

Лекции по Линейной Алгебре

Дима Трушин

2022 — 2023

Содержание

1 Системы линейных уравнений	5
1.1 Системы линейных уравнений и связанная с ними терминология	5
1.2 Матрицы связанные со СЛУ	5
1.3 Элементарные преобразования	6
1.4 Алгоритм Гаусса	6
2 Матрицы	10
2.1 Определение матриц	10
2.2 Операции над матрицами	10
2.3 Специальные виды матриц	11
2.4 Свойства операций	11
2.5 Связь с системами линейных уравнений	12
2.6 Дефекты матричных операций	13
2.7 Деление	13
2.8 Матрицы элементарных преобразований	15
2.9 Невырожденные матрицы	15
2.10 Блочное умножение матриц	17
2.11 Блочные элементарные преобразования	18
2.12 Массовое решение систем	19
2.13 Классификация СЛУ	21
2.14 Полиномиальное исчисление от матриц	24
2.15 Матричные нормы	28
2.16 Обзор применения матричных норм	29
3 Перестановки	31
3.1 Отображения множеств	31
3.2 Перестановки	31
3.3 Операция на перестановках	32
3.4 Переименование элементов	33
3.5 Циклы	33
3.6 Знак перестановки	35
3.7 Подсчет знака	37
3.8 Возведение в степень	38
3.9 Произведение циклов	38
4 Определитель	41
4.1 Философия	41
4.2 Три разных определения	42
4.3 Явные формулы для определителя	43
4.4 Свойства определителя	44
4.5 Полилинейность и кососимметричность определителя	45
4.6 Полилинейные кососимметрические отображения	46
4.7 Мультипликативные отображения	48
4.8 Миноры и алгебраические дополнения	51

4.9	Формулы Крамера	53
4.10	Характеристический многочлен	53
4.11	Теорема Гамильтона-Кэли	56
5	Комплексные числа	58
5.1	Идея	58
5.2	Абстрактное определение комплексных чисел	60
5.3	Две модели комплексных чисел	60
5.4	Простейшие свойства и операции	62
5.5	Геометрическая модель	62
5.6	Основная теорема алгебры	64
5.7	Многочлены	66
6	Векторные пространства	69
6.1	Идея и определение	69
6.2	Подпространства	70
6.3	Линейные комбинации	71
6.4	Базис	72
6.5	Удобный формализм	74
6.6	Размерность	74
6.7	Конкретные векторные пространства	75
6.8	Подпространства в F^n	76
6.9	Ранг	78
6.10	Матричный ранг	78
7	Линейные отображения	82
7.1	Идея и определение	82
7.2	Операции на линейных отображениях	83
7.3	Построение линейных отображений	83
7.4	Линейные отображения и базис	84
7.5	Ядро и образ	86
7.6	Оценки ранга суммы и произведения	87
7.7	Классификация для линейных отображений	88
8	Операции над подпространствами	90
8.1	Сумма и пересечение	90
8.2	Прямые суммы	91
9	Линейные операторы	93
9.1	Определение и базовые свойства	93
9.2	Матрица линейного оператора	94
9.3	Характеристики линейных операторов	94
9.4	Обратимость оператора	96
9.5	Инвариантные подпространства	96
9.6	Собственные векторы и значения	97
9.7	Лемма о стабилизации	99
10	Классификационная задача для линейных операторов	100
10.1	Диагонализуемость линейного оператора	100
10.2	Свойства ограничения оператора	102
10.3	Приведение к верхнетреугольному виду	103
10.4	Идеальный спектр	104
10.5	Обобщение собственных и корневых подпространств	105
10.6	Теоремы о разложении	106
10.7	Геометрический смысл кратности корней минимального и характеристического многочлена	108
10.8	Минимальные инвариантные	108
10.9	Структура векторного пространства с оператором	109

10.10	Отношение равенства по модулю подпространства	110
10.11	Жорданова нормальная форма для нильпотентных операторов	111
10.12	Теорема о жордановой нормальной форме	114
10.13	Классификация для оператора	116
11	Функционалы	118
11.1	Двойственное (сопряженное) пространство	118
11.2	Двойственный базис	119
11.3	Функции на функциях	120
11.4	Сопряженное линейное отображение	121
12	Тензоры	125
12.1	Билинейные отображения	125
12.2	Существование тензорного произведения	128
12.3	Примеры тензорных произведений	130
12.4	Индукцированное линейное отображение	131
12.5	Свертка	133
12.6	Тензоры на пространстве V	134
13	Билинейные формы	137
13.1	Определение и примеры	137
13.2	Матрица билинейной формы	138
13.3	Матричные характеристики билинейной формы	139
13.4	Ортогональные дополнения и ядра	140
13.5	Двойственность для подпространств	141
13.6	Двойственность для линейных отображений и операторов	142
13.7	Классификационная задача для $\text{Bil}(V, U)$	144
13.8	Структура векторного пространства на $\text{Bil}(V, U)$	145
14	Билинейные формы на одном пространстве $\text{Bil}(V)$	146
14.1	Симметричность и кососимметричность	146
14.2	Матрица билинейной формы	146
14.3	Матричные характеристики билинейной формы	146
14.4	Разложение в прямую сумму	148
14.5	Ограничение билинейной формы на подпространство	148
14.6	Диагонализация симметричных форм	150
14.7	Симметричный Гаусс	150
14.8	Метод Якоби	151
14.9	Алгоритм диагонализации на основе метода Якоби	153
14.10	Квадратичные формы	154
14.11	Связь между квадратичными и билинейными формами	155
14.12	Метод Лагранжа	156
14.13	Классификация симметрических билинейных форм над алгебраически замкнутым полем	157
15	Симметричные билинейные формы в вещественном пространстве	158
15.1	Классификация	158
15.2	Геометрический смысл Сигнатуры	158
15.3	Положительная и отрицательная определенность формы над \mathbb{R}	160
15.4	Графики Квадратичных форм	161
15.5	Анализ поверхности	163
16	Евклидовы пространства	164
16.1	Определение и примеры	164
16.2	Ортогональные и ортонормированные базисы	164
16.3	Классификация Евклидовых пространств	166
16.4	Геометрия в Евклидовых пространствах	167
16.5	Проекции	168

16.6	Расстояния и углы	169
16.7	Метод наименьших квадратов	171
16.8	Матрица Грама	172
16.9	Объемы	173
16.10	Ориентированный объем	175
17	Комплексные векторные пространства	177
17.1	Полуторалинейные формы	177
17.2	Сведение к билинейным формам	178
17.3	Квадратичные формы	179
17.4	Эрмитовы и косоэрмитовы формы	180
17.5	Метод Якоби для полуторалинейных форм	183
17.6	Критерий Сильвестра для полуторалинейных форм	184
17.7	Эрмитово векторное пространство	185
17.8	Обзор геометрических понятий в эрмитовом пространстве	187
17.9	Комплексификация	188
17.10	Комплексификация линейных отображений и билинейных форм	189
18	Операторы в Евклидовом и Эрмитовом пространствах	190
18.1	Движения	190
18.2	Классификация движений	191
18.3	Сопряженное линейное отображение	194
18.4	Самосопряженные операторы	195
18.5	Классификация самосопряженных операторов	197
18.6	Билинейные формы и операторы	197
18.7	Классификация линейных отображений	199
18.8	SVD или сингулярное разложение	200
18.9	Ортопроекторы	201
18.10	Задача о низкоранговом приближении	202

1 Системы линейных уравнений

1.1 Системы линейных уравнений и связанная с ними терминология

Наша задача научиться решать Системы Линейных Уравнений (СЛУ), то есть находить все их решения или доказывать, что решений нет. Общий вид СЛУ и ее однородная версия (ОСЛУ):

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\ \dots \\ a_{m1}x_1 + \dots + a_{mn}x_n = b_m \end{cases} \quad \begin{cases} a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n = 0 \\ \dots \\ a_{m1}x_1 + \dots + a_{mn}x_n = 0 \end{cases}$$

Коэффициенты Где живут коэффициенты a_{ij} и b_j ? Варианты:

- Вещественные числа \mathbb{R}
- Комплексные числа \mathbb{C}
- Рациональные числа \mathbb{Q}

Для решения СЛУ **НЕ** имеет значения откуда берутся коэффициенты, так как решения будут лежать там же. Потому мы будем работать с числами из \mathbb{R} .

Решение Решением системы линейных уравнений называется набор чисел (c_1, \dots, c_n) , $c_i \in \mathbb{R}$ такой, что при подстановке c_i вместо x_i , все уравнения системы превращаются в верные равенства. Введем обозначение $\mathbb{R}^n = \mathbb{R} \times \dots \times \mathbb{R} = \{(c_1, \dots, c_n) \mid c_i \in \mathbb{R}\}$. То есть элемент \mathbb{R}^n – это набор из n вещественных чисел. Потому любое решение $c = (c_1, \dots, c_n)$ является элементом \mathbb{R}^n .

1.2 Матрицы связанные со СЛУ

Для каждой СЛУ введем следующие обозначения:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix} \quad x = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \quad (A|b) = \left(\begin{array}{ccc|c} a_{11} & \dots & a_{1n} & b_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} & b_m \end{array} \right)$$

Названия:

- A – матрица системы
- b – вектор правой части
- $(A|b)$ – расширенная матрица системы
- x – вектор решений

Будем кратко записывать СЛУ и ее однородную версию так: $Ax = b$ и $Ax = 0$. Также для краткости будем обозначать системы буквами Σ .

При решении системы линейных уравнений приходится помногу раз переписывать кучу данных, чтобы сократить эти записи целесообразно сократить количество записываемой на бумаге информации. Расширенная матрица системы $(A|b)$ является необходимым минимумом такой информации. Потому сейчас к такой записи можно относиться как к удобному способу компактно записать систему.

Количество решений Случай одного уравнения и одной неизвестной $ax = b$, где $a, b \in \mathbb{R}$:

- При $a \neq 0$ – одно решение $x = b/a$.
- При $a = 0$, $b \neq 0$ – нет решений.
- При $a = 0$, $b = 0$ – любое число является решением, т.е. бесконечное число решений.

Что значит решить систему Решить систему значит описать множество ее решений, то есть либо доказать, что система не имеет решений вовсе, либо описать все наборы, которые являются решениями. Если система не имеет решений, она называется несовместной, в противном случае – совместной.

Эквивалентные системы Пусть даны две системы линейных уравнений с одинаковым числом неизвестных (но быть может разным числом уравнений) Σ_1 и Σ_2 . Будем говорить, что эти системы эквивалентны и писать $\Sigma_1 \sim \Sigma_2$, если множества решений этих систем совпадают. Если $E_i \subseteq \mathbb{R}^n$ – множество решений i -ой системы, то системы эквивалентны, если $E_1 = E_2$.

Вот полезный пример эквивалентных систем:

$$\begin{cases} x + y = 1 \\ x - y = 0 \end{cases} \sim \begin{cases} 2x = 1 \\ 2y = 1 \end{cases}$$

Как решать систему Пусть нам надо решить систему Σ . Идея состоит в том, чтобы постепенно менять ее на эквивалентную до тех пор, пока она не упростится до такого состояния, что все ее решения легко описать.

$$\Sigma = \Sigma_1 \mapsto \Sigma_2 \mapsto \dots \mapsto \Sigma_n \leftarrow \text{легко решается}$$

Теперь надо объяснить две вещи: (1) какого сорта преобразования над системами мы будем делать и (2) к какому замечательному виду мы их приводим и как в нем выглядят все решения. Ответам на эти два вопроса и будет посвящена оставшаяся часть лекции.

1.3 Элементарные преобразования

Мы разделим все преобразования на три типа¹:

$$\begin{aligned} \text{I тип: } & \left(\begin{array}{ccc|c} a_{11} & \dots & a_{1n} & b_1 \\ a_{i1} & \dots & a_{in} & b_i \\ a_{j1} & \dots & a_{jn} & b_j \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} & b_m \end{array} \right) \mapsto \left(\begin{array}{ccc|c} a_{11} & \dots & a_{1n} & b_1 \\ a_{i1} & \dots & a_{in} & b_i \\ a_{j1} + \lambda a_{i1} & \dots & a_{jn} + \lambda a_{in} & b_j + \lambda b_i \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} & b_m \end{array} \right) \quad i \neq j \\ \text{II тип: } & \left(\begin{array}{ccc|c} a_{11} & \dots & a_{1n} & b_1 \\ a_{i1} & \dots & a_{in} & b_i \\ a_{j1} & \dots & a_{jn} & b_j \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} & b_m \end{array} \right) \mapsto \left(\begin{array}{ccc|c} a_{11} & \dots & a_{1n} & b_1 \\ a_{j1} & \dots & a_{jn} & b_j \\ a_{i1} & \dots & a_{in} & b_i \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} & b_m \end{array} \right) \\ \text{III тип: } & \left(\begin{array}{ccc|c} a_{11} & \dots & a_{1n} & b_1 \\ a_{i1} & \dots & a_{in} & b_i \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} & b_m \end{array} \right) \mapsto \left(\begin{array}{ccc|c} a_{11} & \dots & a_{1n} & b_1 \\ \lambda a_{i1} & \dots & \lambda a_{in} & \lambda b_i \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} & b_m \end{array} \right) \quad \lambda \neq 0 \end{aligned}$$

Поясним словами, что делают преобразования:

1. Прибавляем к j -ой строке i -ю, умноженную на константу $\lambda \in \mathbb{R}$.
2. Меняем местами i -ю и j -ю строки.
3. Умножаем i -ю строку на ненулевую константу $\lambda \neq 0$, $\lambda \in \mathbb{R}$.

1.4 Алгоритм Гаусса

Этот метод заключается в приведении СЛУ к некоторому «ступенчатому виду», где множество решений очевидно.² Разберем типичный ход алгоритма Гаусса на примере 3 уравнений и 4 неизвестных.³

¹Стоит отметить, что нумерация типов преобразования не является общепринятой и отличается от учебника к учебнику.

²Данный метод является самым быстрым возможным как для написания программ, так и для ручного вычисления. При вычислениях руками, однако, полезно местами пользоваться «локальными оптимизациями», то есть, если вы видите, что какая-то хитрая комбинация строк сильно упростит вид системы, то сделайте ее.

³При переходе от одной матрицы к другой я новым коэффициентам даю старые имена, чтобы не захламлять текст новыми обозначениями.

Прямой ход алгоритма Гаусса Идея прямого хода алгоритма в следующем. Мы смотрим на левый верхний элемент в матрице и пытаемся с помощью него обнулить все элементы под ним. Как только обнулили, забываем про первую строку и столбец и повторяем процедуру с оставшейся подматрицей.

$$\begin{aligned} & \left(\begin{array}{cccc|c} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & b_2 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & b_3 \end{array} \right) \quad \begin{array}{l} \text{2-я строка} - \frac{a_{21}}{a_{11}} \cdot \text{1-я строка} \\ \text{3-я строка} - \frac{a_{31}}{a_{11}} \cdot \text{1-я строка} \end{array} \\ & \left(\begin{array}{cccc|c} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & b_1 \\ 0 & a_{22} & a_{23} & a_{24} & b_2 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & b_3 \end{array} \right) \\ & \left(\begin{array}{cccc|c} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & b_1 \\ 0 & a_{22} & a_{23} & a_{24} & b_2 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & b_3 \end{array} \right) \quad \begin{array}{l} \text{3-я строка} - \frac{a_{32}}{a_{22}} \cdot \text{2-я строка} \end{array} \\ & \left(\begin{array}{cccc|c} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & b_1 \\ 0 & a_{22} & a_{23} & a_{24} & b_2 \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{34} & b_3 \end{array} \right) \end{aligned}$$

В рассуждениях выше, мы пользовались тем, что угловые элементы a_{11} и a_{22} не нули. Но вообще говоря так могло не получиться. Например на третьем шаге могла быть одна из следующих ситуаций (здесь мы смотрим на элемент a_{22}):

$$\left(\begin{array}{cccc|c} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & b_1 \\ 0 & 0 & a_{23} & a_{24} & b_2 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & b_3 \end{array} \right) \quad \text{или} \quad \left(\begin{array}{cccc|c} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & b_1 \\ 0 & 0 & a_{23} & a_{24} & b_2 \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{34} & b_3 \end{array} \right)$$

В первом случае $a_{22} = 0$, но при этом есть какой-то ненулевой элемент под ним. В такой ситуации надо переставить вторую строчку с другой строкой, где второй элемент не ноль. В примере надо переставить вторую и третью строчку местами. Во втором случае $a_{22} = 0$ и все элементы под ним. В такой ситуации надо пропустить второй столбец и перейти к третьему и мы смотрим на элемент a_{23} . После чего повторяем алгоритм Гаусса с подматрицей.

В результате прямого хода алгоритма из-за обнуления коэффициентов могут возникнуть следующие случаи⁴

$$\left(\begin{array}{cccc|c} \underline{a_{11}} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & b_1 \\ 0 & \underline{a_{22}} & a_{23} & a_{24} & b_2 \\ 0 & 0 & 0 & \underline{a_{34}} & b_3 \end{array} \right) \quad \left(\begin{array}{cccc|c} \underline{a_{11}} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & b_1 \\ 0 & 0 & \underline{a_{23}} & a_{24} & b_2 \\ 0 & 0 & 0 & \underline{a_{34}} & b_3 \end{array} \right) \quad \left(\begin{array}{cccc|c} \underline{a_{11}} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & b_1 \\ 0 & \underline{a_{22}} & a_{23} & a_{24} & b_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{b_3} \end{array} \right) \quad \left(\begin{array}{cccc|c} \underline{a_{11}} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & b_1 \\ 0 & \underline{a_{22}} & a_{23} & a_{24} & b_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

Главные и неглавные переменные Подчеркнутые элементы считаются не равными нулю. Это первые ненулевые коэффициенты в строке, они называются лидерами. В ступенчатом виде все переменные делятся на главные и свободные. Соответствующие лидерам переменные называются главными. Остальные переменные называются свободными.

Обратный ход алгоритма Гаусса Задача обратного хода алгоритма в том, чтобы сделать все лидирующие коэффициенты единицами, а все коэффициенты над ними обнулить. Обратный ход осуществляется снизу вверх. Разберем типичный обратный ход алгоритма Гаусса. Подчеркнутые элементы считаются не равными

⁴Это не полный список всех случаев.

нулю.

$$\begin{aligned}
 & \left(\begin{array}{cccc|c} \underline{a_{11}} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & b_1 \\ 0 & \underline{a_{22}} & a_{23} & a_{24} & b_2 \\ 0 & 0 & \underline{a_{33}} & a_{34} & b_3 \end{array} \right) && \text{разделить } i\text{-ю строку на } a_{ii} \\
 & \left(\begin{array}{cccc|c} 1 & a_{12} & a_{13} & a_{14} & b_1 \\ 0 & 1 & a_{23} & a_{24} & b_2 \\ 0 & 0 & 1 & a_{34} & b_3 \end{array} \right) && \text{2-я строка} - a_{23} \cdot \text{3-я строка} \\
 & \left(\begin{array}{cccc|c} 1 & a_{12} & a_{13} & a_{14} & b_1 \\ 0 & 1 & 0 & a_{24} & b_2 \\ 0 & 0 & 1 & a_{34} & b_3 \end{array} \right) && \text{1-я строка} - a_{13} \cdot \text{3-я строка} \\
 & \left(\begin{array}{cccc|c} 1 & a_{12} & 0 & a_{14} & b_1 \\ 0 & 1 & 0 & a_{24} & b_2 \\ 0 & 0 & 1 & a_{34} & b_3 \end{array} \right) && \text{1-я строка} - a_{12} \cdot \text{2-я строка} \\
 & \left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 0 & a_{14} & b_1 \\ 0 & 1 & 0 & a_{24} & b_2 \\ 0 & 0 & 1 & a_{34} & b_3 \end{array} \right)
 \end{aligned}$$

В специальных случаях приведенных выше, получим

$$\left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & a_{13} & 0 & b_1 \\ 0 & 1 & a_{23} & 0 & b_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & b_3 \end{array} \right) \quad \left(\begin{array}{cccc|c} 1 & a_{12} & 0 & 0 & b_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & b_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & b_3 \end{array} \right) \quad \left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & a_{13} & a_{14} & 0 \\ 0 & 1 & a_{23} & a_{24} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \quad \left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & a_{13} & a_{14} & b_1 \\ 0 & 1 & a_{23} & a_{24} & b_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

Полученный в результате обратного хода вид расширенной матрицы называется улучшенным ступенчатым видом, т.е., это ступенчатый вид, где все лидирующие коэффициенты – единицы, и все коэффициенты над ними равны нулю.

Удобный формализм Пока мы подробно не говорили о матрицах, введем некие удобные обозначения, которые упростят запись решений СЛУ.

$$a = \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n \text{ и } b = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n. \text{ Тогда } a + b = \begin{pmatrix} a_1 + b_1 \\ \vdots \\ a_n + b_n \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n \text{ и } \lambda a = \begin{pmatrix} \lambda a_1 \\ \vdots \\ \lambda a_n \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n \text{ для любого } \lambda \in \mathbb{R}.$$

Получение решений В системе ниже, выберем переменную x_4 как параметр

$$\left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 0 & a_{14} & b_1 \\ 0 & 1 & 0 & a_{24} & b_2 \\ 0 & 0 & 1 & a_{34} & b_3 \end{array} \right)$$

Тогда решения имеют вид⁵

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} - x_4 \begin{pmatrix} a_{14} \\ a_{24} \\ a_{34} \end{pmatrix}$$

⁵Операция умножения матрицы на число покомпонентная (умножаем каждый элемент на число). Сумма и разность двух матриц покомпонентная (складываем или вычитаем числа на одних и тех же позициях).

Специальные случаи:

$$\begin{array}{l}
 \left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & a_{13} & 0 & b_1 \\ 0 & 1 & a_{23} & 0 & b_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & b_3 \end{array} \right) \text{ Решения: } \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} - x_3 \begin{pmatrix} a_{13} \\ a_{23} \\ 0 \end{pmatrix} \\
 \left(\begin{array}{cccc|c} 1 & a_{12} & 0 & 0 & b_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & b_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & b_3 \end{array} \right) \text{ Решения: } \begin{pmatrix} x_1 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} - x_2 \begin{pmatrix} a_{12} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\
 \left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & a_{13} & a_{14} & 0 \\ 0 & 1 & a_{23} & a_{24} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \text{ Решения: Нет решений, т.к. последнее уравнение } 0 = 1 \\
 \left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & a_{13} & a_{14} & b_1 \\ 0 & 1 & a_{23} & a_{24} & b_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right) \text{ Решения: } \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} - x_3 \begin{pmatrix} a_{13} \\ a_{23} \end{pmatrix} - x_4 \begin{pmatrix} a_{14} \\ a_{24} \end{pmatrix}
 \end{array}$$

Количество решений в ступенчатом виде Если во время прямого хода алгоритма Гаусса в расширенной матрице системы вам встретилась строка вида $(0 \dots 0 \mid b)$, где b – произвольное ненулевое число, то данная система решений не имеет. В этом случае нет необходимости переходить к обратному ходу. Если же таких строк не встретилось, то система обязательно имеет решения. При этом, если есть свободные переменные, то решений бесконечное число, а если их нет, то решение единственное.

Технические рекомендации Работая с целочисленными матрицами, старайтесь во время прямого хода алгоритма Гаусса не выходить за рамки целых чисел.

- Используйте элементарные преобразования I типа только с целым параметром.
- Полезно не злоупотреблять умножением на ненулевое целое, умножайте только на ± 1 . Иначе придется работать с большими числами.

На этапе обратного хода алгоритма Гаусса избавиться от деления уже не возможно.

2 Матрицы

2.1 Определение матриц

Матрица – это прямоугольная таблица чисел

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}, \text{ где } a_{ij} \in \mathbb{R}$$

Множество всех матриц с m строками и n столбцами обозначается $M_{m \times n}(\mathbb{R})$. Множество квадратных матриц размера n будем обозначать $M_n(\mathbb{R})$. Матрицы с одним столбцом или одной строкой называются векторами (вектор-столбцами и вектор-строками соответственно). Множество всех векторов с n координатами обозначается через \mathbb{R}^n . Мы по умолчанию считаем, что наши вектора – вектор-столбцы.⁶

2.2 Операции над матрицами

Сложение Пусть $A, B \in M_{m \times n}(\mathbb{R})$. Тогда сумма $A + B$ определяется покомпонентно, т.е. $C = A + B$, то $c_{ij} = a_{ij} + b_{ij}$ или

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} & \dots & b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & \dots & b_{mn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} + b_{11} & \dots & a_{1n} + b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} + b_{m1} & \dots & a_{mn} + b_{mn} \end{pmatrix}$$

Складывать можно только матрицы одинакового размера.⁷

Умножение на скаляр Если $\lambda \in \mathbb{R}$ и $A \in M_{m \times n}(\mathbb{R})$, то λA определяется так: $\lambda A = C$, где $c_{ij} = \lambda a_{ij}$ или

$$\lambda \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda a_{11} & \dots & \lambda a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda a_{m1} & \dots & \lambda a_{mn} \end{pmatrix}$$

Умножение матриц Пусть $A \in M_{m \times n}(\mathbb{R})$ и $B \in M_{n \times k}(\mathbb{R})$, то произведение $AB \in M_{m \times k}(\mathbb{R})$ определяется так: $AB = C$, где $c_{ij} = \sum_{t=1}^n a_{it}b_{tj}$ или

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_{11} & \dots & b_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & \dots & b_{nk} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{t=1}^n a_{1t}b_{t1} & \dots & \sum_{t=1}^n a_{1t}b_{tk} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{t=1}^n a_{mt}b_{t1} & \dots & \sum_{t=1}^n a_{mt}b_{tk} \end{pmatrix}$$

На умножение матриц можно смотреть следующим образом. Чтобы получить коэффициент c_{ij} надо, из матрицы A взять i -ю строку (она имеет длину n), а из матрицы B взять j -ый столбец (он тоже имеет длину n). Тогда их надо скалярно перемножить и результат подставить в c_{ij} .

Транспонирование Пусть A – матрица вида

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \text{ или } \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{pmatrix} \text{ или } \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}$$

Определим транспонированную матрицу $A^t = (a'_{ij})$ так: $a'_{ij} = a_{ji}$. Наглядно, транспонированная матрица для приведенных выше

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{m1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1n} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \text{ или } \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} \\ a_{12} & a_{22} \\ a_{13} & a_{23} \end{pmatrix} \text{ или } (x_1 \ x_2 \ x_3)$$

⁶Важно, directX и OpenGL используют вектор-строки! Потому часть инженерной литературы на английском связанной с трехмерной графикой оперирует со строками. Это важно учитывать, так как нужно вносить поправки в соответствующие формулы.

⁷Можно по аналогии определить и вычитание матриц, но в этом нет необходимости. Например, потому что вычитание можно определить как $A + (-1)B$, где $(-1)B$ – умножение на скаляр. Либо можно определить аксиоматически, как это сделано ниже в следующем разделе.

След матрицы Пусть $A \in M_n(\mathbb{R})$, тогда определим след матрицы A , как сумму ее диагональных элементов: $\text{tr } A = \sum_{i=1}^n a_{ii}$. Давайте отметим следующие свойства следа:

1. Для любых матриц $A, B \in M_n(\mathbb{R})$ верно $\text{tr}(A + B) = \text{tr}(A) + \text{tr}(B)$.
2. Для любой матрицы $A \in M_n(\mathbb{R})$ и $\lambda \in \mathbb{R}$ выполнено $\text{tr}(\lambda A) = \lambda \text{tr}(A)$.
3. Для любых матриц $A \in M_{m \times n}(\mathbb{R})$ и $B \in M_{n \times m}(\mathbb{R})$ выполнено $\text{tr}(AB) = \text{tr}(BA)$.

Все эти свойства проверяются непосредственным вычислением по определению.

2.3 Специальные виды матриц

Ниже мы перечислим названия некоторых специальных классов матриц:

- $A = \begin{pmatrix} \lambda_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda_n \end{pmatrix}$ – диагональная матрица. Все ненулевые элементы стоят на главной диагонали, то есть в позиции, где номер строки равен номеру столбца.
- $A = \begin{pmatrix} \lambda & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda \end{pmatrix}$ – скалярная матрица. Диагональная матрица с одинаковыми элементами на диагонали.

2.4 Свойства операций

Все операции на матрицах обладают «естественными свойствами» и согласованы друг с другом. Вот перечень базовых свойств операций над матрицами:⁸

1. **Ассоциативность сложения** $(A + B) + C = A + (B + C)$ для любых $A, B, C \in M_{m \times n}(\mathbb{R})$
2. **Существование нейтрального элемента для сложения** Существует единственная матрица 0 обладающая следующим свойством $A + 0 = 0 + A = A$ для всех $A \in M_{m \times n}(\mathbb{R})$. Такая матрица целиком заполнена нулями.
3. **Коммутативность сложения** $A + B = B + A$ для любых $A, B \in M_{m \times n}(\mathbb{R})$.
4. **Наличие обратного по сложению** Для любой матрицы $A \in M_{m \times n}(\mathbb{R})$ существует матрица $-A$ такая, что $A + (-A) = (-A) + A = 0$. Такая матрица единственная и состоит из элементов $-a_{ij}$.
5. **Ассоциативность умножения** Для любых матриц $A \in M_{m \times n}(\mathbb{R})$, $B \in M_{n \times k}(\mathbb{R})$ и $C \in M_{k \times t}(\mathbb{R})$ верно $(AB)C = A(BC)$.
6. **Существование нейтрального элемента для умножения** Для каждого k существует единственная матрица $E \in M_k(\mathbb{R})$ такая, что для любой $A \in M_{m \times n}(\mathbb{R})$ верно $EA = AE = A$. У такой матрицы $E_{ii} = 1$, а $E_{ij} = 0$. Когда нет путаницы, матрицу E обозначают через 1 .
7. **Дистрибутивность умножения относительно сложения** Для любых матриц $A, B \in M_{m \times n}(\mathbb{R})$ и $C \in M_{n \times k}(\mathbb{R})$ верно $(A + B)C = AC + BC$. Аналогично, для любых $A \in M_{m \times n}(\mathbb{R})$ и $B, C \in M_{n \times k}(\mathbb{R})$ верно $A(B + C) = AB + AC$.
8. **Умножение на числа ассоциативно** Для любых $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$ и любой матрицы $A \in M_{m \times n}(\mathbb{R})$ верно $\lambda(\mu A) = (\lambda\mu)A$. Аналогично для любого $\lambda \in \mathbb{R}$ и любых $A \in M_{m \times n}(\mathbb{R})$ и $B \in M_{n \times k}(\mathbb{R})$ верно $\lambda(AB) = (\lambda A)B$.
9. **Умножение на числа дистрибутивно относительно сложения матриц и сложения чисел** Для любых $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$ и $A \in M_{m \times n}(\mathbb{R})$ верно $(\lambda + \mu)A = \lambda A + \mu A$. Аналогично, для любого $\lambda \in \mathbb{R}$ и $A, B \in M_{m \times n}(\mathbb{R})$ верно $\lambda(A + B) = \lambda A + \lambda B$.

⁸Все эти свойства объединяет то, что они являются аксиомами в различных определениях для алгебраических структур. Позже мы столкнемся с такими структурами.

10. **Умножение на скаляр нетривиально** Если $1 \in \mathbb{R}$, то для любой матрицы $A \in M_{mn}(\mathbb{R})$ верно $1A = A$.
11. **Умножение на скаляр согласовано с умножением матриц** Для любого $\lambda \in \mathbb{R}$ и любых $A \in M_{mn}(\mathbb{R})$ и $B \in M_{nk}(\mathbb{R})$ верно $\lambda(AB) = (\lambda A)B = A(\lambda B)$.
12. **Транспонирование согласовано с суммой** Для любых матриц $A, B \in M_{mn}(\mathbb{R})$ верно $(A + B)^t = A^t + B^t$.
13. **Транспонирование согласовано с умножением на скаляр** Для любой матрицы $A \in M_{mn}(\mathbb{R})$ и любого $\lambda \in \mathbb{R}$ верно $(\lambda A)^t = \lambda A^t$.
14. **Транспонирование согласовано с умножением** Для любых матриц $A, B \in M_{mn}(\mathbb{R})$ верно $(AB)^t = B^t A^t$.

К этим свойствам надо относиться так. Доказывая что-то про матрицы, можно лезть внутрь определений операций над ними, а можно пользоваться свойствами операций. Так вот, список выше – это минимальный набор свойств операций, из которых можно вытащить базовую информацию про эти операции и при этом не лезть внутрь определений.

Нулевые строки и столбцы Пусть в матрице $A \in M_{mk}(\mathbb{R})$ i -я строка полностью состоит из нулей и нам дана матрица $B \in M_{kn}(\mathbb{R})$. Тогда в произведении AB i -я строка тоже будет нулевой. Изобразим это ниже графически

$$AB = \begin{pmatrix} * & * & \dots & * \\ * & * & \dots & * \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ * & * & \dots & * \end{pmatrix} \begin{pmatrix} * & * & \dots & * \\ * & * & \dots & * \\ * & * & \dots & * \\ * & * & \dots & * \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} * & * & \dots & * \\ * & * & \dots & * \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ * & * & \dots & * \end{pmatrix}$$

Действительно, i -я строка произведения зависит от i -ой строки левого множителя (матрицы A) и всех столбцов B . Но умножая нулевую строку A на что угодно, получим нули в i -ой строке результата. Аналогичное утверждение верно для столбцов в матрице B , а именно. Пусть в матрице $B \in M_{kn}(\mathbb{R})$ i -ый столбец полностью состоит из нулей и нам дана матрица $A \in M_{mk}(\mathbb{R})$. Тогда в произведении AB i -ый столбец тоже будет нулевой.

$$AB = \begin{pmatrix} * & * & * & * \\ * & * & * & * \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ * & * & * & * \end{pmatrix} \begin{pmatrix} * & * & 0 & * \\ * & * & 0 & * \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ * & * & 0 & * \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} * & * & 0 & * \\ * & * & 0 & * \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ * & * & 0 & * \end{pmatrix}$$

2.5 Связь с системами линейных уравнений

Пусть нам дана система линейных уравнений соответствующая матрицам

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix} \quad x = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \quad (A|b) = \left(\begin{array}{ccc|c} a_{11} & \dots & a_{1n} & b_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} & b_m \end{array} \right)$$

Мы кратко записывали такую систему $Ax = b$, а ее однородную версию через $Ax = 0$. Но теперь, когда мы знаем умножение матриц, видно, что Ax – это произведение матрицы A , на вектор неизвестных x .

Главный бонус от матриц и операций над ними заключается вот в чем. У нас исходно была большая и неуклюжая система линейных уравнений, в которой участвовали очень знакомые и простые для использования числа. Теперь же мы заменили много линейных уравнений с кучей неизвестных на одно линейное матричное уравнение $Ax = b$. Однако, теперь вместо приятных в использовании чисел у нас встретились более сложные объекты – матрицы. Потому к матрицам надо относиться как к более продвинутой версии чисел.

Линейная структура Пусть у нас дана система $Ax = b$ как выше. Тогда $y \in \mathbb{R}^n$ является решением этой системы, если выполнено матричное равенство $Ay = b$. Аналогично и для однородной системы. Теперь заметим следующее:

1. Если $y_1, y_2 \in \mathbb{R}^n$ – решения системы $Ax = 0$, то $y_1 + y_2$ тоже является решением системы $Ax = 0$. Действительно, надо показать, что $A(y_1 + y_2) = 0$. Но $A(y_1 + y_2) = Ay_1 + Ay_2 = 0 + 0 = 0$.

2. Если $y \in \mathbb{R}^n$ – решение системы $Ax = 0$ и $\lambda \in \mathbb{R}$, то λy – тоже решение $Ax = 0$. Действительно, $A(\lambda y) = \lambda Ay = 0$.

Теперь сравним решения систем $Ax = b$ и $Ax = 0$. Прежде всего заметим, что однородная система всегда имеет решение $x = 0$. И вообще говоря, может так оказаться, что $Ax = b$ не имеет решений. Например, $(A|b) = (0|1)$. Однако, если $Ax = b$ совместна, то обе системы имеют «одинаковое число» решений.

Утверждение. Пусть система $Ax = b$ имеет хотя бы одно решение $z \in \mathbb{R}^n$ и пусть $E_b \subseteq \mathbb{R}^n$ – множество решений $Ax = b$ и $E_0 \subseteq \mathbb{R}^n$ – множество решений $Ax = 0$. Тогда $E_b = z + E_0 = \{z + y \mid y \in E_0\}$.

Доказательство. Для доказательства $z + E_0 \subseteq E_b$ надо заметить, что если $y \in E_0$, то $z + y \in E_b$. Для обратного включения проверяется, что если $z' \in E_b$, то $z' - z \in E_0$. \square

2.6 Дефекты матричных операций

Матрицы как новые числа Рассмотрим множество квадратных матриц с введенными выше операциями: $(M_n(\mathbb{R}), +, -, \cdot, ^t)$. Про это множество стоит думать как про новый вид чисел со своими операциями. Принципиальное отличие – нельзя делить на любую ненулевую матрицу, как это можно было делать с числами. Однако, это не единственное отличие.

Аномалии матричных операций Матричные операции обладают несколькими аномалиями по сравнению со свойствами операций над обычными числами.

1. Существование вычитания следует из «хорошести» операции сложения. Она позволяет определить вычитание без проблем. Однако, операция умножения уже хуже, чем на обычных числах, потому не получится определить на матрицах операцию деления.
2. Умножение матриц НЕ коммутативно. Действительно

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{но} \quad \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

3. В матрицах есть «делители нуля», т.е. существуют две ненулевые матрицы A и B такие, что $AB = 0$.⁹
Пример:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = 0$$

4. В матрицах есть «нильпотенты», то есть можно найти такую ненулевую матрицу A , что $A^n = 0$. Пример,

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = 0$$

2.7 Деление

Что значит деление в числах? Предположим, что у нас есть два числа $a, b \in \mathbb{R}$. Тогда деление $a/b = a \cdot b^{-1}$ – это просто умножение на обратный элемент, а обратный элемент b^{-1} определяется свойством $bb^{-1} = 1$. Данное наблюдение дает ключ к распространению деления и обращения на случай матриц. А именно, вместо деления, мы будем рассматривать обратные матрицы и умножение на них. Вот неочевидное преимущество такого подхода. Из-за некоммутативности матричного умножения, нам пришлось бы вводить два вида деления: левое и правое. А значит, пришлось бы изучать свойства двух операций и их согласованность. Вместо этого, намного проще изучать обратные матрицы и умножать на них слева и справа с помощью обычного умножения.

Односторонняя обратимость Пусть $A \in M_{m \times n}(\mathbb{R})$, будем говорить, что $B \in M_{n \times m}(\mathbb{R})$ является левым обратным к A , если $BA = E \in M_n(\mathbb{R})$. Аналогично, $B \in M_{n \times m}(\mathbb{R})$ – правый обратный к A , если $AB = E \in M_m(\mathbb{R})$. Надо иметь в виду, что вообще говоря левые и правые обратные между собой никак не связаны и их может быть много. Например, пусть $A = (1, 0) \in M_{1 \times 2}(\mathbb{R})$. Тогда у такой матрицы нет левого обратного, а любая матрица вида $(1, a)^t$ является правым обратным. Если для матрицы A существует левый обратный, то она называется обратимой слева. Аналогично, при существовании правого обратного – обратимой справа.

⁹На самом деле, это очень «хорошая» аномалия, так как она связана с тем, что ОСЛУ имеют решения. Действительно, вопрос решения ОСЛУ $Ax = 0$ – это в точности вопрос существования правых делителей нуля для A в множестве \mathbb{R}^n .

Обратимые матрицы Матрица $A \in M_{m,n}(\mathbb{R})$ называется обратимой, если к ней существует левый и правый обратный.¹⁰

Утверждение 1. Пусть матрица $A \in M_{m,n}(\mathbb{R})$ обратима. Тогда

1. Левый обратный и правый обратный единственны и совпадают друг с другом.
2. Матрица A обязательно квадратная, то есть $m = n$.

Доказательство. (1) Пусть $L \in M_{n,m}(\mathbb{R})$ – произвольный левый обратный к A , а $R \in M_{n,m}(\mathbb{R})$ – произвольный правый обратный. Тогда рассмотрим выражение LAR , расставляя по разному скобки имеем:

$$R = ER = (LA)R = L(AR) = LE = L$$

Теперь, если L и L' – два разных левых обратных. Зафиксируем произвольный правый обратный R . Из выше сказанного следует, что $L = R$ и $L' = R$. Значит все левые обратные равны между собой. Аналогично для правых.

(2) Теперь покажем, что двусторонний обратный есть только у квадратных матриц. Пусть $B \in M_{n,m}(\mathbb{R})$ – двусторонний обратный к A , то есть $AB = E_m \in M_m(\mathbb{R})$ и $BA = E_n \in M_n(\mathbb{R})$.¹¹ Тогда по свойствам следа получим

$$m = \text{tr}(E_m) = \text{tr}(AB) = \text{tr}(BA) = \text{tr}(E_n) = n$$

□

Значит, если матрица A обратима, то она как минимум квадратная и существует единственная матрица B , удовлетворяющая свойствам $AB = BA = E$. Такую матрицу B обозначают A^{-1} и называют обратной к матрице A .

Утверждение 2. Пусть $A, B \in M_n(\mathbb{R})$ – обратимые матрицы. Тогда

1. AB тоже обратима и при этом $(AB)^{-1} = B^{-1}A^{-1}$.
2. A^t также будет обратима и $(A^t)^{-1} = (A^{-1})^t$ и обозначается A^{-t} .

Доказательство. 1) Действительно, надо проверить, что для AB существует двусторонняя обратная. Заметим, что $B^{-1}A^{-1}$ является таковой:

$$ABB^{-1}A^{-1} = E \quad \text{и} \quad B^{-1}A^{-1}AB = E$$

В частности, последнее означает, что $(AB)^{-1} = B^{-1}A^{-1}$.

2) Пусть матрица A обратима, тогда

$$AA^{-1} = E \quad \text{и} \quad A^{-1}A = E$$

Транспонируем оба равенства, получим

$$(A^{-1})^t A^t = E \quad \text{и} \quad A^t (A^{-1})^t = E$$

Это означает, что A^t обратима и при этом $(A^t)^{-1} = (A^{-1})^t$.

□

Обратимые преобразования над СЛУ Пусть у нас есть $A \in M_{m,n}(\mathbb{R})$ и $b \in \mathbb{R}^m$, которые задают систему линейных уравнений $Ax = b$, где $x \in \mathbb{R}^n$. Возьмем произвольную обратимую матрицу $C \in M_m(\mathbb{R})$. Тогда система $Ax = b$ эквивалентна системе $C Ax = Cb$. Действительно, если для некоторого $y \in \mathbb{R}^n$ имеем $Ay = b$, то, умножая обе части на C слева, получим $C Ay = Cb$, значит y решение второй системы. Наоборот, пусть $C Ay = Cb$, тогда, умножая обе части на C^{-1} слева, получим $Ay = b$, значит y решение первой системы.

Сказанное выше значит, что мы можем менять СЛУ на эквивалентные с помощью умножения слева на любую обратимую матрицу. Мы уже знаем, что есть другая процедура преобразования СЛУ с таким же свойством – применение элементарных преобразований. Возникает резонный вопрос: какая процедура лучше? Оказывается, что между ними нет разницы в том смысле, что умножение на обратимую матрицу всегда совпадает с некоторой последовательностью элементарных преобразований и наоборот любое элементарное преобразование можно выразить с помощью умножения на обратимую матрицу. Этому свойству и будет посвящен остаток лекции.

¹⁰Ниже мы покажем, что из двусторонней обратимости следует, что матрица A обязана быть квадратной.

¹¹Тут E_n означает единичную матрицу размера n .

2.8 Матрицы элементарных преобразований

Тип I Пусть $S_{ij}(\lambda) \in M_n(\mathbb{R})$ – матрица, полученная из единичной вписыванием в ячейку i, j числа λ (при этом $i \neq j$, то есть ячейка берется не на диагонали). Эта матрица имеет следующий вид:

$$i \quad \begin{matrix} & & j & \\ \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & \lambda & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Тогда прямая проверка показывает, умножение $A \in M_{nm}(\mathbb{R})$ на $S_{ij}(\lambda)$ слева прибавляет j строку умноженную на λ к i строке матрицы A , а умножение $B \in M_{mn}(\mathbb{R})$ на $S_{ij}(\lambda)$ справа прибавляет i столбец умноженный на λ к j столбцу матрицы B . Заметим, что $S_{ij}(\lambda)^{-1} = S_{ij}(-\lambda)$.

Тип II Пусть $T_{ij} \in M_n(\mathbb{R})$ – матрица, полученная из единичной перестановкой i и j ($i \neq j$) столбцов (или что то же самое – строк). Эта матрица имеет следующий вид

$$\begin{matrix} & i & & j \\ i & \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & 0 & & 1 \\ & & \ddots & \\ j & 1 & & 0 \\ & & & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Тогда прямая проверка показывает, умножение $A \in M_{nm}(\mathbb{R})$ на T_{ij} слева переставляет i и j строки матрицы A , а умножение $B \in M_{mn}(\mathbb{R})$ на T_{ij} справа переставляет i и j столбцы матрицы B . Заметим, что $T_{ij}^{-1} = T_{ij}$.

Тип III Пусть $D_i(\lambda) \in M_n(\mathbb{R})$ – матрица, полученная из единичной умножением i строки на $\lambda \in \mathbb{R} \setminus 0$ (или что то же самое – столбца). Эта матрица имеет следующий вид

$$i \quad \begin{matrix} & & i & \\ \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & \lambda & \\ & & & \ddots \\ & & & & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Тогда прямая проверка показывает, умножение $A \in M_{nm}(\mathbb{R})$ на $D_i(\lambda)$ слева умножает i строку A на λ , а умножение $B \in M_{mn}(\mathbb{R})$ на $D_i(\lambda)$ справа умножает i столбец матрицы B на λ . Заметим, что $D_i(\lambda)^{-1} = D_i(\lambda^{-1})$.

2.9 Невырожденные матрицы

Начнем с полезного утверждения.

Утверждение 3. Пусть $A \in M_n(\mathbb{R})$ – произвольная квадратная матрица. Тогда следующие условия эквивалентны:

1. Система $Ax = 0$ имеет только нулевое решение.
2. Система $A^t y = 0$ имеет только нулевое решение.
3. Матрица A представляется в виде $A = U_1 \cdot \dots \cdot U_k$, где U_i – матрицы элементарных преобразований.
4. Матрица A обратима.
5. Матрица A обратима слева, т.е. существует L такая, что $LA = E$.

6. Матрица A обратима справа, т.е. существует R такая, что $AR = E$.

Доказательство Утверждения 3. (1) \Rightarrow (3). Приведем A к улучшенному ступенчатому виду с помощью Гаусса. Так как $Ax = 0$ имеет только нулевое решение, то ступенчатый вид – это единичная матрица E . Пусть S_1, \dots, S_k – матрицы элементарных преобразований, которые мы совершили во время Гаусса. Это значит, что мы произвели следующие манипуляции

$$A \mapsto S_1 A \mapsto S_2 S_1 A \mapsto \dots \mapsto (S_k \dots S_1 A) = E$$

То есть $A = S_1^{-1} \dots S_k^{-1}$. Заметим, что S_i^{-1} – это матрица обратного элементарного преобразования к S_i . Обозначим $U_i = S_i^{-1}$ и получим требуемое.

(2) \Rightarrow (3). Проведем предыдущее рассуждение для матрицы A^t вместо A . Получим, что $A^t = U_1 \dots U_k$. Тогда $A = U_k^t \dots U_1^t$. Теперь осталось заметить, что U_i^t тоже является матрицей элементарного преобразования.

(3) \Rightarrow (4). Мы имеем $A = U_1 \dots U_k$, причем каждая из U_i обратима. Так как произведение обратимых обратима, то A также обратима.

(4) \Rightarrow (5) и (4) \Rightarrow (6) очевидно, так это переход от более сильного условия к более слабому.

(5) \Rightarrow (1). Пусть A обратима слева и нам надо решить систему $Ax = 0$. Умножим ее слева на левый обратный к A , получим $x = 0$, что и требовалось.

(6) \Rightarrow (2). Пусть A обратима справа и нам надо решить систему $A^t y = 0$. Умножим эту систему слева на R^t , где R – правый обратный к A . Тогда $R^t A^t x = 0$. Но $R^t A^t x = (AR)^t x = Ex = x = 0$, что и требовалось. \square

В силу этого утверждения, мы не будем различать невырожденные и обратимые матрицы между собой.

Определение 4. Пусть $A \in M_n(\mathbb{R})$ – произвольная квадратная матрица. Будем говорить, что A невырождена¹², если удовлетворяет любому из перечисленных в предыдущем утверждении условий.

Делители нуля Пусть $A \in M_n(\mathbb{R})$ – некоторая ненулевая матрица и пусть $B \in M_{nm}(\mathbb{R})$. Матрица B называется правым делителем нуля для A , если $AB = 0$. Условие (1) предыдущего утверждения эквивалентно отсутствию правых делителей нуля. Условие (1) не сильнее, значит надо показать, что оно влечет отсутствие делителей нуля. Если B – правый делитель нуля для A , то любой столбец b матрицы B удовлетворяет условию $Ab = 0$, а значит нулевой.

Аналогично определяются левые делители нуля для A и показывается, что их отсутствие равносильно условию (2) предыдущего результата.

Элементарные преобразования и обратимость Пусть $A \in M_{mn}(\mathbb{R})$ и $b \in \mathbb{R}^m$. Тогда у нас есть две процедуры преобразования СЛУ $Ax = b$:

1. Применение элементарных преобразований к строкам системы.
2. Умножение обеих частей равенства на обратимую матрицу: $Ax = b$ меняем на $CAx = Cb$, где $C \in M_n(\mathbb{R})$ – обратимая.

Так как любое элементарное преобразование сводится к умножению слева на обратимую матрицу, то мы видим, что первый вид модификации систем является частным случаем второго. В обратную сторону, из доказанного утверждения следует, что любая обратимая матрица может быть расписана как произведение матриц элементарных преобразований. Значит, умножить на обратимую матрицу слева – это все равно что сделать последовательность элементарных преобразований.

Главный плюс элементарных преобразований – у них простые матрицы, а минус – их нужно много, очень много, чтобы преобразовать одну систему в другую. С обратимыми матрицами все наоборот: сами матрицы устроены непонятно как, но зато нужно всего одно умножение матриц, чтобы перевести систему из одной в другую. Именно на это надо обращать внимание при выборе подхода по преобразованию систем.

¹²Классически невырожденные матрицы определяются совсем по-другому, однако, все эти определения между собой эквивалентны. Будьте готовы к тому, что в литературе вы увидите совсем другое определение.

Насыщенность обратимых Я хочу продемонстрировать еще одно полезное следствие из Утверждения 3. Предположим у нас есть две матрицы $A, B \in M_n(\mathbb{R})$. Тогда AB обратима тогда и только тогда, когда A и B обратимы. Действительно, справа налево мы уже знаем, обратимость обеих матриц A и B влечет обратимость произведения, мы даже знаем, что при этом $(AB)^{-1} = B^{-1}A^{-1}$. Надо лишь показать в обратную сторону. Предположим, что AB обратима, это значит, что для некоторой матрицы $D \in M_n(\mathbb{R})$ выполнено

$$ABD = E \quad \text{и} \quad DAB = E$$

Тогда первое равенство говорит, что BD является правым обратным к A . А в силу эквивалентности пунктов (4) и (6) Утверждения 3 это означает, что A обратима. Аналогично, DA является левым обратным к B и в силу эквивалентности пунктов (4) и (5) Утверждения 3, матрица B обратима. Так что произведение матриц обратимо тогда и только тогда, когда каждый сомножитель обратим.

2.10 Блочное умножение матриц

Формулы блочного умножения Пусть даны две матрицы, которые разбиты на блоки как показано ниже:

$$\begin{matrix} & \begin{matrix} k & s \end{matrix} \\ \begin{matrix} m \\ n \end{matrix} & \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \end{matrix} \quad \begin{matrix} & \begin{matrix} u & v \end{matrix} \\ \begin{matrix} k \\ s \end{matrix} & \begin{pmatrix} X & Y \\ W & Z \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Числа m, n, k, s, u, v – размеры соответствующих блоков. Наша цель понять, что эти матрицы можно перемножать блочно. А именно, увидеть, что результат умножения этих матриц имеет вид

$$\begin{matrix} & \begin{matrix} u & v \end{matrix} \\ \begin{matrix} m \\ n \end{matrix} & \begin{pmatrix} AX + BW & AY + BZ \\ CX + DW & CY + DZ \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Делается это таким трюком. В начале заметим, что

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & B \\ 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ C & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & D \end{pmatrix}$$

После чего методом «пристального взгляда» перемножаем матрицы с большим количеством нулей (попробуйте проделать это!).

На этот факт можно смотреть вот как. Матрица – это прямоугольная таблица заполненная числами. А можно составлять прямоугольные таблицы заполненные другими объектами, например матрицами. Тогда они складываются и перемножаются так же как и обычные матрицы из чисел. Единственное надо учесть, что в блочном умножении есть разница между $AX + BW$ и $XA + BW$, так как A, B, X и W не числа, а матрицы, то их нельзя переставлять местами, порядок теперь важен.

Вот полезный пример. Пусть дана матрица из $M_{n+1}(\mathbb{R})$ вида

$$\begin{pmatrix} A & v \\ 0 & \lambda \end{pmatrix}, \quad \text{где } A \in M_n(\mathbb{R}), \quad v \in \mathbb{R}^n, \quad \lambda \in \mathbb{R}$$

Тогда

$$\begin{pmatrix} A & v \\ 0 & \lambda \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & v \\ 0 & \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A^2 & Av + v\lambda \\ 0 & \lambda^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A^2 & Av + \lambda v \\ 0 & \lambda^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A^2 & (A + \lambda E)v \\ 0 & \lambda^2 \end{pmatrix}$$

Предпоследнее равенство верно, так как не важно с какой стороны умножать v на скаляр λ .

Вот еще один полезный пример блочного умножения. Пусть $x_1, \dots, x_m \in \mathbb{R}^n$ и $y_1, \dots, y_m \in \mathbb{R}^n$ – столбцы. Составим из этих столбцов матрицы $X = (x_1 | \dots | x_m)$ и $Y = (y_1 | \dots | y_m)$.¹³ Заметим, что $X, Y \in M_{n \times m}(\mathbb{R})$. Тогда

$$XY^t = (x_1 | \dots | x_m)(y_1 | \dots | y_m)^t = \sum_{i=1}^m x_i y_i^t$$

¹³ Данная запись означает, что мы берем столбцы x_i и записываем их подряд в одну большую таблицу.

2.11 Блочные элементарные преобразования

Преобразования первого типа Пусть у нас дана матрица

$$\begin{matrix} & k & s \\ m & \begin{pmatrix} A & B \end{pmatrix} \\ n & \begin{pmatrix} C & D \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Я хочу взять первую «строку» из матриц (A, B) умножить ее на некую матрицу R слева и прибавить результат к «строке» (C, D) . Для этого матрица R должна иметь n строк и m столбцов. То есть процедура будет выглядеть следующим образом

$$\begin{matrix} & k & s \\ m & \begin{pmatrix} A & B \end{pmatrix} \\ n & \begin{pmatrix} C & D \end{pmatrix} \end{matrix} \mapsto \begin{matrix} & k & s \\ m & \begin{pmatrix} A & B \end{pmatrix} \\ n & \begin{pmatrix} C + RA & D + RB \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Оказывается, что такая процедура является умножением на обратимую матрицу слева, а именно

$$\begin{matrix} m & \begin{pmatrix} E & 0 \\ R & E \end{pmatrix} \\ n & \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} k & s \\ m & \begin{pmatrix} A & B \\ C + RA & D + RB \end{pmatrix} \\ n & \end{matrix} = \begin{matrix} & k & s \\ m & \begin{pmatrix} A & B \end{pmatrix} \\ n & \begin{pmatrix} C + RA & D + RB \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Заметим, что

$$\begin{pmatrix} E & 0 \\ R & E \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} E & 0 \\ -R & E \end{pmatrix}$$

В частности из этого наблюдения следует, что блочные элементарные преобразования строк не меняют множества решений соответствующей системы.

Аналогично можно делать блочные элементарные преобразования столбцов. А именно

$$\begin{matrix} & k & s \\ m & \begin{pmatrix} A & B \end{pmatrix} \\ n & \begin{pmatrix} C & D \end{pmatrix} \end{matrix} \mapsto \begin{matrix} & k & s \\ m & \begin{pmatrix} A & B + AT \end{pmatrix} \\ n & \begin{pmatrix} C & D + CT \end{pmatrix} \end{matrix}$$

где T матрица с k строками и s столбцами. Как и в случае преобразований со строками, эта процедура сводится к операции умножения на обратимую матрицу справа

$$\begin{matrix} & k & s \\ m & \begin{pmatrix} A & B \end{pmatrix} \\ n & \begin{pmatrix} C & D \end{pmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} k & s \\ m & \begin{pmatrix} E & T \\ 0 & E \end{pmatrix} \\ s & \end{matrix} = \begin{matrix} & k & s \\ m & \begin{pmatrix} A & B + AT \end{pmatrix} \\ n & \begin{pmatrix} C & D + CT \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Как и раньше

$$\begin{pmatrix} E & T \\ 0 & E \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} E & -T \\ 0 & E \end{pmatrix}$$

Замечание Обратите внимание, что при блочных преобразованиях строк умножение на матрицу-коэффициент R происходит слева, а при преобразованиях столбцов умножение на матрицу-коэффициент T происходит справа.

Преобразования второго типа Преобразование вида

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} C & D \\ A & B \end{pmatrix}$$

сводится к умножению на обратимую блочную матрицу слева

$$\begin{pmatrix} 0 & E \\ E & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C & D \\ A & B \end{pmatrix}$$

А преобразование

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} B & A \\ D & C \end{pmatrix}$$

сводится к умножению на обратимую блочную матрицу справа

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & E \\ E & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B & A \\ D & C \end{pmatrix}$$

При этом

$$\begin{pmatrix} 0 & E \\ E & 0 \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} 0 & E \\ E & 0 \end{pmatrix}$$

Преобразования третьего типа Если $R \in M_m(\mathbb{R})$ – обратимая матрица, то

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} RA & RB \\ C & D \end{pmatrix}$$

является преобразованием умножения на обратимую матрицу слева, а именно

$$\begin{pmatrix} R & 0 \\ 0 & E \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} RA & RB \\ C & D \end{pmatrix}$$

при этом

$$\begin{pmatrix} R & 0 \\ 0 & E \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} R^{-1} & 0 \\ 0 & E \end{pmatrix}$$

Аналогично, для обратимой матрицы $T \in M_k(\mathbb{R})$, преобразование

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} AT & B \\ CT & D \end{pmatrix}$$

является преобразованием умножения на обратимую матрицу справа, а именно

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T & 0 \\ 0 & E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} AT & B \\ CT & D \end{pmatrix}$$

Как и раньше, при работе со строками умножение на матрицу-коэффициент происходит слева, а при работе со столбцами – справа.

2.12 Массовое решение систем

Пусть нам надо решить сразу несколько систем $Ax_1 = b_1, \dots, Ax_k = b_k$, где $A \in M_{m \times n}(\mathbb{R})$, $b_i \in \mathbb{R}^m$ и $x_i \in \mathbb{R}^n$. Определим матрицы $X = (x_1 | \dots | x_k) \in M_{n \times k}(\mathbb{R})$ и $B = (b_1 | \dots | b_k) \in M_{m \times k}(\mathbb{R})$ составленные из столбцов x_i и b_i соответственно. Тогда по формулам блочного умножения матриц

$$AX = A(x_1 | \dots | x_k) = (Ax_1 | \dots | Ax_k) = (b_1 | \dots | b_k) = B$$

То есть массовое решение системы уравнений равносильно решению матричного уравнения $AX = B$.

Решение матричных уравнений

Дано $A \in M_{m \times n}(\mathbb{R})$, $B \in M_{m \times k}(\mathbb{R})$.

Задача Найти $X \in M_{n \times k}(\mathbb{R})$ такую, что $AX = B$.

Алгоритм

1. Составить расширенную матрицу $(A|B)$. Например, если $A \in M_{3 \times 3}(\mathbb{R})$, а $B \in M_{3 \times 2}(\mathbb{R})$, то получим

$$(A|B) = \left(\begin{array}{ccc|cc} a_{11} & a_{12} & a_{13} & b_{11} & b_{12} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & b_{21} & b_{22} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & b_{31} & b_{32} \end{array} \right)$$

2. Привести расширенную матрицу $(A|B)$ к улучшенному ступенчатому виду. В примере выше, может получиться

$$\left(\begin{array}{ccc|cc} 1 & a_{12} & 0 & b_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & b_{21} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \text{ или } \left(\begin{array}{ccc|cc} 1 & 0 & a_{13} & b_{11} & b_{12} \\ 0 & 1 & a_{23} & b_{21} & b_{22} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

3. Для каждого столбца матрицы X выразить его главные переменные через свободные и записать ответ в виде матрицы. Если для какого-то столбца решений нет, то нет решений и у матричного уравнения $AX = B$. В примере выше, в первом случае нет решения для второго столбца, потому что решений нет в этом случае. Во втором случае,

$$X = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -a_{13} \\ -a_{23} \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t & u \end{pmatrix}, \text{ где } t, u \in \mathbb{R}$$

Если нужно решить матричное уравнение $XA = B$ для матриц соответствующего размера, то можно его транспонировать и свести задачу к рассмотренной. А именно, это уравнение равносильно уравнению $A^t X^t = B^t$. Тогда его можно решать относительно X^t , а потом транспонировать ответ.

Нахождение обратной матрицы методом Гаусса

Дано Матрица $A \in M_n(\mathbb{R})$.

Задача Понять обратима ли матрица A и если она обратима, то найти ее обратную A^{-1} .

Алгоритм

1. Нам надо по сути решить систему $AX = E$, где E – единичная матрица. Потому составим расширенную матрицу системы $(A|E)$.
2. Приведем эту матрицу к улучшенному ступенчатому виду.
3. В результате возможны 2 случая:
 - (а) После приведения получили матрицу $(E|B)$. Тогда A обратима и $A^{-1} = B$.
 - (б) После приведения получили матрицу $(D|B)$ и у матрицы D есть свободные позиции. Тогда матрица A не обратима.

Заметим, что если в процессе алгоритма, мы слева от черты в расширенной матрице нашли свободную переменную, то на этом можно остановиться – матрица A необратима.

Корректность алгоритма Давайте я поясню почему алгоритм работает корректно. Пусть у нас есть система $AX = B$ с краткой записью $(A|B)$. Если мы применим элементарное преобразование строк к краткой записи, то это будет означать умножение на матрицу элементарного преобразования слева, то есть при переходе $(A|B) \mapsto (UA|UB)$ мы меняем систему $AX = B$ на $UAX = UB$. А значит, если матрица X была решением $AX = B$, то мы имеем верное равенство двух матриц $AX = B$. Если две одинаковые матрицы слева домножить на одну и ту же матрицу, то результат получится равным, то есть отсюда следует, что $UAX = UB$. То есть любое решение системы $AX = B$ превращается в решение системы $UAX = UB$. Так как матрица элементарного преобразования U обратима, то мы можем домножить второе на U^{-1} , а значит работает рассуждение в обратную сторону и все решения второй являются решениями первой.

Теперь мы знаем, что меняя по алгоритму систему, мы не меняем множество решений. Кроме того, по алгоритму, у нас в результате работы бывают две ситуации, либо мы приходим к ситуации $(E|B)$ либо к $(D|B)$ и в D есть свободная позиция. Давайте разберем их отдельно.

1. Пусть мы привели систему к виду $(E|B)$. Эта запись соответствует системе $EX = B$, то есть $X = B$. Более того, полученная система эквивалентна исходной $AX = B$. Теперь мы видим, что у системы $X = B$ единственное решение B , а это значит что и у системы $AX = B$ единственное решение B (так как они эквивалентны). А значит в этом случае B – это правая обратная к A , а следовательно и просто обратная.

2. Теперь предположим, что мы получим $(D|B)$, где у D есть свободная переменная. Так как мы переходили от $(A|E)$ к $(D|B)$ элементарными преобразованиями строк, то для некоторой обратимой матрицы $C \in M_n(\mathbb{R})$ выполнено $D = CA$. Так как у матрицы D есть свободная позиция и она квадратная ¹⁴, то обязательно найдется нулевая строка. А раз так, то матрица D не может быть обратима справа. Действительно, тогда в произведении DR для любой $R \in M_n(\mathbb{R})$ будет иметь нулевую строку там же, где нулевая строка у D . А значит, не может быть E . Раз матрица D не обратима, то и матрица A не обратима, иначе D была бы обратима, как произведение обратимых матриц.

2.13 Классификация СЛУ

Единственность улучшенного ступенчатого вида Давайте в начале ответим на очень важный вопрос: а единственный ли у матрицы улучшенный ступенчатый вид? Очевидно, что ступенчатый вид не единственный. Однако, улучшенный ступенчатый вид окажется однозначно определенным. Это означает, что у ступенчатого вида однозначно определена его форма (количество и длины ступенек). В частности у любой СЛУ однозначно определены главные и свободные переменные. Все это не бросается сразу в глаза и требует доказательства. Давайте начнем с простого наблюдения.

Утверждение 5. Пусть $A \in M_{m,n}(\mathbb{R})$ и $B \in M_{k,n}(\mathbb{R})$ – матрицы в ступенчатом виде, причем B получена из A выкидыванием одного ненулевого уравнения. Тогда системы $Ax = 0$ и $Bx = 0$ не эквивалентны. ¹⁵

Доказательство. Пусть для определенности A и B имеют следующий вид (все незаполненные места предполагаются нулями):

$$A = \begin{pmatrix} & & k & & & & & & \\ * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ & & * & * & * & * & * & * & * \\ & & & & * & * & * & * & * \\ & & & & & & * & * & \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} & & k & & & & & & \\ * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ & & & & & & * & * & * \\ & & & & & & & & * & * \end{pmatrix}$$

И пусть уравнение, которым они различаются начинается с k -ой позиции, т.е. x_k – главная переменная в A , но неглавная в B .

Пусть $E_A, E_B \subseteq \mathbb{R}^n$ – множества решений систем $Ax = 0$ и $Bx = 0$, соответственно. Так как в A уравнений больше, чем в B , то $E_A \subseteq E_B$.

Чтобы показать неравенство, предположим, что наоборот $E_A = E_B$. Рассмотрим следующие подмножества в них:

$$E_A^0 = \{x \in E_A \mid x_i = 0 \text{ при } i > k\}$$

$$E_B^0 = \{x \in E_B \mid x_i = 0 \text{ при } i > k\}$$

То есть среди всех решений в E_A и E_B , соответственно, рассмотрим только те, у которых координаты с номерами больше k обращаются в ноль. Это не пустые подмножества, например, там есть нулевое решение. Если $E_A = E_B$, то и $E_A^0 = E_B^0$, так как последние задаются одинаковыми условиями. Значит, чтобы прийти к противоречию, достаточно показать, что в E_B^0 есть элемент, которого нет в E_A^0 .

Рассмотрим E_A^0 . Так как для $Ax = 0$ переменная x_k – главная, то она выражается через предыдущие. А значит, если предыдущие ноль, то и она ноль. Это значит, что для $x \in E_A^0$ автоматически $x_k = 0$. С другой стороны, для системы $Bx = 0$ переменная x_k является свободной. Тогда сделаем так: положим все свободные переменные кроме x_k равными нулю, а $x_k = 1$. Тогда все главные переменные правее x_k (с большими номерами) автоматически станут нулями. Таким образом мы получили точку $x \in E_B^0$, у которой $x_k \neq 0$. Последнее приводит к противоречию с предположением, что $E_A = E_B$. \square

Утверждение 6. Пусть $S_1 \in M_{m,n}(\mathbb{R})$ и $S_2 \in M_{k,n}(\mathbb{R})$ – произвольные матрицы в улучшенном ступенчатом виде. Если $S_1x = 0$ эквивалентно $S_2x = 0$, то после удаления нулевых строк матрицы S_1 и S_2 совпадут.

Доказательство. Так как $S_1x = 0$ и $S_2x = 0$ эквивалентны между собой, то если мы возьмем любое уравнение l из системы $S_1x = 0$ и добавим его к системе $S_2x = 0$, получив систему $\begin{pmatrix} S_2 \\ l \end{pmatrix} x = 0$, то новая система будет

¹⁴Вот то место, где мы пользуемся квадратностью матрицы.

¹⁵То есть имеют разное множество решений.

эквивалентна всем трем. Аналогично, можно перекладывать уравнения из второй системы в первую, не меняя множества решений.

Пусть для определенности матрицы S_1 и S_2 имеют следующий вид:

$$S_1 = \begin{pmatrix} 1 & * & 0 & * & 0 & 0 & * & * & * \\ & & 1 & * & 0 & 0 & * & * & * \\ & & & & 1 & 0 & * & * & * \\ & & & & & & 1 & * & * \end{pmatrix} \quad S_2 = \begin{pmatrix} 1 & \bullet & \bullet & 0 & \bullet & \bullet & 0 & \bullet & \bullet \\ & & & 1 & \bullet & \bullet & 0 & \bullet & \bullet \\ & & & & & & 1 & \bullet & \bullet \end{pmatrix}$$

Они вообще говоря могут содержать разное количество ненулевых строк, пока мы ничего про это не знаем.

Давайте докажем, что в системах совпадают последние уравнения, потом следующие и так далее. Будем двигаться снизу вверх от коротких к более длинным. Нам надо показать три вещи: почему совпадают самые короткие уравнения, объяснить как показать совпадение для произвольного промежуточного уравнения и почему у одной из системы уравнения не закончатся раньше, чем у другой.

Пусть для определенности последнее уравнение S_2 не длиннее последнего уравнения S_1 , как на картинке. Добавим это уравнение к системе S_1 . Тогда возможны два случая: уравнение либо строго короче, либо имеет такую же длину. В первом случае получим две эквивалентные системы с матрицами

$$S_1 = \begin{pmatrix} 1 & * & 0 & * & 0 & 0 & * & * & * \\ & & 1 & * & 0 & 0 & * & * & * \\ & & & & 1 & 0 & * & * & * \\ & & & & & & 1 & * & * \end{pmatrix} \quad S'_1 = \begin{pmatrix} 1 & * & 0 & * & 0 & 0 & * & * & * \\ & & 1 & * & 0 & 0 & * & * & * \\ & & & & 1 & 0 & * & * & * \\ & & & & & & 1 & * & * \\ & & & & & & & 1 & \bullet \end{pmatrix}$$

Но по предыдущему утверждению это невозможно. Значит уравнения имеют одинаковую длину, потому эквивалентны системы

$$S_1 = \begin{pmatrix} 1 & * & 0 & * & 0 & 0 & * & * & * \\ & & 1 & * & 0 & 0 & * & * & * \\ & & & & 1 & 0 & * & * & * \\ & & & & & & 1 & * & * \end{pmatrix} \quad S'_1 = \begin{pmatrix} 1 & * & 0 & * & 0 & 0 & * & * & * \\ & & 1 & * & 0 & 0 & * & * & * \\ & & & & 1 & 0 & * & * & * \\ & & & & & & 1 & * & * \\ & & & & & & & 1 & \bullet \end{pmatrix}$$

В матрице S'_1 вычтем предпоследнее уравнение из последнего. Новая система $S'_1 x = 0$ будет эквивалентна $S_1 x = 0$. Если уравнения не совпадают, то разность даст новую ступеньку и по предыдущему утверждению системы не могут быть эквивалентными. Значит последние уравнения совпадают.

Теперь мы знаем, что матрицы S_1 и S_2 имеют вид (где треугольниками отмечены элементы одинаковых строк):

$$S_1 = \begin{pmatrix} 1 & * & 0 & * & 0 & 0 & * & * & * \\ & & 1 & * & 0 & 0 & * & * & * \\ & & & & 1 & 0 & * & * & * \\ & & & & & & 1 & \blacktriangle & \blacktriangle \end{pmatrix} \quad S_2 = \begin{pmatrix} 1 & \bullet & \bullet & 0 & \bullet & 0 & \bullet & \bullet & \bullet \\ & & & 1 & \bullet & 0 & \bullet & \bullet & \bullet \\ & & & & & & 1 & \blacktriangle & \blacktriangle \end{pmatrix}$$

Теперь посмотрим на следующую пару уравнений. Пусть для определенности уравнение в S_1 будет не длиннее, чем уравнение в S_2 . Добавим второе уравнение из S_1 в S_2 и получим эквивалентную систему. У нас как и выше два варианта: либо длина уравнения строго меньше, либо длины одинаковые. Рассмотрим случай первый:

$$S'_2 = \begin{pmatrix} 1 & \bullet & \bullet & 0 & \bullet & 0 & \bullet & \bullet & \bullet \\ & & & 1 & \bullet & 0 & \bullet & \bullet & \bullet \\ & & & & 1 & 0 & * & * & * \\ & & & & & & 1 & \blacktriangle & \blacktriangle \end{pmatrix} \quad S_2 = \begin{pmatrix} 1 & \bullet & \bullet & 0 & \bullet & 0 & \bullet & \bullet & \bullet \\ & & & 1 & \bullet & 0 & \bullet & \bullet & \bullet \\ & & & & & & 1 & \blacktriangle & \blacktriangle \end{pmatrix}$$

В этом случае по предыдущему утверждению системы не эквивалентны, чего быть не может. Значит у нас второй случай:

$$S'_2 = \begin{pmatrix} 1 & \bullet & \bullet & 0 & \bullet & 0 & \bullet & \bullet & \bullet \\ & & & 1 & \bullet & 0 & \bullet & \bullet & \bullet \\ & & & & 1 & * & 0 & * & * \\ & & & & & & 1 & \blacktriangle & \blacktriangle \end{pmatrix} \quad S_2 = \begin{pmatrix} 1 & \bullet & \bullet & 0 & \bullet & 0 & \bullet & \bullet & \bullet \\ & & & 1 & \bullet & 0 & \bullet & \bullet & \bullet \\ & & & & & & 1 & \blacktriangle & \blacktriangle \end{pmatrix}$$

Как и раньше, в S'_2 вычтем из нового уравнения вышестоящее. Предположим, что уравнения были разные и получилась ненулевая строка. Вопрос: где не может начинаться эта строка? Ответ: там, где у обеих строк были нули. Теперь воспользуемся тем, что все нижестоящие уравнения у нас одинаковые. Это значит, что нули у обеих строк в одних и тех же местах (это места где начинаются нижестоящие строки). Значит, может получиться что-то вроде

$$S''_2 = \begin{pmatrix} 1 & \bullet & \bullet & 0 & \bullet & 0 & \bullet & \bullet & \bullet \\ & & & 1 & \bullet & 0 & \bullet & \bullet & \bullet \\ & & & & * & 0 & * & * & * \\ & & & & & & 1 & \blacktriangle & \blacktriangle & \blacktriangle \end{pmatrix} \quad \text{или} \quad S''_2 = \begin{pmatrix} 1 & \bullet & \bullet & 0 & \bullet & 0 & \bullet & \bullet & \bullet \\ & & & 1 & \bullet & 0 & \bullet & \bullet & \bullet \\ & & & & & & * & * & * \\ & & & & & & & 1 & \blacktriangle & \blacktriangle & \blacktriangle \end{pmatrix} \quad \text{и т.д.}$$

Но по предыдущему утверждению такого опять быть не может, так как новая система не эквивалентна $S_2x = 0$. Продолжая аналогично, мы показываем, что все уравнения у систем совпадают.

Осталось объяснить почему уравнения в одной из систем не могут закончиться раньше, чем в другой. Но тогда у нас они обе в ступенчатом виде и одна получена из другой добавлением нескольких уравнений. Добавление одного уменьшает множество решений, как показано в предыдущем утверждении, а добавление нескольких – тем более. \square

Из этого утверждения следует, что матрица улучшенного ступенчатого вида для любой матрицы $A \in M_{m,n}(\mathbb{R})$ определена однозначно. Так как если матрица A приводится к двум разным ступенчатым видам, то их однородные системы эквивалентны, а значит они совпадают. Потому, говоря о матрице A , можно говорить и о ее улучшенном ступенчатом виде без какой-либо неоднозначности.

Классификация

Утверждение 7. Пусть $A, B \in M_{m,n}(\mathbb{R})$ и пусть $E_A, E_B \subseteq \mathbb{R}^n$ – множества решений систем $Ax = 0$ и $Bx = 0$, соответственно. Тогда следующее эквивалентно:

1. $E_A = E_B$, т.е. системы эквивалентны.
2. A приводится к B элементарными преобразованиями строк.
3. Существует обратимая $C \in M_m(\mathbb{R})$ такая, что $B = CA$.
4. Матрица улучшенного ступенчатого вида для A совпадает с матрицей улучшенного ступенчатого вида для B .

Доказательство. Мы все это уже доказали по сути, потому напомним, что откуда следует. $(2) \Rightarrow (1)$ Так как элементарные преобразования меняют систему на эквивалентную. $(1) \Rightarrow (4)$ Предыдущее утверждение. $(4) \Rightarrow (2)$ Если матрицы A и B приводятся элементарными преобразованиями к одной и той же матрице (улучшенного ступенчатого вида), то они переводятся и друг в друга. Эквивалентность $(2) \Leftrightarrow (3)$ следует из Утверждения 3 о том, что матрица обратима тогда и только тогда, когда она раскладывается в произведение элементарных. \square

Смысл этого утверждения в следующем. Возьмем множество всех однородных систем фиксированного размера, которое описывается матрицами $M_{m,n}(\mathbb{R})$. Тогда на этом множестве есть отношение эквивалентности: системы эквивалентны если они имеют одинаковое множество решений. Это полезное свойство, потому что нам не важно какую из систем решать среди эквивалентных. Однако, это свойство сложно проверяется. С другой стороны, у нас есть процедура изменения системы (элементарные преобразования), которая меняет системы на заведомо эквивалентные. Сделаем следующие замечания:

1. Утверждается, что эта процедура эффективная в том смысле, что если уж какие-то системы были эквивалентны, то мы обязательно от одной к другой сможем перейти элементарными преобразованиями.
2. Все то же самое верно и для второй процедуры – умножение на обратимую матрицу слева (потому что это по сути та же самая процедура).
3. Утверждается, что в каждом классе эквивалентных систем мы можем найти одну единственную матрицу улучшенного ступенчатого вида. То есть классов попарно неэквивалентных систем ровно столько же, сколько матриц улучшенного ступенчатого вида.
4. Последнее означает, что свойства системы с произвольной матрицей точно такие же, как у какой-то системы в улучшенном ступенчатом виде. Потому в абстрактных задачах про системы можно всегда предполагать, что система уже имеет улучшенный ступенчатый вид.

2.14 Полиномиальное исчисление от матриц

Обозначим множество всех многочленов с вещественными коэффициентами через $\mathbb{R}[x]$. Формально это значит: $\mathbb{R}[x] = \{a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n \mid n \in \mathbb{Z}_+, a_i \in \mathbb{R}\}$. Аналогично можно обозначать многочлены с рациональными, целыми, комплексными и т.д. коэффициентами.

Подстановка матриц в многочлены Пусть $p(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n$ — многочлен с вещественными коэффициентами, а $A \in M_n(\mathbb{R})$. Тогда можно определить $f(A) = a_0E + a_1A + \dots + a_nA^n \in M_n(\mathbb{R})$. Если определить $A^0 = E$, то формула становится более единообразной $f(A) = a_0A^0 + a_1A^1 + \dots + a_nA^n$. Однако, психологически проще думать так: вместо x подставляем A , а свободный член отождествляем со скалярными матрицами. Отметим, что если два многочлена равны, то и их значения на матрице A тоже равны.

Утверждение. Пусть $A \in M_n(\mathbb{R})$ и $f, g \in \mathbb{R}[x]$ — два произвольных многочлена, тогда:

1. $(f + g)(A) = f(A) + g(A)$.
2. $(fg)(A) = f(A)g(A)$.
3. $f(\lambda E) = f(\lambda)E$.
4. $f(C^{-1}AC) = C^{-1}f(A)C$ для любой обратимой $C \in M_n(\mathbb{R})$
5. Матрицы $f(A)$ и $g(A)$ коммутируют между собой.

Доказательство. Все это делается прямой проверкой по определению. Давайте объясним свойства (2) и (4).

(2) Пусть

$$f = \sum_{k=0}^n a_k x^k \text{ и } g = \sum_{k=0}^m b_k x^k$$

тогда

$$fg = \sum_{k=0}^{n+m} \left(\sum_{s+t=k} a_s b_t \right) x^k$$

Потому надо проверить равенство:

$$\left(\sum_{k=0}^n a_k A^k \right) \left(\sum_{k=0}^m b_k A^k \right) = \sum_{k=0}^{n+m} \left(\sum_{s+t=k} a_s b_t \right) A^k$$

которое следует из перестановочности A со своими степенями и коэффициентами.

(4) Заметим, что

$$(C^{-1}AC)^n = C^{-1}ACC^{-1}AC \dots C^{-1}AC = C^{-1}A^nC$$

Осталось воспользоваться дистрибутивностью умножения, т.е. $C^{-1}(A+B)C = C^{-1}AC + C^{-1}BC$. □

Обнуляющий многочлен

Утверждение 8. Пусть $A \in M_n(\mathbb{R})$, тогда:

1. Существует многочлен $f \in \mathbb{R}[x]$ не равный тождественно нулю степени не больше n^2 такой, что $f(A) = 0$.
2. Если для какого-то многочлена $g \in \mathbb{R}[x]$ имеем $g(A) = 0$, а для $\lambda \in \mathbb{R}$ имеем $g(\lambda) \neq 0$, то $A - \lambda E$ является обратимой матрицей.

Доказательство. (1) Давайте искать многочлен f с неопределенными коэффициентами в виде $f = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n$. Надо чтобы было выполнено равенство $a_0E + a_1A + \dots + a_nA^n = 0$. Последнее равенство означает равенство матрицы слева нулевой матрице справа. Это условие задается равенством всех n^2 ячеек матриц: $(a_0E + a_1A + \dots + a_nA^n)_{ij} = 0$ для всех i, j . Каждое из этих условий является линейным уравнением вида $a_0(E)_{ij} + a_1(A)_{ij} + \dots + a_n(A^n)_{ij} = 0$. То есть у нас есть система с n^2 уравнениями и $n^2 + 1$ неизвестной. А значит при приведении этой системы к ступенчатому виду у нас обязательно будет свободная переменная, а значит мы сможем найти ненулевое решение.

(2) Разделим многочлен g на $x - \lambda$ с остатком, получим $g(x) = h(x)(x - \lambda) + g(\lambda)$. Теперь в левую и правую часть равенства подставим A . Получим

$$0 = g(A) = h(A)(A - \lambda E) + g(\lambda)E$$

Перенесем $g(\lambda)E$ в другую сторону и поделим на $-g(\lambda)$, получим

$$E = -\frac{1}{g(\lambda)}h(A)(A - \lambda E)$$

То есть $-\frac{1}{g(\lambda)}h(A)$ является обратным к $A - \lambda E$. □

На самом деле можно показать, что найдется многочлен степени не больше n , зануляющий нашу матрицу. Однако, мы пока не в состоянии этого сделать.

Спектр Пусть $A \in M_n(\mathbb{R})$ определим вещественный спектр матрицы A следующим образом:

$$\text{спес}_{\mathbb{R}} A = \{\lambda \in \mathbb{R} \mid A - \lambda E \text{ не обратима}\}$$

Аналогично определяются спектры в рациональном, комплексном и прочих случаях.

Утверждение 9. Пусть $A \in M_n(\mathbb{R})$ и пусть $f \in \mathbb{R}[x]$ такой, что $f(A) = 0$. Тогда $|\text{спес}_{\mathbb{R}} A| \leq \deg f$. В частности спектр всегда конечен.

Доказательство. Покажем, что любой элемент спектра является корнем f . Для этого достаточно показать двойственное утверждение, если λ не корень, то λ не в спектре. Но это в точности Утверждение 8 пункт (2). □

Так как у нас для любой матрицы найдется многочлен степени n^2 ее зануляющий, то спектр всегда конечен и его размер не превосходит n^2 . Как говорилось выше, на самом деле, можно найти многочлен степени n , потому спектр всегда не превосходит по мощности n .

Примеры

1. Пусть $A \in M_n(\mathbb{R})$ – диагональная матрица с числами $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ на диагонали, т.е.

$$A = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_n \end{pmatrix}$$

Так как диагональные матрицы складываются и умножаются поэлементно

$$\begin{pmatrix} \lambda_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mu_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \mu_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1 + \mu_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_n + \mu_n \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \lambda_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \mu_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1 \mu_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_n \mu_n \end{pmatrix}$$

То для любого многочлена $f \in \mathbb{R}[x]$ верно

$$f \begin{pmatrix} \lambda_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(\lambda_1) & & \\ & \ddots & \\ & & f(\lambda_n) \end{pmatrix}$$

То есть многочлен f зануляет A тогда и только тогда, когда он зануляет все λ_i . Например, в качестве такого многочлена подойдет $f(x) = (x - \lambda_1) \dots (x - \lambda_n)$.

Давайте покажем, что $\text{спес}_{\mathbb{R}} A = \{\lambda_1, \dots, \lambda_n\}$. Так как многочлен f зануляет A , утверждение 8 пункт (2) влечет, что спектр содержится среди его корней. Значит, надо показать, что $A - \lambda_i E$ необратим для любого i . Последнее легко видеть, так как $A - \lambda_i E$ содержит 0 на i -ом месте на диагонали.

2. Пусть $A = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \in M_2(\mathbb{R})$. Прямое вычисление показывает, что $A^2 = -E$, то есть многочлен $f(x) = x^2 + 1$ зануляет A . Покажем, что $\text{спес}_{\mathbb{R}} A = \emptyset$. Действительно, по утверждению 8 пункт (2) спектр должен содержаться среди корней многочлена $f(x) = x^2 + 1$. Однако, этот многочлен не имеет вещественных корней. Этот пример объясняет, почему вещественных чисел иногда не достаточно и мы хотим работать с комплексными числами. Например, в комплексном случае $\text{спес}_{\mathbb{C}} A = \{i, -i\}$.

Минимальный многочлен Пусть $A \in M_n(\mathbb{R})$ – некоторая матрица. Рассмотрим множество всех ненулевых многочленов зануляющих A . Формально мы смотрим на множество

$$M = \{f \in \mathbb{R}[x] \mid f(A) = 0, f \neq 0\}$$

Пусть $f_{\min} \in M$ – многочлен самой маленькой степени со старшим коэффициентом 1. Тогда он называется минимальным многочленом матрицы A .

Утверждение 10. Пусть $A \in M_n(\mathbb{R})$, тогда верны следующие утверждения:

1. Минимальный многочлен f_{\min} существует.
2. Минимальный многочлен делит любой другой многочлен зануляющий A .
3. Минимальный многочлен единственный.
4. $\lambda \in \text{спес}_{\mathbb{R}} A$ тогда и только тогда, когда $f_{\min}(\lambda) = 0$.

Доказательство. (1). По утверждению 8 пункт (1) у нас всегда найдется многочлен зануляющий A , а значит M не пусто. Так как степень не может убывать бесконечно, то мы обязательно найдем многочлен самой маленькой степени, который зануляет A . Осталось разделить его на старший коэффициент.

(2). Пусть $f \in M$ – произвольный многочлен, а f_{\min} – какой-то минимальный. Тогда разделим f на f_{\min} с остатком, получим

$$f(x) = h(x)f_{\min}(x) + r(x)$$

где $\deg r < \deg f_{\min}$. Подставим в это равенство матрицу A , получим

$$0 = f(A) = h(A)f_{\min}(A) + r(A) = r(A)$$

Значит мы нашли многочлен r , который зануляет A и меньше f_{\min} по степени. Такое может быть только если $r(x) = 0$.

(3). Пусть f_{\min} и f'_{\min} – два минимальных многочлена матрицы A . Тогда у них по определению одинаковая степень. Рассмотрим $r(x) = f_{\min}(x) - f'_{\min}(x)$. Многочлен $r(x)$ степени строго меньше, так как оба минимальных имеют старший коэффициент 1. Кроме того, $r(A) = f_{\min}(A) - f'_{\min}(A) = 0$. А значит $r(x) = 0$.

(4). Мы уже знаем, что $\text{спес}_{\mathbb{R}} A$ лежит среди корней f_{\min} (утверждение 8 пункт (2)). Осталось показать обратное включение. Предположим обратное, что есть $\lambda \in \mathbb{R}$ такое, что $f_{\min}(\lambda) = 0$, но $\lambda \notin \text{спес}_{\mathbb{R}} A$. Тогда $f_{\min}(x) = (x - \lambda)h(x)$. Подставим в это равенство матрицу A и получим

$$0 = f_{\min}(A) = (A - \lambda E)h(A)$$

Так как $\lambda \notin \text{спес}_{\mathbb{R}} A$, то матрица $A - \lambda E$ обратима, а значит на нее можно сократить, то есть $h(A) = 0$ и степень h строго меньше степени f_{\min} , хотя сам h – ненулевой многочлен. Последнее противоречит с нашим предположением о том, что f_{\min} минимальный. \square

Поиск минимального многочлена Пусть задана матрица $A \in M_n(\mathbb{R})$. То мы знаем, что найдется многочлен $f \in \mathbb{R}[x]$ такой, что $f(A) = 0$. Кроме того, я сообщил, что $\deg f \leq n$. Давайте обсудим, как найти подобный многочлен. Будем искать его с неопределенными коэффициентами $f(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n$. Подставим в многочлен матрицу A и приравняем результат к нулю.

$$f(A) = a_0E + a_1A + \dots + a_nA^n = 0$$

Тогда то, что написано, является системой из n^2 уравнений, а именно

$$\{1 \leq i, j \leq n\} E_{ij}a_0 + A_{ij}a_1 + \dots + (A^n)_{ij}a_n = 0$$

Здесь через B_{ij} обозначены коэффициенты матрицы B , например, E_{ij} – это ij -ый коэффициент единичной матрицы, а $(A^n)_{ij}$ – ij -ый коэффициент матрицы A^n .

Теперь нас интересует ненулевое решение этой системы, у которого как можно больше нулей справа. Давайте поясню. Такое решение отвечает зануляющему многочлену. Мы хотим выбрать такой многочлен как можно меньшей степени. То есть мы хотим по возможности занулить a_n , потом a_{n-1} , потом a_{n-2} и так далее, пока находится ненулевое решение. Предположим, что мы привели систему к ступенчатому виду и a_k – самая левая свободная переменная. Я утверждаю, что k и будет степенью минимального многочлена, а чтобы его найти надо положить $a_k = 1$, и все остальные свободные переменные равными нулю.

Действительно, если мы сделали, как описано, то все главные переменные правее a_k тоже равны нулю, ибо они зависят от свободных переменных, стоящих правее, а они в нашем случае нулевые. То есть a_k будет старший ненулевой коэффициент в искомом многочлене, а значит k будет его степенью. Почему нельзя найти меньше. Чтобы найти меньше надо занулить еще и a_k . То есть все свободные переменные в этом случае будут нулевыми, а тогда и все главные будут нулевыми, а это даст нулевое решение, что противоречит нашим намерениям найти ненулевой многочлен.

Вычленение из какого-то зануляющего Предположим, что вы угадали какой-нибудь зануляющий многочлен для вашей матрицы $A \in M_n(\mathbb{R})$, а именно, нашли какой-то $f \in \mathbb{R}[x]$ такой, что $f(A) = 0$. Тогда можно попытаться найти минимальный многочлен среди делителей многочлена f . Эта процедура требует уметь искать эти самые делители. Но в некоторых ситуациях эта процедура тоже бывает полезна. Например, в случае большой блочной матрицы A бывает проще найти зануляющий многочлен.

Замечание о спектре Можно показать, что любой вещественный многочлен $f \in \mathbb{R}[x]$ единственным образом разваливается в произведение

$$f(x) = (x - \lambda_1) \dots (x - \lambda_k) q_1(x) \dots q_r(x)$$

где числа $\lambda_i \in \mathbb{R}$ могут повторяться, а $q_i(x)$ – многочлены второй степени с отрицательным дискриминантом (то есть без вещественных корней).

Пусть теперь f_{min} – минимальный многочлен некоторой матрицы A . Разложим его подобным образом. Тогда мы видим из предыдущего утверждения, что $\text{spes}_{\mathbb{R}} A$ помнит информацию только о первой половине сомножителей и теряет информацию о квадратичных многочленах. Однако, если бы мы рассмотрели f_{min} как многочлен с комплексными коэффициентами, то мы бы могли доразложить все $q_i(x)$ на линейные множители и $\text{spes}_{\mathbb{C}} A$ помнит информацию о всех сомножителях f_{min} . Еще надо понимать, что каждое $x - \lambda$ может несколько раз участвовать в разложении f_{min} , но спектр не помнит это количество, он лишь знает был ли там данный $x - \lambda$ или нет.

Замечание об арифметических свойствах матриц Если вы работаете с матрицами, то готовьтесь к тому, чтобы думать про них как про более сложную версию чисел. А значит, вы будете писать с ними различного рода алгебраические выражения. Например, для какой-нибудь матрицы $A \in M_n(\mathbb{R})$ можно написать $A^3 + 2A - 3E$. И предположим вы хотите упростить это выражение как-нибудь, не зная как именно выглядит ваша матрица A . Единственное, что вам поможет в этом случае – зануляющий многочлен. Пусть, например, $f(x) = x^2 - 3$ зануляет A . Это значит, что $A^2 = 3E$. Тогда выражение выше можно упростить так

$$A^3 + 2A - 3E = 3A + 2A - 3E = 5A - 3E$$

Роль минимального многочлена заключается в том, что это «самый лучший» многочлен, который помнит как можно больше соотношений на матрицу A , чтобы можно было упрощать выражения. Более того, минимальный многочлен автоматически говорит, когда можно делить на выражение от матрицы, а когда нет. Например, на $A - E$ поделить можно, так как 1 не является корнем f , с другой стороны на матрицы $A \pm \sqrt{3}E$ делить нельзя.

Обратимость и минимальный многочлен Обратимость матрицы по определению равносильна тому, что в ее спектре нет нуля, а это то же самое, что у минимального многочлена свободный член отличен от нуля. В этом случае мы можем явно выразить обратную матрицу через исходную. Действительно, пусть $f_{min} = a_0 + a_1x + \dots + a_mx^m$ для некоторой матрицы $A \in M_n(\mathbb{R})$. Тогда

$$a_0E + a_1A + \dots + a_mA^m = 0 \quad \Rightarrow \quad A(a_1E + \dots + a_mA^{m-1}) = -a_0E \quad \Rightarrow \quad A \left(-\frac{a_1}{a_0}E - \dots - \frac{a_m}{a_0}A^{m-1} \right) = E$$

То есть по определению

$$A^{-1} = -\frac{a_1}{a_0}E - \dots - \frac{a_m}{a_0}A^{m-1}$$

Обратите внимание, что данная формула работает при условии, что $a_0 \neq 0$. Эта процедура похожа на процедуру избавления от иррациональности в знаменателе дробей или избавления от мнимой части в знаменателе в комплексных дробях. Это не просто, это в точности тот же самый метод.

2.15 Матричные нормы

Здесь нас ждет пример первого абстрактного определения. Любое такое определение устроено одинаково, оно состоит из двух частей: первая часть содержит данные, а вторая аксиомы на них.

Нормы Будем через \mathbb{R}_+ обозначать множество неотрицательных вещественных чисел, т.е. $\mathbb{R}_+ = \{r \in \mathbb{R} \mid r \geq 0\}$.

Пусть задано отображение

$$M_{m,n}(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}_+$$

т.е. это правило, которое по матрице A выдает некоторое неотрицательное вещественное число, которое будет обозначаться $|A| \in \mathbb{R}_+$. Такое отображение называется нормой, если выполнены следующие аксиомы

1. Для любой матрицы $A \in M_{m,n}(\mathbb{R})$, $|A| = 0$ тогда и только тогда, когда $A = 0$.
2. Для любой матрицы $A \in M_{m,n}(\mathbb{R})$ и любого числа $\lambda \in \mathbb{R}$ выполнено $|\lambda A| = |\lambda| \cdot |A|$.¹⁶
3. Для любых двух матриц $A, B \in M_{m,n}(\mathbb{R})$ выполнено $|A + B| \leq |A| + |B|$.

Стоит отметить, что \mathbb{R}^n можно отождествить с матрицами $M_{n,1}(\mathbb{R})$. Потому определение выше дает понятие нормы на векторах из \mathbb{R}^n .

Субмультипликативность Пусть на квадратных матрицах $M_n(\mathbb{R})$ задана некоторая норма. Тогда она называется субмультипликативной, если выполнено следующее свойство: для любых матриц $A, B \in M_n(\mathbb{R})$ выполнено $|AB| \leq |A| \cdot |B|$.

Простые примеры

1. 1-норма на $M_n(\mathbb{R})$:

$$|A|_1 = \sum_{ij} |a_{ij}|, \quad A \in M_n(\mathbb{R})$$

2. ∞ -норма на $M_n(\mathbb{R})$:

$$|A|_\infty = \max_{ij} |a_{ij}|, \quad A \in M_n(\mathbb{R})$$

3. Норма Фробениуса или 2-норма на $M_n(\mathbb{R})$:

$$|A|_F = |A|_2 = \sqrt{\sum_{ij} |a_{ij}|^2}, \quad A \in M_n(\mathbb{R})$$

4. p -норма на $M_n(\mathbb{R})$:

$$|A|_p = \sqrt[p]{\sum_{ij} |a_{ij}|^p}$$

Выясните в качестве упражнения, какие из этих норм являются субмультипликативными.

¹⁶Здесь $|\lambda|$ означает модуль числа, а $|A|$ – норма от матрицы.

Индукцированная (согласованная) норма Пусть $|\cdot|: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}_+$ – некоторая фиксированная норма. Определим индуцированную ей норму $\|-\|$ на $M_n(\mathbb{R})$ следующим образом:¹⁷

$$\|A\| = \sup_{\substack{x \in \mathbb{R}^n \\ x \neq 0}} \frac{|Ax|}{|x|}, \quad A \in M_n(\mathbb{R})$$

Методом пристального взгляда мы замечаем, что отображение $\|-\|: M_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}_+$ удовлетворяет первым трем аксиомам нормы, а значит действительно является матричной нормой. Более того, верно следующее.

Утверждение. Для любой нормы $|\cdot|: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}_+$ индуцированная ей норма $\|-\|: M_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}_+$ является субмультипликативной.

Доказательство. Из определения индуцированной нормы следует, что $|Ax|/|x| \leq \|A\|$ для любого ненулевого $x \in \mathbb{R}^n$. Ясно, что тогда для любого $x \in \mathbb{R}^n$, верно $|Ax| \leq \|A\| \cdot |x|$.

Пусть теперь $A, B \in M_n(\mathbb{R})$ и нам надо показать, что $\|AB\| \leq \|A\| \cdot \|B\|$. Рассмотрим произвольный $x \in \mathbb{R}^n$, тогда

$$|ABx| = |A(Bx)| \leq \|A\| \cdot |Bx| \leq \|A\| \cdot \|B\| \cdot |x|$$

Значит

$$\frac{|ABx|}{|x|} \leq \|A\| \cdot \|B\|$$

для любого ненулевого $x \in \mathbb{R}^n$. А значит, можно перейти к супремуму по таким x , и следовательно

$$\|AB\| = \sup_{\substack{x \in \mathbb{R}^n \\ x \neq 0}} \frac{|ABx|}{|x|} \leq \|A\| \cdot \|B\|$$

□

Примеры индуцированных норм Индуцированные нормы хороши тем, что они субмультипликативны. Однако, обычно для них не существует явных формул для вычисления. Ниже мы приведем несколько случаев, когда такие формулы все же возможны. Все примеры будут даны без доказательств.

1. Пусть на \mathbb{R}^n дана 1-норма $|x| = \sum_i |x_i|$. Тогда индуцированная норма $\|-\|_1$ на матрицах $M_n(\mathbb{R})$ будет задаваться по формуле

$$\|A\|_1 = \max_j \sum_i |a_{ij}|$$

2. Пусть теперь на \mathbb{R}^n дана ∞ -норма $|x| = \max_i |x_i|$. Тогда индуцированная норма $\|-\|_\infty$ на матрицах $M_n(\mathbb{R})$ будет задаваться по формуле

$$\|A\|_\infty = \max_i \sum_j |a_{ij}|$$

3. И наконец, пусть на \mathbb{R}^n дана 2-норма $|x| = \sqrt{\sum_i |x_i|^2}$. Тогда индуцированная норма $\|-\|_2$ на матрицах $M_n(\mathbb{R})$ уже считается более хитрым способом. Пусть $A \in M_n(\mathbb{R})$. Если взять матрицу $A^t A$, то окажется, что ее спектр состоит целиком из неотрицательных вещественных чисел. Пусть σ_1 – максимальное такое число, тогда $\|A\|_2 = \sqrt{\sigma_1}$.¹⁸

2.16 Обзор применения матричных норм

Для простоты изложения, я буду рассматривать лишь квадратные матрицы ниже. Хотя какие-то вопросы и можно формулировать и для прямоугольных матриц, это не сделает материал более интересным.

¹⁷Можно определить норму на прямоугольных матрицах, но тогда надо иметь две нормы одну на \mathbb{R}^n , а другую на \mathbb{R}^m . В этом случае индуцированная норма зависит от двух норм, одна фигурирует в знаменателе, другая в числителе.

¹⁸К этому явлению надо относиться так: есть спектр – объект из мира алгебры и есть норма – объект из мира анализа. Оказывается, что между анализом и алгеброй есть мостик через спектр и индуцированную 2-норму. Это позволяет задачи про спектр изучать аналитическими методами и наоборот задачи про сходимости изучать алгебраическими.

Сходимость Основная задача нормы – дать понятие о близости матриц друг к другу. А именно, если есть норма $|\cdot|: M_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}_+$, то можно определить расстояние между матрицами $A, B \in M_n(\mathbb{R})$ следующим образом $\rho(A, B) = |A - B|$. А как только у нас есть понятие расстояния между объектами, мы можем ввести понятие предела и сходимости, а именно: пусть задана последовательность матриц $A_n \in M_n(\mathbb{R})$, тогда скажем, что она сходится к матрице $A \in M_n(\mathbb{R})$ и будем писать $A_n \rightarrow A$, $n \rightarrow \infty$ (или $\lim_n A_n = A$), если $\rho(A_n, A) \rightarrow 0$ как последовательность чисел при условии $n \rightarrow \infty$.

Эквивалентность норм Тут встает законный вопрос: у нас есть много различных норм на матрицах, а потому много расстояний, а значит получается огромное количество разных сходимостей (по одной на каждый вид нормы). Оказывается, что все возможные нормы на матрицах дают расстояния приводящие к одинаковому определению предела. Ключом к пониманию этого явления является определение эквивалентности норм. Пусть $|\cdot|$ и $|\cdot|'$ – две разные нормы на $M_n(\mathbb{R})$. Будем говорить, что они эквивалентны, если существуют две положительные константы $c_1, c_2 \in \mathbb{R}$ такие, что $c_1|A| \leq |A|' \leq c_2|A|$ для всех матриц $A \in M_n(\mathbb{R})$. Если две нормы эквивалентны, то несложно углядеть, что расстояние $\rho(A_n, A)$ в смысле нормы $|\cdot|$ стремится к нулю тогда и только тогда, когда расстояние $\rho'(A_n, A)$ в смысле нормы $|\cdot|'$ стремится к нулю. А значит эквивалентные нормы дают одну и ту же сходимость. Второй ключевой факт – все матричные нормы между собой эквивалентны. Это не очень сложный результат и по сути связан с тем, что единичный куб в \mathbb{R}^n является компактным множеством.

Анализ для матриц Как только у нас есть понятие предела для матриц, мы можем с помощью него развивать анализ аналогичный анализу для обычных чисел. Например, можно определить хорошо известные гладкие функции от матриц. Скажем, пусть $A \in M_n(\mathbb{R})$, тогда можно сказать, что значит e^A , $\ln A$, $\sin A$ или $\cos A$. Конечно, $\ln A$ будет существовать не для всех матриц A , так же как и обычный логарифм существует только для положительных чисел. Знакомые тождества вроде $e^{\ln A} = A$ и $\ln e^A = A$ будут оставаться справедливыми. Свойства $e^{A+B} = e^A e^B$ будет верным, в случае если A и B коммутируют.

Одним из простейших подходов к определению таких функций – использование степенных рядов. Например, $e^x = \sum_{k \geq 0} x^k/k!$. Тогда можно определить $e^A = \sum_{k \geq 0} A^k/k!$. Доказательство свойств экспоненты тогда сводится к игре в раскрытие скобок со степенными рядами. И в этой игре нам важно, чтобы символы были перестановочны между собой, потому что какие-то свойства могут нарушиться, если исходные матрицы не коммутируют.

Еще стоит отметить такой момент. Так как для любой матрицы A существует минимальный многочлен ее аннулирующий f_{min} , то, оказывается, что любую гладкую функцию от A можно приблизить многочленом. А именно, если φ – некоторая гладкая функция, то для любой матрицы A найдется такой многочлен f (зависящий от A) степени меньше, чем $\deg f_{min}$, что $\varphi(A) = f(A)$. Более того, существует общая алгоритмическая процедура по нахождению такого многочлена f . Эта процедура является эффективным способом вычисления гладких функций от матриц.

3 Перестановки

3.1 Отображения множеств

Пусть X, Y – некоторые множества, а $\varphi: X \rightarrow Y$ – отображение. Тогда φ называется *инъективным*, если оно «не склеивает точки», т.е. для любых $x, y \in X$ из условия $x \neq y$ следует $\varphi(x) \neq \varphi(y)$. Отображение φ называется *сюръективным*, если в любой элемент что-то переходит, т.е. для любого $y \in Y$ существует $x \in X$ такой, что $\varphi(x) = y$. Отображение φ называется *биективным*, если оно одновременно инъективно и сюръективно.¹⁹

Свойства отображения можно подчеркивать видом стрелки. Например, инъективное отображение обычно обозначается $\varphi: X \hookrightarrow Y$, сюръективное – $\varphi: X \twoheadrightarrow Y$, а биективное – $\varphi: X \xrightarrow{\sim} Y$.

Для любого множества X отображение $\text{Id}: X \rightarrow X$ заданное по правилу $\text{Id}(x) = x$ называется *тождественным*. Пусть $\varphi: X \rightarrow Y$ – некоторое отображение. Тогда $\psi: Y \rightarrow X$ называется *левым обратным* (соответственно *правым обратным*) к φ , если $\psi\varphi = \text{Id}$ ($\varphi\psi = \text{Id}$).²⁰ Левых и правых обратных для φ может быть много. Однако, если есть оба обратных и ψ_1 – левый обратный, а ψ_2 – правый обратный, то они совпадают, так как $\psi_1 = \psi_1(\varphi\psi_2) = (\psi_1\varphi)\psi_2 = \psi_2$. А следовательно совпадают все левые обратные со всеми правыми и такой единственный элемент называют *обратным* и обозначают φ^{-1} , а φ называют *обратимым*. Легко проверить следующее.

Утверждение. Пусть $\varphi: X \rightarrow Y$ – некоторое отображение. Тогда

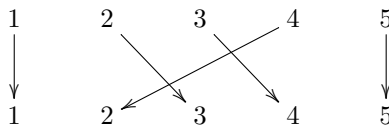
1. φ инъективно тогда и только тогда, когда φ обладает левым обратным.
2. φ сюръективно тогда и только тогда, когда φ обладает правым обратным.
3. φ биективно тогда и только тогда, когда φ обратимо.

3.2 Перестановки

Пусть $X_n = \{1, \dots, n\}$ – конечное множество из n занумерованных элементов.²¹ Перестановкой называется биективное отображение $\sigma: X_n \rightarrow X_n$. Множество всех перестановок на n элементном множестве будем обозначать через S_n .

Как задавать перестановки Как только вам встречается новый объект, первый важный вопрос – а как подобные объекты вообще задавать? Для перестановок есть три способа:

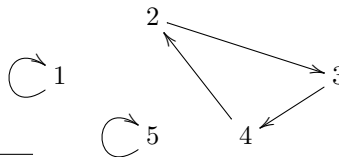
1. Задать стрелками соответствие на элементах



2. С помощью таблицы значений (графика). Здесь под каждым элементом пишется его образ:

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 3 & 4 & 2 & 5 \end{pmatrix}$$

3. Графически в виде действия на элементах



¹⁹В теории множеств, множества – это мешки с элементами, а отображения «сравнивают» эти мешки между собой. Биекция, между множествами говорит, что это по сути одно и то же множество, но по-разному заданное. Потому на биекцию между X и Y можно смотреть не как на отображение между разными множествами, а как на правило «переименовывающее» элементы на одном и том же множестве.

²⁰Легко проверить, что существование левого обратного никак не связано с существованием правого обратного и наоборот.

²¹Формально говоря, это множество из n элементов и фиксированный линейный порядок на нем.

Все эти виды записи однозначно задают перестановку. Самым популярным методом в литературе является второй способ. В общем виде для перестановки $\sigma \in S_n$ табличная запись выглядит следующим образом:

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ \sigma(1) & \sigma(2) & \dots & \sigma(n) \end{pmatrix}$$

Заметим, что, если записать элементы $1, \dots, n$ в другом порядке, скажем, i_1, \dots, i_n , то перестановка σ запишется в виде²²

$$\begin{pmatrix} i_1 & i_2 & \dots & i_n \\ \sigma(i_1) & \sigma(i_2) & \dots & \sigma(i_n) \end{pmatrix}$$

Из однозначности табличной записи получаем следующее.

Утверждение. Количество перестановок на n элементах есть $n!$, т.е. $|S_n| = n!$.

3.3 Операция на перестановках

Так как перестановки являются отображениями, а на отображениях есть операция композиции, то и на перестановках появляется операция. Пусть $\sigma, \tau \in S_n$ – две произвольные перестановки, определим $\sigma\tau$ как композицию, т.е. $\sigma\tau(k) = \sigma(\tau(k))$. На языке диаграмм

$$\begin{array}{ccccc} X_n & \xrightarrow{\tau} & X_n & \xrightarrow{\sigma} & X_n \\ & \searrow \sigma\tau & & \nearrow & \end{array}$$

Важно Обратите внимание, что перестановки применяются к элементам справа налево. Это связано с тем, что они являются отображениями, а когда вы считаете композицию отображений, то вы сначала применяете к аргументу самое правое, потом следующее за ним и так далее.

Давайте посмотрим как выглядит произведение двух перестановок в табличной записи. Пусть даны перестановки

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 4 & 1 & 2 & 3 \end{pmatrix} \text{ и } \tau = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 2 & 1 & 4 & 3 \end{pmatrix}$$

То перестановки $\sigma\tau$ и $\tau\sigma$ имеют вид

$$\sigma\tau = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 4 & 3 & 2 \end{pmatrix} \text{ и } \tau\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 3 & 2 & 1 & 4 \end{pmatrix}$$

Свойства умножения

- Если $\sigma, \tau, \rho \in S_n$ – произвольные перестановки, то как легко видеть по определению $(\sigma\tau)\rho = \sigma(\tau\rho)$. То есть в выражениях составленных из перестановок и произведений не важно в каком порядке расставлять скобки. Потому скобки обычно опускаются.
- Умножение перестановок не коммутативно, то есть вообще говоря $\sigma\tau \neq \tau\sigma$.²³
- Тожественное отображение Id является нейтральным элементом для умножения перестановок в том смысле, что верно $\text{Id}\sigma = \sigma\text{Id} = \sigma$ для любой перестановки σ . В табличной записи Id имеет вид

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ 1 & 2 & \dots & n \end{pmatrix}$$

- Обратное отображение к σ будем обозначать через σ^{-1} . Оно будет обратным элементом относительно операции в том смысле, что $\sigma\sigma^{-1} = \sigma^{-1}\sigma = \text{Id}$. В табличной записи обратное отображение можно записать так

$$\begin{pmatrix} \sigma(1) & \sigma(2) & \dots & \sigma(n) \\ 1 & 2 & \dots & n \end{pmatrix}$$

²²Заметим, что в этой записи можно произвольным образом перемешивать столбцы, это никак не изменит задаваемую перестановку.

²³Один пример мы уже видели, еще один будет в разделе «Циклические перестановки».

3.4 Переименование элементов

В нашем определении перестановка – это биекция на множестве X_n . Однако, элементы X_n имеют конкретные имена – это числа от 1 до n . А что произойдет, если мы сменим имена элементов? Как изменится табличная запись перестановки?

В начале надо понять, что значит переименование элементов. Во-первых, у нас есть запас старых имен $\{1, \dots, n\}$, во-вторых, у нас должен быть список новых имен, скажем, $\{“1”, \dots, “n”\}$ и, в-третьих, у нас должно быть соответствие, которое по старым именам строит новые, т.е. $\tau: \{1, \dots, n\} \rightarrow \{“1”, \dots, “n”\}$. Потому, если мысленно убрать кавычки, то на переименование можно смотреть как на перестановку $\tau: X_n \rightarrow X_n$.

Пусть теперь у нас есть перестановка $\sigma: X_n \rightarrow X_n$. Ее можно записать в табличном виде в старых и новых именах. Чтобы различать эти таблицы мы будем использовать обозначения $\sigma_{\text{стар}}$ и $\sigma_{\text{нов}}$ для них соответственно. Тогда мы можем записать связь между ними с помощью следующей диаграммы:

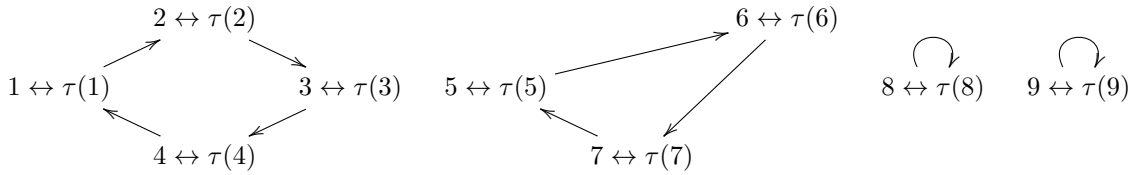
$$\begin{array}{ccc} \{1, \dots, n\} & \xrightarrow{\tau} & \{“1”, \dots, “n”\} \\ \sigma_{\text{стар}} \downarrow & & \downarrow \sigma_{\text{нов}} \\ \{1, \dots, n\} & \xrightarrow{\tau} & \{“1”, \dots, “n”\} \end{array}$$

Если вспомнить, что $\{“1”, \dots, “n”\} = \{\tau(1), \dots, \tau(n)\}$, то действие $\sigma_{\text{нов}}$ в новых именах устроено так: мы берем произвольный элемент с новым именем $\tau(k)$, находим его старое имя – k , на старом имени можем подействовать $\sigma_{\text{стар}}$, которое есть $\sigma(k)$, а теперь надо найти новое имя для образа, что есть $\tau(\sigma(k))$.

Подытожим, что $\sigma_{\text{нов}} = \tau \sigma_{\text{стар}} \tau^{-1}$. В табличной записи перестановки выглядят так

$$\sigma_{\text{стар}} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ \sigma(1) & \sigma(2) & \dots & \sigma(n) \end{pmatrix} \quad \sigma_{\text{нов}} = \begin{pmatrix} \tau(1) & \tau(2) & \dots & \tau(n) \\ \tau(\sigma(1)) & \tau(\sigma(2)) & \dots & \tau(\sigma(n)) \end{pmatrix}$$

Хорошо еще иметь перед глазами следующую картинку:



Здесь в вершинах подписаны и старые и новые имена, а перестановка одна и та же.

3.5 Циклы

Пусть $\sigma \in S_n$ действует следующим образом: для некоторого множества i_1, \dots, i_k ($k \geq 2$) выполнено

$$\sigma(i_1) = i_2, \dots, \sigma(i_{k-1}) = i_k, \sigma(i_k) = i_1,$$

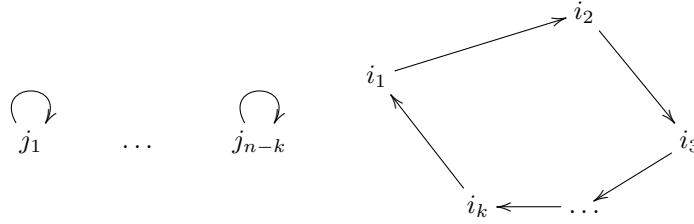
а все остальные элементы остаются на месте под действием σ . Тогда σ называется *циклом* длины k . Такая перестановка для краткости обозначается (i_1, \dots, i_k) . Заметим, что такая запись не единственная: например, можно сказать $\sigma = (i_2, \dots, i_k, i_1)$.²⁴ Стоит отметить, что если в определении выше выбрать $k = 1$, то перестановка обозначаемая (i_1) совпадает с тождественной перестановкой. Потому циклов длины 1 просто не существует. Однако, в некоторых случаях сама запись (i_1) является удобным обозначением для единообразия в формулах. Потому такие «циклы» принято называть тривиальными (подразумевая не цикл, а обозначение), а настоящие циклы – нетривиальными.

Таблицей цикл задается следующим образом

$$\begin{pmatrix} i_1 & \dots & i_{k-1} & i_k & j_1 & \dots & j_{n-k} \\ i_2 & \dots & i_k & i_1 & j_1 & \dots & j_{n-k} \end{pmatrix}$$

²⁴Как легко видеть, другой неоднозначности в записи цикла нет.

где $\{1, \dots, n\} = \{i_1, \dots, i_k\} \sqcup \{j_1, \dots, j_{n-k}\}$. Графически этот цикл выглядит так



Цикл длины 2 называется *транспозицией*, т.е. транспозиция (i, j) – это перестановка двух элементов i и j . Два цикла (i_1, \dots, i_k) и (j_1, \dots, j_m) называются *независимыми*, если множества $\{i_1, \dots, i_k\}$ и $\{j_1, \dots, j_m\}$ не пересекаются, т.е. множества действительно перемещаемых элементов не пересекаются. Заметим, что независимые циклы коммутируют друг с другом, а зависимые вообще говоря нет, как показывает следующий пример: $(1, 2)(2, 3) = (1, 2, 3)$, а $(2, 3)(1, 2) = (3, 2, 1)$.^{25 26}

Утверждение 11. Пусть $\rho = (i_1, \dots, i_k) \in S_n$ – некоторый цикл длины k и $\tau \in S_n$ – произвольная перестановка, тогда

$$\tau(i_1, \dots, i_k)\tau^{-1} = (\tau(i_1), \dots, \tau(i_k))$$

Доказательство. Есть два способа понять это равенство. Первый – посмотреть на τ как на переименование элементов. Тогда справа написан цикл по элементам с новыми именами, а слева – правило переименования.

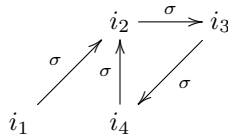
Второй способ – проверка в лоб. Надо проверить, что и левая и правая часть одинаково действуют на всех элементах вида $\tau(i)$. Возьмем элемент $\tau(i_1)$, тогда правая часть его переводит в $\tau(i_2)$. Посмотрим, что с ним делает левая часть. Вначале, мы переходим в i_1 , потом в i_2 , а потом в $\tau(i_2)$. Получили то же самое. Аналогично проверяется, что $\tau(i)$ остается на месте, если i не совпадает ни с одним из i_s . \square

Теперь мы готовы доказать структурный результат о перестановках.

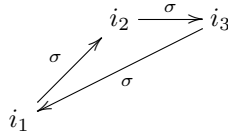
Утверждение 12. Пусть $\sigma \in S_n$ – произвольная перестановка. Тогда

1. Перестановку σ можно представить в виде $\sigma = \rho_1 \dots \rho_k$, где ρ_i – независимые циклы. Причем это представление единственное с точностью до перестановки сомножителей.
2. Пусть $\rho \in S_n$ – произвольный цикл длины k , тогда его можно представить в виде $\rho = \tau_1 \dots \tau_{k-1}$, где τ_i – транспозиции.²⁷

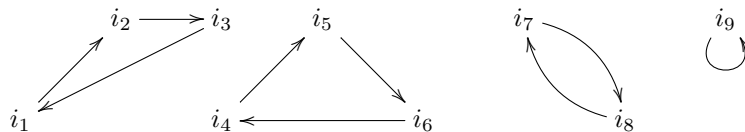
Доказательство. (1) Пусть $i_1 \in X_n$ – произвольный элемент. Подействуем на него σ , получим $i_2 = \sigma(i_1)$ и т.д. Так как X_n конечно, то мы в какой-то момент повторимся, например $i_5 = i_2$, как на рисунке ниже



На этой картинке видно, что $\sigma(i_1) = \sigma(i_4)$, но σ инъективно, потому $i_1 = i_4$. То есть правильная картинка следующая



Далее возьмем элемент, который не попал на этот цикл и повторим рассуждение для него. Так найдем другой цикл и т.д. В итоге картинка будет приблизительно такая



²⁵Проверьте это.

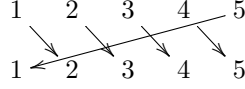
²⁶Зависимые циклы могут коммутировать, например $(1, 2)$ коммутирует с $(1, 2)$.

²⁷Это представление уже не единственное.

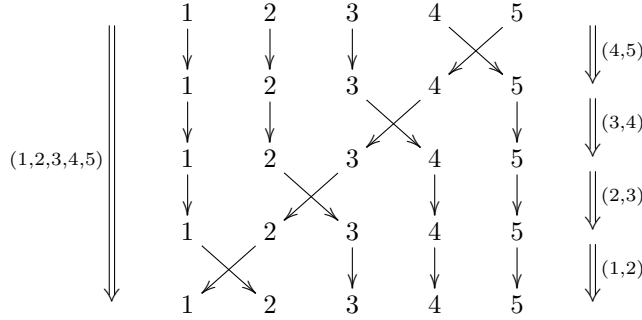
Значит перестановка выше раскладывается в циклы $\sigma = (i_1, i_2, i_3)(i_4, i_5, i_6)(i_7, i_8)$.²⁸

Единственность такого разложения следует из метода пристального взгляда на картинку и наше рассуждение. Если нужно формальное объяснение, то нужно делать так. Пусть $\sigma = \rho_1 \dots \rho_k$ и пусть $\rho_1 = (i_1, \dots, i_s)$. Подействуем σ на элемент i_1 . Так как циклы справа независимы, то только ρ_1 действует на i_1 и значит $\sigma(i_1) = \rho_1 \dots \rho_k(i_1) = i_2$. То есть i_2 однозначно определено. Продолжая в том же духе, мы видим, что все циклы однозначно определяются через σ .

(2) Пусть цикл σ действует по правилу как на картинке ниже



Чтобы получить цикл длины k нам необходимо применить $k - 1$ транспозицию. То есть в нашем примере надо применить 4. Сделаем это следующим образом



То есть в общем случае $(1, 2, \dots, k) = (1, 2)(2, 3) \dots (k - 2, k - 1)(k - 1, k)$.

□

Давайте поймем, почему представление во втором случае не единственное. Рассмотрим перестановку $(1, 2)(2, 3)$. Тогда

$$(1, 2)(2, 3) = (1, 2)(2, 3)(1, 2)^{-1}(1, 2) = (1, 3)(1, 2)$$

здесь в первом равенстве мы поделили и домножили на $(1, 2)$, а во втором воспользовались утверждением 11.

3.6 Знак перестановки

Рассмотрим произвольное отображение

$$\phi: S_n \rightarrow \{\pm 1\}$$

удовлетворяющее следующим двум свойствам:

1. $\phi(\sigma\tau) = \phi(\sigma)\phi(\tau)$ для любых $\sigma, \tau \in S_n$.²⁹
2. $\phi \neq 1$, т.е. ϕ не равно тождественно 1.

Заметим, что несложно найти отображение удовлетворяющее только первому свойству, например, $\phi(\sigma) = 1$ для любого σ , что не интересно. Наша основная задача доказать следующее.

Утверждение 13. *Существует единственное отображение $\phi: S_n \rightarrow \{\pm 1\}$ обладающее свойствами (1) и (2).*

В этом случае такое отображение обозначается $\text{sgn}: S_n \rightarrow \{\pm 1\}$ и называется знаком. Значение $\text{sgn}(\sigma)$ называется знаком перестановки $\sigma \in S_n$. Перестановка называется четной, если знак 1 и нечетной, если -1 .

²⁸Цикл (i_9) здесь не используется, так как он совпадает с тождественной перестановкой Id , как и любой другой цикл длины 1.

²⁹Здесь справа стоит произведение чисел вида 1 или -1 .

Существование Обычно знак перестановки σ определяют в виде $(-1)^{d(\sigma)}$, где $d(\sigma)$ – некоторая целочисленная характеристика перестановки σ . Классическим определением является *число беспорядков*.³⁰

Пусть $\sigma \in S_n$ – некоторая перестановка и $i, j \in X_n$ – пара различных элементов. Тогда эта пара называется *инверсией*, если « σ меняет характер монотонности», т.е. $i < j$ влечет $\sigma(i) > \sigma(j)$, а $i > j$ влечет $\sigma(i) < \sigma(j)$. Если использовать запись перестановки в виде

$$\begin{array}{ccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \downarrow & \swarrow & \searrow & \swarrow & \downarrow \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{array}$$

то инверсия соответствует пересечению стрелок. Определим число $d_{ij}(\sigma) = 1$, если пара i, j образует инверсию и 0, если не образуют. Тогда число всех инверсий для всевозможных пар это $d(\sigma) = \sum_{i < j} d_{ij}(\sigma)$. Определим отображение $\text{sgn}: S_n \rightarrow \{\pm 1\}$ по правилу $\text{sgn}(\sigma) = (-1)^{d(\sigma)}$. Для доказательства существования надо проверить, что sgn обладает указанными свойствами (1) и (2), то есть надо доказать следующее.

Утверждение. Пусть $\sigma, \tau \in S_n$ – произвольные перестановки, тогда

$$\text{sgn}(\sigma\tau) = \text{sgn}(\sigma) \text{sgn}(\tau) \quad \text{и} \quad \text{sgn}(1, 2) = -1$$

Доказательство. Второе утверждение очевидно, в перестановке $(1, 2)$ всего одна инверсия, а значит $\text{sgn}(1, 2) = -1$.

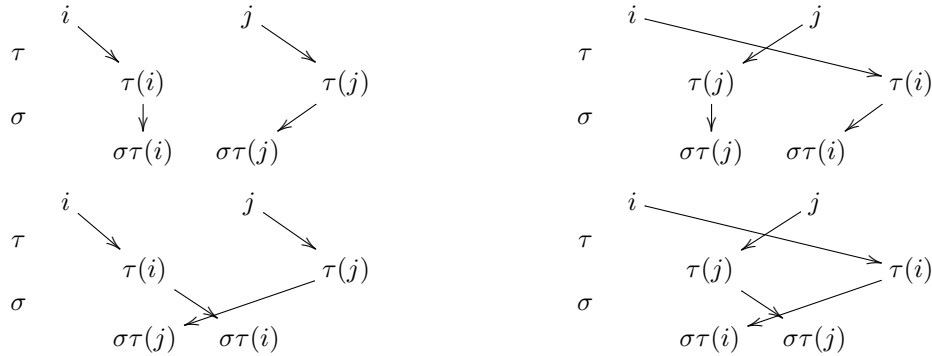
Для доказательства первого надо показать, что

$$d(\sigma) + d(\tau) = d(\sigma\tau) \pmod{2}$$

Давайте фиксируем пару i, j и докажем следующее равенство

$$d_{ij}(\tau) + d_{\tau(i)\tau(j)}(\sigma) = d_{ij}(\sigma\tau) \pmod{2}$$

Возможны следующие 4 случая:



Занесем результаты в таблицу

$d_{ij}(\tau)$	0	1	0	1
$d_{\tau(i)\tau(j)}(\sigma)$	0	0	1	1
$d_{ij} + d_{\tau(i)\tau(j)}(\sigma)$	0	1	1	2
$d_{ij}(\sigma\tau)$	0	1	1	0

Что доказывает равенство

$$d_{ij}(\tau) + d_{\tau(i)\tau(j)}(\sigma) = d_{ij}(\sigma\tau) \pmod{2}$$

Теперь сложим его для всех пар $i < j$. Получим

$$\sum_{i < j} d_{ij}(\tau) + \sum_{i < j} d_{\tau(i)\tau(j)}(\sigma) = \sum_{i < j} d_{ij}(\sigma\tau) \pmod{2}$$

Откуда

$$d(\tau) + \sum_{i < j} d_{\tau(i)\tau(j)}(\sigma) = d(\sigma\tau) \pmod{2}$$

Так как $\tau: X_n \rightarrow X_n$ – биекция, то если (i, j) пробегает все разные пары, то и $(\tau(i), \tau(j))$ пробегает все разные пары. Значит оставшаяся сумма равна $d(\sigma)$, что завершает доказательство. \square

³⁰Оно же *число инверсий*.

Единственность

Утверждение. Пусть $\phi: S_n \rightarrow \{\pm 1\}$ обладает свойством (1). Тогда

1. $\phi(\text{Id}) = 1$
2. $\phi(\sigma^{-1}) = \phi(\sigma)^{-1}$
3. Значение ϕ совпадает на всех транспозициях.

Доказательство. (1) Рассмотрим цепочку равенств

$$\phi(\text{Id}) = \phi(\text{Id}^2) = \phi(\text{Id})\phi(\text{Id})$$

Так как это числовое равенство (все числа ± 1), то можно сократить на $\phi(\text{Id})$ и получим требуемое.

(2) Рассмотрим цепочку равенств

$$1 = \phi(\text{Id}) = \phi(\sigma\sigma^{-1}) = \phi(\sigma)\phi(\sigma^{-1})$$

Значит число $\phi(\sigma^{-1})$ является обратным к $\phi(\sigma)$.³¹

(3) Заметим, что для любых различных $i, j \in X_n$ у нас обязательно существует перестановка $\tau \in S_n$ такая, что $\tau(1) = i$ и $\tau(2) = j$.³² Тогда по утверждению 11 получаем $(i, j) = \tau(1, 2)\tau^{-1}$. А значит

$$\phi(i, j) = \phi(\tau(1, 2)\tau^{-1}) = \phi(\tau)\phi(1, 2)\phi(\tau^{-1}) = \phi(1, 2)\phi(\tau)\phi(\tau^{-1}) = \phi(1, 2)$$

В предпоследнем равенстве мы воспользовались тем, что числа можно переставлять. Следовательно, значение на любой транспозиции равно значению на фиксированной транспозиции $(1, 2)$. То есть значение на всех транспозициях одинаковое. \square

Теперь давайте докажем единственность. Пусть у нас существуют два таких отображения $\phi, \psi: S_n \rightarrow \{\pm 1\}$ удовлетворяющие свойствам (1) и (2). Давайте покажем, что $\phi(\sigma) = \psi(\sigma)$ для любой $\sigma \in S_n$. Из утверждения 12 следует, что σ представляется в виде $\sigma = \tau_1 \dots \tau_r$, где τ_i – транспозиции.

Значение ϕ одно и то же на всех транспозициях: либо 1, либо -1 . Предположим, что значение равно 1. Тогда $\phi(\sigma) = \phi(\tau_1 \dots \tau_r) = \phi(\tau_1) \dots \phi(\tau_r) = 1$ для всех $\sigma \in S_n$, что противоречит свойству (2). А значит $\phi(\tau) = -1$ для любой транспозиции τ . Аналогично, $\psi(\tau) = -1$ для любой транспозиции τ . А следовательно

$$\phi(\sigma) = \phi(\tau_1 \dots \tau_r) = \phi(\tau_1) \dots \phi(\tau_r) = (-1)^r = \psi(\tau_1) \dots \psi(\tau_r) = \psi(\tau_1 \dots \tau_r) = \psi(\sigma)$$

То есть, на самом деле, все определяется значением на транспозиции.

3.7 Подсчет знака

Декремент Декремент перестановки $\sigma \in S_n$ – это

$$\text{dec}(\sigma) = n - \text{«количество нетривиальных циклов»} - \text{«количество неподвижных точек»}$$

Если рассматривать все неподвижные точки как тривиальные «циклы», то формула превращается в

$$\text{dec}(\sigma) = n - \text{«количество циклов»}$$

Декремент можно описать еще так: каждая перестановка σ определяет граф на множестве вершин X_n , где (i, j) – ребро, если $\sigma(i) = j$. Тогда

$$\text{dec}(\sigma) = \text{«количество вершин»} - \text{«количество компонент графа»}$$

Утверждение 14. Пусть $\sigma \in S_n$, тогда $\text{sgn}(\sigma) = (-1)^{\text{dec}(\sigma)}$.

³¹Так как все наши числа ± 1 , то можно было бы сказать $\phi(\sigma^{-1}) = \phi(\sigma)$. Но в указанной форме равенство лучше запоминается и встретится вам еще не раз.

³²Я оставляю это как упражнение.

Доказательство. Действительно, разложим перестановку σ в произведение независимых циклов $\sigma = \rho_1 \dots \rho_k$. Пусть длины циклов d_1, \dots, d_k , соответственно. Тогда

$$\text{sgn}(\sigma) = (-1)^{d_1-1} \dots (-1)^{d_k-1} = (-1)^{\sum_i d_i - k}$$

Пусть s – количество неподвижных точек. Тогда

$$\text{sgn}(\sigma) = (-1)^{(\sum_i d_i + s) - k - s} = (-1)^{n - k - s} = (-1)^{\text{dec}(\sigma)}$$

□

При подсчете знака перестановки надо пользоваться декрементом. То есть надо разложить перестановку в произведение независимых циклов и сложить их длины без единицы. Например:

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 4 & 8 & 2 & 3 & 7 & 1 & 5 & 9 & 6 \end{pmatrix}$$

Теперь видим, что

$$\begin{aligned} 1 &\rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 8 \rightarrow 9 \rightarrow 6 \rightarrow 1 \\ 5 &\rightarrow 7 \rightarrow 5 \end{aligned}$$

Значит $\sigma = (1, 4, 3, 2, 8, 9, 6)(5, 7)$, а значит $\text{dec}(\sigma) = 6 + 1 = 7$ и $\text{sgn}(\sigma) = -1$.

3.8 Возведение в степень

Прежде всего сделаем два простых наблюдения:

1. Пусть $\sigma, \tau \in S_n$ – две коммутирующие перестановки, тогда $(\sigma\tau)^m = \sigma^m \tau^m$.
2. Пусть $\rho \in S_n$ – цикл длины d , тогда d совпадает с наименьшим натуральным числом k таким, что $\rho^k = \text{Id}$.

Пусть теперь $\sigma \in S_n$ – произвольная перестановка. Мы можем разложить ее в произведение независимых циклов $\sigma = \rho_1 \dots \rho_k$ с длинами d_1, \dots, d_k , соответственно. Тогда

$$\sigma^m = \rho_1^m \dots \rho_k^m = \rho_1^{m \pmod{d_1}} \dots \rho_k^{m \pmod{d_k}}$$

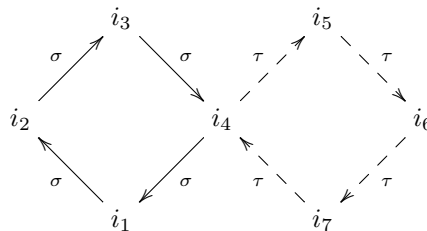
Таким образом, расчет произвольной степени перестановки σ сводится к возведению циклов в степень не большую их длины.

Оставим еще одно замечание в качестве упражнения. Если $\sigma = \rho_1 \dots \rho_k$ – разложение в произведение независимых циклов длин d_1, \dots, d_k , соответственно, то наименьшее натуральное r такое, что $\sigma^r = \text{Id}$, равно наименьшему общему кратному чисел d_1, \dots, d_k .

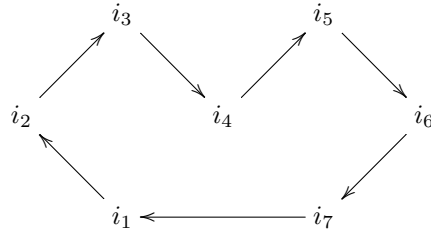
3.9 Произведение циклов

В этом разделе я приведу несколько примеров того, как перемножаются между собой зависимые циклы.

Два цикла Пусть циклы $\sigma, \tau \in S_n$ пересекаются по одному элементу как на рисунке ниже

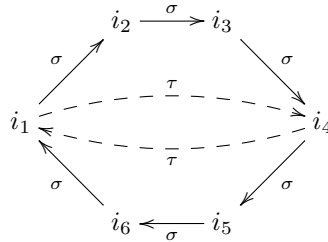


Надо найти произведение $\sigma\tau$. Нетрудно видеть, что результат имеет следующий вид:

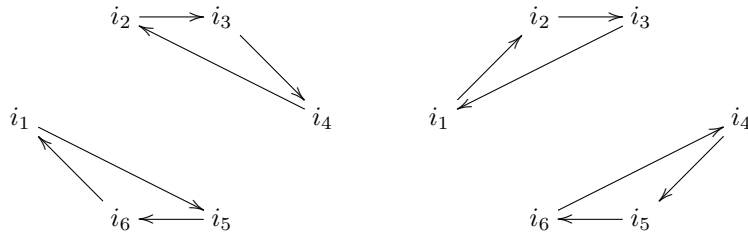


Таким образом мы получили формулу $(i_1, \dots, i_k)(i_k, \dots, i_n) = (i_1, \dots, i_n)$.

Цикл и транспозиция Пусть $\sigma, \tau \in S_n$, где σ – цикл, а τ – транспозиция, переставляющая два элемента цикла σ как на рисунке ниже.



Вот так выглядят композиции для $\sigma\tau$ и $\tau\sigma$ соответственно

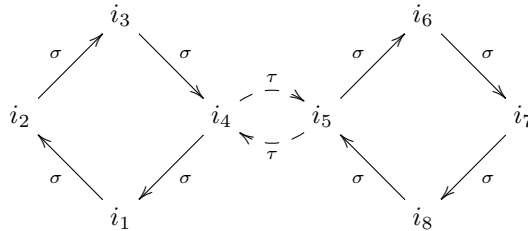


Таким образом общее правило выглядит так:

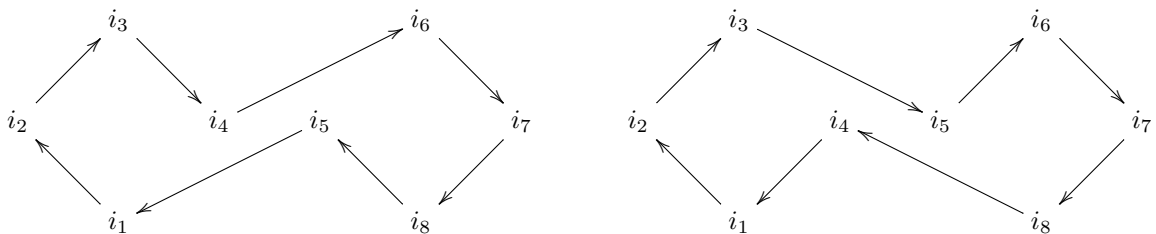
$$(i_1, \dots, i_n)(i_1, i_k) = (i_1, i_{k+1}, \dots, i_n)(i_2, \dots, i_k)$$

$$(i_1, i_k)(i_1, \dots, i_n) = (i_1, \dots, i_{k-1})(i_k, \dots, i_n)$$

Пара циклов и транспозиция Пусть $\sigma, \tau \in S_n$, причем σ – произведение двух независимых циклов, а τ – транспозиция, переставляющая две вершины из разных циклов как на рисунке ниже.



Произведения $\sigma\tau$ и $\tau\sigma$ имеют вид



Таким образом общее правило выглядит так

$$\begin{aligned}(i_1, \dots, i_k)(i_{k+1}, \dots, i_n)(i_k, i_{k+1}) &= (i_1, \dots, i_k, i_{k+2}, \dots, i_n, i_{k+1}) \\(i_k, i_{k+1})(i_1, \dots, i_k)(i_{k+1}, \dots, i_n) &= (i_k, i_1, \dots, i_{k-1}, i_{k+1}, \dots, i_n)\end{aligned}$$

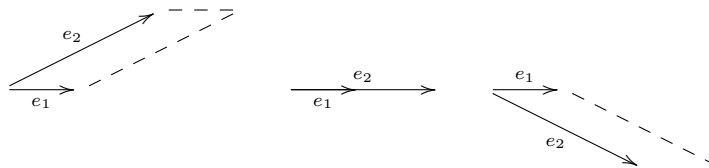
4 Определитель

4.1 Философия

Сейчас я хочу обсудить «ориентированный объем» на прямой, плоскости и в пространстве.

Прямая На прямой мы можем выбрать «положительное» направление. Обычно на рисунке выбирают слева направо. Тогда длина вектора, который смотрит слева направо, считается положительной, а справа налево – отрицательной.

Плоскость Здесь объем будет задаваться парой векторов, то есть некоторой квадратной матрицей размера 2, где вектора – это ее столбцы. Основная идея такая: пусть мы хотим посчитать площадь между двумя векторами на плоскости, точнее площадь параллелограмма натянутого на вектора e_1 и e_2 как на первом рисунке ниже.

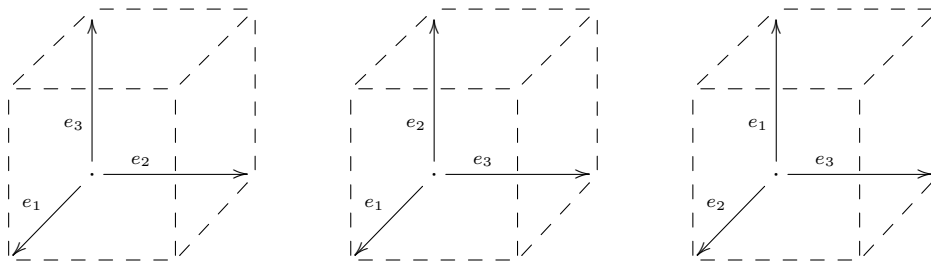


Давайте двигать вектор e_2 к вектору e_1 . Тогда площадь будет уменьшаться и когда вектора совпадут, она будет равна нулю. Однако, если мы продолжим двигать вектор e_2 , то площадь между векторами опять начнет расти и картинка в конце концов станет симметрична исходной, а полученный параллелограмм равен изначальному. Однако, эта ситуация отличается от предыдущей и вот как можно понять чем. Предположим, что между векторами была натянута хорошо сжимаемая ткань, одна сторона которой красная, другая – зеленая. Тогда в самом начале на нас смотрит красная сторона этой ткани, но как только e_2 прошел через e_1 на нас уже смотрит зеленая сторона. Мы бы хотели научиться отличать эти две ситуации с помощью знака, если на нас смотрит красная сторона – знак положительный, если зеленая – отрицательный.

Еще один способ думать про эту ситуацию. Представим, что плоскость – это наш стол, а параллелограмм вырезан из бумаги. Мы можем положить параллелограмм на стол двумя способами: лицевой стороной вверх или же вниз. В первом случае мы считаем площадь положительной, а во втором – отрицательной. Возможность определить лицевую сторону связана с тем, что мы знаем, где у стола верх, а где низ. Это возможно, потому что наша плоскость лежит в трехмерном пространстве и мы можем глядеть на нее извне. Однако, если бы мы жили на плоскости и у нас не было бы возможности выглянуть за ее пределы, то единственный способ установить «какой стороной вверх лежит параллелограмм» был бы с помощью порядка векторов.

Еще одно важное замечание. Если мы берем два одинаковых параллелограмма на нашем столе, которые лежат лицевой стороной вверх, то мы можем передвинуть один в другой, не отрывая его от стола. А вот если один из параллелограммов имеет положительный объем, а другой отрицательный, то нельзя перевести один в другой, не отрывая от стола. То есть, если вы живете на плоскости, то вам не получится переместить положительный параллелограмм в отрицательный, не сломав или не разобрав его.

Пространство В пространстве дело с ориентацией обстоит абсолютно аналогично. Мы хотим уже считать объемы параллелепипедов натянутых на три вектора. И мы так же хотим, чтобы эти объемы показывали «с какой стороны» мы смотрим на параллелепипед.



Здесь знак объема определяется по порядку векторов, как знак перестановки. На рисунке объемы первого и третьего положительные, а у второго отрицательный. Если вы сделаете модельки этих кубиков из подписан-

ных спичек, то третий кубик – это первый, но лежащий на другой грани. А вот второй кубик получить из первого вращениями не получится. Надо будет его разобрать и присобачить ребра по-другому.

Как и в случае с плоскостью, если бы мы могли выйти за пределы нашего трехмерного пространства, то у нас появилась бы лицевая и тыльная сторона, как у стола. И тогда первый и третий кубики лежали бы лицевой стороной вверх, а второй – вниз. Мы, конечно же, так сделать не сможем и никогда в жизни не увидим подобное, но думать про такое положение вещей по аналогии с плоскостью можем и эта интуиция бывает полезна.

Пояснение планов В текущей лекции я не собираюсь обсуждать объемы, а всего лишь хочу коснуться некоторой техники, которая используется для работы с ориентированными объемами. Чтобы начать честный рассказ про сами объемы (который обязательно будет, но позже), нам надо поговорить о том, что такое векторное пространство и как в абстрактном векторном пространстве мерить расстояния и углы. Потому, пока мы не покроем эти темы, всерьез говорить про настоящие объемы мы не сможем.

4.2 Три разных определения

Начнем с классического определения в виде явной формулы.

Определитель (I) Рассмотрим отображение $\det: M_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$, задаваемое следующей формулой: для любой матрицы $A \in M_n(\mathbb{R})$ положим

$$\det A = \sum_{\sigma \in S_n} \operatorname{sgn}(\sigma) a_{1\sigma(1)} \dots a_{n\sigma(n)}$$

Данное отображение называется *определителем*, а его значение $\det A$ на матрице A называется определителем матрицы A .

Давайте неформально обсудим, как считается выражение для определителя. Как мы видим определитель состоит из суммы некоторых произведений. Каждое произведение имеет вид $a_{1\sigma(1)} \dots a_{n\sigma(n)}$ умноженное на $\operatorname{sgn}(\sigma)$. Здесь из каждой строки матрицы A ³³ выбирается по одному элементу так, что никакие два элемента не лежат в одном столбце (это гарантировано тем, что σ – перестановка и потому $\sigma(i)$ не повторяются). Заметим, что слагаемых ровно столько, сколько перестановок – $n!$ штук. Из этих слагаемых половина идет со знаком плюс, а другая – со знаком минус.

Нормированные полилинейные кососимметрические отображения (II) Пусть $\phi: M_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$ – некоторое отображение и $A \in M_n(\mathbb{R})$. Тогда про матрицу A можно думать, как про набор из n столбцов: $A = (A_1 | \dots | A_n)$. Тогда функцию $\phi(A) = \phi(A_1, \dots, A_n)$ можно рассматривать как функцию от n столбцов.

В обозначениях выше рассмотрим отображения $\phi: M_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$, удовлетворяющие следующим свойствам:

1. $\phi(A_1, \dots, A_i + A'_i, \dots, A_n) = \phi(A_1, \dots, A_i, \dots, A_n) + \phi(A_1, \dots, A'_i, \dots, A_n)$ для любого i .
2. $\phi(A_1, \dots, \lambda A_i, \dots, A_n) = \lambda \phi(A_1, \dots, A_i, \dots, A_n)$ для любого i и любого $\lambda \in \mathbb{R}$.
3. $\phi(A_1, \dots, A_i, \dots, A_j, \dots, A_n) = -\phi(A_1, \dots, A_j, \dots, A_i, \dots, A_n)$ для любых различных i и j .
4. $\phi(E) = 1$.

Первые два свойства вместе называются *полилинейностью* ϕ по столбцам, т.е. это уважение суммы и умножения на скаляр. Третье свойство называется *кососимметричностью* ϕ по столбцам. Последнее условие – это условие нормировки. Данный набор свойств можно заменить эквивалентным с переформулированным третьим свойством:

1. $\phi(A_1, \dots, A_i + A'_i, \dots, A_n) = \phi(A_1, \dots, A_i, \dots, A_n) + \phi(A_1, \dots, A'_i, \dots, A_n)$ для любого i .
2. $\phi(A_1, \dots, \lambda A_i, \dots, A_n) = \lambda \phi(A_1, \dots, A_i, \dots, A_n)$ для любого i и любого $\lambda \in \mathbb{R}$.
3. $\phi(A_1, \dots, A', \dots, A', \dots, A_n) = 0$, т.е. если есть два одинаковых столбца, то значение ϕ равно нулю.
4. $\phi(E) = 1$.

³³Первый индекс – индекс строки.

Действительно, обозначим $\Phi(a, b) = \phi(A_1, \dots, a, \dots, b, \dots, A_n)$. Тогда Φ полилинейная функция двух аргументов.³⁴ И нам надо показать, что $\Phi(a, a) = 0$ для любого $a \in \mathbb{R}^n$ тогда и только тогда, когда $\Phi(a, b) = -\Phi(b, a)$ для любых $a, b \in \mathbb{R}^n$. Для \Rightarrow подставим $b = a$, получим $\Phi(a, a) = -\Phi(a, a)$. Для обратного \Leftarrow подставим $a + b$, получим $\Phi(a + b, a + b) = 0$. Раскроем скобки: $\Phi(a, a) + \Phi(a, b) + \Phi(b, a) + \Phi(b, b) = 0$. Откуда следует требуемое.

Пример На всякий случай поясню все свойства выше на примерах:

1. $\phi \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 2 & 7 \end{pmatrix} = \phi \left(\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} \middle| \begin{pmatrix} 3 \\ 7 \end{pmatrix} \right) = \phi \left(\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} \middle| \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \end{pmatrix} \right) = \phi \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 2 & 3 \end{pmatrix} + \phi \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 4 \end{pmatrix}$
2. $\phi \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 2 & 9 \end{pmatrix} = 3\phi \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 2 & 3 \end{pmatrix}$
3. $\phi \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 2 & 7 \end{pmatrix} = -\phi \begin{pmatrix} 3 & 1 \\ 7 & 2 \end{pmatrix}$
- 3' $\phi \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 2 & 2 \end{pmatrix} = 0$

Везде далее будем упоминать отображения с такими свойствами, как отображения со свойством (II).

Нормированные полилинейные кососимметрические отображения (II') Аналогично (II) можно рассмотреть полилинейные кососимметрические отображения по строкам матрицы A вместо столбцов. Тогда можно рассматривать отображения $\phi': M_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$ с аналогами четырех свойств выше: полилинейность, кососимметричность, значение 1 на единичной матрице. Такие отображения мы будем называть, как отображения со свойствами (II').

Специальные мультипликативные отображения (III) Рассмотрим множество отображений $\psi: M_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$ удовлетворяющие следующими свойствам:

1. $\psi(AB) = \psi(A)\psi(B)$ для любых $A, B \in M_n(\mathbb{R})$.
2. $\psi \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & 1 & \\ & & & d \end{pmatrix} = d$ для любого ненулевого $d \in \mathbb{R}$.

Всюду ниже будем упоминать отображения с такими свойствами, как отображения со свойством (I).³⁵

План дальнейших действий Наша задача показать, что, во-первых, определитель обладает свойствами (II), (II') и (III), а, во-вторых, что кроме определителя никакое другое отображение не удовлетворяет этим свойствам. То есть все три определения между собой эквивалентны. Самое сложное будет показать, что (III) влечет остальные два определения. Это означает, что (III) легко проверять, но из него сложно выводить какие-либо свойства. Самые полезные с вычислительной точки зрения – определения (II) и (II').

4.3 Явные формулы для определителя

Подсчет в малых размерностях

1. Если $A \in M_1(\mathbb{R}) = \mathbb{R}$, то $\det A = A$.
2. Если $A \in M_2(\mathbb{R})$ имеет вид $A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$, то $\det A = ad - bc$. Графически: главная диагональ минус побочная.

³⁴Такие отображения называются билинейными.

³⁵Обратите внимание, что существует много отображений со свойством (1), не удовлетворяющих свойству (2). Действительно, если ψ – мультипликативное отображение, то есть удовлетворяет только свойству (1), то $\gamma_n(A) = \psi(A)^n$ – тоже мультипликативное отображение для любого натурального $n \in \mathbb{N}$. Кроме того, $\delta_\alpha(A) = |\psi(A)|^\alpha$ тоже является мультипликативным отображением для любого положительного $\alpha \in \mathbb{R}$.

3. Если $A \in M_3(\mathbb{R})$ имеет вид $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$, то определитель получается из 6 слагаемых три из них с + три с -. Графически слагаемые можно изобразить так:

$$\det A = + \left(\begin{array}{c} \diagdown \\ \diagup \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \diagup \\ \diagdown \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \diagdown \\ \diagdown \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \diagup \\ \diagup \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \diagdown \\ \diagup \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \diagup \\ \diagdown \end{array} \right)$$

Точная формула³⁶

$$\det A = a_{11}a_{22}a_{33} + a_{12}a_{23}a_{31} + a_{13}a_{21}a_{32} - a_{13}a_{22}a_{31} - a_{12}a_{21}a_{33} - a_{11}a_{23}a_{32}$$

Треугольные матрицы

Утверждение 15. Для любых верхне и нижне треугольных матриц верны следующие формулы:

$$\det \begin{pmatrix} \lambda_1 & \dots & * \\ & \ddots & \vdots \\ & & \lambda_n \end{pmatrix} = \lambda_1 \dots \lambda_n \quad \det \begin{pmatrix} \lambda_1 & & \\ \vdots & \ddots & \\ * & \dots & \lambda_n \end{pmatrix} = \lambda_1 \dots \lambda_n$$

В частности $\det E = 1$.

Доказательство. Я докажу утверждение для верхнетреугольных матриц, нижнетреугольный случай делается аналогично. Для доказательства надо посчитать определитель по определению и увидеть, что только одно слагаемое соответствующее тождественной перестановке является не нулем. Действительно, рассмотрим выражение $a_{1\sigma(1)} \dots a_{n\sigma(n)}$. Посмотрим, когда это выражение не ноль. Последний множитель $a_{n\sigma(n)}$ лежит в последней строке и должен быть не ноль. Для этого должно выполняться $\sigma(n) = n$. Теперь $a_{n-1\sigma(n-1)}$ должен быть не ноль. Так как $\sigma(n) = n$, то $\sigma(n-1) \neq n$. А значит, чтобы $a_{n-1\sigma(n-1)}$ был не ноль, остается только один случай $\sigma(n-1) = n-1$. Продолжая аналогично, мы видим, что $\sigma(i) = i$ для всех строк i . \square

4.4 Свойства определителя

Определитель и транспонирование Прежде чем перейти к доказательству следующего утверждения сделаем одно полезное наблюдение. Если мы возьмем две произвольные перестановки $\sigma, \tau \in S_n$ и матрицу $A \in M_n(\mathbb{R})$, то выражения $a_{\tau(1)\sigma(\tau(1))} \dots a_{\tau(n)\sigma(\tau(n))}$ совпадает с выражением $a_{1\sigma(1)} \dots a_{n\sigma(n)}$ с точностью до перестановки сомножителей. Это делается методом пристального взгляда: замечаем что каждый сомножитель одного выражения ровно один раз встречается в другом и наоборот.

Утверждение 16. Пусть $A \in M_n(\mathbb{R})$, тогда $\det A = \det A^t$.

Доказательство. Посчитаем по определению $\det A^t$, получим

$$\det A^t = \sum_{\sigma \in S_n} \text{sgn}(\sigma) a_{\sigma(1)1} \dots a_{\sigma(n)n} = \sum_{\sigma \in S_n} \text{sgn}(\sigma) a_{\sigma(1)\sigma^{-1}(\sigma(1))} \dots a_{\sigma(n)\sigma^{-1}(\sigma(n))}$$

Теперь применим наше замечание перед доказательством:

$$a_{\sigma(1)\sigma^{-1}(\sigma(1))} \dots a_{\sigma(n)\sigma^{-1}(\sigma(n))} = a_{1\sigma^{-1}(1)} \dots a_{n\sigma^{-1}(n)}$$

Значит

$$\det A^t = \sum_{\sigma \in S_n} \text{sgn}(\sigma) a_{1\sigma^{-1}(1)} \dots a_{n\sigma^{-1}(n)}$$

Вспомним, что $\text{sgn}(\sigma) = \text{sgn}(\sigma^{-1})$. Следовательно:

$$\det A^t = \sum_{\sigma \in S_n} \text{sgn}(\sigma^{-1}) a_{1\sigma^{-1}(1)} \dots a_{n\sigma^{-1}(n)}$$

³⁶Для больших размерностей чем 3 на 3 явная формула не пригодна из-за слишком большого числа слагаемых. Даже с вычислительной точки зрения.

Теперь, если σ пробегает все перестановки, то σ^{-1} тоже пробегает все перестановки, так как отображение $S_n \rightarrow S_n$ по правилу $\sigma \mapsto \sigma^{-1}$ является биекцией.³⁷ То есть мы можем сделать замену $\tau = \sigma^{-1}$ и приходим к выражению

$$\det A^t = \sum_{\tau \in S_n} \operatorname{sgn}(\tau) a_{1\tau(1)} \dots a_{n\tau(n)}$$

Последнее в точности совпадает с определением $\det A$. \square

Отметим, что если мы доказали какое-то свойство определителя для столбцов, то это утверждение автоматически гарантирует, что такое же свойство выполнено и для строк. И наоборот, если что-то сделано для строк, то это автоматически следует для столбцов.

4.5 Полилинейность и кососимметричность определителя

Сейчас мы докажем, что определитель обладает всеми свойствами (II) и (II'). В силу утверждения 16 нам достаточно показать только (II).

Утверждение 17. *Отображение $\det: M_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$ рассматриваемое как отображение столбцов матрицы является полилинейным и кососимметричным, т.е. удовлетворяет следующим свойствам:*

1. $\det(A_1, \dots, A_i + A'_i, \dots, A_n) = \det(A_1, \dots, A_i, \dots, A_n) + \det(A_1, \dots, A'_i, \dots, A_n)$ для любого i .
2. $\det(A_1, \dots, \lambda A_i, \dots, A_n) = \lambda \det(A_1, \dots, A_i, \dots, A_n)$ для любого i и любого $\lambda \in \mathbb{R}$.
3. $\det(A_1, \dots, A_i, \dots, A_j, \dots, A_n) = -\det(A_1, \dots, A_j, \dots, A_i, \dots, A_n)$ для любых различных i и j .
4. $\det E = 1$.

Доказательство. Мы знаем, что

$$\det A = \det A^t = \sum_{\sigma \in S_n} \operatorname{sgn}(\sigma) a_{\sigma(1)1} \dots a_{\sigma(i)i} \dots a_{\sigma(n)n}$$

Проверим свойство (1):

$$\begin{aligned} \det(A_1, \dots, A_i + A'_i, \dots, A_n) &= \sum_{\sigma \in S_n} \operatorname{sgn}(\sigma) a_{\sigma(1)1} \dots (a_{\sigma(i)i} + a'_{\sigma(i)i}) \dots a_{\sigma(n)n} = \\ &= \sum_{\sigma \in S_n} \operatorname{sgn}(\sigma) a_{\sigma(1)1} \dots a_{\sigma(i)i} \dots a_{\sigma(n)n} + \sum_{\sigma \in S_n} \operatorname{sgn}(\sigma) a_{\sigma(1)1} \dots a'_{\sigma(i)i} \dots a_{\sigma(n)n} = \\ &= \det(A_1, \dots, A_i, \dots, A_n) + \det(A_1, \dots, A'_i, \dots, A_n) \end{aligned}$$

Теперь свойство (2):

$$\det(A_1, \dots, \lambda A_i, \dots, A_n) = \sum_{\sigma \in S_n} \operatorname{sgn}(\sigma) a_{\sigma(1)1} \dots (\lambda a_{\sigma(i)i}) \dots a_{\sigma(n)n} = \lambda \det(A_1, \dots, A_i, \dots, A_n)$$

Для проверки свойства (3) введем следующее обозначение. Пусть $\tau \in S_n$ обозначает транспозицию (i, j) . Тогда посчитаем определитель с переставленными местами столбцами i и j :

$$\begin{aligned} \det(A_1, \dots, A_j, \dots, A_i, \dots, A_n) &= \sum_{\sigma \in S_n} \operatorname{sgn}(\sigma) a_{\sigma(1)1} \dots a_{\sigma(i)j} \dots a_{\sigma(j)i} \dots a_{\sigma(n)n} = \\ &= \sum_{\sigma \in S_n} \operatorname{sgn}(\sigma) a_{\sigma(1)\tau(1)} \dots a_{\sigma(i)\tau(i)} \dots a_{\sigma(j)\tau(j)} \dots a_{\sigma(n)\tau(n)} = \\ &= \sum_{\sigma \in S_n} \operatorname{sgn}(\sigma) a_{\sigma(\tau^{-1}(1))1} \dots a_{\sigma(\tau^{-1}(n))n} = - \sum_{\sigma \in S_n} \operatorname{sgn}(\sigma\tau^{-1}) a_{\sigma(\tau^{-1}(1))1} \dots a_{\sigma(\tau^{-1}(n))n} \end{aligned}$$

³⁷ Оно биекция, так как имеет обратное – оно само.

Здесь при переходе от второй строчки к третьей мы воспользовались замечанием перед утверждением 16. Так как отображение $S_n \rightarrow S_n$ по правилу $\sigma \mapsto \sigma\tau^{-1}$ является биекцией, то если σ пробегает все перестановки, то и $\sigma\tau^{-1}$ пробегает все перестановки. А значит, делая замену $\rho = \sigma\tau^{-1}$, получаем

$$- \sum_{\sigma \in S_n} \operatorname{sgn}(\sigma\tau^{-1}) a_{\sigma(\tau^{-1}(1))1} \dots a_{\sigma(\tau^{-1}(n))n} = -\det(A_1, \dots, A_i, \dots, A_j, \dots, A_n)$$

(4) Это непосредственно следует из определения, либо, если хотите, можно сослаться на утверждение 15. \square

Утверждение 18. Пусть $\Phi: M_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$ – полилинейное кососимметричное отображение по столбцам. И пусть матрица A имеет нулевой столбец, тогда $\Phi(A) = 0$.³⁸

Доказательство. Пусть $A = (A_1 | \dots | 0 | \dots | A_n)$. Тогда

$$\Phi(A) = \Phi(A_1, \dots, 0, \dots, A_n) = \Phi(A_1, \dots, 0 + 0, \dots, A_n) = \Phi(A_1, \dots, 0, \dots, A_n) + \Phi(A_1, \dots, 0, \dots, A_n)$$

Теперь вычтем из обеих частей $\Phi(A_1, \dots, 0, \dots, A_n)$ и получим, что $\Phi(A_1, \dots, 0, \dots, A_n) = 0$. \square

Утверждение 19. Если $A \in M_n(\mathbb{R})$ имеет нулевой столбец или нулевую строку, то $\det A = 0$.

Доказательство. Так как определитель является полилинейной и кососимметричной функцией как по строкам так и по столбцам, то это утверждение следует из предыдущего. \square

Определитель от элементарных матриц

Утверждение 20. Верны следующие утверждения:

1. $\det(S_{ij}(\lambda)) = 1$, где $S_{ij}(\lambda) \in M_n(\mathbb{R})$ – матрица элементарного преобразования первого типа.
2. $\det(U_{ij}) = -1$, где $U_{ij} \in M_n(\mathbb{R})$ – матрица элементарного преобразования второго типа.
3. $\det(D_i(\lambda)) = \lambda$, где $D_i(\lambda) \in M_n(\mathbb{R})$ – матрица элементарного преобразования третьего типа.

Доказательство. (1) Является следствием для случая верхне- и нижнетреугольных матриц.

(2) Так как U_{ij} получается из единичной матрицы перестановкой i -го и j -го столбцов, то результат следует из кососимметричности определителя.

(3) Следует из полилинейности определителя – свойство (II) (2). \square

4.6 Полилинейные кососимметрические отображения

Все утверждения в этом разделе доказываются для строк. Соответствующие утверждения для столбцов доказываются аналогично. Их формулировки и доказательства я оставляю в качестве упражнения.

Утверждение 21. Пусть $\phi: M_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$ – полилинейное кососимметрическое отображение по строкам матриц, т.е. удовлетворяет следующим свойствам:³⁹

1. $\phi(A_1, \dots, A_i + A'_i, \dots, A_n) = \phi(A_1, \dots, A_i, \dots, A_n) + \phi(A_1, \dots, A'_i, \dots, A_n)$ для любого i .
2. $\phi(A_1, \dots, \lambda A_i, \dots, A_n) = \lambda \phi(A_1, \dots, A_i, \dots, A_n)$ для любого i и любого $\lambda \in \mathbb{R}$.
3. $\phi(A_1, \dots, A_i, \dots, A_j, \dots, A_n) = -\phi(A_1, \dots, A_j, \dots, A_i, \dots, A_n)$ для любых различных i и j .

Тогда $\phi(UA) = \det(U)\phi(A)$ для любой матрицы $A \in M_n(\mathbb{R})$ и любой элементарной матрицы $U \in M_n(\mathbb{R})$.

³⁸Аналогичное утверждение выполнено для полилинейного и кососимметричного отображения по строкам, тогда в матрице A должна быть нулевая строка.

³⁹Здесь через A_i обозначаются строки матрицы A идущие сверху вниз.

Доказательство. Случай $U = S_{ij}(\lambda)$.

$$\begin{aligned}\phi(S_{ij}(\lambda)A) &= \phi(A_1, \dots, A_i + \lambda A_j, \dots, A_j, \dots, A_n) = \\ &= \phi(A_1, \dots, A_i, \dots, A_j, \dots, A_n) + \lambda \phi(A_1, \dots, A_j, \dots, A_j, \dots, A_n) = \phi(A) = \det(S_{ij}(\lambda))\phi(A)\end{aligned}$$

Случай $U = U_{ij}$.

$$\phi(U_{ij}A) = \phi(A_1, \dots, A_j, \dots, A_i, \dots, A_n) = -\phi(A_1, \dots, A_i, \dots, A_j, \dots, A_n) = -\phi(A) = \det(U_{ij})\phi(A)$$

Случай $U = D_i(\lambda)$.

$$\phi(D_i(\lambda)A) = \phi(A_1, \dots, \lambda A_i, \dots, A_n) = \lambda \phi(A_1, \dots, A_i, \dots, A_n) = \lambda \phi(A) = \det(D_i(\lambda))\phi(A)$$

□

Определитель и элементарные матрицы Заметим, что по утверждению 17, определитель тоже является полилинейной и кососимметрической функцией. Потому доказанное утверждение в частности означает, что $\det(UA) = \det(U)\det(A)$ для любой матрицы $A \in M_n(\mathbb{R})$ и любой элементарной матрицы $U \in M_n(\mathbb{R})$.

Подсчет определителя Предыдущее замечание позволяет дать эффективный способ вычисления определителя методом Гаусса. Мы берем матрицу A и приводим ее к ступенчатому виду, попутно запоминая как изменился определитель по сравнению с определителем изначальной матрицы. Если же мы будем использовать только элементарные преобразования первого типа, то определитель вовсе меняться не будет. Ступенчатый вид матрицы всегда верхнетреугольный. Там определитель считается как произведение диагональных элементов.

Следствия утверждения 21

Утверждение 22 (Единственность для полилинейных кососимметричных). Пусть $\phi: M_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$ – полилинейное кососимметрическое отображение по строкам матриц. Тогда $\phi(X) = \det(X)\phi(E)$. В частности, если $\phi(E) = 1$, то $\phi = \det$.

Доказательство. Пусть $X \in M_n(\mathbb{R})$ – произвольная матрица, тогда ее можно элементарными преобразованиями строк привести к улучшенному ступенчатому виду. Последнее означает, что $X = U_1 \dots U_k S$, где S – матрица улучшенного ступенчатого вида, а U_i – матрицы элементарных преобразований. Применим к этому равенству отдельно ϕ и отдельно \det , получим

$$\begin{aligned}\phi(X) &= \det(U_1) \dots \det(U_k) \phi(S) \\ \det(X) &= \det(U_1) \dots \det(U_k) \det(S)\end{aligned}$$

Теперь для матрицы S у нас есть два варианта: либо S единичная, либо содержит нулевую строку.

Пусть $S = E$, тогда

$$\begin{aligned}\phi(X) &= \det(U_1) \dots \det(U_k) \phi(E) \\ \det(X) &= \det(U_1) \dots \det(U_k) \det(E)\end{aligned}$$

Откуда и получаем требуемое $\phi(X) = \det(X)\phi(E)$.

Пусть теперь S имеет нулевую строку. Тогда утверждения 18 и 19 гарантируют, что $\phi(S) = 0$ и $\det(S) = 0$. Что тоже влечет равенство $\phi(X) = \det(X)\phi(E)$. □

Утверждение 23 (Мультипликативность определителя). Пусть $A, B \in M_n(\mathbb{R})$ – произвольные матрицы. Тогда $\det(AB) = \det(A)\det(B)$.

Доказательство. Фиксируем матрицу $B \in M_n(\mathbb{R})$ и рассмотрим отображение $\gamma: M_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$ по правилу $A \mapsto \det(AB)$. Если A_1, \dots, A_n – строки матрицы A , то A_1B, \dots, A_nB – строки матрицы AB . Из этого легко видеть, что γ – полилинейна и кососимметрическая функция по строкам матрицы A . Значит по утверждению 22 $\gamma(A) = \det(A)\gamma(E)$. Но последнее равносильно $\det(AB) = \det(A)\det(B)$. □

Утверждение 24 (Определитель с углом нулей). Пусть $A \in M_n(\mathbb{R})$ и $B \in M_m(\mathbb{R})$. Тогда

$$\det \begin{pmatrix} A & * \\ 0 & B \end{pmatrix} = \det \begin{pmatrix} A & 0 \\ * & B \end{pmatrix} = \det(A) \det(B)$$

Доказательство. Рассмотрим функцию $\phi: M_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$ по правилу

$$\phi(X) = \det \begin{pmatrix} X & * \\ 0 & B \end{pmatrix}$$

Заметим, что эта функция является полилинейной и кососимметричной по столбцам матрицы X . В этом случае по утверждению 22 о единственности для полилинейных кососимметрических отображений она имеет вид $\phi(X) = \det(X)\phi(E)$, то есть

$$\det \begin{pmatrix} A & * \\ 0 & B \end{pmatrix} = \det A \det \begin{pmatrix} E & * \\ 0 & B \end{pmatrix}$$

Теперь рассмотрим функцию $\psi: M_m(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$ по правилу

$$\psi(X) = \det \begin{pmatrix} E & * \\ 0 & X \end{pmatrix}$$

Заметим, что эта функция является полилинейной и кососимметричной по строкам матрицы X . В этом случае по утверждению 22 о единственности для полилинейных кососимметрических отображений она имеет вид $\psi(X) = \det(X)\psi(E)$, то есть

$$\det \begin{pmatrix} E & * \\ 0 & B \end{pmatrix} = \det B \det \begin{pmatrix} E & * \\ 0 & E \end{pmatrix}$$

Последний определитель равен 1, так как по утверждению 15 определитель верхнетреугольной матрицы равен произведению ее диагональных элементов. Теперь собираем вместе доказанные факты и получаем требуемый результат. \square

Заметим, что таким образом мы можем считать определитель для блочно верхнетреугольных матриц и для блочно нижнетреугольных матриц с любым количеством блоков. Формулы тогда будут выглядеть так

$$\det \begin{pmatrix} A_1 & * & \dots & * \\ & A_2 & \dots & * \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & A_k \end{pmatrix} = \det \begin{pmatrix} A_1 & & & \\ * & A_2 & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ * & * & \dots & A_k \end{pmatrix} = \det A_1 \dots \det A_k$$

где $A_i \in M_{n_i}(\mathbb{R})$ – обязательно квадратные матрицы. Это правило является обобщением утверждения о вычислении определителя для треугольных матриц.

4.7 Мультипликативные отображения

Давайте подытожим, что мы показали. Утверждение 17 вместе с утверждением 16 объясняют почему определитель является полилинейной кососимметрической функцией как строк, так и столбцов. Далее утверждение 22 доказывает, что любая полилинейная кососимметричная функция по строкам, принимающая значение 1 на единичной матрице, должна быть определителем. С помощью утверждения 16 мы получаем аналогичный результат для столбцов. Таким образом мы показали эквивалентность подхода (I) подходам (II) и (II').

Теперь, утверждение 23 показывает, что определитель обязательно мультипликативен, а свойство (III) (2) следует из явных вычислений для элементарных матриц. Тем самым мы показали, что (I) и (II) влекут (III). Осталось показать, что (III) влечет (I), т.е. что определитель является единственной функцией с такими свойствами.

Утверждение 25. Пусть $\psi: M_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$ – отображение, удовлетворяющее свойствам:

1. $\psi(AB) = \psi(A)\psi(B)$ для любых $A, B \in M_n(\mathbb{R})$.

2. $\psi \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & 1 & \\ & & & d \end{pmatrix} = d$ для любого ненулевого $d \in \mathbb{R}$.

Тогда $\psi = \det$.

Доказательство этого утверждения разобьем в несколько этапов. В начале докажем элементарные свойства мультипликативных отображений.

Утверждение 26. Пусть $\psi: M_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$ отображение со свойством $\psi(AB) = \psi(A)\psi(B)$ для всех $A, B \in M_n(\mathbb{R})$. Тогда

1. Если $P \in M_n(\mathbb{R})$ такая, что $P^2 = P$, то $\psi(P)$ равно либо 0, либо 1.
2. В частности, значение $\psi(0)$ и $\psi(E)$ равно либо 0, либо 1.
3. Если $\psi(E) = 0$, то $\psi(A) = 0$ для любой матрицы $A \in M_n(\mathbb{R})$.
4. Если $\psi(0) = 1$, то $\psi(A) = 1$ для любой матрицы $A \in M_n(\mathbb{R})$.
5. Если $\psi(E) = 1$, то $\psi(A^{-1}) = \psi(A)^{-1}$ для любой обратимой матрицы $A \in M_n(\mathbb{R})$.

Доказательство. (1) Применим ψ к тождеству $P^2 = P$, получим $\psi(P) = \psi(P^2) = \psi(P)\psi(P)$. То есть число $\psi(P)$ в квадрате равно самому себе. Значит либо $\psi(P) = 0$, либо $\psi(P) = 1$.

(2) Заметим, что $E^2 = E$ и $0^2 = 0$ и воспользуемся предыдущим пунктом.

(3) Применим ψ к тождеству $A = AE$, получим $\psi(A) = \psi(A)\psi(E) = 0$.

(4) Применим ψ к тождеству $0 = A0$, получим $\psi(0) = \psi(A)\psi(0)$. И так как $\psi(0) = 1$ по предположению, то $\psi(A) = 1$.

(5) Применим ψ к тождеству $AA^{-1} = E$, получим $1 = \psi(E) = \psi(AA^{-1}) = \psi(A)\psi(A^{-1})$. Значит число $\psi(A^{-1})$ является обратным к числу $\psi(A)$, что и требовалось показать. \square

Утверждение 27. Пусть $\psi: M_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$ – отображение, удовлетворяющее свойствам:

1. $\psi(AB) = \psi(A)\psi(B)$ для любых $A, B \in M_n(\mathbb{R})$.
2. $\psi(D_n(\lambda)) = \lambda$ для любого ненулевого $\lambda \in \mathbb{R}$.

Тогда

1. $\psi(S_{ij}(\lambda)) = 1 = \det(S_{ij}(\lambda))$.
2. $\psi(U_{ij}) = -1 = \det(U_{ij})$.
3. $\psi(D_i(\lambda)) = \lambda = \det(D_i(\lambda))$.

Доказательство. В начале заметим, что $\psi(E) = 1$. Потому что иначе $\psi(A) = 0$ для любой матрицы, что противоречит второму свойству. А раз $\psi(E) = 1$, то можно пользоваться пунктом (5) предыдущего утверждения.

(1) Для доказательства воспользуемся следующим замечанием: если $A, B \in M_n(\mathbb{R})$ – произвольные обратимые матрицы, то $\psi(ABA^{-1}B^{-1}) = 1$. Действительно,

$$\psi(ABA^{-1}B^{-1}) = \psi(A)\psi(B)\psi(A)^{-1}\psi(B)^{-1} = \psi(A)\psi(A)^{-1}\psi(B)\psi(B)^{-1} = 1$$

Для доказательства нам достаточно представить $S_{ij}(\lambda)$ в таком виде. Давайте проверим, что

$$S_{ij}(\lambda) = D_i(2)S_{ij}(\lambda)D_i^{-1}(2)S_{ij}(\lambda)^{-1}$$

Это равенство проверяется непосредственно глядя на матрицы. Давайте для простоты проверим в случае 2 на 2, когда все наглядно:

$$\begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \lambda \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -\lambda \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2\lambda \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -\lambda \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \lambda \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

(3) Для доказательства этого пункта воспользуемся следующим наблюдением: если $A, B \in M_n(\mathbb{R})$ причем A обратима, тогда $\psi(ABA^{-1}) = \psi(B)$. Действительно,

$$\psi(ABA^{-1}) = \psi(A)\psi(B)\psi(A)^{-1} = \psi(B)\psi(A)\psi(A)^{-1} = \psi(B)$$

Мы уже знаем, что $\psi(D_n(\lambda)) = \lambda$ по условию. Надо лишь доказать, что для всех i выполнено $\psi(D_i(\lambda)) = \lambda$. Для этого достаточно представить $D_i(\lambda) = AD_{i+1}(\lambda)A^{-1}$. Возьмем в качестве $A = U_{i,i+1}$ элементарную матрицу переставляющую i и $i+1$ строки. Тогда $A^{-1} = A$. Более того, легко видеть, что $D_i(\lambda) = U_{i,i+1}D_{i+1}(\lambda)U_{i,i+1}^{-1}$. Действительно, умножение на $U_{i,i+1}$ слева переставляет i и $i+1$ строки, а умножение на $U_{i,i+1}$ справа равносильно умножению на $U_{i,i+1}^{-1}$ и оно переставляет i и $i+1$ столбцы. Для наглядности двумерный случай:

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

(2) Здесь мы воспользуемся тем, что элементарные преобразования второго типа можно выразить через элементарные преобразования первого и третьего типа, а именно, давайте проверим, что

$$U_{ij} = D_i(-1)S_{ji}(1)S_{ij}(-1)S_{ji}(1)$$

Применив ψ к этому равенству и воспользовавшись предыдущими двумя пунктами мы получаем требуемое. Однако, остается законный вопрос: а как вообще можно догадаться до такого и проверить? Вот вам рассуждение приводящее к такому ответу. Давайте последовательно применять элементарные преобразования первого и третьего типа к единичной матрице, пока не получим из нее матрицу U_{ij} . Написанное равенство означает, что надо сделать так: (1) прибавить i строку к j , (2) вычесть j строку из i , (3) прибавить i строку к j , (4) умножить i строку на -1 . Давайте для наглядности это сделаем на матрицах 2 на 2. Ниже мы последовательно умножаем матрицу с левой стороны слева на матрицу, написанную над стрелкой:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \xrightarrow{\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \xrightarrow{\begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}} \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \xrightarrow{\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}} \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \xrightarrow{\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

□

Утверждение 28. Пусть $\psi: M_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$ – отображение, удовлетворяющее свойствам:

1. $\psi(AB) = \psi(A)\psi(B)$ для любых $A, B \in M_n(\mathbb{R})$.
2. $\psi(D_n(\lambda)) = \lambda$ для любого ненулевого $\lambda \in \mathbb{R}$.

И пусть $P \in M_n(\mathbb{R})$ матрица с нулевой строкой. Тогда $\psi(P) = 0$.

Доказательство. Пусть в матрице P нулевой является i -я строка. Тогда $D_i(\lambda)P = P$ при любом ненулевом $\lambda \in \mathbb{R}$. Применим к этому равенству ψ и получим

$$\lambda\psi(P) = \psi(D_i(\lambda))\psi(P) = \psi(P)$$

Выберем любое ненулевое число λ отличное от 1, тогда получим, что $\psi(P)$ обязано быть нулем. □

Доказательство Утверждения 25. В начале пусть $A \in M_n(\mathbb{R})$ – невырожденная матрица. Тогда мы знаем, что она является произведением элементарных матриц $A = U_1 \dots U_k$. Применим ψ к этому равенству, получим $\psi(A) = \psi(U_1) \dots \psi(U_k)$. С другой стороны по утверждению 27 получаем $\psi(A) = \det(U_1) \dots \det(U_k)$. А из мультипликативности определителя следует, что правая часть равна $\det A$. То есть ψ совпадает с \det на невырожденных матрицах.

Теперь покажем, что ψ совпадает с \det на всех матрицах. Пусть $A \in M_n(\mathbb{R})$ – вырожденная матрица. Тогда элементарными преобразованиями строк она приводится к ступенчатому виду, то есть A можно представить в виде TB , где T – обратимая, а B имеет улучшенный ступенчатый вид. Так как A вырождена, матрица B имеет нулевую строку. Теперь применим к равенству $A = TB$ отображение ψ и \det . Получим

$$\psi(A) = \psi(T)\psi(B) \quad \text{и} \quad \det(A) = \det(T)\det(B)$$

Но мы знаем по утверждению 28, что $\psi(B) = 0$. Кроме того, мы знаем, что определитель от матриц с нулевой строкой тоже равен нулю по утверждению 19. Значит $\psi(A) = 0 = \det(A)$. □

4.8 Миноры и алгебраические дополнения

Определения Пусть $B \in M_n(\mathbb{R})$ – некоторая матрица с b_{ij} . Рассмотрим матрицу $D_{ij} \in M_{n-1}(\mathbb{R})$ полученную из B вычеркиванием i -ой строки и j -го столбца. Определитель матрицы D_{ij} обозначается M_{ij} и называется *минором* матрицы B или i j -минором для определенности. Число $A_{ij} = (-1)^{i+j} M_{ij}$ называется *алгебраическим дополнением* элемента b_{ij} или i j -алгебраическим дополнением матрицы B .

Покажем как все это выглядит на картинках. Если мы представим матрицу B в виде

$$B = \left(\begin{array}{ccc|ccc} & & & * & & \\ & X_{ij} & & \vdots & & Y_{ij} \\ & & & & & \\ * & \dots & & b_{ij} & \dots & * \\ & & & & & \\ & Z_{ij} & & \vdots & & W_{ij} \\ & & & * & & \end{array} \right)$$

Тогда

$$D_{ij} = \begin{pmatrix} X_{ij} & Y_{ij} \\ Z_{ij} & W_{ij} \end{pmatrix}, \quad M_{ij} = \det \begin{pmatrix} X_{ij} & Y_{ij} \\ Z_{ij} & W_{ij} \end{pmatrix} \quad \text{и} \quad A_{ij} = (-1)^{i+j} \det \begin{pmatrix} X_{ij} & Y_{ij} \\ Z_{ij} & W_{ij} \end{pmatrix}$$

Присоединенная матрица \hat{B} для B определяется как

$$\hat{B} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{21} & \dots & A_{n1} \\ A_{12} & A_{22} & \dots & A_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{1n} & A_{2n} & \dots & A_{nn} \end{pmatrix}$$

То есть надо в матрице B каждый элемент b_{ij} заменить на его алгебраическое дополнение A_{ij} , а потом полученную матрицу транспонировать. Полезно держать перед глазами формулу для элемента присоединенной матрицы $\hat{B}_{ij} = A_{ji}$.

Формула разложения по строке

Утверждение 29. Пусть $B \in M_n(\mathbb{R})$ – произвольная матрица. Тогда⁴⁰

1. Для любой строки i верно разложение

$$\det B = \sum_{j=1}^n b_{ij} A_{ij}$$

2. Для любого столбца j верно разложение

$$\det B = \sum_{i=1}^n b_{ij} A_{ij}$$

Доказательство. Мы докажем формулу для строки, для столбца она получается аналогично либо применением транспонирования к матрице. Рассмотрим i -ю строку в матрице B

$$B = \left(\begin{array}{ccc|cccc} & & & * & & \\ & X_{ij} & & \vdots & & Y_{ij} \\ & & & & & \\ b_{i1} & \dots & & b_{ij} & \dots & b_{in} \\ & & & & & \\ & Z_{ij} & & \vdots & & W_{ij} \\ & & & * & & \end{array} \right)$$

Эту строку можно разложить в сумму следующих строк

$$(b_{i1}, \dots, b_{in}) = \sum_{j=1}^n (0, \dots, 0, b_{ij}, 0, \dots, 0)$$

⁴⁰Всюду в формулах A_{ij} обозначает алгебраическое дополнение.

Теперь вычислим определитель B пользуясь линейностью по i -ой строке

$$\det B = \sum_{j=1}^n \det \begin{pmatrix} X_{ij} & \begin{matrix} * \\ \vdots \\ b_{ij} \end{matrix} & Y_{ij} \\ 0 & \dots & \dots & 0 \\ Z_{ij} & \begin{matrix} \vdots \\ * \end{matrix} & W_{ij} \end{pmatrix}$$

Теперь отдельно посчитаем следующий определитель

$$\det \begin{pmatrix} X_{ij} & \begin{matrix} * \\ \vdots \\ b_{ij} \end{matrix} & Y_{ij} \\ 0 & \dots & \dots & 0 \\ Z_{ij} & \begin{matrix} \vdots \\ * \end{matrix} & W_{ij} \end{pmatrix} = (-1)^{j-1} \det \begin{pmatrix} \begin{matrix} * \\ \vdots \\ b_{ij} \end{matrix} & X_{ij} & Y_{ij} \\ b_{ij} & \dots & 0 \\ \begin{matrix} \vdots \\ * \end{matrix} & Z_{ij} & W_{ij} \end{pmatrix} = (-1)^{j-1} (-1)^{i-1} \det \begin{pmatrix} b_{ij} & \dots & 0 \\ \vdots & X_{ij} & Y_{ij} \\ * & Z_{ij} & W_{ij} \end{pmatrix}$$

В первом равенстве мы переставили j -ый столбец $j-1$ раз, чтобы переместить его на место первого столбца. Во втором равенстве мы переставили i -ю строку $i-1$ раз, чтобы переставить ее на место первой строки. Последняя матрица является блочно нижнетреугольной, а следовательно, равенство можно продолжить так

$$(-1)^{i+j} b_{ij} \det \begin{pmatrix} X_{ij} & Y_{ij} \\ Z_{ij} & W_{ij} \end{pmatrix} = b_{ij} (-1)^{i+j} M_{ij} = b_{ij} A_{ij}$$

□

Явные формулы для обратной матрицы

Утверждение 30. Для любой матрицы $B \in M_n(\mathbb{R})$ верно

$$\hat{B}B = B\hat{B} = \det(B)E$$

Доказательство. Нам надо отдельно доказать два равенства $\hat{B}B = \det(B)E$ и $B\hat{B} = \det(B)E$. Давайте докажем второе равенство, а первое показывается аналогично (или через трюк с транспонированием).

Для доказательства $B\hat{B} = \det(B)E$ нам надо показать две вещи: (1) все диагональные элементы матрицы $B\hat{B}$ равны $\det(B)$, (2) все внедиагональные элементы равны нулю.

(1) Рассмотрим i -ый диагональный элемент в матрице $B\hat{B}$:

$$(B\hat{B})_{ii} = \sum_{j=1}^n b_{ij} \hat{B}_{ji} = \sum_{j=1}^n b_{ij} A_{ij} = \det(B)$$

Последняя формула является разложением определителя $\det(B)$ по i -ой строке из утверждения 29.

(2) Рассмотрим элемент на позиции ij для $i \neq j$:

$$(B\hat{B})_{ij} = \sum_{k=1}^n b_{ik} \hat{B}_{kj} = \sum_{k=1}^n b_{ik} A_{jk}$$

Нам надо показать, что последнее выражение равно нулю. Давайте рассмотрим матрицу B и заменим в ней j -ю строку на i -ю, все остальные оставим нетронутыми. Обозначим полученную матрицу через B' . Тогда

$$B' = \begin{pmatrix} * & \dots & * & \dots & * \\ b_{i1} & \dots & b_{ik} & \dots & b_{in} \\ * & \dots & * & \dots & * \\ b_{i1} & \dots & b_{ik} & \dots & b_{in} \\ * & \dots & * & \dots & * \end{pmatrix}$$

Давайте посчитаем определитель B' двумя способами. С одной стороны $\det(B') = 0$ так как в матрице есть две одинаковые строки. С другой стороны, давайте разложим определитель $\det(B')$ по j -ой строке

$$\det(B') = \sum_{k=1}^n b_{ik} A_{jk}$$

Что и требовалось доказать.

□

В качестве непосредственного следствия этого утверждения получаем явные формулы обратной матрицы.⁴¹

Утверждение 31 (Явные формулы обратной матрицы). Пусть $B \in M_n(\mathbb{R})$ – обратимая матрица, тогда

$$B^{-1} = \frac{1}{\det(B)} \hat{B}$$

Заметим, что в случае матрицы 2 на 2 формулы принимают следующий вид

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}^{-1} = \frac{1}{ad - bc} \begin{pmatrix} d & -b \\ -c & a \end{pmatrix}$$

4.9 Формулы Крамера

Пусть $A \in M_n(\mathbb{R})$ – произвольная матрица и $b \in \mathbb{R}^n$ – столбец. Рассмотрим систему линейных уравнений $Ax = b$. Давайте в матрице A i -ый столбец заменим на b , а остальные столбцы оставим как есть. Обозначим полученную матрицу через \bar{A}_i . Определим $\Delta = \det(A)$ и $\Delta_i = \det(\bar{A}_i)$.

Мы знаем, что данная система имеет единственное решение для любого b тогда и только тогда, когда матрица A обратима. Следующее утверждение дает явные формулы для координат решения системы в этом случае.

Утверждение 32 (Формулы Крамера). Пусть $A \in M_n(\mathbb{R})$, $x, b \in \mathbb{R}^n$ и выполнено равенство $Ax = b$. Тогда $\Delta \cdot x_i = \Delta_i$ для любого i .⁴²

Доказательство. Рассмотрим матрицу A как строку из столбцов $A = (A_1 | \dots | A_n)$, где A_i – столбцы матрицы A . Тогда равенство $Ax = b$, пользуясь блочными формулами, можно переписать так $x_1 A_1 + \dots + x_n A_n = b$. Давайте посчитаем определитель \bar{A}_i , пользуясь последним равенством.

$$\det(\bar{A}_i) = \det(A_1 | \dots | b | \dots | A_n) = \det(A_1 | \dots | \sum_{k=1}^n x_k A_k | \dots | A_n) = \sum_{k=1}^n x_k \det(A_1 | \dots | A_k | \dots | A_n)$$

В последней формуле, если $k \neq i$, то слагаемое имеет два одинаковых столбца A_i . Потому остается только одно слагаемое для $k = i$. Получаем

$$\det(\bar{A}_i) = x_i \det(A_1 | \dots | A_i | \dots | A_n) = x_i \det(A)$$

Что и требовалось. □

Заметим, что если $\Delta = \det(A) \neq 0$, то имеется единственное решение системы $Ax = b$ для любой правой части b и координаты этого решения заданы по формулам $x_i = \frac{\Delta_i}{\Delta}$. Однако, если $\Delta = \det(A) = 0$, то либо решений бесконечное число, либо их вообще нет. В этом случае единственная информация из формул Крамера это: $\Delta_i = 0$.

4.10 Характеристический многочлен

Пусть $A \in M_n(\mathbb{R})$ – произвольная квадратная матрица и $\lambda \in \mathbb{R}$. Рассмотрим функцию $\chi_A(\lambda) = \det(\lambda E - A)$.

Утверждение 33. Пусть $A \in M_n(\mathbb{R})$. Тогда верно

1. Функция $\chi_A(\lambda)$ является многочленом степени n со старшим коэффициентом 1.
2. Для произвольного числа λ верно, что $\lambda \in \text{spec}_{\mathbb{R}} A$ тогда и только тогда, когда $\chi_A(\lambda) = 0$.⁴³

⁴¹Заметим, что для формулы требуется условие $\det(B) \neq 0$. Однако, матрица обратима тогда и только тогда, когда $\det(B) \neq 0$. Один из способов это показать – применить \det к равенству $BB^{-1} = E$ и увидеть, что $\det(B) \det(B^{-1}) = 1$. А в обратную сторону – явные формулы.

⁴²Здесь x_i – координаты вектора x .

⁴³Аналогичное утверждение верно и для $\text{spec}_{\mathbb{C}} A$.

Доказательство. (1) Давайте посмотрим на явную формулу определителя

$$\det B = \sum_{\sigma \in S_n} \operatorname{sgn}(\sigma) b_{1\sigma(1)} \dots b_{n\sigma(n)}$$

Заметим, что данное выражение является многочленом от коэффициентов матрицы A , причем все его слагаемые имеют степень n . Теперь, когда мы считаем характеристический многочлен, мы находим $\det(\lambda E - A)$. То есть вместо b_{ii} мы должны подставить $\lambda - a_{ii}$, а вместо b_{ij} взять $-a_{ij}$ (при $i \neq j$). То есть мы в многочлен от многих переменных подставляем либо числа, либо линейный многочлен от λ . Понятно, что результатом будет многочлен от λ причем степени уж точно не больше n . Теперь давайте поймем какая будет у него степень и старший коэффициент.

$$\lambda E - A = \begin{pmatrix} \lambda - a_{11} & \dots & -a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{n1} & \dots & \lambda - a_{nn} \end{pmatrix}$$

Ясно, что максимальная степень по λ может вылезти только из слагаемого являющегося произведением диагональных элементов $(\lambda - a_{11}) \dots (\lambda - a_{nn})$. А его старший член λ^n . Вот и все.

(2) Вспомним, что $\lambda \in \operatorname{sp}_{\mathbb{R}} A$ тогда и только тогда, когда $A - \lambda E$ – необратимая матрица или что то же самое, $\lambda E - A$ – необратимая матрица. Матрица необратима тогда и только тогда, когда ее определитель ноль. Потому $\lambda \in \operatorname{sp}_{\mathbb{R}} A$ тогда и только тогда, когда $\det(\lambda E - A) = 0$, то есть $\chi_A(\lambda) = 0$. Что и требовалось. \square

Определение 34. Для произвольной матрицы $A \in M_n(\mathbb{R})$ многочлен $\chi_A(\lambda)$ называется *характеристическим многочленом* матрицы A .

Явные формулы для коэффициентов характеристического многочлена Вначале давайте введем некоторые обозначения. Пусть $A \in M_n(\mathbb{R})$ – некоторая матрица. Рассмотрим произвольное k элементное подмножество в множестве чисел от 1 до n заданное в виде i_1, \dots, i_k ⁴⁴ Вычеркнем из матрицы A столбцы и строки с этими номерами и обозначим полученную матрицу через R_{i_1, \dots, i_k} . Графически эта процедура выглядит так:

$$i_1 \begin{pmatrix} & i_1 & \dots & i_k & \\ & a_{1i_1} & \dots & a_{1i_k} & \\ & \vdots & & \vdots & \\ i_1 & R_{11} & \dots & R_{1k+1} & \\ a_{i_1 1} & \dots & & \dots & a_{i_1 n} \\ \vdots & & & & \vdots \\ i_k & a_{i_k 1} & \dots & & \dots & a_{i_k n} \\ & R_{k+1 1} & \dots & R_{k+1 k+1} & \\ & a_{ni_1} & \dots & a_{ni_k} & \end{pmatrix} \mapsto R_{i_1, \dots, i_k} = \begin{pmatrix} R_{11} & \dots & R_{1k+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{k+1 1} & \dots & R_{k+1 k+1} \end{pmatrix} \in M_{n-k}(\mathbb{R})$$

Пользуясь этими обозначениями покажем следующее.

Утверждение 35. Пусть $A \in M_n(\mathbb{R})$ и его характеристический многочлен имеет вид

$$\chi_A(\lambda) = \lambda^n + a_{n-1}\lambda^{n-1} + \dots + a_1\lambda + a_0$$

Тогда

1. В обозначениях выше, для коэффициентов a_k верна следующая формула⁴⁵

$$a_k = (-1)^{n-k} \left(\sum_{i_1 < \dots < i_k} \det R_{i_1, \dots, i_k} \right)$$

⁴⁴Здесь предполагается, что $i_1 < \dots < i_k$.

⁴⁵Заметим, что эта формула также имеет смысл при $k = 0$ и при $k = n$. Если $k = 0$, то множество индексов пусто \emptyset и $R_{\emptyset} = A$, потому формула превращается в равенство $a_0 = (-1)^n \det A$. При условии $k = n$, мы вычеркиваем все строки из матрицы и в этом случае $R_{i_1, \dots, i_n} \in M_0(\mathbb{R})$. Такого объекта не существует, но мы можем для удобства считать, что в этом случае формула означает $\det R_{i_1, \dots, i_n} = 1$.

2. $a_0 = (-1)^n \det A$.

3. $a_{n-1} = -\operatorname{tr} A$.

Доказательство. (1) Введем обозначения для столбцов матрицы $A = (A_1 | \dots | A_n)$ и пусть $e_i \in \mathbb{R}^n$ – столбец, у которого i -я координата равна 1, а все остальные 0. Нам надо посчитать $\det(\lambda E - A) = (-1)^n \det(A - \lambda E)$. Тогда,

$$\det(A - \lambda E) = \det(A_1 - \lambda e_1 | \dots | A_n - \lambda e_n)$$

Теперь надо раскрыть последний определитель по полилинейности.⁴⁶ Всего у нас будет 2^n слагаемых, каждое из которых – это определитель матрицы состоящей из столбцов A_i или $-\lambda e_j$, стоящих вперемешку.

Давайте для определенности считать, что у нас $n = 5$, тогда мы считаем

$$\det(A_1 - \lambda e_1 | A_2 - \lambda e_2 | A_3 - \lambda e_3 | A_4 - \lambda e_4 | A_5 - \lambda A_5)$$

Среди слагаемых давайте посмотрим на слагаемое, содержащее 2 столбца матрицы A и 3 столбца вида $-\lambda e_i$, например, такое

$$\det(A_1 | -\lambda e_2 | A_3 | -\lambda e_4 | -\lambda e_5) = \det \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & a_{13} & 0 & 0 \\ a_{21} & -\lambda & a_{23} & 0 & 0 \\ a_{31} & 0 & a_{33} & 0 & 0 \\ a_{41} & 0 & a_{43} & -\lambda & 0 \\ a_{51} & 0 & a_{53} & 0 & -\lambda \end{pmatrix}$$

Давайте последовательно разлагать этот определитель по 2-ому, 4-ому и 5-ому столбцам. Обратим внимание, что $-\lambda$ всегда будут стоять на диагонали, потому что знаки всех алгебраических дополнений будут положительными:

$$\det \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & a_{13} & 0 & 0 \\ a_{21} & -\lambda & a_{23} & 0 & 0 \\ a_{31} & 0 & a_{33} & 0 & 0 \\ a_{41} & 0 & a_{43} & -\lambda & 0 \\ a_{51} & 0 & a_{53} & 0 & -\lambda \end{pmatrix} = (-\lambda) \det \begin{pmatrix} a_{11} & a_{13} & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{33} & 0 & 0 \\ a_{41} & a_{43} & -\lambda & 0 \\ a_{51} & a_{53} & 0 & -\lambda \end{pmatrix} = (-\lambda)^2 \det \begin{pmatrix} a_{11} & a_{13} & 0 \\ a_{31} & a_{33} & 0 \\ a_{51} & a_{53} & -\lambda \end{pmatrix} = (-\lambda)^3 \det \begin{pmatrix} a_{11} & a_{13} \\ a_{31} & a_{33} \end{pmatrix}$$

В общем случае слагаемое с k столбцами вида $-\lambda e_i$ является определителем матрицы вида

$$\begin{matrix} & i_1 & \dots & i_k \\ i_1 & \begin{pmatrix} R_{11} & \boxed{0} & \dots & \boxed{0} & R_{1\ k+1} \\ a_{i_1 1} & \dots & -\lambda & & \dots & a_{i_1 n} \end{pmatrix} \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots & \\ i_k & \begin{pmatrix} a_{i_k 1} & \dots & & -\lambda & \dots & a_{i_k n} \\ R_{k+1\ 1} & \vdots & \dots & \vdots & R_{k+1\ k+1} \\ & \boxed{0} & & \boxed{0} & \end{pmatrix} \end{matrix} = I_{i_1, \dots, i_k}$$

Раскладывая этот определитель по столбцам i_1, \dots, i_k мы получаем

$$\det I_{i_1, \dots, i_k} = (-\lambda)^k \det R_{i_1, \dots, i_k}$$

Слагаемые при λ^k вылезут, когда ровно k столбцов имеют вид $-\lambda e_i$. Остается не забыть, что мы считали $(-1)^n \chi_A(\lambda)$.

(2) Свободный член многочлена $\chi_A(\lambda)$ всегда равен $\chi_A(0) = \det(0E - A) = \det(-A) = (-1)^n \det(A)$, что и требовалось.

(3) Для подсчета a_{n-1} воспользуемся формулой, получим⁴⁷

$$a_{n-1} = (-1)^{n-(n-1)} \sum_{i=1}^n \det R_{1, \dots, \hat{i}, \dots, n}$$

⁴⁶ Думать про это выражение надо так: надо мысленно заменить вертикальные черточки умножением и считать, что мы раскрываем скобки в произведении.

⁴⁷ Здесь \hat{i} означает, что индекс i пропущен.

Но заметим, что $R_{1,\dots,\hat{i},\dots,n} = a_{ii}$, а значит предыдущее равенство превращается в

$$a_{n-1} = (-1)^{n-(n-1)} \sum_{i=1}^n a_{ii} = -\operatorname{tr} A$$

□

Примеры

1. Если $A \in M_1(\mathbb{R})$, то есть $A = a \in \mathbb{R}$ – число, то $\chi_A(\lambda) = \lambda - a$.
2. Если $A \in M_2(\mathbb{R})$, то $\chi_A(\lambda) = \lambda^2 - \operatorname{tr} A \lambda + \det A$.
3. Если $A \in M_3(\mathbb{R})$, то $\chi_A(\lambda) = \lambda^3 - \operatorname{tr} A \lambda^2 + a_1 \lambda - \det A$, где

$$a_1 = \det \begin{pmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} + \det \begin{pmatrix} a_{11} & a_{13} \\ a_{31} & a_{33} \end{pmatrix} + \det \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}$$

Стоит отметить, что считать характеристические многочлены от матриц большего размера через эти формулы практически не целесообразно. Максимальный разумный размер – матрица 4 на 4. Самый быстрый способ остается алгоритм Гаусса для подсчета определителя $\det(\lambda E - A)$ с символьными коэффициентами.

4.11 Теорема Гамильтона-Кэли

Многочлены с матричными коэффициентами Обозначим через $M_n(\mathbb{R})[t]$ множество многочленов от переменной t имеющих матричные коэффициенты из $M_n(\mathbb{R})$, т.е.

$$M_n(\mathbb{R})[t] = \{A_0 + A_1 t + \dots + A_k t^k \mid A_i \in M_n(\mathbb{R})\}$$

здесь t – формальная переменная, которая представляет собой неизвестное число. Про эти многочлены надо думать как про картинки. Такие картинки можно складывать и умножать по формулам известным для многочленов с обычными числовыми коэффициентами:

- Сумма.

$$\left(\sum_i A_i t^i \right) + \left(\sum_j B_j t^j \right) = \sum_i (A_i + B_i) t^i$$

- Произведение.

$$\left(\sum_i A_i t^i \right) \left(\sum_j B_j t^j \right) = \sum_k \left(\sum_{s+t=k} A_s B_t \right) t^k$$

Надо лишь отметить, что в произведении нельзя переставлять местами A_s и B_t , так как матрицы вообще говоря не перестановочны.

Подстановка матрицы в многочлен Теперь для произвольного многочлена $f \in M_n(\mathbb{R})[t]$ и матрицы $D \in M_n(\mathbb{R})$ определим подстановку матрицы D в многочлен f справа:

$$f(D) = A_0 + A_1 D + \dots + A_k D^k$$

т.е. мы вместо t подставляем всюду матрицу D . Аналогично, можно определить левую подстановку:

$$(D)f = A_0 + D A_1 + \dots + D^k A_k$$

Надо отметить, что вообще говоря $f(D) \neq (D)f$. Мы всегда будем пользоваться только правой подстановкой.

Свойства подстановки Пусть $f, g \in M_n(\mathbb{R})[t]$ – два многочлена и $D \in M_n(\mathbb{R})$ – некоторая матрица. Сделаем следующие замечания:

1. Всегда верно равенство

$$f(D) + g(D) = (f + g)(D)$$

2. Для произведения вообще говоря выполнено

$$f(D)g(D) \neq (fg)(D)$$

Действительно, возьмем $f(t) = t$, $g(t) = Bt$, тогда $(fg)(t) = Bt^2$. В этом случае $f(D)g(D) = DBD$, а $(fg)(D) = BDD$. Вообще говоря, имеем $DBD \neq BDD$ если матрицы B и D не коммутируют.

3. Если D коммутирует со всеми коэффициентами матрицы g , то верно равенство

$$f(D)g(D) = (fg)(D)$$

Это видно непосредственно из определения умножения и подстановки.

Теорема Теперь мы готовы к формулировке и доказательству полезного результата.

Утверждение 36 (Теорема Гамильтона-Кэли). Пусть $A \in M_n(\mathbb{R})$. Тогда $\chi_A(A) = 0$.

Прежде чем доказывать теорему, давайте объясним в чем сложность и почему дурацкие доказательства не работают. Смотрите, у нас $\chi_A(\lambda) = \det(\lambda E - A)$. Хочется подставить вместо λ матрицу A и сказать, что определитель нулевой матрицы равен 0. В этом рассуждении есть лажа. Давайте продемонстрируем ее на матрице 2 на 2. Пусть

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}$$

Тогда

$$\det(A - \lambda E) = \det \left(\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} - \lambda E \right) = \det \begin{pmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda \end{pmatrix}$$

Так вот, последнее равенство верно если λ является числом. Если же λ является матрицей, то оно непонятно, что значит. Можно понимать правую часть как блочную матрицу 2 на 2 из блоков 2 на 2 (т.е. всего 4 на 4), но тогда это просто не верное равенство. Это рассуждение можно докрутить до верного, но тогда в правой части надо использовать вместо определителя более хитрую его версию. Подобное рассуждение растет из коммутативной алгебры, где доказательство естественным образом сводится к формулам Крамера, но для его освоения надо знать, что такое кольца и модули. Мы же пойдем чуть более простым путем.

Доказательство. Рассмотрим матрицу $\lambda E - A$, где λ – неизвестное число. Введем следующее обозначение $R(\lambda) = \lambda E - A$.

Заметим, что каждый коэффициент $R(\lambda)$ является многочленом от λ , т.е. $R(\lambda) = (r_{ij}(\lambda))$ и $r_{ij}(\lambda)$ – многочлен. То есть $r_{ij}(\lambda) = \sum_k r_{ijk} \lambda^k$. Тогда $R(\lambda) = \sum_k R_k \lambda^k$, где $R_k = (r_{ijk})$. То есть $R(\lambda) \in M_n(\mathbb{R})[\lambda]$. Для ясности, давайте проиллюстрируем сказанное на следующем примере.

$$\begin{pmatrix} 5 - \lambda + 2\lambda^2 & 3 \\ 4 - \lambda & 2 + \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 & 3 \\ 4 & 2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \lambda + \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \lambda^2$$

Теперь применим формулы для перемножения матрицы с ее присоединенной из утверждения 30 для матрицы $\lambda E - A$, получим

$$(\lambda E - A)R(\lambda) = R(\lambda)(\lambda E - A) = \det(\lambda E - A)E = \chi_A(\lambda)E$$

Нас интересует только равенство

$$R(\lambda)(\lambda E - A) = \chi_A(\lambda)E$$

Тогда рассмотрим многочлены $f(\lambda) = R(\lambda)$, $g(\lambda) = \lambda E - A$. В этом случае $(fg)(\lambda) = \chi_A(\lambda)E$. Возьмем в качестве матрицы D матрицу A . Заметим, что она коммутирует с коэффициентами g , потому что это E и $-A$. Значит верно равенство $f(D)g(D) = (fg)(D)$. Последнее означает

$$0 = R(A)(AE - A) = \chi_A(A)E = \chi_A(A)$$

Что и требовалось доказать. □

5 Комплексные числа

5.1 Идея

Почему нам вдруг не хватает вещественных чисел? Давайте вспомним, а откуда получились вещественные числа? Для начала у нас есть натуральные числа: $\mathbb{N} = \{1, 2, 3, \dots\}$. Которые мы беззаботно складывали и умножали. Но как только нам захотелось посчитать $5 - 8$, как нам понадобились другие числа – целые $\mathbb{Z} = \{\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots\}$. И мы опять жили долго и счастливо, пока на не пришлось делить $2/3$ и тут пришлось построить рациональные числа $\mathbb{Q} = \{\frac{p}{q} \mid p, q \in \mathbb{Z}, q \neq 0\}$. Вещественные нам пригодились, когда надо было решить уравнение $x^2 = 2$. Тогда пришлось добавить $\sqrt{2}$, а заодно и кучу других полезных чисел. Однако, этого опять оказалось мало и уравнение $x^2 + 1 = 0$ не решается в вещественных числах. При этом давайте заметим, что добавляя новые числа, операции над старыми мы не меняли. Мы добавили целые, рациональные, вещественные, а натуральные как складывались и умножались по старым правилам, так и продолжают складываться и умножаться.

А какие-же числа мы хотим получить в идеале. Прежде всего хочется решать уравнения вида $f(x) = 0$, где $f \in \mathbb{R}[x]$, всегда, когда это возможно. Например, если $f = 1$, то решить такое уравнение по понятным причинам не возможно, но вот если $\deg f > 0$, то очень хочется иметь решение. Новые числа должны содержать все вещественные как подмножество. Но кроме этого, мы хотим уметь делать все арифметические операции с новыми числами, да еще так, чтобы старые операции не изменились. И еще хочется по возможности быть экономными. Вдруг, можно построить много разных лишних чисел (например, когда нам понадобились рациональные числа, мы могли по наивности и безрассудству сразу же построить вещественные, но обошлись более экономным вариантом в виде рациональных чисел).

Для того, чтобы формализовать идеи выше, нам надо строго сказать, а какой математической структурой должны являться новые числа. Такими структурами являются поля. Потом надо объяснить как правильно обращаться с полями, что с ними можно делать, как их сравнивать между собой. И как только у нас появился зверинец полей, мы можем найти в нем поле комплексных чисел, как самое лучшее, которое только возможно среди тех, что удовлетворяют нашим запросам.

Сейчас нас ждет очередное абстрактное определение. Напомню, что оно всегда состоит из двух частей: в первой части сказано какие у нас данные, а во второй – каким аксиомам эти данные подчиняются.

Определение 37 (Поле). Поле это следующий набор данных: $(F, +, \cdot)$, где

- F – некоторое множество. Элементы этого множества называются числами.
- $+$: $F \times F \rightarrow F$, $(x, y) \mapsto x + y$ – некоторая операция называемая сложением.
- \cdot : $F \times F \rightarrow F$, $(x, y) \mapsto xy$ – некоторая операция называемая умножением.

Эти данные должны подчиняться следующим десяти аксиомам:

1. **Ассоциативность сложения** Для любых элементов $x, y, z \in F$ выполнено $x + (y + z) = (x + y) + z$.
2. **Существования нейтрального по сложению** Существует такой элемент $0 \in F$ такой, что для любого $x \in F$ верно $x + 0 = 0 + x = x$. Такой элемент называется нулем.
3. **Существование обратного по сложению** Для любого $x \in F$ существует элемент $-x \in F$ такой, что $x + (-x) = (-x) + x = 0$. Такой элемент называется противоположным.
4. **Коммутативность сложения** Для любых элементов $x, y \in F$ верно $x + y = y + x$.
5. **Ассоциативность умножения** Для любых элементов $x, y, z \in F$ верно $x(yz) = (xy)z$.
6. **Существование нейтрального по умножению** Существует такой элемент $1 \in F$, что для любого $x \in F$, верно $x1 = 1x = x$. Такой элемент называется единицей.
7. **Существование обратного по умножению** Для любого элемента $x \in F \setminus \{0\}$ существует элемент $x^{-1} \in F$ такой, что $xx^{-1} = x^{-1}x = 1$. Такой элемент называется обратным к x .
8. **Коммутативность умножения** Для любых элементов $x, y \in F$ верно $xy = yx$.
9. **Дистрибутивность** Для любых элементов $x, y, z \in F$ верно $x(y + z) = xy + xz$ и $(x + y)z = xz + yz$.
10. **Нетривиальность** $0 \neq 1$.

Замечания Давайте сделаем несколько полезных замечаний.

1. Аксиомы сгруппированы следующим образом: (1–4) аксиомы на сложение, (5–8) аксиомы на умножение, (9) связь между сложением и умножением, (10) нетривиальность. Причем аксиомы (1–4) и (5–8) идут по одному и тому же шаблону: ассоциативность, нейтральный элемент, обратный, коммутативность. НО стоит отметить важную разницу между аксиомами (3) и (7). По сложению обратный должен быть для любого элемента, по умножению только для ненулевого. В частности, аксиому (7) нельзя сформулировать без аксиомы (2).
2. В аксиомах (2) и (6) не требуется единственность нуля и единицы. Однако, можно показать, что если ноль существует, то он обязательно единственный, аналогично с единицей. Действительно, если у нас есть два нуля 0_1 и 0_2 , то рассмотрим их сумму $0_1 + 0_2$. Так как 0_1 является нулем, то $0_1 + 0_2 = 0_2$. Так как 0_2 является нулем, то $0_1 + 0_2 = 0_1$. Значит оба нуля совпадают. Аналогично проверяется единственность единицы. Потому в силу однозначности эти элементы обозначаются 0 и 1.
3. В аксиомах (3) и (7) не требуется единственность обратного. Однако, можно показать, что для любого x существует единственный $-x$ и единственный x^{-1} . Действительно, если для элемента $x \in F$ есть два элемента $y, z \in F$ таких, что

$$x + y = y + x = 0 \quad \text{и} \quad x + z = z + x = 0$$

Тогда рассмотрим выражение

$$(y + x) + z = y + (x + z)$$

Его левая часть вычисляется в $0 + z = z$, а правая вычисляется в $y + 0 = y$. А значит y и z совпадают. То есть обратный по сложению будет один, аналогично с обратным по умножению. Именно по причине однозначности им даются такие имена. В частности однозначно определено число -1 .

4. Мы привыкли к всяким замечательным свойствам, которым подчиняются числа 0 и 1. Например: $x0 = 0$ или $(-1)x = -x$ для любого x . Оказывается, что их можно доказать пользуясь аксиомами. Попробуйте сделать это.
5. Давайте рассмотрим множество $F = \{\cdot\}$ состоящее из одной точки. Тогда на таком множестве существует единственная операция, положим сложение и умножение равными ей. Тогда данный набор данных удовлетворяет всем аксиомам поля кроме последней. Здесь ноль равен единице и вообще все элементы равны друг другу и ничего кроме нуля (единицы) у нас нет. На самом деле, если ноль равен единице, то никаких других структур мы не построим. Действительно, предположим $(F, +, \cdot)$ удовлетворяет всем аксиомам с первой по девятую, а вместо десятой – ее отрицание $1 = 0$. Тогда для любого элемента $a \in F$ имеем $a = a \cdot 1 = a \cdot 0$. Давайте покажем, что $a \cdot 0 = 0$ для любого $a \in F$. Рассмотрим равенство $0 + 0 = 0$, которое следует из определения нуля. Умножим его на a , получим $a \cdot (0 + 0) = a \cdot 0$. Раскроем скобки и получим $a \cdot 0 + a \cdot 0 = a \cdot 0$. Теперь прибавим к обеим частям равенства элемент $-(a \cdot 0)$. Получим

$$a \cdot 0 + a \cdot 0 + -(a \cdot 0) = a \cdot 0 + -(a \cdot 0)$$

Что равносильно $a \cdot 0 + 0 = 0$, а значит $a \cdot 0 = 0$, что и требовалось. Потому последняя аксиома нужна для того, чтобы исключить именно этот дурацкий пример.

Примеры Как только вам скормили абстрактное определение, первым делом нужны примеры. Он помогут по-новому взглянуть на старых знакомых и разобраться с тем, а как вообще задавать эти самые новые объекты.

1. Рациональные и вещественные числа \mathbb{Q} и \mathbb{R} с обычными операциями.
2. Множество $\mathbb{Q}[\sqrt{2}] = \{a + b\sqrt{2} \mid a, b \in \mathbb{Q}\} \subseteq \mathbb{R}$ с обычными операциями является примером поля, которое лежит между \mathbb{Q} и \mathbb{R} .
3. Рациональные функции $\mathbb{R}(x) = \{\frac{f}{g} \mid f, g \in \mathbb{R}[x]\}$. Давайте думать про рациональные функции как про картинки. Тогда на них определены формальные операции сложения и умножения. Относительно этих операций они являются полем.

4. Теперь время экзотики $\mathbb{F}_2 = \{0, 1\}$, а операции берутся по модулю 2. Можно проверить, что и этот товарищ является полем. Это очень важное поле для computer science. Оно и его аналоги используются в теории кодирования, восстановления сигнала, архивирования и т.д.

Определение 38 (Подполе). Пусть K и L – два поля причем $K \subseteq L$. Тогда K называется подполем в L , если операции сложения и умножения из L ограниченные на K дают сложение и умножение на K соответственно. Более подробно, пусть $+_L$ и \cdot_L – сложение и умножение на L , а $+_K$ и \cdot_K – сложение и умножение на K . Тогда для любых элементов $x, y \in K$ верно: $x +_L y = x +_K y$ и $x \cdot_L y = x \cdot_K y$.

По простому подполе – это подмножество чисел в нашем поле, которое само является полем относительно операций из большего поля. То есть нет никакой разницы какие операции использовать в подполе K : операции из K или операции из L , так как между ними нет разницы.

5.2 Абстрактное определение комплексных чисел

Определение 39. Пусть поле \mathbb{C} обладает следующими свойствами:

1. $\mathbb{R} \subseteq \mathbb{C}$ – подполе, т.е. поле \mathbb{C} содержит вещественные числа и операции сложения и умножения ограничиваются на \mathbb{R} в обычные операции сложения и умножения.⁴⁸
2. Для любого не константного многочлена $f \in \mathbb{C}[x]$ существует корень $\alpha \in \mathbb{C}$, т.е. $f(\alpha) = 0$.
3. Поле \mathbb{C} является минимальным полем, удовлетворяющим предыдущим свойствам, т.е. для любого поля F такого, что $\mathbb{R} \subseteq F \subseteq \mathbb{C}$ если F обладает двумя предыдущими свойствами, то $F = \mathbb{C}$.

Тогда оно называется полем комплексных чисел.

Стоит сделать важное замечание. Из определения вообще говоря не следует, что подобное поле существует, но даже если оно и существует, то не понятно, вообще говоря, единственно ли оно. Как можно ожидать, такое поле обязательно существует и оказывается, что оно единственно в некотором естественном смысле. Потому идейно к определению выше надо относиться так: это набросок тех свойств, которые мы хотели бы получить от нашего поля, а дальше вся работа заключается в том, чтобы показать, во-первых, что таких свойств добиться можно и построить необходимое поле, а во-вторых, что как бы мы ни построили поле комплексных чисел, всегда получится одно и то же.

Как вы понимаете построить поле удовлетворяющее свойству (2) – не простая задача. Потому обычно поступают по-другому. Мы построим поле с более слабым свойством, что существует решение только у уравнения $x^2 + 1 = 0$. А уже потом покажем, что подобное поле удовлетворяет более сильному условию (2) из определения. Единственность мы с вами доказывать не будем в силу того, что эта тема будет затронута в курсе алгебры в общем виде.

5.3 Две модели комплексных чисел

В этом разделе я построю две модели комплексных чисел. Для того чтобы различать эти модели, я для начала буду обозначать их \mathbb{C}_1 и \mathbb{C}_2 . Но как только мы поймем, что это одно и то же, мы будем опускать индекс и обозначать построенное поле через \mathbb{C} .

Символьная модель Пусть \mathbb{C}_1 – это множество картинок вида $a + bi$, где $a, b \in \mathbb{R}$ – вещественные числа, а i и $+$ – картинки. Множество мы определили, теперь надо определить операции сложения и умножения. Сумму картинок определим покомпонентно:

$$(a + bi) + (c + di) = (a + c) + (b + d)i, \quad \text{где } a, b, c, d \in \mathbb{R}$$

Умножение определим исходя из соображений $i^2 = -1$. Тогда

$$(a + bi)(c + di) = (ac - bd) + (ad + bc)i, \quad \text{где } a, b, c, d \in \mathbb{R}$$

На этом этапе необходимые данные для определения поля нами построены. Осталось дело за малым – проверить все 10 аксиом. Эту интереснейшую задачу я оставлю в качестве упражнения, но обязательно проверьте эти аксиомы.

⁴⁸В терминологии ниже вложение $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ является гомоморфизмом полей.

Теперь \mathbb{C}_1 является полем. Вещественные числа в него вкладываются так: число $r \in \mathbb{R}$ идет в картинку $r + 0i \in \mathbb{C}_1$. Теперь надо проверить, что сложить два вещественных числа – это все равно, что сложить их как два комплексных числа. Аналогично, умножить два вещественных числа – это все равно, что умножить их как два комплексных числа. Напоследок заметим, что комплексное число i выбрано так, чтобы оно являлось решением уравнения $x^2 + 1 = 0$.

Матричная модель Пусть \mathbb{C}_2 – это множество матриц вида $\begin{pmatrix} a & -b \\ b & a \end{pmatrix} \in M_2(\mathbb{R})$. Множество построено, теперь дело за операциями. Придумывать их не надо, это будут обычные матричные сложение и умножение. Единственное, что надо проверить, это что сумма и произведение матриц из \mathbb{C}_2 остаются в \mathbb{C}_2 .⁴⁹

Как и с первой моделью, мы только что построили все необходимые данные для определения поля, теперь надо проверить аксиомы. И тут нам очень пригождаются матрицы. Почти все аксиомы будут автоматически следовать из соответствующих свойств матричных операций. Единственное, что надо проверить: коммутативность умножения и что любой ненулевой элемент обратим. Я сейчас опять поступлю не очень честно и попрошу жаждущего знаний читателя все проверить самостоятельно.⁵⁰

Вещественные числа вкладываются в \mathbb{C}_2 в виде скалярных матриц, то есть $r \in \mathbb{R}$ идет в $rE \in \mathbb{C}_2$. Как мы знаем при этом операции матричного сложения и умножения превращаются в операции сложения и умножения вещественных чисел. Осталось найти решение уравнения $x^2 + 1 = 0$. Для этого заметим, что матрица $\begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ удовлетворяет этому уравнению.

Сравнение полей Для того чтобы сравнить различные поля и сказать, что они одинаковые или различные нам потребуется понятие изоморфизма полей.

Определение 40. Пусть F_1 и F_2 поля. Отображение $\varphi: F_1 \rightarrow F_2$ называется гомоморфизмом полей, если

1. $\varphi(x + y) = \varphi(x) + \varphi(y)$ для любых $x, y \in F_1$.
2. $\varphi(xy) = \varphi(x)\varphi(y)$ для любых $x, y \in F_1$.
3. $\varphi(1) = 1$.

Если φ является биекцией, то оно называется изоморфизмом.

Стоит отметить, что гомоморфизм полей всегда инъективен. Попробуйте доказать это. Кроме того, если отображение φ инъективно, то достаточно лишь проверить первые два свойства гомоморфизма, т.е. единица автоматически перейдет в единицу.⁵¹

Мы будем говорить что два поля изоморфны, если между ними существует изоморфизм. Про изоморфные поля надо думать, как про одинаковые поля. Действительно, что значит, что между множествами есть биекция. Это значит, что это на самом деле одно и то же множество, а биекция лишь переопределяет имена, которыми называются наши элементы. Изоморфизм кроме всего прочего сохраняет операции, это значит, что отождествив элементы наших полей, мы не различаем проделанных операций. Так как поле для нас – это множество с операциями, то значит мы не увидим никакой разницы, между полями, если в них одинаковые операции.

Задачи 41. Пусть $\varphi: K \rightarrow L$ – гомоморфизм полей. Покажите, что выполнены следующие вещи:

1. $\varphi(0) = 0$.
2. $\varphi(-x) = -\varphi(x)$ для любого $x \in K$.
3. Если в определении гомоморфизма оставить только свойства 1 и 2, то $\varphi(1)$ либо 0, либо 1. В частности, если φ инъективно, то $\varphi(1) = 1$.
4. $\varphi(x^{-1}) = \varphi(x)^{-1}$ для любого ненулевого $x \in K$.

⁴⁹Это, пусть и легкое, упражнение мы оставляем на совести читателя.

⁵⁰На самом деле я всего лишь полу-честен с вами ибо чуть ниже будут проведены все соответствующие проверки.

⁵¹Догадливый читатель уже сообразил, что в этом месте будет фраза: «Проверьте это».

Сравнение моделей комплексных чисел Прежде чем объяснить, что \mathbb{C}_1 и \mathbb{C}_2 – это одно и то же. Нам понадобится еще одно определение. Дело в том, что в наших полях лежат дополнительно вещественные числа и мы, когда будем сравнивать эти два поля, хотим чтобы это сравнение было согласовано в каком-то смысле с вещественными числами.

Определение 42. Пусть F_1 и F_2 – два поля, содержащие поле вещественных чисел \mathbb{R} , то есть $\mathbb{R} \subseteq F_1$ и $\mathbb{R} \subseteq F_2$ и операции с F_i ограничиваются на соответствующие операции на вещественных числах. Будем говорить, что $\varphi: F_1 \rightarrow F_2$ является изоморфизмом над \mathbb{R} , если

1. φ является изоморфизмом.
2. $\varphi(r) = r$ для любого вещественного числа $r \in \mathbb{R}$.

Давайте построим изоморфизм над \mathbb{R} между \mathbb{C}_1 и \mathbb{C}_2 . А именно: $\varphi: \mathbb{C}_1 \rightarrow \mathbb{C}_2$ будет действовать по правилу $a + bi \mapsto \begin{pmatrix} a & -b \\ b & a \end{pmatrix}$. По построению очевидно, что данное отображение является биекцией. Кроме того, очевидно, что оно переводит сумму в сумму. Методом пристального взгляда проверяем, что φ сохраняет умножение. Вещественное число $r = r + 0i$ переходит в матрицу $\begin{pmatrix} r & 0 \\ 0 & r \end{pmatrix} = rE$. С учетом нашего отождествления вещественных чисел с подмножествами в \mathbb{C}_1 и \mathbb{C}_2 последнее означает, что $\varphi(r) = r$ для любого $r \in \mathbb{R}$. То есть нет никакой разницы между этими двумя моделями. Причем на столько нет разницы, что при нашем отождествлении все новые числа в одной модели имеют ровно те же отношения со старыми числами, что и в другой (это по сути философия изоморфизма над \mathbb{R}). С этого момента мы будем обозначать любую из этих двух моделей через \mathbb{C} .

5.4 Простейшие свойства и операции

Комплексное сопряжение Определим следующую операцию $\bar{\cdot}: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ по правилу $z = a + bi \mapsto \bar{z} = a - bi$. На языке матричной модели эта операция соответствует транспонированию. Мы знаем, что транспонирование переводит сумму в сумму, а на произведении действует так $(AB)^t = B^t A^t$, но так как \mathbb{C}_2 коммутативно, то для матриц из \mathbb{C}_2 мы имеем $(AB)^t = A^t B^t$. Кроме того сопряжение биективно, как видно из построения и переводит вещественные числа в вещественные. Значит сопряжение является изоморфизмом \mathbb{C} на \mathbb{C} над \mathbb{R} .

Сделаем еще одно полезное замечание: на матричном языке сопряжение так же совпадает с вычислением присоединенной матрицы. Действительно,

$$\begin{pmatrix} a & -b \\ b & a \end{pmatrix}^t = \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overline{a} & \overline{-b} \\ \overline{b} & \overline{a} \end{pmatrix}$$

У последнего замечания есть интересное философское следствие. Заметим, что сопряжение переводит i в $-i$. А так как оно является изоморфизмом, то это означает, что между i и $-i$ нет никакой разницы. То есть если мы внезапно обозначим $-i$ за j , то i превратится в $-j$ и все комплексные числа будут иметь вид $a + bj$ и в этой новой форме никто не догадается, что j это была $-i$, а не опечатка наборщика перепутавшего буквы i и j . То есть в поле комплексных чисел есть небольшая свобода выбора. Мы случайно выбрали один из корней уравнения $x^2 + 1 = 0$ за i и на самом деле нет никакой разницы какой из его корней мы так обозначим.

Вещественная и мнимая части Когда комплексное число записано в виде $z = a + bi$, где $a, b \in \mathbb{R}$, мы говорим, что это его алгебраическая форма. В таком случае число a называется его вещественной частью и обозначается $\operatorname{Re} z$, а b называется мнимой частью z и обозначается $\operatorname{Im} z$. Числа с нулевой мнимой частью – это вещественные числа, а числа с нулевой вещественной частью называются чисто мнимыми.

Заметим, что для любого числа $z \in \mathbb{C}$ верно

1. $z \in \mathbb{R}$ тогда и только тогда, когда $\bar{z} = z$.
2. $z \in i\mathbb{R}$ тогда и только тогда, когда $\bar{z} = -z$.

5.5 Геометрическая модель

Комплексные числа \mathbb{C} можно отождествить с вещественной плоскостью \mathbb{R}^2 , а именно $a + bi$ соответствует вектору на плоскости $\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$. Таким образом про каждое комплексное число можно думать геометрически как про вектора. При этом сложение комплексных чисел соответствует сложению векторов на плоскости.

У каждого вектора есть длина $|z| = \sqrt{a^2 + b^2}$ – эта величина называется модулем комплексного числа. В матричной модели у нас определитель, легко увидеть, что $\det z = |z|^2$. Перечислим свойства модуля в следующем утверждении.

Утверждение. Модуль комплексного числа обладает следующими свойствами:

1. $|-|: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{R}_+$ является нормой, то есть
 - $|z| \geq 0$ для любого $z \in \mathbb{C}$, причем равенство нулю достигается тогда и только тогда, когда $z = 0$.
 - $|\lambda z| = |\lambda||z|$ для любого $\lambda \in \mathbb{R}$ и $z \in \mathbb{C}$.
 - $|z + w| \leq |z| + |w|$ для любых $z, w \in \mathbb{C}$.
2. $z\bar{z} = |z|^2$ для любого $z \in \mathbb{C}$.
3. $|zw| = |z||w|$ для любых $z, w \in \mathbb{C}$.
4. $z^{-1} = \frac{\bar{z}}{|z|^2}$.

Доказательство. Проверку (1) я оставляю на совести читателя. (2) – это явная формула. (3) доказывается с использованием (2). А вот (4) – это явная формула для обратной матрицы, потому что в матричной модели \bar{z} – это сопряженная матрица, а $|z|^2$ – это $\det(z)$. \square

Тригонометрическая форма Пусть $z \in \mathbb{C}$ и пусть $z \neq 0$. Тогда мы можем сделать следующее

$$z = a + bi = \sqrt{a^2 + b^2} \left(\frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} + \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} i \right)$$

У числа в скобках вещественная и мнимая часть после возведения в квадрат в сумме дают единицу, а значит они являются косинусом и синусом некоторого числа φ , а значит, z можно переписать в следующей форме

$$z = |z|(\cos \varphi + i \sin \varphi)$$

Такая запись комплексного числа называется тригонометрической. Число φ определено с точностью до $2\pi n$, $n \in \mathbb{Z}$ и называется аргументом комплексного числа. Геометрически φ – это угол между осью OX и вектором проходящим из нуля в z . Угол отсчитывается против часовой стрелки. Существует следующее удобное соглашение

$$e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi$$

Оказывается, что при таком определении экспонента обладает всеми знакомыми нам свойствами.⁵² В этом случае тригонометрическую форму можно записать так

$$z = |z|e^{i\varphi} = e^{\ln|z| + i\varphi}$$

Алгебраическая форма записи комплексного числа хорошо согласована со сложением, а тригонометрическая – с умножением, о чем говорит следующее.

Утверждение. Для комплексных чисел в тригонометрической форме верны следующие формулы

1. Пусть $z_1 = r_1(\cos \varphi + i \sin \varphi)$ и $z_2 = r_2(\cos \psi + i \sin \psi)$ – два ненулевых комплексных числа, тогда

$$z_1 z_2 = r_1 r_2 (\cos(\varphi + \psi) + i \sin(\varphi + \psi))$$

2. Пусть $z_1 = r_1(\cos \varphi + i \sin \varphi)$ и $z_2 = r_2(\cos \psi + i \sin \psi)$ – два ненулевых комплексных числа, тогда

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{r_1}{r_2} (\cos(\varphi - \psi) + i \sin(\varphi - \psi))$$

3. **Формулы Муавра** Пусть $z = r(\cos \varphi + i \sin \varphi)$ – ненулевое комплексное число, тогда

$$z^n = r^n (\cos(n\varphi) + i \sin(n\varphi))$$

⁵²Если заглянуть чуть глубже в большую науку, то окажется, что вас ждет некоторый набор чудес. Окажется, что в комплексном мире очень мало гладких функций и они очень жесткие. Это значит, что для любой вещественной гладкой функции $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ существует не более одной комплексной гладкой функции $\tilde{f}: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$, продолжающей f , в том смысле, что $\tilde{f}(r) = f(r)$ для любой $r \in \mathbb{R}$. Потому как бы мы не продолжили нашу вещественную экспоненту в комплексный мир, все эти способы дают одно и то же.

Доказательство. 1) По определению

$$r_1(\cos \varphi + i \sin \varphi)r_2(\cos \psi + i \sin \psi) = r_1r_2(\cos \varphi \cos \psi - \sin \varphi \sin \psi + i(\sin \varphi \cos \psi + \sin \psi \cos \varphi)) = \\ r_1r_2(\cos(\varphi + \psi) + i \sin(\varphi + \psi))$$

2) Можно проверить двумя способами. Либо воспользоваться тем, что $1/z_2 = \bar{z}_2/|z_2|^2$, либо домножить требуемое равенство на z_2 и тогда проверка сводится к первому пункту.

3) Это непосредственное следствие первого пункта. \square

5.6 Основная теорема алгебры

Определение 43. Поле F называется алгебраически замкнутым, если для любого многочлена $f \in F[x] \setminus F$ существует корень $\alpha \in F$, то есть $f(\alpha) = 0$.

Утверждение 44 (Основная теорема алгебры). Поле \mathbb{C} построенное в разделе 5.3 алгебраически замкнуто.

План доказательства Доказательство основной теоремы алгебры проведем следующим образом. Нам надо будет показать, что верны следующие утверждения:

1. Пусть $p \in \mathbb{C}[x]$ – произвольный многочлен отличный от константы. Тогда для любой константы $c > 0$ найдется $r > 0$ такое, что для любого $z \in \mathbb{C}$ с условием $|z| > r$ выполнено $|p(z)| > c$.⁵³
2. Пусть $p \in \mathbb{C}[x]$ – произвольный многочлен, тогда отображение $|p|: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{R}$ заданное по правилу $z \mapsto |p(z)|$ достигает минимума, то есть найдется такая точка $z_0 \in \mathbb{C}$, что $|p(z_0)| \leq |p(z)|$ для любого $z \in \mathbb{C}$.
3. Пусть $p \in \mathbb{C}[x]$ – не константный многочлен и пусть $z \in \mathbb{C}$ такая точка, что $p(z) \neq 0$. Тогда найдется точка $z_1 \in \mathbb{C}$ такая, что $|p(z_1)| < |p(z)|$.

Первое утверждение нужно для доказательства второго. В свою очередь второе утверждение и третье дадут доказательство теоремы. В начале я покажу, как из утверждений два и три вытекает основная теорема.

Доказательство основной теоремы алгебры. Возьмем произвольный неконстантный многочлен $p \in \mathbb{C}[x]$. Мы должны показать, что он имеет хотя бы один корень в \mathbb{C} . Предположим противное, пусть у него нет корней. По второму пункту мы знаем, что найдется точка минимума $z_0 \in \mathbb{C}$ для отображения $|p|: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{R}$. То есть для любой точки $z \in \mathbb{C}$ будет выполнено $|p(z_0)| \leq |p(z)|$. Так как по предположению у нас нет корней у многочлена p , то $p(z_0) \neq 0$. А значит по третьему пункту мы можем найти точку $z_1 \in \mathbb{C}$ такую, что $|p(z_1)| < |p(z_0)|$, что противоречит тому, что z_0 была точкой минимума. Противоречие получилось из нашего предположения, что p не имело корней. \square

Теперь для завершения доказательства нам надо лишь показать истинность утверждений два и три выше. Однако, для доказательства второго мне понадобится первое утверждение.

Утверждение 45. Пусть $p \in \mathbb{C}[x]$ – произвольный многочлен отличный от константы. Тогда для любого $c > 0$ найдется $r > 0$, что $|p(z)| > c$ при $|z| > r$.

Доказательство. Пусть $p(z) = a_0 + a_1z + \dots + a_nz^n$ и $a_n \neq 0$. Тогда

$$p(z) = a_nz^n \left(1 + \frac{a_{n-1}}{a_nz} + \dots + \frac{a_0}{a_nz^n} \right) = a_nz^n(1 + \omega(z))$$

Фиксируем произвольное положительное число $r > 1$ и рассмотрим $|z| > r$. Тогда

$$|\omega(z)| \leq \left| \frac{a_{n-1}}{a_nz} \right| + \dots + \left| \frac{a_0}{a_nz^n} \right| \leq \left| \frac{a_{n-1}}{a_n} \right| \frac{1}{r} + \dots + \left| \frac{a_0}{a_n} \right| \frac{1}{r^n} \leq \left(\left| \frac{a_{n-1}}{a_n} \right| + \dots + \left| \frac{a_0}{a_n} \right| \right) \frac{1}{r}$$

Последнее выражение обозначим за $\delta(r)$, оно идет к нулю при $r \rightarrow \infty$. Давайте теперь оценим вне этого диска значение $|p(z)|$:

$$|p(z)| = |a_nz^n(1 + \omega(z))| = |a_n||z|^n|1 + \omega(z)| \geq |a_n||z|^n(1 - |\omega(z)|) \geq |a_n||r|^n(1 - \delta(r)) \rightarrow \infty, \text{ при } r \rightarrow \infty$$

То есть мы сможем найти r при котором вне диска $\{z \in \mathbb{C} \mid |z| \leq r\}$ будет выполняться $|p(z)| > c$. \square

⁵³То есть для z больших по модулю значения модуля многочлена тоже большие.

Утверждение 46. Пусть $p \in \mathbb{C}[x]$ – произвольный многочлен, тогда отображение $|p|: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{R}$ заданное по правилу $z \mapsto |p(z)|$ достигает минимума, то есть найдется такая точка $z_0 \in \mathbb{C}$, что $|p(z_0)| \leq |p(z)|$ для любого $z \in \mathbb{C}$.

Доказательство. Идея доказательства этого утверждения следующая. Пусть $c = |p(0)|$. Если это ноль, то мы нашли наш минимум. Пусть $c \neq 0$, тогда давайте найдем диск $D_r(0)$ с центром в нуле и радиуса r такой, что $|p(z)| > c$ для всех $z \notin D_r(0)$. Тогда, по предыдущему утверждению 45 мы можем найти диск $D_r(0) = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| \leq r\}$, вне которого $|p(z)| > c$. А значит, если мы найдем минимум для $|p(z)|$ на диске $D_r(0)$ он автоматически будет минимумом в \mathbb{C} . Действительно, внутри диска в этой точке мы будем принимать наименьшее значение, в частности значение будет не больше c . Но вне диска мы не можем принять значение меньше, так как там мы строго больше c .

Теперь надо найти минимум внутри диска $D_r(0)$. Давайте я приведу два доказательства: идейное и доказательство в лоб. Идейное доказательство такое. Функция $\phi: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{R}$ по правилу $z \mapsto |p(z)|$ есть композиция двух отображений: полиномиального $p: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ и модуля $|-|: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{R}$ по правилу $z \mapsto |z|$. Оба эти отображения непрерывны, а значит и отображение $z \mapsto |p(z)|$ тоже непрерывно. Кроме того, диск $D_r(0)$ является компактом, а любое непрерывное отображение на компакте достигает минимума.⁵⁴ \square

Минимум на диске (по простому?) Чтобы найти минимум на диске, мне придется пользоваться фактами из математического анализа, ведь свойства комплексных чисел должны зависеть от особенностей их природы, которая не чисто алгебраическая. Нам понадобится следующий факт.⁵⁵

Утверждение (БД). У любой последовательности на отрезке найдется сходящаяся подпоследовательность. То есть для любой $a_n \in [a, b]$ найдется подпоследовательность a_{n_k} такая, что существует

$$\lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k} \in [a, b]$$

Рассмотрим функцию $f = |p|: D_r(0) \rightarrow \mathbb{R}$ по правилу $f(z) = |p(z)|$. Так как эта функция ограничена снизу нулем, то существует нижняя грань

$$a = \inf_{z \in D_r(0)} f(z)$$

По определению нижней грани, мы можем выбрать последовательность $z_n \in D_r(0)$ такую, что $f(z_n) \rightarrow a$. Такая последовательность обязательно имеет вид $z_n = a_n + ib_n$, где $a_n, b_n \in [-r, r]$ – последовательности вещественных чисел на отрезке. Из них мы по очереди можем выбрать сходящиеся подпоследовательности a_{n_k} и b_{n_k} , так что последовательность z_{n_k} сходится в $D_r(0)$ к какой-то точке z_0 . А значит

$$a = \lim_{k \rightarrow \infty} f(z_{n_k}) = \lim_{k \rightarrow \infty} |p(z_{n_k})| = \left| \lim_{k \rightarrow \infty} p(z_{n_k}) \right| = \left| p \left(\lim_{k \rightarrow \infty} z_{n_k} \right) \right| = |p(z_0)|$$

Давайте объясним все переходы. Первый – это определение нашей последовательности, мы по ней подбираем к инфимуму. Второй – это непрерывность модуля, то есть для комплексного числа верно $\lim_{n \rightarrow \infty} |z_n| = |\lim_{n \rightarrow \infty} z_n|$. Действительно, ведь $|a + bi| = \sqrt{a^2 + b^2}$ и функция корня от суммы квадратов непрерывна, то есть предел в точке равен ее значению в точке. Третий переход следует из непрерывности многочлена $p(z)$. Действительно, такой многочлен – это сумма произведений мнимых и вещественных частей с коэффициентами, а в таких функциях мы тоже умеем переходить к пределу. Последнее равенство – это возможность взять предел у выбранной подпоследовательности. Таким образом в точке z_0 достигается нижняя грань на диске $D_r(0)$, а значит это точка минимума.

Минимум обязан быть нулем Теперь осталось доказать утверждение (3), что минимум для функции $|p(z)|$ (если p не константа) обязательно должен быть нулем. Точнее мы покажем, что если $|p(z)| \neq 0$, то обязательно найдется точка с еще меньшим модулем, то есть найдется $z' \in \mathbb{C}$, что $|p(z')| < |p(z)|$. Но в начале нам понадобится следующий пример.

Пример 47 (V.I.P. пример). Рассмотрим $p(z) = z^d$ и посмотрим на функцию $p: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ по правилу $z \mapsto p(z) = z^d$. Давайте рассмотрим окружность $z(t) = re^{2\pi it}$ для $t \in [0, 1]$. Когда t пробегает от 0 до 1, то $z(t) = re^{2\pi it}$ пробегает по окружности радиуса r один оборот против часовой стрелки. Давайте посмотрим на образ этой окружности под действием p , получим $p(z(t)) = r^d e^{2\pi i d t}$. То есть теперь, когда t пробегает от 0 до 1 мы пробегаем окружность радиуса r^d но уже d раз против часовой стрелки (делаем d оборотов вместо одного).

⁵⁴Если вы сейчас пребываете в шоке, то это нормально. Сейчас я исправлюсь и напишу простое доказательство, но он будет несколько длиннее.

⁵⁵Искренне надеюсь, что с ним вы знакомы. Его можно считать одной из аксиом вещественных чисел.

Утверждение 48. Пусть $p \in \mathbb{C}[x]$ – произвольный не константный многочлен и $z_0 \in \mathbb{C}$ такая точка, что $p(z_0) \neq 0$. Тогда найдется точка $z_1 \in \mathbb{C}$ такая, что $|p(z_1)| < |p(z_0)|$.

Доказательство. Рассмотрим отображение $|p|: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{R}$. По предыдущему утверждению, у него есть точка минимума z_0 . Давайте определим многочлен $g(z) = p(z_0 + z)$. Тогда у многочлена $g(z)$ то же множество значений, что и у $p(z)$, но у него точка 0 является точкой минимума. В свою очередь g представляется в виде

$$g(z) = a_0 + a_r z^r + a_{r+1} z^{r+1} + \dots + a_n z^n$$

Здесь выше a_0 – это значение многочлена g в нуле, которое по условию не ноль. Число a_r – это первый ненулевой коэффициент после a_0 в многочлене g . Учтите, что r может быть 1, а может быть больше 1. Давайте перепишем многочлен g следующим образом:

$$g(z) = a_0 + a_r z^r \left(1 + \frac{a_{r+1}}{a_r} z + \dots + \frac{a_n}{a_r} z^{n-r} \right) = a_0 + a_r z^r (1 + \omega(z))$$

где

$$\omega(z) = \frac{a_{r+1}}{a_r} z + \dots + \frac{a_n}{a_r} z^{n-r}$$

Давайте в начале посмотрим на многочлен $h(z) = a_0 + a_r z^r$ и покажем что для него найдется точка z_1 такая, что $|h(z_1)| < |h(z_0)|$. Если $|z| = \delta$, то z^r описывает окружность радиуса δ^r вокруг нуля и делает r оборотов. Выражение $a_r z^r$ описывает окружность радиуса $|a_r| \delta^r$ вокруг нуля и делает r оборотов.⁵⁶ А значит $h(z) = a_0 + a_r z^r$ описывает окружность радиуса $|a_r| \delta^r$ вокруг точки a_0 и делает r оборотов. При малых δ эта окружность пересекается с радиус вектором a_0 в некоторой точке m . Тогда решая уравнение $m = a_0 + a_r z^r$,⁵⁷ мы найдем точку z_1 такую, что $h(z_1) = m$. Но по построению точка m ближе к нулю, чем a_0 , а это и значит, что $|h(z_1)| < |h(z_0)|$.

Теперь давайте посмотрим, что происходит с функцией g . Давайте для начала оценим $\omega(z)$, когда $|z| = \delta < 1$:

$$|\omega(z)| \leq \left| \frac{a_{r+1}}{a_r} \right| \delta + \dots + \left| \frac{a_n}{a_r} \right| \delta^{n-r} \leq \left(\left| \frac{a_{r+1}}{a_r} \right| + \dots + \left| \frac{a_n}{a_r} \right| \right) \delta = C\delta$$

Последнее неравенство следует из того, что $\delta < 1$. А через C мы обозначили полученную константу. Тогда при $|z| = \delta$ имеем⁵⁸

$$|g(z) - h(z)| = |a_{r+1} z^{r+1} + \dots + a_n z^n| = |a_r| \delta^r |\omega(z)| \leq |a_r| \delta^r C\delta = RC\delta$$

где за R мы обозначили радиус окружности описываемой $h(z)$ при $|z| = \delta$. Таким образом мы видим, что при малых δ выполнено $|g(z_1) - h(z_1)| < RC\delta$.⁵⁹ Но тогда

$$|g(z_1)| \leq |h(z_1)| + RC\delta$$

Но по построению

$$|h(z_1)| = |m| = |a_0| - R$$

Значит

$$|g(z_1)| \leq |h(z_1)| + RC\delta = |a_0| - R(1 - C\delta) < |a_0|$$

где последнее неравенство выполнено при малых δ , когда $C\delta < 1$. □

5.7 Многочлены

В этом разделе я хочу сказать пару слов про многочлены. Пусть F – некоторое поле. Тогда многочлен над полем F – это картинка вида $f = a_0 + a_1 x + \dots + a_n x^n$, где $a_i \in F$. Формально, такая картинка – это конечная последовательность чисел (a_0, \dots, a_n) , но психологически лучше и правильнее думать именно про картинки. Еще можно для краткости писать $f = \sum_{k \geq 0} a_k x^k$, подразумевая, что в этой сумме только конечное число

⁵⁶Начальная точка для окружности имеет аргумент равный аргументу a_r .

⁵⁷Это мы можем сделать, так как тут задача про извлечение корня из числа $(m - a_0)/a_r$.

⁵⁸Давайте я объясню смысл этой оценки. Мы видим, что при $|z| = \delta$ функция $h(z)$ описывает окружность вокруг точки a_0 радиуса R . Полученная оценка показывает, что функция $g(z)$ отличается от $h(z)$ на величину εR , то есть лежит в кольце возле этой окружности. А значит, $g(z)$ пересечет вектор a_0 в точке близкой к m – точке пересечения вектора a_0 с $h(z)$.

⁵⁹Здесь z_1 – точка такая, что $h(z_1)$ лежит на векторе a_0 .

ненулевых коэффициентов. Это удобное соображение позволяет удобно записать правила для сложения и умножения многочленов, которые определяются следующим образом

$$\left(\sum_{k \geq 0} a_k x^k\right) + \left(\sum_{k \geq 0} b_k x^k\right) = \sum_{k \geq 0} (a_k + b_k) x^k \quad \text{и} \quad \left(\sum_{k \geq 0} a_k x^k\right) \left(\sum_{k \geq 0} b_k x^k\right) = \sum_{k \geq 0} \left(\sum_{m+n=k} a_m b_n\right) x^k$$

Таким образом многочлен – это не функция, а картинка. Однако, каждый многочлен $f \in F[x]$ задает функцию $F \rightarrow F$ по правилу $x \mapsto f(x)$. Но в случае конечных полей (то есть полей из конечного числа элементов) разные многочлены могут давать одни и те же функции. Напомню, что степень многочлена f – это наибольший номер n , что коэффициент $a_n \neq 0$.⁶⁰

Примеры

- Пример конечного поля.

Пусть $p \in \mathbb{Z}$ – некоторое простое число. Обозначим через \mathbb{Z}_p множество остатков по этому числу, то есть $\mathbb{Z}_p = \{0, 1, \dots, p-1\}$. Введем на этом множестве операции сложения и умножения по модулю простого числа p , то есть

$$a + b = a + b \pmod{p} \quad \text{и} \quad ab = ab \pmod{p}$$

Тогда можно проверить, что \mathbb{Z}_p является полем, где числа 0 и 1 являются нулем и единицей поля. Единственная аксиома, которая требует усилий – показать, что любой ненулевой элемент \mathbb{Z}_p обратим. Давайте возьмем произвольный ненулевой элемент $a \in \mathbb{Z}_p$. Так как $a < p$ и p – простое число, то $(a, p) = 1$. По расширенному алгоритму евклида найдутся целые числа $u, v \in \mathbb{Z}$ такие, что $1 = ua + vp$. Рассмотрим это равенство по модулю простого числа p и получим, что $ua = 1 \pmod{p}$, а это и означает, что u является обратным к a по умножению.

- Пример, когда разные многочлены дают одну и ту же функцию.

Рассмотрим многочлены $\mathbb{Z}_2[x]$. Тогда \mathbb{Z}_2 состоит только из 0 и 1. В этом случае все многочлены x^n задают одну и ту же функцию.

Определение 49. Пусть F – произвольное поле и $f \in F[x]$ – некоторый многочлен. Если число $a \in F$ является его корнем, то f делится на $x - a$, а значит представляется в виде $f(x) = (x - a)g(x)$ для некоторого $g \in F[x]$. Аналогично, если a является корнем g , то можно выделить $(x - a)$ и в g и так далее. В итоге можно найти разложение $f(x) = (x - a)^k g(x)$, где $g(a) \neq 0$. В этом случае говорят, что k – это кратность корня a в многочлене f . Корень кратности 1 называется простым.

Определение 50. Пусть $f \in F[x]$ имеет вид $f = a_0 + a_1 x + \dots + a_n x^n$. Определим формальную производную следующим образом $f' = a_1 + 2a_2 x + \dots + na_n x^{n-1}$ или по-другому $f' = \sum_{k \geq 1} k a_k x^{k-1}$.

Несложно убедиться, что, определив таким образом производную, она удовлетворяет всем естественным свойствам, к которым мы привыкли в анализе. В качестве упражнения предлагается проверить следующее.

Утверждение 51. Пусть F – произвольное поле. Для формальной производной выполнены следующие свойства:

1. $(f + g)' = f' + g'$ для любых $f, g \in F[x]$.
2. $(\lambda f)' = \lambda f'$ для любых $\lambda \in F$ и $f \in F[x]$.
3. $(fg)' = f'g + fg'$ для любых $f, g \in F[x]$.
4. $f(g(x))' = f'(g(x))g'(x)$ для любых $f, g \in F[x]$.

С помощью формальной производной можно проверить кратность корня в произвольном многочлене. Для начала нам нужно следующее вспомогательное утверждение.

Утверждение 52. Пусть F – произвольное поле, $f \in F[x]$ – некоторый многочлен и $a \in F$ – его корень кратности k . Тогда

⁶⁰По-хорошему надо еще аккуратно определить степень нулевого многочлена. Но ее обычно определяют по ситуации так, как удобнее. Например можно положить -1 или $-\infty$ и есть еще пара способов. Но об этом можно особенно не запариваться.

1. Число a является корнем кратности хотя бы $k - 1$ в многочлене f' .

2. Если число $k \neq 0$ в F , то a является корнем кратности в точности $k - 1$ в многочлене f' .

Доказательство. 1) По определению имеем $f = (x - a)^k g(x)$ причем $g(a) \neq 0$. Возьмем производную от f , получим

$$f' = k(x - a)^{k-1}g(x) + (x - a)^k g'(x) = (x - a)^{k-1}(kg(x) + (x - a)g'(x))$$

и мы видим, что у производной a имеет кратность хотя бы $k - 1$.

2) Давайте поймем, когда кратность может вырасти. Только если множитель $(kg(x) + (x - a)g'(x))$ зануляется в a . Если подставить a , то получим $kg(a)$. Число $g(a) \neq 0$ по выбору, но если $k \neq 0$, то и их произведение не ноль в поле F , а это будет означать, что кратность корня в точности $k - 1$. \square

Примеры и замечания

- Давайте продемонстрируем ситуацию, когда кратность корня может возрасти. Например, выберем $F = \mathbb{Z}_p$ и в качестве многочлена h рассмотрим $x^p - 1$. Тогда $h' = 0$. Теперь положим $f = xh(x) = x^{p+1} - x$. Тогда $f' = h(x) = x^p - 1$. С другой стороны $x^p - 1 = (x - 1)^p$, а значит 1 имеет кратность p в многочлене f . Но и в многочлене f' 1 имеет кратность p .
- Если для любого натурального числа $k \in \mathbb{N}$ в поле F выполнено, $k \neq 0$, то можно следующим образом проверить корень многочлена $f \in F[x]$ на кратность. Если $a \in F$ — некоторый корень. Надо посмотреть на $f'(a)$. Если это число ноль, то a корень кратности больше 1, а если не ноль, то кратности в точности 1.
- Если F произвольное поле, то общий алгоритм проверки корня на простоту следующий. Надо взять многочлен $f \in F[x]$, для которого a является корнем. Посчитать производную f' , потом посчитать нод $d(x) = (f, f')$. Если $d(a) = 0$, то a кратный корень, если $d(a) \neq 0$, то это корень кратности 1.⁶¹

⁶¹Я не буду останавливаться на доказательствах этих фактов. Все они вам встретятся в курсе алгебры.

6 Векторные пространства

6.1 Идея и определение

Идея Мы с вами до этого изучали много разных объектов, которые не сильно похожи друг на друга. Например, вектор-столбцы F^n , матрицы $M_{m \times n}(F)$, функции $f: X \rightarrow F$, многочлены $F[x]$. Все эти товарищи нам постоянно встречаются и каждый раз приходится для каждого из них все доказывать заново и во время доказательств мы видим, что наши рассуждения повторяются. Это означает, что на самом деле у всех этих объектов есть некий общий интерфейс, через который мы на самом деле с ним работаем. Самое главное в этом интерфейсе то, что мы можем брать элементы из этих объектов, умножать эти элементы на числа и складывать между собой. Абстрактное векторное пространство как раз и формализует идею такого общего интерфейса, через который в множестве можно складывать элементы и умножать на числа.

У такого подхода есть несколько плюсов. Во-первых, формальное удобство: как только вы что-то сделали для абстрактного векторного пространства и увидели, что что-то конкретное является таковым, то все ваши достижения автоматом применимы в этой конкретной ситуации. Общий алгоритм для векторного пространства будет одинаково хорошо работать и для столбцов, и для матриц, и для функций и т.д. Во-вторых, есть менее очевидный бонус. Когда мы доказываем что-то про абстрактное векторное пространство, то про него надо думать как про F^n . Это поможет вам не потеряться в формализме и догадаться, что откуда берется. Неформально это означает, что если вы что-то умеете делать для F^n , то это автоматически верно для любого векторного пространства! Формально это не совсем правда, но в классе хороших пространств это так.⁶² Тем не менее, даже в классе всех пространств, интуиция из F^n очень полезна.

Определение Следующее определение – это пример определения с контекстом. Это означает, что прежде, чем его дать, вы должны зафиксировать некоторую информацию, которая необходима для вашего определения и без этой информации оно – бессмысленный мусор. У определения векторного пространства в качестве такого контекста выступает некоторое поле F . Это значит, что пока вы не зафиксировали какое-то поле, вы не можете говорить о векторных пространствах над полем F , а «просто векторных пространств» без указания какого-либо поля не существует.

Определение 53. Пусть F – некоторое фиксированное поле. Тогда векторное пространство над полем F – это следующий набор данных $(V, +, \cdot)$, где

- V – множество. Элементы этого множества будут называться векторами.
- $+: V \times V \rightarrow V$ – бинарная операция, то есть правило, действующее так: $(v, u) \mapsto v + u$, где $u, v \in V$.
- $\cdot: F \times V \rightarrow V$ – бинарная операция, то есть правило, действующее так: $(\alpha, v) \mapsto \alpha v$, где $\alpha \in F$ и $v \in V$.

При этом эти данные удовлетворяют следующим 8 аксиомам:

1. **Ассоциативность сложения** Для любых векторов $u, v, w \in V$ верно $(u + v) + w = u + (v + w)$.
2. **Существование нулевого вектора** Существует такой вектор $0 \in V$, что для любого $v \in V$ выполнено $0 + v = v + 0 = v$.
3. **Существование противоположного вектора** Для любого вектора $v \in V$ существует вектор $-v \in V$ такой, что $v + (-v) = (-v) + v = 0$.
4. **Коммутативность сложения** Для любых векторов $u, v \in V$ верно $u + v = v + u$.
5. **Согласованность умножения со сложением векторов** Для любого числа $\alpha \in F$ и любых векторов $u, v \in V$ верно $\alpha(v + u) = \alpha v + \alpha u$.
6. **Согласованность умножения со сложением чисел** Для любых чисел $\alpha, \beta \in F$ и любого вектора $v \in V$ верно $(\alpha + \beta)v = \alpha v + \beta v$.
7. **Согласованность умножения с умножением чисел** Для любых чисел $\alpha, \beta \in F$ и любого вектора $v \in V$ верно $(\alpha\beta)v = \alpha(\beta v)$.
8. **Нетривиальность** Для любого $v \in V$ верно $1v = v$.⁶³

⁶²Под хорошими тут подразумеваются конечно мерные.

⁶³Здесь $1 \in F$.

Примеры

1. Поле F (или кто больше привык к вещественным числам \mathbb{R}) является векторным пространством над F (соответственно над \mathbb{R}).
2. Более обще, множество вектор-столбцов F^n является векторным пространством над F .
3. Множество матриц $M_{mn}(F)$ является векторным пространством над F .
4. Пусть X – произвольное множество, тогда множество функций $F(X, F) = \{f: X \rightarrow F\}$ является векторным пространством над F . Надо лишь объяснить как складывать функции и умножать на элементы F . Операции поточечные, пусть $f, g: X \rightarrow F$, тогда функция $(f + g): X \rightarrow F$ действует по правилу $(f + g)(x) = f(x) + g(x)$. Если $\alpha \in F$, то функция $(\alpha f): X \rightarrow F$ действует по правилу $(\alpha f)(x) = \alpha f(x)$.
5. Множество многочленов $F[x] = \{a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n \mid a_i \in F, n \in \mathbb{Z}_{\geq 0}\}$. Тут надо обратить внимание, что мы подразумеваем под многочленом. Для нас многочлен – это НЕ функция, многочлен – это картинка вида $a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n$.⁶⁴ Складываются и умножаются эти картинки по одинаковым правилам. Важно, что две такие картинки равны тогда и только тогда, когда у них равные коэффициенты. Множество всех многочленов $F[x]$ является векторным пространством над F .

Замечание Стоит отметить, что в обычных векторных пространствах мы привыкли к некоторым свойствам, которые бы хотелось иметь и в общем случае. Например, в F^n есть единственный нулевой вектор, а аксиомы в общем случае говорят, что нулевой вектор лишь существует. Однако, можно показать, что нулевой вектор автоматически единственный. Давайте перечислим некоторые непосредственные следствия из аксиом, которые я оставляю в качестве упражнения:

1. Нулевой вектор единственный.
2. Для любого $v \in V$ существует единственный $-v$.
3. Для любого вектора $v \in V$ верно $-v = (-1)v$.
4. Для любого вектора $v \in V$ имеем $0v = 0$.⁶⁵
5. Для любого числа $\alpha \in F$ верно $\alpha 0 = 0$.⁶⁶

6.2 Подпространства

Пусть V – векторное пространство над F . Тогда непустое подмножество $U \subseteq V$ называется подпространством, если на него можно ограничить операции $+$ и \cdot и относительно них оно является векторным пространством. Давайте определим подпространство формально.

Определение 54. Пусть V – векторное пространство над полем F . Тогда подмножество $U \subseteq V$ называется подпространством, если

1. U не пусто.⁶⁷
2. Для любых векторов $u, u' \in U$ верно, что $u + u' \in U$.
3. Для любого скаляра $\alpha \in F$ и вектора $u \in U$ верно, что $\alpha u \in U$.

Если U – подпространство в V , то на U можно корректно ограничить операции сложения и умножения на скаляр из исходного пространства V . Таким образом у нас получается набор данных $(U, +, \cdot)$ и теперь надо, чтобы выполнялись все аксиомы векторного пространства для них. Оказывается, что все аксиомы будут выполняться автоматически! Например, почему у нас будет $0 \in U$. Потому что если мы возьмем любой вектор $u \in U$, то $0 = 0u \in U$. Остальное я оставлю в качестве упражнения.

⁶⁴Для любителей формализма, можете считать, что многочлен – это конечная последовательность элементов F вида (a_0, \dots, a_n) , но длина последовательности может быть любой, включая нулевую.

⁶⁵Здесь слева 0 – это нулевой элемент поля, а справа 0 – это нулевой вектор.

⁶⁶Здесь 0 – это нулевой вектор в обеих частях равенства.

⁶⁷При наличии свойства (3) это свойство эквивалентно тому, что нулевой вектор V попадает в U . Действительно, если он попадает, то U не пусто. Наоборот, если $u \in U$ – какой-то вектор, то $0 = 0u \in U$ по третьему свойству.

Примеры

1. Для любого векторного пространства V подмножества 0 и V всегда являются подпространствами.
2. Множество $\{y \in F^n \mid Ay = 0\} \subseteq F^n$, где $A \in M_{m,n}(F)$, является векторным подпространством в F^n .
3. Множество многочленов $\mathbb{R}[x]$ является подпространством в пространстве $F(\mathbb{R}, \mathbb{R})$ – всех функций на прямой.

Обратите внимание, что подпространство из второго примера кажется устроено сложнее, чем векторное пространство F^n , в котором оно лежит. Однако, окажется, что взаимодействие с ним через абстрактный интерфейс векторного пространства происходит точно так же. То есть на самом деле подпространство устроено не сложнее, чем исходное пространство. Об этом речь пойдет после того, как мы узнаем, что такое базисы и что значит, что какие-то векторные пространства одинаковые.

6.3 Линейные комбинации

Мотивация Пусть у нас есть векторное пространство V над полем F . Давайте поймем, а что вообще с ним можно делать? Во-первых, V – это множество. Значит из него можно брать элементы. Во-вторых, там есть операция умножения на числа, то есть любой вектор можно умножить на какое-то число. В-третьих, вектора можно складывать. Все это означает, что все что можно делать с векторным пространством, это набрать каких-то векторов из него v_1, \dots, v_n и написать выражение вида $\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n$, для произвольных $\alpha_i \in F$. Это выражение будет задавать нам какой-то вектор из V . Как мы видим, особенно не разбежишься с разнообразием действий. Однако, важно, что с помощью подобных выражений можно вытащить абсолютно всю информацию из векторных пространств, которую только возможно. Именно поэтому все наше внимание будет посвящено выражениям такого вида, так как из них получится узнать все, что только можно про векторные пространства.

Линейные комбинации

Определение 55. Пусть V – некоторое векторное пространство над полем F и пусть $v_1, \dots, v_n \in V$ – некоторый набор векторов. Тогда выражение вида $\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n$, где $\alpha_i \in F$, называется линейной комбинацией v_1, \dots, v_n . Линейная комбинация называется тривиальной, если все $\alpha_i = 0$. В противном случае она называется нетривиальной.

Определение 56. Вектора $v_1, \dots, v_n \in V$ называются линейно зависимыми, если существует их нетривиальная линейная комбинация равная нулю, то есть для каких-то $\alpha_i \in F$ (так что хотя бы один не равен нулю) выражение $\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n = 0$. Подчеркнем, что вектора линейно независимы, если из равенства $\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n = 0$ следует, что все $\alpha_i = 0$.

Примеры

1. Вектор 0 всегда линейно зависим.
2. Вектор $v \in V$ линейно зависим тогда и только тогда, когда он равен нулю.
3. Вектора $v_1, v_2 \in V$ линейно зависимы тогда и только тогда, когда они пропорциональны (то есть один из них равен другому умноженному на элемент поля).

Заметим, что если множество векторов v_1, \dots, v_k линейно независимо, то и любое его подмножество тоже линейно независимо. Потому интересно не уменьшать, а увеличивать линейно независимые подмножества векторов. Линейно независимое множество векторов v_1, \dots, v_k называется максимальным, если при добавлении к нему любого вектора оно становится линейно зависимым.

Линейная оболочка

Определение 57. Пусть $E \subseteq V$ – некоторое подмножество в векторном пространстве V над полем F . Тогда обозначим через $\langle E \rangle$ множество всех линейных комбинаций векторов из E , то есть

$$\langle E \rangle = \{\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n \mid \alpha_i \in F, v_i \in E, n \in \mathbb{N}\}$$

Сделаем важное замечание, если $E = \emptyset$ (пусто), то $\langle \emptyset \rangle$ полагаем равным нулевому подпространству (подпространству состоящему только из нуля). Это полезное и удобное соглашение можно понимать так: если берется линейная комбинация с нулевым числом слагаемых, то она равна нулю.

Заметим, что $\langle E \rangle$ является наименьшим векторным подпространством содержащим E . Потому, для любого подпространства $U \subseteq V$ верно $\langle U \rangle = U$.

Пример Полезно держать перед глазами следующий пример. Пусть $V = \mathbb{R}^3$ – пространство, $e_1 = (1, 0, 0)$, $e_2 = (0, 1, 0)$, $e_3 = (0, 0, 1)$ – три вектора вдоль координатных осей. Тогда $\langle e_1 \rangle$, $\langle e_2 \rangle$ и $\langle e_3 \rangle$ – это в точности координатные оси. Подпространства $\langle e_1, e_2 \rangle$, $\langle e_1, e_3 \rangle$ и $\langle e_2, e_3 \rangle$ – это плоскости содержащие пары координатных осей, $\langle e_1, e_2, e_3 \rangle$ будет совпадать со всем пространством \mathbb{R}^3 .

Порождающее подмножество

Определение 58. Пусть V – векторное пространство над полем K , тогда подмножество $E \subseteq V$ называется порождающим, если $\langle E \rangle = V$.

Другими словами, E является порождающим если любой вектор из V является линейной комбинацией векторов из E . Отметим, что V целиком всегда является порождающим. Если $E \subseteq E' \subseteq V$ и подмножество E является порождающим, то и E' тоже порождающее. Потому порождающее семейство всегда можно увеличить и это не интересно, интереснее попытаться его уменьшить и сделать более экономным. Порождающее множество E называется минимальным, если любое строго меньшее подмножество E уже не порождающее. Для этого достаточно проверить, что для любого $v \in E$ множество $E \setminus \{v\}$ уже не порождающее.

6.4 Базис

Подмножество $E \subseteq V$ называется порождающим, если $\langle E \rangle = V$. Другими словами, E является порождающим если любой вектор из V является линейной комбинацией векторов из E . Отметим, что V целиком всегда является порождающим. Если $E \subseteq E' \subseteq V$ и подмножество E является порождающим, то и E' тоже порождающее. Потому порождающее семейство всегда можно увеличить и это не интересно, интереснее попытаться его уменьшить и сделать более экономным. Порождающее множество E называется минимальным, если любое строго меньшее подмножество E уже не порождающее. Для этого достаточно проверить, что для любого $v \in E$ множество $E \setminus \{v\}$ уже не порождающее.

Подмножество $E \subseteq V$ называется линейно независимым, если любое конечное подмножество векторов E линейно независимо. Если $E' \subseteq E \subseteq V$ и E является линейно независимым, то E' тоже будет линейно независимым. Потому линейно независимое подмножество можно всегда уменьшать⁶⁸ и это не интересно, интереснее попытаться его увеличить и сделать наиболее большим. Линейно независимое подмножество E называется максимальным, если любое строго содержащее его подмножество является линейно зависимым. Для этого достаточно проверить, что для любого $v \in V \setminus E$ множество $E \cup \{v\}$ является линейно зависимым.

Утверждение 59. Пусть V – некоторое векторное пространство над некоторым полем F . Тогда следующие условия на подмножество $E \subseteq V$ эквивалентны:

1. E – минимальное порождающее подмножество.
2. E – максимальное линейно независимое подмножество.
3. E – одновременно порождающее и линейно независимое подмножество.

Доказательство. Будем доказывать по схеме $(1) \Leftrightarrow (3) \Leftrightarrow (2)$.

$(1) \Rightarrow (3)$. Пусть E – минимальное порождающее, нам надо показать, что оно будет линейно независимым. Предположим противное, пусть найдется вектора $v_1, \dots, v_n \in E$ и числа $\alpha_1, \dots, \alpha_n \in F$, так что не все из них равны нулю, что выполнено $\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n = 0$. Мы можем предположить, что $\alpha_1 \neq 0$. Тогда $v_1 = \beta_2 v_2 + \dots + \beta_n v_n$ для некоторых $\beta_i \in F$. Давайте покажем, что тогда $E \setminus \{v_1\}$ тоже является порождающим, что будет противоречить минимальности E . Действительно, пусть $v \in V$ – произвольный вектор. Так как E – порождающее, то v выражается через вектора из E , $v = \sum_i \alpha'_i v'_i$. Если среди v'_i нет вектора v_1 то мы выразили v через $E \setminus \{v_1\}$, если есть то подставим вместо него выражение $\beta_2 v_2 + \dots + \beta_n v_n$ и получим выражение v только через вектора из $E \setminus \{v_1\}$, что и требовалось.

⁶⁸Вопрос линейной независимости пустого множества оставим на совести строгой аксиоматической теории множеств и не будем его касаться, чтобы не обжечься о всякий формальный гемморрой.

(3) \Rightarrow (1). Пусть E одновременно порождающее и линейно независимое, нам надо показать, что оно минимальное порождающее. Достаточно проверить, что для любого $v \in E$ вектор v не лежит в $\langle E \setminus \{v\} \rangle$. Действительно, пусть лежит, тогда найдутся вектора $v_1, \dots, v_n \in E \setminus \{v\}$ и числа $\alpha_i \in F$ такие, что $v = \alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n$, то тогда $(-1)v + \alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n = 0$ – нетривиальная линейная комбинация разных элементов E , что противоречит линейной независимости E .

(2) \Rightarrow (3). Пусть E – максимальное линейно независимое, нам надо показать, что оно будет порождающим. Нам надо показать, что $\langle E \rangle = V$. Пусть это не так, возьмем $v \in V \setminus \langle E \rangle$, тогда множество $E \cup \{v\}$ строго больше, а значит линейно зависимо. То есть для каких-то $v_1, \dots, v_n \in E \cup \{v\}$ и чисел $\alpha_i \in F$ (так что не все из них нули) выполнено $\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n = 0$. Выкинув все нулевые слагаемые, можем считать, что на самом деле все α_i не равны нулю. Если среди v_i нет v , то значит все они из E . Тогда это означает, что E линейно зависимо, что неправда. Значит один из v_i – это v . Будем считать, что $v_1 = v$. Так как по нашему предположению все коэффициенты не нулевые, то $v = v_1$ выражается через остальные v_2, \dots, v_n . Но это означает, что $v \in \langle E \rangle$, а это противоречит с выбором v .

(3) \Rightarrow (2). Пусть E одновременно порождающее и линейно независимое, нам надо показать, что оно максимальное линейно независимое. Для этого возьмем любой вектор $v \in V \setminus E$ и покажем, что $E \cup \{v\}$ линейно зависимо. Действительно, мы знаем, что E порождающее, значит v представляется в виде линейной комбинации векторов из E , то есть $v = \alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n$ для некоторых $v_i \in E$ и $\alpha_i \in F$. Но тогда $(-1)v + \alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n = 0$ – нетривиальная линейная комбинация векторов из $E \cup \{v\}$, то есть последнее множество линейно зависимо, что и требовалось. \square

Пусть V – векторное пространство над некоторым полем F , тогда подмножество $E \subseteq V$ удовлетворяющее одному из трех эквивалентных условий предыдущего утверждения называется базисом V .

Примеры

1. Пусть $V = F^n$, тогда вектора

$$v_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, v_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \dots, v_n = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}$$

являются базисом. Очевидно, что эти вектора линейно независимы и любой вектор через них выражается.

2. Пусть $V = F[x]$ – множество многочленов, тогда в качестве базиса можно взять $E = \{1, x, x^2, \dots, x^n, \dots\}$ – множество всех степеней x . Заметим, что в данном случае базис получается бесконечным.
3. Пусть X – произвольное множество и $V = \{f: X \rightarrow F\}$ – множество всех функций на X со значениями в F . Тогда это векторное пространство над F с очень любопытным свойством.

Ситуация с базисами тут устроена так. Чтобы работать с бесконечными множествами нам нужно использовать аккуратно определенную теорию множеств. Я не буду вдаваться в подробности, что там да как строится, но важно понимать, что в теории множеств вообще говоря не всякое утверждение является доказуемым или опровергаемым. Подобные утверждения можно включить в качестве дополнительных аксиом, а можно их отрицания использовать в качестве таких же законных аксиом и будут получаться совершенно разные теории множеств. Есть такая популярная аксиома «аксиома выбора», которую очень любят включать в список стандартных.

Если вы используете аксиому выбора, то можно доказать, что всякое векторное пространство имеет базис. Если же вы не используете аксиому выбора, то нельзя ни доказать, ни опровергнуть существования базиса уже в пространстве V из этого примера. Оказывается, что факт существования базиса является более слабым утверждением, чем аксиома выбора. Кроме того, если базис существует по аксиоме выбора, то это значит, что не существует никакой процедуры, которая бы помогла вам описать этот базис, потому что существование подобной процедуры дало бы вам доказательство существования базиса без аксиомы выбора.

Замечания

- Пусть V – некоторое векторное пространство и $E' \subseteq V$ – произвольное линейно независимое подмножество. Тогда его всегда можно дополнить до базиса $E \supseteq E'$, потому что базис – это максимальное линейно независимое подмножество. В случае, если существует конечный базис, это просто. А если конечного не существует, то тут придется обращаться к аккуратной формулировке аксиоматики теории множеств.
- Пусть V – некоторое векторное пространство и $E'' \subseteq V$ – произвольное порождающее множество, тогда из него всегда можно выбрать базис $E \subseteq E''$. Как и в предыдущем случае, если существует конечный базис, то это просто. А если нет конечного базиса, то это требует аккуратной аксиоматики теории множеств.

6.5 Удобный формализм

Пусть V – некоторое векторное пространство над некоторым полем F . Возьмем некоторые вектора $v_1, \dots, v_n \in V$ и набор чисел $x_1, \dots, x_n \in F$. Тогда можно составить строку из векторов v_i и столбец из чисел x_i и перемножить в следующем порядке

$$(v_1 \quad v_2 \quad \dots \quad v_n) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = x_1 v_1 + \dots + x_n v_n$$

Таким образом мы можем записывать линейные комбинации с помощью матричных объектов, когда матрицы состоят не только из чисел, но и из векторов. Если при этом ввести обозначения

$$v = (v_1 \quad v_2 \quad \dots \quad v_n) \quad \text{и} \quad x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

то линейную комбинацию можно записать как vx . Если $w \in V$ – некоторый вектор, то тот факт, что он линейно выражается через v_i тогда записывается так $w = vx$ для некоторого $x \in F^n$. Пусть теперь у нас есть несколько векторов $w_1, \dots, w_m \in V$ и каждый из них выражается через вектора v_1, \dots, v_n , тогда

$$w_1 = (v_1 \quad v_2 \quad \dots \quad v_n) A_1, \dots, w_m = (v_1 \quad v_2 \quad \dots \quad v_n) A_m$$

где $A_i \in F^n$. Тогда составим из A_i матрицу $A \in M_{nm}(F)$ и получим запись

$$(w_1 \quad w_2 \quad \dots \quad w_m) = (v_1 \quad v_2 \quad \dots \quad v_n) A$$

6.6 Размерность

Наша задача сейчас показать, что в векторном пространстве любые два базиса имеют одинаковое количество элементов. Однако, обсуждать как сравнивать бесконечные множества между собой я не очень хочу, потому мы с этого момента ограничимся случаями конечных базисов. Для начала нам надо показать, что если векторное пространство имеет хотя бы один конечный базис, то все его базисы конечны и имеют одинаковое количество элементов.

Утверждение 60. Пусть V – некоторое векторное пространство над полем F и пусть $\{e_1, \dots, e_n\} \subseteq V$ – базис V . Тогда если $E \subseteq V$ – некоторый базис V , то $|E| = n$.

Доказательство. Нам достаточно показать, что $|E| \leq n$. Тогда базис E становится конечным и мы можем поменять местами два базиса и применить это же утверждение для доказательства обратного неравенства.

Предположим, что это не верно, тогда в E есть хотя бы $n + 1$ элемент v_1, \dots, v_{n+1} . Так как e_1, \dots, e_n – базис, то каждый v_i линейно выражается через этот базис. Значит можно найти матрицу $A \in M_{n, n+1}(F)$ такую, что

$$(v_1 \quad v_2 \quad \dots \quad v_{n+1}) = (e_1 \quad e_2 \quad \dots \quad e_n) A$$

Рассмотрим систему $Ax = 0$, где $x \in F^{n+1}$. В этой системе количество столбцов больше, чем количество строк. Значит обязательно существует ненулевое решение $x \in F^{n+1}$. Тогда умножим на него предыдущее равенство справа, получим

$$(v_1 \ v_2 \ \dots \ v_{n+1})x = (e_1 \ e_2 \ \dots \ e_n)Ax = 0$$

То есть мы нашли нетривиальную линейную комбинацию векторов v_1, \dots, v_{n+1} . Но по определению E в нем не должно быть линейно зависимых векторов, противоречие. \square

Пусть V – векторное пространство над полем F , тогда размерностью V называется число элементов в любом из его базисов.⁶⁹ Размерность V будем обозначать через $\dim V$ или $\dim_F V$, если надо подчеркнуть, какое поле F имеется в виду.

Утверждение 61. Пусть $U \subseteq V$ – подпространство в векторном пространстве над полем F . Тогда

1. $\dim U \leq \dim V$.
2. $\dim U = \dim V$ тогда и только тогда, когда $U = V$.

Доказательство. (1) В начале сделаем замечание. Пусть $E \subseteq V$ – какое-то линейно независимое подмножество V . Так как базис – это максимальное линейно независимое подмножество, то $|E| \leq \dim V$.

Пусть $E \subseteq U$ – базис U . Тогда E – линейно независимое подмножество U , а значит и V . Но тогда из замечания выше $|E| \leq \dim V$. А по определению $\dim U = |E|$.

(2) Теперь сделаем еще одно замечание. Пусть $E \subseteq V$ – некоторое линейно независимое подмножество V . Как понять, что оно максимальное? Достаточно, проверить, что в нем $\dim V$ элементов. Действительно, если бы при этом оно было не максимальным, то в максимальном было бы больше $\dim V$ элементов, что противоречит определению размерности.

Теперь пусть $E \subseteq U$ – базис U и пусть $\dim U = \dim V$. Мы хотим показать, что $U = V$. Тогда E – это линейно независимое подмножество в V и в нем $|E| = \dim U = \dim V$ элементов. Но тогда по замечанию выше оно является базисом в V . Так как E – базис в U , то $U = \langle E \rangle$, а так как E – базис в V , то $V = \langle E \rangle$, то есть $U = V$. Утверждение в обратную сторону очевидно. \square

6.7 Конкретные векторные пространства

Пусть V – векторное пространство над некоторым полем F . Вообще говоря, в этом случае элементы V могут быть чем угодно (функции, вектор-столбцы, матрицы, отображения и т.д.), но если в нем можно выбрать конечный базис, то оно автоматически превратится в пространство F^n . Сейчас я хочу обсудить все этапы этого магического превращения.

Пусть $e_1, \dots, e_n \in V$ – некоторый базис пространства V . Тогда можно рассмотреть отображение

$$\begin{aligned} F^n &\rightarrow V \\ x &\mapsto ex \end{aligned}$$

где $e = (e_1, \dots, e_n)$, $x \in F^n$. Так как e порождает V , то это отображение сюръективно. С другой стороны из линейной независимости следует инъективность: если $ex = ey$ для $x, y \in F^n$, то $e(x - y) = 0$, а значит $x - y = 0$. Таким образом мы получаем, что каждый вектор-столбец длины n однозначно соответствует некоторому вектору из V . Кроме того, если присмотреться внимательно, то мы увидим, что сложение столбцов соответствует сложению векторов и то же самое верно для умножения на скаляр. Таким образом, мы видим, что между этими пространствами нет никакой разницы. Изучать одно из них – это все равно, что изучать другое. По-другому, можно думать еще так: если вам дали произвольное конечномерное пространство, то всегда можно считать, что это F^n (для этого нужно всего лишь выбрать базис).

Координаты Если вектор $v \in V$ разложен по некоторому базису $e = (e_1, \dots, e_n)$ пространства V , то есть представлен в виде $v = ex$, где $x \in F^n$, то столбец $x = (x_1, \dots, x_n)$ называют координатами вектора v в базисе e_1, \dots, e_n .

⁶⁹Корректность этого определения следует из предыдущей леммы в случае существования хотя бы одного конечного базиса. Однако, если бы мы были знакомы с теорией мощности для произвольных множеств, то мы бы показали, что количество элементов в базисе не зависит от базиса всегда. Потому можно говорить о размерности даже для бесконечно мерных пространств. Например, размерность многочленов $F[x]$ счетная, а для бесконечного множества X размерность пространства F^X совпадает с $|F^X|$, то есть она зависит от мощности поля.

Смена базиса Так как базис в пространстве выбирается не единственным образом, то в конструкции выше у нас есть некоторая свобода. Давайте проследим, что и как меняется при замене одного базиса другим.

Утверждение 62. Пусть V – некоторое векторное пространство над полем F и пусть $e_1, \dots, e_n \in V$ – какой-нибудь базис этого пространства. Тогда

1. Для любой обратимой матрицы $C \in M_n(F)$ набор векторов $(e_1, \dots, e_n)C$ тоже является базисом.
2. Если $f_1, \dots, f_n \in V$ – любой другой базис V , то найдется единственная обратимая матрица $C \in M_n(F)$ такая, что $(f_1, \dots, f_n) = (e_1, \dots, e_n)C$.

Доказательство. (1) Заметим, что набор $(e_1, \dots, e_n)C$ является линейно независимым и состоит из $n = \dim V$ элементов, а значит автоматом максимальный линейно независимый набор. Для проверки линейной независимости рассмотрим линейную комбинацию $(e_1, \dots, e_n)Cx = 0$, где $x \in F^n$. Тогда $Cx = 0$, так как e_i – базис. А следовательно $x = 0$, так как C обратима.

(2) Так как e_i – базис, то любой вектор однозначно раскладывается по этому базису, например, каждый f_i имеет представление $f_i = (e_1, \dots, e_n)C_i$, где $C_i \in F^n$. Тогда все эти равенства вместе можно записать так $(f_1, \dots, f_n) = (e_1, \dots, e_n)C$, где $C = (C_1 | \dots | C_n) \in M_n(F)$ – квадратная матрица, составленная из столбцов C_i . То есть такая матрица найдется, а ее единственность следует из того, что любой вектор однозначно раскладывается по базису.

Теперь осталось доказать обратимость матрицы C . Применив то же самое рассуждение для базисов в обратном порядке, мы найдем матрицу $B \in M_n(F)$ такую, что $(e_1, \dots, e_n) = (f_1, \dots, f_n)B$. Тогда получаем

$$(e_1, \dots, e_n) = (f_1, \dots, f_n)B = (e_1, \dots, e_n)CB$$

А значит $(e_1, \dots, e_n)(E - CB) = 0$. Из линейной независимости базиса следует, что $E = CB$. Аналогично доказывается $BC = E$,⁷⁰ то есть B является обратной к C , что и требовалось. \square

Если e_1, \dots, e_n и f_1, \dots, f_n – два базиса пространства V , то матрица $C \in M_n(F)$ такая, что $(f_1, \dots, f_n) = (e_1, \dots, e_n)C$ называется матрицей перехода от базиса e_i к базису f_i . Таким образом у нас есть, вообще говоря бесконечный, граф с вершинами пронумерованными базисами пространства V , а ребра соответствуют матрицам перехода C от базиса e_i к базису f_i , если $(f_1, \dots, f_n) = (e_1, \dots, e_n)C$. Предыдущее утверждение говорит, что этот граф связный и между любыми двумя вершинами есть ровно одно ребро.⁷¹

Смена координат Пусть теперь у нас $v \in V$ – некоторый вектор. Тогда мы его можем разложить по одному базису $v = ex$ с координатами $x \in F^n$ и по другому базису $v = fy$ с координатами $y \in F^n$. Пусть C – матрица перехода от базиса e к базису f , то есть $f = eC$. Тогда координаты x в старом базисе e связаны с новыми координатами в базисе f следующим образом: $x = Cy$. Действительно, с одной стороны $v = ex$, а с другой $v = fy = eCy$. Но так как разложение по базису однозначно, получаем, что $x = Cy$. Запоминать это правило надо так: если от базиса e к базису f мы перешли с помощью умножения справа на матрицу C , то на координатах у нас отображение в обратную сторону с помощью умножения на матрицу C слева (то есть тоже с другой стороны). Еще полезно держать перед глазами вот эту таблицу.

базис	новый \xleftarrow{C} старый
координаты	новые \xrightarrow{C} старые

6.8 Подпространства в F^n

Давайте посмотрим как можно задавать подпространства в F^n . Существует два способа

Явный	Неявный
Если $v_1, \dots, v_k \in V$, тогда $U = \langle v_1, \dots, v_k \rangle$	Если $A \in M_{m \times n}(F)$, тогда $U = \{y \in F^n \mid Ay = 0\}$

По-хорошему, хочется научиться пересчитывать векторное пространство заданное в одной из этих форм в другую. Мы разберем пока только одну из этих задач. А именно, пусть подпространство задано неявно в виде системы, то как найти его базис?

Если подпространство $U \subseteq F^n$ задано в виде $U = \{y \in F^n \mid Ay = 0\}$ для некоторой матрицы $A \in M_{m \times n}(F)$, то любой базис пространства U будем называть фундаментальной системой решений (ФСР). Ниже мы разберем задачу построения какого-нибудь ФСР для однородной системы линейных уравнений.

⁷⁰Либо можно воспользоваться утверждением 3.

⁷¹Кстати между вершиной и ей самой тоже есть ребро-петля, соответствующая единичной матрице.

Нахождение ФСР однородной СЛУ В начале мы приведем алгоритм находящий ФСР, а потом объясним почему он работает.

Дано Система однородных линейных уравнений $Ax = 0$, где $A \in M_{m \times n}(F)$ и $x \in F^n$.

Задача Найти ФСР системы $Ax = 0$.

Алгоритм

1. Привести матрицу A элементарными преобразованиями строк к улучшенному ступенчатому виду. Например

$$A' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & a_{31} & 0 & a_{51} \\ 0 & 1 & a_{32} & 0 & a_{52} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & a_{53} \end{pmatrix}$$

2. Пусть k_1, \dots, k_r – позиции свободных переменных. Если положить одну из этих переменных равной 1, а все остальные нулями, то существует единственное решение, которое мы обозначим через u_i (всего r штук). Например, для матрицы A' выше свободные переменные имеют номера 3 и 5. Тогда вектора (записанные в строку)

$$u_1 = (-a_{31} \ -a_{32} \ 1 \ 0 \ 0), u_2 = (-a_{51} \ -a_{52} \ 0 \ -a_{53} \ 1)$$

являются ФСР.

Доказательство корректности алгоритма поиска ФСР. Пусть в общем виде, ступенчатый вид матрицы A выглядит так

$$\begin{pmatrix} 1 & * & 0 & * & 0 & * & * & 0 & * \\ & & 1 & * & 0 & * & * & 0 & * \\ & & & & 1 & * & * & 0 & * \\ & & & & & & & 1 & * \end{pmatrix}$$

Тогда построенные вектора имеют вид

$$\begin{array}{ccccccccc} & & k_1 & & k_2 & & \dots & \dots & k_r \\ u_1 & (* & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0) \\ u_2 & (* & 0 & * & 1 & 0 & 0 & 0 & 0) \\ \vdots & (* & 0 & * & 0 & * & 1 & 0 & 0) \\ \vdots & (* & 0 & * & 0 & * & 0 & 1 & 0) \\ u_r & (* & 0 & * & 0 & * & 0 & 0 & 1) \end{array}$$

В начале проверим, что u_i линейно независимы. Действительно, тогда линейная комбинация $\alpha_1 u_1 + \dots + \alpha_r u_r$ имеет вид

$$(* \ \alpha_1 \ * \ \alpha_2 \ * \ \dots \ \dots \ * \ \alpha_r)$$

Если эта линейная комбинация равна нулю, то значит и все α_i равны нулю.

Теперь пусть v – произвольное решение системы $Ax = 0$. Посмотрим на его координаты в свободных позициях

$$(* \ v_1 \ * \ v_2 \ * \ \dots \ \dots \ * \ v_r)$$

Теперь рассмотрим вектор $w = v - v_1 u_1 - \dots - v_r u_r$. С одной стороны это решение системы $Ax = 0$. С другой стороны у этого решения все свободные переменные равны нулю. А значит автоматически и все главные переменные равны нулю, что означает, что $w = 0$. То есть $v = v_1 u_1 + \dots + v_r u_r$, что и требовалось. \square

Замечание

- Обратите внимание, что ФСР – это любой базис в пространстве $\{y \in F^n \mid Ay = 0\}$, а не только тот, который построен по алгоритму.
- В алгоритме выше, мы могли бы вместо 1 и 0 расставить любой набор из r линейно независимых векторов длины r в позиции со свободными переменными. Это тоже дало бы базис. Однако, у построенного ФСР именно по алгоритму выше есть одно важное преимущество: в нем легко считать координаты. Действительно, для любого вектора из пространства решений его свободные переменные – это и есть координаты в построенном базисе.

6.9 Ранг

В начале обсудим общее понятие ранга системы векторов в произвольном векторном пространстве.

Утверждение 63. Пусть V – некоторое векторное пространство над полем F . Пусть $S = (v_1, \dots, v_k)$ – система векторов из V .⁷² Пусть $S' \subseteq S$ – максимальный линейно независимый поднабор в S .^{73, 74} Тогда $|S'| = \dim_F \langle S \rangle$.

Доказательство. Рассмотрим $\langle S \rangle \subseteq V$. Если мы покажем, что $\langle S' \rangle = \langle S \rangle$, то по определению S' будет базисом $\langle S \rangle$, как порождающее и линейно независимое. Для этого нам достаточно показать, что любой вектор из $S \setminus S'$ выражается через векторы из S' . Действительно, возьмем такой вектор $v \in S \setminus S'$, тогда набор составленный из S' и v уже будет линейно зависимым, то есть есть линейная комбинация вида $\sum_i \alpha_i v'_i + \alpha v = 0$, где $v'_i \in S'$ и $\alpha_i, \alpha \in F$. Коэффициент $\alpha \neq 0$ иначе это означало бы линейную зависимость S' . А значит можно выразить v через v'_i перенеся αv направо и разделив на $-\alpha$. \square

В частности это утверждение делает корректным следующее.

Определение 64. Пусть V – векторное пространство и $S = (v_1, \dots, v_k)$ – набор векторов из V . Тогда рангом S называется размер максимального линейно независимого поднабора и обозначается $\text{rk } S$.

Кроме корректности, утверждение выше говорит, что $\text{rk}(v_1, \dots, v_k) = \dim_F \langle v_1, \dots, v_k \rangle$. К рангу надо относиться так – это дискретный аналог размерности. Векторное пространство – объект большой и сложный, базисов в нем много, потому его недостаток – с ним сложно работать. Конечный набор векторов – объект простой и понятный, с ним намного проще работать, чем целиком со всем пространством. Однако, главный недостаток – он недостаточно гибкий по сравнению с векторным пространством, если мы чуть-чуть поменяем вектора (например, прибавим один к другому) мы уже изменим набор, но не изменим векторного пространства. Как обычно, каким-то из этих понятий удобно пользоваться в одних ситуациях, а в каких-то ситуациях намного лучше подходит другое.

6.10 Матричный ранг

Пусть $A \in M_{m \times n}(F)$ – некоторая матрица с коэффициентами в поле F .

Определение 65. Пусть $A_1, \dots, A_n \in F^m$ – столбцы матрицы A , то есть $A = (A_1 | \dots | A_n)$. Тогда столбцовым рангом матрицы A называется ранг системы (A_1, \dots, A_n) , то есть $\text{rk}_{\text{столб}} A = \text{rk}(A_1, \dots, A_n)$.

Определение 66. Пусть $A_1, \dots, A_m \in F^n$ – строки матрицы A , то есть $A^t = (A_1 | \dots | A_m)$. Тогда строковым рангом матрицы A называется ранг системы (A_1, \dots, A_m) , то есть $\text{rk}_{\text{стр}} A = \text{rk}(A_1, \dots, A_m)$.

Определение 67. Факториальным рангом матрицы A называется следующее число

$$\min\{k \mid A = BC, \text{ где } B \in M_{m \times k}(F), C \in M_{k \times n}(F)\}$$

то есть это минимальное число k такое, что матрица A представима в виде произведения матриц BC , где общая размерность для B и C , по которой они перемножаются, есть k .

Определение 68. Тензорным рангом матрицы A называется следующее число

$$\min\{k \mid A = x_1 y_1^t + \dots + x_k y_k^t, \text{ где } x_i \in F^m, y_i \in F^n\}$$

то есть это минимальное число k такое, что матрица A представима в виде суммы k «тощих» матриц вида $x y^t$, где $x \in F^m$ и $y \in F^n$.

Перед следующим определением нам нужна некоторая подготовка. Зафиксируем некоторый набор индексов для строк: $1 \leq i_1 < \dots < i_k \leq m$, а так же некоторый набор индексов для столбцов в том же количестве $1 \leq j_1 < \dots < j_k \leq n$. Тогда обозначим через $A_{i_1, \dots, i_k}^{j_1, \dots, j_k} \in M_k(F)$ подматрицу образованную пересечением данных строк и столбцов. То есть формально ее элементы это $\bar{a}_{st} = a_{i_s j_t}$. Такую матрицу будем называть квадратной подматрицей матрицы A размера k .

⁷²Формально $S \in V^k$, то есть это упорядоченный набор векторов, где векторы могут повторяться.

⁷³Это означает, что элементы S' не повторяются, полученное множество является линейно независимым и к набору S' нельзя добавить ни один вектор из S , чтобы получился линейно независимый набор.

⁷⁴Формально мы разбирались лишь со случаем множества векторов, но я не хочу разводить формальный геморрой на ровном месте и уверен, что каждый из вас сможет без труда распространить все необходимые определения и факты на наборы вместо множеств.

Определение 69. Минорным рангом матрицы A называется размер максимальной невырожденной квадратной подматрицы, то есть минорный ранг A – это такое k , что существует невырожденная подматрица $A_{i_1, \dots, i_k}^{j_1, \dots, j_k} \in M_k(F)$ такая, что любая квадратная подматрица ее содержащая уже вырождена.⁷⁵

В начале сделаем очень полезное замечание.

Утверждение 70. Для любой матрицы $A \in M_{m \times n}(F)$ ее факториальный ранг равен тензорному.

Доказательство. Пусть $B \in M_{m \times k}(F)$ и $C \in M_{k \times n}(F)$ – такие матрицы, что $A = BC$. Пусть $B = (B_1 | \dots | B_k)$ и $C^t = (C_1 | \dots | C_k)$. Тогда по блочным формулам $BC = B_1 C_1^t + \dots + B_k C_k^t$. Это доказывает, что тензорный ранг A не превосходит факториального. Наоборот, если задано разложение $BC = B_1 C_1^t + \dots + B_k C_k^t$, то определим матрицы $B = (B_1 | \dots | B_k)$ и $C^t = (C_1 | \dots | C_k)$ и получим, что $A = BC$. Это доказывает оценку рангов в другую сторону. \square

Наша цель в этом разделе очень проста – показать, что все пять определений ранга совпадают между собой. Начнем со следующего.

Утверждение 71. Пусть $A \in M_{m \times n}(F)$ – произвольная матрица, тогда столбцовый, строковый, факториальный и тензорный ранги не меняются при домножении A слева или справа на невырожденную матрицу.

Доказательство. (1) Столбцовый ранг. Пусть $A = (A_1 | \dots | A_n)$, где $A_i \in F^m$ и пусть $D \in M_n(F)$ – обратимая матрица. Тогда $\langle (A_1, \dots, A_n) \rangle = \langle (A_1, \dots, A_n)D \rangle$ (включение \supseteq очевидно, а обратное следует из обратимости D), а значит

$$\text{rk}_{\text{столб}}(A) = \dim \langle (A_1, \dots, A_n) \rangle = \dim \langle (A_1, \dots, A_n)D \rangle = \text{rk}_{\text{столб}}(AD)$$

Пусть теперь $C \in M_m(F)$ – обратимая матрица. Тогда система $Ax = 0$ эквивалентна системе $CAX = 0$. Если какая-то линейная комбинация $x_1 A_1 + \dots + x_n A_n = 0$, то это значит, что $Ax = 0$, т.е. x является решением системы $Ax = 0$, а значит и решением системы $CAX = 0$, то есть столбцы матрицы CA удовлетворяют той же самой линейной комбинации, что и столбцы матрицы A . Это значит, что если какое-то множество столбцов в A было линейно независимо, то множество столбцов с теми же самыми номерами в CA тоже линейно независимо. И если какой-то столбец из A выражался через другие, то и в CA столбец с тем же номером будет выражаться с помощью той же самой линейной комбинации через другие. Потому максимальная линейно независимая система в A переходит в максимальную линейно независимую систему в CA .⁷⁶ Последнее по определению означает $\text{rk}_{\text{столб}} A = \text{rk}_{\text{столб}}(CA)$.

(2) Строковый ранг. Так как $\text{rk}_{\text{столб}} A = \text{rk}_{\text{стр}}(A^t)$, то этот случай следует из предыдущего.

(3) Факториальный ранг. Пусть $\text{rk}_{\text{ф}} A = k$ и пусть $A = BC$ – разложение на котором достигается ранг A . Тогда $AD = B(CD)$ – некоторое разложение для AD с числом k , а значит по определению $\text{rk}_{\text{ф}}(AD) \leq \text{rk}_{\text{ф}} A$. Обратное неравенство следует из обратимости D , т.е. $AD = (AD)D^{-1}$. Домножение на матрицу слева делается аналогично.

(4) В силу замечания выше (утверждение 70) тензорный ранг и факториальный – это одно и то же, потому этот пункт следует из предыдущего. \square

Утверждение 72. Пусть $A \in M_{m \times n}(F)$, тогда столбцовый, строковый, факториальный и тензорный ранги для нее совпадают.

Доказательство. Домножив матрицу A слева и справа на обратимую, мы можем считать, что она имеет следующий вид $\begin{pmatrix} E & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$. Из утверждения 71 следует, что достаточно доказать утверждение для последней матрицы.

Давайте посчитаем $\text{rk}_{\text{столб}} \begin{pmatrix} E & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = r$, где r – размер единичной матрицы E . Аналогично $\text{rk}_{\text{стр}} \begin{pmatrix} E & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = r$. Более того, для минорного ранга $\text{rk}_{\text{м}} \begin{pmatrix} E & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = r$, так как матрица E является невырожденной матрицей размера r , а все большие подматрицы вырождены, потому что имеют нулевую строку или столбец. То есть эти три ранга равны между собой.

⁷⁵ Обратите внимание, что нужно еще доказывать корректность этого определения, а именно, что число k не зависит от выбора максимальной невырожденной подматрицы. Это вообще говоря не очевидно.

⁷⁶ Еще один способ думать про это доказательство такое. Можно считать, что столбцы матрицы A – это векторы в F^m , а умножение на C слева – это замена координат в пространстве F^n , то есть мы ничего не делаем с нашими векторами, но меняем стандартный базис в F^n на какой-то другой. Потому столбцы CA – это координаты тех же самых векторов, что и исходные, только записанные в другом базисе. А раз это те же самые векторы, то у нас ничего не поменялось, кроме их «внешнего вида».

Теперь осталось доказать, что факториальный ранг совпадает со столбцовым (строковым) рангом. Если $A = BC = (B_1 | \dots | B_k)C$ – равенство, на котором достигается факториальный ранг. Тогда столбцы матрицы A выражаются через столбцы матрицы B , то есть $\langle A_1, \dots, A_m \rangle \subseteq \langle B_1, \dots, B_k \rangle$, а значит

$$\text{rk}_{\text{столб}} A = \dim \langle A_1, \dots, A_m \rangle \leq \dim \langle B_1, \dots, B_k \rangle \leq k = \text{rk}_{\text{ф}} A$$

С другой стороны

$$\begin{pmatrix} E & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E \\ 0 \end{pmatrix} (E \quad 0)$$

где общая размерность матриц справа равна строковому рангу, а значит факториальный ранг не превосходит этой размерности. Что дает обратное неравенство. \square

Утверждение 73. Пусть $A \in M_{m,n}(F)$ – произвольная матрица, тогда ее минорный ранг корректно определен и совпадает со всеми остальными рангами.

Доказательство. Давайте напомним, что минорным рангом мы называли размер максимальной невырожденной квадратной подматрицы в матрице A , то есть мы ищем подматрицу $A_{i_1, \dots, i_k}^{j_1, \dots, j_k}$ натянутую на строки i_1, \dots, i_k и столбцы j_1, \dots, j_k такую, что она сама является невырожденной, а все квадратные подматрицы ее содержащие (если такие имеются) уже вырождены. Во-первых, не понятно, почему это число не зависит от выбора квадратной подматрицы, а во-вторых, почему оно совпадает со всеми остальными рангами. Мы поступим следующим образом. Выберем произвольную такую максимальную невырожденную квадратную подматрицу и докажем, что ее размер совпадает со столбцовым рангом. Тогда отсюда будет следовать, что ее размер не зависит от выбора подматрицы и что минорный ранг совпадает со всеми остальными.

Заметим, что если я переставлю строки и столбцы в матрице A , то ее квадратные подматрицы как-то переставятся местами. При этом если какая-то подматрица была максимальной невырожденной, то она останется максимальной невырожденной. Следовательно можно считать, что максимальная невырожденная квадратная подматрица натянута на первые k строк и столбцов и матрица A выглядит так

$$A = \begin{pmatrix} B & C \\ D & F \end{pmatrix} \quad \text{где } B \in M_k(F) \text{ невырождена}$$

Наша задача показать, что $k = \text{rk}_{\text{столб}} A$. Теперь будем делать элементарные преобразования строк и столбцов первого типа, когда разрешается прибавлять строку с номером от 1 до k к любой другой строке (аналогично со столбцами). Заметим, что при этом не меняется определитель подматрицы B и любой другой подматрицы содержащей матрицу B . Поэтому, при таких преобразованиях матрица B будет продолжать оставаться максимальной невырожденной матрицей.

С помощью указанных выше преобразований мы можем привести матрицу B к диагональному виду с ненулевыми числами на диагонали

$$A \mapsto \begin{pmatrix} b_1 & \dots & 0 & * & \dots & * \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & b_k & * & \dots & * \\ * & \dots & * & * & \dots & * \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ * & \dots & * & * & \dots & * \end{pmatrix}$$

Теперь с помощью указанных элементарных преобразований строк можно занулить весь блок под левой верхней диагональной подматрицей, а с помощью указанных элементарных преобразований столбцов – весь блок справа от нее.

$$\begin{pmatrix} b_1 & \dots & 0 & * & \dots & * \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & b_k & * & \dots & * \\ * & \dots & * & * & \dots & * \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ * & \dots & * & * & \dots & * \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} b_1 & \dots & 0 & * & \dots & * \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & b_k & * & \dots & * \\ 0 & \dots & 0 & * & \dots & * \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & * & \dots & * \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} b_1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & b_k & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & * & \dots & * \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & * & \dots & * \end{pmatrix}$$

При этом подматрица B в верхнем левом углу остается максимальной невырожденной подматрицей. В частности, если мы возьмем и добавим к ней i -ю строку и j -й столбец, то получится вырожденная матрица. С другой стороны эта матрица будет иметь вид

$$\begin{pmatrix} b_1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & b_k & 0 \\ 0 & \dots & 0 & d_{ij} \end{pmatrix}$$

Здесь через d_{ij} обозначен элемент на i -ой строке и j -ом столбце последней матрицы. Так как все b_i не равны нулю, то такая матрица может быть вырождена только если $d_{ij} = 0$. Применяя это рассуждение к произвольному столбцу и строке с номерами больше k , мы видим, что последняя матрица на самом деле имеет вид

$$A' = \begin{pmatrix} b_1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & b_k & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}$$

Теперь мы видим, что $k = \text{rk}_{\text{столб}} A'$. Но так как мы перешли от матрицы A к матрице A' с помощью элементарных преобразований, то $\text{rk}_{\text{столб}} A = \text{rk}_{\text{столб}} A'$ по утверждению 71. \square

Определение 74. Пусть $A \in M_{m \times n}(F)$ – произвольная матрица. Тогда рангом A называется один из пяти рангов определенных выше и обозначается $\text{rk } A$.

Теорема Кронекера-Капэлли Пользуясь определением ранга можно сделать следующее замечание.

Утверждение 75. Пусть F – некоторое поле, $A \in M_{m \times n}(F)$ и $b \in F^m$. Тогда система $Ax = b$ имеет решение тогда и только тогда, когда $\text{rk}(A) = \text{rk}(A|b)$.

7 Линейные отображения

7.1 Идея и определение

Пусть F – некоторое поле и нам даны два векторных пространства V и U . Самый первый вопрос, который встает глядя на них: а как их сравнить? Одно и то же ли это пространство? Для того, чтобы отвечать на подобные вопросы, нам и нужны линейные отображения. Давайте начнем с более простого вопроса: а как сравнивать множества? Множества сравниваются с помощью отображений. Всевозможные теоремы об эквивалентности разных подходов с помощью инъективных, сюръективных и биективных отображений в конце концов говорят, что два множества надо считать одинаковыми, если между ними есть биекция, то есть в них одинаковый запас элементов. Но теперь векторное пространство – это не просто множество, на нем еще есть и операции. Если на биекцию смотреть, как на способ переименовать элементы, то теперь мы хотим, чтобы при этом переименовании одни операции превращались в другие, то есть мы хотим, чтобы наше отображение было согласовано неким способом с операциями. Ну и как в случае множеств, мы не будем ограничивать себя только биекциями, ибо все остальные отображения тоже оказываются очень полезными для сравнения разных векторных пространств.

Определение 76. Пусть V и U – векторные пространства над некоторым полем F . Отображение $\varphi: V \rightarrow U$ называется линейным, если оно удовлетворяет двум свойствам:

1. $\varphi(v_1 + v_2) = \varphi(v_1) + \varphi(v_2)$ для всех $v_1, v_2 \in V$.
2. $\varphi(\lambda v) = \lambda \varphi(v)$ для всех $\lambda \in F$ и всех $v \in V$.

Примеры

1. $F^n \rightarrow F^m$ задано по правилу $x \mapsto Ax$, где $A \in M_{m \times n}(F)$.
2. $V \rightarrow U$ задано по правилу $v \mapsto 0$ для любого $v \in V$. Такое отображение называется нулевым и обозначается 0 .
3. $V \rightarrow V$ задано по правилу $v \mapsto v$. Такое отображение называется тождественным и обозначается Id .
4. Пусть $D[0, 1]$ – множество дифференцируемых функций на отрезке $[0, 1]$, $F[0, 1]$ – множество всех функций на отрезке $[0, 1]$. Тогда зададим линейное отображение $D[0, 1] \rightarrow F[0, 1]$ по правилу $f \mapsto f'$, то есть взятие производной является линейным отображением.
5. Пусть $L[0, 1]$ – множество функций f на отрезке $[0, 1]$ таких, что существует интеграл $\int_0^1 |f(x)| dx$ ⁷⁷ и пусть $C[0, 1]$ – множество непрерывных функций на отрезке $[0, 1]$. Тогда рассмотрим следующее отображение $f \mapsto \int_0^t f(x) dx$.
6. Пусть V – некоторое векторное пространство с базисом e_1, \dots, e_n . Тогда отображение $F^n \rightarrow V$ по правилу $x \mapsto (e_1, \dots, e_n)x$ является линейным.

Замечание Давайте посмотрим на примеры (1), (4) и (5). Они говорят, что в терминах линейных отображений можно говорить о системах линейных уравнений (1), о дифференциальных уравнениях (4) или об интегральных уравнениях (5). Пример (6) нам встречался, когда мы объясняли, что любое векторное пространство превращается в пространство столбцов, если в нем выбрать базис.

Определение 77. Пусть V и U – векторные пространства над некоторым полем F , тогда отображение $\varphi: V \rightarrow U$ называется изоморфизмом, если

1. φ линейно.
2. φ биективно.

⁷⁷Для тех кто беспокоится о том, какой же тут берется интеграл, сообщим по честному, что на самом деле тут у нас функции интегрируемые по Лебегу на отрезке $[0, 1]$.

Заметим, что если отображение $\varphi: V \rightarrow U$ изоморфизм, то существует обратное отображение (потому что φ биекция) и обратное так же является линейным.⁷⁸ Если между двумя векторными пространствами V и U существует изоморфизм, то говорят, что они изоморфны и пишут $V \simeq U$.

Множество всех линейных отображений из пространства V в пространство U обозначается через $\text{Hom}_F(V, U)$. Формально

$$\text{Hom}_F(V, U) = \{f: V \rightarrow U \mid f - \text{линейное}\}$$

Множество линейных отображений из V в поле F называется двойственным пространством к V и обозначается через V^* . Формально

$$V^* = \{\xi: V \rightarrow F \mid \xi - \text{линейное}\} = \text{Hom}_F(V, F)$$

Если нет путаницы, то индекс, обозначающий поле F опускают и пишут просто $\text{Hom}(V, U)$.⁷⁹

7.2 Операции на линейных отображениях

Давайте порадуем себя еще немного абстрактным формализмом и введем операции на линейных отображениях. Причем мы постараемся так, что множество всех линейных отображений между двумя векторными пространствами $\text{Hom}_F(V, U)$ внезапно превратится в векторное пространство. А это не так уж и плохо, это значит, что постоянно оставаясь в рамках векторных пространств, мы сможем к новым конструкциям применять все те же методы, что мы изначально разрабатывали для произвольных векторных пространств.

Сумма Пусть $\varphi: V \rightarrow U$ и $\psi: V \rightarrow U$ два линейных отображения между векторными пространствами V и U . Тогда, чтобы определить отображение $(\varphi + \psi): V \rightarrow U$, надо задать его действие на всех векторах из V и проверить, что полученное правило линейно. Зададим его так: для любого $v \in V$ положим $(\varphi + \psi)(v) = \varphi(v) + \psi(v)$.

Умножение на скаляр Пусть $\varphi: V \rightarrow U$ – линейное отображение между векторными пространствами V и U и пусть $\lambda \in F$ – произвольный элемент поля. Тогда определим $(\lambda\varphi): V \rightarrow U$ как отображение задаваемое правилом $(\lambda\varphi)(v) = \lambda\varphi(v)$.

Композиция Пусть $\varphi: V \rightarrow U$ и $\psi: U \rightarrow W$ – два линейных отображения, а V , U и W – векторные пространства. Тогда теоретико-множественная композиция отображений $\psi \circ \varphi: V \rightarrow W$ это отображение задаваемое по правилу $(\psi \circ \varphi)(v) = \psi(\varphi(v))$. Методом пристального взгляда на определение композиции и линейного отображения проверяется, что композиция тоже является линейным отображением. Теоретико-множественная композиция тогда обозначается просто $\psi\varphi$ и называется композицией линейных отображений. Здесь полезно иметь перед глазами картинку:

$$\begin{array}{ccccc} V & \xrightarrow{\varphi} & U & \xrightarrow{\psi} & W \\ & \searrow & \swarrow & \nearrow & \\ & & \psi\varphi & & \end{array}$$

Замечание Можно проверить методом пристального взгляда, что множество $\text{Hom}_F(V, U)$ с операциями сложения и умножения на скаляр превращается в векторное пространство над полем F , а значит и двойственное пространство V^* тоже является векторным пространством над F .⁸⁰

7.3 Построение линейных отображений

Мы хорошенько поиграли в абстракции, а теперь внимание главный вопрос дня: а как задавать линейные отображения между двумя векторными пространствами V и U ? И как следствие другой вопрос: а вообще существуют хоть какие-нибудь линейные отображения между V и U ? К счастью на второй вопрос мы уже знаем ответ с помощью примера (2) выше. Нулевое отображение у нас есть всегда, но это совсем не интересно. На самом деле вопрос задания объектов нового вида – это один из самых важных вопросов. Когда мы проходили перестановки, нам нужен был способ с ними работать, работая с действительными числами, мы даже

⁷⁸Предлагаю дотошным читателям проверить это заявление, а остальным пустить скупую слезу и, поверив мне на слово, двигаться дальше в мир неизведанного.

⁷⁹Для интересующихся таким странным обозначением поясню, Hom происходит от слова *homomorphism* – гомоморфизм, которое является более общим определением и в случае векторных пространств дает в точности понятие линейного отображения.

⁸⁰Глупо было бы ожидать другого результата.

не задумываемся над способом их задания, так как эти способы нам знакомы с детства, задавать функции многих из нас тоже научили в школе. Теперь пришло время научиться работать с линейными отображениями.

Утверждение 78. Пусть V и U – векторные пространства и пусть e_1, \dots, e_n – базис пространства V . Тогда для любого набора $u_1, \dots, u_n \in U$ ⁸¹ существует единственное линейное отображение $\varphi: V \rightarrow U$ такое, что $\varphi(e_i) = u_i$.

Доказательство. Давайте проверим единственность в начале. Пусть $\varphi, \psi: V \rightarrow U$ – два таких отображения, тогда для любого вектора $v \in V$ имеем $v = x_1 e_1 + \dots + x_n e_n$. А значит

$$\varphi(v) = \varphi(x_1 e_1 + \dots + x_n e_n) = x_1 \varphi(e_1) + \dots + x_n \varphi(e_n) = x_1 u_1 + \dots + x_n u_n$$

Аналогично $\psi(v)$ равно тому же самому. Потому $\varphi = \psi$.⁸²

Теперь займемся вопросом существования. Для этого надо всего лишь проверить, что правило $\varphi(v) = x_1 u_1 + \dots + x_n u_n$ задает линейное отображение. Для этого надо проверить, что $\varphi(v_1 + v_2) = \varphi(v_1) + \varphi(v_2)$ и $\varphi(\lambda v) = \lambda \varphi(v)$. Я молча выпишу ниже две необходимые для проверки строчки и понадеюсь на вашу сознательность и сообразительность в завершении доказательства. Пусть $e = (e_1, \dots, e_n)$ и $u = (u_1, \dots, u_n)$, тогда для $v \in V$ найдется единственный $x \in F^n$, что $v = ex$. А значит выражение $ux \in U$ зависит только от v , а не от выбора координат. Потому можно положить $\varphi(v) = ux$. Теперь линейность следует из равенств

$$\begin{aligned}\varphi(v_1 + v_2) &= \varphi(ex_1 + ex_2) = \varphi(e(x_1 + x_2)) = u(x_1 + x_2) = ux_1 + ux_2 = \varphi(v_1) + \varphi(v_2) \\ \varphi(\lambda v) &= \varphi(\lambda ex) = \varphi(e(\lambda x)) = u(\lambda x) = \lambda ux = \lambda \varphi(v)\end{aligned}$$

□

Таким образом, если у вас зафиксирован базис в пространстве, то чтобы построить линейное отображение достаточно отправить базисные векторы куда угодно и у вас автоматом будет только одно линейное отображение, действующее на базисе таким образом.

Классификация векторных пространств с точностью до изоморфизма Теперь мы можем дать критерий, когда два векторных пространства изоморфны.

Утверждение 79. Пусть V и U – векторные пространства над полем F . Они изоморфны тогда и только тогда, когда $\dim_F V = \dim_F U$.

Доказательство. Если векторные пространства V и U изоморфны, это значит, что существует изоморфизм $\varphi: V \xrightarrow{\sim} U$. Остается заметить, что при изоморфизме линейно независимое и порождающее множество переходит в линейно независимое и порождающее. А значит, базис переходит в базис. Следовательно пространства имеют одинаковую размерность.

Теперь пусть у пространств одинаковая размерность. Тогда пусть e_1, \dots, e_n – базис V и f_1, \dots, f_n – базис U . Обратим внимание, что их количество одинаковое, так как это и есть их размерности, которые совпадают между собой по условию. Тогда по предыдущему утверждению существует единственное отображение $\varphi: V \rightarrow U$ такое, что $e_i \mapsto f_i$. Аналогично существует обратное отображение $\psi: U \rightarrow V$ переводящее $f_i \mapsto e_i$. А следовательно композиции $\psi\varphi$ и $\varphi\psi$ оставляют на месте базисы пространств V и U соответственно. Последнее означает, что $\psi\varphi = \text{Id}_V$ и $\varphi\psi = \text{Id}_U$. То есть это обратимые отображения, то есть биекции. □

7.4 Линейные отображения и базис

Матрица линейного отображения Пусть в векторном пространстве V зафиксирован базис e_1, \dots, e_n , а в пространстве U базис f_1, \dots, f_m . Тогда любое линейное отображение $\varphi: V \rightarrow U$ задается набором $\varphi(e_1, \dots, e_n) = (\varphi(e_1), \dots, \varphi(e_n))$.⁸³ Любой вектор $\varphi(e_i)$ можно разложить по базису f_1, \dots, f_m , то есть есть равенство $\varphi(e_i) = (f_1, \dots, f_m)A_i$, где $A_i \in F^m$ – столбец коэффициентов образа e_i по f_1, \dots, f_m . Тогда все эти равенства вместе можно записать так:

$$\varphi(e_1, \dots, e_n) = (f_1, \dots, f_m)A, \text{ где } A_\varphi = (A_1 | \dots | A_n) \in M_{m \times n}(F)$$

⁸¹Векторам u_i разрешено повторяться.

⁸²Чтобы проверить, что два отображения равны, как раз и надо проверить, что они совпадают на любом элементе, а мы ровно это и сделали.

⁸³Это равенство можно понимать, как произведение матрицы 1 на 1 с элементом из $\text{Hom}_F(V, U)$, с вектором размера 1 на n с элементами из пространства V .

Как только фиксированы базисы e_i и f_i , матрица A_φ определена однозначно. Эта матрица и называется матрицей линейного отображения φ в базисах e_i и f_i .⁸⁴ Еще раз повторим в кратких обозначениях, если $e = (e_1, \dots, e_n)$ и $f = (f_1, \dots, f_m)$ то, чтобы показать, что какая-то матрица A является матрицей линейного отображения $\varphi: V \rightarrow U$ в базисах e и f , то надо показать равенство $\varphi e = fA$.

Действие в координатах Пусть теперь $v \in V$. Тогда вектор v можно разложить по базису e в виде $v = ex$, для некоторого $x \in F^n$. Применим φ к v , получим

$$\varphi(v) = \varphi(ex) = (\varphi e)x = fA_\varphi x$$

То есть $\varphi(v)$ имеет координаты $A_\varphi x$. То есть, если отождествить пространство V с F^n посредством $v = ex \mapsto x$ и пространство U с F^m посредством $u = fy \mapsto y$, то наше линейное отображение φ превращается в отображение $F^n \rightarrow F^m$ по правилу $x \mapsto A_\varphi x$. Таким образом изучать линейное отображение между двумя конечномерными векторными пространствами – это все равно, что изучать отображение между пространствами столбцов, заданное умножением слева на матрицу.

Смена базиса Пусть теперь в пространстве V задано два базиса $e = (e_1, \dots, e_n)$ и $e' = (e'_1, \dots, e'_n)$. Аналогично, в пространстве U – два базиса $f = (f_1, \dots, f_m)$ и $f' = (f'_1, \dots, f'_m)$. Кроме того выполнены равенства $e' = eC$ для некоторой $C \in M_n(F)$ и $f' = fD$ для некоторой $D \in M_m(F)$, то есть D и C – матрицы перехода от нештрихованных базисов к штрихованным. Тогда в базисах e и f линейное отображение $\varphi: V \rightarrow U$ выглядит $\varphi e = fA_\varphi$, а в базисах e' и f' – $\varphi e' = f'A'_\varphi$. Давайте поймем какая связь между матрицами A_φ и A'_φ в терминах матриц перехода C и D .

$$\varphi e' = f'A'_\varphi \Rightarrow \varphi eC = fDA'_\varphi \Rightarrow \varphi e = fDA'_\varphi C^{-1}$$

В силу единственности матрицы линейного отображения

$$A_\varphi = DA'_\varphi C^{-1} \Rightarrow A'_\varphi = D^{-1}A_\varphi C$$

Последнее равенство показывает как меняется матрица линейного отображения, когда мы меняем базисы пространств. Запоминать можно так: когда мы хотим заменить старую матрицу A_φ на новую A'_φ надо справа домножить на матрицу перехода от e к e' , а слева на обратную к матрице перехода от f к f' . Еще полезно перед глазами держать следующую картинку:

$$\begin{array}{ccc} \text{старые} & F^n \xrightarrow{\varphi} F^m & x = Cx' \longmapsto y = A_\varphi Cx' \\ \uparrow & \downarrow & \uparrow \quad \downarrow \\ \text{новые} & F^n \xrightarrow{\varphi} F^m & x' \longmapsto y' = D^{-1}A_\varphi Cx' \end{array}$$

Связь матрицы отображения с операциями

Утверждение 80. Пусть V и U – некоторые векторные пространства над полем F размерностей n и m соответственно и пусть $e = (e_1, \dots, e_n)$ и $f = (f_1, \dots, f_m)$ – базисы пространств V и U . Тогда отображение

$$\begin{aligned} \text{Hom}_F(V, U) &\rightarrow M_{mn}(F) \\ \varphi &\mapsto A_\varphi \end{aligned}$$

является изоморфизмом векторных пространств, то есть выполнено

1. $A_{\varphi+\psi} = A_\varphi + A_\psi$.
2. $A_{\lambda\varphi} = \lambda A_\varphi$.

⁸⁴Как обычно я злоупотребляю своей любовью к опусканию чрезмерных деталей в обозначениях. Надо помнить, что вообще говоря матрица A_φ не имеет значения, если не сказано в каких именно базисах она посчитана. Потому хорошо бы еще писать, что это $A_{\varphi e_i f_i}$, но на практике не удобно использовать такое громоздкое обозначение, да и не особенно много проку от него.

Доказательство. Биективность этого отображения мы уже знаем в других терминах: при зафиксированных базисах e и f в обоих пространствах для любого линейного отображения φ существует единственная матрица A_φ такая, что $\varphi e = f A_\varphi$.

Теперь надо проверить линейность этого отображения. По определению $(\varphi + \psi)e = f A_{\varphi+\psi}$. С другой стороны

$$(\varphi + \psi)e = \varphi e + \psi e = f A_\varphi + f A_\psi = f(A_\varphi + A_\psi)$$

Из единственности следует, что $A_{\varphi+\psi} = A_\varphi + A_\psi$. Аналогично, $(\lambda\varphi)e = f A_{\lambda\varphi}$ с одной стороны и

$$(\lambda\varphi)e = \lambda(\varphi e) = \lambda f A_\varphi = f(\lambda A_\varphi)$$

с другой. Потому из единственности получаем $A_{\lambda\varphi} = \lambda A_\varphi$. \square

Таким образом изучать линейные отображения между двумя векторными пространствами – это все равно что изучать матрицы, причем с учетом операций на матрицах, а не просто как множество.

Утверждение 81. Пусть V , U и W – векторные пространства размерностей m , n и k соответственно с базисами e , f и h соответственно. Пусть $\varphi: V \rightarrow U$ и $\psi: U \rightarrow W$, тогда $A_{\psi\varphi} = A_\psi A_\varphi$.

Доказательство. Доказательство – прямая проверка в лоб по определению. С одной стороны $(\psi\varphi)e = h A_{\psi\varphi}$. С другой

$$(\psi\varphi)e = \psi(\varphi e) = \psi(f A_\varphi) = (\psi f) A_\varphi = h A_\psi A_\varphi$$

И результат следует из единственности. \square

Все эти результаты вместе взятые означают, что выбрав базис, мы можем отождествить все конечномерные пространства с какими-то конкретными пространствами вида F^n , а линейные отображения между ними на матрицы соответствующих размеров. Тогда изучать конечно мерные векторные пространства – это то же самое, что изучать конкретные векторные пространства столбцов с матричными отображениями между ними. Потому, если что-то глобально доказано для вектор столбцов, оно автоматом есть и для конечно мерных векторных пространств. Более того, если какой-то факт о векторах бесконечномерного векторного пространства требует лишь конечного набора векторов из него, то они живут в конечномерном подпространстве, а значит подобные факты для бесконечно мерных пространств автоматически следуют из случая конечномерных, а значит и из случая вектор столбцов.

7.5 Ядро и образ

Определение 82. Пусть V и U – векторные пространства над некоторым полем F и $\varphi: V \rightarrow U$ – линейное отображение. Тогда ядром φ называется следующее множество

$$\ker \varphi = \{v \in V \mid \varphi(v) = 0\} = \varphi^{-1}(0)$$

– прообраз нуля, а образом φ называется

$$\operatorname{Im} \varphi = \{\varphi(v) \mid v \in V\} = \varphi(V)$$

– теоретико множественный образ отображения φ .

Отметим, что ядро и образ никогда не пусты, они всегда содержат 0. Кроме того, простая проверка показывает, что оба этих множества являются подпространствами, а именно: $\ker \varphi$ – подпространство в V , а $\operatorname{Im} \varphi$ – подпространство в U .

Пример Пусть $\varphi: F^n \rightarrow F^m$ – линейное отображение задаваемое матрицей $A \in M_{m,n}(F)$, и пусть $A = (A_1 | \dots | A_n)$, где $A_i \in F^m$ – столбцы матрицы A . Тогда

- $\operatorname{Im} \varphi = \langle A_1, \dots, A_n \rangle$.
- $\ker \varphi = \{y \in F^n \mid Ay = 0\}$.

Второе получается просто по определению. Для того чтобы увидеть первое, поймем, что образ φ состоит из векторов вида $Ax = x_1 A_1 + \dots + x_n A_n$.

Утверждение 83. Пусть V и U – векторные пространства над полем F и $\varphi: V \rightarrow U$ – линейное отображение. Тогда

1. φ сюръективно тогда и только тогда, когда $\text{Im } \varphi = U$.
2. φ инъективно тогда и только тогда, когда $\ker \varphi = 0$.
3. $\dim_F \ker \varphi + \dim_F \text{Im } \varphi = \dim_F V$.

Доказательство. (1) Это просто переформулировка сюръективности на другом языке.

(2) Так как $\ker \varphi = \varphi^{-1}(0)$ и прообраз всегда содержит 0, то из инъективности вытекает, что $\ker \varphi = 0$. Наоборот, пусть $\varphi(v) = \varphi(v')$, тогда $\varphi(v) - \varphi(v') = 0$. А значит, $\varphi(v - v') = 0$. То есть $v - v'$ лежит в ядре, а значит равен 0, что и требовалось.

(3) Это самое интересное. Выберем базис ядра $\ker \varphi$, пусть это будет e_1, \dots, e_k . Тогда дополним его до базиса всего пространства V с помощью векторов e_{k+1}, \dots, e_n . Тогда образ φ является линейной оболочкой векторов $\varphi(e_1), \dots, \varphi(e_n)$. Так как первые k из них лежат в ядре и идут в ноль, то $\text{Im } \varphi = \langle \varphi(e_{k+1}), \dots, \varphi(e_n) \rangle$. Потому если мы покажем, что $\varphi(e_{k+1}), \dots, \varphi(e_n)$ является базисом $\text{Im } \varphi$, то мы получим требуемое.

Для доказательства последнего достаточно показать линейную независимость $\varphi(e_{k+1}), \dots, \varphi(e_n)$. Рассмотрим их какую-нибудь линейную комбинацию равную нулю

$$\lambda_{k+1}\varphi(e_{k+1}) + \dots + \lambda_n\varphi(e_n) = \varphi(\lambda_{k+1}e_{k+1} + \dots + \lambda_ne_n) = 0$$

Значит $\lambda_{k+1}e_{k+1} + \dots + \lambda_ne_n \in \ker \varphi$. А все что лежит в ядре раскладывается по базису ядра e_1, \dots, e_k , значит найдется выражение вида

$$\lambda_{k+1}e_{k+1} + \dots + \lambda_ne_n = \lambda_1e_1 + \dots + \lambda_ke_k$$

Перенеся все в одну сторону, мы получим линейную комбинацию на e_1, \dots, e_n , который по построению базис, значит, все λ_i равны нулю. Откуда следует требуемое. \square

7.6 Оценки ранга суммы и произведения

Давайте начнем с простой оценки, которая не требует серьезных знаний.

Утверждение 84. Пусть $A, B \in M_{m \times n}(F)$. Тогда

$$|\text{rk } A - \text{rk } B| \leq \text{rk}(A + B) \leq \text{rk } A + \text{rk } B$$

Доказательство. Докажем сначала верхнюю оценку. Пусть $\text{rk } A = r$ и $\text{rk } B = s$, тогда по определению тензорного ранга существуют разложения

$$A = x_1y_1^t + \dots + x_ry_r^t \quad \text{и} \quad B = u_1v_1^t + \dots + u_sv_s^t, \quad x_i, u_i \in F^m, \quad y_i, v_i \in F^n$$

Тогда

$$A + B = x_1y_1^t + \dots + x_ry_r^t + u_1v_1^t + \dots + u_sv_s^t$$

То есть мы получили какое-то разложение матрицы $A + B$ в сумму матриц ранга 1 из $r + s$ слагаемых. Но по определению тензорный ранг – это длина самого короткого разложения, значит $\text{rk}(A + B) \leq r + s = \text{rk } A + \text{rk } B$.

А теперь выведем нижнюю оценку из верхней. Давайте для определенности считать, что $\text{rk } A \geq \text{rk } B$. Тогда нам надо доказать, что $\text{rk } A - \text{rk } B \leq \text{rk}(A + B)$ или что то же самое, что $\text{rk } A \leq \text{rk}(A + B) + \text{rk } B$. Но в этом случае

$$\text{rk}(A) = \text{rk}(A + B + (-B)) \leq \text{rk}(A + B) + \text{rk}(-B) = \text{rk}(A + B) + \text{rk}(B)$$

Здесь мы воспользовались верхней оценкой. \square

А теперь давайте продемонстрируем, как можно применить векторные пространства и линейные отображения для доказательства более хитрых неравенств на ранги матриц.

Утверждение 85. Пусть $A \in M_{m \times k}(F)$ и $B \in M_{k \times n}(F)$. Тогда

$$\text{rk } A + \text{rk } B - k \leq \text{rk}(AB) \leq \min(\text{rk } A, \text{rk } B)$$

Доказательство. Правая оценка – не самый большой сюрприз. Заметим, что столбцы AB есть линейная комбинация столбцов A , потому $\text{rang } AB$ не превосходит ранга A . С другой стороны, строки AB есть линейная комбинация строк B , потому $\text{rang } AB$ не превосходит ранга B .

Теперь перейдем к интересной части доказательства. Давайте заменим матрицы на линейные отображения следующим образом. Рассмотрим последовательность

$$F^n \xrightarrow{B} F^k \xrightarrow{A} F^m$$

Здесь линейные отображения я буду обозначать теми же самыми буквами, что и матрицы. Это окажется удобным и не приведет к путанице. В этом случае доказываемое неравенство превращается в такое:

$$\dim_F \text{Im } A + \dim_F \text{Im } B - \dim_F F^k \leq \dim_F \text{Im } AB$$

Заметим, что $\text{Im } AB = A(\text{Im } B)$. Потому мы можем ограничить A со всего пространства F^k только на кусочек $\text{Im } B$, то есть рассмотрим отображение

$$\text{Im } B \xrightarrow{A|_{\text{Im } B}} F^m$$

которое каждый вектор u переводит в Au , но только мы рассматриваем только те u , что лежат в $\text{Im } B$.⁸⁵ Мы выбрали $A|_{\text{Im } B}$ так, что выполнено равенство $\text{Im } A|_{\text{Im } B} = \text{Im } AB$. Теперь применим утверждение 83 пункт (3) на связь размерности ядра и образа к $A|_{\text{Im } B}$, получим

$$\dim_F \text{Im } AB = \dim_F \text{Im } A|_{\text{Im } B} = \dim_F \text{Im } B - \dim_F \ker A|_{\text{Im } B}$$

Теперь наша задача оценить $\ker A|_{\text{Im } B}$. По определению это векторы из $\text{Im } B$, которые под действием A идут в ноль. То есть это $\text{Im } B \cap \ker A$ по определению. В частности $\ker A|_{\text{Im } B} \subseteq \ker A$, а значит можно продолжить равенство выше

$$\dim_F \text{Im } B - \dim_F \ker A|_{\text{Im } B} \geq \dim_F \text{Im } B - \dim_F \ker A = \dim_F \text{Im } B - (\dim_F F^k - \dim_F \text{Im } A)$$

в последнем равенстве мы воспользовались утверждением 83 пункт (3) еще раз для оператора $A: F^k \rightarrow F^m$. Объединяя полученные равенства и оценку, мы приходим к требуемому результату. \square

Доказательство оценки в этом случае получается технически несложным. Не надо рассматривать дурацкие линейные комбинации строк или столбцов от произведения матриц, которые не пойми как выражаются всякими непотребными формулами из исходных столбцов и строк матриц A и B . Это бонус абстрактного языка и правильного использования нужных объектов. Расплатой за это является идейная сложность. Тут надо сообразить и осознать, что мы вообще сделали, но как только вы с этим справитесь, то никаких проблем с доказательством у вас не будет.

7.7 Классификация для линейных отображений

Напомню, что если $\varphi: V \rightarrow U$ – линейное отображение между векторными пространствами над некоторым полем F . То после выбора базиса e в V и базиса f в U линейное отображение φ превращается в матрицу $A \in M_{m,n}(F)$, где $n = \dim_F V$ и $m = \dim_F U$. Если же мы выберем другие базисы e' и f' в пространствах V и U , соответственно, то φ превратится в матрицу A' . Если $e' = eC$ и $f' = fD$, где $C \in M_n(F)$ и $D \in M_m(F)$ – матрицы перехода к новым базисам, то $A' = D^{-1}AC$.

Утверждение 86. Пусть V и U – векторные пространства над полем F размерностей n и m , соответственно, и пусть нам даны матрицы $A, B \in M_{m,n}(F)$. Тогда следующие условия эквивалентны:

1. Существует линейное отображение $\varphi: V \rightarrow U$ и базисы e и e' в V , f и f' в U такие, что A будет матрицей φ в базисах e и f , а B будет матрицей φ в базисах e' и f' .
2. $\text{rk } A = \text{rk } B$.

⁸⁵ Такое линейное отображение $A|_{\text{Im } B}$ называется ограничением A на $\text{Im } B$.

Доказательство. (1) \Rightarrow (2). Здесь есть два доказательства: идейное и техническое. Я приведу оба. Давайте начнем с технического. Оно проще в понимании.

Техническое доказательство. Если такой φ и базисы существуют, то $B = D^{-1}AC$ для некоторых невырожденных матриц C и D подходящего размера. Тогда мы знаем по утверждению 71, что $\text{rk } A = \text{rk } B$, так как ранг не меняется при умножении на обратимую матрицу слева и справа.

Идейное доказательство. Если зафиксировать базисы e и f в пространствах V и U соответственно, то $\varphi: V \rightarrow U$ превращается в $A: F^n \rightarrow F^m$. Тогда образ φ совпадает с линейной оболочкой столбцов матрицы A . А значит $\text{rk } A = \dim_F \text{Im } \varphi$. Аналогично, $\text{rk } B = \dim_F \text{Im } \varphi$.

(2) \Rightarrow (1). Нам дано, что у матриц A и B равны ранги, а нам надо построить линейное отображение $\varphi: V \rightarrow U$ и еще пары базисов, чтобы в них матрицы φ совпали с A и B .

Так как $\text{rk } A = \text{rk } B$, мы можем найти обратимую матрицу $D \in M_m(F)$ и обратимую матрицу $C \in M_n(F)$ такие, что $B = D^{-1}AC$. Действительно, мы можем преобразованиями строк и столбцов матрицу A привести к виду $R = \begin{pmatrix} E & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$, где E имеет размер $\text{rk } A$. То есть $A = D_1RC_1$. Аналогично, $B = D_2RC_2$. Выразим R из первого равенства и подставим во второе. Получим требуемое.

Теперь выберем произвольный базис e в V и произвольный базис f в U . Чтобы задать линейное отображение из V в U нам надо отправить каждый базисный вектор из e куда-то в U (утверждение 78). Сделаем это так: $\varphi e = fA$. Тогда мы задали линейное отображение $\varphi: V \rightarrow U$ такое, что в базисах e и f он имеет матрицу A .

Далее положим $e' = eC$ и $f' = fD$. По утверждению 62 о классификации базисов, из обратимости C и D следует, что e' и f' – тоже базисы. Тогда оператор φ в этих базисах будет иметь матрицу $D^{-1}AC$, которая равна B по построению. Мы сделали все, что требовалось. \square

8 Операции над подпространствами

До этого мы с вами работали с векторными пространствами «в терминах элементов», то есть основные модификации производились на языке векторов и вектора являлись основным объектом, к которому применялись операции. Настало время все изменить в своей жизни и сделать шаг вперед в прекрасный новый мир абстракций. Теперь мы хотим, чтобы основным объектом для нас было векторное пространство, потому мы хотим определить операции над самими векторными пространствами.

8.1 Сумма и пересечение

Пусть V – некоторое векторное пространство над полем F и пусть $U, W \subseteq V$ – некоторые его подпространства.

Пересечение Так как U и W являются подмножествами в V , то для них определено теоретико множественное пересечение $U \cap W$. Легкая проверка показывает, что такое пересечение обязательно является подпространством (оно в частности никогда не пусто, потому что 0 обязательно лежит в их пересечении).

Чтобы лучше себе представить пересечение, представьте себе трехмерное пространство $V = \mathbb{R}^3$ и в нем две различные плоскости $U, W \subseteq V$ проходящие через ноль. Тогда эти плоскости обязательно пересекаются по прямой $U \cap W$.

Пересечение подпространств U и W обладает следующим свойством: это наибольшее подпространство, которое одновременно лежит и в U и в W . Потому про него надо думать, как про НОД векторных подпространств.

Сумма Если мы возьмем объединение двух подпространств U и W , то это хозяйство уже не обязательно будет подпространством. Простейший пример $V = \mathbb{R}^2$ – плоскость, $U = \langle e_1 \rangle$ и $W = \langle e_2 \rangle$ – координатные прямые. Тогда объединение $U \cup W$ – это крест, состоящий из двух прямых. Но это не векторное подпространство, так как $e_1 + e_2$ там не лежит.

Потому мы определяем сумму подпространств $U + W = \{u + w \mid u \in U, w \in W\}$. То есть мы берем по вектору из каждого подпространства и рассматриваем все их возможные суммы. Легкая проверка показывает, что $U + W$ обязательно является подпространством в V .

Чтобы лучше себе представить сумму, давайте рассмотрим трехмерное пространство $V = \mathbb{R}^3$, а в качестве U и W – две произвольные прямые в нем проходящие через ноль. Тогда сумма U и W – это плоскость натянутая на эти две прямые.

Сумма подпространств U и W обладает следующим свойством: это наименьшее подпространство, которое одновременно содержит и U и W . Потому про него надо думать, как про НОК векторных подпространств.

Утверждение 87. Пусть V – векторное пространство над полем F и $U, W \subseteq V$ – некоторые подпространства, тогда

$$\dim_F(U + W) = \dim_F U + \dim_F W - \dim_F(U \cap W)$$

Доказательство. Пусть $e = (e_1, \dots, e_r)$ – базис пересечения $U \cap W$. Теперь вспомним, что это линейно независимое подмножество во всем U и дополним его там до базиса U с помощью векторов $f = (f_1, \dots, f_p)$. Аналогично, базис $U \cap W$ будет линейно независимым подмножеством в W , а значит его можно дополнить до базиса W векторами $h = (h_1, \dots, h_t)$. Давайте покажем, что множество $e_1, \dots, e_r, f_1, \dots, f_p, h_1, \dots, h_t$ является базисом подпространства $U + W$. Тогда из этого и будет следовать необходимое утверждение.

Любой вектор из $U + W$ имеет вид $u + w$. Тогда u раскладывается по e и f , а вектор w раскладывается через e и h . А значит система $e \cup f \cup h$ порождает $U + W$. Теперь надо показать, что она линейно независима. Рассмотрим произвольную линейную комбинацию

$$ex + fy + hz = 0, \text{ где } x \in F^r, y \in F^p, z \in F^t$$

Тогда

$$U \ni ex + fy = -hz \in W$$

а значит лежит в пересечении $U \cap W$. В частности $hz \in U \cap W$. Но все что попадает в пересечение раскладывается по e . Значит найдется какое-то $z' \in F^t$ такое, что $hz = ez'$. Но это означает, что линейная комбинация $h \cup e$ равна нулю, так как они образовывали базис W , то $z = 0$ и $z' = 0$. А значит $-hz = 0$. Что влечет $ex + fy = 0$. Так как $e \cup f$ образовывали базис U , последнее означает, что $x = 0$ и $y = 0$. То есть все коэффициенты линейной комбинации на $e \cup f \cup h$ равны нулю, что и требовалось. \square

Бесконечные суммы и пересечения Если V – векторное пространство над полем F и в нем дано семейство подпространств $U_\alpha \subseteq V$, где $\alpha \in X$, то можно определить пересечение и сумму этого семейства. С пересечением все просто, это обычное теоретико-множественное пересечение $\bigcap_\alpha U_\alpha$ и как можно заметить, это подмножество является подпространством. Сумма же определяется следующим образом

$$\sum_{\alpha \in X} U_\alpha = \{u_{\alpha_1} + \dots + u_{\alpha_k} \mid k \in \mathbb{Z}_{\geq 0}, u_{\alpha_i} \in U_{\alpha_i}\}$$

То есть мы берем все возможные конечные суммы элементов из пространств U_α и складываем в один мешок. Как мы можем заметить, сумма таких выражений снова выражение такого вида и после умножения такого выражения на скаляр опять остается выражение такого вида. Значит, только что определенное подмножество является подпространством. В случае конечного числа слагаемых получаем следующее определение

$$U_1 + \dots + U_k = \{u_1 + \dots + u_k \mid u_i \in U_i\}$$

Определенные выше пересечение и сумма семейства U_α обладают следующим свойством:

1. Пересечение $\bigcap_\alpha U_\alpha$ является наибольшим подпространством, содержащимся во всех U_α . Здесь под наибольшим имеется в виду самое большое относительно порядка включения подпространств, то есть такое подпространство, что любое подпространство содержащееся во всех U_α в нем содержится. В частности пересечение можно определить, как объединение (или сумму) всех подпространств лежащих во всех U_α .
2. Сумма $\sum_\alpha U_\alpha$ является наименьшим подпространством, содержащим все U_α . Здесь под наименьшим имеется в виду самое маленькое относительно порядка включения подпространств, то есть такое подпространство, которое содержится в любом содержащем все U_α . В частности сумму можно определить как пересечение всех подпространств, содержащих все U_α .
3. Кроме того, отметим, что $\sum_\alpha U_\alpha$ совпадает с линейной оболочкой $\langle \bigcup_\alpha U_\alpha \rangle$. В частности для двух подпространств $U, W \subseteq V$ верно $U + W = \langle U, W \rangle = \langle U \cup W \rangle$. Таким образом к сумме можно относиться как к более удобному синтаксису задания линейных оболочек.

8.2 Прямые суммы

Если V – векторное пространство над полем F и $U_1, \dots, U_k \subseteq V$ – его подпространства такие, что $U_1 + \dots + U_k = V$. Тогда ясно, что можно не экономить на U_i и, заменив каждое из них на большее подпространство, равенство сохранится. Потому интересно в таких суммах выбирать U_i как можно меньше и быть экономными. Вопрос о том на сколько экономно и как можно и нужно выбирать U_i в таких ситуациях, мы и обсудим в этом разделе. Но в начале новая операция над пространствами.

Определение 88. Пусть V – векторное пространство и $U_1, \dots, U_k \subseteq V$ – его некоторые подпространства. В этом случае U_1, \dots, U_k называются линейно независимыми, если для любых элементов $u_1 \in U_1, \dots, u_k \in U_k$ условие $u_1 + \dots + u_k = 0$ влечет $u_i = 0$ для всех i .

Определение 89. Если нам даны произвольные векторные пространства V_1, \dots, V_k , то их декартово произведение $V_1 \times \dots \times V_k$ обладает структурой векторного пространства. Действительно, его элементы – это наборы векторов (v_1, \dots, v_k) . Тогда относительно поэлементных операций – это будет векторное пространство, то есть $(v_1, \dots, v_k) + (u_1, \dots, u_k) = (v_1 + u_1, \dots, v_k + u_k)$ и $\lambda(v_1, \dots, v_k) = (\lambda v_1, \dots, \lambda v_k)$. Пространство $V_1 \times \dots \times V_k$ называется внешней прямой суммой пространств V_1, \dots, V_k .

Предположим, что у нас есть некоторое векторное пространство V и его подпространства $U_1, \dots, U_k \subseteq V$. Тогда можно определить отображение $U_1 \times \dots \times U_k \rightarrow V$ по правилу $(u_1, \dots, u_k) \mapsto u_1 + \dots + u_k$. Заметим, что это отображение будет линейным и образом этого отображения будет сумма подпространств $U_1 + \dots + U_k$.

Утверждение 90. Пусть V – векторное пространство над полем F и $U_1, \dots, U_k \subseteq V$ – его подпространства такие, что $V = U_1 + \dots + U_k$. Тогда следующие условия эквивалентны

1. U_1, \dots, U_k – линейно независимые подпространства.
2. Любой вектор $v \in V$ единственным образом представляется в виде суммы $v = u_1 + \dots + u_k$, где $u_i \in U_i$.
3. Если e_i – базис U_i , то $\bigcup_{i=1}^k e_i$ – базис V .

$$4. \dim_F V = \sum_{i=1}^k \dim_F U_i.$$

$$5. U_i \cap (\sum_{j \neq i} U_j) = 0 \text{ для любого } i.$$

$$6. \text{Отображение } U_1 \times \dots \times U_k \rightarrow V \text{ по правилу } (u_1, \dots, u_k) \mapsto u_1 + \dots + u_k \text{ является изоморфизмом.}$$

Доказательство. (1) \Leftrightarrow (2). (\Leftarrow) Если любой вектор единственным образом представляется в виде суммы u_i , то в частности это верно для 0, но он уже представляется в виде $0 = 0 + \dots + 0$, а значит никаких других представлений у него нет. (\Rightarrow) Если $v = v_1 + \dots + v_k$ и $v = u_1 + \dots + u_k$, то, вычтя из одного другое, получим $0 = (v_1 - u_1) + \dots + (v_k - u_k)$. А значит $u_i = v_i$, что и требовалось.

(1) \Leftrightarrow (3). (\Rightarrow) Достаточно показать, что $\bigcup_i e_i$ является линейно независимым. Пусть $\sum_i e_i x_i = 0$ – некоторая линейная комбинация, где $x_i \in F^{\dim_F U_i}$. Но тогда по (1) все $e_i x_i = 0$. А так как e_i линейно независимо, то $x_i = 0$, что и требовалось. (\Leftarrow) Пусть $u_1 + \dots + u_k = 0$. Разложим каждый из них по базису $u_i = e_i x_i$. Тогда $\sum_i e_i x_i = 0$. Так как объединение всех e_i – базис, то $x_i = 0$, то есть $u_i = e_i x_i = 0$, что и требовалось.

(3) \Leftrightarrow (4). (\Rightarrow) Выполнено по определению, так как размерность – это количество векторов в любом базисе. (\Leftarrow) Если e_i – это базис U_i , то система $\bigcup_{i=1}^k e_i$ порождает V . Чтобы проверить, что это базис, достаточно показать, что в ней $\dim_F V$ элементов. Но так как эта система порождающая, то достаточно проверить, что в ней не больше $\dim_F V$ элементов. Теперь прямое вычисление показывает, что

$$|\bigcup_{i=1}^k e_i| \leq \sum_{i=1}^k |e_i| = \sum_{i=1}^k \dim_F U_i = \dim_F V$$

(1) \Leftrightarrow (5). (\Rightarrow) Пусть $u \in U_i \cap (\sum_{j \neq i} U_j)$, тогда $u = u_i$ и $u = \sum_{j \neq i} u_j$, а значит $u_i = \sum_{j \neq i} u_j$. Перенесем все в одну сторону, получим $\sum_{j \neq i} u_j - u_i = 0$. А значит все $u_i = 0$ по (1). А значит $u = u_i = 0$, что и требовалось. (\Leftarrow) Пусть $u_1 + \dots + u_k = 0$ и какой-нибудь $u_i \neq 0$. Тогда $u_i = -\sum_{j \neq i} u_j$. Мы получили ненулевой вектор в пересечении $U_i \cap (\sum_{j \neq i} U_j)$, противоречие.

(2) \Leftrightarrow (6). Это переформулировка одного и того же свойства. □

Определение 91. Пусть V – векторное пространство над полем F и $U_1, \dots, U_k \subseteq V$ – его подпространства такие, что $V = U_1 + \dots + U_k$ обладающие одним из эквивалентных свойств из предыдущего утверждения. Тогда сумма $V = U_1 + \dots + U_k$ называется прямой и обозначается $V = U_1 \oplus \dots \oplus U_k$. Тогда говорят, что V является внутренней прямой суммой подпространств U_1, \dots, U_k .

Прямая сумма – это обычная сумма подпространств, только с условием, что эти подпространства удовлетворяют некоторому дополнительному свойству. Кроме того, свойство (6) из предыдущего утверждения означает, что прямая сумма векторных подпространств совпадает с внешней прямой суммой этих же подпространств рассматриваемых как абстрактные векторные пространства. Бонус от этого вот какой: с внешней прямой суммой работать очень просто, так как это наборы векторов, их легко складывать, умножать на числа и сравнивать друг с другом. А так как внутренняя прямая сумма от этой не отличается (с точностью до изоморфизма), то изучать одно это все равно, что изучать другое.

Примеры

1. Пусть V – векторное пространство с базисом e_1, \dots, e_n . Положим $U_i = \langle e_i \rangle$, тогда $V = U_1 \oplus \dots \oplus U_n$. То есть мы раскладываем все пространство в прямую сумму прямых натянутых на базисные векторы.
2. Условие (5) очень просто переформулируется в случае двух подпространств. Пусть $U, W \subseteq V$, тогда $V = U \oplus W$ тогда и только тогда, когда $V = U + W$ и $U \cap W = 0$.
3. Давайте посмотрим на предыдущий пример в конкретном случае. Пусть $V = \mathbb{R}^3$, U – некоторая плоскость проходящая через 0, а W – прямая проходящая через 0 и не содержащаяся в U . Тогда пересечение прямой и плоскости есть ноль, а наименьшее подпространство, которое их содержит – это все пространство V . Значит $V = U \oplus W$.
4. Условие (5) сильнее условия $U_i \cap U_j = 0$. Вот пример. Пусть $V = \mathbb{R}^2$, $U_1 = \langle e_1 \rangle$, $U_2 = \langle e_2 \rangle$, $U_3 = \langle e_1 + e_2 \rangle$. То есть я беру две координатные прямые на плоскости и прямую под углом 45 градусов через первый квадрант. Тогда все попарные пересечения прямых есть ноль. Но $U_i + U_j = V$ для любой пары прямых, потому условие (5) не выполнено.

9 Линейные операторы

В этом разделе я наконец-то вам начну рассказывать о самых важных объектах в линейной алгебре – линейных операторах.

9.1 Определение и базовые свойства

Определение 92. Пусть V – векторное пространство над полем F , тогда линейным оператором на V называется линейное отображение $\varphi: V \rightarrow V$.

Так как линейный оператор – это частный случай линейного отображения, то для него применимо все, о чем мы уже говорили в случае отображений. Про линейный оператор надо думать как про деформацию пространства V .

Примеры

1. $\text{Id}: V \rightarrow V, v \mapsto v$. Тожественный линейный оператор, ничего не деформирует.
2. $0: V \rightarrow V, v \mapsto 0$. Нулевой линейный оператор, который все отправляет в ноль.
3. $A: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3, x \mapsto Ax$, где $A \in M_3(\mathbb{R})$ задана так

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$$

– поворот на угол α вокруг оси $\langle e_1 \rangle$.

4. Пусть $V = U \oplus W$, тогда зададим $\pi: V \rightarrow V$ по правилу $v = u + w \mapsto u$. Так как разложение в прямой сумме однозначно, то это корректно задает линейный оператор, который называется проектором на U вдоль W . Обратите внимание, что $\ker \pi = W$ и $\text{Im } \pi = U$. При этом для любого $u \in \text{Im } \pi$ верно $\pi u = u$.

Утверждение 93. Пусть V – векторное пространство над полем F и $\pi: V \rightarrow V$ – линейный оператор. Тогда следующие свойства эквивалентны:

1. Существуют подпространства $U, W \subseteq V$ такие, что $V = U \oplus W$ и π является проектором на U вдоль W .
2. $\pi^2 = \pi$.

Доказательство. (1) \Rightarrow (2). Рассмотрим произвольный $v \in V$, тогда $\pi^2(v) = \pi(\pi(v))$. Но вектор $\pi(v)$ лежит в образе π , то есть в U . Как я уже отмечал в замечании выше, на векторах из образа проектор π действует тождественно, то есть $\pi(\pi(v)) = \pi(v)$, что и требовалось.

(2) \Rightarrow (1). Пусть $\pi^2 = \pi$. Для начала нам надо откуда-то взять подпространства U и W . Замечание выше подсказывает, что надо положить $U = \text{Im } \pi$ и $W = \ker \pi$. Теперь надо показать две вещи: (1) V раскладывается в прямую сумму U и W , (2) действие π совпадает с действием проектора на U вдоль W .

Для (1) нам надо показать, что $U \cap W = 0$ и $U + W = V$. Начнем с пересечения. Пусть $v \in U \cap W$ – произвольный вектор. Тогда с одной стороны $v \in U = \text{Im } \pi$, а значит $v = \pi(v')$ и $v' \in V$. С другой стороны, $v \in W = \ker \pi$, а значит $\pi(v) = 0$. Но тогда

$$0 = \pi(v) = \pi(\pi(v')) = \pi^2(v') = \pi(v') = v$$

Значит в пересечении лежит только нулевой вектор.

Теперь займемся суммой. Мы должны показать, что любой вектор из V представляется в виде суммы векторов из U и W . Пусть $v \in V$, рассмотрим следующее разложение

$$v = \pi(v) + (\text{Id} - \pi)(v) = \pi(v) + (v - \pi(v))$$

Первый вектор $\pi(v)$ по определению попадает в $\text{Im } \pi = U$. Проверим, что второй лежит в ядре:

$$\pi((\text{Id} - \pi)(v)) = \pi(v - \pi(v)) = \pi(v) - \pi^2(v) = 0$$

Значит $V = U + W$.

Теперь мы знаем, что $V = U \oplus W = \text{Im } \pi \oplus \ker \pi$. Давайте покажем, что π действует как проектор. Возьмем $v \in V$, тогда он представляется в виде $v = u + w$, где $u = \pi(v)$ и $w = v - \pi(v)$. Применим π к v и видим, что получаем u . По определению действие π совпадает с действием проектора на U вдоль W . \square

Замечание

- Таким образом, если мы хотим разложить какое-то пространство V в прямую сумму подпространств, нам достаточно найти оператор на V , который в квадрате равен самому себе.
- Обратите внимание, что Id является по определению проектором на все пространство вдоль нулевого подпространства, а 0 является проектором на нулевое подпространство вдоль всего пространства. Эти операторы дают тривиальное разложение пространства V в прямую сумму $0 \oplus V$. Эти случаи надо иметь в виду.

9.2 Матрица линейного оператора

Пусть в векторном пространстве V задан некоторый базис e_1, \dots, e_n и пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор. Так как у оператора пространство из которого он бьет и то в которое он бьет совпадают, то мы фиксируем всего лишь один базис (пространство-то у нас одно). Тогда по определению матрица линейного оператора φ – это такая матрица $A_\varphi \in M_n(F)$, что выполнено $\varphi e = e A_\varphi$, где $e = (e_1, \dots, e_n)$.

Пусть теперь у нас задан другой базис e'_1, \dots, e'_n в пространстве V с матрицей перехода $C \in M_n(F)$, то есть $(e'_1, \dots, e'_n) = (e_1, \dots, e_n)C$. Пусть так же $e' = (e'_1, \dots, e'_n)$. Тогда матрица φ в базисе e' пусть будет A'_φ , то есть $\varphi e' = e' A'_\varphi$. В этом случае связь между матрицами следующая $A'_\varphi = C^{-1} A_\varphi C$. То есть матрица A_φ сопряжена матрице A'_φ .⁸⁶

Замечания

- Отметим, что матрица линейного оператора обязательно квадратная. Таким образом, изучение линейного отображения – это изучение прямоугольной матрицы, а изучение линейного оператора – это всегда изучение только квадратной матрицы.
- Если линейное отображение $\psi: V \rightarrow U$ бьет между двумя разными пространствами одинаковой размерности, то ему тоже соответствует квадратная матрица. Но принципиальная разница с линейным оператором заключается в том, что для линейного отображения мы можем независимо менять базисы в V и U , что соответствует замене $A'_\psi = C^{-1} A_\psi D$, а для линейного оператора, так как пространство одно и то же, базисы меняются одновременно, что соответствует $A'_\varphi = C^{-1} A_\varphi C$.
- Так как линейные операторы – это линейные отображения, то задавать их можно так же как и линейные отображения, например: либо с помощью образа базисных векторов, либо с помощью матрицы в фиксированном базисе.

9.3 Характеристики линейных операторов

В этом разделе я перечислю основные характеристики, которые можно определить для любого линейного оператора.

След Перед определением докажем техническое утверждение.

Утверждение. Пусть V – векторное пространство над полем F и пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – некоторый линейный оператор. Тогда число $\text{tr}(A_\varphi)$ не зависит от базиса, в котором посчитана матрица A_φ .

Доказательство. Действительно, пусть у нас есть два базиса $e' = (e'_1, \dots, e'_n)$ и $e = (e_1, \dots, e_n)$ связанные матрицей перехода $e' = eC$. Пусть $\varphi e = e A_\varphi$ и $\varphi e' = e' A'_\varphi$. Тогда как мы видели выше $A'_\varphi = C^{-1} A_\varphi C$. Тогда

$$\text{tr}(A'_\varphi) = \text{tr}(C^{-1} A_\varphi C) = \text{tr}(A_\varphi C C^{-1}) = \text{tr}(A_\varphi)$$

□

Положим по определению $\text{tr } \varphi = \text{tr } A_\varphi$ и будем называть это число следом оператора φ . Это определение корректно, так как данное число не зависит от базиса, в котором считается матрица оператора.⁸⁷

⁸⁶Напомним, что квадратные матрицы B и D называются сопряженными, если найдется обратимая матрица C такая, что $D = C^{-1} B C$.

⁸⁷Тут нужно сделать важное замечание. Как мы видим след оператора определяется через его матрицу, но не зависит от матрицы, а зависит только от самого линейного оператора. Потому есть соблазн дать эквивалентное определение совсем не используя матрицу оператора. К сожалению так сделать невозможно. Одной из причин является отсутствие следа в бесконечно мерных векторных пространствах. Любые попытки дать «без координатное» определение следа на самом деле является лишь тщательной маскировкой его координатной природы.

Определитель Перед определением докажем техническое утверждение.

Утверждение. Пусть V – векторное пространство над полем F и пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – некоторый линейный оператор. Тогда число $\det(A_\varphi)$ не зависит от базиса, в котором посчитана матрица A_φ .

Доказательство. Действительно, пусть у нас есть два базиса $e' = (e'_1, \dots, e'_n)$ и $e = (e_1, \dots, e_n)$ связанные матрицей перехода $e' = eC$. Пусть $\varphi e = eA_\varphi$ и $\varphi e' = e'A'_\varphi$. Тогда как мы видели выше $A'_\varphi = C^{-1}A_\varphi C$. Тогда

$$\det(A'_\varphi) = \det(C^{-1}A_\varphi C) = \det(C^{-1}) \det(A_\varphi) \det(C) = \det(A_\varphi)$$

□

Положим по определению $\det \varphi = \det A_\varphi$ и будем называть это число определителем оператора φ . Это определение корректно, так как данное число не зависит от базиса, в котором считается матрица оператора.⁸⁸

Характеристический многочлен Пусть опять $\varphi: V \rightarrow V$ – произвольный линейный оператор, тогда для любого $\lambda \in F$, $\lambda \text{Id} - \varphi: V \rightarrow V$ – тоже линейный оператор. Тогда по предыдущему определению корректно определен определитель такого оператора, который мы обозначим так: $\chi_\varphi(\lambda) = \det(\lambda \text{Id} - \varphi)$ и будем называть характеристическим многочленом оператора φ .

Пусть теперь в некотором базисе φ имеет матрицу A_φ . Тожественный оператор Id в любом базисе задается единичной матрицей. Тогда по предыдущему определению $\det(\lambda \text{Id} - \varphi)$ совпадает с $\det(\lambda E - A_\varphi)$. То есть характеристический многочлен оператора – это характеристический многочлен любой из его матриц в каком-нибудь базисе (в силу корректности определения определителя оператора, все эти многочлены будут одинаковыми).

Есть другой способ смотреть на характеристический многочлен. Можно просто сказать, что для оператора φ его характеристический многочлен – это характеристический многочлен его матрицы A_φ и надо лишь показать, что он не зависит от базиса. Это делается следующей проверкой

$$\det(\lambda E - CA_\varphi C^{-1}) = \det(\lambda CC^{-1} - CA_\varphi C^{-1}) = \det(C(\lambda E - A_\varphi)C^{-1}) = \det(\lambda E - A_\varphi)$$

Спектр Как и выше $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор на векторном пространстве, тогда положим

$$\text{спес}_F(\varphi) = \{\lambda \in F \mid \varphi - \lambda \text{Id} \text{ не обратим}\}$$

И будем называть это множество спектром линейного оператора φ .⁸⁹ Пусть теперь A_φ – матрица линейного оператора в каком-нибудь базисе. Оператор обратим тогда и только тогда, когда обратима его матрица (потому что все операции над операторами превращаются в операции над матрицами). Потому условие $\varphi - \lambda \text{Id}$ не обратим превращается в условие $A_\varphi - \lambda E$ не обратима. То есть спектр линейного оператора совпадает со спектром любой из его матриц в каком-нибудь базисе.

Минимальный многочлен Если у нас есть многочлен $f \in F[t]$ вида $f = a_0 + a_1 t + \dots + a_n t^n$ и задан линейный оператор $\varphi: V \rightarrow V$, то можно определить оператор $f(\varphi)$ по правилу

$$f(\varphi) = a_0 \text{Id} + a_1 \varphi + \dots + a_n \varphi^n$$

Здесь степень φ^k – это композиция оператора φ с самим собой k раз, а сумма и умножение на коэффициенты из поля берутся поточечно.⁹⁰

Если в результате подстановки оператора в многочлен мы получили нулевой оператор (тот который на всех векторах действует нулем), то мы говорим, что многочлен зануляет φ и пишем $f(\varphi) = 0$. Если в каком-то базисе $e_1, \dots, e_m \in V$ оператор φ имеет матрицу $A \in M_m(F)$, то $f(\varphi) = 0$ тогда и только тогда, когда $f(A) = 0$. Действительно, при переходе к базису $f(\varphi)$ имеет матрицу $f(A)$, а нулевой оператор соответствует нулевой матрице. Теперь мы можем определить минимальный многочлен оператора, как такой ненулевой многочлен $f_{\min \varphi} \in F[t]$, что

1. $f_{\min \varphi}(\varphi) = 0$.

⁸⁸Здесь верно то же самое замечание, что и для следа. Определитель оператора нельзя определить без матрицы оператора, но в то же время он не зависит от матрицы, а зависит лишь от самого оператора.

⁸⁹Заметим, что определение спектра дается без помощи матрицы линейного оператора.

⁹⁰Смотри определения для линейных отображений в разделе 7.2.

2. $f_{\min} \varphi$ имеет наименьшую степень среди всех ненулевых многочленов аннулирующих φ .
3. Старший коэффициент $f_{\min} \varphi$ равен единице.

В силу того, что для многочлена аннулировать оператор это тоже самое, что аннулировать его матрицу, то минимальный многочлен для линейного оператора совпадает с минимальным многочленом для его матрицы в любом базисе.

Ранг Мы знаем, что линейный оператор – это просто линейное отображение, но на одном пространстве. Для любого линейного отображения мы видели, что ранг его матрицы не меняется при смене базиса (см. утверждение 86). В частности ранг матрицы линейного оператора не меняется при смене базиса.

9.4 Обратимость оператора

Утверждение 94. Пусть V – векторное пространство над некоторым полем F и $\varphi: V \rightarrow V$ – некоторый линейный оператор. Тогда следующие свойства эквивалентны:

1. $\ker \varphi = 0$.
2. $\operatorname{Im} \varphi = V$.
3. φ обратим.
4. $\det \varphi \neq 0$.

Доказательство. Это утверждение является преформулировкой утверждения 3 на языке оператора. С другой стороны его можно получить из комбинации пунктов утверждения 83. \square

9.5 Инвариантные подпространства

Пусть $U \subseteq V$ – подпространство в некотором векторном пространстве V над полем F и пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – некоторый линейный оператор. Будем говорить, что векторное подпространство U является инвариантным относительно φ (или просто φ -инвариантным), если $\varphi(U) \subseteq U$.

Пример

- Рассмотрим пример поворота трехмерного пространства вокруг некоторой оси, а именно, пусть $A: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$, $x \mapsto Ax$, где $A \in M_3(\mathbb{R})$ задана так

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$$

В данном случае мы поворачиваем вокруг оси $\langle e_1 \rangle$. Заметим, что подпространство $\langle e_1 \rangle$ является инвариантным, любой вектор из этого подпространства остается неподвижным. Кроме того, подпространство $\langle e_2, e_3 \rangle$ – плоскость поворота, тоже является инвариантным относительно φ , любой вектор в ней поворачивается на угол α .

- Для любого оператора $\varphi: V \rightarrow V$ его ядро и образ являются инвариантными подпространствами.

Ограничение оператора

Определение 95. Пусть V – векторное пространство над полем F . Если $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор и $U \subseteq V$ – некоторое инвариантное подпространство, то тогда можно определить оператор $\varphi|_U: U \rightarrow U$, действующий по правилу $u \mapsto \varphi(u)$. Такой оператор называется ограничением φ на U .

Инвариантность в терминах матрицы Пусть $V = U \oplus W$ – прямая сумма подпространств. Выберем в U базис $e = (e_1, \dots, e_n)$, а в W базис $f = (f_1, \dots, f_m)$. Тогда $e \cup f$ является базисом V . Если $\varphi: V \rightarrow V$ – некоторый линейный оператор, то его можно записать в этом базисе в следующем блочном виде

$$\varphi(e, f) = (e, f) \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$$

Заметим, что при этом подпространство U будет φ -инвариантным тогда и только тогда, когда $C = 0$. Действительно, если U инвариантно, то $\varphi(U) \subseteq U$. С другой стороны $U = \langle e \rangle$. То есть U инвариантно тогда и только тогда, когда $\varphi(e) \subseteq U$. С другой стороны, по определению матрицы оператора $\varphi(e) = eA + fC$. Но $eA + fC$ лежит в $\langle e \rangle$ тогда и только тогда, когда $C = 0$. В этом случае определен оператор $\varphi|_U$ и матрица A будет матрицей этого оператора в базисе e .

Аналогично, подпространство W инвариантно тогда и только тогда, когда $B = 0$. Если же оба пространства инвариантны, то матрица φ является блочно диагональной. То есть отсюда мы видим геометрический смысл блочно верхнетреугольных и блочно диагональных матриц. Блочно верхнетреугольная означает наличие инвариантных подпространств натянутых на первый кусок базисных векторов. Блочно диагональный вид означает разложение пространства в прямую сумму инвариантных подпространств. Подобное разбиение в прямую сумму инвариантных позволяет сводить задачу про один оператор к задачам про оператор на пространстве меньшего размера. Это бывает полезно, если надо вести рассуждение индукцией по размерности подпространств.

Утверждение 96. Пусть $\varphi, \psi: V \rightarrow V$ два коммутирующих линейных оператора. Тогда $\ker \varphi$ и $\operatorname{Im} \varphi$ являются ψ -инвариантными.

Доказательство. Случай $\ker \varphi$. Мы должны показать, что $\psi(\ker \varphi) \subseteq \ker \varphi$. Возьмем произвольный вектор $v \in \ker \varphi$, нам надо показать, что $\psi(v) \in \ker \varphi$. То есть мы должны показать, что $\varphi(\psi(v)) = 0$. Но $\varphi\psi v = \psi\varphi v = \psi 0 = 0$.

Случай $\operatorname{Im} \varphi$. Мы должны показать, что $\psi(\operatorname{Im} \varphi) \subseteq \operatorname{Im} \varphi$. Возьмем произвольный вектор $v \in \operatorname{Im} \varphi$, нам надо показать, что $\psi(v) \in \operatorname{Im} \varphi$. Но условие $v \in \operatorname{Im} \varphi$ означает, что $v = \varphi(u)$ для некоторого $u \in V$. Но тогда $\psi v = \psi\varphi u = \varphi(\psi(u))$, что и требовалось. \square

9.6 Собственные векторы и значения

Определение 97. Пусть V – некоторое векторное пространство над полем F и $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор. Вектор $v \in V$ называется собственным для φ , если найдется такое $\lambda \in F$, что $\varphi v = \lambda v$.

Замечания

- Вектор $v \in V$ является собственным тогда и только тогда, когда $\langle v \rangle$ является φ -инвариантным подпространством. Таким образом изучать собственные векторы – это то же самое, что изучать не более чем одномерные инвариантные подпространства.
- Вектор $0 \in V$ всегда является собственным для любого линейного оператора.

Определение 98. Пусть V – некоторое векторное пространство над полем F и $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор. Число $\lambda \in F$ называется собственным значением φ , если найдется ненулевой $v \in V$ такой, что $\varphi v = \lambda v$.

Замечания

- Важно отметить, что в определении требуется, чтобы $v \neq 0$. Это связано с тем, что вектор $0 \in V$ является собственным для любого λ , то есть всегда верно $\varphi 0 = \lambda 0$. И если не потребовать этого условия, то любое число удовлетворяет этому определению и в нем теряется смысл. Будьте те внимательны.
- Популярная ошибка – считать, что 0 не может быть собственным значением. На самом деле, число 0 как может являться собственным значением, так и может не являться им. А именно, число 0 является собственным значением тогда и только тогда, когда $\ker \varphi \neq 0$. Потому что собственные векторы для значения 0 – это векторы $v \in V$ такие, что $\varphi(v) = 0v = 0$. Потому наличие ненулевого такого вектора означает, наличие ненулевого вектора в ядре, а это равносильно неинъективности, а значит и необратимости оператора (в силу утверждения 94).

Собственные и корневые подпространства

Определение 99. Пусть V – некоторое векторное пространство над полем F и $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор. Для любого числа $\lambda \in F$ определим собственное подпространство

$$V_\lambda = \{v \in V \mid \varphi v = \lambda v\}$$

Заметим, что такое подмножество обязательно является подпространством, например, потому что совпадает с $\ker(\varphi - \lambda \text{Id})$. Действительно, $\varphi v = \lambda v$ тогда и только тогда, когда $\varphi v - \lambda v = 0$. Что равносильно тому, что $(\varphi - \lambda \text{Id})v = 0$, что значит $v \in \ker(\varphi - \lambda \text{Id})$.

Замечание Обратите внимание, что оператор φ на собственном подпространстве V_λ действует как скалярный оператор λId , то есть все умножает на λ просто по определению $\varphi v = \lambda v$ для любого $v \in V_\lambda$. Тут Капитан Очевидность передает привет. Однако, не спешите, его помощник по имени Нетривиальное Следствие сейчас расскажет пару слов.

Давайте рассмотрим произвольный многочлен $f \in F[x]$, тогда определен оператор $f(\varphi): V \rightarrow V$. Так вот, оператор $f(\varphi)$ на собственном подпространстве V_λ действует умножением на $f(\lambda)$, то есть $f(\varphi)v = f(\lambda)v$. Это очень простое наблюдение жутко полезно.

Утверждение 100. Пусть V – некоторое векторное пространство над полем F и $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор. Тогда следующие условия равносильны:

1. $V_\lambda \neq 0$.
2. $\lambda \in \text{спес}_F \varphi$.
3. λ – корень $\chi_\varphi(t)$.
4. λ – корень минимального многочлена для φ .

Доказательство. Эквивалентность последних трех условий была доказана в утверждениях 10 и 33. Здесь эти условия приводятся, чтобы создать общую картину у читающего. Давайте проверим эквивалентность первого условия с оставшимися.

(1) \Rightarrow Пусть $V_\lambda \neq 0$, тогда $\varphi v = \lambda v$ для некоторого ненулевого вектора. Значит $(\varphi - \lambda \text{Id})v = 0$. А значит оператор $\varphi - \lambda \text{Id}$ не обратим.

\Rightarrow (1) Пусть $\varphi - \lambda \text{Id}$ не обратим. Тогда по одному из эквивалентных свойств обратимости оператора (утверждение 94), это означает, что $\varphi - \lambda \text{Id}$ имеет не нулевое ядро. То есть есть ненулевой вектор $v \in V$ такой, что $(\varphi - \lambda \text{Id})v = 0$. А это и значит, что $\varphi v = \lambda v$ после раскрытия скобок и переноса второго слагаемого вправо. \square

Определение 101. Пусть V – векторное пространство над полем F , $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор и λ – его собственное значение. Тогда кратность λ в характеристическом многочлене χ_φ называется кратностью собственного значения.

Почему это определение имеет смысл, вы увидите чуть позже, когда мы будем говорить про диагонализацию (утверждение 107).

Утверждение 102. Пусть F – алгебраически замкнутое поле, V – векторное пространство над полем F и $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор. Тогда обязательно существует ненулевой собственный вектор $v \in V$ для некоторого $\lambda \in F$.

Доказательство. Действительно, наличие такого вектора означает, что для некоторого $\lambda \in F$ пространство V_λ не нулевое. А это по предыдущему утверждению равносильно тому, что λ – корень характеристического многочлена для φ . Так как этот многочлен не константный (его степень равна размерности пространства),⁹¹ а F – алгебраически замкнуто, то у нас обязательно существует корень $\lambda \in F$. А значит $V_\lambda \neq 0$ (по утверждению 100). \square

Определение 103. Пусть V – некоторое векторное пространство над полем F и $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор. Для любого числа $\lambda \in F$ определим корневое подпространство

$$V^\lambda = \{v \in V \mid \exists n : (\varphi - \lambda \text{Id})^n v = 0\}$$

⁹¹Мы скромно закроем глаза на случай $V = 0$, то есть пространство нульмерно. В этом случае большой вопрос, что считать спектром. Правильно полагать его пустым. Верность утверждения тогда зависит от аккуратности формулировки. Но не надо забивать себе этим голову, просто имейте в виду, что иногда этот случай нужен.

Замечания

- Заметим, что $V^\lambda = \bigcup_{n \geq 0} \ker(\varphi - \lambda \text{Id})^n$. Каждое из ядер является подпространством. Однако в общем случае объединение подпространств не является подпространством. Но в данном случае $\ker(\varphi - \lambda \text{Id})^k \subseteq \ker(\varphi - \lambda \text{Id})^{k+1}$, то есть наши подпространства возрастают. Я оставляю в качестве упражнения убедиться, что при таком условии объединение обязательно будет подпространством.
- Кроме того, по определению $V_\lambda \subseteq V^\lambda$. При этом равенства в этом включении может не быть. Пусть

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Тогда $A: F^2 \rightarrow F^2$ – линейный оператор. При этом $A^2 = 0$. То есть $f(x) = x^2$ – зануляющий многочлен. Заметим, что он обязательно минимальный. А значит $\text{spec}(A) = \{0\}$. Тогда $V_0 = \ker A$ и оно порождено вектором e_1 . С другой стороны $F^2 = \ker A^2$, а потому $V^0 = F^2$.

- Обратите внимание, что $V_\lambda \neq 0$ тогда и только тогда, когда $V^\lambda \neq 0$. В одну сторону – это следует из вложения $V_\lambda \subseteq V^\lambda$. В другую сторону, если $v \in V^\lambda$ и $v \neq 0$, то найдем такое k , что $w = (\varphi - \lambda \text{Id})^k v \neq 0$, а $(\varphi - \lambda \text{Id})w = (\varphi - \lambda \text{Id})^{k+1} v = 0$. Тогда $w \in V_\lambda$ и не нулевой.
- Подпространства V_λ и V^λ являются φ инвариантными для любого λ .

9.7 Лемма о стабилизации

Утверждение 104. Пусть V – векторное пространство над полем F и $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор. Тогда

1. Найдется такое число $0 \leq k \leq \dim_F V$, что

$$0 \subsetneq \ker \varphi \subsetneq \ker \varphi^2 \subsetneq \dots \subsetneq \ker \varphi^k = \ker \varphi^{k+1} = \dots$$

2. Найдется такое число $0 \leq k \leq \dim_F V$, что

$$V \supsetneq \text{Im } \varphi \supsetneq \text{Im } \varphi^2 \supsetneq \dots \supsetneq \text{Im } \varphi^k = \text{Im } \varphi^{k+1} = \dots$$

Давайте поясним, что утверждается. Мы говорим, что ядра оператора сначала строго растут, а начиная с какого-то момента обязательно становятся одинаковыми для всех последующих шагов. Аналогичное происходит с образами, только они сначала строго уменьшаются, а потом становятся одинаковыми. Стоит обратить внимание, что k может быть равным 0, это означает, что нет строгих включений и равенства начинаются с самого начала.

Доказательство. (1) Нам достаточно показать, что если в какой-то момент $\ker \varphi^m = \ker \varphi^{m+1}$, то $\ker \varphi^{m+1} = \ker \varphi^{m+2}$. Включение $\ker \varphi^{m+1} \subseteq \ker \varphi^{m+2}$ понятно из определения (если что-то зануляется φ^{m+1} , то оно зануляется и большей степенью φ^{m+2}). Надо показать обратное. Пусть $v \in \ker \varphi^{m+2}$, тогда $\varphi^{m+2}v = 0$. То есть $\varphi^{m+1}(\varphi v) = 0$. Это значит $\varphi v \in \ker \varphi^{m+1} = \ker \varphi^m$. Последнее означает, что $\varphi^m(\varphi v) = 0$, то есть $\varphi^{m+1}v = 0$. Значит $v \in \ker \varphi^{m+1}$, что и требовалось.

Теперь надо понять, что k не превосходит размерность V . Но это следует из того факта, что в цепочке

$$0 \subsetneq \ker \varphi \subsetneq \ker \varphi^2 \subsetneq \dots$$

размерность подпространств каждый шаг растет хотя бы на единицу. Значит больше, чем $\dim_F V$ шагов у нас быть не может.

(2) Доказательство этого факта проходит аналогично. Либо можно воспользоваться соотношением между размерностями ядра и образа (утверждение 83 пункт (3)) и увидеть, что стабилизация у образов начинается на том же значении k , что и у ядер. \square

Замечание В силу этого утверждения мы получаем, что $V^\lambda = \ker(\varphi - \lambda \text{Id})^m$ для некоторого достаточно большого m . Понятно, что на самом деле, достаточно взять $m = \dim_F V$.⁹²

⁹²Если уж бы до конца честным, то можно еще сильнее уменьшить m . Тут достаточно взять кратность собственного значения в минимальном многочлене, я докажу это позже.

10 Классификационная задача для линейных операторов

Абстрактные объекты вроде векторных пространств и линейных операторов становятся более знакомыми после выбора базиса. Пространства превращаются в столбцы, а операторы в квадратные матрицы. Но так как базис выбирать можно по-разному, то и матрицы в такой ситуации получаются черт знает какими. Основной вопрос классификационной задачи: как понять по матрицам, что они задают один и тот же линейный оператор, но в разных базисах. Другой вопрос: к какому самому простому виду можно привести матрицу линейного оператора. Мы уже видели ответ в случае линейного отображения между разными пространствами, в этом случае все контролируется рангом матриц. Оказывается, что в случае линейного оператора ситуация сильно сложнее и зависит от выбора поля.

Пусть теперь $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор, т.е. линейное отображение из векторного пространства в себя. Тогда при выборе базиса e в V наш оператор превращается в матрицу $A \in M_n(F)$, где $n = \dim_F V$. Если же мы выберем другой базис e' в V такой, что $e' = eC$ для некоторой обратимой $C \in M_n(F)$. То матрица φ в базисе e' будет $C^{-1}AC$. Заметим сложность ситуации. Мы теперь не можем независимо домножать нашу матрицу с разных сторон на разные матрицы. Если думать в терминах элементарных преобразований, мы теперь должны неким сложным образом согласовывать преобразования строк и столбцов. Из-за этих ограничений кустарными методами (вроде подбора элементарных преобразований) для приведения матрицы в хороший вид нам обойтись не получится. Более того, степень «хорошести» нашей матрицы будет сильно зависеть от свойств поля F над которым определены наши векторные пространства. А так как элементарные преобразования ничего не знают про свойства поля, то это автоматически означает, что не мы такие неумелые, что не смогли воспользоваться элементарными преобразованиями, а этот метод в лоб просто не работает.

Для преодоления сложившихся трудностей в случае оператора приходится привлекать более продвинутую технику. К такой технике как раз и относятся собственные векторы и значения, собственные и корневые подпространства. Кульминацией для нас будет теорема о жордановой нормальной форме. Сформулировать мы ее пока не будем, но обсудим некоторые стратегические соображения.

Для чего вообще меняется базис? Для того, чтобы сделать вид матрицы линейного оператора максимально простым. Тогда заменив его простой матрицей, его будет проще изучать. В идеале простой вид – это когда много нулей. Самый желанный для нас вид – диагональный. Было бы еще лучше, если бы можно было сделать матрицу диагональной с единицами и нулями на диагонали, но это совсем не возможно. Например, если оператор не вырожден, то его определитель не меняется, а он совпадает с произведением диагональных элементов матрицы. То есть скалярную матрицу λE никогда нельзя сделать единичной E путем замены базиса (это так же видно из формулы замены) если $\lambda \neq 1$.

Оказывается и диагональной можно сделать не всякую матрицу путем сопряжения, то есть не всякий линейный оператор приводится к диагональному виду в каком-то базисе. Потому один из первых вопросов, которым мы хотим заняться – это вопрос: когда линейный оператор задается диагональной матрицей в некотором базисе.

10.1 Диагонализуемость линейного оператора

Определение 105. Пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор над некоторым полем F . Будем говорить, что φ диагонализуется или диагонализуемый, если в некотором базисе его матрица является диагональной.

Утверждение 106. Пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор в некотором векторном пространстве над полем F и пусть $\lambda_1, \dots, \lambda_k \in F$ – различные числа. Тогда

1. Пространства $V_{\lambda_1}, \dots, V_{\lambda_k}$ линейно независимы.^{93, 94}
2. Пространства $V^{\lambda_1}, \dots, V^{\lambda_k}$ линейно независимы.

Доказательство. 1) В начале покажем случай собственных подпространств. Пусть $u_1 \in V_{\lambda_1}, \dots, u_k \in V_{\lambda_k}$ – произвольные ненулевые векторы такие, что $u_1 + \dots + u_k = 0$. Применим к этому равенству оператор $\varphi - \lambda_1 \text{Id}$. Тогда u_1 занулится, а $(\varphi - \lambda_1 \text{Id})u_i = (\lambda_i - \lambda_1)u_i$ будет ненулевым вектором из V_{λ_i} при $i \neq 1$. Обозначим эти векторы за u'_2, \dots, u'_k . Тогда мы доказали, что если у нас дана сумма из k ненулевых векторов $u_1 + \dots + u_k = 0$, то мы можем получить более короткую сумму из $k - 1$ вектора $u'_2 + \dots + u'_k = 0$.

2) Теперь давайте разберемся с корневыми. Пусть v_1, \dots, v_s – набор векторов такой, что $v_i \in V^{\lambda_i}$ и $v_1 + \dots + v_s = 0$, где s – самое маленькое из возможных. Если $s = 1$, то имеем $v_1 = 0$ и доказывать нечего.

⁹³Определение линейной независимости подпространств 88.

⁹⁴Прошу обратить внимание, что линейно независимые подпространства могут быть нулевыми или часть из них может быть нулевыми.

Теперь считаем, что у нас $s > 1$. Так как v_s – корневой, то для некоторого m получаем $(\varphi - \lambda_s \text{Id})^m v_s = 0$. Тогда получим

$$(\varphi - \lambda_s \text{Id})^m v_1 + \dots + (\varphi - \lambda_s \text{Id})^m v_{s-1} = 0$$

Если мы покажем, что $(\varphi - \lambda_s \text{Id})^m v_i$ лежит в V^{λ_i} и хотя бы одно из них не ноль, то мы придем к противоречию, так как получим более короткую сумму корневых векторов, дающую ноль.

Каждое подпространство V^{λ_i} является φ инвариантным. А значит и $\varphi - \lambda_s \text{Id}$ инвариантным. А значит и $(\varphi - \lambda_s \text{Id})^m$ инвариантным. Это показывает, что все слагаемые действительно остаются внутри соответствующего V^{λ_i} .

Теперь проверим, что хотя бы одно из слагаемых не равно нулю. Давайте покажем более сильное утверждение, если $v_i \neq 0$, то и $(\varphi - \lambda_s \text{Id})^m v_i \neq 0$. По определению корневого пространства, мы можем найти такое d , что

$$(\varphi - \lambda_i \text{Id})^d v_i = 0 \quad \text{и} \quad u_i = (\varphi - \lambda_i \text{Id})^{d-1} v_i \neq 0$$

В частности $(\varphi - \lambda_i \text{Id})u_i = 0$, то есть u_i – собственный вектор. Чтобы показать, что $(\varphi - \lambda_s \text{Id})^m v_i$ не нулевой, достаточно показать, что

$$(\varphi - \lambda_i \text{Id})^{d-1} (\varphi - \lambda_s \text{Id})^m v_i \neq 0$$

Действительно,

$$(\varphi - \lambda_i \text{Id})^{d-1} (\varphi - \lambda_s \text{Id})^m v_i = (\varphi - \lambda_s \text{Id})^m (\varphi - \lambda_i \text{Id})^{d-1} v_i = (\varphi - \lambda_s \text{Id})^m u_i$$

Но по определению u_i – собственный вектор с собственным значением λ_i . Это значит, что умножение на φ совпадает с умножением на λ_i на векторе u_i . Значит

$$(\varphi - \lambda_s \text{Id})^m u_i = (\lambda_i - \lambda_s)^m u_i \neq 0$$

□

Утверждение 107. Пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – некоторый линейный оператор в векторном пространстве над полем F . Тогда следующие утверждения эквивалентны:

1. Оператор φ диагонализуем.
2. Существует базис из собственных векторов.
3. Существует разложение $V = V_{\lambda_1} \oplus \dots \oplus V_{\lambda_k}$.
4. (a) Характеристический многочлен раскладывается на линейные множители

$$\chi_\varphi(t) = (t - \lambda_1)^{r_1} \dots (t - \lambda_k)^{r_k}$$

(b) для каждого i верно $\dim_F V_{\lambda_i} = r_i$.

Доказательство. (1) \Leftrightarrow (2). Пусть e – некоторый базис V . Тогда $\varphi e = eA$, где A – матрица φ в базисе e . По определению φ диагонализуем в базисе e тогда и только тогда, когда A диагональная. С другой стороны, все векторы в e собственные тогда и только тогда, когда A диагональная.

(2) \Rightarrow (3). Пусть e – базис из собственных векторов и $\varphi e = eA$, где A – диагональная с числами $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ на диагонали (эти числа могут повторяться). Для удобства переупорядочим вектора так, чтобы одинаковые числа λ_i шли по-порядку. Тогда базис e можно разделить на части $e = e_1 \sqcup \dots \sqcup e_k$, где все векторы из e_i являются собственными с собственным значением λ_i . Значит $\langle v \mid v \in e_i \rangle \subseteq V_{\lambda_i}$. А значит

$$V = \langle e \rangle = \sum_i \langle e_i \rangle \subseteq \sum_i V_{\lambda_i} \subseteq V$$

То есть мы показали, что $V = \sum_i V_{\lambda_i}$ является суммой. С другой стороны, утверждение 106 гарантирует, что векторные подпространства V_{λ_i} линейно независимы, а значит сумма прямая (одно из эквивалентных определений по утверждению 90).

(3) \Rightarrow (2). Пусть $V = V_{\lambda_1} \oplus \dots \oplus V_{\lambda_k}$ и пусть e_i – какой-нибудь базис V_{λ_i} . Тогда по одному из эквивалентных определений прямой суммы (утверждение 90) $e = e_1 \sqcup \dots \sqcup e_k$ будет базисом для V . Тогда это и есть базис из собственных векторов.

(3) \Rightarrow (4). Выберем как в предыдущем пункте базис e_i в каждом слагаемом V_{λ_i} . Тогда $|e_i| = \dim_F V_{\lambda_i}$. Запишем матрицу нашего оператора в этом базисе в блочном виде

$$\varphi(e_1, \dots, e_k) = (e_1, \dots, e_k) \begin{pmatrix} \lambda_1 E & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_k E \end{pmatrix}$$

где размеры блоков равны в точности $r_i = |e_i| = \dim_F V_{\lambda_i}$. Тогда характеристический многочлен $\chi_\varphi(t) = (t - \lambda_1)^{r_1} \dots (t - \lambda_k)^{r_k}$. Как мы видим многочлен разложился на линейные множители и кратности корней совпали с размерностями V_{λ_i} .

(4) \Rightarrow (3). Пусть $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ – все корни характеристического многочлена. Тогда по утверждению 106 сумма $V_{\lambda_1} + \dots + V_{\lambda_k}$ всегда прямая. То есть мы имеем $V_{\lambda_1} \oplus \dots \oplus V_{\lambda_k} \subseteq V$. И осталось лишь проверить равенство. Для этого посчитаем размерности. С одной стороны $\dim_F V = \deg \chi_\varphi$ по определению. С другой стороны размерность левой части есть

$$\sum_i \dim_F V_{\lambda_i} = \sum_i r_i = \deg \chi_\varphi$$

В первом равенстве мы воспользовались вторым условием, а во втором равенстве первым (если многочлен разложился на линейные множители, то сумма кратностей его корней равна степени). Значит обе размерности совпали и пространства оказались равны. \square

Примеры

1. Рассмотрим оператор $A: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ по правилу $x \mapsto Ax$, где $A = \begin{pmatrix} a & -b \\ b & a \end{pmatrix}$, $a, b \in \mathbb{R}$. Если $b \neq 0$ то этот оператор не диагонализуется, потому что его хар многочлен имеет только комплексные корни $a + bi$ и $a - bi$ и не имеет вещественных. Значит не выполняется пункт 4(a).
2. Теперь рассмотрим оператор заданный той же матрицей, но в случае комплексного векторного пространства $A: \mathbb{C}^2 \rightarrow \mathbb{C}^2$ по правилу $x \mapsto Ax$, где $A = \begin{pmatrix} a & -b \\ b & a \end{pmatrix}$, $a, b \in \mathbb{R}$. Этот оператор диагонализуется и в некотором базисе записывается в виде $\begin{pmatrix} a+bi & 0 \\ 0 & a-bi \end{pmatrix}$.
3. Теперь рассмотрим оператор $A: \mathbb{C}^2 \rightarrow \mathbb{C}^2$ по правилу $x \mapsto Ax$, где $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$. Тогда его характеристический многочлен $\chi_A(t) = t^2$ раскладывается на линейные множители. Число $\lambda = 0$ является единственной точкой спектра, то есть это единственное собственное значение. Собственное подпространство V_λ для $\lambda = 0$ задается $\{x \in \mathbb{C}^2 \mid Ax = 0\}$, которое совпадает с $\langle e_1 \rangle$. То есть $\dim V_\lambda$ не равно кратности корня, то есть он не диагонализуется даже над \mathbb{C} .

Таким образом мы видим, что диагонализуемость зависит от поля. Часть причин недиагонализуемости – плохой выбор поля. В этом случае в утверждении 107 не выполняется условие 4(a). Такая проблема решается расширением поля до алгебраически замкнутого поля (так всегда можно сделать). Но последний пример показывает, что существуют операторы, которые не диагонализуются над любым полем. Это по-настоящему недиагонализуемые операторы. А действительно важное препятствие к диагонализуемости – это условие 4(b). Другими словами условие 4(b) означает, что размерность собственного подпространства должна совпасть с кратностью соответствующего собственного значения.

10.2 Свойства ограничения оператора

Теперь нам надо освоить несколько мелких технических утверждений связанных с поведением различных характеристик ограничения оператора на инвариантное подпространство.

Утверждение 108. Пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор и $U \subseteq V$ – инвариантное подпространство. Тогда

1. Если φ обратим, то $\varphi|_U$ обратим.
2. $\text{спес}_F \varphi|_U \subseteq \text{спес}_F \varphi$.

Доказательство. (1) Если φ обратим, то $\ker \varphi = 0$, тогда $\ker \varphi|_U = \ker \varphi \cap U = 0$. А значит $\varphi|_U$ обратим по утверждению 94.

(2) Нам надо показать, что если $\lambda \notin \text{спес}_F \varphi$, то $\lambda \notin \text{спес}_F \varphi|_U$. То есть если $\varphi - \lambda \text{Id}$ обратим, то и $\varphi|_U - \lambda \text{Id}$ обратим. Но это следует из первого пункта и наблюдения

$$(\varphi - \lambda \text{Id})|_U = \varphi|_U - (\lambda \text{Id})|_U = \varphi|_U - \lambda \text{Id}$$

□

Утверждение 109. Пусть $V = U \oplus W$, $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор и подпространства U и W являются φ -инвариантными. Тогда

1. $\text{tr } \varphi = \text{tr } \varphi|_U + \text{tr } \varphi|_W$.
2. $\det \varphi = \det \varphi|_U \det \varphi|_W$.
3. $\chi_\varphi(t) = \chi_{\varphi|_U}(t) \chi_{\varphi|_W}(t)$.
4. $\text{спес}_F \varphi = \text{спес}_F \varphi|_U \cup \text{спес}_F \varphi|_W$.

Доказательство. Пусть e – базис U и f – базис W . Тогда по одному из эквивалентных определений прямой суммы (утверждение 90) $e \cup f$ будет базисом V . Давайте запишем в этом базисе наш оператор φ :

$$\varphi(e, f) = (e, f) \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$$

Так как подпространство $U = \langle e \rangle$ φ -инвариантно, то есть $\varphi(U) \subseteq U$, то $\varphi(e)$ выражается только через e . Последнее означает, что $C = 0$. Аналогично, так как W φ -инвариантно, то $B = 0$. А значит

$$\varphi(e, f) = (e, f) \begin{pmatrix} A & 0 \\ 0 & D \end{pmatrix}$$

При этом по определению A – это матрица $\varphi|_U$ в базисе e , а D – это матрица $\varphi|_W$ в базисе f . Тогда все четыре утверждения следуют из явного подсчета следа, определителя, характеристического многочлена и спектра для блочно диагональных матриц. □

10.3 Приведение к верхнетреугольному виду

Утверждение 110. Пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор в векторном пространстве размерности n над полем F и пусть $\lambda \in F$ – корень минимального многочлена для φ . Тогда существует базис, в котором матрица φ имеет следующий блочный вид

$$A_\varphi = \begin{pmatrix} \lambda & * \\ 0 & B \end{pmatrix}, \text{ где } B \in M_{n-1}(F)$$

Доказательство. Тут можно было бы воспользоваться утверждением 100. Тогда для корня λ подпространство V_λ не нулевое. А значит в нем есть искомый ненулевой вектор. Однако, полезно понимать, как найти собственный вектор с помощью минимального многочлена явно. Давайте проделаем это.

Пусть $f_{\min} = (t - \lambda)g(t)$. Тогда $g(\varphi) \neq 0$, то есть $g(\varphi)$ – ненулевой оператор. Последнее означает, что для какого-то вектора $v \in V$, $g(\varphi)v \neq 0$. Обозначим $u = g(\varphi)v$. Тогда это ненулевой вектор. С другой стороны

$$(\varphi - \lambda \text{Id})u = (\varphi - \lambda \text{Id})g(\varphi)v = f_{\min}(\varphi)v = 0$$

То есть u – ненулевой собственный вектор с собственным значением λ . Раз это ненулевой вектор, то множество $\{u\}$ линейно независимое. А значит его можно дополнить до базиса. Пусть это будет u, u_2, \dots, u_n . Тогда в этом базисе матрица оператора φ будет иметь заявленный вид. Действительно, по определению

$$\varphi(u, u_2, \dots, u_n) = (u, u_2, \dots, u_n) \begin{pmatrix} a & * \\ w & B \end{pmatrix}$$

Тогда $\varphi u = au + (u_2, \dots, u_n)w$. Но мы уже знаем, что $\varphi u = \lambda u$. То есть $a = \lambda$ и $w = 0$. □

Утверждение 111. Пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор в векторном пространстве над полем F и пусть минимальный многочлен f_{\min} для φ раскладывается на линейные множители $(t - \lambda_1)^{k_1} \dots (t - \lambda_r)^{k_r}$. Тогда существует базис в V такой, что матрица φ верхнетреугольная с числами $\lambda_1, \dots, \lambda_r$ на диагонали (возможно с повторениями).

Доказательство. Я не смогу вам дать доказательство полностью на языке операторов, так как мы не владеем некоторыми необходимыми техническими средствами в виде фактор пространств и фактор операторов. Потому надо будет переформулировать все в терминах матриц.

В начале выберем случайный базис в V . Тогда наш оператор превратится в $A: F^n \rightarrow F^n$. Нам надо найти такую обратимую матрицу $D \in M_n(F)$, что $D^{-1}AD$ будет верхне треугольной с числами $\lambda_1, \dots, \lambda_r$ на диагонали (может быть с повторениями).

Начнем. Так как минимальный многочлен раскладывается на линейные, то он имеет корень, например, выберем λ_1 . Тогда предыдущее утверждение означает, что можно найти обратимую матрицу $C \in M_n(F)$ такую, что

$$C^{-1}AC = \begin{pmatrix} \lambda_1 & * \\ 0 & B \end{pmatrix}$$

Заметим, что для произвольного многочлена f верно

$$f \begin{pmatrix} \lambda_1 & * \\ 0 & B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(\lambda_1) & * \\ 0 & f(B) \end{pmatrix}$$

А значит f_{\min} зануляет блок B . То есть минимальный многочлен для B тоже раскладывается на линейные множители и его корни находятся среди корней f_{\min} , так как минимальный для B делит f_{\min} . А значит, для B по индукции найдется такая обратимая матрица $T \in M_{n-1}(F)$, что $T^{-1}BT$ является верхне треугольной с числами $\lambda_1, \dots, \lambda_r$ на диагонали (быть может с повторениями и пропусками). Тогда

$$\begin{pmatrix} 1 & \\ & T \end{pmatrix}^{-1} C^{-1}AC \begin{pmatrix} 1 & \\ & T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \\ & T \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \lambda_1 & * \\ 0 & B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \\ & T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & * \\ 0 & T^{-1}BT \end{pmatrix}$$

Последняя матрица верхне треугольная с числами $\lambda_1, \dots, \lambda_r$ на диагонали (быть может с повторениями). То есть мы доказали, что хотели с матрицей

$$D = C \begin{pmatrix} 1 & \\ & T \end{pmatrix}$$

□

Утверждение 112. Пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – некоторый линейный оператор на векторном пространстве V над полем F . Тогда $\chi_{\varphi|_{V^\lambda}}(t) = (t - \lambda)^{\dim V^\lambda}$.

Доказательство. Оператор $\varphi|_{V^\lambda}$ зануляется многочленом вида $(t - \lambda)^d$. Значит его минимальный многочлен имеет вид $(t - \lambda)^k$. По утверждению 111 матрица оператора $\varphi|_{V^\lambda}$ приводится к верхнетреугольному виду с λ на диагонали. А значит $\chi_{\varphi|_{V^\lambda}}(t) = (t - \lambda)^{\dim V^\lambda}$. □

10.4 Идеальный спектр

Определение 113. Пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор над произвольным полем F , тогда идеальный спектр φ это следующее множество:

$$\text{спес}_F^I \varphi := \{p \in F[t] \mid p \text{ неприводим со старшим коэффициентом 1 и } p(\varphi) \text{ необратим}\}$$

Пример Если рассмотреть линейный оператор $A: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ заданный матрицей $A = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$, то его минимальный многочлен будет $f = x^2 + 1$. Таким образом вещественный спектр пуст $\text{спес}_{\mathbb{R}} A = \emptyset$, так как f неприводим и не линеен, а значит не имеет корней. Однако идеальный спектр будет непустым $\text{спес}_{\mathbb{R}}^I A = \{x^2 + 1\}$.

Утверждение 114. Пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – некоторый оператор над произвольным полем F и f_{\min} – его минимальный зануляющий многочлен над F . Тогда

1. Для любого зануляющего многочлена f и любого $p \in \text{спес}_F^I \varphi$ следует, что p делит f .
2. $p \in \text{спес}_F^I \varphi$ тогда и только тогда, когда p делит f_{\min} .

Доказательство. (1) Для этого достаточно показать, что если p не делит f , то $p(\varphi)$ обратим. Действительно, так как p неприводим, это означает, что f и p взаимно просты. Тогда по расширенному алгоритму Евклида

мы знаем, что $1 = u(t)p(t) + v(t)f(t)$ для некоторых многочленов $u(t), v(t) \in F[t]$. Тогда подставив в последнее равенство φ мы видим

$$\text{Id} = u(\varphi)p(\varphi) + v(\varphi)f(\varphi) = u(\varphi)p(\varphi)$$

То есть $u(\varphi)$ – обратный к $p(\varphi)$, что и требовалось.

(2) Пусть теперь f_{\min} – минимальный многочлен и пусть p – неприводимый делитель f_{\min} , то есть $f_{\min} = ph$. Надо показать, что $p(\varphi)$ необратим.

Мы знаем, что $0 = f_{\min}(\varphi) = p(\varphi)h(\varphi)$. Предположим, что $p(\varphi)$ обратим. Тогда в равенстве $p(\varphi)h(\varphi) = 0$ можно сократить на $p(\varphi)$. Значит $h(\varphi) = 0$, что противоречит минимальности φ . \square

Замечания

- Пусть f_{\min} раскладывается на линейные множители

$$f_{\min}(t) = (t - \lambda_1)^{k_1} \dots (t - \lambda_r)^{k_r}$$

Тогда идеальный спектр φ – это в точности многочлены $\{t - \lambda_1, \dots, t - \lambda_r\}$. То есть каждый элемент идеального спектра однозначно соответствует элементу обычного спектра $\text{spes}_F \varphi = \{\lambda_1, \dots, \lambda_r\}$. Потому идеальный спектр можно рассматривать как обобщение понятия спектра на случай, когда в минимальном многочлене есть нелинейные множители.

- Последнее утверждение можно рассматривать как обобщение утверждений 8 и 10 о том, что спектр лежит среди корней зануляющего многочлена и в точности совпадает с корнями минимального.
- Так как минимальный многочлен делит характеристический, то любой элемент идеального спектра является делителем характеристического многочлена.

На самом деле можно показать, что элементы идеального спектра – это в точности делители характеристического многочлена. Но я не буду вас мучить доказательством этого утверждения нашими методами.

Давайте я намекну про правильный способ. Пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – некоторый оператор над полем F и пусть $f_{\min} = p_1^{k_1} \dots p_r^{k_r}$. Предположим, что многочлен χ_φ имеет неприводимый делитель p отличный от всех p_i . Пусть \bar{F} – алгебраическое замыкание F . Тогда можно заменить оператор φ на его версию над \bar{F} , а именно $\varphi_{\bar{F}}: V_{\bar{F}} \rightarrow V_{\bar{F}}$, у которого будет тот же минимальный и характеристический многочлен. Например, это можно сделать, выбрав базис в V , оно превращается в F^n , потом взять $V_{\bar{F}} = \bar{F}^n$ и в нем задать $\varphi_{\bar{F}}$ той же матрицей, что и φ . Характеристический многочлен не изменится, потому что матрица та же самая, но надо пояснить, почему минимальный многочлен не изменится. В этом случае есть общая конструкция для $V_{\bar{F}}$, которая определяется так, что неизменность минимального многочлена будет очевидна (можно и руками показать, выбрав базис \bar{F} как векторного пространства над F). После чего мы видим, что f_{\min} и χ_φ имеют одни и те же корни в \bar{F} , то есть p имеет общий корень с каким-то p_i . Но это не возможно. Действительно, в силу их взаимной простоты, мы имеем $1 = u(t)p(t) + v(t)p_i(t)$. И если у них есть общий корень, то после подстановки его в равенство, справа будет ноль, а слева – единица. На этом победа.⁹⁵

Утверждение 115 (БД). Пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – некоторый оператор над произвольным полем F . Тогда $p \in \text{spes}_F^I \varphi$ тогда и только тогда, когда p делит χ_φ .

10.5 Обобщение собственных и корневых подпространств

Определение 116. Пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор над произвольным полем и $p \in \text{spes}_F^I \varphi$. Тогда определим корневое подпространство как:

$$V^p = \{v \in V \mid \exists k: p^k(\varphi)v = 0\} = \bigcup_{k \geq 0} \ker p^k(\varphi)$$

и собственное подпространство

$$V_p = \{v \in V \mid p(\varphi)v = 0\} = \ker p(\varphi)$$

⁹⁵В курсе алгебры вам расскажут как для любого поля F и любого многочлена $g \in F[t]$ построить большее поле $L \supseteq F$ такое, что в нем g раскладывается на линейные множители. Как мы видим из доказательства, этого нам достаточно. Остается аккуратно объяснить, почему не изменится минимальный многочлен и вы будете готовы доказать этот факт.

Замечания

- В силу леммы о стабилизации $V^p = \ker p^k(\varphi)$ для некоторого достаточно большого $k \leq \dim_F V$.
- Это определение является обобщением корневого и собственного подпространства на случай идеального спектра. Действительно, если $\lambda \in \text{spes}_F \varphi$, то в идеальном спектре ему соответствует $p(t) = t - \lambda$. Тогда определения превращаются в те же самые, что были даны в предыдущих разделах.

10.6 Теоремы о разложении

Утверждение 117. Пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор над полем F и пусть $p, q \in F[t]$ – два взаимно простых многочлена. Тогда

1. $\ker p(\varphi) \cap \ker q(\varphi) = 0$.
2. Оператор $p(\varphi)|_{\ker q(\varphi)}$ существует и обратим.

Доказательство. (1) Из того, что многочлены p и q взаимнопросты, по расширенному алгоритму Евклида, найдутся многочлены $u, v \in F[t]$ такие, что $1 = u(t)p(t) + v(t)q(t)$. Пусть теперь w – вектор из пересечения, тогда

$$w = u(\varphi)p(\varphi)w + v(\varphi)q(\varphi)w = 0$$

(2) Так как операторы $p(\varphi)$ и $q(\varphi)$ коммутируют, то ядро $q(\varphi)$ инвариантно относительно $p(\varphi)$ по утверждению 96. А значит существует оператор ограничения. Так как для операторов обратимость равносильна инъективности (утверждение 94), то нам достаточно показать, что $\ker q(\varphi)|_{\ker p(\varphi)} = 0$. Но $\ker q(\varphi)|_{\ker p(\varphi)} = \ker q(\varphi) \cap \ker p(\varphi) = 0$. \square

Утверждение 118. Пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор над полем F , $f \in F[t]$ зануляющий многочлен такой, что $f = pq \in F[t]$, где $(p, q) = 1$. Тогда

1. $\ker p(\varphi) = \text{Im } q(\varphi)$.
2. $\ker q(\varphi) = \text{Im } p(\varphi)$.
3. $V = \ker p(\varphi) \oplus \ker q(\varphi)$.
4. Для любого φ инвариантного подпространства $U \subseteq V$ выполнены равенства

$$U = U \cap \ker p(\varphi) \oplus U \cap \ker q(\varphi) = \pi_1(U) \oplus \pi_2(U)$$

где $\pi_1: V \rightarrow V$ – проектор на $\ker p(\varphi)$ вдоль $\ker q(\varphi)$, то есть для вектора $v = u + w$, где $u \in \ker p(\varphi)$ и $w \in \ker q(\varphi)$, имеем $\pi_1(v) = u$. Аналогично, $\pi_2: V \rightarrow V$ – проектор на $\ker q(\varphi)$ вдоль $\ker p(\varphi)$.

5. Если f – минимальный многочлен для φ , то многочлен p будет минимальным для оператора $\varphi|_{\ker p(\varphi)}$.

Доказательство. В начале сделаем некие общие подготовительные работы. Из того, что многочлены p и q взаимнопросты, по расширенному алгоритму Евклида, найдутся многочлены $u, v \in F[t]$ такие, что $1 = u(t)p(t) + v(t)q(t)$. Подставим в это равенство и в f оператор φ , получим два равенства

$$\begin{aligned} \text{Id} &= u(\varphi)p(\varphi) + v(\varphi)q(\varphi) \\ 0 &= p(\varphi)q(\varphi) \end{aligned}$$

- (1) и (2). Так как утверждения (1) и (2) симметричны, то достаточно доказать одно из них.

В начале покажем, что $\text{Im } q(\varphi) \subseteq \ker p(\varphi)$. Так как $p(\varphi)q(\varphi) = 0$, то для любого $w \in V$ верно, что $p(\varphi)q(\varphi)w = 0$, но это означает, что $q(\varphi)w \in \ker p(\varphi)$, то есть $\text{Im } q(\varphi) \subseteq \ker p(\varphi)$.

Наоборот, возьмем $w \in \ker p(\varphi)$ и применим к нему первое операторное равенство, получим

$$w = u(\varphi)p(\varphi)w + v(\varphi)q(\varphi)w = v(\varphi)q(\varphi)w = q(\varphi)v(\varphi)w \in \text{Im } q(\varphi)$$

(3) Из взаимной простоты p и q следует, что $\ker p(\varphi) \cap \ker q(\varphi) = 0$ по утверждению 117. Значит сумма этих под пространств прямая, то есть $\ker p(\varphi) \oplus \ker q(\varphi) \subseteq V$. Чтобы показать равенство, возьмем произвольный $w \in V$ и рассмотрим

$$w = u(\varphi)p(\varphi)w + v(\varphi)q(\varphi)w = p(\varphi)u(\varphi)w + q(\varphi)v(\varphi)w \in \text{Im } p(\varphi) + \text{Im } q(\varphi) = \ker q(\varphi) + \ker p(\varphi)$$

Здесь последнее равенство выполнено в силу предыдущих двух пунктов.

(4) Пусть $U \subseteq V$ инвариантное подпространство. Тогда $U \cap \ker p(\varphi) \subseteq U$ и $U \cap \ker q(\varphi) \subseteq U$, а значит и их сумма лежит в U . С другой стороны, так как $\ker p(\varphi)$ и $\ker q(\varphi)$ пересекаются по нулю, то и подпространства $U \cap \ker p(\varphi)$ и $U \cap \ker q(\varphi)$ тоже пересекаются по нулю. А значит они образуют прямую сумму внутри U , то есть $U \supseteq U \cap \ker p(\varphi) \oplus U \cap \ker q(\varphi)$. Осталось доказать, обратное включение. Пусть $w \in U$, тогда

$$w = v(\varphi)q(\varphi)w + u(\varphi)p(\varphi)w$$

Так как U было инвариантным и $w \in U$, то $v(\varphi)q(\varphi)w \in U$. С другой стороны,

$$p(\varphi)v(\varphi)q(\varphi)w = v(\varphi)p(\varphi)q(\varphi)w = 0$$

А значит, $v(\varphi)q(\varphi)w \in \ker p(\varphi)$. Таким образом, мы проверили, что первое слагаемое лежит в $U \cap \ker p(\varphi)$. Аналогично проверяется включение для второго слагаемого.

Теперь мы знаем, что любое инвариантное $U \subseteq V$ имеет вид $U = U_1 \oplus U_2$, где $U_1 = U \cap \ker p(\varphi)$ и $U_2 = U \cap \ker q(\varphi)$. Давайте применим π_1 к U . По определению

$$\pi_1(U) = \pi_1(U_1 + U_2) = \pi_1(U_1) = U_1.$$

Аналогично $\pi_2(U) = U_2$. А значит $U = U_1 \oplus U_2 = \pi_1(U) \oplus \pi_2(U)$, то есть мы доказали второе равенство.

(5) Теперь мы считаем, что $f = f_{\min}$ для φ на V . Заметим, что

$$p(\varphi|_{\ker p(\varphi)}) = p(\varphi)|_{\ker p(\varphi)} = 0$$

Значит p зануляет $\varphi|_{\ker p(\varphi)}$. Так как минимальный многочлен обязательно делит p , то нам надо показать, что никакой делитель p отличный от p не зануляет $\varphi|_{\ker p(\varphi)}$. Предположим противное, пусть $p_0|p$ и $p_0(\varphi|_{\ker p(\varphi)}) = 0$. Тогда рассмотрим многочлен $g = p_0q$ и покажем, что $g(\varphi) = 0$. Так как $V = \ker p(\varphi) \oplus \ker q(\varphi)$, то нам достаточно показать, что $g(\varphi)$ действует нулем на любом векторе из $\ker p(\varphi)$ и на любом векторе из $\ker q(\varphi)$. Но на $\ker q(\varphi)$ нулем действует $q(\varphi)$, а $g(\varphi) = p_0(\varphi)q(\varphi)$. А на $\ker p(\varphi)$ оператор $p_0(\varphi)$ действует нулем по выбору p_0 , а значит и $g(\varphi) = q(\varphi)p_0(\varphi)$ действует нулем. То есть многочлен g зануляет φ и имеет степень меньше, чем f_{\min} , противоречие. □

Утверждение 119. Пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор, f_{\min} – его минимальный многочлен. Пусть

$$f_{\min} = p_1^{k_1} \dots p_r^{k_r}$$

разложение минимального в неприводимые многочлены. Тогда

1. $V^{p_i} = \ker p_i^{k_i}(\varphi)$ причем k_i – минимальное такое k для которого выполнено равенство $V^{p_i} = \ker p_i^k(\varphi)$.
2. $V = V^{p_1} \oplus \dots \oplus V^{p_r}$.
3. Любое инвариантное подпространство $U \subseteq V$ имеет вид $U = U_1 \oplus \dots \oplus U_r$, где $U_i \subseteq V^{p_i}$ – произвольные инвариантные подпространства.

Доказательство. 1) В начале покажем, что $V^{p_i} = \ker p_i^{k_i}(\varphi)$, а уже потом, что k_i минимально.

Не умаляя общности можно считать, что $i = 1$. Тогда сгруппируем множители минимального многочлена следующим образом $f_{\min} = p_1^{k_1}g$. Так как минимальный многочлен – зануляющий, то $p_1^{k_1}(\varphi)g(\varphi) = 0$ на всем пространстве V , а значит и на подпространстве V^{p_1} . Тогда утверждение 117, примененное для многочленов p_1^d и g , означает, что оператор $g(\varphi)$ будет обратим на пространстве V^{p_1} . А значит можно в равенстве $p_1^{k_1}(\varphi)g(\varphi) = 0$ сократить на $g(\varphi)$ и получить, что $p_1^{k_1}(\varphi) = 0$ на V^{p_1} . То есть $V^{p_1} \subseteq \ker p_1^{k_1}(\varphi)$. Обратное вложение следует из определения V^{p_i} .

Теперь покажем, что k_1 – это минимальная степень d такая, что $V^{p_1} = \ker p_1^d(\varphi)$. Нам нужно показать, что на подпространстве V^{p_1} многочлен $p_1^{k_1}$ является минимальным для оператора φ . Из утверждения 118 пункт (5) следует, что $p_1^{k_1}$ является минимальным для φ на подпространстве $\ker p_1^{k_1}(\varphi)$. Но последнее по только что доказанному совпадает с V^{p_1} .

С другой стороны, по утверждению 118 пункт (5) $p_1^{k_1}$ будет минимальным многочленом для φ ограниченного на $\ker p_1^{k_1}(\varphi) = V^{p_1}$. А значит, никакая меньшая степень $p_1^d(\varphi)$ не зануляется на V^{p_1} . А значит $d \geq k_1$.

2) Сгруппируем множители f_{\min} следующим образом

$$f_{\min} = \underbrace{p_1^{k_1}}_p \underbrace{p_2^{k_2} \cdots p_r^{k_r}}_q$$

Тогда, p и q взаимно просты и по утверждению 118 пункт (3) мы можем разложить V в прямую сумму

$$V = \ker p(\varphi) \oplus \ker q(\varphi) = \ker p_1^{k_1}(\varphi) \oplus V_1$$

где $V_1 = \ker q(\varphi)$. При этом минимальный многочлен оператора $\varphi_1 = \varphi|_{\ker q(\varphi)}$ есть q (утверждение 117). Тогда продолжая по индукции для оператора φ_1 в пространстве V_1 , мы можем считать, что

$$V = \ker p_1^{k_1}(\varphi) \oplus \dots \oplus \ker p_r^{k_r}(\varphi)$$

Теперь осталось показать, что $\ker p_i^{k_i}(\varphi) = V^{p_i}$, но это следует из предыдущего пункта.

3) Это непосредственно следует из утверждения 118 пункт (4) индукцией по количеству прямых слагаемых. \square

10.7 Геометрический смысл кратности корней минимального и характеристического многочлена

Утверждение 120. Пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор и $\lambda \in \text{спес}_F \varphi$. Пусть число k выбрано так, что

$$\ker(\varphi - \lambda \text{Id})^{k-1} \neq \ker(\varphi - \lambda \text{Id})^k = \ker(\varphi - \lambda \text{Id})^{k+1}$$

Тогда

1. Число k – это кратность λ в минимальном многочлене оператора φ .
2. Число $\dim \ker(\varphi - \lambda \text{Id})^k = \dim V^\lambda$ – это кратность корня λ в характеристическом многочлене оператора φ .

Доказательство. (1) Это частный случай утверждения 119 пункт (1) для $p_1(x) = x - \lambda$.

(2) Пусть $f_{\min} = (x - \lambda)^k g(x)$ – минимальный многочлен для φ на V . Тогда пользуясь утверждением 118 пункт (3) и предыдущим пунктом этого утверждения, мы видим, что $V = V^\lambda \oplus \ker g(\varphi)$. Теперь давайте посчитаем характеристический многочлен для φ . По утверждению 109 $\chi_\varphi(t)$ есть произведение $\chi_{\varphi|_{V^\lambda}}$ и $\chi_{\varphi|_{\ker g(\varphi)}}$. Утверждение 112 гласит, что $\chi_{\varphi|_{V^\lambda}}(t) = (t - \lambda)^{\dim V^\lambda}$. А утверждение 117 пункт (2), что $\varphi - \lambda \text{Id}$ обратим на $\ker g(\varphi)$. Значит, оператор $\varphi|_{\ker g(\varphi)}$ не содержит λ в своем спектре, а значит λ не корень $\chi_{\varphi|_{\ker g(\varphi)}}$. Это завершает доказательство. \square

10.8 Минимальные инвариантные

Пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – некоторый оператор и $p \in \text{спес}_F^I \varphi$. В этом случае подпространство $V_p = \ker p(\varphi)$ не нулевое. Более того, по определению оператор $p(\varphi)$ равен нулю на этом подпространстве, а значит p зануляет $\varphi|_{V_p}$. В частности минимальный многочлен $\varphi|_{V_p}$ должен делить p . Но так как p неприводим, то единственный вариант – минимальный многочлен совпадает с p . Аналогично, если $U \subseteq V_p$ произвольное ненулевое инвариантное подпространство, то минимальный многочлен φ_U будет p по тем же самым соображениям. Мы знаем, что в случае обычного спектра собственное подпространство V_λ состоит из инвариантных прямых, на которых φ действует растяжением в λ раз. В случае V_p все подпространство состоит из одинаковых инвариантных кусочков, которые уже не являются прямыми. Давайте опишем как эти инвариантные подпространства выглядят.

Утверждение 121. Пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – некоторый оператор и $p \in \text{спес}_F^I \varphi$ и при этом $m = \deg p$. И пусть $v \in V_p$ – произвольный ненулевой вектор. Тогда $v, \varphi v, \dots, \varphi^{m-1}v$ линейно независимы и их линейная оболочка будет минимальным инвариантным подпространством содержащим v .

Доказательство. Давайте рассмотрим линейную оболочку

$$U = \langle v, \varphi v, \varphi^2 v, \dots, \varphi^k v, \dots \rangle$$

По построению ясно, что это инвариантное подпространство содержащее v . Кроме того, если какое-то инвариантное подпространство W содержит v , то оно обязано содержать φv . А значит обязано содержать $\varphi^2 v$ и так далее. То есть оно содержит U . Таким образом U является наименьшим инвариантным подпространством содержащим v .

Теперь рассмотрим элемент $p = t^m + a_{m-1}t^{m-1} + \dots + a_1t + a_0$. Подставим в него φ и получим ноль, то есть

$$0 = p(\varphi) = \varphi^m + a_{m-1}\varphi^{m-1} + \dots + a_1\varphi + a_0 \text{Id}$$

Теперь применим это равенство к вектору v , получим

$$\varphi^m v + a_{m-1}\varphi^{m-1}v + \dots + a_1\varphi v + a_0v = 0$$

А значит $\varphi^m v$ выражается через $\varphi^k v$, где $k < m$. Умножая это равенство на φ^N мы видим, что при $N \geq m$, $\varphi^N v$ выражается через $\varphi^k v$, где $k < N$. Следовательно подпространство U порождается векторами $v, \varphi v, \dots, \varphi^{m-1}v$.

Теперь покажем, что эти векторы линейно независимы. Предположим противное, то есть найдется система коэффициентов $\alpha_0, \dots, \alpha_{m-1}$ такая, что

$$\alpha_0 v + \alpha_1 \varphi v + \dots + \alpha_{m-1} \varphi^{m-1} v = 0$$

Если мы положим $q(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t + \dots + \alpha_{m-1} t^{m-1}$, то это означает, что $q(\varphi)v = 0$. Так как $q(\varphi)$ и φ^k коммутируют для любого k , то $q(\varphi)\varphi^k v = \varphi^k q(\varphi)v = 0$ для любого k . А это значит, что q зануляет $\varphi|_U$. Но по замечанию перед утверждением мы знаем, что минимальный многочлен для $\varphi|_U$ должен быть p . А значит p делит q и так как $\deg q < \deg p$, такое возможно только если $q = 0$. То есть если все $\alpha_i = 0$, что и требовалось. \square

Таким образом в случае $\lambda \in \text{spec}_F \varphi$ ему соответствует линейный многочлен $t - \lambda \in \text{spec}_F^I \varphi$. А значит линейному многочлену соответствуют одномерные инвариантные подпространства в V_λ . В случае если элемент идеального спектра p имеет степень больше единицы, то V_p содержит инвариантные размерности $\deg p$. На самом деле можно показать, что все такие инвариантные подпространства внутри V_p «одинаковые» в некотором смысле и все V_p есть их прямая сумма.

10.9 Структура векторного пространства с оператором

Изучение структуры матрицы линейного оператора в некотором базисе равносильна изучению инвариантных подпространств пространства V . Теорема о жордановой нормальной форме может рассматриваться таким образом как структурная теорема для векторного пространства с оператором. В общем виде теорема о жордановой нормальной форме доказывается в два шага: все пространство раскладывается в прямую сумму корневых, после чего задача сводится к нильпотентному оператору. Первый шаг мы уже на самом деле проделали в утверждении 119.

Утверждение 122. Пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор такой, что его характеристический (или минимальный) многочлен раскладывается на линейные множители. Тогда $V = V^{\lambda_1} \oplus \dots \oplus V^{\lambda_r}$, где $\text{spec}_F \varphi = \{\lambda_1, \dots, \lambda_r\}$.

Доказательство. Это частный случай утверждения 119. \square

Замечание Давайте объясним, что мы доказали на данный момент. Пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – некоторый линейный оператор, у которого характеристический многочлен раскладывается на линейные множители. Тогда $V = V^{\lambda_1} \oplus \dots \oplus V^{\lambda_r}$. Выберем базис e_i в каждом V^{λ_i} . Тогда по одному из определений прямой суммы $e = e_1 \sqcup \dots \sqcup e_r$ будет базисом V . Так как все V^{λ_i} инвариантны относительно φ , то когда мы запишем его матрицу в этом базисе, мы получим блочно диагональную матрицу вида

$$A_\varphi = \begin{pmatrix} A_1 & & & \\ & A_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & A_r \end{pmatrix}$$

где A_i – это матрица ограничения $\varphi|_{V^{\lambda_i}}$, то есть ее размер равен $\dim V^{\lambda_i}$. Кроме того, из утверждения 111 следует, что в каждом V^{λ_i} можно найти такой базис, что матрица A_i будет верхней треугольной с числом λ_i на диагонали, то есть

$$A_i = \begin{pmatrix} \lambda_i & * & \dots & * \\ & \lambda_i & \dots & * \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & \lambda_i \end{pmatrix}$$

Наша цель еще улучшить вид матриц A_i . Оказывается, почти все элементы верхнего блока можно сделать нулевыми. Что это в точности означает и как доказывается, вы узнаете в теореме о жордановой нормальной форме.

10.10 Отношение равенства по модулю подпространства

Определение 123. Пусть V – векторное пространство, а $U \subseteq V$ – подпространство. Тогда будем говорить, что векторы $v, w \in V$ равны по модулю U и писать $v = w \pmod{U}$, если $v - w \in U$.⁹⁶

Например, если $V = \mathbb{R}^2$ – плоскость и $U = \langle e_1 \rangle$ – горизонтальная прямая, то все векторы лежащие на горизонтальных прямых между собой равны по модулю U . Например, $e_2 = e_2 + e_1 = e_2 - 3e_1 \pmod{U}$. Но $e_2 \neq 2e_2 \pmod{U}$.

Заметим, что обычное равенство – это равенство по модулю нулевого подпространства. С другой стороны, по модулю подпространства $U = V$ любые два вектора равны.

Определение 124. Пусть V – векторное пространство, $U \subseteq V$ – некоторое подпространство, и $v_1, \dots, v_n \in V$ – набор векторов.

1. Будем говорить, что v_1, \dots, v_n линейно независимы по модулю U , если из равенства $\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n = 0 \pmod{U}$ следует, что $\alpha_1 = \dots = \alpha_n = 0$.
2. Будем говорить, что v_1, \dots, v_n порождающие по модулю U , если для любого вектора $v \in V$ найдутся коэффициенты $\alpha_1, \dots, \alpha_n \in F$ такие, что $v = \alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n \pmod{U}$.
3. Будем говорить, что v_1, \dots, v_n являются базисом V по модулю U , если они одновременно линейно независимы и порождающие по модулю U .⁹⁷

Утверждение 125. Пусть V – векторное пространство, $U \subseteq V$ – подпространство, и $v_1, \dots, v_n \in V$ – набор векторов. Тогда

1. Векторы v_1, \dots, v_n линейно независимы по модулю U тогда и только тогда, когда они линейно независимы и $\langle v_1, \dots, v_n \rangle \cap U = 0$.
2. Векторы v_1, \dots, v_n порождающие по модулю U тогда и только тогда, когда $\langle v_1, \dots, v_n \rangle + U = V$.
3. Векторы v_1, \dots, v_n являются базисом по модулю U тогда и только тогда, когда они линейно независимы и $\langle v_1, \dots, v_n \rangle \oplus U = V$.

Доказательство. (1) \Rightarrow Пусть $\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n = 0$, тогда $\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n \in U$. Последнее означает, что $\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n = 0 \pmod{U}$. А значит все $\alpha_i = 0$. Значит v_i линейно независимы. Теперь рассмотрим вектор $v \in \langle v_1, \dots, v_n \rangle \cap U$. Так как v лежит в первом подпространстве, то $v = \alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n$. Так как он лежит в правом подпространстве, то $\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n = v \in U$. Значит $\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n = 0 \pmod{U}$. А следовательно все $\alpha_i = 0$. Но значит и $v = 0$, что и требовалось.

\Leftarrow Пусть $\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n = 0 \pmod{U}$. Это значит, что $\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n \in U$. А значит $\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n \in \langle v_1, \dots, v_n \rangle \cap U = 0$. То есть $\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n = 0$. Но так как v_i линейно независимы, то $\alpha_i = 0$ для всех i .

(2) \Rightarrow По определению, для любого $v \in V$ найдутся коэффициенты α_i такие, что $v = \alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n \pmod{U}$. То есть $v - (\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n) = u \in U$. Значит, $v = \alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n + u$, что и требовалось.

\Leftarrow Пусть $v \in V = \langle v_1, \dots, v_n \rangle + U$. Тогда $v = \alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n + u$. По определению это означает, что $v = \alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n \pmod{U}$.

(3) Этот пункт получается из первых двух вместе взятых. \square

⁹⁶На самом деле равенство по модулю подпространства сводится к равенству в некотором новом пространстве, которое называется фактор пространством. Так как мы пока не знаем, что это такое, будем пользоваться лишь отношением равенства по модулю. Думать про него надо так же, как и про остатки в целых числах.

⁹⁷Так как равенство по модулю сводится к равенству в некотором новом пространстве, то все факты про базис аналогичные обычным фактам, что мы доказывали будут верны. Вам же я предлагаю доказать их по аналогии в качестве упражнения.

10.11 Жорданова нормальная форма для нильпотентных операторов

Определение 126. Матрица

$$J_n(\lambda) = \begin{pmatrix} \lambda & 1 & & \\ & \lambda & 1 & \\ & & \ddots & \ddots \\ & & & \lambda & 1 \\ & & & & \lambda \end{pmatrix} \in M_n(F)$$

называется жордановой клеткой размера n . Если матрица A блочно диагональная, где на диагонали стоят жордановы клетки

$$A = \begin{pmatrix} J_{n_1}(\lambda_1) & & \\ & J_{n_2}(\lambda_2) & \\ & & \ddots \\ & & & J_{n_r}(\lambda_r) \end{pmatrix} \in M_{n_1+\dots+n_r}(F)$$

то говорят, что A имеет жорданову нормальную форму.

Рассмотрим оператор $\phi: F^n \rightarrow F^n$, по правилу $x \mapsto J_n(0)x$. Если e_1, \dots, e_n – стандартный базис в F^n , то мы видим, что

$$0 \xleftarrow{\phi} e_1 \xleftarrow{\phi} e_2 \xleftarrow{\phi} \dots \xleftarrow{\phi} e_{n-1} \xleftarrow{\phi} e_n$$

Наоборот, пусть у нас нашелся базис для оператора $\phi: V \rightarrow V$ с таким свойством. Тогда метод пристального взгляда нам подсказывает, что его матрица в этом базисе будет $J_n(0)$. Таким образом мы описали на геометрическом языке как понять, что в некотором базисе матрица оператора задана жордановой клеткой с нулем на диагонали.

Утверждение 127. Пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – некоторый оператор и $v_1, \dots, v_r \in \ker \varphi^{k+1}$ линейно независимы по модулю $\ker \varphi^k$. Тогда векторы $\varphi v_1, \dots, \varphi v_r$ лежат в $\ker \varphi^k$ и при $k \geq 1$ ⁹⁸ они линейно независимы по модулю $\ker \varphi^{k-1}$.

Доказательство. Тот факт что $\varphi v_i \in \ker \varphi^k$ следует из того, что они зануляются оператором φ^k . Теперь покажем, что они линейно независимы по модулю $\ker \varphi^{k-1}$. Пусть

$$\alpha_1 \varphi v_1 + \dots + \alpha_r \varphi v_r = 0 \pmod{\ker \varphi^{k-1}}$$

Тогда

$$\begin{aligned} \varphi(\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_r v_r) &\in \ker \varphi^{k-1} \Rightarrow \\ \varphi^k(\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_r v_r) &= 0 \Rightarrow \\ \alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_r v_r &\in \ker \varphi^k \Rightarrow \\ \alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_r v_r &= 0 \pmod{\ker \varphi^k} \end{aligned}$$

Значит все $\alpha_i = 0$, что и требовалось. □

Утверждение 128 (ЖНФ для нильпотентов). Пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – нильпотентный оператор. Тогда

1. Для оператора φ существует жорданов базис, то есть в некотором базисе матрица φ имеет вид

$$A_\varphi = \begin{pmatrix} J_{n_1}(0) & & \\ & J_{n_2}(0) & \\ & & \ddots \\ & & & J_{n_r}(0) \end{pmatrix}$$

2. Количество клеток размера r вычисляется по формуле

$$2 \dim \ker \varphi^r - \dim \ker \varphi^{r+1} - \dim \ker \varphi^{r-1}$$

Так как эти числа не зависят от базиса, то в любом жордановом базисе количество клеток размера r одинаковое. А значит жордановы формы в разных базисах могут отличаться лишь перестановкой клеток.

⁹⁸При $k = 0$ все векторы $\varphi v_i = 0$. Формально доказательство не работает, так как при $k = 0$ не определено $\ker \varphi^{0-1}$.

Доказательство. (1) Пусть $\varphi^k = 0$, причем k – наименьшее возможное. Для того, чтобы доказать теорему, мне надо найти базис в пространстве $V = \ker \varphi^k$, состоящий из цепочек вида:

$$0 \xleftarrow{\varphi} e_1 \xleftarrow{\varphi} e_2 \xleftarrow{\varphi} \dots \xleftarrow{\varphi} e_{n-1} \xleftarrow{\varphi} e_n$$

Каждая такая цепочка будет давать одну клетку размера n . Так как вектор e_n в такой цепочке имеет высоту n его надо искать в $\ker \varphi^n \setminus \ker \varphi^{n-1}$. Значит, чтобы получить самые длинные цепочки я должен как-то выбрать векторы v_1, \dots, v_r в $\ker \varphi^k \setminus \ker \varphi^{k-1}$. При этом, я хочу, чтобы все векторы вида $\varphi^i v_j$ были между собой линейно независимы. То есть выбирать надо аккуратно. Для этого мне и понадобится понятие линейной независимости по модулю подпространства. Итак, приступим.

Возьмем $v_1, \dots, v_{r_1} \in \ker \varphi^k$ – базис $\ker \varphi^k$ по модулю $\ker \varphi^{k-1}$. Последнее означает, что $\ker \varphi^k = \langle v_1, \dots, v_{r_1} \rangle \oplus \ker \varphi^{k-1}$. Из утверждения 127 следует, что векторы $\varphi v_1, \dots, \varphi v_{r_1}$ лежат в $\ker \varphi^{k-1}$ и линейно независимы по модулю $\ker \varphi^{k-2}$.⁹⁹ Значит их можно дополнить до базиса пространства $\ker \varphi^{k-1}$ по модулю подпространства $\ker \varphi^{k-2}$ векторами $v_{r_1+1}, \dots, v_{r_2}$. Данный процесс можно изобразить на следующей диаграмме:

$$\begin{array}{ccccccc} \ker \varphi^k & & v_1 & & \dots & & v_{r_1} \\ \cup & & \downarrow & & & & \downarrow \\ \ker \varphi^{k-1} & & \varphi v_1 & & \dots & & \varphi v_{r_1} & & v_{r_1+1} & & \dots & & v_{r_2} \end{array}$$

Кроме того, проделанное означает, что

$$\begin{aligned} \ker \varphi^k &= \langle v_1, \dots, v_{r_1} \rangle \oplus \ker \varphi^{k-1} \\ \ker \varphi^{k-1} &= \langle \varphi v_1, \dots, \varphi v_{r_1} \rangle \oplus \langle v_{r_1+1}, \dots, v_{r_2} \rangle \oplus \ker \varphi^{k-2} \end{aligned}$$

Мы можем продолжать этот процесс далее. Он остановится, когда мы дойдем до $\ker \varphi$, так как следующее подпространство будет уже нулевым. Весь процесс можно изобразить на следующей диаграмме (здесь я векторы обозначил точками, чтобы не загромождать обозначения):



Кроме того, мы будем иметь равенства вида:

$$\ker \varphi^{k-s} = \langle \varphi^s v_1, \dots, \varphi^s v_{r_1} \rangle \oplus \langle \varphi^{s-1} v_{r_1+1}, \dots, \varphi^{s-1} v_{r_2} \rangle \oplus \dots \oplus \langle v_{r_s+1}, \dots, v_{r_{s+1}} \rangle \oplus \ker \varphi^{k-s-1}$$

То есть все векторы расположенные в заштрихованных прямоугольниках на диаграмме выше являются линейно независимыми между собой и со всеми векторами, которые лежат ниже них. Значит все построенные вектора (точки на диаграмме выше) являются базисом пространства $\ker \varphi^k = V$. А это то, что и надо было сделать.

(2) Теперь нам надо доказать формулу для количества клеток. Для этого предлагается сделать так: выберем произвольную жорданову нормальную форму для оператора, для нее посчитаем количество клеток фиксированного размера и поймем, что оно задается нужной формулой. Пусть e_1, \dots, e_n – жорданов базис и

⁹⁹Либо, что $k = 1$, то есть $V = \ker \varphi$, а значит $\varphi = 0$ и доказывать нечего.

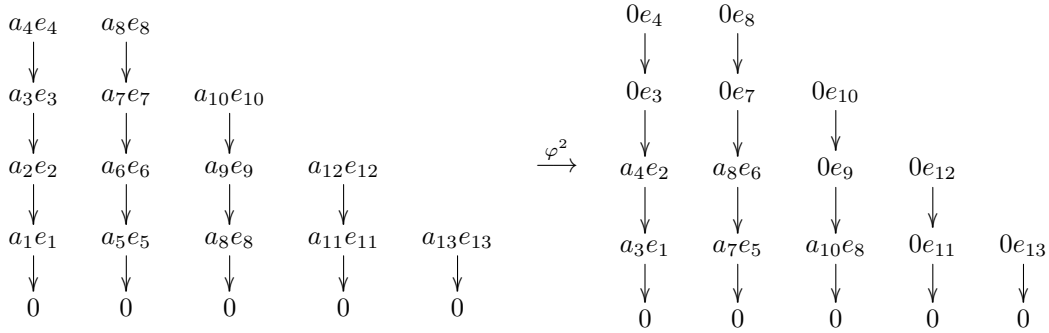
пусть матрица оператора имеет вид

$$A = \begin{pmatrix} J_{k_1}(0) & & & \\ & J_{k_2}(0) & & \\ & & \ddots & \\ & & & J_{k_s}(0) \end{pmatrix}$$

Переставив базисные векторы, мы можем считать, что $k_1 \geq k_2 \geq \dots \geq k_s$. Тогда мы можем расположить базисные векторы в виде диаграммы



где мы ставим вектора e_1, e_2, \dots, e_n снизу вверх и слева направо, а стрелочки означают применение оператора φ . Теперь мы знаем, что все эти векторы линейно независимы, но вообще говоря не понятно, как они связаны с ядрами. Давайте покажем, что нижние r слоев дают базис $\ker \varphi^r$. Действительно, рассмотрим произвольный вектор $v = a_1 e_1 + \dots + a_n e_n$ из $\ker \varphi^r$. Это значит, что $\varphi^r(v) = 0$. Давайте мысленно расставим коэффициенты a_i в диаграмме выше рядом с соответствующим e_i . При применении φ каждый базисный вектор спустится на ярус ниже, а вектора нижнего яруса занулятся. Это значит, что под действием φ^r нижние r ярусов занулятся, а вектора с ярусов $r+1, \dots, k$ перейдут на ярусы $1, \dots, k-r$. Давайте изобразим это безобразия на следующем примере.¹⁰⁰



Как мы видим, остаются слагаемые вида коэффициент на какой-то базисный вектор. Чтобы результат был нулем, надо чтобы все коэффициенты оставшиеся справа на диаграмме были нулевыми. В данном примере, это означает, что на левой диаграмме верхние два слоя были нулями, то есть линейная комбинация принадлежит нижним двум слоям. В общем случае ситуация такая же, ядро φ^r будет порождено первыми r слоями снизу.

Теперь нам надо посчитать количество клеток размера r в жордановой форме. Это соответствует тому, чтобы посчитать количество цепочек длины r на большой диаграмме выше. То есть нам надо посчитать количество векторов обведенных в овальную рамку в r -ой строке. В начале посчитаем количество векторов в заштрихованной рамке на каждом этаже. Так как $\ker \varphi^r$ порожден всеми векторами на слое r и ниже, то в r -ой строке количество векторов в заштрихованной рамке равно $\dim \ker \varphi^r - \dim \ker \varphi^{r-1}$. Тогда количество векторов в овальной рамке на этаже r равно количеству векторов в заштрихованной рамке на этаже r минус

¹⁰⁰Здесь имеется в виду, что надо взять сумму всех указанных на диаграмме слагаемых. Слева стоит исходная линейная комбинация $v = a_1 e_1 + \dots + a_{13} e_{13}$, а справа результат применения к нему φ^2 , то есть $\varphi^2 v$.

количество векторов в заштрихованной рамке на этаже $r + 1$. Значит, искомое количество клеток размера r равно:

$$(\dim \ker \varphi^r - \dim \ker \varphi^{r-1}) - (\dim \ker \varphi^{r+1} - \dim \ker \varphi^r) = 2 \dim \ker \varphi^r - \dim \ker \varphi^{r+1} - \dim \ker \varphi^{r-1}$$

□

Замечания Отметим специальный вид для количества клеток максимального и минимального размеров и сделаем еще пару замечаний.

- Максимальный размер $r = k$. Тогда как мы видим, количество клеток равно

$$\dim \ker \varphi^k - \dim \ker \varphi^{k-1} = \dim V - \dim \ker \varphi^{k-1} = \dim \operatorname{Im} \varphi^{k-1}$$

То есть ранг последней ненулевой степени оператора φ – это количество клеток максимальной размерности.

- Минимальный размер $r = 1$. Тогда $\ker \varphi^{r-1} = 0$. Значит, количество клеток размера 1, то есть, количество отдельно стоящих нулей в жордановой форме будет

$$2 \dim \ker \varphi - \dim \ker \varphi^2$$

Обратите внимание на то, что это НЕ размерность ядра.

- Размерность ядра $\dim \ker \varphi$ – это количество всех клеток всевозможных размеров.
- Максимальный размер клетки – это степень минимального многочлена для φ или что то же самое – кратность его единственного корня 0.

10.12 Теорема о жордановой нормальной форме

Утверждение 129 (Теорема о жордановой нормальной форме). Пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор такой, что его характеристический (или минимальный) многочлен раскладывается на линейные множители

$$\chi_\varphi(t) = (t - \lambda_1)^{n_1} \dots (t - \lambda_r)^{n_r}$$

Тогда

1. Для оператора φ существует жорданов базис, то есть в некотором базисе матрица φ имеет вид

$$A_\varphi = \begin{pmatrix} J_{k_1}(\lambda_{i_1}) & & \\ & J_{k_2}(\lambda_{i_2}) & \\ & & \ddots \\ & & & J_{k_s}(\lambda_{i_s}) \end{pmatrix}$$

2. В любом жордановом базисе количество клеток размера m с фиксированным числом λ на диагонали одинаковое и равно

$$2 \dim \ker(\varphi - \lambda \operatorname{Id})^m - \dim \ker(\varphi - \lambda \operatorname{Id})^{m+1} - \dim \ker(\varphi - \lambda \operatorname{Id})^{m-1}$$

А значит жордановы формы в разных базисах могут отличаться лишь перестановкой клеток.

Доказательство. (1) Так как $\chi_\varphi(t)$ (или минимальный многочлен) раскладывается на линейные множители, утверждение 122 говорит, что $V = V^{\lambda_1} \oplus \dots \oplus V^{\lambda_r}$. Тогда, если мы выберем базисы в подпространствах V^{λ_i} объединим (они обязательно дадут базис V) и запишем в этом базисе матрицу φ , она будет иметь блочно диагональный вид

$$A_\varphi = \begin{pmatrix} A_1 & & & \\ & A_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & A_r \end{pmatrix}$$

где A_i – матрица $\varphi|_{V^{\lambda_i}}$. То есть, чтобы доказать теорему, нам надо в каждом V^{λ_i} выбрать жорданов базис для оператора $\varphi|_{V^{\lambda_i}}$. Теперь заметим, что базис является жордановым для некоторого оператора ϕ тогда и только тогда, когда он является жордановым для оператора $\phi - \lambda \text{Id}$ (при любом выборе λ). Потому нам надо в каждом V^{λ_i} выбрать жорданов базис для оператора $\phi_i := \varphi|_{V^{\lambda_i}} - \lambda_i \text{Id}$. Но оператор ϕ_i является нильпотентным и для него это следует из утверждения 128.

(2) Пусть теперь у нас выбран какой-нибудь жорданов базис, в котором матрица φ имеет вид

$$A_\varphi = \begin{pmatrix} A_1 & & & \\ & A_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & A_r \end{pmatrix}, \quad \text{где} \quad A_i = \begin{pmatrix} J_{k_{1i}}(\lambda_i) & & \\ & J_{k_{2i}}(\lambda_i) & \\ & & \ddots & \\ & & & J_{k_{m_i i}}(\lambda_i) \end{pmatrix}$$

Во-первых, числа λ_i на диагоналях клеток будут обязательно числами из спектра, просто потому что A_φ верхнетреугольная с этими числами на диагонали.

Во-вторых, нам надо показать, что все A_i (где A_i – это блоки в которых мы сгруппировали клетки с одним и тем же числом λ_i на диагонали) имеют одинаковый размер. Но по определению размер этих блоков – это кратность λ_i в $\chi_\varphi(t)$ или что то же самое – размерность V^{λ_i} . А сам блок A_i оказывается матрицей оператора $\varphi|_{V^{\lambda_i}}$.

В-третьих, надо показать, что внутри каждого A_i количество блоков фиксированного размера одинаковое и задано формулой

$$2 \dim \ker(\varphi - \lambda_i \text{Id})^m - \dim \ker(\varphi - \lambda_i \text{Id})^{m+1} - \dim \ker(\varphi - \lambda_i \text{Id})^{m-1}$$

Но так как A_i – это матрица оператора $\varphi|_{V^{\lambda_i}}$, а оператор $\varphi|_{V^{\lambda_i}} - \lambda_i \text{Id}$ нильпотентен и имеет те же размеры блоков, то из пункта (2) утверждения 128 следует, что нужное количество клеток задано формулой

$$2 \dim \ker(\varphi|_{V^{\lambda_i}} - \lambda_i \text{Id})^m - \dim \ker(\varphi|_{V^{\lambda_i}} - \lambda_i \text{Id})^{m+1} - \dim \ker(\varphi|_{V^{\lambda_i}} - \lambda_i \text{Id})^{m-1}$$

Теперь осталось показать, что

$$\ker(\varphi - \lambda_i \text{Id})^m = \ker(\varphi|_{V^{\lambda_i}} - \lambda_i \text{Id})^m$$

Если вспомнить определение оператора ограничения мы видим, что

$$\ker(\varphi|_{V^{\lambda_i}} - \lambda_i \text{Id})^m = V^{\lambda_i} \cap \ker(\varphi - \lambda_i \text{Id})^m$$

С другой стороны, $\ker(\varphi - \lambda_i \text{Id})^m$ является подпространством V^{λ_i} по определению, что и доказывает нужное равенство. \square

Обратите внимание, что жорданова форма для оператора единственная с точностью до перестановки блоков. Однако, жордановых базисов может быть много! Например, если $\varphi = \lambda \text{Id}$, то любой базис является жордановым, так как в любом базисе матрица оператора будет диагональной с числом λ на диагонали.

Замечания Давайте обсудим некоторые характеристики жордановых клеток в терминах исходного оператора.

- Число $\dim V^{\lambda_i}$ является суммарным размером всех клеток с заданным λ_i , то есть клеток вида $J_s(\lambda_i)$. Действительно, по построению, блок из таких клеток возникает как матрица $\varphi|_{V^{\lambda_i}}$. А размер матрицы оператора равен размерности пространства, на котором определен оператор.¹⁰¹
- Число $\dim V_{\lambda_i}$ является количеством жордановых клеток с фиксированным λ_i , то есть клеток вида $J_s(\lambda_i)$. Действительно, по определению $V_{\lambda_i} = \ker(\varphi - \lambda_i \text{Id})$. Теперь надо посчитать правую часть равенства в жордановой форме и увидеть, что его размерность равна суммарному размеру клеток с числом λ_i . Пусть A имеет жорданову форму как в предыдущем утверждении, тогда

$$A - \lambda_i E = \begin{pmatrix} A_1 - \lambda_i E & & & \\ & \ddots & & \\ & & \ddots & \\ & & & A_r - \lambda_i E \end{pmatrix}, \quad \text{где} \quad A_k - \lambda_i E = \begin{pmatrix} J_*(\lambda_k - \lambda_i) & & \\ & \ddots & \\ & & J_*(\lambda_k - \lambda_i) \end{pmatrix}$$

¹⁰¹Можно объяснить по-другому из явного вычисления с матрицей жордановой нормальной формы аналогично следующему пункту.

То есть для $k \neq i$ все блоки будут верхнетреугольными с ненулевым числом на диагонали, а значит обратимыми, а для $k = i$ блок будет вида

$$A_i - \lambda_i E = \begin{pmatrix} J_*(0) & & \\ & \ddots & \\ & & J_*(0) \end{pmatrix}$$

Пусть A размера n , а n_k – размер блока A_k . Тогда размерность $\ker(A - \lambda_i E)$ равна $n - \operatorname{rk}(A - \lambda_i E)$. Но $\operatorname{rk}(A - \lambda_i E) = \sum_k \operatorname{rk}(A_k - \lambda_i E)$ и $n = \sum_k n_k$. Так как все матрицы $A_k - \lambda_i E$ для $k \neq i$ обратимы, то есть имеют полный ранг, то $n - \operatorname{rk}(A - \lambda_i E)$ равно $n_i - \operatorname{rk}(A_i - \lambda_i E)$. Каждый блок $J_s(0)$ имеет ранг $s - 1$. То есть каждая клетка вносит в ранг вклад на единицу меньше размера. Следовательно $\operatorname{rk}(A_i - \lambda_i E)$ равно n минус количество клеток, победа!

- Кратность λ_i в f_{\min} равна размерности самого большого блока вида $J_s(\lambda_i)$. Давайте посчитаем кратность корня λ_i в f_{\min} для A в жордановой форме. Для этого надо найти m для которого наступит $\ker(A - \lambda_i E)^m = \ker(A - \lambda_i E)^{m+1}$ (утверждение 120). Как и выше, блоки $A_k - \lambda_i E$ не дают вклад в ядро. А блок $A_i - \lambda_i E$ зануляется в степени равной максимальному размеру клетки. То есть это равна степень стабилизации, что и требовалось.
- Мы уже доказали, что количество клеток размера r с числом λ вычисляется по формуле

$$2 \dim \ker(\varphi - \lambda \operatorname{Id})^r - \dim \ker(\varphi - \lambda \operatorname{Id})^{r+1} - \dim \ker(\varphi - \lambda \operatorname{Id})^{r-1}$$

Однако, можно дать совершенно другое доказательство этого факта, которое может оказаться для вас более приятным или более понятным. Вместо всех этих дурацких рассуждений с операторами, которые были приведены во второй части предыдущего утверждения, можно поступить вот как. Пусть мы уже привели матрицу в ЖНФ в каком-то базисе (но пока еще не знаем ее единственности).

$$A_\varphi = \begin{pmatrix} A_1 & & \\ & A_2 & \\ & & \ddots \\ & & & A_r \end{pmatrix}, \quad \text{где} \quad A_i = \begin{pmatrix} J_{k_{1i}}(\lambda_i) & & \\ & J_{k_{2i}}(\lambda_i) & \\ & & \ddots \\ & & & J_{k_{m_i i}}(\lambda_i) \end{pmatrix}$$

А давайте для данной ЖНФ просто посчитаем число

$$2 \dim \ker(\varphi - \lambda \operatorname{Id})^r - \dim \ker(\varphi - \lambda \operatorname{Id})^{r+1} - \dim \ker(\varphi - \lambda \operatorname{Id})^{r-1}$$

То есть мы будем считать

$$2 \dim \ker(A_\varphi - \lambda E)^r - \dim \ker(A_\varphi - \lambda E)^{r+1} - \dim \ker(A_\varphi - \lambda E)^{r-1}$$

Прделаем это аналогично тому, как в одном из замечаний выше и увидим, что это число дает количество клеток размера r для данной ЖНФ.¹⁰² Но с другой стороны, это число не зависит от ЖНФ, значит для любой ЖНФ число клеток считается по этой формуле.

10.13 Классификация для оператора

Теперь мы можем решить вопрос, когда же две разные матрицы задают один и тот же оператор в разных базисах. Однако, нам потребуется техническое условие. Отвечать на этот вопрос мы пока умеем лишь когда характеристические многочлены матриц раскладываются на линейные множители. Потому мы ответим на этот вопрос лишь над алгебраическим полем.

Утверждение 130 (Классификация для линейных операторов). Пусть F – алгебраически замкнутое поле. Пусть $A, B \in M_n(F)$ – произвольные матрицы. Тогда следующее эквивалентно:

1. Найдется векторное пространство V , линейный оператор $\varphi: V \rightarrow V$ и два базиса e_1, \dots, e_n и f_1, \dots, f_n в V такие, что матрица φ в базисе e_1, \dots, e_n есть A , а в базисе f_1, \dots, f_n есть B .

¹⁰²Попробуйте довести это рассуждение до конца, это очень полезно и просто.

2. Матрицы A и B сопряжены, то есть найдется невырожденная матрица $C \in M_n(F)$ такая, что $B = C^{-1}AC$.

3. Матрицы A и B имеют одинаковую жорданову нормальную форму.

4. Для матриц A и B выполнено:

(a) Их характеристические многочлены равны между собой: $\chi_A(t) = \chi_B(t)$.

(b) Для любого корня λ характеристического многочлена и любого числа k не превосходящего кратности λ выполнено $\operatorname{rk}(A - \lambda E)^k = \operatorname{rk}(B - \lambda E)^k$.

Доказательство. Обратим внимание, что $(1) \Leftrightarrow (2)$ делается так же, как и в случае линейных отображений (утверждение 86). Напомню кратко: $(1) \Rightarrow (2)$ следует из общей формулы замены матрицы при переходе от одного базиса к другому. $(2) \Rightarrow (1)$. Пусть $B = C^{-1}AC$. Тогда положим $V = F^n$ и зададим $\varphi(x) = Ax$. В качестве $e = (e_1, \dots, e_n)$ возьмем стандартный базис, в качестве $f = (e_1, \dots, e_n)C$. Тогда по правилам замены в базисе f оператор φ задан матрицей $C^{-1}AC$, что по условию есть B , что и требовалось.

$(1) \Rightarrow (4)$ Так как A и B матрицы одно и того же оператора в разных базисах, то их характеристические многочлены равны (утверждение о корректности характеристического многочлена). Для любого корня λ характеристического многочлена и произвольного натурального k имеем $\operatorname{rk}(A - \lambda E)^k = \dim \operatorname{Im}(\varphi - \lambda \operatorname{Id})^k = \operatorname{rk}(B - \lambda E)^k$.

$(4) \Rightarrow (3)$ Из совпадению $\chi_A = \chi_B$ следует, что ЖНФ для A и B имеют одни и те же λ_i на диагонали. Теперь надо показать, что количество клеток фиксированного размера для λ_i и у A и у B будет одинаковым. По формуле, клеток с числом λ размера r в A будет

$$2 \dim \ker(A - \lambda E)^r - \dim \ker(A - \lambda E)^{r+1} - \dim \ker(A - \lambda E)^{r-1}$$

Но

$$\dim \ker(A - \lambda E)^r = n - \operatorname{rk}(A - \lambda E)^r = n - \operatorname{rk}(B - \lambda E)^r = \dim \ker(B - \lambda E)^r$$

То есть для A и B эти количества совпадают.

$(3) \Rightarrow (2)$ Пусть у матриц A и B одинаковая жорданова нормальная форма J . Тогда $A = C^{-1}JC$ и $B = D^{-1}JD$. Следовательно $B = D^{-1}CAC^{-1}D$. \square

11 Функционалы

Этот раздел посвящен специальному случаю векторного пространства состоящего из линейных функций на фиксированном пространстве.

11.1 Двойственное (сопряженное) пространство

Определение 131. Пусть V – векторное пространство над полем F , тогда двойственным (или сопряженным) пространством к нему называется

$$V^* = \text{Hom}_F(V, F) = \{\xi: V \rightarrow F \mid \xi - \text{линейное над } F\}$$

Элементы V^* называются линейными функционалами или линейными функциями.

Замечания

- Таким образом двойственное пространство к V состоит из линейных функций на V .
- Вспомним, что в разделе 7.2 было показано, что V^* обладает структурой векторного пространства. Напомним явно эту структуру.

Если $\xi, \eta \in V^*$ – два функционала, то нам надо определить их сумму $\xi + \eta \in V^*$. То есть нам надо определить отображение $(\xi + \eta): V \rightarrow F$, которое должно быть F -линейным. Определим его так: $(\xi + \eta)(v) = \xi(v) + \eta(v)$. Если $\xi \in V^*$ и $\lambda \in F$, то нам надо определить $\lambda\xi \in V^*$. То есть нам надо определить отображение $(\lambda\xi): V \rightarrow F$, которое должно быть F -линейным. Сделаем это так: $(\lambda\xi)(v) = \lambda\xi(v)$. Элементарные проверки показывают, что эти операции снабжают V^* структурой векторного пространства над F (то есть удовлетворяют всем нужным аксиомам).

- **Удобный формализм** Если $\xi \in V^*$, а $v \in V$, то применение функционала к вектору $\xi(v)$ можно записать более кратко без скобок ξv рассматривая операцию применения функционала, как операцию умножения $V^* \times V \rightarrow F$ по правилу $(\xi, v) \mapsto \xi v = \xi(v)$. Это очень удобно и унифицирует многие обозначения. Например можно использовать с блочными формулами, в виде

$$\begin{pmatrix} \xi_1 \\ \vdots \\ \xi_m \end{pmatrix} (v_1 \quad \dots \quad v_n) = \begin{pmatrix} \xi_1 v_1 & \dots & \xi_1 v_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \xi_m v_1 & \dots & \xi_m v_n \end{pmatrix}$$

Здесь я умножаю столбец из функционалов на строку из векторов и получаю матрицу из чисел.

Примеры

1. Пусть $V = F^n$ – пространство столбцов. Если $y \in F^n$ – некоторый столбец, то положим $\alpha_y: V \rightarrow F$ по правилу $\alpha_y(x) = y^t x$. Ниже мы покажем, что в конечномерном пространстве так выглядят все функционалы.
2. Пусть $F(X, \mathbb{R}) = \{f: X \rightarrow \mathbb{R}\}$ – множество всех функций на множестве X со значениями в поле \mathbb{R} . Тогда это множество является векторным пространством над полем \mathbb{R} . Тогда каждая точка $x \in X$ задает функционал «вычисления в точке» $\alpha_x: F(X, \mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$ по правилу $f \mapsto f(x)$.
3. Пусть $C[a, b]$ – множество непрерывных функций на отрезке $[a, b]$. Тогда отображение $\int: C[a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ по правилу $f \mapsto \int_a^b f(t) dt$ является линейным функционалом.
4. Пусть $V = M_n(F)$ – квадратные матрицы, тогда отображение $\text{tr}: M_n(F) \rightarrow F$ по правилу $A \mapsto \text{tr } A$ является линейным функционалом.

11.2 Двойственный базис

Утверждение 132. Пусть V – векторное пространство над полем F и $e_1, \dots, e_n \in V$ – некоторый базис. Тогда

1. Существует единственный набор функционалов $\xi_1, \dots, \xi_n \in V^*$ такой, что

$$\begin{pmatrix} \xi_1 \\ \vdots \\ \xi_n \end{pmatrix} (e_1 \quad \dots \quad e_n) = E$$

2. В конечномерном пространстве любой набор функционалов со свойством (1) является базисом V^* .

Доказательство. (1) Нам надо найти такие функционалы ξ_i , что $\xi_i(e_j) = 1$, если $i = j$ и $= 0$, если $i \neq j$. Но по утверждению 78 существует единственная линейная функция ξ_i отправляющая e_i в единицу, а остальные базисные векторы в 0.

(2) Пусть $\xi \in V^*$ – произвольный функционал, тогда покажем, что $\xi = \xi(e_1)\xi_1 + \dots + \xi(e_n)\xi_n$. Для этого надо показать, что левая и правая часть равенства одинаково действуют на любом векторе из V . Для этого достаточно проверить, что они одинаково действуют на каком-нибудь базисе V . То есть нам достаточно проверить, что левая и правая часть одинаково действуют на каждом e_i . Под действием ξ вектор e_i идет в $\xi(e_i)$. С другой стороны

$$(\xi(e_1)\xi_1 + \dots + \xi(e_n)\xi_n)(e_i) = \xi(e_1)\xi_1(e_i) + \dots + \xi(e_n)\xi_n(e_i) = \xi(e_i)\xi_i(e_i) = \xi(e_i)$$

что и требовалось. □

Определение 133. Пусть V – векторное пространство и $e_1, \dots, e_n \in V$ – его некоторый базис. Тогда единственный базис $\xi_1, \dots, \xi_n \in V^*$, удовлетворяющий условию

$$\begin{pmatrix} \xi_1 \\ \vdots \\ \xi_n \end{pmatrix} (e_1 \quad \dots \quad e_n) = E$$

называется двойственным (или сопряженным) к базису e_1, \dots, e_n .

Замечания

- В предыдущем утверждении мы показали, что если пространство V конечно мерно, то и пространство V^* конечно мерно и имеет ту же самую размерность. Кратко: $\dim V < \infty \Rightarrow \dim V^* = \dim V$.
- Можно показать, что если пространство V бесконечно мерно, то пространство V^* всегда имеет строго большую размерность. Кратко: $\dim V = \infty \Rightarrow \dim V < \dim V^*$.
- Таким образом можно дать очень дурацкое, но тем не менее корректное определение: векторное пространство V будем называть конечномерным, если V изоморфно V^* . Удачи с доказательствами в этом прекрасном мире чудесных определений!
- Давайте обсудим рабоче-крестьянский смысл последнего утверждения. Пусть вам выдали векторное пространство V . Как только вы в нем выбрали базис e_1, \dots, e_n , то оно сразу превратилось в пространство столбцов F^n . Теперь у вас рядом стоит векторное пространство V^* , давайте в нем выберем двойственный базис ξ_1, \dots, ξ_n . Тогда пространство V^* тоже превращается в F^n , но давайте его отождествим с пространством строк, а не столбцов. Тогда, если $\xi \in V^*$ в координатах задается строкой $y \in F^n$, а вектор $v \in V$ в координатах задается столбцом $x \in F^n$, то $\xi(v)$ в координатах считается по правилу yx – произведение строки на столбец.¹⁰³

Утверждение 134. Пусть V – векторное пространство над полем F , e_1, \dots, e_n – базис V , ξ_1, \dots, ξ_n – базис V^* двойственный к e_1, \dots, e_n . Пусть e'_1, \dots, e'_n – другой базис V и ξ'_1, \dots, ξ'_n – двойственный ему базис V^* . Тогда если $(e'_1, \dots, e'_n) = (e_1, \dots, e_n)C$, где $C \in M_n(F)$ – невырожденная матрица перехода, то $(\xi'_1, \dots, \xi'_n) = (\xi_1, \dots, \xi_n)C^{-t}$.

¹⁰³Проверьте это. Именно это свойство является ключевым для двойственного базиса. Мы согласованно превращаем в строки и столбцы функционалы и векторы, так что вычисление функционала превращается в матричное умножение.

Доказательство. Так как ξ_1, \dots, ξ_n и ξ'_1, \dots, ξ'_n – базисы пространства V^* , то обязательно найдется невырожденная матрица перехода между ними, давайте обозначим ее за D , то есть

$$(\xi'_1, \dots, \xi'_n) = (\xi_1, \dots, \xi_n)D$$

Транспонируем это равенство и получим

$$\begin{pmatrix} \xi'_1 \\ \vdots \\ \xi'_n \end{pmatrix} = D^t \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \vdots \\ \xi_n \end{pmatrix}$$

Так как ξ'_1, \dots, ξ'_n двойственный к e'_1, \dots, e'_n , то по определению это значит

$$\begin{pmatrix} \xi'_1 \\ \vdots \\ \xi'_n \end{pmatrix} (e'_1 \quad \dots \quad e'_n) = E$$

С другой стороны

$$\begin{pmatrix} \xi'_1 \\ \vdots \\ \xi'_n \end{pmatrix} (e'_1 \quad \dots \quad e'_n) = D^t \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \vdots \\ \xi_n \end{pmatrix} (e_1 \quad \dots \quad e_n) C = D^t C$$

Откуда $D = C^{-t}$. □

11.3 Функции на функциях

Давайте рассмотрим следующую последовательность векторных пространств

V	V^*	V^{**}
v	ξ	?

В V у нас живут векторы, в V^* функции на векторах, а в V^{**} – функции на функциях на векторах. Оказывается, каждый вектор можно рассматривать как функцию на функциях на векторах. Давайте вспомним наш удобный формализм: если $v \in V$ и $\xi \in V^*$, то $\xi(v)$ надо обозначать так ξv , то есть как произведение. Тогда зафиксировав ξ мы получим правило линейное по v , то есть отображение $V \rightarrow F$. Но, мы с таким же успехом можем зафиксировать v и начать менять левый аргумент. Тогда получится линейное отображение $V^* \rightarrow F$. Это ломает мозг в записи $\xi(v)$, но когда и функционал и вектор записаны равноправно в виде умножения ξv , такие конструкции становится проще понимать. Теперь аккуратно.

Для произвольного векторного пространства V построим отображение $\phi: V \rightarrow V^{**}$, где $v \mapsto \phi_v$. Чтобы задать это отображение нам надо определить элемент $\phi_v \in V^{**}$, то есть нам надо задать $\phi_v: V^* \rightarrow F$. То есть нам надо определить число из поля $\phi_v(\xi)$ для каждого $\xi \in V^*$. Для этого положим по определению $\phi_v(\xi) = \xi(v)$ – функционал вычисления на векторе. Обратим внимание, что отображение $\phi: V \rightarrow V^{**}$ является линейным отображением между векторными пространствами.

Утверждение 135. Пусть V – произвольное векторное пространство и $\phi: V \rightarrow V^{**}$ отображение по правилу $v \mapsto \phi_v$, где $\phi_v(\xi) = \xi(v)$. Тогда

1. Отображение $\phi: V \rightarrow V^{**}$ инъективно.
2. Если V конечно мерно, то отображение ϕ является изоморфизмом.

Доказательство. (1) Так как ϕ линейно, нам достаточно показать, что у него нулевое ядро. Давайте расшифруем, что это значит. Пусть $v \in V$ такой, что $\phi_v = 0$. Это значит, что $\phi_v: V^* \rightarrow F$ является нулевым отображением. То есть $\phi_v(\xi) = 0$ для любого $\xi \in V^*$. То есть $\xi(v) = 0$ для любого $\xi \in V^*$. Чтобы доказать, что $v = 0$, нам достаточно показать, что если $v \neq 0$, то найдется функционал $\xi \in V^*$ такой, что $\xi(v) \neq 0$. Действительно, если $v \neq 0$, то $\{v\}$ – линейно независимая система. Тогда ее можно дополнить до базиса $\{v\} \cup E$.¹⁰⁴ Тогда положим отображение $\xi: V \rightarrow F$ по правилу $v \mapsto 1$, а E идет целиком в 0.¹⁰⁵ Тогда $\xi \in V^*$ и $\xi(v) \neq 0$, что и требовалось.

(2) Так как V вкладывается в V^{**} , то нам достаточно убедиться, что они имеют одинаковую размерность. А это следует из утверждения 132, так как $\dim V = \dim V^* = \dim V^{**}$. □

¹⁰⁴В конечномерном случае мы это умеем делать, а в бесконечномерном случае – это аксиома эквивалентная аксиоме выбора.

¹⁰⁵В конечномерном случае это утверждение 59. Для бесконечномерного случая можете проверить, что оно остается верным.

Я конечно же постарался привести доказательство в бесконечно мерном случае. Однако, если все эти бесконечномерные пакости так претят вашей ранимой тонкой душевной организации, можете доказывать это утверждение только для конечно мерных пространств.

Замечания

- Если мы стартовали с векторного пространства V , то можем начать строить цепочку пространств вида V, V^*, V^{**}, \dots . Утверждение 132 гласит, что с абстрактной точки зрения, все эти пространства одинаковые – изоморфны и мы ничего не получили нового.
- Однако, этот абстрактный изоморфизм ничего не знает про «семантику» наших пространств, а именно он ничего не знает про операцию применения функционалов к векторам. Изоморфизм $\phi: V \rightarrow V^{**}$ из утверждения 135 согласован с этой семантикой следующим образом. На паре пространств V^*, V есть операция $V^* \times V \rightarrow F$ вычисления функционала и на паре пространств V^{**}, V^* есть операция $V^{**} \times V^* \rightarrow F$ вычисления функционала. Рассмотрим следующую картинку

$$\begin{array}{c|c|c} V & V^* & V^{**} \\ \hline v & \xi & \phi_v \end{array}$$

Тогда мы можем применить ξ к v и получим $\xi(v)$, можем применить ϕ_v к ξ и получим $\phi_v(\xi) = \xi(v)$. То есть рассматривать пару (v, ξ) можно как пару (вектор, функция), а можно рассматривать как пару (функция, вектор). При этом операция вычисления функции на векторе будет одной и той же и задается правилом ξv (вот видите, как полезна симметричная запись).¹⁰⁶

- Теперь еще раз рассмотрим последовательность V, V^*, V^{**} . Если мы выберем в V некоторый базис e_1, \dots, e_n , то в V^* можем найти к нему двойственный ξ_1, \dots, ξ_n . После чего найдем к последнему двойственный η_1, \dots, η_n в V^{**} . Но теперь вспомним, что V^{**} изоморфно V . А так как изоморфизм между V и V^{**} согласован с применением функционалов, то базис η_1, \dots, η_n перейдет в e_1, \dots, e_n .
- Чуть ниже я покажу более аккуратно, что значит, что изоморфизм $\phi: V \rightarrow V^{**}$ в некотором смысле канонический, а между V и V^* таких не бывает.

11.4 Сопряженное линейное отображение

Выше мы показали, что в конечномерном случае все три пространства V, V^* и V^{**} изоморфны между собой. Однако, в случае V и V^{**} мы не просто показали это, мы построили некоторый замечательнейший изоморфизм между ними. Ниже очень хочется объяснить, а что же такого замечательного в этом изоморфизме и почему подобного замечательного изоморфизма нет между V и V^* . Оказывается, что изоморфизм $\phi: V \rightarrow V^{**}$ в некотором смысле согласован с линейными отображениями, а подобного согласованного изоморфизма между V и V^* просто не бывает. Для того, чтобы объяснить, что все это значит, мне нужно для начала определить сопряженное линейное отображение.

Пусть $\varphi: V \rightarrow U$ – некоторое линейное отображение. Мы хотим определить другое линейное отображение $\varphi^*: U^* \rightarrow V^*$ следующим образом:

$$\begin{array}{ccccc} & & \xi \circ \varphi & & \\ & \swarrow & \text{---} & \searrow & \\ V & \xrightarrow{\varphi} & U & \xrightarrow{\xi} & F \\ & \nwarrow & \text{---} & \swarrow & \\ V^* & \xleftarrow{\varphi^*} & U^* & & \\ \xi \circ \varphi & \longleftarrow & \xi & & \end{array}$$

Давайте поясним, что нарисовано на диаграмме. Нам надо определить $\varphi^*: U^* \rightarrow V^*$. То есть для любого $\xi \in U^*$ нам надо задать $\varphi^*(\xi) \in V^*$. Последнее означает, что по линейному функционалу на U , нам надо как-то построить линейный функционал на V . Предлагается определить $\varphi^*(\xi) = \xi \circ \varphi$ как композицию.

Определение 136. Для линейного отображения $\varphi: V \rightarrow U$ сопряженным (или двойственным) линейным отображением называется $\varphi^*: U^* \rightarrow V^*$ по правилу $\xi \mapsto \varphi^*(\xi) = \xi \circ \varphi$.

¹⁰⁶ Таким образом нам необходимо знать только про векторы и функционалы. Кроме того, оказывается, что если определить такую операцию над векторными пространствами как тензорное произведение, то все, что только можно определить в линейной алгебре, можно выразить через векторы и функционалы с помощью тензорного произведения, например, линейные отображения, операторы, билинейные формы (которые будут чуть позже) и много других объектов. Это все ведет к некоторому единому удобному тензорному языку.

Матрица сопряженного линейного отображения

Утверждение 137. Пусть V – векторное пространство с базисом e_1, \dots, e_n , U – векторное пространство с базисом f_1, \dots, f_m . Пусть e^1, \dots, e^n – двойственный базис в V^* и f^1, \dots, f^m – двойственный базис в U^* . Пусть $\varphi: V \rightarrow U$ – некоторое линейное отображение с матрицей A_φ в базисах e_i и f_j и пусть $\varphi^*: U^* \rightarrow V^*$ – сопряженное линейное отображение с матрицей A_{φ^*} в базисах f^i и e^j . Тогда $A_{\varphi^*} = A_\varphi^t$.

Доказательство. Для лучшего понимания, я приведу два доказательства: без координатное и координатное. Выбирайте любое, какое вам больше нравится.

Абстрактное доказательство По определению матрицы линейного отображения

$$\varphi(e_1, \dots, e_n) = (f_1, \dots, f_m)A_\varphi \quad \text{и} \quad \varphi^*(f^1, \dots, f^m) = (e^1, \dots, e^n)A_{\varphi^*}$$

Кроме того, по определению двойственного базиса нам дано

$$\begin{pmatrix} e^1 \\ \vdots \\ e^n \end{pmatrix} (e_1 \quad \dots \quad e_n) = E \quad \text{и} \quad \begin{pmatrix} f^1 \\ \vdots \\ f^m \end{pmatrix} (f_1 \quad \dots \quad f_m) = E$$

В начале распишем следующее равенство

$$(f^1\varphi, \dots, f^m\varphi) = \varphi^*(f^1, \dots, f^m) = (e^1, \dots, e^n)A_{\varphi^*}$$

Теперь транспонируем его и получим

$$\begin{pmatrix} f^1\varphi \\ \vdots \\ f^m\varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f^1 \\ \vdots \\ f^m \end{pmatrix} \varphi = A_{\varphi^*}^t \begin{pmatrix} e^1 \\ \vdots \\ e^n \end{pmatrix}$$

Умножим левую и правую часть полученного равенства на (e_1, \dots, e_n) , получим

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} f^1 \\ \vdots \\ f^m \end{pmatrix} \varphi(e_1, \dots, e_n) &= A_{\varphi^*}^t \begin{pmatrix} e^1 \\ \vdots \\ e^n \end{pmatrix} (e_1 \quad \dots \quad e_n) \\ \begin{pmatrix} f^1 \\ \vdots \\ f^m \end{pmatrix} (f_1, \dots, f_m)A_\varphi &= A_{\varphi^*}^t \\ A_\varphi &= A_{\varphi^*}^t \end{aligned}$$

что и требовалось.

Координатное доказательство Так как в пространствах V и V^* фиксированы базис и двойственный к нему, то можно считать, что $V = F^n$ – пространство столбцов, $V^* = F^n$ – пространство строк, а применение функции к вектору – умножение строки на столбец. Аналогично, можно считать, что $U = F^m$ – пространство столбцов, $U^* = F^m$ – пространство строк. Тогда линейное отображение φ действует по правилу $\varphi(x) = A_\varphi x$. Значит по определению строка $\xi \in F^m$ переходит в $\varphi^*(\xi) = \xi \circ \varphi = \xi A_\varphi$, то есть строка $\xi \in F^m$ переходит в строку ξA_φ . Но чтобы получить матрицу линейного отображения, надо записать координаты вектора в столбцы, тогда получим $\xi^t \mapsto A_\varphi^t \xi^t$. То есть отображение φ^* действует с помощью матрицы A_φ^t . \square

Замечание То есть транспонирование матриц имеет следующий философский смысл: это переход к сопряженному линейному отображению в двойственном пространстве. Заметили, что транспонирование и звездочка меняют местами порядок отображений? Последнее утверждение показывает, что это не случайное совпадение.

Функториальность звездочки Обратите внимание, что мы теперь построили очень любопытный математический агрегат. А именно, пусть у нас есть мешок всех векторных пространств и линейных отображений между ними. Тогда для каждого векторного пространства V мы можем построить новое векторное пространство V^* . Кроме того, мы умеем действовать не только на векторных пространствах, но и на отображениях между ними. То есть каждому отображению $\varphi: V \rightarrow U$ мы ставим в соответствие $\varphi^*: U^* \rightarrow V^*$. Про это надо думать так: все векторные пространства образуют (охренительно огромнейший) граф, у которого вершины – векторные пространства, а ребра – линейные отображения. Мы построили отображение из этого графа в себя, которое разворачивает стрелки. Кроме того, это отображение согласовано с композицией в следующем смысле:¹⁰⁷

- Если $\text{Id}: V \rightarrow V$, тогда $\text{Id}^*: V^* \rightarrow V^*$ является тождественным отображением, то есть $\text{Id}^* = \text{Id}$.
- Если $\varphi: V \rightarrow U$ и $\psi: U \rightarrow W$, тогда $(\psi\varphi)^* = \varphi^*\psi^*$, то есть звездочка меняет местами порядок отображений. Графически это можно изобразить так:

$$\text{Если коммутативна диаграмма } \begin{array}{ccc} & \psi \circ \varphi & \\ \swarrow \varphi & & \searrow \psi \\ V & \longrightarrow & U \longrightarrow W \end{array}, \text{ то коммутативна диаграмма } \begin{array}{ccc} & (\psi \circ \varphi)^* & \\ \swarrow \varphi^* & & \searrow \psi^* \\ V^* & \longleftarrow & U^* \longleftarrow W^* \end{array}$$

Коммутативность диаграммы, означает, что любые два пути ведущие из одной вершины в другую приводят к одному результату.

- Так же отметим, что звездочка согласована со структурой векторного пространства. А именно для любых $\varphi, \psi: V \rightarrow U$ и числе $\alpha, \beta \in F$ верно $(\alpha\varphi + \beta\psi)^* = \alpha\varphi^* + \beta\psi^*: U^* \rightarrow V^*$.

Канонический изоморфизм

Утверждение 138. Пусть $\varphi: V \rightarrow U$ – линейное отображение и $\phi: V \rightarrow V^{**}$ и $\phi: U \rightarrow U^{**}$ – канонические изоморфизмы на второе сопряженное. В этом случае коммутативна следующая диаграмма:

$$\begin{array}{ccc} V & \xrightarrow{\varphi} & U \\ \downarrow \phi & & \downarrow \phi \\ V^{**} & \xrightarrow{\varphi^{**}} & U^{**} \end{array}$$

то есть $\phi\varphi = \varphi^{**}\phi$.

Доказательство. Давайте распишем, как вектор $v \in V$ двигается по этой диаграмме

$$\begin{array}{ccc} v & \xrightarrow{\quad} & \varphi(v) \\ \downarrow & & \downarrow \\ \phi_v & \xrightarrow{\quad} & \phi_v \circ \varphi^* \stackrel{?}{=} \phi_{\varphi(v)} \end{array}$$

И нам надо проверить равенство с вопросиком. Для этого надо сравнить действие левой и правой части на произвольном $\xi \in U^*$. Получим

$$(\phi_v \circ \varphi^*)(\xi) = \phi_v(\varphi^*(\xi)) = \phi_v(\xi \circ \varphi) = (\xi \circ \varphi)(v) = \xi(\varphi(v)) = \phi_{\varphi(v)}(\xi)$$

что и требовалось. □

Замечания

- Последнее утверждение показывает, что изоморфизмы $\phi: V \rightarrow V^{**}$ согласованы с линейными отображениями в том смысле, что коммутативны некоторые диаграммы. Как надо думать про это? Смысл φ в том, что мы можем считать, что V и V^{**} – это одно и то же. Согласованность с отображениями означает, что при таком отождествлении V с V^{**} и U с U^{**} отображение φ превращается в φ^{**} .

¹⁰⁷Я не хочу вводить формальные определения, но мы реально только что построили контровариантный функтор из категории векторных пространств в себя, что бы это ни значило.

- С другой стороны, если мы захотим потребовать нечто подобное для V и V^* то мы получим диаграмму вида

$$\begin{array}{ccc} V & \xrightarrow{\varphi} & U \\ \downarrow \phi & & \downarrow \phi \\ V^* & \xleftarrow{\varphi^*} & U^* \end{array}$$

Причем эта диаграмма должна быть коммутативной (то есть $\phi = \varphi^* \phi \varphi$) для всех отображений $\varphi: V \rightarrow U$, а вертикальные стрелки ϕ все должны быть изоморфизмами. Но выберем тогда в качестве φ нулевое отображение и получим, что $\phi = 0$, противоречие.

12 Тензоры

Всем хороши векторные пространства. Их элементы можно складывать и умножать на числа. Одна беда – векторы нельзя перемножать. А очень хочется. А мы знаем, что когда нельзя, но очень хочется, то можно, а скорее даже нужно. Наша следующая задача научиться перемножать векторы. Окажется, что способов перемножать векторы много и результаты этих перемножений могут лежать где угодно. Однако, среди всех этих способов можно найти самую лучшую операцию перемножения и для нее построить особое пространство, в котором будут лежать произведения векторов. Вот это новое замечательное пространство будет называться тензорным произведением исходных векторных пространств. Чтобы начать разговор о тензорных произведениях, надо немного поговорить об операциях умножения или как более прилично говорить в математике – билинейных отображениях.

12.1 Билинейные отображения

Определение 139. Пусть V , U и T – векторные пространства над полем F . Отображение $\mu: V \times U \rightarrow T$ называется билинейным, если выполняется следующий набор аксиом

1. Для любых векторов $v_1, v_2 \in V$ и $u \in U$ выполнено

$$\mu(v_1 + v_2, u) = \mu(v_1, u) + \mu(v_2, u)$$

2. Для любых векторов $v \in V$, $u \in U$ и чисел $\lambda \in F$ выполнено

$$\mu(\lambda v, u) = \lambda \mu(v, u)$$

3. Для любых векторов $v \in V$ и $u_1, u_2 \in U$ выполнено

$$\mu(v, u_1 + u_2) = \mu(v, u_1) + \mu(v, u_2)$$

4. Для любых векторов $v \in V$, $u \in U$ и чисел $\lambda \in F$ выполнено

$$\mu(v, \lambda u) = \lambda \mu(v, u)$$

Обратите внимание, что отображение μ – это функция двух аргументов. А у любой функции двух аргументов есть операторная запись.¹⁰⁸ Например, на запись $\mu(v, u)$ можно смотреть как на $v * u$. В этом случае определение выше можно переписать в эквивалентной форме, которая психологически кому-то может быть более близка.

Определение 140. Пусть V , U и T – векторные пространства над полем F . Отображение $*$: $V \times U \rightarrow T$ называется билинейным (или умножением), если выполняется следующий набор аксиом

1. Для любых векторов $v_1, v_2 \in V$ и $u \in U$ выполнено

$$(v_1 + v_2) * u = v_1 * u + v_2 * u$$

2. Для любых векторов $v \in V$, $u \in U$ и чисел $\lambda \in F$ выполнено

$$(\lambda v) * u = \lambda(v * u)$$

3. Для любых векторов $v \in V$ и $u_1, u_2 \in U$ выполнено

$$v * (u_1 + u_2) = v * u_1 + v * u_2$$

4. Для любых векторов $v \in V$, $u \in U$ и чисел $\lambda \in F$ выполнено

$$v * (\lambda u) = \lambda(v * u)$$

То есть билинейная операция – это умножение, от которого мы лишь требуем дистрибутивности относительно сложения и согласованность с умножением на скаляр.¹⁰⁹

¹⁰⁸Операторная и функциональная запись функций с двумя аргументами многим должна быть знакома по языкам программирования.

¹⁰⁹Когда вы чуть-чуть дорастете до курса алгебры, вы узнаете, что эти свойства определяют любую операцию умножения в алгебраических структурах.

Примеры Давайте сделаем передышку и взглянем на несколько полезных примеров:

- Пусть V и U – два произвольных векторных пространства. Зададим операцию умножения следующим образом $\mu: V \times U \rightarrow 0$ по правилу $(v, u) \mapsto 0$. Это самая дурацкая операция умножения, которую только можно придумать. Она не несет в себе никакой полезной информации и именно в этом заключается ее польза.

- Пусть $V = F^n$ и $U = F^n$ зададим операцию умножения так

$$F^n \times F^n \rightarrow F, \quad (x, y) \mapsto x^t y$$

- Пусть $V = F^n$ и $U = F^n$ зададим операцию умножения так

$$F^n \times F^n \rightarrow M_n(F), \quad (x, y) \mapsto xy^t$$

- Пусть $V = U = M_n(F)$, тогда рассмотрим операцию матричного умножения

$$M_n(F) \times M_n(F) \rightarrow M_n(F), \quad (A, B) \mapsto AB$$

- Пусть $\mu: V \times U \rightarrow T$ – произвольная операция умножения и пусть $\phi: T \rightarrow E$ – произвольное линейное отображение векторных пространств. Тогда композиция $\phi \circ \mu: V \times U \rightarrow E$ будет так же операцией умножения.

Таким образом некоторые операции умножения можно выразить через другие с помощью линейных отображений. В таком смысле операция μ интереснее операции $\phi \circ \mu$, так как вторая получается из первой. Идея заключается в том, что если мы будем знать все про первую операцию, то мы будем знать все и про вторую, так как она выражается через первую.

Прежде всего мы видим, что бывает много разных операций умножения на одной и той же паре пространств. Кроме того, в силу последнего замечания самый большой интерес для нас представляет операция умножения, через которую можно выразить все другие операции (при условии, что такая существует). Оказывается, что подобная замечательная операция существует и в некотором смысле единственная. Но начнем мы с формулировки универсального свойства.

Определение 141. Пусть V, U, T – векторные пространства и $\mu: V \times U \rightarrow T$ – операция умножения. Тогда μ называется универсальной, если выполняется следующее свойство: для любого векторного пространства E и любой операции умножения $\phi: V \times U \rightarrow E$ найдется единственное линейное отображение $\psi: T \rightarrow E$ такое, что $\phi = \psi \circ \mu$. Продемонстрируем происходящее на диаграмме ниже

$$\begin{array}{ccc} V \times U & \xrightarrow{\mu} & T \\ & \searrow \phi & \swarrow \psi \\ & E & \end{array}$$

Сделаю одно полезное замечание. Если умножение $\mu: V \times U \rightarrow T$ универсальное, это значит, что любая операция умножения $\phi: V \times U \rightarrow E$ соответствует единственному линейному отображению $\psi: T \rightarrow E$. Таким образом мы можем свести изучение билинейных отображений к линейным. Подобная процедура позволит избежать построения теории билинейных отображений, аналогичной теории линейных отображений, и пользоваться уже готовым аппаратом.

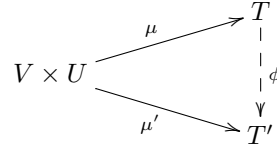
Утверждение 142. Пусть V, U и T – векторные пространства над полем F и пусть $\mu: V \times U \rightarrow T$ – универсальное умножение. Тогда

1. Если $\phi: T \rightarrow T$ – линейное отображение такое, что $\mu = \phi \circ \mu$, то есть следующая диаграмма коммутативна:

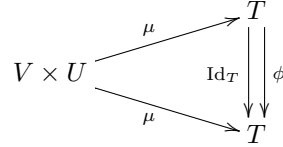
$$\begin{array}{ccc} & & T \\ & \nearrow \mu & \downarrow \phi \\ V \times U & & T \\ & \searrow \mu & \\ & & T \end{array}$$

То $\phi = \text{Id}_T$, то есть ϕ обязательно тождественное отображение.

2. Пусть $\mu': V \times U \rightarrow T'$ – другая универсальная операция умножения. Тогда существует единственное линейное отображение $\phi: T \rightarrow T'$ такое, что $\mu' = \phi \circ \mu$ и при этом ϕ обязательно окажется изоморфизмом. На диаграмме это можно изобразить так

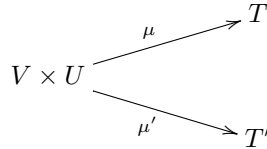


Доказательство. 1) С одной стороны у нас есть отображение $\phi: T \rightarrow T$ такое, что $\mu = \phi \circ \mu$. С другой стороны отображение $\text{Id}_T: T \rightarrow T$ тоже удовлетворяет условию $\mu = \text{Id}_T \circ \mu$. Изобразим это на диаграмме ниже

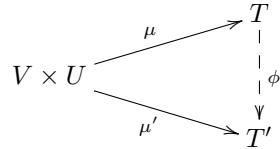


Но так как μ было универсальным, то существует одно единственное отображение с таким свойством. А значит $\phi = \text{Id}_T$.

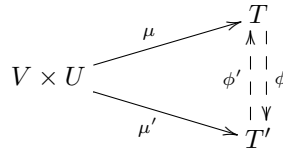
2) Пусть теперь у нас есть две универсальные операции умножения.



Так как μ является универсальной операцией, то существует единственное линейное отображение $\phi: T \rightarrow T'$ такое, что $\mu' = \phi \circ \mu$. В терминах диаграммы



С другой стороны, так как μ' является универсальной операцией умножения, существует единственное линейное отображение $\phi': T' \rightarrow T$ такое, что $\mu = \phi' \circ \mu'$. На диаграмме это изображается так



Тогда композиция $\phi' \circ \phi: T \rightarrow T$ удовлетворяет условиям первого пункта утверждения, а значит равна тождественному отображению на T , то есть $\phi' \circ \phi = \text{Id}_T$. Аналогично, отображение $\phi \circ \phi': T' \rightarrow T'$ удовлетворяет условиям первого пункта утверждения, а значит $\phi \circ \phi' = \text{Id}_{T'}$. Таким образом ϕ и ϕ' – это два взаимнообратных изоморфизма, что и требовалось. \square

Последнее утверждение означает, что любые две универсальные операции одинаковые. Одинаковость понимается так: мы можем найти изоморфизм между их областями значений (T и T' в обозначениях предыдущего утверждения) такой, что под действием этого изоморфизма одна операция превращается в другую. Причем это отождествление единственно, то есть нет никакой неоднозначности в определении операции. Потому нет никакого смысла отличать одну универсальную операцию от другой. Все свойства у этих универсальных операций автоматически будут одинаковые.

12.2 Существование тензорного произведения

Достаточное условие универсальности Теперь когда мы знаем, что наша возжеленная операция одна единственная на всем белом свете, мы очень хотим ее найти и пощупать руками ее свойства. Но прежде чем отправиться на поиски, давайте сформулируем полезное достаточное условие универсальности. Оно поможет нам разглядеть ту самую.

Утверждение 143. Пусть V, U и T – векторные пространства над полем F , e_1, \dots, e_n – базис V , f_1, \dots, f_m – базис U и $\mu: V \times U \rightarrow T$ – билинейная операция. Если векторы $\mu(e_i, f_j)$ образуют базис T , где $1 \leq i \leq n$ и $1 \leq j \leq m$, то операция μ является универсальным умножением.

Доказательство. Пусть $\mu': V \times U \rightarrow T'$ – любая другая операция умножения. Нам надо построить линейное отображение $\varphi: T \rightarrow T'$ такое, что для любых векторов $v \in V$ и $u \in U$ было выполнено $\mu'(v, u) = \varphi(\mu(v, u))$. В частности должно выполняться условие $\mu'(e_i, f_j) = \varphi(\mu(e_i, f_j))$. Так как векторы $\mu(e_i, f_j)$ являются базисом T , то существует единственное линейное отображение $\varphi: T \rightarrow T'$ такое, что $\varphi(\mu(e_i, f_j)) = \mu'(e_i, f_j)$ (утверждение 78).

Давайте проверим, что φ удовлетворяет необходимому требованию. Пусть $v \in V$ и $u \in U$, разложим их по базисам, получим $v = \sum_{i=1}^n a_i e_i$ и $u = \sum_{j=1}^m b_j f_j$ для некоторых $a_i, b_j \in F$. Тогда

$$\varphi(\mu(v, u)) = \varphi(\mu(\sum_{i=1}^n a_i e_i, \sum_{j=1}^m b_j f_j)) = \sum_{i,j} a_i b_j \varphi(\mu(e_i, f_j)) = \sum_{i,j} a_i b_j \mu'(e_i, f_j) = \mu'(\sum_{i=1}^n a_i e_i, \sum_{j=1}^m b_j f_j) = \mu'(v, u)$$

□

Конструкция тензорного произведения Лучший способ найти лучшую операцию – построить ее явно. Пусть V и U – два векторных пространства над полем F . Мы будем предполагать, что они оба конечномерны, но конструкция будет работать и в общем случае, надо лишь аккуратно произносить все заклинания. Я предъявлю конструкцию, которая будет зависеть от базиса, но в силу единственности универсальной операции, стартуя с любого базиса, мы получим одно и то же пространство и операцию.

Пусть e_1, \dots, e_n – базис V и f_1, \dots, f_m – базис U . Рассмотрим набор букв t_{ij} , где $1 \leq i \leq n$ и $1 \leq j \leq m$. Положим в качестве множества формальных линейных комбинаций букв t_{ij} с коэффициентами из поля¹¹⁰, то есть

$$T = \{ \sum_{i,j} a_{ij} t_{ij} \mid a_{ij} \in F \}$$

То есть элементом T является картинка вида $a_{11}t_{11} + a_{12}t_{12} + \dots + a_{nm}t_{nm}$. Две такие картинки совпадают тогда и только тогда, когда у них все коэффициенты одинаковые. Здесь умножение коэффициента a_{ij} на букву t_{ij} чисто формальное, мы просто приписываем коэффициент к букве, никакого другого умножения коэффициента на букву нет.

Теперь надо на этом множестве определить операции сложения и умножения на скаляры. Для полноты картины я напишу формулы:

- Элементы T складываются покоэффициентно, то есть

$$\sum_{i,j} a_{ij} t_{ij} + \sum_{i,j} b_{ij} t_{ij} = \sum_{i,j} (a_{ij} + b_{ij}) t_{ij}$$

- Элементы T умножаются на числа покоэффициентно, то есть

$$\lambda(\sum_{i,j} a_{ij} t_{ij}) = \sum_{i,j} \lambda a_{ij} t_{ij}$$

Я позволю себе сказать, что аксиомы векторного пространства проверяются методом пристального взгляда и куда полезнее их проверку оставить читателю. Но обратите внимание, что нулем в таком пространстве является картинка, где все коэффициенты нулевые.

¹¹⁰Если вы боитесь слова «буквы» и сочетания «формальная линейная комбинация», то можете думать про эти выражения, как про многочлены.

Теперь надо построить операцию $\mu: V \times U \rightarrow T$. Пусть $v \in V$ и $u \in U$. Разложим векторы по базисам и получим $v = \sum_i x_i e_i$ и $u = \sum_j y_j f_j$. Так как координаты векторов определены однозначно, мы можем определить отображение множеств $\mu: V \times U \rightarrow T$ по правилу

$$\mu(v, u) = \sum_{ij} x_i y_j t_{ij}$$

Теперь надо проверить билинейность этого отображения. Действительно, пусть $v' = \sum_i x'_i e_i$, тогда

$$\mu(v + v', u) = \sum_{ij} (x_i + x'_i) y_j t_{ij} = \sum_{ij} x_i y_j t_{ij} + \sum_{ij} x'_i y_j t_{ij} = \mu(v, u) + \mu(v', u)$$

И для любого числа $\lambda \in F$ выполнено

$$\mu(\lambda v, u) = \sum_{ij} (\lambda x_i) y_j t_{ij} = \lambda \sum_{ij} x_i y_j t_{ij} = \lambda \mu(v, u)$$

Аналогично проверяется линейность по второму аргументу.

Утверждение. Пространство T вместе с операцией $\mu: V \times U \rightarrow T$ построенные выше дают универсальную операцию умножения на V и U .

Доказательство. Заметим, что по построению у нас получилась билинейная операция такая, что $\mu(e_i, f_j) = t_{ij}$ – базис пространства T . Тогда по утверждению 143 эта операция является универсальной. \square

Обозначения

- Построенное пространство T выше будем обозначать¹¹¹ $V \otimes_F U$ или кратко $V \otimes U$, когда понятно о каком поле идет речь. Это пространство называется тензорным произведением пространств V и U над полем F , а его элементы называются тензорами.
- Операция μ в операторной форме обозначается символом \otimes . Тогда запись для операции имеет вид $\otimes: V \times U \rightarrow V \otimes U$ по правилу $(v, u) \mapsto v \otimes u$.
- Если я возьму произвольный набор векторов $v_1, \dots, v_k \in V$ и такой же длины набор $u_1, \dots, u_k \in U$, то я могу построить элементы $v_1 \otimes u_1, \dots, v_k \otimes u_k \in V \otimes_F U$, просто перемножим векторы с помощью универсальной операции. Кроме того, я могу сложить получившиеся векторы. Потому в тензорном произведении пространств есть элементы вида $\sum_{i=1}^k v_i \otimes u_i$. Оказывается, что любой элемент тензорного произведения имеет такой вид, это показано в следующем пункте.
- В обозначениях выше, элементы t_{ij} представляются в виде $t_{ij} = e_i \otimes f_j$. А так как t_{ij} – это базис, то любой элемент $V \otimes_F U$ единственным образом представляется в виде $\sum_{ij} a_{ij} e_i \otimes f_j$. В частности любой элемент $V \otimes_F U$ имеет вид $\sum_{i=1}^k v_i \otimes u_i$ для достаточно большого k .
- Тензоры вида $v \otimes u \in V \otimes_F U$ называются разложимыми. Примеры ниже покажут, что разложимых тензоров сильно меньше, чем неразложимых.¹¹²

Замечание о базисах Мы построили тензорное произведение пространств исходя из соображения, что тензорное произведение двух фиксированных базисов является базисом тензорного произведения пространств. А что будет, если взять любые другие базисы? Оказывается, они тоже дадут базис тензорного произведения.

Утверждение 144. Пусть V и U – векторные пространства над полем F . Тогда для любых базисов $e'_1, \dots, e'_n \in V$ и $f'_1, \dots, f'_m \in U$ следует, что набор векторов $e'_i \otimes f'_j$ будет базисом в $V \otimes_F U$.

Доказательство. Пусть $\otimes: V \times U \rightarrow V \otimes_F U$ – тензорное произведение. Построим другую его версию $\mu: V \times U \rightarrow T$ с помощью базисов e'_i и f'_j по конструкции выше. Тогда по построению $\mu(e'_i, f'_j)$ будет базисом T . Но мы знаем, что универсальная операция единственная, потому пространство T и $V \otimes_F U$ изоморфны и при этом

¹¹¹Напомним, что такое пространство единственное с точностью до единственного изоморфизма. Потому как бы вы его ни построили, вы всегда сможете отождествить две конструкции единственным образом

¹¹²Один из примеров ниже показывает, что разложимые тензоры соответствуют матрицам ранга не более 1.

изоморфизме одна операция превращается в другую (утверждение 142). Более формально, коммутативна следующая диаграмма

$$\begin{array}{ccc} & & V \otimes_F U \\ & \nearrow \otimes & \uparrow \phi \\ V \times U & & T \\ & \searrow \mu & \downarrow \end{array}$$

где $\phi: T \rightarrow V \otimes_F U$ является изоморфизмом. С другой стороны из коммутативности диаграммы следует, что элементы $\mu(e'_i, f'_j)$ переходят в $e'_i \otimes f'_j$ под действием ϕ . А значит последние тоже являются базисом. \square

Утверждение 145. Для любых векторных пространств V и U над полем F верно, что $\dim_F V \otimes_F U = \dim_F V \dim_F U$.

Доказательство. Это непосредственно следует из конструкции тензорного произведения, которая приведена выше. \square

12.3 Примеры тензорных произведений

Мы очень долго говорили про нашу ненаглядную операцию, но что-то пока ни разу на нее не взглянули и не притронулись ни к одному из ее загадочных свойств. Давайте наконец-то перейдем к примерам.

- Давайте рассмотрим операцию умножения вектора на число $\mu: V \times F \rightarrow V$ по правилу $(v, \lambda) \mapsto \lambda v$. Утверждается, что эта операция универсальная. Действительно, для этого надо воспользоваться утверждением 143 и проверить, что она базисы отправляет в базис. Пусть e_1, \dots, e_n – базис V , а в качестве базиса F выберем 1. Тогда $\mu(e_1, 1) = e_1, \dots, \mu(e_n, 1) = e_n$ – базис V . Что доказывает универсальность операции. Нарисуем соответствующую коммутативную диаграмму:

$$\begin{array}{ccc} & & V \otimes_F F \\ & \nearrow \otimes & \downarrow \phi \\ V \times F & & V \\ & \searrow \mu & \end{array} \quad \begin{array}{ccc} & & v \otimes \lambda \\ & \nearrow \otimes & \downarrow \phi \\ (v, \lambda) & & \lambda v \\ & \searrow \mu & \end{array}$$

Таким образом тензорное произведение $V \otimes_F F = V$, при этом отождествлении тензорное произведение превращается в умножение вектора на скаляр, а разложимые тензоры $v \otimes \lambda$ переходят в λv .

- Теперь изучим тензорное произведение $F^n \otimes_F F^m$. Рассмотрим билинейную операцию $\mu: F^n \times F^m \rightarrow M_{n \times m}(F)$ по правилу $(x, y) \mapsto xy^t$, то есть пару векторов переводим в матрицу ранга не более 1. Пусть e_1, \dots, e_n – стандартный базис F^n и f_1, \dots, f_m – стандартный базис F^m . Тогда $\mu(e_i, f_j) = E_{ij}$ – матричные единицы, а они образуют базис пространства $M_{n \times m}(F)$. Утверждение 143 тогда влечет, что данная операция является универсальной. Нарисуем соответствующую коммутативную диаграмму

$$\begin{array}{ccc} & & F^n \otimes_F F^m \\ & \nearrow \otimes & \downarrow \phi \\ F^n \times F^m & & M_{n \times m}(F) \\ & \searrow \mu & \end{array} \quad \begin{array}{ccc} & & x \otimes y \\ & \nearrow \otimes & \downarrow \phi \\ (x, y) & & xy^t \\ & \searrow \mu & \end{array}$$

Таким образом тензорное произведение $F^n \otimes_F F^m$ совпадает с матрицами $M_{n \times m}(F)$, при этом отождествлении операция тензорного произведения превращается в операцию умножения столбца на строку $(x, y) \mapsto xy^t$, а разложимый тензор $x \otimes y$ переходит в матрицу ранга не более 1 вида xy^t .

Этот пример объясняет смысл определения тензорного ранга. Один из подходов к понятию ранга тензора – минимальное количество разложимых тензоров, в сумму которых раскладывается данный тензор. Это определение превращается в определение тензорного ранга матриц, когда мы отождествляем $F^n \otimes_F F^m$ с $M_{n \times m}(F)$.

- Теперь покажем, как на тензорном языке определить линейные отображения. Пусть V и U – два векторных пространства и $\text{Hom}_F(V, U)$ – линейные отображения из V в U над полем F . Давайте определим

билинейную операцию $\mu: U \times V^* \rightarrow \text{Hom}_F(V, U)$. Чтобы определить такую операцию, нам надо для каждой пары (u, ξ) , где $\xi \in V^*$ и $u \in U$, задать линейное отображение $\phi_{u\xi}: V \rightarrow U$. Определим это отображение по правилу $\phi_{u\xi}(v) = \xi(v)u$. Это значит, что мы построили отображение $\mu: U \times V^* \rightarrow \text{Hom}_F(V, U)$ по правилу $(u, \xi) \mapsto \phi_{u\xi}$.

Давайте проверим, что эта операция является универсальной. Пусть $e_1, \dots, e_n \in V$ – некоторый базис V , $f_1, \dots, f_m \in U$ – некоторый базис U и $\xi_1, \dots, \xi_n \in V^*$ – базис V^* двойственный к e_i . Нам надо показать, что $\phi_{f_i \xi_j}$ являются базисом $\text{Hom}_F(V, U)$. Для этого посчитаем матрицы этих отображений в паре базисов e_1, \dots, e_n и f_1, \dots, f_m . Заметим, что

$$\phi_{f_i \xi_j}(e_1, \dots, e_n) = (f_1, \dots, f_m) E_{ij}, \quad \text{где } E_{ij} \text{ – матричная единица}$$

Что и требовалось. Нарисуем соответствующую коммутативную диаграмму:

$$\begin{array}{ccc} U \times V^* & \xrightarrow{\otimes} & U \otimes_F V^* \\ & \searrow \mu & \downarrow \phi \\ & & \text{Hom}_F(V, U) \end{array} \quad \begin{array}{ccc} (u, \xi) & \xrightarrow{\otimes} & u \otimes \xi \\ & \searrow \mu & \downarrow \phi \\ & & \phi_{u\xi} \end{array}$$

Таким образом тензорное $U \otimes_F V^*$ произведение можно отождествить с линейными отображениями $\text{Hom}_F(V, U)$, при этом отождествлении операция тензорного произведения совпадает с операцией $(u, \xi) \mapsto \phi_{u\xi}$, а разложимый тензор $v \otimes \xi$ соответствует отображению $\phi_{v\xi}$.

12.4 Индуцированное линейное отображение

Пусть $\phi: V \rightarrow U$ и $\psi: W \rightarrow E$ – линейные отображения векторных пространств над полем F . Давайте я озвучу план действий на сейчас. Мы хотим определить линейное отображение, которое будет обозначаться $\phi \otimes \psi: V \otimes_F W \rightarrow U \otimes_F E$. То есть мы перемножаем тензорно области определения двух отображений и их области значений, и на них естественным образом возникает новое отображение, обозначаемое $\phi \otimes \psi$. Элемент вида $\sum_i v_i \otimes w_i$ оно будет переводить в $\sum_i \phi(v_i) \otimes \psi(w_i)$. Мы могли бы не сильно мучиться и просто определить это отображение такой формулой, но так как запись тензора в виде такой суммы неоднозначно, то вообще говоря не понятно, почему это определение корректно. В целом тут есть два подхода как решить эту проблему. В случае векторных пространств мы знаем как строить линейные отображения. Достаточно в левом пространстве выбрать базис, задать на базисе отображение как надо, а потом проверить указанное свойство. И для векторных пространств этого подхода хватает выше крыши. Однако, я не хочу идти очевидным путем. Одна из причин в том, что идя необычным маршрутом можно увидеть необычные вещи. Потому предлагаю чуть-чуть потыкаться носом в формализм, а потом, утерев нос и слезу, пойти радостно применять полученные знания.

Построение индуцированного отображения Пусть $\phi: V \rightarrow U$ и $\psi: W \rightarrow E$ – линейные отображения векторных пространств над полем F . Рассмотрим следующую диаграмму

$$\begin{array}{ccc} V \times W & \xrightarrow{\otimes} & V \otimes_F W \\ \phi \times \psi \downarrow & \searrow \mu & \\ U \times E & \xrightarrow{\otimes} & U \otimes_F E \end{array} \quad \begin{array}{ccc} (v, w) & \xrightarrow{\otimes} & v \otimes w \\ \phi \times \psi \downarrow & \searrow \mu & \\ (\phi(v), \psi(w)) & \xrightarrow{\otimes} & \phi(v) \otimes \psi(w) \end{array}$$

В ней горизонтальные стрелки – это операции тензорного произведения на соответствующих пространствах. Вертикальная стрелка слева – это отображение множеств, когда мы на паре векторов действуем соответствующим линейным отображением. А диагональная стрелка μ – это композиция вертикальной стрелки и нижнего тензорного произведения.

Методом пристального взгляда определяем, что отображение $\mu: V \times W \rightarrow U \otimes_F E$ является билинейной (но НЕ обязательно универсальной!) операцией на $V \times W$. Потому по универсальности $V \otimes_F W$ существует

линейное отображение $V \otimes_F W \rightarrow U \otimes_F E$ такое, что диаграмма ниже коммутативна

$$\begin{array}{ccc} V \times W & \xrightarrow{\otimes} & V \otimes_F W \\ \phi \times \psi \downarrow & \searrow \mu & \downarrow \\ U \times E & \xrightarrow{\otimes} & U \otimes_F E \end{array} \quad \begin{array}{ccc} (v, w) & \xrightarrow{\otimes} & v \otimes w \\ \phi \times \psi \downarrow & \searrow \mu & \downarrow \\ (\phi(v), \psi(w)) & \xrightarrow{\otimes} & \phi(v) \otimes \psi(w) \end{array}$$

Полученное пунктиром отображение и обозначается $\phi \otimes \psi$. Кроме того, по построению мы видим, что $(\phi \otimes \psi)(v \otimes w) = \phi(v) \otimes \psi(w)$. А значит по линейности

$$(\phi \otimes \psi)\left(\sum_i v_i \otimes w_i\right) = \sum_i \phi(v_i) \otimes \psi(w_i)$$

Линейная независимость с векторными коэффициентами Теперь я хочу продемонстрировать, как можно применять индуцированные линейные отображения.

Утверждение 146. Пусть V и U – векторные пространства над полем F , $v_1, \dots, v_n \in V$ – линейно независимый набор векторов, $u_1, \dots, u_n \in U$ – какой-то набор векторов из U . Тогда если $v_1 \otimes u_1 + \dots + v_n \otimes u_n = 0$ в $V \otimes_F U$, то все $u_i = 0$.

Доказательство. Давайте для каждого i построим линейное отображение $\phi_i: V \otimes_F U \rightarrow U$ такое, что линейная комбинация $v_1 \otimes u_1 + \dots + v_n \otimes u_n$ перейдет в u_i . Тогда это автоматически докажет утверждение. Действительно, тогда

$$0 = \phi_i(0) = \phi_i(v_1 \otimes u_1 + \dots + v_n \otimes u_n) = u_i$$

Осталось лишь построить отображения с нужными свойствами. Для начала надо заметить, что мы можем построить линейные функции $\xi_i: V \rightarrow F$ по правилу $\xi_i(v_j) = 1$ если $i = j$ и 0 при $i \neq j$. Например, можно дополнить v_1, \dots, v_n до базиса и потом взять двойственный базис в V^* . Теперь можем рассмотреть следующую композицию

$$\phi_i: V \otimes_F U \xrightarrow{\xi_i \otimes \text{Id}} F \otimes_F U = U \quad \text{где} \quad v \otimes u \mapsto \xi_i(v) \otimes u \mapsto \xi_i(v)u$$

Теперь проверим, что полученные отображения обладают нужным свойством:

$$\phi_i(v_1 \otimes u_1 + \dots + v_n \otimes u_n) = \phi_i(v_1 \otimes u_1) + \dots + \phi_i(v_n \otimes u_n) = \xi_i(v_1)u_1 + \dots + \xi_i(v_n)u_n = u_i$$

Что и требовалось. □

Замечания

- Существует и другой способ показать справедливость этого утверждения, разложив все по базису тензорного произведения. А именно, можно дополнить v_1, \dots, v_n до базиса V , скажем v_1, \dots, v_k . Выбрать произвольный базис f_1, \dots, f_m в U и разложить u_i по f_j . После чего тензор $v_1 \otimes u_1 + \dots + v_n \otimes u_n$ раскладывается по базису $v_i \otimes f_j$ и его коэффициенты приравняются к нулю. Очень рекомендую проделать этот способ.
- Неформально это утверждение означает, что если векторы v_1, \dots, v_n были линейно независимы с числовыми коэффициентами в V , то они остаются линейно независимы в $V \otimes_F U$ с векторными коэффициентами из U .

Тензорное произведение нескольких пространств

Пусть V, U, W – векторные пространства над полем F . Тогда можно построить тензорное произведение всех трех пространств $V \otimes_F U \otimes_F W$. Конструкция такая же, как и в случае двух, а именно, пусть $e_1, \dots, e_n \in V$, $f_1, \dots, f_m \in U$, $g_1, \dots, g_r \in W$ – какие-нибудь базисы соответствующих пространств. Тогда картинки вида $e_i \otimes f_j \otimes g_k$ являются базисом пространства $V \otimes_F U \otimes_F W$. В этом случае определена тернарная операция линейная по каждому аргументу $V \times U \times W \rightarrow V \otimes_F U \otimes_F W$ по правилу $(v, u, w) \mapsto v \otimes u \otimes w$.¹¹³ То есть каждый элемент такого пространства имеет вид $\sum_i v_i \otimes u_i \otimes w_i$. Отметим, что это пространство можно было

¹¹³Здесь надо каждый вектор расписать по своему базису и воспользоваться линейностью операции по каждому аргументу.

бы строить так: сначала рассмотреть $E = V \otimes_F U$, а потом $E \otimes_F W = V \otimes_F U \otimes_F W$ (либо в другом порядке, метод пристального взгляда показывает, что результат не меняется).

Можно показать, что конструкция выше не зависит от базиса. Это делается аналогично тому, как мы поступали для двух аргументов. Можно развить теорию тернарных операций умножения (то есть линейных по каждому аргументу) и доказать, что построенная нами операция будет универсальной. Но я не буду мучить никого этими тривиальными, но абстрактными рассуждениями. Главное понять пример для двух пространств, который дает интуицию для произвольного случая. Аналогично можно строить тензорные произведения любого количества векторных пространств. И по аналогии, там будут жить картинки с большим количеством перечеркнутых кружков. Например, можно построить $V \otimes_F V^* \otimes_F U \otimes_F V \otimes_F W$, тогда в нем живут картинки вида $\sum_i v_i \otimes \eta_i \otimes u_i \otimes v'_i \otimes w_i$. И если я зафиксирую базисы e_i в V , ξ_i в V^* , f_i в U и g_i в W , то картинки вида $e_{i_1} \otimes \xi_{i_2} \otimes u_{i_3} \otimes e_{i_4} \otimes g_{i_5}$ будут базисом пространства $V \otimes_F V^* \otimes_F U \otimes_F V \otimes_F W$.

12.5 Свертка

Пусть V – векторное пространство над полем F и V^* – его двойственное. Тогда определена операция

$$\beta: V \times V^* \rightarrow F \quad \text{по правилу} \quad (v, \xi) \mapsto \xi(v)$$

Это правило является билинейным отображением. Действительно, мы должны проверить следующие четыре свойства:

1. $\beta(v_1 + v_2, \xi) = \xi(v_1 + v_2) = \xi(v_1) + \xi(v_2) = \beta(v_1, \xi) + \beta(v_2, \xi)$.
2. $\beta(\lambda v, \xi) = \xi(\lambda v) = \lambda \xi(v) = \lambda \beta(v, \xi)$.
3. $\beta(v, \xi_1 + \xi_2) = (\xi_1 + \xi_2)(v) = \xi_1(v) + \xi_2(v) = \beta(v, \xi_1) + \beta(v, \xi_2)$.
4. $\beta(v, \lambda \xi) = (\lambda \xi)(v) = \lambda \xi(v) = \lambda \beta(v, \xi)$.

В силу универсального свойства тензорного произведения, существует единственное линейное отображение $\text{ev}: V \otimes V^* \rightarrow F$ такое, что следующая диаграмма коммутативна.

$$\begin{array}{ccc} V \times V^* & \xrightarrow{\otimes} & V \otimes_F V^* \\ & \searrow \beta & \downarrow \text{ev} \\ & & F \end{array} \quad \begin{array}{ccc} (v, \xi) & \xrightarrow{\otimes} & v \otimes \xi \\ & \searrow \beta & \downarrow \text{ev} \\ & & \xi(v) \end{array}$$

Отображение ev называется сверткой. Из диаграммы выше следует, что на произвольном тензоре вида $\sum_i v_i \otimes \xi_i \in V \otimes V^*$ свертка вычисляется по правилу

$$\text{ev} \left(\sum_i v_i \otimes \xi_i \right) = \sum_i \xi_i(v_i)$$

В частности такое отображение корректно и не зависит от представления тензора в виде подобной суммы.

Примеры свертки

След матрицы Пусть $V = F^n$. Тогда $V^* = (F^n)^*$ – пространство строк длины n , которое тоже можно отождествить с F^n . В разделе 12.3 мы уже посчитали, что $F^n \otimes_F F^n = M_n(F)$ по правилу $\sum_i x_i \otimes y_i \mapsto \sum_i x_i y_i^t$. Тогда отображение свертки превращается в некоторое линейное отображение на квадратных матрицах, как показано ниже

$$\begin{array}{ccc} F^n \otimes_F F^n & & \\ \parallel & \searrow \text{ev} & \\ M_n(F) & \longrightarrow & F \end{array}$$

Давайте посчитаем, что получится. Возьмем произвольную матрицу $A \in M_n(F)$. Тогда для нее можно найти разложение вида $A = \sum_i x_i y_i^t$, где $x_i, y_i \in F^n$. Тогда матрица A соответствует тензору $\sum_i x_i \otimes y_i$. По определению свертка действует так:

$$\text{ev} \left(\sum_i x_i \otimes y_i \right) = \sum_i y_i^t x_i$$

С другой стороны давайте посчитаем след матрицы A , пользуясь разложением в матрицы ранга 1, получим

$$\text{tr } A = \text{tr} \left(\sum_i x_i y_i^t \right) = \sum_i \text{tr}(x_i y_i^t) = \sum_i \text{tr}(y_i^t x_i) = \sum_i y_i^t x_i$$

Как мы видим, после отождествления тензорного произведения с квадратными матрицами, свертка превращается в операцию вычисления следа матрицы.

Если стартовать с произвольного пространства V , то пространство $V \otimes_F V^*$ отождествляется с $\text{Hom}_F(V, V)$. Тогда отображение свертки $\text{ev}: V \otimes_F V^* \rightarrow F$ превращается в отображения взятия следа линейного оператора $\text{tr}: \text{Hom}_F(V, V) \rightarrow F$. Это один из способов спрятать использование базиса в определении следа оператора.

Умножение линейных отображений Пусть V, U, W – векторные пространства над полем F . Тогда у нас есть операция композиции отображений

$$\circ: \text{Hom}_F(U, W) \times \text{Hom}_F(V, U) \rightarrow \text{Hom}_F(V, W) \quad (\phi, \psi) \mapsto \phi \circ \psi$$

Для удобства изобразим на диаграмме

$$\begin{array}{ccccc} V & \xrightarrow{\psi} & U & \xrightarrow{\phi} & W \\ & \searrow \phi \circ \psi & & \nearrow & \end{array}$$

Теперь вспомним, что у нас есть следующие изоморфизмы (раздел 12.3)

$$\text{Hom}_F(V, U) = U \otimes_F V^* \quad \text{Hom}_F(U, W) = W \otimes_F U^* \quad \text{Hom}_F(V, W) = W \otimes_F V^*$$

Напомню, что, например, при изоморфизме $\text{Hom}_F(V, U) = U \otimes_F V^*$ тензор вида $\sum_i u_i \otimes \xi_i$ переходит в линейное отображение $\phi: V \rightarrow U$, действующее по правилу $\phi(v) = \sum_i \xi_i(v) u_i$. С учетом этих изоморфизмов, операция композиции превращается в следующую

$$\circ: W \otimes_F U^* \times U \otimes_F V^* \rightarrow W \otimes_F V^* \quad (w \otimes \eta, u \otimes \xi) \mapsto \eta(u) w \otimes \xi$$

По универсальному свойству тензорного произведения, это дает единственное линейное отображение

$$W \otimes_F U^* \otimes_F U \otimes_F V^* \rightarrow W \otimes_F V^* \quad w \otimes \eta \otimes u \otimes \xi \mapsto \eta(u) w \otimes \xi$$

Как мы видим, это отображение устроено так: мы сделали свертку для двух центральных множителей U^* и U , а остальные тензорные сомножители не тронули. Если быть чуть-чуть формальнее, то это отображение есть следующая композиция

$$W \otimes_F U^* \otimes_F U \otimes_F V^* \rightarrow W \otimes_F F \otimes_F V^* = W \otimes_F V^*$$

где первая стрелка задана отображением $w \otimes \eta \otimes u \otimes \xi \mapsto w \otimes \eta(u) \otimes \xi$, то есть является отображением

$$\text{Id} \otimes \text{ev} \otimes \text{Id}: W \otimes_F U^* \otimes_F U \otimes_F V^* \rightarrow W \otimes_F F \otimes_F V^*$$

А второе отображение $W \otimes_F F \otimes_F V^* \rightarrow W \otimes_F V^*$ задано по правилу $w \otimes \alpha \otimes \xi \mapsto \alpha w \otimes \xi$. Мы уже по сути его встречали в разделе 12.3.

12.6 Тензоры на пространстве V

Пусть V – некоторое векторное пространство над полем F . Рассмотрим пространство

$$T_k^m(V) = \underbrace{V \otimes_F \dots \otimes_F V}_m \otimes_F \underbrace{V^* \otimes_F \dots \otimes_F V^*}_k = V^{\otimes m} \otimes_F (V^*)^{\otimes k}$$

Элементы этого пространства называются тензорами типа (m, k) . Если e_1, \dots, e_n – базис пространства V , то он естественным образом индуцирует базис в пространстве $T_k^m(V)$. Прежде всего, он индуцирует двойственный базис e^1, \dots, e^n в пространстве V^* . После чего, в пространстве $T_k^m(V)$ возникает базис

$$e_{i_1} \otimes \dots \otimes e_{i_m} \otimes e^{j_1} \otimes \dots \otimes e^{j_k}, \quad \text{где } 1 \leq i_1, \dots, i_m, j_1, \dots, j_k \leq n$$

Тогда произвольный тензор типа (m, k) представляется единственным образом в виде суммы

$$\sum_{\substack{1 \leq i_1, \dots, i_m \leq n \\ 1 \leq j_1, \dots, j_k \leq n}} a_{j_1, \dots, j_k}^{i_1, \dots, i_m} e_{i_1} \otimes \dots \otimes e_{i_m} \otimes e^{j_1} \otimes \dots \otimes e^{j_k}$$

Таким образом любой тензор типа (m, k) задается многомерной матрицей $a_{j_1, \dots, j_k}^{i_1, \dots, i_m}$, где индексы поделены на два типа: верхние и нижние. Таким образом про тензоры можно думать, как про обобщение матриц. Когда у тензора 1 индекс, то это столбец или строка. Когда 2 индекса – это прямоугольная таблица, то есть матрица. А когда 3 индекса, то получается трехмерная таблица. Разницу между двумя типами индексов я продемонстрирую на примерах ниже.

Примеры

- Тензоры типа $(1, 0)$. По определению $T_0^1(V) = V$. То есть это векторы. Тогда $\omega \in T_0^1(V)$ имеет вид $\omega = \sum_i x^i e_i$. Таким образом тензор типа $(1, 0)$ – это вектор из V и в базисе он задается столбцом с координатами x^1, \dots, x^n .
- Тензор типа $(0, 1)$. По определению $T_1^0(V) = V^*$. То есть это линейная функция. Тогда $\omega \in T_1^0(V)$ имеет вид $\omega = \sum_i y_i e^i$. Таким образом тензор типа $(0, 1)$ – это линейная функция на V и в базисе она задается строкой с координатами y_1, \dots, y_n .
- Тензор типа $(1, 1)$. По определению это $T_1^1(V) = V \otimes_F V^* = \text{Hom}_F(V, V)$. То есть это линейные операторы на V . Тогда $\omega \in T_1^1(V)$ имеет вид $\omega = \sum_{i,j} a_{ij}^i e_i \otimes e^j$. Если ϕ – соответствующий оператор, то

$$\phi(e_1, \dots, e_n) = (e_1, \dots, e_n) \begin{pmatrix} a_1^1 & a_2^1 & \dots & a_n^1 \\ a_1^2 & a_2^2 & \dots & a_n^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_1^n & a_2^n & \dots & a_n^n \end{pmatrix} \quad \text{или} \quad \phi(e_j) = \sum_i a_j^i e_i$$

Обратите внимание, как выглядят индексы. Верхний индекс – это строка, а нижний – столбец.

Обозначения Эйнштейна Как вы видите, расписывать тензоры типа (m, k) – огромное удовольствие. Еще большее удовольствие – количество знаков суммирования, которые у нас возникают. Для того, чтобы избавиться от лишних знаков суммы принято следующее соглашение: «если какой-то индекс в выражении встречается и сверху и снизу, то по нему ведется суммирование», например

$$\sum_i x^i e_i = x^i e_i \quad \text{или} \quad \text{tr } A = \sum_i a_i^i = a_i^i$$

В этих соглашениях, если y_i задает линейную функцию ξ , а x^j – вектор v , то $\xi(v)$, записываемой с помощью суммы $\sum_i y_i x^i$ превращается в $y_i x^i$.

Такие обозначения помогают избежать ошибок. Например, если вы случайно перемножили два вектора $v = x^i e_i$ и $u = y^i e_i$, то вы получите $x^i y^i$ и у вас нет суммирования. Это должно смутить и навести на мысль, что делается какая-то хрень. Я не буду использовать обозначения Эйнштейна, но полезно знать о нем, особенно, если вы будете читать какую-нибудь физическую литературу, тензоры там частые гости.

Смена базиса Мы с вами до сих пор записывали все тензоры типа (m, k) в одном базисе индуцированным базисом e_1, \dots, e_n . А что, если мы теперь поменяем базис на f_1, \dots, f_n , то как изменятся координаты тензора? Давайте запишем явные формулы. Пусть

$$(f_1, \dots, f_n) = (e_1, \dots, e_n)C, \quad \text{где } C \in M_n(F)$$

Тогда для двойственных базисов получаем (утверждение 134)

$$(f^1, \dots, f^n) = (e^1, \dots, e^n)C^{-t}$$

Введем явные обозначения для коэффициентов матриц C и C^{-1} как ниже

$$C = \begin{pmatrix} c_1^1 & \dots & c_n^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_1^n & \dots & c_n^n \end{pmatrix} \quad \text{и} \quad C^{-1} = \begin{pmatrix} d_1^1 & \dots & d_n^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_1^n & \dots & d_n^n \end{pmatrix}$$

В координатах формулы смены базиса превращаются в следующие

$$f_j = \sum_i c_j^i e_i \quad \text{и} \quad f^j = \sum_i d_i^j e^i$$

Тот факт, что для двойственного базиса мы используем транспонированную к обратной матрице отражен в этой формуле суммированием по нижнему индексу, а не по верхнему. Пусть теперь у нас есть тензор $\omega \in T_k^m(V)$ который в двух базисах представляется так:

$$\begin{aligned} \omega &= \sum_{\substack{1 \leq i_1, \dots, i_m \leq n \\ 1 \leq j_1, \dots, j_k \leq n}} a_{j_1, \dots, j_k}^{i_1, \dots, i_m} e_{i_1} \otimes \dots \otimes e_{i_m} \otimes e^{j_1} \otimes \dots \otimes e^{j_k} \\ \omega &= \sum_{\substack{1 \leq i_1, \dots, i_m \leq n \\ 1 \leq j_1, \dots, j_k \leq n}} b_{j_1, \dots, j_k}^{i_1, \dots, i_m} f_{i_1} \otimes \dots \otimes f_{i_m} \otimes f^{j_1} \otimes \dots \otimes f^{j_k} \end{aligned}$$

Тогда, подставив в последнее равенство выражение f_i через e_i и f^j через e^j , мы получим формулу

$$a_{j_1, \dots, j_k}^{i_1, \dots, i_m} = \sum_{\substack{1 \leq \bar{i}_1, \dots, \bar{i}_m \leq n \\ 1 \leq \bar{j}_1, \dots, \bar{j}_k \leq n}} b_{\bar{j}_1, \dots, \bar{j}_k}^{\bar{i}_1, \dots, \bar{i}_m} c_{i_1}^{\bar{i}_1} \dots c_{i_m}^{\bar{i}_m} d_{j_1}^{\bar{j}_1} \dots d_{j_k}^{\bar{j}_k}$$

Обратите внимание, что в случае векторов, линейных функций и линейных операторов эти формулы превращаются в уже известные нам:

- Если $\omega \in T_0^1(V) = V$, то $\omega = \sum_i a^i e_i = \sum_i b^i f_i$. Тогда $a^i = \sum_j b^j c_j^i$, что в матричной форме превращается в знакомую нам формулу (формулы в конце раздела 6.7)

$$\begin{pmatrix} a^1 \\ \vdots \\ a^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1^1 & \dots & c_n^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_1^n & \dots & c_n^n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b^1 \\ \vdots \\ b^n \end{pmatrix}$$

- Если $\omega \in T_1^0(V) = V^*$, $\omega = \sum_i a_i e^i = \sum_i b_i f^i$. Тогда $a_i = \sum_j b_j d_i^j$, что превращается в знакомую формулу (это частный случай формул смены координат из раздела 6.7 но в двойственном пространстве, где делается замена двойственного базиса по формулам из утверждения 134)

$$(a_1 \quad \dots \quad a_n) = (b_1 \quad \dots \quad b_n) \begin{pmatrix} d_1^1 & \dots & d_n^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_1^n & \dots & d_n^n \end{pmatrix}$$

- Если $\omega \in T_1^1(V) = V \otimes_F V^* = \text{Hom}_F(V, V)$, то $\omega = \sum_{ij} a_{ij}^i e_i \otimes e^j = \sum_{ij} b_{ij}^i f_i \otimes f^j$. Тогда формула замены координат превращается в формулу (раздел про матрицу линейного оператора в разделе 9.2)

$$\begin{pmatrix} a_1^1 & \dots & a_n^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_1^n & \dots & a_n^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1^1 & \dots & c_n^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_1^n & \dots & c_n^n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1^1 & \dots & b_n^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_1^n & \dots & b_n^n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_1^1 & \dots & d_n^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_1^n & \dots & d_n^n \end{pmatrix}$$

13 Билинейные формы

Мы уже видели с вами разные способы перемножать векторы и нашли самый «лучший» – тензорное произведение. Однако, универсальные операции не всегда самые интересные. Так оказывается, что полезно уметь перемножать векторы так, чтобы в результате получалось число. Такие операции называются билинейными формами. В случае вещественных пространств особый вид билинейных форм нам даст так называемые скалярные произведения, которые снабдят пространство углами и расстояниями. Мы хотим плавно двигаться в их сторону. Тем не менее для полноты картины, я хочу осветить несколько содержательных моментов в общей теории билинейных форм. В случае общих билинейных форм мы обсудим понятие двойственности. А потом перейдем к билинейным формам на одном пространстве. Среди них интерес представляют симметричные билинейные формы. Для них мы найдем удобную классификацию (на самом деле полная классификация будет только над комплексными и вещественными числами). Ну а потом мы перейдем к скалярным произведениям.

13.1 Определение и примеры

Определение 147. Пусть V и U – векторные пространства над полем F . Билинейная форма на паре пространств V и U – это билинейное отображение $\beta: V \times U \rightarrow F$, то есть такое отображение, что выполнены следующие свойства:

1. $\beta(v_1 + v_2, u) = \beta(v_1, u) + \beta(v_2, u)$ для всех $v_1, v_2 \in V$ и $u \in U$.
2. $\beta(\lambda v, u) = \lambda \beta(v, u)$ для всех $v \in V$, $u \in U$ и $\lambda \in F$.
3. $\beta(v, u_1 + u_2) = \beta(v, u_1) + \beta(v, u_2)$ для всех $v \in V$ и $u_1, u_2 \in U$.
4. $\beta(v, \lambda u) = \lambda \beta(v, u)$ для всех $v \in V$, $u \in U$ и $\lambda \in F$.

Таким образом, билинейная форма на V и U – это правило, которому скармливают два вектора (один из V , другой из U), а на выходе оно выдает нам число. Причем это число линейно зависит от каждого из аргументов. Множество всех билинейных форм на паре пространств V и U будем обозначать через $\text{Bil}(V, U)$.

Билинейная форма – это функция от двух аргументов. А про функции от двух аргументов можно думать, как про оператор. Давайте запишем нашу билинейную форму $\beta: V \times U \rightarrow F$ в следующем виде $\beta(v, u) = v \cdot_\beta u$, где выражение справа – это все та же билинейная форма но в операторной записи. Тогда определение билинейной формы можно переписать так:

Определение 148. Пусть V и U – векторные пространства над полем F . Билинейная форма на паре пространств V и U – это отображение $\cdot_\beta: V \times U \rightarrow F$ такое, что

1. $(v_1 + v_2) \cdot_\beta u = v_1 \cdot_\beta u + v_2 \cdot_\beta u$ для всех $v_1, v_2 \in V$ и $u \in U$.
2. $(\lambda v) \cdot_\beta u = \lambda(v \cdot_\beta u)$ для всех $v \in V$, $u \in U$ и $\lambda \in F$.
3. $v \cdot_\beta (u_1 + u_2) = v \cdot_\beta u_1 + v \cdot_\beta u_2$ для всех $v \in V$ и $u_1, u_2 \in U$.
4. $v \cdot_\beta (\lambda u) = \lambda(v \cdot_\beta u)$ для всех $v \in V$, $u \in U$ и $\lambda \in F$.

То есть наше определение превращается в определение умножения дистрибутивного по обоим аргументам и согласованное с умножением на скаляр.

Примеры

1. Начнем с самого популярного примера: $\beta: F^n \times F^n \rightarrow F$ по правилу $\beta(x, y) = x^t y$. Этот товарищ нам известен в случае $F = \mathbb{R}$ и $n \leq 3$ как скалярное произведение. Над произвольным полем у него уже нет такой выделенной роли (даже над \mathbb{C} оно уже не так хорошо как над \mathbb{R}), однако, это достаточно общий пример, как будет видно из классификационной теоремы.
2. Пусть $C[a, b]$ – множество непрерывных функций на отрезке $[a, b]$, тогда рассмотрим следующую форму $\beta: C[a, b] \times C[a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ по правилу $(f, g) \mapsto \int_a^b f(x)g(x) dx$.
3. Отображение $M_n(F) \times M_n(F) \rightarrow F$ по правилу $(A, B) \mapsto \text{tr}(A^t B)$ так же является билинейной формой. Тут можно было бы использовать $\text{tr}(AB)$ или другие разновидности. Однако, версия $\text{tr}(A^t B)$ в случае поля \mathbb{R} обладает весьма замечательными свойствами, как и пример из пункта (1).

4. До сих пор у нас были примеры на одном векторном пространстве. Пусть V – некоторое векторное пространство, тогда отображение $\langle \cdot, \cdot \rangle: V^* \times V \rightarrow F$ по правилу $(\xi, v) \mapsto \langle \xi, v \rangle := \xi(v)$ называется естественной билинейной формой.^{114,115}

13.2 Матрица билинейной формы

При изучении любого объекта один из первых вопросов: «а как этот объект задавать?» Сейчас мы коснемся этого вопроса для билинейных форм и начнем со следующего.

Определение 149. Пусть $\beta: V \times U \rightarrow F$ – некоторая билинейная форма, $e_1, \dots, e_n \in V$ – базис пространства V и $f_1, \dots, f_m \in U$ – базис пространства U . Тогда матрица B_β с коэффициентами $b_{ij} = \beta(e_i, f_j)$ называется матрицей билинейной формы β в паре базисов e_1, \dots, e_n и f_1, \dots, f_m .

Утверждение 150. Пусть $\beta: V \times U \rightarrow F$ – некоторая билинейная форма, $e = (e_1, \dots, e_n)$ – базис пространства V и $f = (f_1, \dots, f_m)$ – базис пространства U . Пусть $v = ex$, $x \in F^n$, $u = fy$, $y \in F^m$ и B – матрица билинейной формы β в базисах e и f . Тогда $\beta(v, u) = x^t B y$.

Доказательство. Действительно,

$$\beta(v, u) = \beta\left(\sum_{i=1}^n x_i e_i, \sum_{j=1}^m y_j f_j\right) = \sum_{i,j} x_i y_j \beta(e_i, f_j) = x^t B y$$

□

Таким образом, когда вы работаете с парой пространств V и U , после выбора базиса они превращаются в F^n и F^m , соответственно, а билинейная форма $\beta: V \times U \rightarrow F$ превращается в отображение $\beta: F^n \times F^m \rightarrow F$ по правилу $(x, y) \mapsto x^t B y$.

Утверждение 151. Пусть $\beta: V \times U \rightarrow F$ – некоторая билинейная форма, $e = (e_1, \dots, e_n)$ – базис пространства V и $f = (f_1, \dots, f_m)$ – базис пространства U . Тогда отображение $\text{Bil}(V, U) \rightarrow M_{n,m}(F)$ по правилу $\beta \mapsto B_\beta$ является биекцией.

Доказательство. Из утверждения 150 следует, что $\beta(x, y) = x^t B_\beta y$. Значит, билинейная форма восстанавливается по своей матрице и отображение $\beta \mapsto B_\beta$ инъективно. Обратно, если $B \in M_{n,m}(F)$ – произвольная матрица, то рассмотрим форму $\beta(x, y) = x^t B y$. Тогда по определению $B = B_\beta$. □

Матричный формализм Пусть $\beta: V \times U \rightarrow F$ – билинейная форма и пусть $v = (v_1, \dots, v_s)$ – некоторый набор векторов из V и $u = (u_1, \dots, u_t)$ – набор векторов из U . Тогда рассмотрим следующую конструкцию

$$v^t \cdot_\beta u = \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_s \end{pmatrix} \cdot_\beta \begin{pmatrix} u_1 & \dots & u_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1 \cdot_\beta u_1 & \dots & v_1 \cdot_\beta u_t \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_s \cdot_\beta u_1 & \dots & v_s \cdot_\beta u_t \end{pmatrix}$$

То есть мы умножаем столбец из векторов из V на строку из векторов из U с помощью билинейной формы, рассматриваемой как оператор умножения. Тогда результат будет матрица из $M_{s,t}(F)$. Причем умножение происходит по тем же самым формальным правилам, что и обычное матричное умножение, только с использованием \cdot_β вместо обычного умножения (которое для векторов даже не определено).

Тогда, если выбрать $e = (e_1, \dots, e_n)$ – базис V и $f = (f_1, \dots, f_m)$ – базис U , то

$$B_\beta = e^t \cdot_\beta f = \begin{pmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_n \end{pmatrix} \cdot_\beta \begin{pmatrix} f_1 & \dots & f_m \end{pmatrix}$$

Мы привыкли, что в случае линейных отображений вычисления можно вести в удобной матричной форме. Последнее равенство позволяет вычисления с билинейными формами сводить к матричной.

¹¹⁴Это один из главных примеров, ради которого и вводится понятие билинейной формы на паре разных пространств. Основной плюс от этого подхода в том, что выражение $\langle \xi, v \rangle$ симметрично относительно своих аргументов в отличие от $\xi(v)$ и позволяет думать и работать с векторами и функциями на равных правах.

¹¹⁵Про эту симметрию мы уже говорили в замечании после определения 133.

Утверждение 152. Пусть V и U – векторные пространства над полем F , $e_1, \dots, e_n \in V$ – базис V и $f_1, \dots, f_m \in U$ – базис U . Тогда для любого набора чисел $b_{ij} \in F$, где $1 \leq i \leq n$ и $1 \leq j \leq m$, существует единственная билинейная форма $\beta: V \times U \rightarrow F$ такая, что $\beta(e_i, f_j) = b_{ij}$.

Доказательство. По сути – это переформулировка утверждения 151. □

Утверждение 153. Пусть $\beta: V \times U \rightarrow F$ – билинейная форма. Пусть в пространстве V зафиксировано два базиса $e = (e_1, \dots, e_n)$ и $e' = (e'_1, \dots, e'_n)$ с матрицей перехода $C \in M_n(F)$ такой, что $e' = eC$, пусть в пространстве U также зафиксированы два базиса $f = (f_1, \dots, f_m)$ и $f' = (f'_1, \dots, f'_m)$ с матрицей перехода $D \in M_m(F)$ такой, что $f' = fD$. Если B_β – матрица β в базисах e и f и B'_β – матрица β в базисах e' и f' , тогда $B'_\beta = C^t B_\beta D$.

Доказательство. Пользуясь только что введенным формализмом можно проделать следующие вычисления:¹¹⁶

$$B'_\beta = (e')^t \cdot_\beta f' = (eC)^t \cdot_\beta (fD) = (C^t e^t) \cdot_\beta (fD) = C^t (e^t \cdot_\beta f) D = C^t B_\beta D$$

□

Замечания

- Заметим, что если билинейная форма определена на одном пространстве $\beta: V \times V \rightarrow F$, то достаточно выбрать один базис $e = (e_1, \dots, e_n)$, после чего коэффициенты B_β считаются по правилу $b_{ij} = \beta(e_i, e_j)$. При этом, если $e' = (e'_1, \dots, e'_n)$ – другой базис и $e' = eC$, где C – матрица перехода, то $B'_\beta = C^t B_\beta C$.
- Пусть у нас есть два векторных пространства V и U . Тогда на них могут жить два разного рода объектов: линейные отображения и билинейные формы, например, $\phi: V \rightarrow U$ и $\beta: U \times V \rightarrow F$. Если мы выберем базис в V и базис в U , то V превращается в F^n , а U – в F^m . В этом случае, линейное отображение ϕ описывается некоторой матрицей $A \in M_{m \times n}(F)$, при этом $\phi(x) = Ax$. С другой стороны, билинейная форма тоже описывается матрицей $B \in M_{m \times n}(F)$, при этом $\beta(x, y) = x^t B y$.

Таким образом, для описания и линейных отображений и билинейных форм в фиксированном базисе мы используем матрицы (причем одного и того же размера). Возникает вопрос: «а как понять, когда матрица задает линейное отображение, а когда билинейную форму?» Если нам выдали только одну пару базисов и матрицу S , то ответ простой – никак. В фиксированном базисе они не отличимы. Мы можем считать нашу матрицу S линейным оператором или билинейной формой, в зависимости от наших предпочтений. Однако, если нам выдали несколько базисов, например два, и в этих базисах наш объект задается матрицами S и S' . То отличить оператор от билинейной формы можно по формуле перехода, а именно, если задан оператор, то $S' = C^{-1} S D$, а если билинейная форма, то $S' = C^t S D$. Конечно, если базисы трепетно подобраны (врагом или другом – это как повезет), то мы все равно можем не заметить разницы. Но если мы будем сравнивать во всех возможных базисах, то ответ определяется однозначно.

13.3 Матричные характеристики билинейной формы

В случае линейного отображения или оператора мы поступали так: выбирали базисы (или базис) и задавали их матрицами. Потом считали какие-то характеристики этих самых матриц и показывали, что они не зависят от базисов. В случае линейных отображений между разными пространствами у нас по сути была только одна характеристика – ранг. Оказывается, что для билинейных форм на паре разных пространств это тоже корректная характеристика.

Ранг Пусть $\beta: V \times U \rightarrow F$ – билинейная форма и в каких то парах базисов она задана матрицами B и B' . Тогда $B' = C^t B D$ для некоторых невырожденных матриц C и D . Тогда $\text{rk } B' = \text{rk } B$, так как он не меняется при умножении слева и справа на невырожденную матрицу (утверждение 71).

¹¹⁶Обратите внимание, что тут у нас присутствует два умножения: матричное с числами и матричное с билинейной формой. Порядок этих операций (то есть расстановка скобок) не важны, это следует просто из определения билинейной формы, если присмотреться внимательно.

13.4 Ортогональные дополнения и ядра

Определение 154. Пусть $\beta: V \times U \rightarrow F$ – билинейная форма. Тогда

- Если $X \subseteq V$ – произвольное подмножество, тогда правое ортогональное дополнение к X это

$$X^\perp = \{u \in U \mid \beta(x, u) = 0 \forall x \in X\} = \{u \in U \mid \beta(X, u) = 0\}$$

- Если $Y \subseteq U$ – произвольное подмножество, тогда левое ортогональное дополнение к Y это

$${}^\perp Y = \{v \in V \mid \beta(v, y) = 0 \forall y \in Y\} = \{v \in V \mid \beta(v, Y) = 0\}$$

Замечания

- Когда понятно о чем идет речь и нет путаницы, обычно оба дополнения обозначают X^\perp и X^\perp . Обычно это не мешает если пространства V и U разные, так как каждое дополнение живет в своем отдельном пространстве. Однако, если форма определена на одном пространстве $\beta: V \times V \rightarrow F$, то приходится использовать разные обозначения, так как для $X \subseteq V$ определены оба дополнения X^\perp и ${}^\perp X$ и оба живут в V . Я постараюсь различать дополнения там, где это необходимо.
- Стоит отметить, что ортогональное дополнение X^\perp к подмножеству $X \subseteq V$ обязательно будет подпространством в U , аналогично и для второго дополнения.

Пример Давайте выясним как считать левое и правое ортогональные дополнения к подпространству. Пусть $\beta: F^n \times F^m \rightarrow F$ – некоторая билинейная форма заданная $\beta(x, y) = x^t B y$, где $B \in M_{nm}(F)$. Пусть $W = \langle w_1, \dots, w_s \rangle \subseteq F^n$ – некоторое подпространство заданное в виде линейной оболочки. Положим $T = (w_1 | \dots | w_s) \in M_{ns}(F)$ – матрица из столбцов w_i . Тогда

$$W^\perp = \{y \in F^m \mid T^t B y = 0\}$$

Аналогично, если $U = \langle u_1, \dots, u_r \rangle \subseteq F^m$ – подпространство и $P = (u_1 | \dots | u_r)$ – матрица из столбцов u_i . То

$${}^\perp U = \{x \in F^n \mid x^t B P = 0\} = \{x \in F^n \mid P^t B^t x = 0\}$$

Определение 155. Пусть $\beta: V \times U \rightarrow F$ – некоторая билинейная форма, тогда ее правым ядром называется $\ker^R \beta = V^\perp$, а левым ядром $\ker^L \beta = {}^\perp U$.

Смысл левого ядра в том, что это такие векторы из V , которые на что из U ни умножай, все равно получишь 0. В этом смысле – это не интересные векторы, изучение которых с точки зрения билинейной форм невозможно. Аналогично с правым ядром.

Пример Пусть $\beta: F^n \times F^m \rightarrow F$ – некоторая билинейная форма заданная правилом $\beta(x, y) = x^t B y$, где $B \in M_{nm}(F)$. Тогда $\ker^R \beta = \{y \in F^m \mid B y = 0\}$ и $\ker^L \beta = \{x \in F^n \mid x^t B = 0\} = \{x \in F^n \mid B^t x = 0\}$.

Определение 156. Билинейная форма $\beta: V \times U \rightarrow F$ называется невырожденной, если $\ker^R \beta = 0$ и $\ker^L \beta = 0$.

Утверждение 157. Билинейная форма $\beta: V \times U \rightarrow F$ невырождена тогда и только тогда, когда $\dim V = \dim U$ и матрица формы β невырождена.

Доказательство. Пусть форма β невырожденная. Выберем базисы в V и U , тогда наша билинейная форма превратится в $\beta: F^n \times F^m \rightarrow F$ по правилу $(x, y) \mapsto x^t B y$ для некоторой матрицы $B \in M_{nm}(F)$. Тогда

$$\ker^R \beta = \{y \in F^m \mid B y = 0\} \quad \text{и} \quad \ker^L \beta = \{x \in F^n \mid B^t x = 0\}$$

Если размерности пространств разные, то матрица B не квадратная и хотя бы одно из ядер не ноль, так как хотя бы одна из систем $B y = 0$ или $B^t x = 0$ содержит переменных больше чем уравнений, а значит есть ненулевое решение. Теперь мы знаем, что B квадратная и система $B y = 0$ имеет только нулевые решения, значит B – невырожденная матрица по утверждению 3.

Обратно, пусть $\dim V = \dim U$ и матрица B_β не вырождена. Тогда в каких-то координатах β записывается так $\beta: F^n \times F^n \rightarrow F$ по правилу $(x, y) \mapsto x^t B y$. Так как B невырожденная, то системы $B y = 0$ и $B^t x = 0$ имеют только нулевые решения, значит оба ядра нулевые, значит форма невырожденная. \square

Утверждение 158. Пусть $\beta: V \times U \rightarrow F$ – некоторая билинейная форма, тогда.¹¹⁷

1. $\dim \ker^L \beta + \text{rk } \beta = \dim V$
2. $\dim \ker^R \beta + \text{rk } \beta = \dim U$

Доказательство. Докажем для определенности первое утверждение, другое ему симметрично. Записав все в координатах, мы имеем $\beta: F^n \times F^m \rightarrow F$ по правилу $\beta(x, y) = x^t B y$. И для левого ядра мы имеем $\ker^L \beta = \{x \in F^n \mid B^t x = 0\}$. Тогда $\dim \ker^L \beta$ – количество свободных переменных системы $B^t x = 0$ (раздел 6.8 о ФСР), $\text{rk } \beta$ – количество главных переменных системы $B^t x = 0$ (совпадает со строчным рангом B^t), а $\dim V$ – количество переменных системы $B^t x = 0$. Ну а количество главных плюс количество свободных переменных – это все переменные. \square

13.5 Двойственность для подпространств

Утверждение 159. Пусть $\beta: V \times U \rightarrow F$ – невырожденная билинейная форма. Тогда:

1. Для любого подпространства $W \subseteq V$ выполнено

$$\dim W^\perp + \dim W = \dim V$$

2. Для любого подпространства $W \subseteq V$ выполнено ${}^\perp(W^\perp) = W$.
3. Для любых подпространств $W \subseteq E \subseteq V$ верно, что $W^\perp \supseteq E^\perp$. Причем $W = E$ тогда и только тогда, когда $W^\perp = E^\perp$.
4. Для любых подпространств $W, E \subseteq V$ выполнено равенство

$$(W + E)^\perp = W^\perp \cap E^\perp$$

5. Для любых подпространств $W, E \subseteq V$ выполнено равенство

$$(W \cap E)^\perp = W^\perp + E^\perp$$

Аналогично выполнены все свойства для подпространств $W \subseteq U$ и их левых ортогональных дополнений ${}^\perp W$.

Доказательство. Давайте прежде всего перейдем в координаты выбрав какой-нибудь базис V и U . Тогда получим $\beta: F^n \times F^m \rightarrow F$ по правилу $\beta(x, y) = x^t B y$, где $B \in M_n(F)$ – невырожденная матрица.

(1) Пусть $W = \langle w_1, \dots, w_r \rangle$ задано своим базисом и $T = (w_1 | \dots | w_r) \in M_{n \times r}(F)$. Тогда $W^\perp = \{y \in F^m \mid T^t B y = 0\}$. Так как матрица B невырожденная, то $\text{rk}(T^t B) = \text{rk}(T^t) = r$ (утверждение 71). В очередной раз все интерпретируем в терминах свободных и главных переменных системы $T^t B y = 0$. Имеем: $\dim W = r$ – это количество главных переменных системы, $\dim W^\perp$ – это количество свободных переменных, а $\dim V$ – это количество всех переменных, что и требовалось.

(2) Давайте в начале покажем, что $W \subseteq {}^\perp(W^\perp)$, а потом сравним их размерности. Пусть $w \in W$, нам надо показать, что $w \in {}^\perp(W^\perp)$. То есть нам надо показать, что $\beta(w, W^\perp) = 0$. То есть для любого $v \in W^\perp$ надо показать, что $\beta(w, v) = 0$. Однако, по определению, если $v \in W^\perp$, то $\beta(w, v) = 0$ для любого $w \in W$, что и требовалось. Теперь надо показать, что пространства имеют одинаковую размерность. Для этого воспользуемся пунктом (1):

$$\dim {}^\perp(W^\perp) = \dim U - \dim W^\perp = \dim U - (\dim V - \dim W) = \dim W$$

последнее равенство в силу того, что $\dim U = \dim V$. А раз пространства вложены и имеют одинаковую размерность, то они совпадают.

- (3) Пусть $W \subseteq E \subseteq V$, тогда

$$W^\perp = \{u \in U \mid \beta(w, u) = 0, w \in W\} \quad \text{и} \quad E^\perp = \{u \in U \mid \beta(e, u) = 0, e \in E\}$$

¹¹⁷Это утверждение является прямым аналогом утверждения 83 для линейных отображений и является очередным проявлением тривиального наблюдения для систем линейных уравнений, что количество главных и свободных переменных равно количеству всех переменных.

Заметим, что так как $W \subseteq E$, то справа ограничений не меньше, чем слева, а значит пространство не больше.

Пусть теперь $E, W \subseteq V$ – произвольные подпространства. Тогда если они равны, то и их ортогональные дополнения равны. Обратно, пусть $W^\perp = E^\perp$, тогда ${}^\perp(W^\perp) = {}^\perp(E^\perp)$, то есть по пункту (2) $W = E$.

(4) Рассмотрим левую и правую части равенства $(W + E)^\perp = W^\perp \cap E^\perp$ отдельно:

$$(W + E)^\perp = \{u \in U \mid \beta(w + e, u) = 0, \forall w \in W, \forall e \in E\}$$

С другой стороны

$$\begin{aligned} W^\perp \cap E^\perp &= \{u \in U \mid \beta(w, u) = 0, \forall w \in W\} \cap \{u \in U \mid \beta(e, u) = 0, \forall e \in E\} = \\ &= \{u \in U \mid \beta(w, u) = 0, \forall w \in W \text{ и } \beta(e, u) = 0, \forall e \in E\} \end{aligned}$$

Если $u \in W^\perp \cap E^\perp$, то $\beta(w, u) = 0$ и $\beta(e, u) = 0$ для любых $w \in W$ и $e \in E$, а значит и $\beta(w + e, u) = 0$, то есть $u \in (W + E)^\perp$. Обратно, если $u \in (W + E)^\perp$, то $\beta(w + e, u) = 0$ для любых $w \in W$ и $e \in E$. В частности для любого $w \in W$ и $e = 0 \in E$ получаем $\beta(w, u) = 0$, аналогично $w = 0 \in W$ и любого $e \in E$ получаем $\beta(e, u) = 0$. То есть $u \in W^\perp \cap E^\perp$.

(5) Выведем это утверждение из предыдущего с помощью остальных. Действительно, чтобы доказать равенство $(W \cap E)^\perp = W^\perp + E^\perp$, необходимо и достаточно доказать ${}^\perp((W \cap E)^\perp) = {}^\perp(W^\perp + E^\perp)$ по пункту (3) вторая часть. В силу (2) это равносильно $W \cap E = {}^\perp(W^\perp + E^\perp)$. По пункту (4) для левых ортогональных дополнений получаем, что правая часть совпадает с ${}^\perp(W^\perp) \cap {}^\perp(E^\perp)$. И опять воспользовавшись (2), получаем $W \cap E$, то есть левую часть. \square

К этому утверждению надо относиться так. Процедура взятия ортогонального дополнения «переворачивает» множество подпространств «вверх ногами», меняет размерность на «коразмерность»¹¹⁸, обращает включения и меняет местами сумму и пересечение. Это один из способов переформулировать задачи про подпространства и сводить одни к другим. Если у вас есть задача на пересечение подпространств, то перейдя к ортогональным дополнениям, вы получаете эквивалентную задачу на сумму подпространств и решить ее – то же самое, что решить исходную задачу. Например, алгоритмы на поиск суммы и пересечения подпространств заданных порождающими, можно превратить в алгоритмы на поиск суммы и пересечения подпространств заданных системами, применив переход к ортогональному дополнению.

13.6 Двойственность для линейных отображений и операторов

В утверждении ниже, мы предполагаем, что все ортогональные дополнения берутся относительно естественной билинейной формы, то есть $\langle, \rangle: V^* \times V \rightarrow F$, где $(\xi, v) \mapsto \langle \xi, v \rangle := \xi(v)$. В данном случае, я не буду различать левые и правые ортогональные дополнения, так как понятно, в каком пространстве находятся соответствующие подпространства. В частности, если $W \subseteq V$, то $W^\perp \subseteq V^*$ и наоборот, если $W \subseteq V^*$, то $W^\perp \subseteq V$.

Давайте сделаем еще одно полезное замечание относительно изоморфизма $\phi: V \rightarrow V^{**}$. Посмотрим на следующую диаграмму

$$\begin{array}{ccc} V^* \times V & & (\xi, v) \\ \text{Id} \times \phi \downarrow & \searrow & \downarrow \\ V^* \times V^{**} & \rightarrow F & (\xi, \phi_v) \end{array} \quad \begin{array}{ccc} & & \swarrow \\ & & \phi_v(\xi) \\ & \nearrow & \searrow \\ & & \xi(v) \end{array}$$

Здесь горизонтальные стрелки – это естественные билинейные формы применения функции к вектору. Справа показано, как стрелки действуют на элементах. И равенство показывает, что диаграмма коммутативна. А это означает, что если мы возьмем подпространство $W \subseteq V^*$, то мы можем проделать с ним две процедуры:

1. В начале возьмем ортогональное дополнение относительно верхней формы и получим $W^\perp \subseteq V$, а потом применим ϕ и получим $\phi(W^\perp) \subseteq V^{**}$.
2. Сразу возьмем ортогональное дополнение относительно нижней формы и получим $W^\perp \subseteq V^{**}$.

Так вот, коммутативность диаграммы выше означает, что результаты этих двух операций совпадают, то есть полученные подпространства в V^{**} будут одинаковыми. Я утверждаю, что это объясняется методом пристального взгляда,¹¹⁹ и мы воспользуемся этим наблюдением в доказательстве следующего результата.

¹¹⁸Для подпространства $U \subseteq V$ его коразмерность – это $\dim V - \dim U$.

¹¹⁹Но как обычно слепым для прозрения рекомендую воспользоваться бумажкой и ручкой. Пригодится в любом случае: либо написать доказательство, либо вытереть слезы отчаяния.

Утверждение 160 (Альтернатива Фредгольма). Пусть $\varphi: V \rightarrow U$ – некоторое линейное отображение и $\varphi^*: U^* \rightarrow V^*$ – сопряженное к нему. Тогда

1. $(\operatorname{Im} \varphi)^\perp = \ker \varphi^*$.
2. $(\ker \varphi)^\perp = \operatorname{Im} \varphi^*$.

Доказательство. (1) Следующая цепочка равенств проводит доказательство:

$$\ker \varphi^* = \{\xi \in U^* \mid \varphi^*(\xi) = 0\} = \{\xi \in U^* \mid \xi\varphi = 0\} = \{\xi \in U^* \mid \xi(\operatorname{Im} \varphi) = 0\} = \{\xi \in U^* \mid \langle \xi, \operatorname{Im} \varphi \rangle = 0\} = (\operatorname{Im} \varphi)^\perp$$

Теперь докажем, что (1) влечет (2). По утверждению 159 пункты (2) и (3) равенство $(\ker \varphi)^\perp = \operatorname{Im} \varphi^*$ в пространстве V^* эквивалентно равенству $\ker \varphi = (\operatorname{Im} \varphi^*)^\perp$ в пространстве V . Теперь применим к этому равенству изоморфизм $\phi: V \rightarrow V^{**}$ (утверждение 138). Тогда $\ker \varphi$ перейдет в $\ker \varphi^{**}$ (это сразу следует из утверждения 138). Кроме того, $(\operatorname{Im} \varphi^*)^\perp \subseteq V$, где ортогональное дополнение берется относительно формы $V^* \times V \rightarrow F$, перейдет в $(\operatorname{Im} \varphi^*)^\perp \subseteq V^{**}$, где ортогональное дополнение берется относительно формы $V^* \times V^{**} \rightarrow F$. Это получается из замечания перед формулировкой утверждения выше. Потому нам достаточно показать, что $(\operatorname{Im} \varphi^*)^\perp = \ker(\varphi^*)^*$ в пространстве V^{**} . А это равносильно (1), примененному к отображению $\varphi^*: U^* \rightarrow V^*$. \square

Замечания

- Я хочу добавить пару замечаний о пользе утверждения выше. Не надо ожидать, что оно даст вам супер тайное знание, которое решит все проблемы. Нет, это скорее доказательство бессмысленного очевидного факта. Чтобы понять, почему он бессмысленный выберете базис в V , потом двойственный к нему в V^* и переформулируйте все на матричном языке. Очень удивитесь тому, какую элементарную дичь мы тут с вами делаем. А раз так, то надо бы объяснить, какого я вас тут мучаю заведомо более дурацким доказательством и совсем бессмысленным рассуждением.

Так вот, самая большая польза от этого утверждения – сломать мозг. А именно, я хочу продемонстрировать вам конструкции в рамках линейной алгебры, которые мозгу тяжело воспринимать, про которые сложно думать, но которые часто встречаются в математике. Причина, почему вам сложно, проста – у вас нет интуиции про эти объекты и вы никогда не проделывали подобные рассуждения и не видели таких конструкций. И потому самое полезное из произошедшего – вы все это увидели и у вас был шанс в этом разобраться или попробовать разобраться. Вот именно необходимость разобраться в абстрактной чуши и есть цель этого утверждения, как и его доказательства.

- Чуть выше я уже рекомендовал все перевести на матричный язык. Другое хорошее упражнение – попробовать расписать явно условие $(\ker \varphi)^\perp = \operatorname{Im} \varphi^*$ и доказать его в лоб без применения двойственности. Это тоже очень полезное упражнение. Вообще, очень полезно видеть разные способы доказать одно и то же, это помогает лучше понять место знания в экосистеме изученного.

В случае, когда $\varphi: V \rightarrow V$ является оператором, то у него намного больше характеристик, чем просто ядро и образ. Следующее утверждение подытоживает все знания об общих характеристиках воедино.

Утверждение 161. Пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – некоторый линейный оператор над полем F . Тогда

1. $\operatorname{tr} \varphi = \operatorname{tr} \varphi^*$.
2. $\det \varphi = \det \varphi^*$.
3. $\chi_\varphi = \chi_{\varphi^*}$.
4. $f_{\min, \varphi} = f_{\min, \varphi^*}$.
5. $\operatorname{spec}_F(\varphi) = \operatorname{spec}_F(\varphi^*)$.
6. $\operatorname{spec}_F^I(\varphi) = \operatorname{spec}_F^I(\varphi^*)$.
7. если $U \subseteq V$ – φ -инвариантное, то $U^\perp \subseteq V^*$ – φ^* -инвариантное.

Доказательство. Все утверждения кроме последнего следуют из утверждения 137, которое гласит, что при правильном выборе базисов в V и V^* матрицы φ и φ^* отличаются транспонированием.

(7) Нам дано $\varphi(U) \subseteq U$, а надо показать, что $\varphi^*(U^\perp) \subseteq U^\perp$. Пусть $\xi \in U^\perp$, то есть $\xi(U) = 0$, надо проверить, что $\varphi^*(\xi)(U) = 0$. То есть надо проверить, что $(\xi\varphi)(U) = 0$. Но $(\xi\varphi)(U) = \xi(\varphi(U)) \subseteq \xi(U) = 0$, что и требовалось. \square

Замечания

- Таким образом изучение оператора φ это тоже самое, что изучение оператора φ^* , если при этом «перевернуть» все пространства. То есть любой вопрос про φ^* можно переформулировать в терминах φ , заменив размерности подпространств в формулировках на n минус размерность (здесь n – размерность объемлющего пространства V).
- На самом деле для φ и φ^* совпадают жордановы нормальные формы. Действительно, если вы транспонируете матрицу в жордановой нормальной форме, то результирующая матрица будет иметь ту же самую жорданову нормальную форму.
- Хорошее упражнение для ума: пусть e_1, \dots, e_n – жорданов базис для φ , а e^1, \dots, e^n – двойственный к нему базис. Как из e^1, \dots, e^n получить жорданов базис для φ^* ?

Примеры

1. Пусть $\varphi: V \rightarrow V$ такой, что характеристический многочлен φ раскладывается на линейные множители. А это означает, что V раскладывается в прямую сумму корневых, то есть $V = V^{\lambda_1} \oplus \dots \oplus V^{\lambda_r}$ (утверждение 122). Так как характеристический многочлен у φ^* такой же, то $V^* = (V^*)^{\lambda_1} \oplus \dots \oplus (V^*)^{\lambda_r}$. Давайте покажем, что $(V^{\lambda_1})^\perp = (V^*)^{\lambda_2} \oplus \dots \oplus (V^*)^{\lambda_r}$.

Самый простой способ сделать это такой. Рассмотрим многочлен $p(t) = (t - \lambda_1)^{k_1}$, где k_1 – кратность λ_1 в χ_φ . Тогда $V^{\lambda_1} = \ker p(\varphi)$ (это, например, следует из утверждения 120, однако, можно просто взять достаточно большое k_1 и можно обойтись леммой о стабилизации – утверждение 104). По утверждению 160 о двойственности для линейных отображений, мы получаем, что $(\ker p(\varphi))^\perp = \text{Im}(p(\varphi))^* = \text{Im } p(\varphi^*)$. Последнее равенство проверяется в лоб:

$$p(\varphi)^* = \left(\sum_k a_k \varphi^k \right)^* = \sum_k a_k (\varphi^k)^* = \sum_k a_k (\varphi^*)^k = p(\varphi^*)$$

По утверждению 118 для оператора φ^* последний образ как раз и равен сумме оставшихся корневых.¹²⁰

2. Пусть $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор над полем \mathbb{C} . Тогда мы знаем, что обязательно найдется ненулевой собственный вектор $v \in V_\lambda$ для некоторого $\lambda \in \mathbb{C}$. Последнее равносильно тому, что найдется инвариантное одномерное подпространство $\langle v \rangle$. Давайте покажем, как с помощью двойственности автоматически найти инвариантное $n - 1$ мерное подпространство, где $n = \dim V$. Пусть $U \subseteq V^*$ – инвариантное одномерное для φ^* . Такое существует, потому что у φ^* есть собственный вектор (мы над полем \mathbb{C}). В этом случае $U^\perp \subseteq V$ будет $n - 1$ мерным и инвариантным для φ по пункту (7) предыдущего утверждения.

13.7 Классификационная задача для $\text{Bil}(V, U)$

Утверждение 162. Пусть V и U – векторные пространства над полем F размерностей n и m , соответственно, и пусть $A, B \in M_{nm}(F)$ – произвольные матрицы. Тогда эквивалентны следующие утверждения:

1. Матрицы A и B задают одну и ту же билинейную форму на V и U в разных базисах, т.е. существует билинейная форма $\beta: V \times U \rightarrow F$, два базиса в V : $e = (e_1, \dots, e_n)$ и $e' = (e'_1, \dots, e'_n)$ и два базиса в U : $f = (f_1, \dots, f_m)$ и $f' = (f'_1, \dots, f'_m)$ такие, что A является матрицей β в базисах e и f , а B является матрицей β в базисах e' и f' .
2. $\text{rk } A = \text{rk } B$.

Доказательство. Из (1) в (2) мы уже знаем, это корректность ранга билинейной формы.

Из (2) в (1). Так как ранги матриц A и B одинаковые, мы можем найти такие обратимые матрицы $C, R \in M_n(F)$ и $D, P \in M_m(F)$, что

$$A = C \begin{pmatrix} E & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} D, \quad B = R \begin{pmatrix} E & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} P$$

¹²⁰Если не понятно, на что я тут ссылаюсь, то загляните в доказательство утверждения 119 пункт (2), это должно снять все вопросы.

А значит $B = RC^{-1}AD^{-1}P$, то есть $B = S^tAT$, где $S = (RC^{-1})^t$ и $T = D^{-1}P$. Теперь нам надо найти билинейную форму и две пары базисов. Возьмем два произвольных базиса $e = (e_1, \dots, e_n)$ в V и $f = (f_1, \dots, f_m)$ в U и положим $\beta: V \times U \rightarrow F$ по правилу $\beta(v, u) = x^tAy$, где $v = ex$ и $x \in F^n$, $u = fy$ и $y \in F^m$. После положим $e' = eS$ и $f' = fT$. Так как S и T невырожденные матрицы, то e' будет базисом V , а f' – базисом U . Тогда в новой паре базисов матрица нашей билинейной формы будет S^tAT , что совпадает с B по построению. \square

Таким образом, как и в случае линейного отображения, две матрицы задают одну и ту же билинейную форму тогда и только тогда, когда их ранги совпадают.

13.8 Структура векторного пространства на $\text{Bil}(V, U)$

До сих пор мы смотрели на $\text{Bil}(V, U)$ как на множество билинейных форм, такой мешок, в котором аморфно лежат все наши замечательные симпатичные формочки, одна лучше другой. На самом деле $\text{Bil}(V, U)$ само является векторным пространством. По-простому, это означает, что на $\text{Bil}(V, U)$ есть хорошие операции сложения и умножения на константу.

Определение 163. Пусть $\beta_1, \beta_2: V \times U \rightarrow F$ – две билинейные формы. Мы хотим определить форму $\beta_1 + \beta_2$. Это значит, что нам надо определить отображение $(\beta_1 + \beta_2): V \times U \rightarrow F$. Определим его по правилу

$$(\beta_1 + \beta_2)(v, u) := \beta_1(v, u) + \beta_2(v, u)$$

Если $\beta: V \times U \rightarrow F$ – билинейная форма и $\lambda \in F$, тогда форму $(\lambda\beta): V \times U \rightarrow F$ определим по правилу

$$(\lambda\beta)(v, u) := \lambda\beta(v, u)$$

Замечания

- В качестве упражнения я предлагаю проверить, что $\beta_1 + \beta_2$ и $\lambda\beta$ – это не просто отображения из $V \times U$ в F , а билинейные формы, то есть удовлетворяют условиям определения 147. Это объясняет, что определенные выше операции корректны, то есть их результат – это тоже билинейная форма.
- В качестве другого упражнения я предлагаю проверить, что множество $\text{Bil}(V, U)$ является векторным пространством, то есть надо проверить аксиомы из определения 53.
- Чтобы немного вывернуть мозги наизнанку, давайте вспомним, что билинейные формы имеют операторную запись, то есть вместо $\beta: V \times U \rightarrow F$ мы будем писать $\cdot_\beta: V \times U \rightarrow F$, при этом $\beta(v, u) = v \cdot_\beta u$. То есть билинейные формы – это операции умножения векторов, которые в результате возвращают число. Так вот, мы только что определили как складывать и умножать на числа операции умножения так, что они остаются операциями умножения! Определения выше можно переписать так

$$\begin{aligned} v(\cdot_{\beta_1} + \cdot_{\beta_2})u &= v \cdot_{\beta_1} u + v \cdot_{\beta_2} u \\ v(\lambda \cdot_\beta)u &= \lambda(v \cdot_\beta u) \end{aligned}$$

Неправда ли выносит мозг? Это лишний раз говорит о том, что в математике очень важно правильно думать об объекте. Сложение билинейных форм не представляется нам чем-то особенным, вот умение складывать операции умножения кажется диким. Психологические барьеры надо уметь перепрыгивать.

Теперь вспомним, что фиксируя базисы в пространствах V и U , каждая билинейная форма превращается в матрицу (утверждение 151). Так вот, заметим, что это превращение является изоморфизмом между векторными пространствами. Для полноты картины я все же сформулирую сам результат.

Утверждение 164. Пусть $\beta: V \times U \rightarrow F$ – некоторая билинейная форма, $e = (e_1, \dots, e_n)$ – базис пространства V и $f = (f_1, \dots, f_m)$ – базис пространства U . Тогда отображение $\text{Bil}(V, U) \rightarrow M_{nm}(F)$ по правилу $\beta \mapsto B_\beta$ является изоморфизмом.

Следующая наша задача разобраться со случаем аналогичным случаю оператора, а именно: билинейная форма определена на одном пространстве.

14 Билинейные формы на одном пространстве $\text{Bil}(V)$

В случае, когда линейное отображение определено на одном пространстве (линейный оператор), у нас в запасе намного больше конструкций и характеристик, чем в случае общего линейного отображения. Аналогичная ситуация обстоит и с билинейными формами. В случае, когда билинейная форма живет на одном пространстве у нас на много больше характеристик и поведение ее изучать несколько сложнее. Ниже я буду рассказывать о билинейных формах на одном пространстве. Окажется, что от части ситуация с билинейными формами технически сильно проще, чем случай линейных операторов.

14.1 Симметричность и кососимметричность

Первое отличие билинейных форм на одном пространстве от общего случая заключается в том, что мы можем подставлять один и тот же вектор как в качестве левого, так и в качестве правого аргумента. Благодаря можно выделить классы симметричных и кососимметричных форм.

Определение 165. Пусть $\beta: V \times V \rightarrow F$ – билинейная форма определенная на одном пространстве. Тогда

- Будем говорить, что β симметричная, если $\beta(u, v) = \beta(v, u)$ для любых $u, v \in V$.
- Будем говорить, что β кососимметрична, если $\beta(v, v) = 0$ для любого $v \in V$.

Замечание Давайте обсудим свойство кососимметричности. Вас должно было удивить такое дурацкое условие в определении. Однако, теперь, когда мы уже взрослые и знаем разные поля, но толком про них ничего еще и не знаем, нам надо быть чуточку аккуратными. Если $\beta(v, v) = 0$ для любого $v \in V$, тогда $\beta(v + u, v + u) = 0$ для любых $u, v \in V$. Это значит

$$0 = \beta(v + u, v + u) = \beta(v, v) + \beta(v, u) + \beta(u, v) + \beta(u, u) = \beta(v, u) + \beta(u, v)$$

То есть из этого условия вытекает, что $\beta(v, u) = -\beta(u, v)$. Однако, если нам дано, что $\beta(v, u) = -\beta(u, v)$, то подставив $u = v$, мы получим $\beta(v, v) = -\beta(v, v)$, а значит $2\beta(v, v) = 0$. И вот тут начинаются чудеса. Бывают поля, в которых $2 = 0$. В таких полях условие $\beta(v, v) = 0$ сильнее условия $\beta(v, u) = -\beta(u, v)$. Если же 2 обратимо в поле F , то оба условия равносильны. Однако, в общем случае, правильное определение – потребовать более сильное условие, которое и содержится в определении.

14.2 Матрица билинейной формы

Если $\beta: V \times V \rightarrow F$ – билинейная форма на пространстве V над полем F , то для определения ее матрицы нам достаточно выбрать только один базис.¹²¹ Если e_1, \dots, e_n – базис пространства V , то матрица билинейной формы в этом базисе будет $B = (\beta(e_i, e_j))$. Если мы переходим к новому базису $(e'_1, \dots, e'_n) = (e_1, \dots, e_n)C$, где C – обратимая матрица, и B' – матрица билинейной формы в новом базисе, то $B' = C^t B C$.

Обратите внимание, что в случае одного пространства все определяется одним базисом и в этом случае переход от одного базиса к другому на матричном языке идет по формуле $B' = C^t B C$. Если внимательно посмотреть, как действуют матрицы элементарных преобразований (раздел 2.8), то мы увидим, что переход от B к $C^t B C$ означает совершить одинаковые элементарные преобразования над строками и столбцами матрицы B . А это значит, что в отличие от операторов, нам не нужна никакая сложная теория с собственными значениями. Достаточно действовать обычным Гауссом. Чуть ниже мы увидим, что любую симметричную билинейную форму всегда можно диагонализировать. Но вот сравнение диагональных форм будет требовать некоторых знаний про базовое поле и эту задачу мы решим лишь для полей \mathbb{R} и \mathbb{C} . Уже для поля \mathbb{Q} и билинейных форм на двумерных пространствах мы получим нетривиальную задачу из теории чисел.

14.3 Матричные характеристики билинейной формы

В случае линейного оператора мы поступали так: выбирали базисы и задавали их матрицами. Потом считали какие-то характеристики этих самых матриц и показывали, что они не зависят от базисов. Мы уже попробовали такой подход в случае общих билинейных форм (на двух разных пространствах). Теперь давайте попробуем такой же подход в случае с билинейными формами

¹²¹ Вообще говоря никто не мешает выбрать для одного и того же пространства два разных базиса для левого и правого аргумента. И бывает, что так делать нужно. Но вообще говоря не стоит. В разных базисах один и те же векторы имеют разные координаты и у нас ломается главное, что мы имеем – возможность сравнить левый и правый вектор методом взгляда.

Ранг Пусть $\beta: V \times V \rightarrow F$ – билинейная форма, которая в двух базисах имеет матрицы B и B' , соответственно. Тогда $B' = C^t B C$ для некоторой невырожденной матрицы C . Тогда $\text{rk } B' = \text{rk } B$, так как он не меняется при умножении слева и справа на невырожденную матрицу (утверждение 71).

След Так как $\text{tr}(B') = \text{tr}(C^t B C)$, то вообще говоря след не несет никакой содержательной информации. Действительно, рассмотрите пример $B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$ и $C = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ – невырожденная матрица, то есть $ad - bc \neq 0$. Тогда $\text{tr}(B) = 0$ и $\text{tr}(B') = (a^2 + b^2) - (c^2 + d^2)$. В случае поля \mathbb{R} или \mathbb{C} это означает, что след B' может быть каким угодно числом.

Определитель В этом случае $\det(B') = \det(C^t B C) = \det(B) \det(C)^2$. То есть определитель в разных базисах может отличаться на квадрат числа из F^* . В общем случае это означает, что корректно определено понятие $\det(B) = 0$ или $\det(B) \neq 0$. Например:

- Если поле $F = \mathbb{C}$, то условие $\det(B) = 0$ или $\det(B) \neq 0$ – лучшее, что можно получить. Действительно, если $\det(B) \neq 0$, то в другом базисе $\det(B') = \det(B)c^2$. Так как в поле \mathbb{C} из любого числа можно извлечь корень, то $\det(B')$ можно сделать произвольным.
- Пусть $F = \mathbb{R}$, тогда корректно определен знак определителя, то есть $\text{sgn } \det B$ корректно определен. Действительно, $\det(B') = \det(B)c^2$. В поле \mathbb{R} число равно квадрату тогда и только тогда, когда оно положительно.
- Пусть $F = \mathbb{Q}$. Тут ничего особенно сказать нельзя, кроме явной формулировки. Пусть $\det(B) = p_1^{k_1} \dots p_r^{k_r}$, где $p_i \in \mathbb{N}$ – простые числа, а $k_i \in \mathbb{Z}$ – степени (вообще говоря положительные или отрицательные). Тогда четности чисел k_i определены однозначно независимо от базиса.

Как мы видим определитель вообще говоря не определен для билинейной формы, но какие-то характеристики из него вытащить можно и эти характеристики сильно зависят от поля, над которым мы работаем.

Обратимость матрицы Так как корректно определен ранг или понятие $\det(B) = 0$, то обратимость матрицы B тоже не зависит от базиса.

Матрицы симметричных и кососимметричных форм

Утверждение 166. Пусть $\beta: V \times V \rightarrow F$ – билинейная форма. Тогда

1. Билинейная форма β симметрична тогда и только тогда, когда матрица B_β симметрична $B_\beta^t = B_\beta$.
2. Если $2 \neq 0$ в поле F , то билинейная форма кососимметрична тогда и только тогда, когда матрица B_β кососимметрична $B_\beta^t = -B_\beta$.
3. Если $2 = 0$ в поле F , то билинейная форма кососимметрична тогда и только тогда, когда матрица B_β симметрична $B_\beta^t = B_\beta$ и имеет нулевую диагональ.¹²²

Доказательство. (1) Фиксируем базис e_1, \dots, e_n , тогда билинейная форма превращается в $\beta(x, y) = x^t B y$. Условие $\beta(x, y) = \beta(y, x)$ для любых $x, y \in F^n$ равносильно условию $x^t B y = y^t B x = (y^t B x)^t = x^t B^t y$ для любых $x, y \in F^n$. Заметим, что это условие равносильно симметричности матрицы B , которая в свою очередь является матрицей B_β в базисе e_1, \dots, e_n .

(2) Если $2 \neq 0$ в поле F , то кососимметричность равносильна условию $\beta(x, y) = -\beta(y, x)$. Выберем произвольный базис e_1, \dots, e_n , тогда $\beta(x, y) = x^t B y$. Тогда условие $\beta(x, y) = -\beta(y, x)$ для всех $x, y \in F^n$ равносильно условию $x^t B y = -y^t B x = -(y^t B x)^t = -x^t B^t y$ для любых $x, y \in F^n$. Последнее равносильно условию $B^t = -B$.

(3) Пусть теперь $2 = 0$ в F . Тогда надо заметить, что $1 + 1 = 0$, то есть $1 = -1$. То есть условие $B^t = B$ и $B^t = -B$ равносильны! Как и выше выберем некоторый базис e_1, \dots, e_n и в нем запишем нашу форму в виде $\beta(x, y) = x^t B y$. Если β кососимметрична, то $\beta(x, y) = -\beta(y, x) = \beta(y, x)$, то есть форма симметрична. А значит $B^t = B$ по первому пункту. С другой стороны, так как $\beta(e_i, e_i) = 0$, то диагональ матрицы B должна быть нулевой.

¹²² Над полем F , где $2 = 0$, эти два условия по определению полагаются условием кососимметричности матрицы. Тогда получается, что билинейная форма кососимметрична тогда и только тогда, когда матрица кососимметрична.

Обратно. Этот случай противной математики, когда без счета в лоб не обойтись (сочувствую нам всем). Пусть $v = x_1 e_1 + \dots + x_n e_n$ – некоторый вектор, посчитаем $\beta(v, v)$ и покажем, что мы получим ноль.

$$\begin{aligned}\beta(v, v) &= \beta\left(\sum_i x_i e_i, \sum_j x_j e_j\right) = \sum_{ij} x_i x_j \beta(e_i, e_j) = \\ &= \sum_{i=1}^n x_i^2 \beta(e_i, e_i) + \sum_{i < j} (x_i x_j \beta(e_i, e_j) + x_j x_i \beta(e_j, e_i)) = \sum_{i=1}^n x_i^2 \beta(e_i, e_i) + 2 \sum_{i < j} x_i x_j \beta(e_i, e_j)\end{aligned}$$

Тогда в последней сумме первое слагаемое равно нулю так как диагональ B_β состоит из нулей, а второе равно нулю, так как $2 = 0$. \square

Как мы видим в случае $2 = 0$ в поле F нас ждал сюрприз. Самым большим откровением обычно становится тот факт, что кососимметрические билинейные формы в данном случае становятся специального вида симметрическими формами. Вот такие чудесатые чудеса.

14.4 Разложение в прямую сумму

Пусть V – векторное пространство над полем F . Тогда будем обозначать через $\text{SBil}(V)$ множество симметричных билинейных форм на V , а через $\text{ABil}(V)$ множество кососимметричных билинейных форм. Напомним, что если $2 = 0$ в поле F , то $\text{ABil}(V) \subseteq \text{SBil}(V)$ (утверждение 166). Этот пример объясняет ограничение случаям $2 \neq 0$ в следующем утверждении.

Утверждение 167. Пусть V – векторное пространство над полем F таким, что $2 \neq 0$. Тогда любая билинейная форма $\beta: V \times V \rightarrow F$ единственным образом раскладывается в сумму симметричной и кососимметричной. На языке векторных пространств это означает, что $\text{Bil}(V) = \text{SBil}(V) \oplus \text{ABil}(V)$.

Доказательство. Я лишь предьявлю желаемое разложение

$$\beta(v, u) = \frac{\beta(v, u) + \beta(u, v)}{2} + \frac{\beta(v, u) - \beta(u, v)}{2}$$

Все детали остаются на совести читателя. \square

В дальнейшем наше основное внимание будет уделено симметричным билинейным формам.

14.5 Ограничение билинейной формы на подпространство

Определение 168. Пусть $\beta: V \times V \rightarrow F$ – билинейная форма и $U \subseteq V$ – подпространство. Тогда через $\beta|_U: U \times U \rightarrow F$ будем обозначать билинейную форму, действующую по правилу $(u_1, u_2) \mapsto \beta(u_1, u_2)$ для всех $u_1, u_2 \in U$. Форма $\beta|_U$ будет называться ограничением β на U .¹²³

По-простому, ограничение формы – это та же самая форма, которая забыла как перемножать все векторы из нашего пространства, а помнит только про перемножение векторов из подпространства.

Замечание Пусть $\beta: V \times V \rightarrow F$ – некоторая билинейная форма и $U \subseteq V$ – подпространство. Пусть e_1, \dots, e_n – базис V такой, что e_1, \dots, e_k образуют базис U . Тогда матрица β в базисе e_1, \dots, e_n будет $B_\beta = (\beta(e_i, e_j))_{1 \leq i, j \leq n}$. С другой стороны, матрица $\beta|_U$ в базисе e_1, \dots, e_k будет $B_{\beta|_U} = (\beta(e_i, e_j))_{1 \leq i, j \leq k}$. То есть матрица $B_{\beta|_U}$ – это левый верхний блок размера k в матрице B_β . Таким образом, в отличие от линейных операторов, матрицу ограничения билинейной формы очень легко считать.

Утверждение 169. Пусть $\beta: V \times V \rightarrow F$ – билинейная форма и $U \subseteq V$ – некоторое подпространство. Тогда

1. Выполнены следующие равенства

$$\begin{aligned}(a) \quad \ker^L \beta|_U &= U \cap {}^\perp U \\ (b) \quad \ker^R \beta|_U &= U \cap U^\perp\end{aligned}$$

2. Следующие условия эквивалентны

¹²³В случае формы $\beta: V \times U \rightarrow F$ также можно определить ограничение, но для этого нужно иметь пару подпространств $V' \subseteq V$ и $U' \subseteq U$. Полученная форма будет $\beta|_{V' \times U'}: V' \times U' \rightarrow F$. Однако мы ими не пользуемся и обозначения у них ужасные.

- (a) $\beta|_U$ невырождена
 (b) $U \cap {}^\perp U = 0$
 (c) $U \cap U^\perp = 0$

- (d) $V = U \oplus U^\perp$
 (e) $V = U \oplus {}^\perp U$

Доказательство. (1) Этот пункт проверяется по определению. Я проверю лишь первый. Имеем

$$\ker^L \beta|_U = \{u \in U \mid \beta(u, U) = 0\}$$

С другой стороны

$$U \cap {}^\perp U = U \cap \{v \in V \mid \beta(v, U) = 0\} = \{u \in U \mid \beta(u, U) = 0\}$$

Получили одно и то же.

(2) По определению форма не вырождена тогда и только тогда, когда у нее оба ядра ноль. Из первого пункта следует, что $U \cap {}^\perp U$ и $U \cap U^\perp$ – это ядра формы $\beta|_U$. С другой стороны, так как форма действует на одном пространстве, то размерности ядер совпадают (утверждение 158). Таким образом доказана эквивалентность первых трех пунктов.

Понятно, что (d) – более сильная версия (c) и (e) – более сильная версия (b). Остается показать, что (c) влечет (d) и аналогично (b) влечет (e). Покажем первое. Так как подпространства U и U^\perp не пересекаются, то они образуют прямую сумму $U \oplus U^\perp \subseteq V$ и надо лишь показать, что в сумме получается все V . Для этого достаточно показать, что U^\perp имеет размерность хотя бы $\dim V - \dim U$. Пусть $U = \langle v_1, \dots, v_k \rangle$, тогда

$$U^\perp = \{v \in V \mid \beta(v_1, v) = \dots = \beta(v_k, v) = 0\}$$

То есть U^\perp задается системой из k уравнений и $n = \dim V$ переменных. Значит ранг этой системы не превосходит k , а количество свободных переменных не меньше $n - k$ и равно размерности U^\perp , что и требовалось. \square

Замечания

- Если $\beta: V \times V \rightarrow F$ – билинейная форма и $U = \langle v \rangle \subseteq V$ – подпространство порожденное одним вектором $v \neq 0$. Тогда v – базис U и матрица $\beta|_U$ в этом базисе – это $\beta(v, v)$. Потому $\beta|_U$ невырождена тогда и только тогда, когда $\beta(v, v) \neq 0$.
- Пусть $\beta: V \times V \rightarrow F$ – некоторая билинейная форма, $U \subseteq V$ – некоторое подпространство. Предположим, что $V = U \oplus {}^\perp U$. Выберем базис $U = \langle e_1, \dots, e_k \rangle$ и базис ${}^\perp U = \langle g_{k+1}, \dots, g_n \rangle$. Тогда в базисе $e_1, \dots, e_k, g_{k+1}, \dots, g_n$ матрица β имеет вид

$$\begin{pmatrix} B_{\beta|_U} & * \\ 0 & B_{\beta|_{{}^\perp U}} \end{pmatrix}$$

Если же $V = U \oplus U^\perp$ и $U^\perp = \langle f_{k+1}, \dots, f_n \rangle$, то в базисе $e_1, \dots, e_k, f_{k+1}, \dots, f_n$ матрица β имеет вид

$$\begin{pmatrix} B_{\beta|_U} & 0 \\ * & B_{\beta|_{U^\perp}} \end{pmatrix}$$

Если же $U^\perp = {}^\perp U$,¹²⁴ то, выбрав базисы $U = \langle e_1, \dots, e_k \rangle$ и $U^\perp = {}^\perp U = \langle e_{k+1}, \dots, e_n \rangle$, мы получим матрицу для β вида

$$\begin{pmatrix} B_{\beta|_U} & 0 \\ 0 & B_{\beta|_{U^\perp}} \end{pmatrix}$$

Таким образом выделение угла нулей в матрице билинейной формы – это вопрос разложения пространства V в прямую сумму подпространства U и одного из его двух ортогональных дополнений. А выделение блочно диагонального вида означает, что надо подобрать такое U , чтобы его левое и правое ортогональные дополнения совпали и все пространство V разваливалось в прямую сумму U и дополнения.

¹²⁴Например такое бывает, если β симметрична.

14.6 Диагонализация симметричных форм

Утверждение 170. Пусть $\beta: V \times V \rightarrow F$ – симметричная билинейная форма и $2 \neq 0$ в F . Тогда существует такой базис, что матрица формы β имеет диагональный вид.

Доказательство. Что значит найти базис e_1, \dots, e_n , в котором матрица β будет диагональной? Это значит, найти базис, в котором $\beta(e_i, e_j) = 0$ при $i \neq j$. Потому план будет следующий: если $\beta \neq 0$, то найдем некоторый вектор $v \in V$ такой, чтобы $V = \langle v \rangle \oplus \langle v \rangle^\perp$. Положим $e_1 = v$, а векторы e_2, \dots, e_n выберем по индукции в подпространстве $\langle v \rangle^\perp$ (если β нулевая, то годится любой базис). Полученная система векторов будет ортогональным базисом. Чтобы завершить доказательство, надо объяснить, почему всегда можно выбрать такой вектор v .

Рассмотрим значения $\beta(v, v)$ для всех $v \in V$. Если это значение всегда ноль, то β – кососимметричная, но она одновременно симметричная. Так как $2 \neq 0$, такое возможно только если $\beta = 0$. В этом случае все доказано, матрица β будет диагональной в любом базисе. Значит мы можем предположить, что найдется такой $v \in V$, что $\beta(v, v) \neq 0$. Последнее означает, что $\beta|_U$ невырождена, где $U = \langle v \rangle$. В силу утверждения 169 это означает, что $U \oplus U^\perp = V$. Обозначим $e_1 = v$ выберем $e_2, \dots, e_n \in U^\perp$ из индукционного предположения. \square

Замечание Предположим, что $2 = 0$ в поле F . Тогда рассмотрим $V = F^2$ и зададим билинейную форму $\beta: V \times V \rightarrow F$ по правилу $(x, y) \mapsto x^t B y$ для матрицы¹²⁵

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Если выбрать произвольную матрицу $C \in M_2(F)$ с неопределенными коэффициентам

$$C = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$$

Тогда

$$C^t B C = \begin{pmatrix} a & c \\ b & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & c \\ b & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c & d \\ a & b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & ad + bc \\ ad + bc & 0 \end{pmatrix} = \det(C) B$$

В выкладках выше не забывайте, что $1 = -1$ в F . Таким образом, какую бы замену мы ни с делали, матрица B лишь изменится на скаляр из F и никогда не диагонализуется. Значит в предыдущем утверждении нельзя отбросить предположение $2 \neq 0$.

14.7 Симметричный Гаусс

Теперь, когда мы знаем, что симметричные билинейные формы диагонализуются в каком-то базисе, хорошо было бы иметь какой-нибудь (ну хотя бы плохонький) алгоритм, приводящий форму к диагональному виду, если она задана в каком-то случайном базисе. Пусть, скажем, нам задана билинейная форма $\beta: F^n \times F^n \rightarrow F$ по правилу $(x, y) \mapsto x^t B y$, где $B \in M_n(F)$ – некоторая симметричная матрица. Тогда в новом базисе матрица будет иметь вид $C^t B C$, где $C \in M_n(F)$ – некоторая невырожденная матрица.¹²⁶ Любая невырожденная матрица C раскладывается в произведение элементарных матриц (утверждение 3). С другой стороны, если C – матрица элементарного преобразования, то $B \mapsto C^t B C$ – это выполнение одного и того же преобразования и над строками и над столбцами (не важно в каком порядке, так как произведение матриц ассоциативно). То есть у нас есть следующий запас операций:

- Прибавляем i -ю строку умноженную на λ к j -ой строке, потом прибавляем i -ый столбец умноженный на λ к j -ому столбцу.
- Меняем местами i и j строки, после чего меняем местами i и j столбцы.
- Умножаем на ненулевое λ i -ю строку, потом умножаем на λ i -ый столбец.

Таким образом предыдущая теорема гласит, что выполняя подобные симметричные элементарные преобразования над симметричной матрицей, мы обязательно приведем ее к диагональному виду.

¹²⁵Заметим, что в силу того, что $1 = -1$ в F , то эта матрица еще к тому же и кососимметричная.

¹²⁶На самом деле C – матрица перехода из старого в новый базис.

14.8 Метод Якоби

Постановка задачи Пусть $\beta: V \times V \rightarrow F$ – некоторая симметричная билинейная форма, e_1, \dots, e_n – базис пространства V и $B = (\beta(e_i, e_j))$ – матрица билинейной формы в этом базисе, то есть в базисе e_1, \dots, e_n билинейная форма задается как $\beta(x, y) = x^t B y$, где $x, y \in F^n$ – координаты векторов в базисе e_1, \dots, e_n .

Введем следующие обозначения: $U_k = \langle e_1, \dots, e_k \rangle$ – подпространство натянутое на первые k векторов исходного базиса. Теперь выделим в матрице B верхние левые блоки:

$$B = \begin{pmatrix} \begin{matrix} \boxed{b_{11}} & & \\ & \ddots & \\ & & B_k \end{matrix} & \\ & & \ddots \end{pmatrix}$$

То есть B_k – подматрица состоящая из первых k строк и столбцов. Тогда B_k – это в точности матрица $\beta|_{U_k}$ в базисе e_1, \dots, e_k . Так же обозначим через Δ_k определители $\det(B_k)$. В дальнейшем мы будем предполагать, что все $\Delta_k \neq 0$ и наша задача будет найти базис e'_1, \dots, e'_n в пространстве V такой, чтоб $\langle e'_1, \dots, e'_k \rangle = U_k$ и $\beta(e'_i, e'_j) = 0$ при $i \neq j$.

Описание метода Предположим теперь, что все $\Delta_k \neq 0$. Будем строить векторы нового базиса e'_1, \dots, e'_n по следующим рекуррентным формулам

$$\begin{cases} e'_1 = e_1 \\ e'_2 = e_2 - \frac{\beta(e_2, e'_1)}{\beta(e'_1, e'_1)} e'_1 \\ e'_3 = e_3 - \frac{\beta(e_3, e'_1)}{\beta(e'_1, e'_1)} e'_1 - \frac{\beta(e_3, e'_2)}{\beta(e'_2, e'_2)} e'_2 \\ \dots \\ e'_k = e_k - \frac{\beta(e_k, e'_1)}{\beta(e'_1, e'_1)} e'_1 - \dots - \frac{\beta(e_k, e'_{k-1})}{\beta(e'_{k-1}, e'_{k-1})} e'_{k-1} \\ \dots \end{cases}$$

Наша задача показать, что эти формулы всегда сработают и приведут к нужному результату. То есть нам надо показать, что все знаменатели вида $\beta(e'_i, e'_i)$ не равны нулю и все векторы e'_1, \dots, e'_n ортогональны друг другу, то есть $\beta(e'_i, e'_j) = 0$ при $i \neq j$. Для того, чтобы доказать это, мы будем индукцией по номеру построенного вектора проверять выполнимость трех инвариантов

$$\begin{aligned} \langle e_1, \dots, e_k \rangle &= \langle e'_1, \dots, e'_k \rangle \\ \Delta_k &= \beta(e'_1, e'_1) \dots \beta(e'_k, e'_k) \\ \beta(e'_i, e'_j) &= 0 \text{ при } i \neq j, i, j \leq k \end{aligned}$$

И уже из этого мы выведем корректность алгоритма.

Утверждение 171. Пусть $\beta: V \times V \rightarrow F$ – симметричная билинейная форма, e_1, \dots, e_n – базис пространства V и $B = (\beta(e_i, e_j))$ и все диагональные подматрицы B_k не вырождены, то есть $\Delta_k \neq 0$ для любого $1 \leq k \leq n$. Предположим, что мы построили k векторов e'_1, \dots, e'_k по методу Якоби описанному выше и при этом выполнено

$$\begin{aligned} \langle e_1, \dots, e_k \rangle &= \langle e'_1, \dots, e'_k \rangle \\ \Delta_k &= \beta(e'_1, e'_1) \dots \beta(e'_k, e'_k) \\ \beta(e'_i, e'_j) &= 0 \text{ при } i \neq j, i, j \leq k \end{aligned}$$

Тогда

1. Вектор

$$e'_{k+1} = e_{k+1} - \frac{\beta(e_{k+1}, e'_1)}{\beta(e'_1, e'_1)} e'_1 - \dots - \frac{\beta(e_{k+1}, e'_k)}{\beta(e'_k, e'_k)} e'_k$$

корректно определен и ортогонален всем векторам e'_1, \dots, e'_k .

2. Выполнены равенства

$$\begin{aligned}\langle e_1, \dots, e_{k+1} \rangle &= \langle e'_1, \dots, e'_{k+1} \rangle \\ \Delta_{k+1} &= \beta(e'_1, e'_1) \dots \beta(e'_{k+1}, e'_{k+1}) \\ \beta(e'_i, e'_j) &= 0 \text{ при } i \neq j, i, j \leq k+1\end{aligned}$$

Доказательство. 1) Так как $\Delta_k \neq 0$, то из условия $\Delta_k = \beta(e'_1, e'_1) \dots \beta(e'_k, e'_k)$ следует, что все знаменатели в формуле для e'_{k+1} не равны нулю. Значит e'_{k+1} корректно определен. Давайте проверим, что он оказался ортогонален $\langle e'_1, \dots, e'_k \rangle = \langle e_1, \dots, e_k \rangle$. Для этого посчитаем

$$\beta(e'_{k+1}, e'_i) = \beta(e_{k+1}, e'_i) - \frac{\beta(e_{k+1}, e'_1)}{\beta(e'_1, e'_1)} \beta(e'_1, e'_i) - \dots - \frac{\beta(e_{k+1}, e'_k)}{\beta(e'_k, e'_k)} \beta(e'_k, e'_i)$$

Так как все построенные векторы e'_1, \dots, e'_k были ортогональны, то справа выживает лишь одно слагаемое, то есть

$$\beta(e'_{k+1}, e'_i) = \beta(e_{k+1}, e'_i) - \frac{\beta(e_{k+1}, e'_i)}{\beta(e'_i, e'_i)} \beta(e'_i, e'_i) = 0$$

2) По построению $e'_{k+1} - e_{k+1} \in \langle e'_1, \dots, e'_k \rangle = \langle e_1, \dots, e_k \rangle$. Откуда получаем, что $\langle e_1, \dots, e_{k+1} \rangle = \langle e'_1, \dots, e'_{k+1} \rangle$. Кроме того, все векторы по построению получились ортогональными. Осталось лишь показать, что Δ_{k+1} равно произведению $\beta(e'_1, e'_1) \dots \beta(e'_{k+1}, e'_{k+1})$. Для этого заметим, что мы в подпространстве U_{k+1} сделали замену базиса по правилам

$$(e_1 \quad \dots \quad e_{k+1}) = (e'_1 \quad \dots \quad e'_{k+1}) \begin{pmatrix} 1 & \frac{\beta(e_2, e'_1)}{\beta(e'_1, e'_1)} & \frac{\beta(e_3, e'_1)}{\beta(e'_1, e'_1)} & \dots & \frac{\beta(e_{k+1}, e'_1)}{\beta(e'_1, e'_1)} \\ & 1 & \frac{\beta(e_3, e'_2)}{\beta(e'_2, e'_2)} & \dots & \frac{\beta(e_{k+1}, e'_2)}{\beta(e'_2, e'_2)} \\ & & 1 & & \\ & & & \ddots & \vdots \\ & & & & 1 \end{pmatrix}$$

Обозначим матрицу справа за C . Тогда это будет матрица перехода от e'_1, \dots, e'_{k+1} к базису e_1, \dots, e_{k+1} . Пусть B'_k будет матрица β в штрихованном базисе. Тогда $B_{k+1} = C^t B'_{k+1} C$, а значит

$$\Delta_{k+1} = \det B_{k+1} = \det B'_{k+1} \det C^2 = \det B_{k+1} = \beta(e'_1, e'_1) \dots \beta(e'_{k+1}, e'_{k+1})$$

Что доказывает оставшееся равенство. □

Замечания

1. Утверждение 171 показывает, что

- Метод Якоби для поиска базиса e'_1, \dots, e'_n работает на каждом шаге и в итоге мы получим диагональную матрицу B' .
- Полученные диагональные элементы b'_{ii} матрицы B' можно вычислить по формуле

$$b'_{ii} = \beta(e'_i, e'_i) = \frac{\Delta_i}{\Delta_{i-1}}$$

при этом мы считаем, что $\Delta_0 = 1$.

- Исходная матрица B представляется в виде $B = C^t B' C$, где

$$C = \begin{pmatrix} 1 & \frac{\beta(e_2, e'_1)}{\beta(e'_1, e'_1)} & \frac{\beta(e_3, e'_1)}{\beta(e'_1, e'_1)} & \dots & \frac{\beta(e_{k+1}, e'_1)}{\beta(e'_1, e'_1)} \\ & 1 & \frac{\beta(e_3, e'_2)}{\beta(e'_2, e'_2)} & \dots & \frac{\beta(e_{k+1}, e'_2)}{\beta(e'_2, e'_2)} \\ & & 1 & & \\ & & & \ddots & \vdots \\ & & & & 1 \end{pmatrix} \quad B' = \begin{pmatrix} \Delta_1 & & & & \\ & \frac{\Delta_2}{\Delta_1} & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & \frac{\Delta_n}{\Delta_{n-1}} \end{pmatrix}$$

2. Если вы недоумеваете (а вообще говоря очень даже должны) откуда взялись эти дурацкие формулы для векторов e'_k и как вообще можно было до них догадаться, то давайте я приоткрою завесу тайны и сообщу всю правду. На самом деле мы производили следующий процесс. Мы взяли вектор $e'_1 = e_1$. Далее мы решили ортогонализировать вектор e_2 относительно e'_1 . А именно, в плоскости $\langle e_1, e_2 \rangle = \langle e'_1, e_2 \rangle$ вектор e_2 представляется как что-то параллельное e'_1 и что-то ортогональное e'_1 .¹²⁷ Тогда будем искать разложение вида $e_2 = \lambda e'_1 + w$. При этом будем подбирать параметр λ так, чтобы w оказался ортогонален e'_1 , то есть

$$0 = \beta(w, e'_1) = \beta(e_2, e'_1) - \lambda \beta(e'_1, e'_1)$$

Отсюда находим формулу для λ , а w полагаем новым вектором e'_2 . Аналогично поступаем на следующем шаге, мы теперь будем пытаться раскладывать вектор e_2 в виде

$$e_2 = \lambda e'_1 + \mu e'_2 + w$$

И коэффициенты λ и μ будут искаться из соображений, чтобы w был ортогонален e'_1 и e'_2 . Применяя $\beta(-, e'_i)$ к w мы находим коэффициенты λ и μ , а w полагаем за e'_2 и т.д.

14.9 Алгоритм диагонализации на основе метода Якоби

Определение 172. Пусть $B, L, U \in M_n(F)$ – матрицы такие, что L нижнетреугольная с единицами на диагонали, U верхнетреугольная. Тогда представление $B = LU$ называется LU-разложением матрицы B .

Отметим, что LU-разложение не всегда существует. Можно показать, что для невырожденной матрицы B оно существует тогда и только тогда, когда все угловые подматрицы B_k невырождены. Мы же показали этот результат только для симметрических матриц.¹²⁸ Важно, что LU-разложение обязательно единственно для невырожденной матрицы.

Утверждение 173. Пусть $B \in M_n(F)$ – некоторая невырожденная матрица.

1. Пусть $B = L_1 U_1 = L_2 U_2$ – два LU-разложения матрицы B , тогда $L_1 = L_2$ и $U_1 = U_2$.
2. Если матрица B – симметрична и найдутся матрицы $C_1, C_2, D_1, D_2 \in M_n(F)$ такие, что C_1, C_2 – верхнетреугольные с единицей на диагонали, D_1, D_2 – диагональные и $B = C_1^t D_1 C_1 = C_2^t D_2 C_2$, то $C_1 = C_2$ и $D_1 = D_2$.

Доказательство. (1) Пусть $L_1 U_1 = L_2 U_2$, тогда $L_2^{-1} L_1 = U_2 U_1^{-1}$ (в силу обратимости). Тогда левая часть – ниже треугольная с единицами на диагонали, а правая часть – выше треугольная. Такое может быть лишь когда они обе единичные, то есть $L_2^{-1} L_1 = E$ и $U_2 U_1^{-1} = E$, что и требовалось.

(2) Так как $C_1^t (D C_1)$ и $C_2^t (D C_2)$ – два LU-разложения, то $C_1 = C_2$ и $D_1 C_1 = D_2 C_2$. Откуда получаем требуемое из обратимости $C_1 = C_2$. \square

Алгоритм диагонализации на основе метода Якоби

Дано Симметрическая матрица $B \in M_n(F)$.

Задача Проверить, что все ее угловые подматрицы B_k невырождены и если это так, то найти их значения, а также найти верхнетреугольную матрицу с единицами на диагонали $C \in M_n(F)$ и диагональную матрицу $D \in M_n(F)$ такие, что $B = C^t D C$.

Алгоритм

1. Начнем приводить матрицу B к верхнетреугольному виду элементарными преобразованиями первого типа, когда нам разрешено прибавлять строку с коэффициентом только к более низкой строке. Возможны два исхода:
 - На каком-то этапе получили, что на диагонали на k -ом месте стоит 0, а под диагональю есть ненулевой элемент. Это значит, что $\Delta_k = 0$. Условие на матрицу не выполнено.

¹²⁷Например потому что $\langle e_1, e_2 \rangle = \langle e_1 \rangle \oplus \langle e_1 \rangle^\perp$, где ортогональное дополнение берется внутри $\langle e_1, e_2 \rangle$.

¹²⁸На самом деле можно рассмотреть несимметрическую форму $\beta: F^n \times F^n \rightarrow F$, считая левое F^n и правое F^n разными пространствами одной размерности. Тогда приведенные в предыдущем разделе рассуждения остаются верны и в этом случае и доказывают LU-разложение в общем случае. Другой подход – сделать все на матричном языке.

- Мы привели матрицу B к верхнетреугольной матрице U . Переходим к следующему шагу.

2. Восстановим все необходимые данные по матрице U следующим образом:

- (a) D – диагональ матрицы U .
- (b) $C = D^{-1}U$.
- (c) Δ_k – произведение первых k элементов диагонали матрицы D .

Замечание Заметим, что данный метод работает с вдвое меньшим количеством операций нежели общий симметрический Гаусс. Однако, для него требуется дополнительное условие, чтобы все угловые подматрицы были невырожденные. На практике же, для невырожденной матрицы, условие вырожденности минора – это условие случающееся с нулевой вероятностью и в реальных данных скорее всего будет выполнено. Но если даже оно не выполнено для невырожденной матрицы B , то можно взять случайную матрицу C и рассмотреть $C^t B C$ вместо B . Тогда с вероятностью единица, у новой матрицы все угловые миноры будут невырожденные. Есть и другой способ. Можно очень хитро модифицировать алгоритм выше, добавив один дополнительный шаг, который будет бороться с вырожденными угловыми минорами и станет работать всегда.

14.10 Квадратичные формы

Определение 174. Пусть $\beta: V \times V \rightarrow F$ – некоторая билинейная форма (не обязательно симметричная), тогда отображение $Q: V \rightarrow F$ по правилу $Q(v) = \beta(v, v)$ называется квадратичной формой. Если надо подчеркнуть связь с β пишут Q_β . Множество квадратичных форм на пространстве V будем обозначать через $\text{Quad}(V)$.

Отметим, что квадратичные формы являются векторным пространством над полем F . Действительно, мы умеем складывать многочлены и умножать их на скаляры из F .

Однородность степени 2 Квадратичная форма является однородной функцией степени 2 в следующем смысле. Для любого $\lambda \in F$ и любого вектора $v \in V$ выполнено $Q(\lambda v) = \lambda^2 Q(v)$.

Замечание Идея квадратичной формы в следующем. Когда нам задана билинейная форма, то мы имеем функцию двух аргументов, но она по каждому аргументу линейная. В случае квадратичной формы, мы имеем функцию одного аргумента, однако, теряем линейность и становимся квадратичными по аргументу. Забегая вперед, скажу, что окажется, что симметричные билинейные формы будут однозначно описываться квадратичными формами. А так как для нас симметричные билинейные формы – это самый интересный случай, то удобно иметь подобный механизм, когда в зависимости от задачи нам удобнее иметь два аргумента, но линейных или наоборот один, но квадратичный.

Квадратичные формы в координатах Если нам дана какая-то билинейная форма $\beta: F^n \times F^n \rightarrow F$ вида $\beta(x, y) = x^t B y$, где $B \in M_n(F)$. Квадратичная форма $Q_\beta: F^n \rightarrow F$ тогда имеет вид $Q(x) = x^t B x$. Если расписать явно последнее выражение, то мы получим

$$Q(x) = \beta(x, x) = x^t B x = \sum_{ij} b_{ij} x_i x_j = \sum_i b_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} (b_{ij} + b_{ji}) x_i x_j$$

Обратите внимание, что в отличие от билинейной формы, квадратичная форма не однозначно задается матрицей B . Действительно,

$$Q(x_1, x_2) = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 2 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = 2x_1 x_2$$

За счет этого эффекта, при переходе к квадратичным формам от билинейных, мы теряем часть информации. Однако, квадратичная форма однозначно задается симметрической матрицей B , то есть матрицей B с условием $B^t = B$. В примере выше – это последний случай.

14.11 Связь между квадратичными и билинейными формами

Утверждение 175 (Поляризационная формула). Пусть V – векторное пространство над полем F , причем $2 \neq 0$, и $Q: V \rightarrow F$ – квадратичная форма. Тогда отображение $\beta_Q: V \times V \rightarrow F$ по правилу

$$(v, u) \mapsto \beta_Q(v, u) = \frac{1}{2} (Q(v + u) - Q(v) - Q(u))$$

является симметричной билинейной формой.

Доказательство. Для начала заметим, что β_Q по формуле выше действительно получается симметричной функцией, потому нам лишь надо показать, что она будет билинейной. Для этого вспомним, что $Q(v) = \beta(v, v)$ для некоторой необязательно симметричной билинейной формы $\beta: V \times V \rightarrow F$. Теперь подставим это выражение в определение β_Q и получим

$$\begin{aligned} \beta_Q(v, u) &= \frac{1}{2} (\beta(v + u, v + u) - \beta(v, v) - \beta(u, u)) = \\ &= \frac{1}{2} (\beta(v, v) + \beta(v, u) + \beta(u, v) + \beta(u, u) - \beta(v, v) - \beta(u, u)) = \frac{1}{2} (\beta(v, u) + \beta(u, v)) \end{aligned}$$

Что и требовалось. □

Замечания

- Таким образом у нас получается отображение $\Phi: \text{Quad}(V) \rightarrow \text{Bil}(V)$ по правилу $Q \mapsto \beta_Q$. Кроме того, это отображение является линейным.
- После выбора базиса билинейные и квадратичные формы задаются матрицами. Тогда отображение записывается так: пусть квадратичная форма $Q(x) = x^t A x$ задается какой-нибудь матрицей A , тогда $\beta_Q(x, y) = x^t \left(\frac{A + A^t}{2} \right) y$. Причем результат не зависит от выбора матрицы A , которой задается квадратичная форма (просто потому что поляризационная формула не зависит от этого выбора, а матричная формула – это координатная запись поляризационной формулы).

Теперь сформулируем общее утверждение о взаимосвязи между билинейными и квадратичными формами.

Утверждение 176. Пусть V – векторное пространство над полем F , в котором $2 \neq 0$. Пусть $\Psi: \text{Bil}(V) \rightarrow \text{Quad}(V)$ по правилу $\beta \mapsto Q_\beta$ и $\Phi: \text{Quad}(V) \rightarrow \text{Bil}(V)$ по правилу $Q \mapsto \beta_Q$ по поляризационной формуле. Тогда

1. $\Psi \circ \Phi$ является тождественным на $\text{Quad}(V)$.
2. $\Phi \circ \Psi$ является проектором на пространство симметричных билинейных форм вдоль подпространства кососимметричных билинейных форм.

Как следствие:

- I. $\ker \Psi$ совпадает с подпространством кососимметричных билинейных форм.
- II. $\text{Im } \Psi$ совпадает с пространством всех квадратичных форм, то есть Ψ сюръективно.
- III. Ψ и Φ являются взаимно обратными изоморфизмами между $\text{SBil}(V)$ (симметричными билинейными формами) и $\text{Quad}(V)$.

Доказательство. 1) Проверяется в лоб прямым вычислением. Пусть $Q(v) = \beta(v, v)$ – некоторая квадратичная форма, тогда $\beta_Q(v, u) = \frac{1}{2} (\beta(v, u) + \beta(u, v))$ (как мы видели в доказательстве поляризационной формулы). И теперь надо взять $Q_{\beta_Q}(v) = \frac{1}{2} (\beta(v, v) + \beta(v, v)) = \beta(v, v)$.

2) Пусть $\text{SBil}(V)$ – пространство симметричных билинейных форм и $\text{ABil}(V)$ – пространство кососимметричных билинейных форм. Тогда $\text{Bil}(V) = \text{SBil}(V) \oplus \text{ABil}(V)$ по утверждению 167. Нам надо показать, что $\Phi \circ \Psi$ зануляет кососимметричные билинейные формы и оставляет на месте все симметричные. Но Ψ отправляет форму $\beta(v, u)$ в форму $\beta(v, v)$. Потому если форма кососимметрична, то результат ноль. Теперь пусть β – симметричная форма. Тогда она идет в $Q_\beta(v) = \beta(v, v)$, которая идет по поляризационной формуле в $\beta_{Q_\beta}(v, u) = \frac{1}{2} (\beta(v, u) + \beta(u, v)) = \beta(v, u)$.

I) По определению $\text{ABil}(V) \subseteq \ker \Psi \subseteq \ker \Phi \circ \Psi = \text{ABil}(V)$.

II) Для любой квадратичной формы Q верно $Q = \Psi(\Phi(Q))$, значит Ψ сюръективно.

III) Этот пункт непосредственно проверялся во время доказательства (1) и (2). □

Замечания

- Таким образом нет разницы между симметрическими билинейными формами и квадратичными формами, в случае $2 \neq 0$ в поле F . Это значит, что если вы что-то доказали для симметрической билинейной формы, то этот факт можно перевести на язык квадратичных форм и он там будет верен автоматически. И наоборот, если вы что-то сделали для квадратичных форм, то вы автоматически что-то показали для билинейных.
- Когда мы работаем с билинейными формами плохо то, что они имеют два аргумента. Зато по каждому аргументу форма линейна. Квадратичная форма имеет только один аргумент, зато она по нему не линейна, а является однородной функцией степени 2. В зависимости от задачи бывает удобнее пользоваться квадратичными формами, бывает билинейными. Потому件лезно понимать, что вы выигрываете, а что проигрываете при переходе от одних к другим.
- Другой взгляд на последнее утверждение такой: квадратичные формы однозначно задаются симметрическими матрицами.

14.12 Метод Лагранжа

Когда нам задана симметрическая билинейная форма, одна из основных задач – диагонализировать ее в каком-нибудь базисе. Так как симметрические билинейные формы соответствуют квадратичным формам (утверждение 176), то неплохо было бы понять, что это означает для последних. Метод пристального взгляда говорит, что симметричная билинейная форма $\beta: F^n \times F^n \rightarrow F$ по правилу $(x, y) \mapsto x^t B y$ задана в диагональном виде тогда и только тогда, когда $Q_\beta(x) = a_{11}x_1^2 + \dots + a_{nn}x_n^2$. То есть на языке квадратичных форм диагонализация матрицы – это представление формы в виде суммы квадратов координат с коэффициентами. Существует универсальный метод, приводящий любую квадратичную форму к такому виду – метод Лагранжа.¹²⁹

Этот метод работает на языке замены координат. Пусть у нас

$$Q_\beta(x) = \sum_{ij} b_{ij} x_i x_j = b_{11} x_1^2 + \sum_{j=2}^n b_{1j} x_j x_1 + Q'(x_2, \dots, x_n)$$

Далее поведение метода зависит от того является ли коэффициент b_{11} нулем. Давайте в начале разберем типичный шаг метода, когда этот коэффициент не ноль.

В этом случае выделим полный квадрат из первых двух слагаемых

$$Q_\beta(x) = b_{11} \left(x_1^2 + 2 \sum_{j=2}^n \frac{b_{1j}}{2b_{11}} x_j x_1 + \left(\sum_{j=2}^n \frac{b_{1j}}{2b_{11}} x_j \right)^2 \right) - b_{11} \left(\sum_{j=2}^n \frac{b_{1j}}{2b_{11}} x_j \right)^2 + Q'(x_2, \dots, x_n)$$

Тогда

$$Q_\beta(x) = b_{11} \left(x_1 + \sum_{j=2}^n \frac{b_{1j}}{2b_{11}} x_j \right)^2 + Q''(x_2, \dots, x_n)$$

Сделаем замену

$$\begin{cases} \bar{x}_1 = x_1 + \sum_{j=2}^n \frac{b_{1j}}{2b_{11}} x_j \\ \bar{x}_2 = x_2 \\ \dots \\ \bar{x}_n = x_n \end{cases} \quad \text{то есть} \quad \begin{pmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \\ \vdots \\ \bar{x}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{b_{12}}{2b_{11}} & \dots & \frac{b_{1n}}{2b_{11}} \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ & & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

Теперь мы получили, что $Q(\bar{x}) = b_{11} \bar{x}_1^2 + Q''(\bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$. Далее переходим к форме $Q''(\bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$ и повторяем процедуру.

¹²⁹На мой взгляд метод Лагранжа не самый удачный. Точнее мы уже знаем симметричный метод Гаусса, который сильно удобнее и в целом решает все нужные проблемы. Но тем не менее, для полноты картины я привожу здесь подробное описание метода Лагранжа, иногда даже он бывает полезен.

Теперь давайте разберемся что делать, если $b_{11} = 0$. Если хотя бы один из коэффициентов $b_{ii} \neq 0$, мы переставим координаты так, чтобы x_i превратилась в x_1 . В противном случае $Q(x)$ вообще не зависит от x_i^2 ни для какого i . Но тогда она должна зависеть от какого-то $x_i x_j$. После переупорядочивания координат, мы можем считать, что это $x_1 x_2$. Тогда

$$Q(x) = b_{12}x_1x_2 + \sum_{\substack{i < j \\ (i,j) \neq (1,2)}} b_{ij}x_i x_j$$

В этом случае сделаем следующую замену переменных

$$\begin{cases} x_1 = \bar{x}_1 + \bar{x}_2 \\ x_2 = \bar{x}_1 - \bar{x}_2 \\ x_3 = \bar{x}_3 \\ \vdots \\ x_n = \bar{x}_n \end{cases} \quad \text{то есть} \quad \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & & \\ 1 & -1 & & \\ & & 1 & \\ & & & \ddots \\ & & & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \\ \bar{x}_3 \\ \vdots \\ \bar{x}_n \end{pmatrix}$$

Обратите внимание, что в этот раз мы выражаем старые переменные через новые, а не наоборот как в первом шаге. После такой подстановки форма примет вид

$$Q(\bar{x}) = b_{12}\bar{x}_1^2 - b_{12}\bar{x}_2^2 + Q'(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n)$$

причем Q' не зависит от \bar{x}_1^2 и \bar{x}_2^2 . После такой замены можно перейти к первому шагу.

14.13 Классификация симметрических билинейных форм над алгебраически замкнутым полем

Утверждение 177. Пусть V – векторное пространство над полем F , F алгебраически замкнуто и $2 \neq 0$. Тогда для любой симметрической билинейной формы $\beta: V \times V \rightarrow F$ существует базис, в котором ее матрица имеет вид

$$\begin{pmatrix} E & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

причем размер блока E совпадает с рангом β .

Доказательство. При условии $2 \neq 0$ в поле F любая симметрическая билинейная форма диагонализуется по утверждению 170. То есть $\beta(x, y) = a_{11}x_1y_1 + \dots + a_{kk}x_ky_k$, где $k \leq n$ (часть диагональных элементов может быть нулевыми). Для каждого числа a_{ii} найдем s_i такой, что $s_i^2 = a_{ii}$. Такое число найти можно в силу алгебраической замкнутости F , в нем решаются все уравнения вида $t^2 - a = 0$. Теперь сделаем замену

$$\bar{x}_1 = s_1x_1, \dots, \bar{x}_k = s_kx_k, \bar{x}_{k+1} = x_{k+1}, \dots, \bar{x}_n = x_n$$

После такой замены $\beta(\bar{x}, \bar{y}) = x_1y_1 + \dots + x_ky_k$, что и требовалось. \square

Замечания

- Таким образом две симметрические матрицы $A, B \in M_n(F)$ над алгебраически замкнутым полем F задают одну и ту же билинейную форму в разных базисах тогда и только тогда, когда у них совпадают ранги.
- Обратите внимание, что ранг – это единственная содержательная характеристика симметрической билинейной формы над алгебраически замкнутым полем.

15 Симметричные билинейные формы в вещественном пространстве

15.1 Классификация

Утверждение 178. Пусть V – векторное пространство над полем \mathbb{R} . Тогда для любой симметрической билинейной формы $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ существует базис, в котором ее матрица имеет вид

$$\begin{pmatrix} E & & \\ & -E & \\ & & 0 \end{pmatrix}$$

причем количество единиц, минус единиц и нулей на диагонали не зависит от выбора базиса. При этом количество единиц и минус единиц вместе совпадает с рангом β .

Доказательство. В силу утверждения 170, мы можем привести форму к диагональному виду $\beta(x, y) = a_{11}x_1y_1 + \dots + a_{kk}x_ky_k$, где $k \leq n$ (часть диагональных элементов – ноль). При этом считаем, что сначала идут положительные a_{ii} , а потом отрицательные. В отличие от алгебраически замкнутого случая, мы можем извлекать корни только из положительных чисел. Поэтому сделаем такую замену

$$\bar{x}_1 = \sqrt{|a_{11}|}x_1, \dots, \bar{x}_k = \sqrt{|a_{kk}|}x_k, \bar{x}_{k+1} = x_{k+1}, \dots, \bar{x}_n = x_n$$

Тогда форма примет вид

$$\beta(\bar{x}, \bar{y}) = \bar{x}_1\bar{y}_1 + \dots + \bar{x}_s\bar{y}_s - \bar{x}_{s+1}\bar{y}_{s+1} - \dots - \bar{x}_k\bar{y}_k$$

Теперь давайте докажем, что количество единиц, минус единиц и нулей не зависит от выбора базиса. Количество нулей – это размерность ядра формы, а количество единиц и минус единиц – это ранг формы. Потому нам лишь надо доказать, что количество единиц и минус единиц не зависит от выбора базиса.

Предположим противное – пусть зависит. Пусть найдутся два базиса e_1, \dots, e_n и f_1, \dots, f_n , так что форма в них имеет вид

$$\begin{aligned} \beta(x, y) &= x_1y_1 + \dots + x_sy_s - x_{s+1}y_{s+1} - \dots - x_ky_k \\ \beta(\bar{x}, \bar{y}) &= \bar{x}_1\bar{y}_1 + \dots + \bar{x}_t\bar{y}_t - \bar{x}_{t+1}\bar{y}_{t+1} - \dots - \bar{x}_k\bar{y}_k \end{aligned}$$

Пусть для определенности $s > t$. Тогда положим $W = \langle e_1, \dots, e_s \rangle$ и $U = \langle f_{t+1}, \dots, f_n \rangle$. Заметим, что $Q_\beta(w) > 0$ для любого ненулевого $w \in W$ и $Q_\beta(u) \leq 0$ для любого $u \in U$. Следовательно подпространства W и U могут пересекаться только по нулю. С другой $\dim W + \dim U = s + n - t > n$, а значит $\dim(W \cap U) > 0$, противоречие. \square

Замечание Очень полезно о диагонализации симметричных форм думать в терминах квадратичных. А именно, после диагонализации формы мы получили $Q_\beta(x) = a_{11}x_1^2 + \dots + a_{kk}x_k^2$. Теперь, чтобы сделать замену координат, нам надо внести под корень коэффициент a_{ii} .

Определение 179. Пусть $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ – симметричная билинейная форма. Тогда количество положительных, отрицательных и нулевых элементов в ее диагональной форме называются ее индексами инерции. Это тоже самое, что посчитать количество единиц, минус единиц и нулей в диагональной форме из единиц, минус единиц и нулей.

Число единиц – это положительный индекс инерции, он будет обозначаться $\#1$. Число минус единиц – это отрицательный индекс инерции, он будет обозначаться $\#-1$. Число нулей будем для единообразия обозначать $\#0$.

Обратите внимание, что утверждение 178 показывает корректность этого определения, то есть, что указанные числа не зависят от диагональной формы, а зависят только от самой билинейной формы.

15.2 Геометрический смысл Сигнатуры

Утверждение 180. Пусть V – векторное пространство над \mathbb{R} и $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ – симметричная билинейная форма на V .

1. Пусть $W \subseteq V$ – максимальное по вложению подпространство такое, что $\beta(w, w) > 0$ для любого ненулевого $w \in W$. Тогда $\#1 = \dim W$.
2. Пусть $W \subseteq V$ – максимальное по вложению подпространство такое, что $\beta(w, w) < 0$ для любого ненулевого $w \in W$. Тогда $\#-1 = \dim W$.

Доказательство. Если заменить форму β на $-\beta$, то количество единиц в сигнатуре $-\beta$ равно количеству минус единиц в сигнатуре β . Потому достаточно доказать только первое утверждение.

Так как $\beta(w, w) > 0$ для любого ненулевого $w \in W$, то $\beta|_W$ не вырождена, а значит $V = W \oplus W^\perp$ по утверждению 169 пункт 2. Пусть e_1, \dots, e_k – базис W , в котором $\beta|_W$ диагональная с единицами на диагонали. Так же выберем e_{k+1}, \dots, e_n базис W^\perp , в котором $\beta|_{W^\perp}$ диагоналізуема с единицами, минус единицами и нулями на диагонали. Если в сигнатуре $\beta|_{W^\perp}$ есть хотя бы одна единица, например на $k+1$ месте, то на подпространстве $W + \langle e_{k+1} \rangle$ в базисе e_1, \dots, e_{k+1} форма β задана в виде $\beta(x, y) = x^t y$ и потому $\beta(x, x)$ положительна для любого ненулевого вектора, что противоречит выбору W . Значит в сигнатуре $\beta|_{W^\perp}$ могут быть только -1 и 0 . А значит в сигнатуре β единицы взялись только из блока для $\beta|_W$, что завершает доказательство. \square

Замечания

- Стоит отметить, что аналог формулы из предыдущего утверждения не подходит для вычисления $\#0$. Например, если взять $\beta: \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ заданную матрицей $\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$, то для $W = \langle e_1 \rangle$ выполнено $\beta|_W = 0$. Однако, форма β невырождена, а значит $\#0 = 0$. В этом случае $\#0$ надо искать как размерность ядра формы.
- Аналогично можно показать следующее утверждение. Если $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ – симметричная билинейная форма, $U \subseteq V$ – подпространство такое, что $\beta|_U$ невырождена, тогда $\#1$ для β не меньше, чем $\#1$ для $\beta|_W$ и $\#-1$ для β не меньше, чем $\#-1$ для $\beta|_W$.

Утверждение 181. Пусть V – векторное пространство над \mathbb{R} и $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ – симметричная билинейная форма на V . Пусть $W \subseteq V$ – максимальное по вложению подпространство такое, что $\beta|_W = 0$. Тогда $\dim W = \min(\#1, \#-1) + \#0$.

Доказательство. Обратите внимание, что $\ker \beta \subseteq W$. Действительно, если это не так, то на подпространстве $W + \ker \beta$ форма β полностью нулевая, но это подпространство больше по включению. Теперь выберем базис пространства V следующим образом: в начале возьмем $e_1, \dots, e_k \in \ker \beta$ – базис ядра. Потом дополним его до базиса W векторами e_{k+1}, \dots, e_{k+m} . Пусть $U = \langle e_{k+1}, \dots, e_{k+m} \rangle$. Тогда $W = \ker \beta \oplus U$. Так же дополним W прямым слагаемым до всего подпространства V , то есть найдем такое $E \subseteq V$, что $V = W \oplus E$.

Заметим, что ограничение $\beta': U \times E \rightarrow \mathbb{R}$ не имеет левого ядра. Действительно, если у этой формы есть левое ядро, то эти векторы лежат в ядре β , которое не пересекается с U , противоречие. Значит, мы можем найти в E подпространство U' такой же размерности, что и U такие, что ограничение β на $U \times U'$ будет невырожденной. А значит, мы можем выбрать базис в U и U' так, что матрица в нем будет иметь вид

$$\begin{pmatrix} \beta|_U & \beta|_{U \times U'} \\ \beta|_{U' \times U} & \beta|_{U'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & E \\ E & * \end{pmatrix}$$

Симметричным гауссом вычитая более верхние строки из более нижних и более левые столбцы из более правых, мы можем занулить блок справа внизу. Значит можно так поменять базис, что

$$\begin{pmatrix} \beta|_U & \beta|_{U \times \bar{U}} \\ \beta|_{\bar{U} \times U} & \beta|_{\bar{U}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & E \\ E & 0 \end{pmatrix}$$

для некоторого нового подпространства \bar{U} .

На подпространстве $U \oplus E$ форма β не вырождена, а значит $U \oplus E = U \oplus \bar{U} \oplus (U \oplus \bar{U})^\perp$ по утверждению 169 пункт (2). В итоге мы выбрали базис в $U \oplus \bar{U}$ так, что матрица билинейной формы на этом подпространстве имеет вид

$$\begin{pmatrix} 0 & E \\ E & 0 \end{pmatrix}$$

А значит, выбрав базис в ортогональном дополнении и в ядре, мы получим, что матрица для β имеет вид

$$B_\beta = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E & 0 \\ 0 & E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C \end{pmatrix}$$

При этом W порождено базисными векторами соответствующим первым двум блокам.

Теперь мы можем допривести полученную матрицу к диагональному виду. В перестановке базисных векторов можно сделать

$$\begin{pmatrix} 0 & E \\ E & 0 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} 0 & 1 & & \\ 1 & 0 & & \\ & & 0 & 1 \\ & & 1 & 0 \\ & & & & \ddots \end{pmatrix}$$

А теперь мы видим, что у каждого блока 2 на 2 сигнатура состоит из одной единицы и одной минус единицы. Далее мы доприводим блок C к диагональному виду. Получаем

$$B_\beta = \begin{pmatrix} 0 & & & & \\ & E & & & \\ & & -E & & \\ & & & E & \\ & & & & -E \end{pmatrix}$$

Здесь последние два блока взялись из матрицы C . Откуда мы видим, что размерность W не больше $\#0 + \min(\#1, \#-1)$. Давайте покажем, что если размерность W строго меньше, то мы можем его увеличить. Если размерность строго меньше, то это значит, что в сигнатуре C есть и единицы и минус единицы. Вернемся к базису, в котором матрица билинейной формы имеет вид

$$B_\beta = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E & 0 \\ 0 & E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C \end{pmatrix}$$

Пусть U – подпространство, на котором билинейная форма задана матрицей C . Так как в сигнатуре C есть и единицы и минус единицы, мы можем выбрать в C два ортогональных вектора f и g такие, что $\beta(f, f) = 1$ и $\beta(g, g) = -1$. Тогда можно проверить, что на подпространстве $W + \langle f + g \rangle$ форма β будет тождественно нулем. А это противоречит максимальной размерности W . Это противоречие возникло из предположения, что $\dim W < \#0 + \min(\#1, \#-1)$. \square

15.3 Положительная и отрицательная определенность формы над \mathbb{R}

Определение 182. Пусть $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ – симметричная билинейная форма. Тогда

- β (или Q_β) называется положительно определенной (или кратко положительной), если $Q_\beta(v) > 0$ для любого $v \neq 0, v \in V$.
- β (или Q_β) называется отрицательно определенной (или кратко отрицательной), если $Q_\beta(v) < 0$ для любого $v \neq 0, v \in V$.
- β (или Q_β) называется неотрицательно определенной (или кратко неотрицательной), если $Q_\beta(v) \geq 0$ для любого $v \in V$.
- β (или Q_β) называется неположительно определенной (или кратко неположительной), если $Q_\beta(v) \leq 0$ для любого $v \in V$.
- В противном случае β и Q_β называются неопределенными.

Замечание Обратите внимание, что определение зависит от значений квадратичной формы, а не самой билинейной формы. То есть $\beta(u, v)$ может быть вообще говоря каким угодно (если $\beta(u, v) > 0$, то $\beta(-u, v) < 0$), а мы смотрим на $\beta(v, v)$.

Ниже я все определения отразил в единой табличке. В ней подразумевается, что билинейная форма задана на пространстве размерности n .

Термин	Обозначения	Условие	Индексы
Положительная	$\beta > 0$ или $Q > 0$	$\forall x \neq 0 \Rightarrow Q(x) > 0$	$\#1 = n$
Отрицательная	$\beta < 0$ или $Q < 0$	$\forall x \neq 0 \Rightarrow Q(x) < 0$	$\# - 1 = n$
Неотрицательная	$\beta \geq 0$ или $Q \geq 0$	$\forall x \Rightarrow Q(x) \geq 0$	$\# - 1 = 0$
Неположительная	$\beta \leq 0$ или $Q \leq 0$	$\forall x \Rightarrow Q(x) \leq 0$	$\#1 = 0$
Неопределенная		$\exists x, y \Rightarrow Q(x) > 0$ и $Q(y) < 0$	$\#1 > 0$ и $\# - 1 > 0$

Утверждение 183 (Критерий Сильвестра). Пусть $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ – симметрическая билинейная форма и пусть в некотором базисе e_1, \dots, e_n она записывается в виде $\beta(x, y) = x^t B y$, где $B \in M_n(\mathbb{R})$ – симметрическая матрица. Обозначим ее угловые миноры через $\Delta_1, \dots, \Delta_n$. Тогда

1. Форма β положительно определена тогда и только тогда, когда $\Delta_i > 0$ для любого i .
2. Форма β отрицательно определена тогда и только тогда, когда $\text{sgn } \Delta_i = (-1)^i$.

Доказательство. (1) Пусть $W = \langle e_1, \dots, e_i \rangle$. Если β положительно определена, то $\beta|_W$ тоже положительно определена. Кроме того $\Delta_i = \det \beta|_W$. Так как над полем \mathbb{R} знак определителя формы не зависит от базиса (раздел 14.3), то достаточно посчитать этот определитель в удобном базисе. Так как $\beta|_W$ положительно определена, то $\#1 = n$, то есть в каком то базисе она задана единичной матрицей.

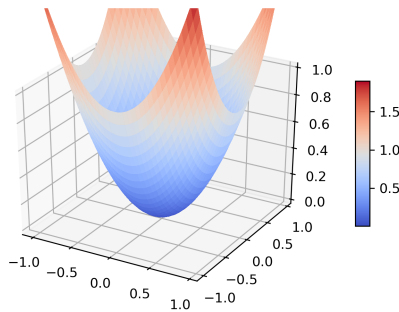
Обратно, пусть $\Delta_i > 0$. Тогда можно применить алгоритм Якоби. Значит форма приводится к диагональному виду с числами $\Delta_1, \Delta_2/\Delta_1, \dots, \Delta_n/\Delta_{n-1}$ на диагонали. Значит $\#1 = n$, то есть форма положительно определена.

(2) Заметим, что β отрицательно определена тогда и только тогда, когда $-\beta$ положительно определена. Тогда $\text{sgn } \Delta_i(-\beta) = (-1)^i \text{sgn } \Delta_i(\beta)$. Теперь утверждение следует из первого пункта. \square

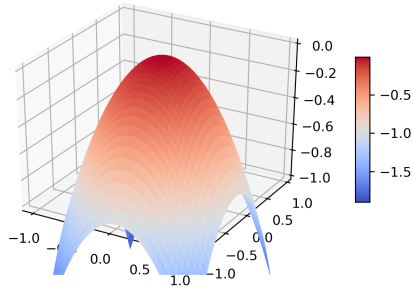
15.4 Графики Квадратичных форм

Пусть $V = \mathbb{R}^2$. Тогда квадратичная форма $Q(x, y)$ задает функцию от двух переменных. Давайте нарисуем ее графики в различных ситуациях.

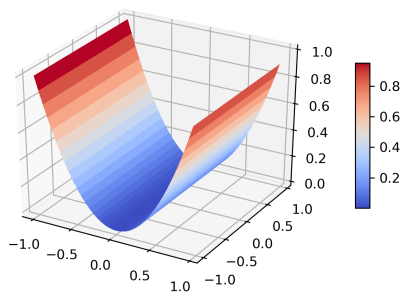
1. Положительно определенная форма $z = x^2 + y^2$. Начало координат – точка минимума.



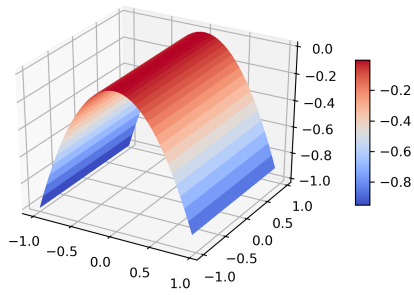
2. Отрицательно определенная форма $z = -x^2 - y^2$. Начало координат – точка максимума.



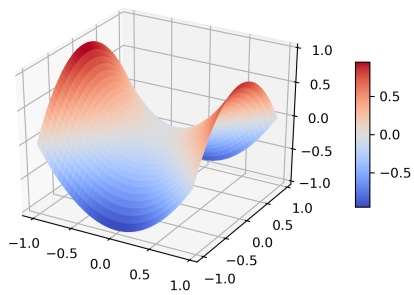
3. Неотрицательно определенная форма $z = x^2$. Минимум достигается на прямой $x = 0$.



4. Неположительно определенная форма $z = -x^2$. Максимум достигается на прямой $x = 0$.



5. Неопределенная форма $z = x^2 - y^2$. Начало координат – седловая точка.



15.5 Анализ поверхности

Квадратичные формы применяются для анализа поверхности графика функции от многих переменных. Давайте я вкратце обрисую как. Пусть $f \in C^2(\mathbb{R}^n)$ – функция n переменных, дифференцируемая дважды и вторые производные все непрерывны. Тогда для любой точки $a \in \mathbb{R}^n$ выполнено разложение Тейлора

$$f(z) = f(a) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i}(a)(z_i - a_i) + \sum_{ij=1}^n \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}(a)(z_i - a_i)(z_j - a_j) + o(|z - a|^2)$$

Здесь $o(|z - a|^2) = |z - a|^2 o(1)$, где $o(1) \rightarrow 0$ когда $z \rightarrow a$. Геометрический смысл слагаемых следующий

1. Первое слагаемое $f(a)$ – значение функции в точке. Тут я никого этим не удивил. Это лучшее приближение константой для нашей функции в точке a .
2. Второе слагаемое

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i}(a)(z_i - a_i)$$

задает касательную плоскость в точке a к графику функции $y = f(z)$. То есть это линейное приближение для графика функции. Эта плоскость горизонтальна тогда и только тогда, когда $\frac{\partial f}{\partial x_i}(a) = 0$ для всех $1 \leq i \leq n$.

3. Третье слагаемое

$$\sum_{ij=1}^n \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}(a)(z_i - a_i)(z_j - a_j)$$

является квадратичным приближением для графика функции. Матрица с коэффициентами $\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}(a)$ задает квадратичную форму называемую гессианом. Если касательная плоскость горизонтальна, то сигнатура этой квадратичной формы определяет поведение графика в окрестности точки.

- Если форма положительно определена, то это точка локального минимума.
- Если форма отрицательно определена, то это точка локального максимума.
- Если форма не вырождена и неопределена, то это седловая точка

16 Евклидовы пространства

16.1 Определение и примеры

Определение 184. Евклидово пространство – это пара V и $(-, -)$, где

- V – векторное пространство над полем \mathbb{R} .
- $(-, -): V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ – билинейная форма

При этом выполнены следующие аксиомы:

1. Форма $(-, -)$ симметрическая.
2. Форма $(-, -)$ положительно определена.

Такая билинейная форма называется скалярным произведением.

Очень часто, для краткости, когда задано евклидово пространство $V, (-, -)$, говорят, что V является евклидовым пространством, подразумевая, что на нем есть скалярное произведение.

Примеры

1. Пространство \mathbb{R}^n со стандартным скалярным произведением $(x, y) = x^t y$. Тогда $Q(x) = x^t x = \sum_{i=1}^n x_i^2 > 0$ при $x \neq 0$.
2. Пространство $M_n(\mathbb{R})$ со скалярным произведением $(A, B) = \text{tr}(A^t B)$. Тогда $Q(A) = \text{tr}(A^t A) = \sum_{i,j=1}^n a_{ij}^2 > 0$ при $A \neq 0$.
3. Пусть $C[0, 1]$ – пространство непрерывных функций на отрезке $[0, 1]$ с скалярным произведением $(f, g) = \int_0^1 f(x)g(x) dx$. Тогда $Q(f) = \int_0^1 f^2(x) dx > 0$ при $f \neq 0$.¹³⁰

Важный вопрос: а как задавать скалярные произведения на некотором пространстве V ? Если в V выбрать базис, то оно превратится в \mathbb{R}^n . Тогда скалярное произведение задается симметричной матрицей B с положительной сигнатурой. Самый неудобный момент здесь заключается в том, что вообще говоря, глядя на матрицу B не очевидно является ли она положительно определенной или нет. Для этого надо пользоваться критерием Сильвестра (утверждение 183). Оказывается есть способ лучше, его мы обсудим далее.

16.2 Ортогональные и ортонормированные базисы

Определение 185. Пусть V – евклидово пространство. Тогда

- Набор $v_1, \dots, v_k \in V$ называется ортогональным, если $(v_i, v_j) = 0$ для всех $i \neq j$.
- Набор $v_1, \dots, v_k \in V$ называется ортонормированным, если он ортогонален и $(v_i, v_i) = 1$ для любого i .

Если e_1, \dots, e_n – базис V , то он называется ортогональным или ортонормированным базисом, если набор e_1, \dots, e_n ортогонален или ортонормирован.

Замечания

- Базис является ортогональным тогда и только тогда, когда матрица скалярного произведения в нем диагональная.
- Базис является ортонормированным тогда и только тогда, когда матрица скалярного произведения в нем единичная.
- Утверждение 178 говорит, что матрицу скалярного произведения всегда можно привести к единичной в некотором базисе. То есть ортонормированные базисы существуют.
- Процесс применяемый в методе Якоби (раздел 14.9) превращает любой базис в ортогональный.¹³¹

¹³⁰В силу непрерывности, если $f(x) \neq 0$, то в какой-то окрестности $(x - \delta, x + \delta)$ точки x имеем $|f(y)| > |f(x)| - \varepsilon$.

¹³¹В евклидовых пространствах этот процесс называется процессом ортогонализации Грама-Шмидта. Определение будет дальше.

Утверждение 186. Пусть V – векторное пространство над \mathbb{R} . Тогда для любого базиса e_1, \dots, e_n существует единственное скалярное произведение $(-, -)$ на V такое, что e_1, \dots, e_n является ортонормированным базисом.

Доказательство. Зафиксируем базис e_1, \dots, e_n . Тогда задать билинейную форму – это все равно, что задать матрицу $B \in M_n(\mathbb{R})$ (утверждение 151). Когда такая матрица B задает скалярное произведение, в котором e_1, \dots, e_n – ортонормированный базис? Тогда и только тогда, когда $B = E$. \square

По ортогональным и ортонормированным базисам удобно раскладывать произвольные векторы.

Утверждение 187. Пусть V – евклидово пространство, e_1, \dots, e_n – базис и $v \in V$ – произвольный вектор. Тогда

1. Если e_1, \dots, e_n ортогональный, то

$$v = \frac{(v, e_1)}{(e_1, e_1)} e_1 + \dots + \frac{(v, e_n)}{(e_n, e_n)} e_n$$

2. Если e_1, \dots, e_n ортонормированный, то

$$v = (v, e_1) e_1 + \dots + (v, e_n) e_n$$

Доказательство. Вторая формула есть элементарное следствие первой, так как $(e_i, e_i) = 1$ для ортонормированного базиса. Потому достаточно доказать первую формулу. Пусть $v = \alpha_1 e_1 + \dots + \alpha_n e_n$. Умножим скалярно левую и правую часть на вектор e_k , тогда получим $(v, e_k) = \sum_{i=1}^n \alpha_i (e_i, e_k) = \alpha_k (e_k, e_k)$. Значит, $\alpha_k = \frac{(v, e_k)}{(e_k, e_k)}$, что и требовалось. \square

Утверждение 188. Пусть $A \in M_n(\mathbb{R})$. Тогда следующие условия равносильны

1. $A^t A = E$.

2. $AA^t = E$.

3. $A^t = A^{-1}$.

Доказательство. Это следует из существования и единственности обратного при наличии левого или правого обратного (утверждение 3). \square

Определение 189. Матрица $A \in M_n(\mathbb{R})$ называется ортогональной, если выполнено одно из эквивалентных свойств из предыдущего утверждения, например, $A^t A = E$.

Замечание Рассмотрим в \mathbb{R}^n стандартное скалярное произведение. Если $A \in M_n(\mathbb{R})$, то условие $A^t A = E$ означает, что столбцы матрицы A образуют ортонормированный базис. Условие $AA^t = E$ означает, что строки матрицы A образуют ортонормированный базис. Важно понимать, что эти условия эквивалентны. А именно, если вы возьмете ортонормированный базис в \mathbb{R}^n и поставите эти векторы в столбцы матрицы A , то строки этой матрицы автоматически образуют некий другой ортонормированный базис в \mathbb{R}^n .

Утверждение 190. Пусть V – евклидово пространство. Тогда

1. Если e_1, \dots, e_n и f_1, \dots, f_n – два ортонормированных базиса, то матрица перехода между ними будет ортогональной.

2. Если e_1, \dots, e_n – ортонормированный базис и $C \in M_n(\mathbb{R})$ – ортогональная матрица, то базис $(e_1, \dots, e_n)C$ будет ортонормированным.

Доказательство. (1) Пусть $(f_1, \dots, f_n) = (e_1, \dots, e_n)C$, где $C \in M_n(\mathbb{R})$. Так оба базиса ортонормированные, то матрица скалярного произведения в каждом из этих базисов единичная. По правилу изменения матрицы билинейной формы при смене базиса получаем $E = C^t E C$. Значит C ортогональная.

(2) Пусть $(f_1, \dots, f_n) = (e_1, \dots, e_n)C$. В базисе e_1, \dots, e_n матрица билинейной формы E , так как он ортонормированный. Матрица в базисе f_1, \dots, f_n будет $C^t E C$. Так как C ортогональная, то это будет E , то есть f_1, \dots, f_n – ортонормированный базис. \square

Таким образом за переход между ортонормированными базисами отвечают только ортогональные матрицы.

16.3 Классификация Евклидовых пространств

Если у нас есть два векторных пространства V и U , то они изоморфны (то есть по сути одно и то же векторное пространство, но заданное по-разному) тогда и только тогда, когда у них одинаковые размерности (утверждение 79). Теперь мы хотим решить ту же самую задачу для евклидовых пространств – понять, когда они будут одинаковыми. Для начала надо объяснить, что значит изоморфизм евклидовых пространств.

Определение 191. Пусть V и U – два евклидовых пространства. Линейное отображение $\phi: V \rightarrow U$ называется изоморфизмом евклидовых пространств, если

1. ϕ – изоморфизм векторных пространств.
2. Для любых $v, u \in V$ выполнено $(v, u) = (\phi(v), \phi(u))$.¹³²

При наличии изоморфизма между евклидовыми пространствами V и U они называются изоморфными.

Второе условие в определении можно выразить коммутативностью следующей диаграммы

$$\begin{array}{ccc}
 V \times V & & (v, u) \\
 \downarrow \phi \times \phi & \searrow & \downarrow \\
 U \times U & \rightarrow & (\phi(v), \phi(u))
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{ccc}
 & & (v, u) \\
 & \searrow & \downarrow \\
 & & (v, u) = (\phi(v), \phi(u))
 \end{array}$$

Смысл определения в том, что при изоморфизме не только вектора и операции над ними переходят в соответствующие вектора и операции, но и скалярное произведение на первом пространстве превращается в скалярное произведение на втором после применения изоморфизма. Значит при таком изоморфизме вся структура евклидова пространства сохраняется, а значит мы считаем, что такие пространства одинаковые, как евклидовы пространства. Более того, все свойства таких пространств (если они выражены в терминах евклидова пространства) одинаковые и одно можно безболезненно менять на другое, если это удобно.

Утверждение 192. Два евклидовых пространства V и U изоморфны тогда и только тогда, когда $\dim V = \dim U$.

Доказательство. Ясно, что у изоморфных пространств одинаковая размерность. Потому надо показать, что из условия $\dim V = \dim U$ найдется изоморфизм, согласованный со скалярным произведением. Давайте выберем ортонормированный базис e_1, \dots, e_n в V и ортонормированный базис f_1, \dots, f_n в U . Тогда построим линейное отображение $\phi: V \rightarrow U$ отправляющее $e_i \mapsto f_i$ (такое найдется единственное по утверждению 78). Если векторы $v, u \in V$ имеют координаты $x, y \in \mathbb{R}^n$ в базисе e_1, \dots, e_n , то векторы $\phi(v), \phi(u) \in U$ имеют те же самые координаты x, y в базисе f_1, \dots, f_n . Тогда $(v, u) = x^t y$ и $(\phi(v), \phi(u)) = x^t y$. \square

Замечания

- Таким образом добавление скалярного произведения к пространству не увеличивает количество не изоморфных векторных пространств.
- Пространство \mathbb{R}^2 со стандартным скалярным произведением является «школьной плоскостью», которую мы все долго и упорно изучали в курсе геометрии школьной программы. А пространство \mathbb{R}^3 со стандартным произведением является «школьным пространством».
- Самым важным с идейной точки зрения является следующее наблюдение, которое вытекает из предыдущего утверждения. Пусть мы хотим доказать что-то про два вектора $v, u \in V$ в каком-то евклидовом пространстве. Тогда они обязательно содержатся в каком-то двумерном подпространстве $U \subseteq V$. Само U тоже является евклидовым вместе с ограничением скалярного произведения с V . Но у нас есть школьная плоскость, которая тоже является двумерным евклидовым пространством. А значит, это то же самое пространство, что и U . То есть нам достаточно доказать факт для произвольных двух векторов на школьной плоскости. Получается, что автоматически можно пользоваться результатами школьной геометрии. Аналогичная идея работает с тремя векторами и сведением задачи к школьной стереометрии.
- Несмотря на то, что можно пользоваться школьной геометрией, бывает полезно понять, как именно доказывать те или иные утверждения пользуясь формализмами линейной алгебры напрямую. Потому я буду периодически демонстрировать какие-то вещи в лоб.

¹³²Здесь слева скалярное произведение в пространстве V , а справа в пространстве U .

16.4 Геометрия в Евклидовых пространствах

Определение 193. Пусть V – евклидово пространство и $v \in V$ – произвольный вектор. Определим длину вектора $|v| = \sqrt{(v, v)}$.

Замечания

- Именно для того, чтобы определить длину произвольного вектора, нам нужна положительная определенность в определении скалярного произведения.
- Обратите внимание, что $|v| = 0$ тогда и только тогда, когда $v = 0$.
- Если выбрать ортонормированный базис, то $|x| = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}$. То есть это $|\cdot|_2$ норма на \mathbb{R}^n . На самом деле можно развивать теорию норм на произвольных векторных пространствах, как это делается в функциональном анализе.

Утверждение 194 (Неравенство Коши-Буняковского). Пусть V – евклидово пространство, $v, u \in V$, тогда $|(v, u)| \leq |v||u|$. Кроме того, равенство достигается тогда и только тогда, когда u и v лежат на одной прямой.

Доказательство. Так как у нас всего два вектора, можно считать, что V двумерно. Выберем первый базисный вектор e_1 вдоль v (если v нулевой, то выбираем любой), а второй – любой ортогональный к e_1 и длины 1. Тогда

$$v = \begin{pmatrix} a \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{и} \quad u = \begin{pmatrix} b \\ c \end{pmatrix}$$

Тогда $|(v, u)| = |ab|$, а $|v||u| = |a|\sqrt{b^2 + c^2}$. Доказываемое неравенство превращается в $|ab| \leq |a|\sqrt{b^2 + c^2}$, что очевидно.

Давайте проанализируем, когда в нем достигается равенство. Во-первых, если $a = 0$. В этом случае v и u лежат на одной прямой. Если $a \neq 0$, то мы получаем условие $|b| = \sqrt{b^2 + c^2}$, что равносильно тому, что $c = 0$. В этом случае векторы тоже лежат на одной прямой. Обратно, если векторы лежат на одной прямой, то $v = \lambda e$ и $u = \mu e$ для некоторого ненулевого вектора $e \in V$. Тогда $(v, u) = \lambda\mu(e, e)$, а с другой стороны $|v||u| = |\lambda e||\mu e| = |\lambda\mu||e|^2 = |\lambda\mu|(e, e)$. \square

Замечание Хочу обратить внимание на то, что по сути доказательство можно было закончить на первой строчке, где я ссылаюсь на школьную геометрию. Вся остальная часть всего лишь доказывала факт из школьной геометрии. Это было сделано для полноты изложения. К тому же я продемонстрировал метод последовательного выбора удобных базисных векторов, который часто применяется при решении задач аналитической геометрии. Подобный метод позволяет упростить разбор общего случая в координатах за счет наличия большого количества нулей в векторах. В нашем случае ноль был всего один, но это сильно сократило вычисления.

Из неравенства Коши-Буняковского следует, что для любых двух ненулевых векторов $v, u \in V$ верно $-1 \leq \frac{(v, u)}{|v||u|} \leq 1$. А значит найдется единственное число $\alpha \in [0, \pi]$ такое, что $\cos \alpha = \frac{(v, u)}{|v||u|}$.

Определение 195. Пусть V – евклидово пространство и $v, u \in V$ – два вектора. Тогда число α такое, что $\cos \alpha = \frac{(v, u)}{|v||u|}$, называется углом между векторами v и u . Будем этот угол обозначать через $\angle(v, u)$.

Замечание Так как два вектора v и u всегда лежат внутри «школьной плоскости», то определение угла превращается в то самое определение угла, которое дается в школьном курсе геометрии. Потому от этого угла надо ожидать ровно то же самое поведение, к которому мы привыкли в курсе школьной геометрии. Просто потому, что это тот же самый угол.

Утверждение 196 (Теорема Пифагора). Пусть V – евклидово пространство и $v, u \in V$ – два ортогональных вектора, тогда $|v + u|^2 = |v|^2 + |u|^2$.

Доказательство. Формальное доказательство в этом случае является наиболее простым:

$$|v + u|^2 = (v + u, v + u) = (v, v) + (v, u) + (u, v) + (u, u) = (v, v) + (u, u) = |v|^2 + |u|^2$$

Здесь $(v, u) = (u, v) = 0$ из ортогональности u и v . \square

Процесс, применяемый к базисным векторам в методе Якоби (раздел 14.9), в случае евклидова пространства называется ортогонализацией Грама-Шмидта. Единственное отличие – ортогонализация Грама-Шмидта применяется не только к линейно независимым векторам, а к произвольным системам векторов.

Ортогонализация методом Грама-Шмидта

Дано Евклидово пространство V , система векторов $\{v_1, \dots, v_k\} \subseteq V$.¹³³

Задача Найти систему ортогональных векторов $\{u_1, \dots, u_r\} \subseteq V$ такую, что $\langle v_1, \dots, v_k \rangle = \langle u_1, \dots, u_r \rangle$.

Алгоритм

1. В качестве первого вектора u_1 берем первый ненулевой вектор из v_i . Если таких нет, то ответ – пустое множество.
2. Пусть мы нашли вектора u_1, \dots, u_s и пусть v_d – первый еще не просмотренный вектор среди v_i . Посчитать вектор

$$u' = v_d - \frac{(v_d, u_1)}{(u_1, u_1)}u_1 - \dots - \frac{(v_d, u_s)}{(u_s, u_s)}u_s$$

3. Если $u' \neq 0$ положим $u_{s+1} = u'$, иначе пропустим v_d . Теперь перейдем к предыдущему шагу с вектором v_{d+1} вместо v_d .

16.5 Проекции

Утверждение 197. Пусть V – евклидово пространство и $U \subseteq V$ – произвольное подпространство. Тогда $V = U \oplus U^\perp$.

Доказательство. Это в точности утверждение 169 пункт (2). □

Таким образом в евклидовом пространстве V при фиксированном подпространстве $U \subseteq V$, любой вектор $v \in V$ единственным образом раскладывается в сумму $v = \text{pr}_U v + \text{ort}_U v$, где $\text{pr}_U v \in U$ и $\text{ort}_U v \in U^\perp$.

Определение 198. Если V – евклидово пространство, $U \subseteq V$ – произвольное подпространство и $v \in V$, то

- Вектор $\text{pr}_U v$ называется ортогональной проекцией v на U .
- Вектор $\text{ort}_U v$ называется ортогональной составляющей v относительно U .

Обратите внимание, что ортогональная проекция v на U – это проекция v на U вдоль U^\perp , а ортогональная составляющая – проекция v на U^\perp вдоль U .

Формула БАБА

Давайте я в начале разберу задачу нахождения проекции вектора на подпространство вдоль другого подпространства (здесь нам не нужно никакое скалярное произведение). Пусть V – некоторое векторное пространство и $V = U \oplus W$. Тогда на пространстве V задан оператор проекции $P: V \rightarrow V$ такой, что $\ker P = W$ и $P|_U = \text{Id}$, то есть, если $v \in V$ раскладывается в сумму $v = u + w$, где $u \in U$ и $w \in W$, то $Pv = u$ – оператор вычисления проекции на U вдоль W .

Теперь мы хотим научиться эффективно считать P . Для этого предположим $V = \mathbb{R}^n$, $U = \langle u_1, \dots, u_k \rangle$, $W = \{y \in \mathbb{R}^n \mid Ay = 0\}$, где $A \in M_{s \times n}(\mathbb{R})$. В этом случае $P: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ задается некоторой матрицей. Наша задача – найти эту матрицу.

Предположим для простоты, что векторы u_1, \dots, u_k образуют базис U , а строки матрицы A линейно независимы. Определим матрицу $B = (u_1 \mid \dots \mid u_k) \in M_{n \times k}(\mathbb{R})$. Тогда утверждаются следующие вещи:

1. Количество столбцов B совпадает с количеством строк A , то есть $k = s$.
2. Матрица AB обратима.
3. Оператор проекции задается формулой $P = B(AB)^{-1}A$. Мнемоническое правило «БАБА».

¹³³Обратите внимание, что V не обязательно задано как пространство столбцов \mathbb{R}^n . Это может быть и пространство многочленов определенной степени или пространство тригонометрических функций, или вообще что угодно. Даже если V задано как \mathbb{R}^n , то скалярное произведение не обязательно стандартное, т.е. скалярное произведение может быть задано любой положительной симметрической матрицей.

Доказательство. Так как мы уже взрослые, я позволю себе пользоваться линейными операторами и отображениями, а не просто матричной техникой. Матрица A задает линейное отображение $A: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^s$ такое, что $\ker A = W$ и $\operatorname{Im} A = \mathbb{R}^s$ (так как строки матрицы A линейно независимы, то $\operatorname{rk} A = s$, но $\operatorname{rk} A = \dim \operatorname{Im} A$). Матрица B задает отображение $B: \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^n$ такое, что $\operatorname{Im} B = U$ и $\ker B = 0$ (так как столбцы B линейно независимы).

(1) Теперь мы знаем, что

$$\begin{array}{lll} \dim U + \dim W = n & \text{то есть} & k + \dim W = n \\ \dim \ker A + \dim \operatorname{Im} A = n & & \dim W + s = n \end{array} \quad \text{откуда} \quad s = k$$

(2) Теперь рассмотрим отображение $AB: \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^k$. Заметим, что $\operatorname{Im} B \cap \ker A = U \cap W = 0$. Значит $\ker AB = 0$, то есть AB – обратимый оператор.

(3) Теперь выведем формулу для P . Пусть $v = u + w$, где $v \in \mathbb{R}^n$ – произвольный вектор, $u \in U$ и $w \in W$ – его единственное разложение по прямой сумме подпространств. Тогда $Av = Au + Aw = Au$. С другой стороны, так как $u \in U$, мы имеем $u = Bx$ для некоторого $x \in \mathbb{R}^k$. Тогда $Av = ABx$. Так как AB обратимая квадратная матрица, имеем $x = (AB)^{-1}Av$. Значит $u = Bx = B(AB)^{-1}Av$, что и требовалось. \square

Обратите внимание, что проектор P на U вдоль W зависит от двух подпространств, а не только от U . Если вы измените одно из них, то проектор изменится.

Формула Атата

Пусть $V = \mathbb{R}^n$ со стандартным скалярным произведением $(x, y) = x^t y$ и пусть подпространство $U \subseteq V$ задано своим базисом $U = \langle u_1, \dots, u_k \rangle$. Составим матрицу $A = (u_1 | \dots | u_k) \in M_{n \times k}(\mathbb{R})$. Тогда $U^\perp = \{y \in \mathbb{R}^n \mid A^t y = 0\}$. Пусть теперь $v \in V$ – произвольный вектор и $v = \operatorname{pr}_U v + \operatorname{ort}_U v$. Тогда формула «БАБА» превращается в $\operatorname{pr}_U v = A(A^t A)^{-1} A^t v$. Мнемоническое правило для запоминания: в евклидовом пространстве БАБА – это Атата.

Обратите внимание, что проектор P всегда зависит от двух подпространств: то, на которое проектируем U , и то, вдоль которого проектируем W . Но в случае ортогонального проектирования $W = U^\perp$, потому ортопроектор P реально зависит только от одного подпространства.

16.6 Расстояния и углы

Определение 199. Пусть V – евклидово пространство и $u, v \in V$ – произвольные векторы. Тогда определим расстояние между векторами по формуле $\rho(u, v) = |u - v|$.

Утверждение 200. Расстояние ρ на евклидовом пространстве V удовлетворяет следующим свойствам:

1. **Невырожденность** $\rho(v, u) \geq 0$ для любых $u, v \in V$ причем равенство достигается тогда и только тогда, когда $v = u$.
2. **Симметричность** $\rho(u, v) = \rho(v, u)$ для любых $u, v \in V$.
3. **Неравенство треугольника** $\rho(u, v) \leq \rho(u, w) + \rho(w, v)$ для любых $u, v, w \in V$.

Доказательство. (1) По определению $\rho(v, u) = |v - u| \geq 0$ причем равенство достигается тогда и только тогда, когда $v - u = 0$.

(2) По определению $\rho(v, u) = |v - u| = |u - v| = \rho(u, v)$.

(3) Нам надо доказать $\rho(u, v) \leq \rho(u, w) + \rho(w, v)$, то есть $|u - v| \leq |u - w| + |w - v|$. Положим $x = u - w$ и $y = w - v$. Тогда нам надо доказать $|x + y| \leq |x| + |y|$. Так как левая и правая части этого неравенства неотрицательные, то оно равносильно неравенству $|x + y|^2 \leq (|x| + |y|)^2$. Проверяем:

$$|x + y|^2 = (x + y, x + y) = (x, x) + 2(x, y) + (y, y) = |x|^2 + 2(x, y) + |y|^2$$

По неравенству Коши-Буняковского $(x, y) \leq |x||y|$. Значит

$$|x|^2 + 2(x, y) + |y|^2 \leq |x|^2 + 2|x||y| + |y|^2 = (|x| + |y|)^2$$

\square

Замечание Если на множестве X задана функция $\rho: X \times X \rightarrow \mathbb{R}$ со свойствами из предыдущего утверждения, то пара (X, ρ) называется метрическим пространством. Самое главное, что известно про метрические пространства – принцип сжимающих отображений. Это один из способов доказывать существование объектов с нужными свойствами. Есть два важных примера:

- Теорема о неявной функции. Ее доказательство через принцип сжимающих отображений в разы проще и доступнее, чем копание в координатах.
- Теорема о существовании и единственности решения дифференциального уравнения. Дифференциальное уравнение обычно заменяется на интегральное, после чего можно пользоваться метрическими пространствами и принципом сжимающих отображений.

В нашем случае метрика на евклидовом пространстве скорее является случайным гостем, заглянувшим на огонек, нежели чем-то фундаментальным и сверх полезным. Самым полезным является понимание роли метрических пространств.

Определение 201. Пусть $X, Y \subseteq V$ – произвольные подмножества евклидова пространства, тогда расстояние между ними определяется следующим образом:

$$\rho(X, Y) = \inf_{\substack{x \in X \\ y \in Y}} \rho(x, y)$$

Обратите внимание, что это расстояние не удовлетворяет аксиоме не вырожденности, то есть расстояние между разными множествами может быть нулевым. Например, для этого достаточно, чтобы X и Y имели непустое пересечение. Но, даже если $X \cap Y = \emptyset$, расстояние может быть нулем. Например, если $X, Y \subseteq \mathbb{R}$ и $X = \{\frac{1}{n} \mid n \in \mathbb{N}\}$ и $Y = -X = \{-\frac{1}{n} \mid n \in \mathbb{N}\}$.

Определение 202. Пусть V – евклидово пространство, $v \in V$ и $L \subseteq V$ – некоторое подпространство. Тогда углом между v и L называется $\angle(v, L) = \inf_{u \in L} \angle(v, u)$.

Теперь давайте обсудим, как эффективно находить некоторые расстояния и углы.

Утверждение 203. Пусть V – евклидово пространство, $L \subseteq V$ – подпространство, $v \in V$ – некоторый вектор. Тогда

1. $\rho(v, L) = |\text{ort}_L v|$.
2. $\angle(v, L) = \angle(v, \text{pr}_L v)$.¹³⁴

Доказательство. (1) Пусть $u \in L$ – произвольный вектор отличный от $\text{pr}_L v$. Достаточно показать, что

$$\rho(v, u) > \rho(v, \text{pr}_L v) = |v - \text{pr}_L v| = |\text{ort}_L v|$$

Рассмотрим треугольник образованный концами следующих трех векторов: v , $\text{pr}_L v$, u . Сторона $v - \text{pr}_L v = \text{ort}_L v$ ортогональна стороне $u - \text{pr}_L v \in L$. Значит $u - v$ – гипотенуза прямоугольного треугольника. Тогда по теореме Пифагора (утверждение 196)

$$\rho(v, u) = |u - v| = \sqrt{|\text{ort}_L v|^2 + |u - \text{pr}_L v|^2} > |\text{ort}_L v|$$

Последнее неравенство строгое, так как $u \neq \text{pr}_L v$.

(2) В начале рассмотрим случай $\text{pr}_L v = 0$. Это значит, что вектор v ортогонален L и угол с любым вектором $\pi/2$. Теперь предположим, что $\text{pr}_L v \neq 0$. Выберем произвольный вектор $u \in L$ отличный от $\text{pr}_L v$ и имеющий такую же длину, как $\text{pr}_L v$. Тогда рассмотрим два треугольника: первый на векторах 0 , v , $\text{pr}_L v$, второй 0 , v , u . Тогда у обоих треугольников стороны при вершине 0 попарно одинаковой длины, а противоположные стороны – $\text{ort}_L v$ и $u - v$ соответственно. Но по доказанному выше $|\text{ort}_L v| < |u - v|$. А школьная геометрия учит нас, что в этом случае угол в первом треугольнике меньше, чем во втором.

¹³⁴Если $\text{pr}_L v = 0$, то надо считать косинус угла нулевым, то есть угол равным $\pi/2$.

формальное доказательство Для любителей формализма я приготовил второе доказательство. Случай $\text{pr}_L v = 0$ разбирается так же как и выше. Случай $\text{ort}_L v = 0$ означает, что $v \in L$. В этом случае угол между вектором и пространством нулевой и минимум достигается на $u = v$. Теперь считаем, что $\text{pr}_L v \neq 0$, $\text{ort}_L v \neq 0$ и выберем произвольный вектор $u \in L$ такой, что $|u| = |\text{pr}_L v|$. Теперь выберем единичный вектор e_1 пропорциональный $\text{pr}_L v$. Выберем единичный вектор e_2 в плоскости $\langle \text{pr}_L v, u \rangle$ ортогональным e_1 . Единичный вектор e_3 выберем пропорциональным $\text{ort}_L v$. Тогда все интересные нам векторы живут в пространстве $\langle e_1, e_2, e_3 \rangle$. Давайте запишем их в этом базисе

$$v = \begin{pmatrix} \lambda \\ 0 \\ \mu \end{pmatrix}, \quad \text{pr}_L v = \begin{pmatrix} \lambda \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad u = \begin{pmatrix} a \\ b \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \text{причем} \quad \lambda^2 = a^2 + b^2, \quad \lambda > 0$$

Условие $v = \text{pr}_L v$ означает $b = 0$ и $\lambda = a$. Нам надо показать, что $\angle(v, \text{pr}_L v) < \angle(v, u)$. То есть $\cos \angle(v, \text{pr}_L v) > \cos \angle(v, u)$. То есть надо показать, что

$$\frac{(v, \text{pr}_L v)}{|v| |\text{pr}_L v|} > \frac{(v, u)}{|v| |u|}$$

Но так как $|u| = |\text{pr}_L v|$ по выбору, нам надо доказать, что $(v, \text{pr}_L v) > (v, u)$, то есть, что $\lambda^2 > \lambda a$. Из условия $\lambda^2 = a^2 + b^2$ видно, что $|\lambda| > |a|$ при $b \neq 0$. Значит $\lambda^2 > |\lambda a|$ при $b \neq 0$. При $b = 0$ имеем $a = \lambda$ либо $a = -\lambda$. Если $u \neq \text{pr}_L v$, то возможно только $a = -\lambda$, но тогда неравенство очевидно. \square

Замечания

- Обратите внимание, что угол между вектором и подпространством всегда находится в интервале $[0, \pi/2]$ или что то же самое косинус угла всегда неотрицательный.
- Заметим следующую связь $\angle(v, \text{pr}_L v) + \angle(v, \text{ort}_L v) = \pi/2$. Причем формула верна даже когда проекция или ортогональная составляющая равны нулю. В этом случае соответствующий угол надо считать равным $\pi/2$.
- Предположим, что подпространство $L \subseteq V$ имеет коразмерность 1, то есть $\dim L = \dim V - 1$. Тогда у нас L^\perp — одномерно. Пусть $n \in L^\perp$ какой-нибудь ненулевой вектор. Таким образом n — вектор нормали к L . В этом случае n лежит с $\text{ort}_L v$ на одной прямой (может быть сонаправлен ему или смотреть в противоположную сторону). Тогда $\angle(v, \text{ort}_L v)$ равен либо $\angle(v, n)$ либо $\angle(v, -n)$ (на самом деле не большему из этих двух). То есть в этом случае можно взять к L произвольную нормаль n , посчитать угол α . Если он оказался больше $\pi/2$ заменить его на $\pi - \alpha$. После чего найти угол с подпространством как $\pi/2$ минус полученный угол.

16.7 Метод наименьших квадратов

Пусть мы хотим решить систему $Ax = b$, где $A \in M_{m,n}(\mathbb{R})$, $b \in \mathbb{R}^m$ и $x \in \mathbb{R}^n$ — столбец неизвестных. И предположим, что система не имеет решений, но от этого наше желание ее решить не становится слабее. Давайте обсудим, как удовлетворить наши желания в подобной ситуации и когда такие ситуации обычно встречаются.

Введем на пространстве \mathbb{R}^m стандартное скалярное произведение $(x, y) = x^t y$. Тогда, на процесс решения системы можно смотреть так: мы подбираем $x \in \mathbb{R}^n$ так, чтоб $\rho(Ax, b) = 0$. Если решить систему невозможно, то этот подход подсказывает, как надо поступить. Надо пытаться минимизировать расстояние между Ax и b . То есть решить задачу

$$\rho(Ax, b) \rightarrow \min_{x \in \mathbb{R}^n}$$

Теперь давайте поймем, как надо решать такую задачу. Пусть матрица A имеет вид $A = (A_1 | \dots | A_n)$, где $A_i \in \mathbb{R}^m$ — ее столбцы. Тогда система $Ax = b$ означает, $x_1 A_1 + \dots + x_n A_n = b$. То есть система разрешима тогда и только тогда, когда $b \in \langle A_1, \dots, A_n \rangle$. Значит наша задача минимизировать расстояние между b и $\langle A_1, \dots, A_n \rangle$. Тогда утверждение 203 подсказывает, что минимум расстояния достигается на $b_0 = \text{pr}_{\langle A \rangle} b$. В этом случае вместо исходной системы $Ax = b$ мы должны решить систему $Ax = b_0$. И если x_0 — ее решение, то $\rho(Ax_0, b)$ как раз и будет минимальным.

Давайте теперь предположим, что столбцы матрицы A линейно независимы. Тогда по формуле «Атата» мы знаем, что $b_0 = A(A^t A)^{-1} A^t b$. Кроме этого должно выполняться $b_0 = Ax_0$. Так как столбцы A линейно независимы, такое x_0 должно быть единственным. Но мы видим, что в качестве x_0 подходит $x_0 = (A^t A)^{-1} A^t b$.

16.8 Матрица Грама

Давайте поговорим о еще одном объекте, который возникает в связи с конечной системой векторов в Евклидовом пространстве. Таким объектом является матрица Грама. Она в частности используется для определения объемов.

Определение 204. Пусть V – евклидово пространство и $v_1, \dots, v_k \in V$ – произвольный набор векторов (k НЕ обязательно равно размерности пространства). Тогда матрица

$$G(v_1, \dots, v_k) = \begin{pmatrix} (v_1, v_1) & \dots & (v_1, v_k) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (v_k, v_1) & \dots & (v_k, v_k) \end{pmatrix} \in M_k(\mathbb{R})$$

называется матрицей Грама системы векторов v_1, \dots, v_k .¹³⁵

Если e_1, \dots, e_n – некоторый базис пространства V , то $B = G(e_1, \dots, e_n)$ – матрица скалярного произведения заданная в базисе e_1, \dots, e_n . Таким образом матрица Грама – это некоторое обобщение матрицы билинейной формы.

Теперь вспомним, что у любой билинейной формы есть операторная запись. Давайте введем следующее обозначение: для произвольных векторов $w, u \in V$ положим $w \cdot u = (w, u)$. Тогда для набора $v = (v_1, \dots, v_k)$ выполнено

$$G(v_1, \dots, v_k) = \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_k \end{pmatrix} \cdot (v_1 \dots v_k) = v^t \cdot v$$

Пусть теперь $C \in M_{k,r}(\mathbb{R})$ – некоторая матрица. Тогда из набора (v_1, \dots, v_k) можно построить новый набор $(u_1, \dots, u_r) = (v_1, \dots, v_k)C$ или кратко $u = vC$. Тогда

$$G(u) = G(vC) = (vC)^t \cdot vC = C^t v^t \cdot vC = C^t G(v)C$$

То есть $G((v_1, \dots, v_k)C) = C^t G(v_1, \dots, v_k)C$.

Утверждение 205. Пусть $v_1, \dots, v_k \in V$ – произвольный набор векторов в евклидовом пространстве. Тогда

1. Пусть $\alpha_1, \dots, \alpha_k \in \mathbb{R}$, введем обозначение $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_k)^t$. Тогда следующие условия эквивалентны:
 - (a) $\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_k v_k = 0$.
 - (b) $G(v_1, \dots, v_k)\alpha = 0$.
 - (c) $\alpha^t G(v_1, \dots, v_k)\alpha = 0$.
2. $\text{rk } G(v_1, \dots, v_k) = \dim \langle v_1, \dots, v_k \rangle$.
3. $\det G(v_1, \dots, v_k) \geq 0$. При этом равенство достигается тогда и только тогда, когда векторы линейно зависимы.
4. Если $C \in M_k(\mathbb{R})$ является матрицей элементарного преобразования I или II типа, то

$$\det G(v_1, \dots, v_k) = \det G((v_1, \dots, v_k)C)$$

Доказательство. 1) Пусть $v = (v_1, \dots, v_k)$. Тогда условие $v\alpha = 0$ влечет, что $v^t \cdot v\alpha = 0$. Но это означает, что $G(v_1, \dots, v_k)\alpha = 0$. Домножая слева на α^t получаем, что $\alpha^t G(v_1, \dots, v_k)\alpha = 0$. Осталось показать из последнего в первое. Для этого заметим, что $0 = \alpha^t G(v_1, \dots, v_k)\alpha = \alpha^t v^t \cdot v\alpha = (v\alpha, v\alpha)$. А значит $v\alpha = 0$.

2) Пункт (1) эквивалентность (a) и (b) означает, что векторы v_1, \dots, v_k обладают теми же линейными зависимостями, что и столбцы матрицы $G(v_1, \dots, v_k)$. В частности столбцовый ранг $G(v_1, \dots, v_k)$ равен рангу системы векторов (v_1, \dots, v_k) . А последняя совпадает с размерностью линейной оболочки $\langle v_1, \dots, v_k \rangle$.

3) Давайте на пространстве \mathbb{R}^k рассмотрим билинейную форму $\beta(x, y) = x^t G(v_1, \dots, v_k)y$. Давайте покажем, что она не отрицательно определена. Тогда, ее определитель должен быть не отрицательным. Действительно, тогда в каком-то базисе ее матрица диагональна с 1 и 0 на диагонали, а значит в этом базисе

¹³⁵Обратите внимание, тут важен порядок векторов. То есть формально матрица Грама зависит от набора $(v_1, \dots, v_k) \in V^k$.

определитель будет неотрицательным. Но определитель билинейной формы не меняет знак при замене базиса (раздел 14.3). Теперь остается лишь проверить, что $\beta(x, x) \geq 0$ для любого $x \in \mathbb{R}^k$. Действительно

$$x^t G(v_1, \dots, v_k) x = x^t v^t \cdot vx = (vx, vx) \geq 0$$

Последнее неравенство выполнено для любого вектора $vx \in V$ по определению скалярного произведения.

4) Если C – матрица элементарного преобразования, то $G((v_1, \dots, v_k)C) = C^t G(v_1, \dots, v_k) C$. А значит $\det(G((v_1, \dots, v_k)C)) = \det(G(v_1, \dots, v_k)) \det C^2$. Но для элементарных преобразований I и II типов $\det C = \pm 1$. \square

Заметим, что из третьего пункта следует вот какое наблюдение. Если v_1, \dots, v_k – линейно независимый набор векторов, из которого процессом ортогонализации Грама-Шмидта мы получили набор u_1, \dots, u_k , то $\det G(u_1, \dots, u_k) = \det G(v_1, \dots, v_k)$.

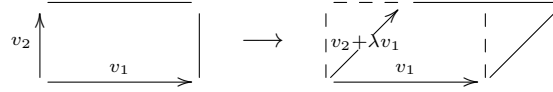
16.9 Объемы

Теперь самое время прикоснуться к объемам. Надо сказать, что существует общая теория вычисления объемов в евклидовом пространстве V . Она позволяет посчитать «объем» любого подмножества в V . Данная конструкция ведет к понятию меры Лебега и далее к интегралу Лебега. Мы, конечно же, не будем развивать подобную теорию в такой общности, а всего лишь ограничимся вычислением объемов для простых и естественных с точки зрения линейной алгебры фигур – многомерных параллелепипедов.

Определение 206. Пусть V – евклидово пространство и $v_1, \dots, v_k \in V$ – набор векторов, тогда k -мерным параллелепипедом натянутым на v_1, \dots, v_k называется следующее множество

$$\Pi(v_1, \dots, v_k) = \left\{ \sum_{i=1}^k x_i v_i \mid 0 \leq x_i \leq 1 \right\}$$

VIP пример Я хочу разобрать один важный пример. Пусть $V = \mathbb{R}^2$ – плоскость со стандартным скалярным произведением $(x, y) = x^t y$ и $v_1, v_2 \in V$ – два ортогональных вектора. Если я заменю v_2 на $v_2 + \lambda v_1$, то геометрически я наклоню мой параллелепипед вдоль направления v_1 как на рисунке ниже:



На рисунке мы видим, что параллелепипед справа отличается от параллелепипеда слева перестановкой треугольника отмеченного пунктиром. А значит их площади одинаковые. Давайте посмотрим на матрицы Грама двух наборов векторов:

$$G(v_1, v_2 + \lambda v_1) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \lambda & 1 \end{pmatrix} G(v_1, v_2) \begin{pmatrix} 1 & \lambda \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{при этом} \quad G(v_1, v_2) = \begin{pmatrix} |v_1|^2 & 0 \\ 0 & |v_2|^2 \end{pmatrix}$$

То есть $\det G(v_1, v_2 + \lambda v_1) = \det G(v_1, v_2) = |v_1|^2 |v_2|^2 = S_{\Pi(v_1, v_2)}^2$. То есть определитель матрицы Грама дает нам квадрат площади параллелограмма, натянутого на векторы v_1, v_2 . Этот пример подсказывает, как надо определять объемы в общем случае.

Определение 207. Пусть $v_1, \dots, v_k \in V$ – произвольный набор векторов в евклидовом пространстве. Тогда определим k -мерный объем параллелепипеда $\Pi(v_1, \dots, v_k)$ по следующей формуле:

$$\text{Vol}_k(\Pi(v_1, \dots, v_k)) = \sqrt{\det G(v_1, \dots, v_k)}$$

Давайте теперь покажем, что объем k -мерного параллелепипеда можно считать через площадь $(k-1)$ -мерный объем) основания на высоту.

Утверждение 208. Пусть $v_1, \dots, v_k \in V$ – произвольный набор векторов в евклидовом пространстве. Тогда

$$\text{Vol}_k(\Pi(v_1, \dots, v_k)) = \text{Vol}_{k-1}(\Pi(v_1, \dots, v_{k-1})) \rho(v_k, \langle v_1, \dots, v_{k-1} \rangle)$$

Доказательство. Пусть $h = \text{ort}_{\langle v_1, \dots, v_{k-1} \rangle} v_k$. Тогда мы знаем, что $h = v_k - \sum_{i=1}^{k-1} \alpha_i v_i$ для каких-то коэффициентов α_i (например это следует из алгоритма Грама-Шмидта). Значит по утверждению 205 пункт (4),

$$\det G(v_1, \dots, v_{k-1}, h) = \det G(v_1, \dots, v_{k-1}, v_k)$$

Так как $h \perp v_i$, то

$$G(v_1, \dots, v_{k-1}, h) = \begin{pmatrix} G(v_1, \dots, v_{k-1}) & 0 \\ 0 & (h, h) \end{pmatrix}$$

То есть

$$\det G(v_1, \dots, v_{k-1}, h) = \det G(v_1, \dots, v_{k-1}) (h, h)$$

□

Последняя формула позволяет нам вычислять расстояние от вектора до подпространства с помощью объемов. А именно, если $v \in V$ и $L \subseteq V$ – подпространство с базисом e_1, \dots, e_k , то

$$\rho(v, L) = \sqrt{\frac{\det G(e_1, \dots, e_k, v)}{\det G(e_1, \dots, e_k)}}$$

Пример Давайте рассмотрим векторное пространство \mathbb{R}^n со стандартным скалярным произведением $(x, y) = x^t y$. И пусть даны векторы $v_1, \dots, v_n \in \mathbb{R}^n$. Сложим эти векторы в матрицу $A = (v_1 | \dots | v_n)$. Тогда

$$\text{Vol}_n(\Pi(v_1, \dots, v_n)) = \sqrt{\det(A^t A)} = |\det A|$$

Таким образом в ортонормированном базисе теория неориентированного объема превращается в теорию вычисления модуля определителя.

Утверждение 209. Пусть V – евклидово пространство размерности n , $v_1, \dots, v_n \in V$ – некоторый набор векторов и $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор. Тогда

$$\text{Vol}_n(\varphi(\Pi(v_1, \dots, v_n))) = |\det \varphi| \text{Vol}_n(\Pi(v_1, \dots, v_n))$$

Доказательство. Давайте выберем произвольный ортонормированный базис $e_1, \dots, e_n \in V$. Тогда V превращается в \mathbb{R}^n , скалярное произведение становится стандартным $(x, y) = x^t y$, линейное отображение превращается в умножение на матрицу $\varphi(x) = Cx$, а векторы v_1, \dots, v_n расставим по столбцам матрицы $A = (v_1 | \dots | v_n)$.¹³⁶

Заметим, что $\varphi(\Pi(v_1, \dots, v_n)) = \Pi(\varphi(v_1), \dots, \varphi(v_n))$ – параллелепипед натянутый на столбцы матрицы CA . Теперь можно воспользоваться предыдущим примером и увидеть, что

$$\text{Vol}_n(\Pi(v_1, \dots, v_n)) = |\det A| \quad \text{и} \quad \text{Vol}_n(\varphi(\Pi(v_1, \dots, v_n))) = |\det(CA)| = |\det C| |\det A|$$

А так как $\det C = \det \varphi$ по определению, то все доказано. □

Утверждение 210. Пусть $v_1, \dots, v_k \in V$ – набор векторов в евклидовом пространстве и $C \in M_k(\mathbb{R})$ – произвольная матрица. Тогда

$$\text{Vol}_k \Pi((v_1, \dots, v_k)C) = |\det C| \text{Vol}_k \Pi(v_1, \dots, v_k)$$

Доказательство. По формуле для замены матрицы Грама (раздел 16.8) мы знаем, что

$$G((v_1, \dots, v_k)C) = C^t G(v_1, \dots, v_k) C$$

Значит $\det G((v_1, \dots, v_k)C) = \det C^2 \det G(v_1, \dots, v_k)$. Откуда следует требуемое по определению объемов. □

Таким образом, при линейной замене образующих параллелепипеда мы получаем другой параллелепипед, объем которого меняется на модуль определителя матрицы замены. Мы хотим избавиться от модуля в этой формуле, чтобы объем мог быть положительным и отрицательным.

¹³⁶Заметьте, что мы избрали мучительный и болезненный путь расчета в координатах. У вас может появиться соблазн найти другое доказательство. Однако, увы и ах. Так как в формулировке присутствует определитель отображения, то у нас нет другого способа, потому что невозможно определить $\det \varphi$ без базиса. Его свойствами пользоваться можно без базиса, но посчитать нет.

16.10 Ориентированный объем

Конструкция ориентированного объема Пусть V – евклидово пространство размерности n . Рассмотрим все возможные наборы из n векторов – V^n . Множество V^n разбивается на две части: когда набор (v_1, \dots, v_n) линейно зависим и когда он линейно независим. В первом случае $\text{Vol}_n \Pi(v_1, \dots, v_n) = 0$, а во втором $\text{Vol}_n \Pi(v_1, \dots, v_n) \neq 0$. Мы хотим поделить все линейно независимые наборы (то есть базисы) на два класса: для одного класса объемы будут положительные, а для другого – отрицательные.

Определение 211. Пусть (v_1, \dots, v_n) и (u_1, \dots, u_n) – два базиса пространства V . Тогда существует единственная матрица $C \in M_n(\mathbb{R})$ такая, что $(v_1, \dots, v_n) = (u_1, \dots, u_n)C$.¹³⁷ Будем говорить, что (v_1, \dots, v_n) эквивалентно (u_1, \dots, u_n) и писать $(v_1, \dots, v_n) \sim (u_1, \dots, u_n)$, если $\det C > 0$.

Утверждение 212. Пусть V – евклидово пространство размерности n . Тогда

1. Отношение, введенное на базисах, является отношением эквивалентности на множестве всех упорядоченных базисов

$$G_n(V) = \{(v_1, \dots, v_n) \mid v_i \in V, v_i \text{ линейно независимы}\}$$

2. Множество упорядоченных базисов $G_n(V)$ разбивается на два класса эквивалентности.

Доказательство. (1) Если $v \in G_n(V)$ – некоторый набор, то $v = vE$, а $\det E = 1 > 0$. Значит $v \sim v$. Если $v = uC$, то $u = vC^{-1}$. Но знак у $\det C$ такой же как и у $\det C^{-1}$. Значит если $v \sim u$, то $u \sim v$. Теперь пусть $v \sim u$ и $u \sim w$, то есть $v = uC$ и $u = wD$. В этом случае $v = wDC$, то $\det(DC) = \det D \det C > 0$, то есть $v \sim w$.

(2) Пусть $v, u, w \in G_n(V)$, и пусть $v \not\sim u$ и $v \not\sim w$. Покажем, что в этом случае $u \sim w$. Действительно $v \not\sim u$ означает, $v = uC$ и $\det C < 0$. Аналогично, $v = wD$ и $\det D < 0$. Тогда $u = wDC^{-1}$ и $\det(DC^{-1}) > 0$, то есть $u \sim w$. Таким образом классов эквивалентности не более двух. С другой стороны. Если набор v лежит в одном классе, а C – произвольная обратимая матрица с отрицательным определителем, то набор vC лежит в другом классе. Значит их в точности два. \square

Таким образом все базисы у нас поделились на две группы. Какую-то из этих групп нам надо назвать положительной, другую отрицательной. Какую выбрать – это наша свобода. После подобного выбора все наборы в V^n делятся на три группы: (1) линейно зависимые, у них объем ноль, (2) положительные, натянутые на них параллелепипеды имеют положительный объем, (3) отрицательные, натянутые на них параллелепипеды имеют отрицательный объем. Положительные базисы будем еще называть положительно ориентированными, а отрицательные – отрицательно ориентированными. Если зафиксированы положительные и отрицательные базисы, будем говорить, что на V зафиксирована ориентация.

Определение 213. Пусть V – евклидово пространство с фиксированной ориентацией. Тогда определим ориентированный n -мерный объем следующим образом. Пусть $(v_1, \dots, v_n) \in V$, тогда

$$\text{Vol}_n^{or} \Pi(v_1, \dots, v_n) = \begin{cases} 0, & v_1, \dots, v_n \text{ линейно зависимы} \\ \text{Vol}_n \Pi(v_1, \dots, v_n), & (v_1, \dots, v_n) \text{ положительно ориентирован} \\ -\text{Vol}_n \Pi(v_1, \dots, v_n), & (v_1, \dots, v_n) \text{ отрицательно ориентирован} \end{cases}$$

Утверждение 214. Пусть V – евклидово пространство размерности n с фиксированной ориентацией, $(v_1, \dots, v_n) \in V^n$ и $C \in M_n(\mathbb{R})$. Тогда

$$\text{Vol}_n^{or} \Pi((v_1, \dots, v_n)C) = \det C \text{Vol}_n^{or} \Pi(v_1, \dots, v_n)$$

Доказательство. Если матрица C вырождена, то набор векторов $(v_1, \dots, v_n)C$ линейно зависим, а значит левый объем равен нулю. С другой стороны $\det C = 0$, а значит и правая часть равна нулю. Аналогично, если (v_1, \dots, v_n) линейно зависимый набор, то и набор $(v_1, \dots, v_n)C$ тоже линейно зависим. А тогда объемы в левой и правой частях равны нулю. Осталось разобраться со случаем (v_1, \dots, v_n) – базис и C – невырожденная матрица. В этом случае совпадение левой и правой части по модулю следует из утверждения 210 об изменении объемов при линейной замене образующих параллелепипеда. Осталось проверить, что у них совпадают знаки. Если $\det C > 0$, то наборы (v_1, \dots, v_n) и $(v_1, \dots, v_n)C$ одинаково ориентированы. Значит знаки у $\text{Vol}_n^{or} \Pi((v_1, \dots, v_n)C)$ и $\text{Vol}_n^{or} \Pi(v_1, \dots, v_n)$ одинаковые, а к тому же $\det C > 0$. Значит знаки обеих частей равны. Пусть теперь $\det C < 0$. Тогда знаки у $\text{Vol}_n^{or} \Pi((v_1, \dots, v_n)C)$ и $\text{Vol}_n^{or} \Pi(v_1, \dots, v_n)$ разные. Но при этом $\det C < 0$, что делает знаки левой и правой части одинаковыми. Победа! \square

¹³⁷Потому что любой вектор однозначно раскладывается по базису.

Пример Пусть $V = \mathbb{R}^n$ со стандартным скалярным произведением $(x, y) = x^t y$. И пусть ориентация зафиксирована так, что стандартный базис является положительным. Возьмем $v_1, \dots, v_n \in \mathbb{R}^n$ произвольный набор векторов. Образует матрицу $A = (v_1 | \dots | v_n) \in M_n(\mathbb{R})$. Тогда

- $G(v_1, \dots, v_n) = A^t A$.
- $\det G(v_1, \dots, v_n) = \det A^2$.
- $\text{Vol}_n \Pi(v_1, \dots, v_n) = |\det A|$.
- $\text{Vol}_n^{or} \Pi(v_1, \dots, v_n) = \det A$.

Заметьте, что ориентация набора (как и знак соответствующего объема) меняется при перестановке векторов в наборе на знак совершенной перестановки. Другая причина знака объема – смена направления вектора, то есть когда вектор v_i в наборе меняется на вектор $-v_i$.

Утверждение 215. Пусть V – ориентированное евклидово пространство размерности n , $v_1, \dots, v_n \in V$ – некоторый набор векторов и $\varphi: V \rightarrow V$ – линейный оператор. Тогда

$$\text{Vol}_n^{or}(\varphi(\Pi(v_1, \dots, v_n))) = \det \varphi \text{Vol}_n^{or}(\Pi(v_1, \dots, v_n))$$

Доказательство. Выберем положительно ориентированный ортонормированный базис e_1, \dots, e_n . Тогда V превращается в \mathbb{R}^n , скалярное произведение становится стандартным $(x, y) = x^t y$, линейное отображение превращается в умножение на матрицу $\varphi(x) = Cx$, а векторы v_1, \dots, v_n расставим по столбцам матрицы $A = (v_1 | \dots | v_n)$.

Как мы видели в предыдущем примере

$$\text{Vol}_n^{or}(\Pi(v_1, \dots, v_n)) = \det A, \quad \text{Vol}_n^{or}(\varphi(\Pi(v_1, \dots, v_n))) = \det CA$$

А так как $\det C = \det \varphi$ по определению, утверждение вытекает из мультипликативности определителя. \square

17 Комплексные векторные пространства

В начале несколько общих слов о том, зачем все это надо и куда оно нас заведет. Этот раздел будет полностью посвящен векторным пространствам над полем \mathbb{C} . Основная задача этого поля – помогать решать трудности поля \mathbb{R} . Но для этого нам надо уметь заменять вещественные объекты комплексными. Например, вещественное векторное пространство превращать в комплексное векторное пространство. Беда с евклидовыми пространствами в том, что среди билинейных форм над \mathbb{C} нет аналога скалярного произведения. Поэтому приходится от билинейных форм переходить к так называемым полуторалинейным. Оказывается, что в этом случае можно построить полноценный аналог евклидовых пространств в комплексном мире, такие пространства называются эрмитовыми (но я иногда буду их называть евклидовыми над \mathbb{C} , чтобы подчеркнуть аналогию). Кроме этого я покажу как переходить от вещественных объектов к комплексным и наоборот. Мы будем менять пространства, операторы, билинейные формы и прочее. Основная идея будет уследить за тем, как при подобных заменах меняются характеристики этих объектов. Этому будет посвящен раздел комплексификации и овеществления.

17.1 Полуторалинейные формы

Определение 216. Пусть V – векторное пространство над полем \mathbb{C} , отображение $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{C}$ называется полуторалинейным, если выполнены следующие свойства:

1. $\beta(v_1 + v_2, u) = \beta(v_1, u) + \beta(v_2, u)$, для любых $v_1, v_2, u \in V$
2. $\beta(\lambda v, u) = \bar{\lambda}\beta(v, u)$, для любых $v, u \in V$ и $\lambda \in \mathbb{C}$.
3. $\beta(v, u_1 + u_2) = \beta(v, u_1) + \beta(v, u_2)$, для любых $v, u_1, u_2 \in V$.
4. $\beta(v, \lambda u) = \lambda\beta(v, u)$, для любых $v, u \in V$ и $\lambda \in \mathbb{C}$.

В этом случае говорят, что β полулинейна по первому аргументу и линейна по второму. Обратите внимание, что выбор первого аргумента для полулинейности является случайным и в разной литературе принято по-разному определять полуторалинейность. В одних источниках полуторалинейность в первом аргументе, в других – во втором.

Определение 217. Пусть V – векторное пространство над \mathbb{C} . Множество всех полуторалинейных форм на пространстве V я буду обозначать через $\text{Bil}_{1\frac{1}{2}}(V)$. Это множество является векторным пространством над \mathbb{C} относительно операций:

$$(\beta_1 + \beta_2)(v, u) := \beta_1(v, u) + \beta_2(v, u) \quad \text{и} \quad (\lambda\beta)(v, u) = \lambda\beta(v, u), \quad \text{где} \quad v, u \in V, \lambda \in \mathbb{C}$$

Для удобства введем следующее техническое определение.

Определение 218. Пусть $A \in M_n(\mathbb{C})$, тогда определим матрицу \bar{A} как матрицу, в которой мы применили сопряжение ко всем элементам матрицы A , то есть $(\bar{A})_{ij} = \overline{A_{ij}}$. Кроме того, определим $A^* = \bar{A}^t$ и будем называть матрицу A^* эрмитово сопряженной к матрице A .¹³⁸

Как обычно начинаем с конструкторов и правил, как работать с новыми объектами.

Утверждение 219. Пусть V – векторное пространство над \mathbb{C} и $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{C}$ – полуторалинейная форма. Тогда

1. Для любого базиса $e_1, \dots, e_n \in V$ определим матрицу B с коэффициентами $\beta(e_i, e_j)$. Тогда в координатах базиса e_1, \dots, e_n полуторалинейная форма записывается в виде $\beta(x, y) = \bar{x}^t B y$.
2. Если $(e'_1, \dots, e'_n) = (e_1, \dots, e_n)C$ – некоторый другой базис, в котором матрица полуторалинейной формы есть B' с коэффициентами $\beta(e'_i, e'_j)$, то $B' = \bar{C}^t B C = C^* B C$.
3. Для любого фиксированного базиса $e_1, \dots, e_n \in V$ отображение $\text{Bil}_{1\frac{1}{2}}(V) \rightarrow M_n(\mathbb{C})$ сопоставляющее полуторалинейной форме β ее матрицу $B = (\beta(e_i, e_j))$ является изоморфизмом векторных пространств.

¹³⁸Вообще говоря, правильный подход к определению матрицы A^* следующий. В случае вещественного поля надо положить $A^* = A^t$, а в случае комплексного $A^* = \bar{A}^t$. Тогда у нас одно обозначение и надо лишь упоминать в каком мире мы живем – комплексном или вещественном. Я предпочитаю единую технику, которая работает в разных ситуациях, чем иметь миллион разных способов под каждую конкретную задачу.

Доказательство. (1) Если $e = (e_1, \dots, e_n)$ – базис в V и $v, u \in V$, тогда $v = ex$ и $u = ey$, где $x, y \in \mathbb{C}^n$. В этом случае

$$\beta(v, u) = \beta\left(\sum_i x_i e_i, \sum_j y_j e_j\right) = \sum_{ij} \bar{x}_i y_j \beta(e_i, e_j) = \bar{x}^t B y$$

(2) Пусть в этом случае $v, u \in V$ и при этом $v = ex = e'x'$ и $u = ey = e'y'$, где $x, y, x', y' \in \mathbb{C}^n$. Тогда по формулам замены координат вектора (формулы в конце раздела 6.7) $x = Cx'$ и $y = Cy'$. Тогда

$$\beta(v, u) = \beta(x, y) = \bar{x}^t B y = \overline{Cx'}^t B Cy' = (\bar{x}')^t \bar{C}^t B C y' = \beta(x', y') = (\bar{x}')^t B' y'$$

Значит $B' = \bar{C}^t B C = C^* B C$.

(3) Линейность правила $\beta \mapsto B = (\beta(e_i, e_j))$ проверяется непосредственно. Также непосредственно проверяется, что правило $B \mapsto \beta(x, y) = \bar{x}^t B y$ линейно и задает обратное отображение. Я оставляю эту рутину на радость читателю. \square

17.2 Сведение к билинейным формам

Теперь нам хотелось бы обобщить на случай полуторалинейных форм все те факты, что мы доказали для билинейных форм. Есть два пути: мучительный и долгий, когда мы по аналогии с билинейными формами все доказываем заново, или мучительный и быстрый, когда мы вводим некую неприятную абстракцию, которая объяснит, как свести полуторалинейные формы к билинейным. Я считаю, что если уж и мучиться, то лучше по-быстрому, и пойду вторым путем.

Определение 220. Пусть V – векторное пространство над \mathbb{C} . Определим новое векторное пространство \bar{V} следующим образом. Как множество $\bar{V} = V$. Теперь на нем надо задать операции сложения и умножения на скаляр. Сложение зададим так же, как оно было задано на V . А умножение определим по формуле $\lambda * v = \bar{\lambda} v$, где справа стоит исходная операция умножения на скаляр в V .

Обратите внимание, что пространства V и \bar{V} имеют одинаковую размерность. Более того, набор векторов e_1, \dots, e_n является базисом в V тогда и только тогда, когда он является базисом в \bar{V} .

Пример Пусть $V = \mathbb{C}^n$, тогда в пространстве \bar{V} операции заданы следующим образом

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 + y_1 \\ \vdots \\ x_n + y_n \end{pmatrix} \quad \text{и} \quad \lambda \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{\lambda} x_1 \\ \vdots \\ \bar{\lambda} x_n \end{pmatrix}$$

Замечания

- Пусть $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{C}$ – полуторалинейная форма, тогда на нее можно посмотреть как на отображение $\beta: \bar{V} \times V \rightarrow \mathbb{C}$ в этом случае β становится билинейной формой. И наоборот если $\beta: \bar{V} \times V \rightarrow \mathbb{C}$ билинейная форма, то $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{C}$ – полуторалинейная форма. Таким образом можно пользоваться всеми фактами про билинейные формы, смотря на полуторалинейную форму, как на отображение $\beta: \bar{V} \times V \rightarrow \mathbb{C}$.
- Заметим, что подмножество $U \subseteq V$ является подпространством в V тогда и только тогда, когда оно является подпространством в \bar{V} . То есть запас подпространств в V и \bar{V} одинаковый.

Определение 221. Пусть $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{C}$ – полуторалинейная форма. Тогда

- Для любого подпространства $W \subseteq V$ определим его левое и правое ортогональное дополнение как левое и правое ортогональное дополнение для соответствующей билинейной формы, то есть:

$$W^\perp = \{v \in V \mid \beta(W, v) = 0\} \quad \text{и} \quad {}^\perp W = \{v \in V \mid \beta(v, W) = 0\}$$

- определим ее левое и правое ядра, как левые и правые ядра соответствующей билинейной формы $\beta: \bar{V} \times V \rightarrow \mathbb{C}$, то есть $\ker^L \beta = {}^\perp W$ и $\ker^R \beta = W^\perp$.
- Полуторалинейная форма β будет называться невырожденной, если соответствующая билинейная форма невырождена. То есть когда $\ker^L \beta = \ker^R \beta = 0$.¹³⁹ Это равносильно тому, что матрица $B = (\beta(e_i, e_j))$ формы в любом базисе e_1, \dots, e_n невырождена.

¹³⁹Так как $\dim \bar{V} = \dim V$, то это условие равносильно тому, что одно из ядер равно нулю.

Утверждение 222. Пусть V – векторное пространство над \mathbb{C} и $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{C}$ – невырожденная полуторалинейная форма. Тогда

1. Для любого подпространства $W \subseteq V$ выполнено

$$\dim W^\perp + \dim W = \dim V$$

2. Для любого подпространства $W \subseteq V$ выполнено ${}^\perp(W^\perp) = W$.
3. Для любых подпространств $W \subseteq E \subseteq V$ верно, что $W^\perp \supseteq E^\perp$. Причем $W = E$ тогда и только тогда, когда $W^\perp = E^\perp$.
4. Для любых подпространств $W, E \subseteq V$ выполнено равенство

$$(W + E)^\perp = W^\perp \cap E^\perp$$

5. Для любых подпространств $W, E \subseteq V$ выполнено равенство

$$(W \cap E)^\perp = W^\perp + E^\perp$$

Аналогичные свойства выполняются для левых ортогональных дополнений ${}^\perp W$.

Доказательство. Это следует из двойственности для подпространств для билинейных форм (утверждение 159) и предыдущего замечания. \square

17.3 Квадратичные формы

Определение 223. Пусть $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{C}$ – полуторалинейная форма. Тогда $Q_\beta: V \rightarrow \mathbb{C}$ по правилу $v \mapsto \beta(v, v)$ называется квадратичной формой.¹⁴⁰

Замечания

- Если $e_1, \dots, e_n \in V$ – некоторый базис, в котором полуторалинейная форма задается в виде $\beta(x, y) = \bar{x}^t B y$, то соответствующая ей квадратичная форма имеет вид $Q_\beta(x) = \bar{x}^t B x$. Множество квадратичных форм для полуторалинейных форм на пространстве V будем обозначать через $\text{Quad}_{1\frac{1}{2}}(V)$.¹⁴¹
- Ключевое свойство квадратичных форм $Q: V \rightarrow \mathbb{C}$ заключается в следующем: для любого $v \in V$ и любого $\lambda \in \mathbb{C}$ выполнено $Q(\lambda v) = |\lambda|^2 Q(v)$.

Главное отличие от билинейных форм – любая полуторалинейная форма (без каких-либо дополнительных требований) восстанавливается по своей квадратичной форме. Давайте разберемся почему это так.

Утверждение 224 (Поляризация формула). Пусть $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{C}$ – произвольная полуторалинейная форма и $Q_\beta: V \rightarrow \mathbb{C}$ – соответствующая ей квадратичная форма. Тогда

$$\beta(v, u) = \sum_{k=0}^3 \frac{i^k}{4} Q_\beta(i^k v + u) = \frac{Q_\beta(v + u) + iQ_\beta(iv + u) - Q_\beta(-v + u) - iQ_\beta(-iv + u)}{4}$$

Доказательство. Рассмотрим следующее выражение

$$\begin{aligned} \beta(v + u, v + u) + i\beta(iv + u, iv + u) - \beta(-v + u, -v + u) - i\beta(-iv + u, -iv + u) = \\ \beta(v, v) + \beta(v, u) + \beta(u, v) + \beta(u, u) + \\ + i\beta(v, v) + \beta(v, u) - \beta(u, v) + i\beta(u, u) - \\ - \beta(v, v) + \beta(v, u) + \beta(u, v) - \beta(u, u) - \\ - i\beta(v, v) + \beta(v, u) - \beta(u, v) - i\beta(u, u) = \\ 4\beta(v, u) \end{aligned}$$

Разделив обе части на 4, получаем требуемое. \square

¹⁴⁰Мы можем рассматривать полуторалинейную форму β , как билинейную форму $\beta: \bar{V} \times V \rightarrow \mathbb{C}$. Но билинейная форма получается на разных пространствах, потому у нас нет понятия квадратичной формы для β , как для билинейной формы. Потому введенное определение квадратичной формы не должно вызвать путаницы.

¹⁴¹Индекс в виде $1\frac{1}{2}$ нужен, чтобы отличить, мы строим квадратичные формы по билинейным или полуторалинейным.

Замечание В частности, если $\beta(v, v) = 0$ для любого вектора $v \in V$, то полуторалинейная форма β тождественно равна нулю.

Утверждение 225. Пусть V векторное пространство над \mathbb{C} , тогда отображения

- $\phi: \text{Bil}_{1\frac{1}{2}}(V) \rightarrow \text{Quad}_{1\frac{1}{2}}(V)$ по правилу $\beta \mapsto Q_\beta(v) = \beta(v, v)$ (в координатах $\bar{x}^t B y$ переходит в $\bar{x}^t B x$)
- $\psi: \text{Quad}_{1\frac{1}{2}}(V) \rightarrow \text{Bil}_{1\frac{1}{2}}(V)$ по поляризационной формуле $Q \mapsto \beta_Q(v, u) = \sum_{k=0}^3 \frac{i^k}{4} Q(i^k v + u)$ (в координатах $\bar{x}^t A x$ переходит в $\bar{x}^t A y$)

являются взаимно обратными изоморфизмами.

Доказательство. По определению, отображение ϕ сюръективно. Из поляризационной формулы (утверждение 224) следует, что композиция $\psi\phi$ равна тождественному отображению. А значит ϕ инъективно, то есть биекция. При этом ψ является левым обратным к обратимому отображению, а значит просто обратным. Получили, что ϕ и ψ взаимнообратные биекции. Тот факт, что они изоморфизмы, то есть линейны, непосредственно следует из определения. \square

Замечания

- Последнее утверждение означает, что полуторалинейные формы и квадратичные формы – это одно и то же. В частности, матрица A в определении квадратичной формы однозначно определена. Действительно, если $Q(x) = \bar{x}^t A x$ в координатах, то ей соответствует билинейная форма $\beta_Q(x, y) = \bar{x}^t A y$. Матрица билинейной формы A определена правилом $a_{ij} = \beta_Q(e_i, e_j)$.
- Для любопытных, давайте в лоб проверим, что $\phi\psi = \text{Id}$. Пусть $Q: V \rightarrow \mathbb{C}$ – произвольная квадратичная форма, тогда она переходит в

$$\begin{aligned} \frac{Q(v+v) + iQ(iv+v) - Q(-v+v) - iQ(-iv+v)}{4} &= \frac{Q(2v) + iQ((1+i)v) - iQ((1-i)v) - Q(0)}{4} = \\ &= \frac{|2|^2 Q(v) + i|1+i|^2 Q(v) - i|1-i|^2 Q(v)}{4} = Q(v) \end{aligned}$$

17.4 Эрмитовы и косоэрмитовы формы

Так исторически сложилось, что аналоги симметричных и кососимметричных полуторалинейных форм не принято называть симметричными и кососимметричными (как бы мне этого ни хотелось), у них есть другие более пристойные (с точки зрения математического сообщества) названия. Однако, очень важно понимать, что мы сейчас будем заниматься не чем иным, как изучением аналогов симметричных и кососимметричных форм, потому и все результаты будут очень ожидаемыми.

Определение 226. Пусть $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{C}$ – полуторалинейная форма. Тогда

- β называется эрмитовой если $\beta(v, u) = \overline{\beta(u, v)}$ для любых $v, u \in V$. Это аналог симметричных форм.
- β называется косоэрмитовой, если $\beta(v, u) = -\overline{\beta(u, v)}$ для любых $v, u \in V$. Это аналог кососимметричных форм.

Замечания

- Обратите внимание, что множество эрмитовых (или косоэрмитовых) форм НЕ является векторным пространством над \mathbb{C} , но является векторным пространством над \mathbb{R} . Действительно, если $\beta(v, u) = \overline{\beta(u, v)}$ для любых $v, u \in V$ и $\lambda \in \mathbb{C}$, то форма $\lambda\beta$ уже не обязательно эрмитова. Например, если $\lambda = i$, то $i\beta(v, u) = -i\beta(u, v)$. Как видно из этого вычисления, эрмитова форма после умножения на i превращается в косоэрмитову и наоборот. В этом смысле изучение эрмитовых или косоэрмитовых форм – это одно и то же.
- Правильно думать про эрмитовы и косоэрмитовы формы, как про аналоги вещественной и мнимой части (только мнимая часть рассматривается вместе с мнимой единицей). В данном случае аналогом комплексного сопряжения является операция $\beta(v, u) \mapsto \overline{\beta(u, v)}$. Тогда неподвижная часть будет аналогом вещественной части, а меняющая знак – аналогом мнимой домноженной на i . При этом любая

полуторалинейная форма представляется единственным способом в виде суммы эрмитовой и косоэрмитовой:

$$\beta(v, u) = \frac{\beta(v, u) + \overline{\beta(u, v)}}{2} + \frac{\beta(v, u) - \overline{\beta(u, v)}}{2}$$

Или в матричной форме

$$B = \frac{B + B^*}{2} + \frac{B - B^*}{2}$$

Утверждение 227. Пусть $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{C}$ – полуторалинейная форма. Тогда

1. Пусть e_1, \dots, e_n – некоторый базис и B – матриц полуторалинейной формы в этом базисе.
 - Форма β эрмитова тогда и только тогда, когда $B^* = B$.
 - Форма β косоэрмитова тогда и только тогда, когда $B^* = -B$.
2. Форма β эрмитова тогда и только тогда, когда $Q_\beta(v) = \beta(v, v) \in \mathbb{R}$ для любого $v \in V$.
3. Если форма β эрмитова или косоэрмитова, то для любого подпространства $W \subseteq V$ верно $W^\perp = {}^\perp W$.

Доказательство. (1) Пусть после выбора базиса в координатах форма имеет вид $\beta(x, y) = \bar{x}^t B y$. Тогда эрмитовость равносильна свойству

$$\bar{x}^t B y = \overline{y^t B x} = y^t \bar{B} \bar{x} = (y^t \bar{B} \bar{x})^t = \bar{x}^t \bar{B}^t y = \bar{x}^t B^* y$$

Так как это свойство выполнено для любых $x, y \in \mathbb{C}^n$, то $B = B^*$. Аналогично показывается для косоэрмитовых форм.

(2) \Rightarrow Пусть β эрмитова. Тогда $\beta(v, v) = \overline{\beta(v, v)}$. То есть $Q_\beta(v) = \beta(v, v) \in \mathbb{R}$.

\Leftarrow Наоборот, применим поляризационную формулу, тогда

$$\begin{aligned} \beta(v, u) &= \frac{Q(v+u) + iQ(iv+u) - Q(-v+u) - iQ(-iv+u)}{4} = \\ &= \frac{Q(v+u) + iQ(i(v-iu)) - Q(-(v-u)) - iQ(-i(v+iu))}{4} = \\ &= \frac{Q(v+u) + i|i|^2 Q(v-iu) - |-1|^2 Q(v-u) - i|-i|^2 Q(v+iu)}{4} = \\ &= \frac{Q(v+u) + iQ(v-iu) - Q(v-u) - iQ(v+iu)}{4} \end{aligned}$$

Если $Q(v) \in \mathbb{R}$ для любого $v \in V$, то последнее выражение есть

$$\frac{Q(v+u) - iQ(v-iu) - Q(v-u) + iQ(v+iu)}{4} = \overline{\beta(u, v)}$$

То есть форма эрмитова.

(3) Для эрмитовых форм по определению получаем

$$W^\perp = \{v \in V \mid \beta(W, v) = 0\} = \{v \in V \mid \overline{\beta(v, W)} = 0\} = \{v \in V \mid \beta(v, W) = 0\} = {}^\perp W$$

Аналогично для косоэрмитовых. □

Замечание Обратите внимание, что в случае полуторалинейных форм, отличительной особенностью эрмитовых является тот факт, что соответствующая им квадратичная форма принимает только вещественные значения. Именно это явление и позволяет нам проводить с ними те же самые трюки, которые работали с симметричными билинейными формами над полем \mathbb{R} .

Утверждение 228. Пусть V – векторное пространство над \mathbb{C} и $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{C}$ – полуторалинейная форма. Тогда

1. Если форма β эрмитова, то существует базис e_1, \dots, e_n такой, что матрица формы B_β диагональная с вещественными числами на диагонали.

2. Если форма β косоэрмитова, то существует базис e_1, \dots, e_n такой, что матрица формы B_β диагональная с чисто мнимыми числами на диагонали.

Доказательство. (1) \Rightarrow (2) Если форма β косоэрмитова, то $i\beta$ будет эрмитова. Тогда в каком-то базисе матрица формы $i\beta$ будет диагональна с вещественными числами на диагонали. То есть матрица формы β диагональная с чисто мнимыми числами на диагонали.

(1) Так как на диагонали у эрмитовой формы всегда находятся вещественные числа (утверждение 227 пункт (2)), то достаточно показать, что матрица формы диагонализуется. Поступать будем так же, как и в случае билинейных форм. Рассмотрим квадратичную форму $Q_\beta(v)$. Если она тождественно равна нулю, то β тоже тождественно равна нулю (утверждение 225). Тогда матрица нулевая и доказывать нечего. Пусть теперь v – такой вектор, что $\beta(v, v) = Q_\beta(v) \neq 0$. Это значит, что $v \notin \langle v \rangle^\perp$, то есть $\langle v \rangle \cap \langle v \rangle^\perp = 0$. По определению $\langle v \rangle^\perp = \ker \beta(v, -)$ является ядром ненулевого линейного функционала, то есть имеет размерность $\dim V - 1$. Значит $V = \langle v \rangle \oplus \langle v \rangle^\perp$. Теперь берем вектор v в качестве первого базисного вектора e_1 . Индукцией по размерности пространства находим ортогональный базис e_2, \dots, e_n в $\langle v \rangle^\perp$ для формы $\beta|_{\langle v \rangle^\perp}$. Победа! \square

Утверждение 229. Пусть V – векторное пространство над \mathbb{C} и $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{C}$ – эрмитова форма. Тогда существует базис, в котором матрица формы имеет вид

$$B_\beta = \begin{pmatrix} E & & \\ & -E & \\ & & 0 \end{pmatrix}$$

При этом количество единиц, минус единиц и нулей на диагонали не зависит от базиса.

Доказательство. Мы уже знаем, что эрмитова форма в некотором базисе диагонализуется. То есть существует базис, что $\beta(x, y) = \sum_{i=1}^n d_i \bar{x}_i y_i$, где $d_i \in \mathbb{R}$. Перестановкой базисных элементов будем считать, что сначала идут все положительные коэффициенты, потом отрицательные и только потом нулевые, то есть $\beta(x, y) = \sum_{i=1}^k d_i \bar{x}_i y_i - \sum_{i=k+1}^r d_i \bar{x}_i y_i$, где все $d_i > 0$. В этом случае сделаем замену $x'_i = \sqrt{d_i} x_i$. Получим $\beta(x'_i, y'_i) = \sum_{i=1}^k \bar{x}'_i y'_i - \sum_{i=k+1}^r \bar{x}'_i y'_i$. А значит, можно привести к такому виду.

Теперь покажем единственность. Количество единиц и минус единиц вместе дает ранг матрицы. А ранг матрицы билинейной формы $\beta: \bar{V} \times V \rightarrow \mathbb{C}$ не меняется при смене базисов (раздел 14.3). Значит у нас количество нулей и суммарное количество единиц и минус единиц не зависит от базиса. Теперь надо показать, что количество единиц и минус единиц одно и то же в каждом базисе. Для этого надо повторить кусок доказательства соответствующего утверждения для билинейных форм над \mathbb{R} (утверждения 178). Я для удобства прочтения повторю его здесь.

Предположим противное – пусть зависит. Пусть найдутся два базиса e_1, \dots, e_n и f_1, \dots, f_n , так что форма в них имеет вид

$$\begin{aligned} \beta(x, y) &= \bar{x}_1 y_1 + \dots + \bar{x}_s y_s - \bar{x}_{s+1} y_{s+1} - \dots - \bar{x}_k y_k \\ \beta(x', y') &= \bar{x}'_1 y'_1 + \dots + \bar{x}'_t y'_t - \bar{x}'_{t+1} y'_{t+1} - \dots - \bar{x}'_k y'_k \end{aligned}$$

Пусть для определенности $s > t$. Тогда положим $W = \langle e_1, \dots, e_s \rangle$ и $U = \langle f_{t+1}, \dots, f_n \rangle$. Теперь вспомним, что для любого $v \in V$ значения $Q_\beta(v) \in \mathbb{R}$ в силу эрмитовости формы. Далее заметим, что $Q_\beta(w) > 0$ для любого ненулевого $w \in W$ и $Q_\beta(u) \leq 0$ для любого $u \in U$. Следовательно подпространства W и U могут пересекаться только по нулю. С другой $\dim W + \dim U = s + n - t > n$, а значит $\dim(W \cap U) > 0$, противоречие. \square

Замечание Как! Откуда взялись эти долбанные минус единицы!? Почему нельзя все сделать единицами как в случае билинейных форм? Звучат эти вопросы у вас сейчас в голове? Если да, то это правильное замечание для прочтения. Давайте рассмотрим пример билинейной формы $\beta(x, y) = \bar{x}_1 y_1 - \bar{x}_2 y_2$. Давайте будем думать в терминах соответствующей билинейной формы $Q_\beta(x) = |x_1|^2 - |x_2|^2$. Теперь мы хотим сделать замену $x_1 = \lambda x'_1$ и $x_2 = \mu x'_2$. Но тогда $Q_\beta(x') = |\lambda|^2 |x'_1|^2 - |\mu|^2 |x'_2|^2$. То есть из под модуля комплексные числа λ и μ вылезут положительными вещественными, потому отрицательный знак поправить так не получится. Все дело в наличии сопряжения на координатах одного аргумента.

Как и в случае вещественного векторного пространства мы можем определить положительные и отрицательные формы.

Определение 230. Пусть $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{C}$ – эрмитова форма. Тогда количество единиц в ее диагональной форме $\#1$ называется положительным индексом инерции, количество минус единиц $\#-1$ называется отрицательным индексом инерции. Количество нулей будет обозначаться $\#0$.

Форма β называется положительно определенной, если $Q_\beta(v) > 0$ для любого ненулевого $v \in V$. Форма β называется отрицательно определенной, если $Q_\beta(v) < 0$ для любого ненулевого $v \in V$.

Обратите внимание, что

- Форма положительно определена тогда и только тогда, когда ее положительный индекс инерции равен размерности пространства, то есть $\#1 = \dim V$.
- Форма отрицательно определена тогда и только тогда, когда ее отрицательный индекс инерции равен размерности пространства, то есть $\#-1 = \dim V$.
- Форма не вырождена тогда и только тогда, когда $\#0 = 0$.

17.5 Метод Якоби для полуторалинейных форм

Здесь я хочу распространить метод Якоби описанный в разделе 14.8 на случай эрмитовых форм. Окажется, что полуторалинейность ни на что не повлияет и метод дословно переносится и сюда.

Пусть V – векторное пространство над \mathbb{C} и $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{C}$ – эрмитова форма. Пусть e_1, \dots, e_n – некоторый базис V , в котором форма записывается в виде $\beta(x, y) = \bar{x}^t B y$, где $B \in M_n(\mathbb{C})$ и $x, y \in \mathbb{C}^n$. Эрмитовость формы β означает, что $B^* = B$.¹⁴² Выделим в матрице B верхние левые блоки:

$$B = \begin{pmatrix} \boxed{\begin{matrix} \boxed{b_{11}} & & \\ & \ddots & \\ & & B_k \end{matrix}} & & \\ & & \ddots \end{pmatrix}$$

То есть B_k – подматрица состоящая из первых k строк и столбцов. Определим подпространства $U_k = \langle e_1, \dots, e_k \rangle$. Тогда B_k – матрица формы $\beta|_{U_k}$ в базисе e_1, \dots, e_k . Обозначим $\det B_k$ через Δ_k . Наша задача найти базис e'_1, \dots, e'_n такой, чтобы

$$(e'_1 \quad \dots \quad e'_n) = (e_1 \quad \dots \quad e_n) \begin{pmatrix} 1 & * & \dots & * \\ & 1 & \dots & * \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & 1 \end{pmatrix}$$

и при этом форма β была диагональная в базисе e'_1, \dots, e'_n . Заметим, что в силу специального вида замены базиса мы имеем $\langle e_1, \dots, e_k \rangle = \langle e'_1, \dots, e'_k \rangle$. Более того, в этом случае верно

$$(e'_1 \quad \dots \quad e'_k) = (e_1 \quad \dots \quad e_k) \begin{pmatrix} 1 & * & \dots & * \\ & 1 & \dots & * \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & 1 \end{pmatrix}$$

В частности, если B' – матрица билинейной формы в базисе e'_1, \dots, e'_n и B'_k – матрица ее ограничения на U_k в базисе e'_1, \dots, e'_k , то $B'_k = C_k^* B_k C_k$, где C_k – верхнетреугольная матрица с единицами на диагонали из формулы выше. То есть $\det B'_k = \det B_k$. В частности B'_k всегда будет невырожденная матрица.

Будем искать векторы e'_i по очереди в виде:

$$e'_k = e_k + \lambda_1 e'_1 + \dots + \lambda_{k-1} e'_{k-1}$$

¹⁴²Такие матрицы называются самосопряженными.

Кроме этого, будем показывать, что $\beta(e'_k, e'_k) \neq 0$. Последнее равенство позволяет находить их по индукции, положив $e'_1 = e_1$. В этом случае $\beta(e'_1, e'_1) = \det B_1 \neq 0$. Пусть мы уже нашли векторы e'_1, \dots, e'_{k-1} (и показали, что $\beta(e'_1, e'_1) \neq 0, \dots, \beta(e'_{k-1}, e'_{k-1}) \neq 0$), давайте предъявим формулу для e'_k и покажем, что $\beta(e'_k, e'_k) \neq 0$. У нас должно получиться

$$e'_k = e_k + \lambda_1 e'_1 + \dots + \lambda_{k-1} e'_{k-1}$$

Вектор e'_k должен быть ортогонален всем построенным e'_i . Умножим предыдущее равенство относительно β на e'_i слева (то есть применим $\beta(e'_i, -)$),¹⁴³ получим

$$0 = \beta(e'_i, e'_k) = \beta(e'_i, e_k) + \sum_{j=1}^{k-1} \lambda_j \beta(e'_i, e'_j) = \beta(e'_i, e_k) + \lambda_i \beta(e'_i, e'_i)$$

Так как по индуктивному предположению все числа $\beta(e'_i, e'_i) \neq 0$ при $i < k$, то мы получаем формулу

$$e'_k = e_k - \frac{\beta(e'_1, e_k)}{\beta(e'_1, e'_1)} e'_1 - \dots - \frac{\beta(e'_{k-1}, e_k)}{\beta(e'_{k-1}, e'_{k-1})} e'_{k-1}$$

Осталось проверить, что $\beta(e'_k, e'_k) \neq 0$. По построению матрица B'_k является диагональной с числами $\beta(e'_i, e'_i)$ на диагонали. Как было отмечено выше, в силу особенностей замены $\det B'_k = \det B_k \neq 0$. С другой стороны $\det B'_k$ равен произведению диагональных элементов, значит они все должны быть ненулевыми. В частности $\beta(e'_k, e'_k)$ тоже не ноль. Кроме того, это рассуждение показывает, что диагональные элементы B' считаются по формулам $\beta(e'_i, e'_i) = \frac{\Delta_i}{\Delta_{i-1}}$, где $\Delta_i = \det B_i$ и $\Delta_0 = 1$.

17.6 Критерий Сильвестра для полуторалинейных форм

Как и в случае вещественных билинейных форм из метода Якоби можно вытащить критерий положительной определенности для эрмитовых форм. Он называется критерием Сильвестра.

В начале сделаем одно наблюдение. Пусть $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{C}$ – некоторая полуторалинейная форма. И пусть фиксированы два базиса с матрицей перехода: $(e'_1, \dots, e'_n) = (e_1, \dots, e_n)C$. Обозначим матрицы формы β через B' и B в соответствующих базисах. Тогда мы знаем, что $B' = C^* B C$. В частности

$$\det B' = \det C^* \det B \det C = \det \bar{C}^t \det C \det B = \det \bar{C} \det C \det B = \overline{\det C} \det C \det B = |\det C|^2 \det B$$

То есть определитель полуторалинейной формы (не обязательно эрмитовой) определен однозначно с точностью до умножения на положительное вещественное число. Это означает, что либо определитель ноль, либо у определителя не меняется аргумент (имеется в виду аргумент комплексного числа). В частности, если определитель β является вещественным положительным числом в некотором базисе, то он остается положительным вещественным в любом другом базисе.

Утверждение 231 (Критерий Сильвестра). Пусть $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{C}$ – эрмитова форма и пусть в некотором базисе e_1, \dots, e_n она записывается в виде $\beta(x, y) = \bar{x}^t B y$, где $B \in M_n(\mathbb{C})$ – самосопряженная матрица, то есть $B^* = B$. Обозначим ее угловые миноры через $\Delta_1, \dots, \Delta_n$. Тогда

1. Форма β положительно определена тогда и только тогда, когда $\Delta_i > 0$ для любого i .
2. Форма β отрицательно определена тогда и только тогда, когда $\operatorname{sgn} \Delta_i = (-1)^i$ для любого i .

Доказательство. (2) выводится из (1) заменой формы β на $-\beta$. При этом $\Delta_i(-\beta) = (-1)^i \Delta_i(\beta)$. Потому нам достаточно доказать только первый пункт.

(1) \Rightarrow Если форма β положительно определена, то ее ограничение $\beta|_{U_k}$, где $U_k = \langle e_1, \dots, e_k \rangle$, тоже положительно определено. Тогда в некотором базисе $\beta|_{U_k}$ задается единичной матрицей. А значит ее определитель положительное число. Значит и в любом другом базисе ее определитель положительное число, например, в базисе e_1, \dots, e_k . Но этот определитель равен Δ_k .

(1) \Leftarrow В этом случае выполнены условия для выполнимости метода Якоби, а именно, $\Delta_i \neq 0$. Значит можно диагонализировать нашу форму с числами $\frac{\Delta_i}{\Delta_{i-1}} > 0$ на диагонали. \square

¹⁴³Обратите внимание, что в отличие от случая билинейной формы, тут мы должны умножить слева. Это нужно, чтобы коэффициенты λ_i из полуторалинейной формы вынеслись без комплексного сопряжения.

17.7 Эрмитово векторное пространство

Определение 232. Пусть V – векторное пространство над \mathbb{C} и $(-, -): V \times V \rightarrow \mathbb{C}$ – полуторалинейная форма. Форма $(-, -)$ называется эрмитовым скалярным произведением если

1. $(-, -)$ эрмитова.
2. $(-, -)$ положительно определена.

Пространство V вместе с эрмитовым скалярным произведением называется эрмитовым пространством.¹⁴⁴

Благодаря тому, что мы грамотно определили эрмитовы скалярные произведения, теперь для любого вектора $v \in V$ число (v, v) является вещественным и более того $(v, v) \geq 0$, причем равенство достигается только в случае $v = 0$. А значит можно вводить все те же самые геометрические понятия, что мы вводили в евклидовом случае. Этим безобразием мы сейчас и займемся. Главная неприятная особенность эрмитовых пространств – тут не работает сведение к школьной геометрии. Однако работает сведение к эрмитовым пространствам малой размерности. Да, они уже не из знакомого со школы геометрического мира, но все же это лучше, чем работать в произвольной размерности.

Определение 233. Пусть V – эрмитово пространство. Тогда базис e_1, \dots, e_n называется ортогональным, если $(e_i, e_j) = 0$ для всех $i \neq j$. Он называется ортонормированным, если он ортогональный и $(e_i, e_i) = 1$.

Определение 234. Пусть $V, (-, -)_V$ и $U, (-, -)_U$ – два эрмитовых пространства. Тогда отображение $\phi: V \rightarrow U$ называется изоморфизмом эрмитовых пространств, если ϕ – изоморфизм векторных пространств, сохраняющий скалярное произведение, то есть $(\phi(v), \phi(u))_U = (v, u)_V$ для всех $v, u \in V$. В этом случае эрмитовы пространства называются изоморфными.

Как и в случае евклидовых пространств верно следующее утверждение.

Утверждение 235. Два эрмитовых пространства $V, (-, -)_V$ и $U, (-, -)_U$ изоморфны тогда и только тогда, когда они имеют одинаковую размерность.

Доказательство. Мы должны слово в слово повторить доказательство утверждения 192. Если два эрмитовых пространства изоморфны, то их подлежащие пространства V и U изоморфны как векторные пространства, а значит имеют одинаковую размерность. В обратную сторону. Выберем в пространстве V ортонормированный базис e_1, \dots, e_n и в пространстве U ортонормированный базис f_1, \dots, f_n . Они существуют, потому что для любой положительно определенной эрмитовой формы можно выбрать базис, в котором его матрица единичная. Тогда ясно, что линейное отображение отправляющее e_i в f_i удовлетворяет нужным свойствам. \square

Еще одно замечание. Как и в случае евклидовых пространств. Формулы из метода Якоби в эрмитовом пространстве задают процесс называемый ортогонализацией Грама-Шмидта.

Определение 236. Пусть V – эрмитово векторное пространство и $v \in V$ определим длину вектора v по формуле $|v| = \sqrt{(v, v)}$.

Утверждение 237 (Неравенство Коши-Буняковского). Пусть V – эрмитово пространство и $v, u \in V$ – произвольные векторы. Тогда $|(v, u)| \leq |v||u|$, причем равенство достигается тогда и только тогда, когда векторы v и u лежат на одной прямой.

Доказательство. Доказательство один в один повторяет вещественный случай. Если хотя бы один из векторов нулевой, то неравенство превращается в верное равенство и в этом случае v и u лежат на одной прямой. Потому достаточно считать, что оба вектора не нулевые. Тогда выберем e_1 – единичный вектор на прямой $\langle v \rangle$, а вектор e_2 выберем в плоскости $\langle v, u \rangle$ длины один и ортогональным к e_1 (воспользуемся методом ортогонализации Грама-Шмидта). Тогда можно считать, что $v, u \in \mathbb{C}^2$ и скалярное произведение является стандартным, то есть задается $(x, y) = \bar{x}^t y$. В силу выбора базиса мы знаем, что

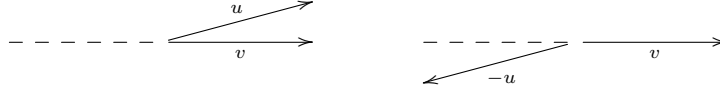
$$v = \begin{pmatrix} a \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{и} \quad u = \begin{pmatrix} b \\ c \end{pmatrix}$$

Тогда $|(v, u)| = |ab|$ и $|v||u| = |a|\sqrt{|b|^2 + |c|^2}$. Доказываемое неравенство принимает вид $|ab| \leq |a|\sqrt{|b|^2 + |c|^2}$, что очевидно.

Теперь надо понять, когда в этом неравенстве достигается равенство. Причем мы считаем, что $a \neq 0$ (так как оба вектора ненулевые). В этом случае равенство $|b| = \sqrt{|b|^2 + |c|^2}$ достигается тогда и только тогда, когда $c = 0$. То есть равенство достигается тогда и только тогда, когда v и u лежат на одной прямой. \square

¹⁴⁴Это прямой аналог евклидова пространства в комплексном мире.

Замечания про углы Давайте в начале посмотрим на ситуацию в евклидовом пространстве. Пусть у нас есть два вектора $v, u \in V$ как на картинке ниже.



Тогда мы можем посмотреть на угол между прямыми $\langle v \rangle$ и $\langle u \rangle$. Это по определению меньший угол из двух на картинках, он измеряется в диапазоне $[0, \pi/2]$ и его можно найти по формуле $\cos \alpha = \frac{|\langle v, u \rangle|}{|v||u|}$. Однако ситуации на картинках отличаются так: слева косинус положительный, а справа отрицательный. То есть у $\cos \alpha$ есть знак, этот знак не чувствует угол между прямыми, но отвечает в некотором смысле за ориентацию векторов по отношению к тому углу, который мы замерили. А так как вещественная прямая является линейно упорядоченным множеством, то на нем есть всего два направления, которые и соответствуют знакам плюс и минус у скалярного произведения (v, u) . На этот знак еще можно смотреть так, мы берем ортогональную проекцию u на $\langle v \rangle$ и проверяем сонаправлены векторы или нет.

Если мы возьмем на вооружение эту точку зрения, то ее можно распространить на комплексный случай. То есть мы будем мерить угол между двумя прямыми натянутыми на вектор, а потом замерять расхождение между направлениями одного вектора и ортогональной проекции другого вектора на первую прямую. Тут еще важно понимать, что из-за несимметричности эрмитова произведения в полном смысле $(v, u) = \overline{(u, v)}$ тут важен порядок! Мы проектируем именно второй вектор на первую прямую. Угол начинает зависеть от порядка векторов.

В итоге мы приходим к таким рассуждениям. Из неравенства Коши-Буняковского следует, что для любых двух векторов $v, u \in V$ верно $-1 \leq \frac{(v, u)}{|v||u|} \leq 1$. А значит найдется единственное число $\alpha \in [0, \pi/2]$ такое, что $\cos \alpha = \frac{|(v, u)|}{|v||u|}$. Это число называется углом между прямыми $\langle v \rangle$ и $\langle u \rangle$ и не зависит от порядка векторов. Кроме того, выражение $\frac{(v, u)}{|v||u|}$ можно представить в тригонометрической форме $re^{i\varphi}$, где $r = \cos \alpha$ – модуль, а $\varphi \in [0, 2\pi)$ – аргумент. Выражение $e^{i\varphi}$ – это поляризационный фактор, который измеряет отклонение от сонаправленности упорядоченной пары векторов v, u . Он аналогичен знаку \pm из вещественного случая, но так как комплексная прямая не упорядочена, то на ней есть много разных причин быть не сонаправленными. Все отклонения задаются аргументом скалярного произведения.

Определение 238. Пусть V – эрмитово пространство и $v, u \in V$ – два вектора. Тогда найдутся такие числа $\alpha \in [0, \pi/2]$ и $\varphi \in [0, 2\pi)$ такие, что $\cos \alpha \cdot e^{i\varphi} = \frac{(v, u)}{|v||u|}$. Тогда α называется углом между прямыми $\langle v \rangle$ и $\langle u \rangle$ и обозначается $\angle(v, u)$, а $e^{i\varphi}$ – это поляризационный множитель, а φ – поляризационный угол.

Замечание 239. • Обратите внимание, что поляризационный множитель зависит от порядка векторов. Действительно, если $\frac{(v, u)}{|v||u|} = \cos \alpha \cdot e^{i\varphi}$, то

$$\frac{(u, v)}{|v||u|} = \frac{\overline{(v, u)}}{|v||u|} = \cos \alpha \cdot e^{-i\varphi}$$

Таким образом поляризационный угол φ сменит знак на противоположный. Эта ситуация аналогична ориентированному объему, который зависит от порядка, в котором рассматриваются векторы в параллелепипеде.

- Если записывать скалярное произведение через угол между прямыми и поляризацию, то в евклидовом случае получается формула

$$(v, u) = |v||u| \cos \alpha \operatorname{sgn}$$

где sgn обозначает знак ± 1 в зависимости от положения векторов. А в эрмитовом случае получается формула

$$(v, u) = |v||u| \cos \alpha \cdot e^{i\varphi}$$

где φ – поляризационный угол. В этом смысле эрмитов случай расширяет евклидов, в котором возможны только два угла 0 и π .

Определение 240. Матрица $C \in M_n(\mathbb{C})$ называется унитарной, если $C^*C = E$.

Эквивалентные определения унитарности: $CC^* = E$ или $C^* = C^{-1}$.

Утверждение 241. Пусть V – эрмитово пространство и e_1, \dots, e_n – ортонормированный базис. Тогда

1. Для любой унитарной матрицы $C \in M_n(\mathbb{C})$ векторы $(e_1, \dots, e_n)C$ являются ортонормированным базисом.
2. Если f_1, \dots, f_n – любой другой ортонормированный базис, то матрица перехода C , то есть $(f_1, \dots, f_n) = (e_1, \dots, e_n)C$, является унитарной.

Доказательство. Доказательство полностью аналогично доказательству евклидова случая (утверждение 190) и потому оставляется в качестве упражнения. \square

17.8 Обзор геометрических понятий в эрмитовом пространстве

Ортогональные проекции Если V – эрмитово пространство и $U \subseteq V$ – некоторое подпространство, то $V = U \oplus U^\perp$. Это значит, что любой вектор раскладывается единственным образом в виде $v = \text{pr}_U v + \text{ort}_U v$, где $\text{pr}_U v \in U$ и $\text{ort}_U v \in U^\perp$. Как и в евклидовом случае их называют проекцией и ортогональным дополнением вектора v .

Углы и расстояния Как и в случае вещественного пространства определяется расстояние между векторами $\rho(v, u) = |v - u|$, где $v, u \in V$. И расстояние между множествами $\rho(X, Y) = \inf_{x \in X, y \in Y} \rho(x, y)$, где $X, Y \subseteq V$. С углами приходится говорить лишь про углы между прямыми, а не векторами из-за поляризационного множителя их нельзя сравнивать между собой. Потому угол между вектором и подпространством определяется так $\angle(v, L) = \inf_{u \in L} \angle(v, u)$. Я оставляю в качестве упражнения показать, следующее.

Утверждение 242. Пусть V – эрмитово пространство, $L \subseteq V$ – подпространство, $v \in V$ – некоторый вектор. Тогда

1. $\rho(v, L) = |\text{ort}_L v|$.
2. $\angle(v, L) = \angle(v, \text{pr}_L v)$.¹⁴⁵

Метод наименьших квадратов Хочу отметить, что в эрмитовом пространстве так же можно применять метод наименьших квадратов. То есть метод для решения систем вида $Ax = b$, где $A \in M_{m \times n}(\mathbb{C})$, $b \in \mathbb{C}^m$ и $x \in \mathbb{C}^n$ – столбец неизвестных, в случае, когда данная система не имеет решения. В этом случае надо минимизировать $\rho(Ax, b)$ по x . Если минимум достигается на x_0 , то $b_0 = Ax_0$ является ортогональной проекцией b на пространство $\langle A \rangle$. Если столбцы матрицы A линейно независимы, то явные формулы для x_0 и b_0 следующие: $b_0 = A(A^*A)^{-1}A^*b$ и $x_0 = (A^*A)^{-1}A^*b$. Это аналог формулы «Атата».¹⁴⁶

Матрица Грама и формальный объем Пусть V – эрмитово пространство. Если $v_1, \dots, v_k \in V$, то матрица $G(v_1, \dots, v_k)$ с элементами (v_i, v_j) называется матрицей Грама. Эта матрица самосопряжена в смысле $G(v_1, \dots, v_k)^* = G(v_1, \dots, v_k)$. При этом $\det G(v_1, \dots, v_k) \geq 0$ причем равенство достигается тогда и только тогда, когда v_1, \dots, v_k линейно зависимы.

Сказать, что такое параллелепипед в комплексном пространстве сложно, потому объем определяется формально для набора векторов $v_1, \dots, v_k \in V$. А именно

$$\text{Vol}_k(v_1, \dots, v_k) = \sqrt{\det G(v_1, \dots, v_k)}$$

Для данного объема также выполняется формула через площадь основания на высоту:

$$\text{Vol}_k(v_1, \dots, v_k) = \text{Vol}_{k-1}(v_1, \dots, v_{k-1})\rho(v_k, \langle v_1, \dots, v_{k-1} \rangle)$$

Можно определить поляризованный объем, пользуясь определителем. Делается это аналогично вещественному случаю, с той лишь разницей, что базисы будут отличаться не знаком, а комплексным аргументом и у нас получается много поляризаций (а не ориентаций) для базисов. Я не буду здесь вдаваться в подробности.

¹⁴⁵Если $\text{pr}_L v = 0$, то надо считать косинус угла нулевым, то есть угол равным $\pi/2$.

¹⁴⁶Так как транспонирование в эрмитовом пространстве заменяется звездочкой, то может быть имеет смысл называть эту формулу «Азаза»?..

17.9 Комплексификация

Задача этого параграфа следующая, мы хотим построить процедуру, которая преобразует вещественные векторные пространства в комплексные и одновременно с этим операторы и билинейные формы превращает в операторы и полуторалинейные формы. Эта процедура и будет называться комплексификацией. На самом деле мы уже знаем на примитивном уровне, как проводить такую процедуру, как показывает пример ниже. Однако, его недостаток в том, что эта конструкция зависит от базиса, а значит, мы не можем ничего гарантировать в другом базисе. Куда удобнее было бы задать эту процедуру абстрактно, а потом проверить, что в базисе она задается по правилам из примера. Этому и будет посвящен этот раздел.¹⁴⁷

VIP пример Пусть $V = \mathbb{R}^n$ – наше векторное пространство, оператор $\varphi: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ задан по правилу $x \mapsto Ax$, где $A \in M_n(\mathbb{R})$, и есть билинейная форма $\beta: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ задана $\beta(x, y) = x^t B y$, где $B \in M_n(\mathbb{R})$. Тогда мы можем заменить V на пространство $V_{\mathbb{C}} = \mathbb{C}^n$, оператор φ на $\varphi_{\mathbb{C}}: \mathbb{C}^n \rightarrow \mathbb{C}^n$ по правилу $z \mapsto Az$, и билинейную форму β на полуторалинейную форму $\beta_{\mathbb{C}}: \mathbb{C}^n \times \mathbb{C}^n \rightarrow \mathbb{C}$ по правилу $\beta_{\mathbb{C}}(z, w) = \bar{z}^t B w$. Вот и все. Ничего страшного. Кроме этого, мы естественным образом получаем вложение \mathbb{R}^n в \mathbb{C}^n . Теперь наша задача – научиться все это хозяйство проделывать без явного выбора базиса и координат.

Определение 243. Пусть V – вещественное векторное пространство, определим комплексное векторное пространство $V_{\mathbb{C}}$ следующим образом:

- Как множество $V_{\mathbb{C}} = \{v + iu \mid v, u \in V\}$. То есть $V_{\mathbb{C}}$ – это множество картинок вида $v + iu$, где i – значок для мнимой единицы, а v и u – векторы из V . Формально $V_{\mathbb{C}} = V \times V$, то есть каждая картинка $v + iu$ – это просто пара векторов $(v, u) \in V^2$.
- Операция сложения задана правилом

$$(v_1 + iu_1) + (v_2 + iu_2) = (v_1 + v_2) + i(u_1 + u_2), \quad v_1, v_2, u_1, u_2 \in V$$

- Умножения на скаляр задано по правилу

$$(\lambda + i\mu)(v + iu) = (\lambda v - \mu u) + i(\lambda u + \mu v), \quad \lambda, \mu \in \mathbb{R}, \quad v, u \in V$$

Пространство $V_{\mathbb{C}}$ называется комплексификацией пространства V .

Можно проверить, что таким образом заданные операции на $V_{\mathbb{C}}$ превращают его в векторное пространство над \mathbb{C} .¹⁴⁸

Замечания

- Обратите внимание на то, что конструкция комплексификации повторяет конструкцию комплексных чисел.
- Если взять $V = \mathbb{R}$, то $V_{\mathbb{C}}$ – это в точности конструкция для комплексных чисел, то есть $V_{\mathbb{C}} = \mathbb{C}$. В более общем случае, если $V = \mathbb{R}^n$, то $V_{\mathbb{C}} = \mathbb{C}^n$.
- Если $v + iu \in V_{\mathbb{C}}$, где $v, u \in V$, то $v + iu = 0$ в $V_{\mathbb{C}}$ тогда и только тогда, когда $v = u = 0$ в V .

Определение 244. Пусть V – вещественное векторное пространство и $V_{\mathbb{C}}$ – его комплексификация. Если $w = v + iu \in V_{\mathbb{C}}$, то вектор $v \in V$ называется вещественной частью w и обозначается $\operatorname{Re} w$, а вектор $u \in V$ называется мнимой частью w и обозначается $\operatorname{Im} w$. Отображение $V_{\mathbb{C}} \rightarrow V_{\mathbb{C}}$ по правилу $v + iu \mapsto v - iu$ называется сопряжением и является \mathbb{R} линейным отображением.

Обратите внимание, что мы можем считать, что $V \subseteq V_{\mathbb{C}}$, отождествляя каждый вектор $v \in V$ с вектором $v + i0 \in V_{\mathbb{C}}$. Это ровно тот способ, каким мы вкладываем вещественные числа в комплексные, но для векторных пространств.

¹⁴⁷На самом деле есть еще процедура овеществления, но она тривиальна, а потому является верхом формализма. По простому, каждое векторное пространство над \mathbb{C} можно рассматривать как векторное пространство над \mathbb{R} , просто забывая про то, что мы умели умножать на мнимую единицу. Может быть имеет смысл помучить вас этим материалом, но я уже оторвался на тензорах и сейчас на это нет времени и возможности.

¹⁴⁸Я знаю, что вы мне тут поверите на слово. Но я настоятельно рекомендую проделать эту проверку.

Утверждение 245. Пусть V – вещественное векторное пространство и $e_1, \dots, e_n \in V$ – базис. Тогда векторы e_1, \dots, e_n являются базисом $V_{\mathbb{C}}$, то есть $\dim_{\mathbb{R}} V = \dim_{\mathbb{C}} V_{\mathbb{C}}$.

Доказательство. Нам надо проверить, что векторы e_1, \dots, e_n линейно независимы и все порождают.

Линейная независимость. Предположим найдутся $z_1, \dots, z_n \in \mathbb{C}$ такие, что $z_1 e_1 + \dots + z_n e_n = 0$ в $V_{\mathbb{C}}$. Пусть $z_k = a_k + ib_k$, где $a_k, b_k \in \mathbb{R}$. Тогда соотношение линейной зависимости можно переписать так:

$$\begin{aligned} (a_1 + ib_1)e_1 + \dots + (a_n + ib_n)e_n &= 0 \\ (a_1 e_1 + \dots + a_n e_n) + i(b_1 e_1 + \dots + b_n e_n) &= 0 \text{ в } V_{\mathbb{C}} \end{aligned}$$

Последнее означает, что и мнимая и вещественная части равны нулю, то есть

$$a_1 e_1 + \dots + a_n e_n = 0 \quad \text{и} \quad b_1 e_1 + \dots + b_n e_n = 0 \text{ в } V$$

Так как e_i – базис, это значит, что все a_i и b_i равны нулю, а значит и все z_i равны нулю, что и требовалось.

Порождаемость. Пусть $v + iu \in V_{\mathbb{C}}$ – произвольный вектор. Тогда $v = a_1 e_1 + \dots + a_n e_n$ и $u = b_1 e_1 + \dots + b_n e_n$, так как e_i – базис. Тогда положим $z_k = a_k + ib_k$, получим, что $v + iu = z_1 e_1 + \dots + z_n e_n$. \square

17.10 Комплексификация линейных отображений и билинейных форм

Определение 246. Пусть $\phi: V \rightarrow U$ – линейное отображение между вещественными векторными пространствами. Определим отображение $\phi_{\mathbb{C}}: V_{\mathbb{C}} \rightarrow U_{\mathbb{C}}$ по правилу $v + iu \mapsto \phi(v) + i\phi(u)$. Полученное отображение является \mathbb{C} линейным отображением и называется комплексификацией линейного отображения ϕ .

Замечание Пусть $\phi: V \rightarrow U$ – линейное отображение между вещественными векторными пространствами. Пусть e_1, \dots, e_n – базис в V и f_1, \dots, f_m – базис в U и пусть $A \in M_{mn}(\mathbb{R})$ – матрица отображения ϕ в указанной паре базисов. По определению это означает, что $\phi(e_1, \dots, e_n) = (f_1, \dots, f_m)A$. Теперь рассмотрим отображение $\phi_{\mathbb{C}}: V_{\mathbb{C}} \rightarrow U_{\mathbb{C}}$. Так как множества векторов e_1, \dots, e_n и f_1, \dots, f_m являются базисами пространств $V_{\mathbb{C}}$ и $U_{\mathbb{C}}$ соответственно (утверждение 245), то равенство $\phi(e_1, \dots, e_n) = (f_1, \dots, f_m)A$ означает, что A является матрицей отображения $\phi_{\mathbb{C}}$ в этих базисах. По сути это значит, что если в координатах ϕ задавалось в виде $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ по правилу $x \mapsto Ax$, то $\phi_{\mathbb{C}}$ задается в координатах в виде $\mathbb{C}^n \rightarrow \mathbb{C}^m$ по правилу $z \mapsto Az$, ровно то, что обещалось в примере. Кроме того, философия этого явления следующая. Если свойства отображения зависят только от матрицы, то эти свойства сохраняются при переходе к комплексификации.

Определение 247. Пусть $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ – билинейная форма на вещественном векторном пространстве V . Определим билинейную форму $\beta_{\mathbb{C}}: V_{\mathbb{C}} \times V_{\mathbb{C}} \rightarrow \mathbb{C}$ по следующему правилу

$$\beta_{\mathbb{C}}(v_1 + iu_1, v_2 + iu_2) = \beta(v_1, v_2) + i\beta(v_1, u_2) - i\beta(u_1, v_2) + \beta(u_1, u_2)$$

Тогда полученное отображение $\beta_{\mathbb{C}}$ будет полуторалинейным и называется комплексификацией формы β .¹⁴⁹

Замечание Пусть $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ – билинейная форма на вещественном векторном пространстве и пусть e_1, \dots, e_n – базис V . Пусть $B \in M_n(\mathbb{R})$ – матрица билинейной формы в этом базисе, то есть $b_{ij} = \beta(e_i, e_j)$. Рассмотрим комплексификацию формы $\beta_{\mathbb{C}}: V_{\mathbb{C}} \times V_{\mathbb{C}} \rightarrow \mathbb{C}$. Так как e_1, \dots, e_n – базис $V_{\mathbb{C}}$ (утверждение 245), то матрица B будет матрицей полуторалинейной формы $\beta_{\mathbb{C}}$ в этом базисе. По сути это значит, что если в координатах β задавалась в виде $\beta(x, y) = x^t B y$, то $\beta_{\mathbb{C}}$ в координатах превращается в $\beta_{\mathbb{C}}(z, w) = \bar{z}^t B w$. Философия этого явления такая же, как и у линейных отображений. Если какое-то свойство билинейной формы зависит только от матрицы, то оно остается верным и при переходе к комплексификации.

¹⁴⁹Опять же, настоятельно рекомендую проверить полуторалинейность полученной формы, не пожалеете.

18 Операторы в Евклидовом и Эрмитовом пространствах

18.1 Движения

Утверждение 248. Пусть V – евклидово или эрмитово пространство и $\phi: V \rightarrow V$ – оператор. Тогда следующие условия эквивалентны:

1. $(\phi v, \phi u) = (v, u)$ для всех $v, u \in V$.
2. $|\phi v| = |v|$ и $\angle(\phi v, \phi u) = \angle(v, u)$ для всех $v, u \in V$.
3. $|\phi v| = |v|$ для всех $v \in V$.

Доказательство. (1) \Rightarrow (2). Так как углы и расстояния выражаются через скалярное произведение, то сохранение скалярного произведения влечет сохранение углов и расстояний. Действительно, $|u| = \sqrt{(u, u)}$, потому $|\phi u| = \sqrt{(\phi u, \phi u)} = \sqrt{(u, u)} = |u|$. Угол по определению целиком определяется своим косинусом, потому достаточно проверить, что $\frac{(u, v)}{|u||v|}$ сохраняется. Ну а это выражение сохраняется, так как все его компоненты сохраняются.

(2) \Rightarrow (3). Тривиально.

(3) \Rightarrow (1). Заметим, что $Q(v) = |v|^2$ – квадратичная форма для скалярного произведения (v, u) , а $Q_\phi(v) = |\phi v|^2$ – квадратичная форма для билинейной (полуторалинейной) формы $(\phi v, \phi u)$. Так как квадратичные формы совпадают, то по поляризационной формуле (утверждение 176 для вещественного случая и 224 для комплексного) совпадают и сами билинейные формы. \square

Замечания

- Обратите внимание, что из условия $|\phi v| = |v|$ следует, что ϕ инъективен, а значит и обратим.
- Я бы хотел пояснить это доказательство для случая евклидовых пространств, в этом случае его можно себе наглядно представить. Эквивалентность (1) и (2) значит, что сохранять скалярное произведение это то же самое, что сохранять углы и расстояния, потому что углы и расстояния выражаются через скалярное произведение и наоборот, скалярное произведение определяется углами и расстояниями. А вот эквивалентность (2) и (3) означает, что из сохранения расстояний следует сохранение углов. Это можно понимать так. Если сохраняются длины, то сохраняются длины сторон у всех треугольников. Но так как треугольник полностью определен своими сторонами, то это означает, что в любом треугольнике сохраняются углы. Это полезная геометрическая интуиция.

Определение 249. Пусть $\phi: V \rightarrow V$ – оператор в евклидовом или эрмитовом пространстве, удовлетворяющий одному из эквивалентных определений предыдущего утверждения. Тогда ϕ называется движением.

В случае евклидова пространства движения называются ортогональными операторами. В случае эрмитова пространства движения называются унитарными операторами.

Утверждение 250. Пусть V – евклидово или эрмитово пространство, $\phi: V \rightarrow V$ – линейный оператор, e_1, \dots, e_n – ортонормированный базис V и A – матрица оператора ϕ в этом базисе. Тогда

1. В евклидовом случае, ϕ является движением (ортогональным оператором) тогда и только тогда, когда $A^t A = E$ (матрица ортогональна).
2. В эрмитовом случае, ϕ является движением (унитарным оператором) тогда и только тогда, когда $A^* A = E$ (матрица унитарна).

Доказательство. (1) По определению в базисе e_1, \dots, e_n скалярное произведение имеет вид $(x, y) = x^t y$, а действие оператора $\phi x = Ax$. Тогда $(Ax, Ay) = (x, y)$ означает, что $x^t A^t A y = x^t y$ для любых $x, y \in \mathbb{R}^n$. Значит $A^t A = E$.

(2) Доказывается аналогично предыдущему пункту. Надо лишь учесть, что $(x, y) = \bar{x}^t y$ и $\phi x = Ax$. Потому $(Ax, Ay) = (x, y)$ превращается в $\bar{x}^t A^* A y = \bar{x}^t y$. \square

Утверждение 251. Пусть V – евклидово пространство и $V_{\mathbb{C}}$ – его комплексификация (эрмитово пространство). Тогда оператор $\phi: V \rightarrow V$ является движением (ортогональным оператором) тогда и только тогда, когда оператор $\phi_{\mathbb{C}}: V_{\mathbb{C}} \rightarrow V_{\mathbb{C}}$ является движением (унитарным оператором).

Доказательство. Самый простой способ доказать – воспользоваться предыдущим утверждением 250. Выберем e_1, \dots, e_n – ортонормированный базис V . Тогда он же будет ортонормированным базисом $V_{\mathbb{C}}$ (комбинируем утверждение 245 и определение 247). Пусть $A \in M_n(\mathbb{R})$ – матрица ϕ , она же будет матрицей $\phi_{\mathbb{C}}$. В частности $A^* = A^t$. Значит условие быть ортогональным оператором и быть унитарным совпадают.¹⁵⁰ \square

Утверждение 252. Пусть V – евклидово или эрмитово пространство и $\phi: V \rightarrow V$ – движение. Тогда

1. Для любого $\lambda \in \text{спес } \phi$ имеем $|\lambda| = 1$.¹⁵¹
2. Если $\lambda \neq \mu$ – два собственных значения ϕ , то $V_{\lambda} \perp V_{\mu}$.
3. Если $U \subseteq V$ – ϕ -инвариантное подпространство, то U^{\perp} ϕ -инвариантное подпространство.

Доказательство. (1) Пусть $v \in V$ – ненулевой собственный вектор соответствующий собственному значению λ . Тогда $(\phi v, \phi v) = (v, v)$, так как ϕ – движение. С другой стороны $(\phi v, \phi v) = (\lambda v, \lambda v) = |\lambda|^2(v, v)$. Потому $|\lambda|^2 = 1$.

(2) Пусть $v \in V_{\lambda}$ и $u \in V_{\mu}$. Тогда $(v, u) = (\phi v, \phi u) = (\lambda v, \mu u) = \lambda \bar{\mu}(v, u) = \lambda/\mu(v, u)$ (последнее равенство следует из предыдущего пункта). Если $\lambda \neq \mu$, то $(v, u) = 0$, что и требовалось.

(3) Так как ϕ – обратим, то $\phi(U) = U$. Нам надо показать, что если $w \perp U$, то $\phi(w) \perp U$. Имеем $(\phi w, \phi u) = (w, u) = 0$ для любого $u \in U$ и $w \in U^{\perp}$. В силу $\phi(U) = U$ получаем, что $\phi(u)$ пробегает все векторы из U , если u пробегает все векторы из U . То есть $(\phi(w), u) = 0$ для любого $u \in U$, что и требовалось. \square

18.2 Классификация движений

Краткий план классификации следующий: мы сначала классифицируем движения в эрмитовом случае, а потом сведем евклидов случай к эрмитовому с помощью комплексификации. Окажется, что в эрмитовом случае все движения диагонализуются в ортонормированном базисе и на диагонали у них будут комплексные числа по модулю 1. В евклидовом случае движения будут блочно диагональными, где на диагонали будут стоять ± 1 и блоки поворотов.

Утверждение 253. Пусть V – эрмитово пространство и $\phi: V \rightarrow V$ – некоторый оператор. Тогда эквивалентно

1. ϕ является движением (унитарный оператор).
2. Выполнены следующие свойства:
 - (a) ϕ диагонализуем в ортонормированном базисе.
 - (b) Для любого $\lambda \in \text{спес}_{\mathbb{C}} \phi$, имеем $|\lambda| = 1$.¹⁵²

Доказательство. (2) \Rightarrow (1). Пусть e_1, \dots, e_n – тот самый ортонормированный базис и A – матрица оператора ϕ . В силу условия (b) имеем $A^*A = E$. Тогда по утверждению 250 (описание движений в терминах матриц) ϕ является движением.

(1) \Rightarrow (2). Так как мы действуем над полем комплексных чисел, то у нас обязательно найдется ненулевой собственный вектор $v \in V$ для некоторого $\lambda \in \text{спес}_{\mathbb{C}} \phi$. Тогда $V = \langle v \rangle \oplus \langle v \rangle^{\perp}$. По утверждению 252 пункт 3, это разложение в прямую сумму ϕ -инвариантных подпространств. Положим $e_1 = v/|v|$. Так как $\langle v \rangle^{\perp}$ является ϕ -инвариантным, то можно применить индукцию для $\phi|_{\langle v \rangle^{\perp}}$ по размерности пространства и найдем ортонормированный базис e_2, \dots, e_n в $\langle v \rangle^{\perp}$, в котором ограничение ϕ диагонализуется. Тогда e_1, \dots, e_n – ортонормированный базис, в котором диагонализуется ϕ . На диагонали ϕ будут стоять элементы $\text{спес}_{\mathbb{C}} \phi$. По утверждению 252 пункт 1 они все по модулю равны 1, что и требовалось. \square

¹⁵⁰На самом деле можно в лоб проверить по определению, что $(\phi v, \phi u) = (v, u)$ для любых $v, u \in V$ тогда и только тогда, когда $(\phi_{\mathbb{C}}(w_1), \phi_{\mathbb{C}}(w_2))_{\mathbb{C}} = (w_1, w_2)_{\mathbb{C}}$ для любых $w_1, w_2 \in V_{\mathbb{C}}$. Очень рекомендую проделать это легкое и полезное упражнение.

¹⁵¹Здесь в евклидовом случае имеется в виду $\text{спес}_{\mathbb{R}} \phi$, а в эрмитовом $\text{спес}_{\mathbb{C}} \phi$.

¹⁵²Если через S^1 обозначить единичную окружность в \mathbb{C} , то есть комплексные числа равные по модулю 1, то это условие можно записать как $\text{спес}_{\mathbb{C}} \phi \subseteq S^1$.

Замечание Обратите внимание на интересный момент. Если вы рассмотрите пространство \mathbb{R}^2 со стандартным скалярным произведением, то оператор заданный матрицей

$$A = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$$

Является поворотом на угол α и в частности это движение. Если α не кратен π , то этот оператор не имеет инвариантных подпространств, а значит он не диагонализуем.

С другой стороны, если рассмотреть пространство \mathbb{C}^2 со стандартным скалярным произведением и оператор заданный той же самой матрицей A , то полученный оператор будет движением. Но при этом он диагонализуется в виде

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha + i \sin \alpha & 0 \\ 0 & \cos \alpha - i \sin \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{i\alpha} & 0 \\ 0 & e^{-i\alpha} \end{pmatrix}$$

Таким образом поворот в плоскости сменился на две сопряженные поляризации внутри каждой из комплексных прямых. Это любопытное явление, которое очень сильно контрастирует с вещественной интуицией. Имейте это в виду, когда работаете в комплексном случае.

Утверждение 254. Пусть V – комплексное векторное пространство и $\phi: V \rightarrow V$ – некоторый оператор. Тогда эквивалентно:

1. Существует скалярное произведение на V , относительно которого ϕ является движением.
2. Выполнены следующие свойства:
 - (a) ϕ диагонализуем.
 - (b) Для любого $\lambda \in \text{sp}_{\mathbb{C}} \phi$, имеем $|\lambda| = 1$.

Доказательство. (1) \Rightarrow (2). Если существует скалярное произведение, то оно задает структуру эрмитова пространства, а значит мы можем применить предыдущее утверждение.

(2) \Rightarrow (1). Пусть e_1, \dots, e_n – базис, в котором ϕ диагонализуем. Зададим скалярное произведение так, чтобы e_1, \dots, e_n был ортонормированным (это делается аналогично утверждению 186). Тогда выполнен пункт (2) предыдущего утверждения, а значит и выполнен пункт (1). То есть ϕ является движением относительно построенного скалярного произведения. \square

В случае евклидова пространства нам нужно одно техническое наблюдение.

Утверждение 255. Пусть V – евклидово пространство, $V_{\mathbb{C}}$ – его комплексификация и $w \in V_{\mathbb{C}}$. Тогда эквивалентно

1. $w \perp \bar{w}$
2. выполнены два условия:
 - (a) $|\text{Re } w| = |\text{Im } w|$
 - (b) $\text{Re } w \perp \text{Im } w$

Доказательство. Пусть $w = v + iu$. Тогда, расписав по определению, получим $(w, \bar{w}) = (v, v) - (u, u) + 2i(v, u)$. Значит,

$$w \perp \bar{w} \iff \begin{cases} (v, v) - (u, u) = 0 \\ (v, u) = 0 \end{cases} \iff \begin{cases} |v| = |u| \\ v \perp u \end{cases}$$

\square

Утверждение 256. Пусть V евклидово пространство и $\phi: V \rightarrow V$ – некоторое движение. Тогда

- Либо существует собственный вектор $v \in V$ для собственных значений ± 1 .
- Либо существует инвариантное двумерное подпространство $U \subseteq V$ и его ортонормированный базис e_1, e_2 такие, что матрица $\phi|_U$ в этом базисе имеет вид

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}, \text{ для некоторого } \alpha \in [0, 2\pi)$$

Доказательство. По утверждению 252 все вещественные собственные значения ϕ – это ± 1 . Значит, если спектр не пуст, то выполнено первое условие. Пусть $\text{sp}_{\mathbb{R}} = \emptyset$. В этом случае перейдем к комплексификации отображения $\phi_{\mathbb{C}}: V_{\mathbb{C}} \rightarrow V_{\mathbb{C}}$. По утверждению 251 $\phi_{\mathbb{C}}$ является движением в эрмитовом пространстве. Так как \mathbb{C} алгебраически замкнуто, то спектр обязательно не пуст. А по утверждению 252 в нем обязательно числа по модулю равные 1. Значит найдется $\lambda = \cos \alpha - i \sin \alpha$ и $w = v + iu \in V_{\mathbb{C}}$ такие, что $\phi_{\mathbb{C}}(w) = \lambda w$. Давайте распишем эти условия более явно. С одной стороны по определению:

$$\phi_{\mathbb{C}}(w) = \phi(v) + i\phi(u)$$

С другой стороны, так как w собственные, имеем

$$\phi_{\mathbb{C}}(w) = \lambda w = (\cos \alpha - i \sin \alpha)(v + iu) = \cos \alpha v + \sin \alpha u + (-\sin \alpha v + \cos \alpha u)$$

Но в комплексификации вектора равны тогда и только тогда, когда их вещественные и мнимые части равны. Значит,

$$\begin{aligned}\phi(v) &= \cos \alpha v + \sin \alpha u \\ \phi(u) &= -\sin \alpha v + \cos \alpha u\end{aligned}$$

Таким образом подпространство в V натянутое на векторы v и u является ϕ инвариантным. Если я теперь покажу, что векторы v и u ортогональны и имеют одинаковую длину, то пространство $\langle v, u \rangle$ будет двумерным и, поделив их на их общую длину, я получу ортонормированный базис и матрица оператора в этом базисе будет ровно такой, как и заявлено.

Давайте применим комплексное сопряжение к равенству $\phi_{\mathbb{C}}(w) = \lambda w$. Тогда левая часть

$$\overline{\phi_{\mathbb{C}}(w)} = \overline{\phi(v) + i\phi(u)} = \phi(v) - i\phi(u) = \phi_{\mathbb{C}}(v - iu) = \phi_{\mathbb{C}}(\overline{v + iw}) = \phi_{\mathbb{C}}(\bar{w})$$

А правая часть равно

$$\overline{\lambda w} = \bar{\lambda} \bar{w}$$

То есть \bar{w} – это собственный вектор с собственным значением $\bar{\lambda}$. Но так как λ было не вещественным числом, $\lambda \neq \bar{\lambda}$. А значит, по утверждению 252 векторы w и \bar{w} ортогональны. Но тогда по утверждению 255 $|v| = |u|$ и $(v, u) = 0$. При этом длина этих векторов не ноль, иначе w был бы нулем, что противоречило бы его выбору. \square

Утверждение 257. Пусть V евклидово пространство и $\phi: V \rightarrow V$ – некоторый оператор. Тогда эквивалентно

1. ϕ является движением (ортogonalный оператор).
2. В некотором ортонормированном базисе матрица оператора ϕ имеет вид:

$$A_{\phi} = \begin{pmatrix} A_1 & & \\ & \ddots & \\ & & A_r \end{pmatrix}, \quad \text{где } A_i \text{ либо } 1, \text{ либо } -1, \text{ либо } \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$$

Доказательство. (2) \Rightarrow (1). Пусть e_1, \dots, e_n – тот самый ортонормированный базис и A – матрица оператора ϕ . Прямая проверка показывает, что $A^t A = E$. Тогда по утверждению 250 (описание движений в терминах матриц) ϕ является движением.

(1) \Rightarrow (2). По утверждению 256 возможен один из двух случаев:

1. Существует собственный вектор v с собственным значением 1 или -1 .
2. Существует инвариантное двумерное подпространство U с ортонормированным базисом e_1, e_2 такие, что матрица $\phi|_U$ в этом базисе имеет указанный вид.

Если у нас случай (1), то мы рассмотрим разложение пространства $V = \langle v \rangle \oplus \langle v \rangle^{\perp}$. Тогда ортогональное дополнение будет ϕ -инвариантным. Значит мы можем ограничить на него ϕ , по индукции там найти ортонормированный базис e_2, \dots, e_n с требуемыми свойствами. Тогда положим $e_1 = v/|v|$ и базис e_1, \dots, e_n будет искомым.

Если у нас случай (2), то мы рассмотрим разложение $V = U \oplus U^{\perp}$. Тогда ортогональное дополнение будет ϕ -инвариантным. Значит мы можем ограничить на него ϕ и как и раньше найти ортонормированный базис e_3, \dots, e_n с требуемыми свойствами. Тогда возьмем e_1, e_2 из U и базис e_1, \dots, e_n будет искомым. \square

Утверждение 258. Пусть V – вещественное векторное пространство и $\phi: V \rightarrow V$ – некоторый оператор. Тогда эквивалентно:

1. Существует скалярное произведение на V , относительно которого ϕ является движением.
2. В некотором базисе матрица оператора ϕ имеет вид:

$$A_\phi = \begin{pmatrix} A_1 & & \\ & \ddots & \\ & & A_r \end{pmatrix}, \quad \text{где } A_i \text{ либо } 1, \text{ либо } -1, \text{ либо } \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$$

Доказательство. (1) \Rightarrow (2). Если существует скалярное произведение, то оно задает структуру евклидова пространства, а значит мы можем применить предыдущее утверждение.

(2) \Rightarrow (1). Пусть e_1, \dots, e_n – базис, в котором ϕ имеет указанный блочный вид. Зададим скалярное произведение так, чтобы e_1, \dots, e_n был ортонормированным (так сделать можно по утверждению 186). Тогда выполнен пункт (2) предыдущего утверждения, а значит и выполнен пункт (1). То есть ϕ является движением относительно построенного скалярного произведения. \square

18.3 Сопряженное линейное отображение

В случае произвольного линейного оператора ϕ на пространстве V , его сопряженный или двойственный ϕ^* живет на V^* и это неудобно. В случае евклидова или эрмитова пространства можно определить сопряженный оператор уже на самом пространстве V . Я в начале расскажу, как строится подобный оператор на пространстве V с помощью скалярного произведения, а потом уже поясню, как он связан с нашим старым знакомым на двойственном пространстве.

Утверждение 259. Пусть V и U – евклидовы или эрмитовы пространства и $\phi: V \rightarrow U$ линейное отображение. Тогда существует единственное линейное отображение $\phi^*: U \rightarrow V$ такое, что $(\phi v, u) = (v, \phi^* u)$ для любых $v \in V$ и $u \in U$.

Доказательство. Для доказательства перейдем в базисы и сделаем все на матричном языке. Давайте я для определенности рассмотрю эрмитов случай. Пусть e_1, \dots, e_n ортонормированный базис пространства V , а f_1, \dots, f_m – ортонормированный базис пространства U . Тогда V превращается в \mathbb{C}^n , U превращается в \mathbb{C}^m , скалярное произведение в обоих пространствах становится стандартным, а отображение ϕ превращается в отображение $\mathbb{C}^n \rightarrow \mathbb{C}^m$ по правилу $x \mapsto Ax$ для некоторой $A \in M_{m,n}(\mathbb{C})$. Давайте будем искать наше отображение ϕ^* в виде $\phi^*(x) = Bx$, где $B \in M_{n,m}(\mathbb{C})$ и покажем, что существует ровно одно линейное отображение удовлетворяющее нужным условиям.

Действительно, условие $(\phi v, u) = (v, \phi^* u)$ переписывается так

$$(\overline{Ax})^t y = \bar{x}^t B y \iff \bar{x}^t \bar{A}^t y = \bar{x}^t B y$$

И это должно выполняться для любых $x \in \mathbb{C}^n$ и $y \in \mathbb{C}^m$. А это возможно тогда и только тогда, когда $B = \bar{A}^t$. Что и означает, что нужное отображение найдется и единственное. \square

Определение 260. Если V и U – евклидовы или эрмитовы пространства и $\phi: V \rightarrow U$ – линейное отображение. Тогда отображение $\phi^*: U \rightarrow V$ называется сопряженным к ϕ . В частности, если $\varphi: V \rightarrow V$ является линейным оператором, то φ^* называется сопряженным оператором.¹⁵³

Замечания

- В силу симметричности скалярного произведения определение сопряженного отображения можно дать в виде $(\phi^* u, v) = (u, \phi v)$. Таким образом по простому, сопряженное линейное отображение – это такое линейное отображение, которое получается при перекидывании внутри скалярного произведения. Это означает, что если вы хотите что-то доказать для сопряженного линейного отображения, то надо желаемый факт выразить в терминах скалярного произведения, а после этого перекинуть ϕ^* и превратить его в ϕ и воспользоваться свойствами ϕ или наоборот.

¹⁵³Иногда говорят евклидово сопряженный или эрмитово сопряженный, чтобы подчеркнуть, что мы в евклидовом или эрмитовом случае.

- Обратите внимание, что если у нас оператор $\phi: V \rightarrow V$ в ортонормированном базисе задан матрицей A , то оператор ϕ^* в этом же базисе будет задан матрицей A^t в вещественном случае и $A^* = \bar{A}^t$ в комплексном случае.
- Пусть теперь $\phi: V \rightarrow U$ – произвольное линейное отображение. Пусть e_1, \dots, e_n – некоторый базис в V и f_1, \dots, f_m – некоторый базис в U . Пусть скалярное произведение в V в указанном базисе задано матрицей B , а в пространстве U в указанном базисе задано матрицей G . Тогда если ϕ задан матрицей A , то матрица сопряженного линейного отображения будет $B^{-1}A^tG$ в вещественном случае и $B^{-1}\bar{A}^tG$ в комплексном.
- Если $\phi: V \rightarrow V$ движение, то это значит, что $(\phi v, \phi u) = (v, u)$. Если обозначить ϕu за w , то получим, что ϕ движение, тогда и только тогда, когда $(\phi v, w) = (v, \phi^{-1}w)$ для любых $v, w \in V$. То есть ϕ движение, тогда и только тогда, когда $\phi^* = \phi^{-1}$. Таким образом движения можно выразить в терминах сопряженного оператора.
- В общем случае даже не пытайтесь понять геометрический смысл сопряженного оператора. Это совсем не очевидная штука.

Связь с двойственным пространством Здесь мне придется разобрать отдельно евклидов и эрмитов случаи. Пусть V и U – евклидовы пространства и $\phi: V \rightarrow U$ – линейное отображение. Тогда существует двойственное линейное отображение $\phi^*: U^* \rightarrow V^*$ по правилу $\xi \mapsto \xi\phi$. Кроме этого, скалярное произведение индуцирует изоморфизм $V \rightarrow V^*$ по правилу $v \mapsto (-, v)$ и аналогично для U . В итоге получаем следующую диаграмму

$$\begin{array}{ccc}
 V^* & \xleftarrow{\phi^*} & U^* \\
 \uparrow \text{ (wavy)} & & \uparrow \text{ (wavy)} \\
 V & \xleftarrow{\psi} & U
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{ccc}
 (-, \psi u) & = & (\phi(-), u) \longleftarrow (-, u) \\
 \uparrow & & \uparrow \\
 \psi u & \longleftarrow & u
 \end{array}$$

Вертикальные стрелки – это изоморфизмы с помощью скалярного произведения, а нижняя пунктирная стрелка – это композиция: сначала изоморфизм $U \rightarrow U^*$, потом ϕ^* , потом обратный изоморфизм $V^* \rightarrow V$. Давайте посмотрим, что получается в качестве отображения ψ . Для этого возьмем произвольный вектор $u \in U$ и пройдем двумя путями в V^* . Справа показан расчет результатов. Получаем, что функции $(-, \psi u)$ и $(\phi(-), u)$ на V совпадают при любых $u \in U$, то есть для любого $v \in V$ и любого $u \in U$ имеем равенство $(v, \psi u) = (\phi v, u)$. Теперь мы видим, что ψ совпадает с определением сопряженного линейного отображения $\phi^*: U \rightarrow V$.

Теперь давайте разберемся с комплексным случаем. Ситуация здесь похожая, но появляется одна тонкость. Но обо всем по порядку. Пусть V и U – эрмитовы пространства и $\phi: V \rightarrow U$ – линейное отображение. Однако, в этом случае отображение $V \rightarrow V^*$ по правилу $v \mapsto (v, -)$ не является \mathbb{C} -линейным, а отображение $v \mapsto (-, v)$ не корректно, потому что результат не является \mathbb{C} -линейной функцией на V . Это правится переходом к пространствам \bar{V} и \bar{U} . А именно, отображение $\phi: V \rightarrow U$ определяет отображение $\bar{\phi}: \bar{V} \rightarrow \bar{U}$ по правилу $v \mapsto \phi(v)$, то есть мы действуем так же, как и исходное отображение ϕ . Кроме этого отображение $V \rightarrow \bar{V}^*$ по правилу $(-, v)$ является \mathbb{C} -линейным изоморфизмом. Теперь имеем следующую диаграмму в комплексном случае

$$\begin{array}{ccc}
 \bar{V}^* & \xleftarrow{\bar{\phi}^*} & \bar{U}^* \\
 \uparrow \text{ (wavy)} & & \uparrow \text{ (wavy)} \\
 \bar{V} & \xleftarrow{\bar{\psi}} & \bar{U}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{ccc}
 (-, \bar{\psi} u) & = & (\bar{\phi}(-), u) \longleftarrow (-, u) \\
 \uparrow & & \uparrow \\
 \bar{\psi} u & \longleftarrow & u
 \end{array}$$

И как и в вещественном случае раскручивание определений приводит нас к равенству $(v, \bar{\psi} u) = (\bar{\phi} v, u)$ для всех $v \in \bar{V}$ и $u \in \bar{U}$, что означает, что $\bar{\psi}$ совпадает с определением сопряженного оператора.

18.4 Самосопряженные операторы

Мы уже видели пример операторов согласованных со скалярными произведениями – движения. Сейчас я познакомлю вас с еще одним классом операторов.

Определение 261. Пусть V евклидово или эрмитово пространство. Тогда оператор ϕ называется самосопряженным, если $\phi = \phi^*$. В евклидовом пространстве самосопряженные операторы обычно называются симметричными.

Замечания

- Если e_1, \dots, e_n – ортонормированный базис в пространстве V и оператор ϕ в этом базисе задан матрицей A , то ϕ^* задан матрицей A^t в евклидовом случае и \bar{A}^t в комплексном. Потому оператор ϕ самосопряжен тогда и только тогда, когда $A = A^t$ в евклидовом случае и $A = \bar{A}^t$ в комплексном случае.
- Если $\phi: V \rightarrow V$ – некоторый оператор в евклидовом пространстве и $\phi_{\mathbb{C}}: V_{\mathbb{C}} \rightarrow V_{\mathbb{C}}$ – его комплексификация. Тогда оператор ϕ самосопряжен тогда и только тогда, когда $\phi_{\mathbb{C}}$ самосопряжен. Легче всего это проверить так: выберем ортонормированный базис e_1, \dots, e_n в пространстве V , тогда он будет ортонормированным в пространстве $V_{\mathbb{C}}$. Если оператор ϕ в этом базисе задан матрицей $A \in M_n(\mathbb{R})$, то оператор $\phi_{\mathbb{C}}$ задан той же матрицей в этом же базисе. Но тогда условие $A = A^t$ равносильно $A = \bar{A}^t$. Первое из них означает самосопряженность ϕ , а второе самосопряженность $\phi_{\mathbb{C}}$.
- Давайте я тут нагоню немного мистики. Оказывается, что самосопряженные операторы являются моделью измеряемых величин в квантовой физике. Их спектры отвечают возможным значениям от измерений. Кроме того, с помощью скалярного произведения можно ввести вероятностную меру на спектре, что превращает наши измерения в случайные. Тот факт, что два оператора коммутируют означает, что эти измерения можно проделать одновременно. А если операторы не коммутируют, то значит эти измерения одновременно не производятся. Главный пример из квантовой механики – координата и импульс. Измеряя все точнее координату, мы теряем точность измерения импульса и наоборот. Все эти странные вещи можно объяснить с помощью самосопряженных операторов на некотором гильбертовом пространстве (это полные бесконечномерные евклидовы пространства). Чтобы в полной мере изучать такие вещи, приходится изучать правильную бесконечномерную линейную алгебру. Имя ей – функциональный анализ. Хотите заниматься квантовой криптографией или квантовыми вычислениями? Знайте, такое безобразие тоже существует и эти вещи ближе, чем они кажутся. Главное – выучить линейную алгебру как следует.

Утверждение 262. Пусть V – евклидово или эрмитово пространство и $\phi: V \rightarrow V$ – самосопряженный оператор, тогда

1. В вещественном случае: $\text{спес}_{\mathbb{R}} \phi \neq \emptyset$. В комплексном случае: $\text{спес}_{\mathbb{C}} \phi \subseteq \mathbb{R}$.
2. Если $\lambda \neq \mu$ – два разных собственных значения для ϕ , то подпространства V_{λ} и V_{μ} ортогональные.
3. Если $U \subseteq V$ ϕ -инвариантное подпространство, то U^{\perp} тоже ϕ -инвариантное подпространство.

Доказательство. 1) Давайте в начале рассмотрим комплексный случай. Пусть $\lambda \in \text{спес}_{\mathbb{C}} \phi$. Тогда для найдем ненулевой вектор $v \in V$ такой, что $\phi v = \lambda v$. Посчитаем выражение $(\phi v, v)$ двумя способами. С одной стороны

$$(\phi v, v) = (\lambda v, v) = \bar{\lambda}(v, v)$$

С другой стороны

$$(\phi v, v) = (v, \phi^* v) = (v, \phi v) = (v, \lambda v) = \lambda(v, v)$$

То есть $\bar{\lambda}(v, v) = \lambda(v, v)$. Так как v ненулевой, то $(v, v) \neq 0$. А это значит, что $\bar{\lambda} = \lambda$, то есть $\lambda \in \mathbb{R}$.

Теперь рассмотрим вещественный случай. Пусть $\phi: V \rightarrow V$ наш самосопряженный оператор. Рассмотрим его комплексификацию $\phi_{\mathbb{C}}: V \rightarrow V$. Это самосопряженный оператор в эрмитовом пространстве. По уже доказанному его спектр вещественный. Но ϕ и $\phi_{\mathbb{C}}$ имеют одинаковые матрицы, значит их спектры совпадают. В частности $\text{спес}_{\mathbb{R}} \phi = \text{спес}_{\mathbb{C}} \phi_{\mathbb{C}} \neq \emptyset$.

- 2) Пусть теперь $v \in V_{\lambda}$ и $u \in V_{\mu}$. Тогда

$$(\phi v, u) = (\lambda v, u) = \bar{\lambda}(v, u) = \lambda(v, u)$$

Здесь мы воспользовались тем, что все собственные значения вещественные. Теперь посчитаем по-другому

$$(\phi v, u) = (v, \phi^* u) = (v, \phi u) = (v, \mu u) = \mu(v, u)$$

То есть $\lambda(v, u) = \mu(v, u)$. Но при этом $\lambda \neq \mu$. Значит $(v, u) = 0$.

3) Нам надо показать, что если $w \perp U$, то $\phi(w) \perp U$. Имеем $(\phi w, u) = (w, \phi^* u) = (w, \phi u)$ для любого $u \in U$ и $w \in U^{\perp}$. В силу $\phi(U) \subseteq U$ получаем, что $\phi u \in U$. То есть $(\phi w, u) = (w, \phi u) = 0$ для любого $u \in U$, что и требовалось. \square

18.5 Классификация самосопряженных операторов

Утверждение 263. Пусть V – эрмитово пространство и $\phi: V \rightarrow V$ – некоторый оператор. Тогда оператор ϕ самосопряжен тогда и только тогда, когда

1. ϕ диагонализуем в ортонормированном базисе.
2. $\text{spec}_{\mathbb{C}} \phi \subseteq \mathbb{R}$.

Доказательство. (\Leftarrow). Если в некотором ортонормированном базисе ϕ задан диагональной матрицей A с вещественными числами на диагонали, то $\bar{A}^t = A^t = A$. А значит ϕ самосопряжен.

(\Rightarrow). Утверждение 262 пункт (1) уже влечет, что спектр ϕ целиком состоит из вещественных чисел. Нам лишь надо показать, что оператор диагонализуется. Так как спектр не пуст, то существует собственный вектор $v \in V$ с вещественным собственным значением λ . Тогда $V = \langle v \rangle \oplus \langle v \rangle^\perp$. Так как $\langle v \rangle$ является ϕ инвариантным, то $U = \langle v \rangle^\perp$ является ϕ инвариантным (утверждение 262 пункт (3)). А значит индукцией по размерности пространства, мы находим ортонормированный базис e_2, \dots, e_n в пространстве U , в котором диагонализуется оператор $\phi|_U$. Если мы выберем $e_1 = v/|v|$, то получим искомым базис e_1, e_2, \dots, e_n . \square

Утверждение 264. Пусть V – комплексное векторное пространство и $\phi: V \rightarrow V$ – некоторый оператор. Тогда существует скалярное произведение на V такое, что ϕ становится самосопряженным оператором тогда и только тогда, когда

1. ϕ диагонализуем.
2. $\text{spec}_{\mathbb{C}} \phi \subseteq \mathbb{R}$.

Доказательство. (\Rightarrow). Если существует такое скалярное произведение, то все следует из предыдущего утверждения 263.

(\Leftarrow). Пусть теперь e_1, \dots, e_n – базис в котором ϕ диагонализуем. Тогда зададим скалярное произведение так, чтобы этот базис был ортонормированным. В этом случае выполнена пара условий из утверждения 263 и мы получаем, что ϕ самосопряжен относительно построенного скалярного произведения. \square

Утверждение 265. Пусть V – евклидово пространство и $\phi: V \rightarrow V$ – некоторый оператор. Тогда ϕ самосопряжен тогда и только тогда, когда ϕ диагонализуем в ортонормированном базисе.

Доказательство. Доказательство этого утверждения один в один повторяет слова доказательства в комплексном случае (утверждение 263). Единственное обратите внимание, что тут мы просто пользуемся тем, что по утверждению 262 пункт (1), спектр самосопряженного оператора не пуст. \square

Утверждение 266. Пусть V – некоторое вещественное пространство и $\phi: V \rightarrow V$ – некоторый оператор. Тогда существует скалярное произведение такое, что ϕ самосопряжен, тогда и только тогда, когда ϕ диагонализуем.

Доказательство. Доказательство слово в слово повторяет комплексный случай (утверждение 264). \square

18.6 Билинейные формы и операторы

В евклидовом пространстве есть тесная связь между линейными операторами и билинейными формами. Аналогичная связь есть в эрмитовых пространствах, но уже между операторами и полуторалинейными формами. Этот механизм позволяет связать характеристики оператора с характеристиками билинейной (или полуторалинейной) формы. Я собираюсь обсудить эту связь.

Пусть V – евклидово или эрмитово пространство и пусть задан линейный оператор $\phi: V \rightarrow V$. Тогда он определяет билинейную (полуторалинейную) форму на V по правилу $\beta_\phi(v, u) = (v, \phi u)$. Таким образом получается отображение $\text{Hom}_{\mathbb{R}}(V, V) \rightarrow \text{Bil}(V)$ в евклидовом случае и $\text{Hom}_{\mathbb{C}}(V, V) \rightarrow \text{Bil}_{1/2}(V)$ в эрмитовом. Давайте теперь посмотрим как это отображение выглядит в некотором базисе.

Я для определенности разберу комплексный случай, вещественный делается аналогично. Пусть e_1, \dots, e_n – ортонормированный базис V , тогда V превращается в \mathbb{C}^n , скалярное произведение превращается в стандартное $(x, y) = \bar{x}^t y$ и оператор задается $\phi x = Ax$ для некоторой $A \in M_n(\mathbb{C})$. В этом случае билинейная форма β_ϕ имеет вид $\beta_\phi(x, y) = \bar{x}^t Ay$, то есть задается той же самой матрицей. Таким образом мы видим, что в случае выбора ортонормированного базиса, отображение из операторов в билинейные (полуторалинейные)

формы превращается в тождественное отображение на матрицах.¹⁵⁴ В частности, построенное отображение из операторов в билинейные (полуторалинейные) формы является биекцией и даже изоморфизмом векторных пространств. Что по простому означает следующее: для любой билинейной (полуторалинейной) формы β существует единственный линейный оператор $\phi: V \rightarrow V$ такой, что $\beta(v, u) = (v, \phi u)$.

Обратите внимание, что в вещественном случае оператор $\phi: V \rightarrow V$ самосопряжен тогда и только тогда, когда β_ϕ симметрична. В комплексном случае ϕ самосопряжен тогда и только тогда, когда β_ϕ эрмитова. Действительно, давайте проверим это для комплексного случая. Если выбрать ортонормированный базис и оператор ϕ превращается в $\phi x = Ax$, то условие самосопряженности оператора – это условие $\bar{A}^t = A$. При этом полуторалинейная функция будет иметь вид $\beta_\phi(x, y) = \bar{x}^t A y$ и условие ее эрмитовости – это опять же условие $\bar{A}^t = A$. Вот и все.¹⁵⁵ У этого наблюдения про формы и операторы есть два полезных следствия.

Утверждение 267. Пусть V – евклидово или эрмитово пространство и β – симметричная билинейная (или эрмитова) форма. Тогда существует ортонормированный базис e_1, \dots, e_n , в котором β задается диагональной матрицей.

Доказательство. Пусть $\phi: V \rightarrow V$ такой оператор, что $\beta(v, u) = (v, \phi u)$. Так как β симметрична (эрмитова) оператор ϕ является самосопряженным. Пусть e_1, \dots, e_n – ортонормированный базис, в котором ϕ диагонализуется. Тогда он задан в этом базисе диагональной матрицей $A = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$. Так как базис e_1, \dots, e_n ортонормированный, то β задана той же самой матрицей A . \square

На это утверждение можно смотреть следующим образом. Давайте обсудим его в вещественном случае. Пусть у вас на пространстве V задано две симметричные билинейные формы, причем одна из них положительно определена. Тогда существует базис, в котором обе формы задаются диагональными матрицами. В такой форме это утверждение возникает в дифференциальной геометрии для первой и второй квадратичной формы.

Утверждение 268. Пусть

1. V – вещественное пространство, $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ – симметричная билинейная форма и пусть в базисе e_1, \dots, e_n форма имеет вид $\beta(x, y) = x^t B y$.
2. V – комплексное пространство, $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{C}$ – эрмитова форма и пусть в базисе e_1, \dots, e_n форма имеет вид $\beta(x, y) = \bar{x}^t B y$.

Тогда характеристический многочлен B раскладывается на линейные множители с вещественными коэффициентами и сигнатура B определяется по знакам собственных значений матрицы B , а именно: $\#1$ совпадает с количеством положительных корней $\chi_B(t)$, $\# -1$ совпадает с количеством отрицательных корней $\chi_B(t)$, а $\#0$ совпадает с кратностью нуля в $\chi_B(t)$.

Доказательство. Давайте введем в пространстве V скалярное произведение такое, что e_1, \dots, e_n становится ортонормированным базисом. Тогда матрица B задает линейный оператор $\phi: V \rightarrow V$ такой, что $\beta(v, u) = (v, \phi u)$. Так как β симметричная (эрмитова), то ϕ^* самосопряжен. Мы можем найти новый ортонормированный базис f_1, \dots, f_n , в котором ϕ диагонализуется $\text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$. Тогда числа на диагонали – это спектр матрицы B . С другой стороны, β в базисе f_1, \dots, f_n тоже задается матрицей $\text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$, а значит ее сигнатура определяется по количеству положительных, отрицательных и нулевых чисел среди корней характеристического многочлена с учетом кратности. \square

Замечание Пусть нам задан оператор $\phi: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ с помощью симметричной матрицы $A \in M_n(\mathbb{R})$. Тогда ϕ самосопряжен относительно стандартного скалярного произведения и по нему строится симметричная билинейная форма $\beta_\phi(x, y) = (x, \phi(y))$. По предыдущему утверждению мы знаем, что сигнатура β_ϕ совпадает со знаками собственных значений ϕ . Обратите внимание, что сигнатуру находить проще, чем знаки собственных значений, для ее поиска достаточно алгоритма Гаусса (симметричной версии). Таким образом у нас появляется алгоритм для матрицы A по определению количества положительных и отрицательных собственных значений – для этого надо у матрицы A определить сигнатуру как у билинейной формы. Теперь заметим, что если мы применим этот метод к матрице $A - \lambda E$, то мы можем определить количество собственных значений больше и меньше λ . А значит у нас есть метод по определению количества собственных значений на любом отрезке.

¹⁵⁴Важно иметь в виду, что при выборе не ортонормированного базиса, отображение будет иметь вид $A \mapsto GA$, где G – матрица скалярного произведения в выбранном базисе.

¹⁵⁵Это условие можно было бы проверять без базиса. По определению $\beta_\phi(v, u) = (v, \phi u)$, кроме того $\overline{\beta_\phi(u, v)} = \overline{(u, \phi v)} = (\phi v, u) = (v, \phi^* u)$. Таким образом равенство этих двух выражений совпадает с определением эрмитовости β_ϕ и самосопряженности ϕ .

18.7 Классификация линейных отображений

Мы с вами уже занимались классификацией линейных отображений между двумя разными пространствами (утверждение 86). Выбирая базисы в двух пространствах независимо, мы можем добиться того, чтобы матрица превратилась в диагональную с единицами и нулями на диагонали. По сути, две прямоугольные матрицы задают одно и то же отображение между двумя разными пространствами тогда и только тогда, когда у них одинаковый ранг. Теперь у нас ситуация немного более жесткая. У нас теперь есть два пространства V и U и они либо вещественные, либо эрмитовы и задано линейное отображение $\phi: V \rightarrow U$. Но теперь в отличие от общего случая я хочу выбирать не произвольные базисы, а только ортонормированные. Таким образом у меня меньше свободы для модификации матрицы оператора. Оказывается, что даже в таком жестком случае, можно сделать матрицу оператора диагональной, то вот на диагонали будут стоять произвольные неотрицательные числа.

Утверждение 269. Пусть V и U – евклидовы или эрмитовы пространства и $\phi: V \rightarrow U$ – линейное отображение. Тогда существует ортонормированный базис e_1, \dots, e_n в V , ортонормированный базис f_1, \dots, f_m в U и последовательность вещественных чисел $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r > 0$ такие, что матрица ϕ имеет вид

$$\phi(e_1, \dots, e_n) = (f_1, \dots, f_m) \begin{pmatrix} \sigma_1 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & \sigma_r & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & 0 \end{pmatrix}$$

При этом числа $\sigma_1, \dots, \sigma_r$ определены однозначно и называются сингулярными значениями отображения ϕ .

Доказательство. Для поиска базиса e_1, \dots, e_n нам надо будет рассмотреть оператор $\phi^* \phi$. Давайте начнем с трех замечаний

1. Оператор $\phi^* \phi: V \rightarrow V$ является самосопряженным.

Действительно, по правилам применения звездочки мы видим $(\phi^* \phi)^* = \phi^* \phi^{**} = \phi^* \phi$.

2. Спектр оператора $\phi^* \phi$ состоит из неотрицательных чисел.

Из обсуждения в разделе 18.6 о связи билинейных форм и операторов следует, что нам достаточно проверить, что билинейная форма $\beta(u, v) = (u, \phi^* \phi(v))$ является неотрицательно определенной. А для этого достаточно проверить, что квадратичная форма $Q(v) = (v, \phi^* \phi(v))$ принимает неотрицательные значения. Но это непосредственно следует из определения $Q(v) = (v, \phi^* \phi(v)) = (\phi(v), \phi(v)) \geq 0$.

3. Ядро оператора $\phi^* \phi$ совпадает с ядром ϕ .

Ясно, что ядро ϕ лежит в ядре композиции $\phi^* \phi$. С другой стороны, пусть $\phi^* \phi(v) = 0$, тогда $(v, \phi^* \phi(v)) = 0$. А следовательно $|\phi(v)|^2 = (\phi(v), \phi(v)) = (v, \phi^* \phi(v)) = 0$. Значит и вектор $\phi(v) = 0$.

Теперь мы готовы к доказательству утверждения. По утверждению ?? существует ортонормированный базис e_1, \dots, e_n в пространстве V такой, что оператор $\phi^* \phi$ в нем диагонален. В силу второго замечания, диагональные элементы этого оператора будут неотрицательны. Давайте упорядочим их по невозрастанию $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_n \geq 0$. Пусть первые r элементов ненулевые, то есть мы имеем $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_r > 0 = \dots = 0$. Определим числа $\sigma_i = \sqrt{\lambda_i}$.

Теперь для $1 \leq i \leq r$ определим векторы $f_i = \frac{1}{\sigma_i} \phi(e_i)$. Покажем, что f_i это ортонормированная система векторов. Действительно. Сначала проверим длины ($1 \leq i \leq r$):

$$(f_i, f_i) = \left(\frac{1}{\sigma_i} \phi(e_i), \frac{1}{\sigma_i} \phi(e_i) \right) = \frac{1}{\sigma_i^2} (e_i, \phi^* \phi(e_i)) = \frac{1}{\sigma_i^2} (e_i, \lambda_i e_i) = \frac{\lambda_i}{\sigma_i^2} = 1$$

Теперь проверим ортогональность ($1 \leq i, j \leq r$):

$$(f_i, f_j) = \left(\frac{1}{\sigma_i} \phi(e_i), \frac{1}{\sigma_j} \phi(e_j) \right) = \frac{1}{\sigma_i \sigma_j} (e_i, \phi^* \phi(e_j)) = \frac{1}{\sigma_i \sigma_j} (e_i, \lambda_j e_j) = 0$$

В частности это значит, что векторы $f_1, \dots, f_r \in U$ являются линейно независимыми. Теперь дополним векторы $f_1, \dots, f_r \in U$ до ортонормированного базиса пространства U и получим f_1, \dots, f_m . Теперь методом пристального взгляда проверяем, что построенная пара базисов удовлетворяет требуемому условию:

$$\phi(e_1, \dots, e_n) = (f_1, \dots, f_m) \begin{pmatrix} \sigma_1 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & \sigma_r & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & 0 \end{pmatrix}$$

Осталось показать, что числа σ_i определены однозначно. Пусть у нас есть другая пара базисов $e'_1, \dots, e'_n \in V$ и $f'_1, \dots, f'_m \in U$ такая, что матрица ϕ в этой паре базисов диагональна с положительными числами $\sigma'_1, \dots, \sigma'_r$ и нулями на диагонали. Тогда в базисе e'_1, \dots, e'_n матрица оператора $\phi^* \phi$ будет диагональной с числами $(\sigma'_1)^2, \dots, (\sigma'_r)^2$ и нулями на диагонали. Но тогда эти числа совпадают со спектром $\phi^* \phi$. А так как σ'_i положительны, то они однозначно восстанавливаются как корни из спектра $\phi^* \phi$. \square

18.8 SVD или сингулярное разложение

Давайте переформулируем последнее утверждение в матричных терминах. Чтобы упростить изложение, я все сделаю для вещественного случая. Комплексный делается аналогично с той лишь разницей, что везде в формулах транспонированную матрицу M^t надо менять на эрмитово сопряженную $M^* = \bar{M}^t$ при любой матрице M . В начале я переформулирую утверждение на матричном языке.

Утверждение 270. Пусть дана матрица $A \in M_{m,n}(\mathbb{R})$. Тогда

1. Существует $U \in M_m(\mathbb{R})$ такая, что $U^t U = E$.
2. Существует $V \in M_n(\mathbb{R})$ такая, что $V^t V = E$.
3. Существует последовательность вещественных чисел $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r > 0$.

такие, что $A = U \Sigma V^t$, где

$$\Sigma = \left(\begin{array}{cccc} \overbrace{\sigma_1}^n & & & \\ & \ddots & & \\ & & \sigma_r & \\ & & & \ddots \\ & & & & 0 \end{array} \right) \left. \vphantom{\begin{array}{c} \sigma_1 \\ \ddots \\ \sigma_r \\ \ddots \\ 0 \end{array}} \right\} m$$

При этом последовательность чисел $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r$ определена однозначно.

- Разложение матрицы A в этом утверждении называется сингулярным разложением или SVD.
- Чтобы свести матричное утверждение к операторному, надо рассмотреть пространства \mathbb{R}^n и \mathbb{R}^m со стандартным скалярным произведением и оператор $\phi: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ по правилу $x \mapsto Ax$. Тогда столбцы матрицы U – это базисные векторы $f_1, \dots, f_m \in \mathbb{R}^m$, а столбцы V – это базисные векторы e_1, \dots, e_n из утверждения 269.
- Обратите внимание, что такое разложение не единственное. Например, если A квадратная и равна единичной матрице, то подойдет любое разложение вида $A = U E U^t$, где U – произвольная ортогональная матрица. В данном случае эффект связан с тем, что все сингулярные значения одинаковые. Но даже, если сингулярные значения разные, вы можете домножать соответствующие столбцы U и V на минус единицу,¹⁵⁶ например.

$$A = (u_1 | \dots | u_m) \Sigma (v_1 | \dots | v_n)^t \quad \text{тогда} \quad A = (-u_1 | \dots | u_m) \Sigma (-v_1 | \dots | v_n)^t$$

¹⁵⁶ В комплексном случае домножать можно на пару сопряженных чисел по модулю равных единице.

- Последний пример показывает, что не только разложение неоднозначно, но и что между столбцами U и V есть некоторое условие согласованности. Из-за этой неоднозначности в разложении, надо аккуратно искать все компоненты этого разложения. Если вы нашли какие-то части разложения, например матрицы U и Σ , то матрицу V надо искать не абы каким методом.
- Рассмотрим сингулярное разложение $A = U\Sigma V^t$. В этом случае $AA^t = U\Sigma\Sigma^tU^t$. Тогда $D = \Sigma\Sigma^t$ будет диагональной матрицей, где на диагонали стоят квадраты сингулярных значений. При этом по столбцам матрицы U стоят собственные векторы для AA^t . Таким образом, если сингулярное значение σ_i отлично от всех остальных, то в вещественном случае вектор u_i определен однозначно с точностью до знака.

Заметим, что в SVD матрица Σ имеет тот же размер, что и матрица A . Однако, ее правая часть полностью заполнена нулями. А значит, что умножение этой части на соответствующую часть матрицы V^t ни на что не повлияет. Предположим для определенности, что $n > m$, как на картинках. Тогда можем определить матрицу $\Sigma_0 \in M_m(\mathbb{R})$ полученную из Σ отрезанием последних $n - m$ нулевых столбцов. Так же заменим матрицу $V = (v_1 | \dots | v_n)$ на матрицу $V_0 = (v_1 | \dots | v_m)$. Тогда получим разложение вида

$$A = U\Sigma_0V_0^t$$

Это разложение называется усеченным сингулярным разложением и многие алгоритмы ищут именно его. Здесь квадратными являются U и Σ_0 , а столбцы V_0 образуют ортонормированную систему (не обязательно базис). Если бы было $m > n$, то разложение было бы вида

$$A = U_0\Sigma_0V^t$$

при этом квадратными были бы матрицы Σ_0 и V , а столбцы матрицы U_0 образуют ортонормированную систему (не обязательно базис).

Если пойти еще дальше и применить блочные формулы к сингулярному разложению, то можно получить разложение матрицы A в сумму матриц ранга 1, а именно

$$A = \sigma_1 u_1 v_1^t + \dots + \sigma_r u_r v_r^t$$

Если задать на пространстве матриц $M_{m,n}(\mathbb{R})$ скалярное произведение в виде $(A, B) = \text{tr}(A^t B)$, то матрицы $u_i v_i^t$ будут ортонормированной системой в пространстве матриц, а написанное выше разложение – это разложение матрицы A по ортонормированному базису, состоящему из матриц ранга 1.

Последнее разложение используется для сжатия информации с потерей информации. Например, про матрицу A можно думать как про картинку в шкале серого, где в ячейке матрицы задана интенсивность черного. В реальной жизни, числа $\sigma_1 \geq \dots \geq \sigma_r$ убывают очень быстро и последние значения ничтожно малы. Если вы откинете последнее слагаемое $\sigma_r u_r v_r^t$, то вы измените исходную матрицу A . Однако, u_r и v_r – векторы нормы 1, а значит их координаты по модулю не больше единицы, а значит у матрицы $\sigma_r u_r v_r^t$ координаты не больше, чем σ_r по модулю. Значит, если σ_r мало, то выкидывание последнего слагаемого меняет каждый коэффициент матрицы A на очень малую величину, незаметную для глаза. Таким образом, вместо того, чтобы хранить матрицу A целиком (для этого нужно mn ячеек памяти), мы можем отрезать в каком-нибудь месте сумму в сингулярном разложении и хранить

$$A' = \sigma_1 u_1 v_1^t + \dots + \sigma_k u_k v_k^t$$

Здесь нам понадобится k ячеек памяти под σ_i , kt ячеек памяти под векторы u_i и kn ячеек памяти под векторы v_i . Итого будет $k(1 + n + m)$ ячеек памяти. При этом параметр k контролирует степень сжатия картинки.

18.9 Ортопроекторы

В этом разделе я хочу обсудить некоторые технические факты, которые мне понадобятся для задачи о низкоранговом приближении. Давайте напомним, что такое проекторы и ортопроекторы.¹⁵⁷ Пусть V – векторное пространство, $U, W \subseteq V$ – его подпространства и $V = U \oplus W$. Тогда любой вектор v однозначно раскладывается в сумму $v = u + w$, где $u \in U$ и $w \in W$. Тогда можно определить отображение $P: V \rightarrow V$ по правилу $v \mapsto u$. Как легко видеть P является линейным оператором. Он называется проектором на U вдоль W . Заметим, что

¹⁵⁷Мы уже изучили их в разделе 9.1 и разделе 16.5.

P действует тождественно на U и нулем на W . Кроме того, $U = \text{Im } P$, а $W = \ker P$. Или в терминах собственных подпространств U – это V_1 собственное подпространство для 1, а $W = V_0$ – собственное подпространство для 0. Кроме того, мы с вами уже знаем, что оператор $P: V \rightarrow V$ является проектором тогда и только тогда, когда $P^2 = P$ (утверждение 93).

Пусть теперь V – евклидово или эрмитово пространство и $U \subseteq V$ – некоторое подпространство. Тогда $V = U \oplus U^\perp$. В этом случае проектор на U вдоль U^\perp называется ортопроектором на U .

Утверждение 271. Пусть V – евклидово или эрмитово пространство и $P: V \rightarrow V$ – некоторый оператор. Тогда P является ортопроектором тогда и только тогда, когда $P^2 = P$ и $P^* = P$.

Доказательство. Мы уже знаем, что P проектор тогда и только тогда, когда $P^2 = P$. Надо показать, что при этом условие ядро и образ проектора ортогональны тогда и только тогда, когда P самосопряжен.

Предположим, что P ортопроектор, то есть ядро ортогонально образу. Выберем e_1, \dots, e_k – ортонормированный базис образа и e_{k+1}, \dots, e_n – ортонормированный базис ядра. Тогда в силу ортогональности ядра и образа, e_1, \dots, e_n будет ортонормированным базисом V и в нем P задан матрицей $A = \begin{pmatrix} E & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$. То есть $A^t = A$ в вещественном случае или $\bar{A}^t = A$ в комплексном. Последнее означает, что P самосопряжен.

Обратно, пусть $P^* = P$. Надо показать, что ядро и образ ортогональны. Пусть $u = Pv \in \text{Im } P$ и $w \in \ker P$, тогда

$$(u, w) = (Pv, w) = (v, P^*w) = (v, Pw) = (v, 0) = 0$$

□

Утверждение 272. Пусть V – евклидово или эрмитово пространство, $P: V \rightarrow V$ – ортопроектор на некоторое подпространство U и e_1, \dots, e_n – ортонормированный базис пространства V . Тогда

$$\sum_{i=1}^n |Pe_i|^2 = \dim U$$

Доказательство. Давайте посчитаем след оператора P двумя разными способами. Если мы выберем базис e_1, \dots, e_k в пространстве U и e_{k+1}, \dots, e_n базис в U^\perp , то оператор P в нем задается матрицей $\begin{pmatrix} E & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$. То есть $\text{tr } P = \dim U$.

С другой стороны, давайте посчитаем левую часть выражения

$$\sum_{i=1}^n |Pe_i|^2 = \sum_{i=1}^n (Pe_i, Pe_i) = \sum_{i=1}^n (e_i, P^*Pe_i) = \sum_{i=1}^n (e_i, P^2e_i) = \sum_{i=1}^n (e_i, Pe_i)$$

Так как базис e_1, \dots, e_n ортонормированный, то скалярное произведение стандартное. Если $P(e_1, \dots, e_n) = (e_1, \dots, e_n)A$, то $(e_i, Pe_i) = a_{ii}$. Таким образом $\sum_{i=1}^n (e_i, Pe_i) = \sum_{i=1}^n a_{ii} = \text{tr } P$. □

18.10 Задача о низкоранговом приближении

Пусть теперь $A \in M_{m,n}(\mathbb{R})$ или $A \in M_{m,n}(\mathbb{C})$. Зададим на пространствах матриц скалярное произведение. В вещественном случае по формуле $(A, B) = \text{tr}(A^t B)$, а в комплексном $(A, B) = \text{tr}(A^* B)$. Длина относительно заданного скалярного произведения называется нормой фробениуса и выражается следующим образом (в вещественном или комплексном случае соответственно):

$$\|A\|_F = \sqrt{\sum_{ij} a_{ij}^2} \quad \text{или} \quad \|A\|_F = \sqrt{\sum_{ij} |a_{ij}|^2}$$

Если матрица A имеет вид $A = (A_1 | \dots | A_n)$, тогда $\|A\|_F^2 = \sum_{i=1}^n |A_i|^2$, где $|A_i|$ – длина относительно стандартного скалярного произведения для столбца A_i . В силу последнего замечания легко видеть, что норма фробениуса не меняется при домножении матрицы слева или справа на ортогональную матрицу.

Теперь наша задача – заменить матрицу A на матрицу B ранга не выше k , причем мы хотим выбрать B ближайшей в смысле нормы фробениуса. То есть мы зафиксируем матрицу A и число k и будем решать задачу

$$\begin{cases} \|A - B\|_F \rightarrow \min_B \\ \text{rk } B \leq k \end{cases}$$

Важно понимать, что множество матриц ранга не выше k не образуют линейное подпространство в пространстве матриц. А значит, тут не получится решить эту задачу просто применением ортопроекторов. Кроме того, задача может иметь не единственное решение, в некоторых ситуациях ближайших матриц может оказаться бесконечное число.

Обратите внимание, что если $k \geq \text{rk } A$, то ответом будет сама матрица A . А если $k < \text{rk } A$, то оказывается, что SVD дает нужный ответ к данной задаче. Нужно найти для матрицы A сингулярное разложение. После чего, выбрать в качестве нужной матрицы матрицу

$$B_k = \sigma_1 u_1 v_1^t + \dots + \sigma_k u_k v_k^t$$

Доказательству этого факта будет посвящен этот раздел.

Утверждение 273. Пусть $A \in M_{m,n}(\mathbb{R})$, $A = U\Sigma V^t$ – ее сингулярное разложение и $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r$ – ее сингулярные числа. Определим матрицу

$$\Sigma_k = \begin{pmatrix} \sigma_1 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & \sigma_k & & \\ & & & 0 & \end{pmatrix} \in M_{m,n}(\mathbb{R})$$

Тогда матрица $B_k = U\Sigma_k V^t$ будет ближайшей матрицей ранга не более k к матрице A по норме Фробениуса, то есть $\|A - B_k\|_F \leq \|A - B\|_F$ для любой матрицы $B \in M_{m,n}(\mathbb{R})$ ранга не более k .

Доказательство. Так как у нас есть претендент на минимум, то мы для начала посчитаем значение $\|A - B_k\|_F$. Получим

$$\|A - B_k\|_F^2 = \|U(\Sigma - \Sigma_k)V^t\|_F^2 = \|\Sigma - \Sigma_k\|_F^2$$

Последнее равенство выполняется в силу того, что U и V ортогональные (см. замечание в начале раздела 18.10). Но матрица $\Sigma - \Sigma_k$ является диагональной с $\sigma_{k+1}, \dots, \sigma_r$ на диагонали. Потому

$$\|A - B_k\|_F^2 = \sigma_{k+1}^2 + \dots + \sigma_r^2$$

То есть нам теперь надо доказать, что для любой $B \in M_{m,n}(\mathbb{R})$ с условием $\text{rk } B \leq k$ выполнено

$$\|A - B\|_F^2 \geq \sigma_{k+1}^2 + \dots + \sigma_r^2$$

В начале сведем случай к диагональной матрице A следующим образом.

$$\|A - B\|_F = \|U\Sigma V^t - B\|_F = \|\Sigma - U^t B V\|_F = \|\Sigma - B'\|_F$$

где $B' = U^t B V$. Введем обозначения для столбцов матрицы $B' = (B_1 | \dots | B_n)$ и пусть e_1, \dots, e_m – стандартный базис в \mathbb{R}^m . Тогда

$$\|\Sigma - B'\|_F^2 = \left\| (\sigma_1 e_1 | \dots | \sigma_r e_r | 0 | \dots | 0) - (B_1 | \dots | B_n) \right\|_F^2 = \sum_{i=1}^r |\sigma_i e_i - B_i|^2 + \sum_{i=r+1}^n |B_i|^2$$

Теперь оценим это выражение снизу отбросив вторую сумму, получим

$$\|\Sigma - B'\|_F^2 \geq \sum_{i=1}^r |\sigma_i e_i - B_i|^2$$

При этом обратите внимание, что если линейная оболочка $U = \langle B_1, \dots, B_n \rangle$ не лежит в линейной оболочке столбцов матрицы Σ , то у нас строгое неравенство. Величина $|\sigma_i e_i - B_i|$ не меньше, чем расстояние от вектора $\sigma_i e_i$ до U . Значит мы можем оценить эту разность через ортогональную составляющую и написать

$$\sum_{i=1}^r |\sigma_i e_i - B_i|^2 \geq \sum_{i=1}^r |\text{ort}_U(\sigma_i e_i)|^2 = \sum_{i=1}^r \sigma_i^2 |\text{ort}_U(e_i)|^2$$

Теперь обозначим $|\text{ort}_U(e_i)|^2 = t_i$ (здесь $1 \leq i \leq m$). По утверждению 272 имеем $\sum_{i=1}^r t_i = \dim \text{Im } \text{ort}_U \geq m - k$. Теперь наша задача показать, что

$$\sum_{i=1}^t \sigma_i^2 t_i \geq \sum_{i=k+1}^r \sigma_i^2 \quad \text{при условии} \quad \begin{cases} 0 \leq t_i \leq 1 \\ \sum_{i=1}^r t_i \geq m - k \end{cases}$$

Так как все функции неравенства линейные и σ_i^2 упорядочены по убыванию, то мы извлекаем ответ методом пристального взгляда. А именно, минимум будет в случае

$$t_1 = 0, \dots, t_k = 0, t_{k+1} = 1, \dots, t_m = 1$$

В этом случае минимальное значение выражения $\sum_{i=1}^t \sigma_i^2 t_i$ как раз получается $\sum_{i=k+1}^r \sigma_i^2$. \square

Замечания Обратите внимание на одну тонкость. В утверждении выше, мы показали, что матрица B_k построенная по сингулярному разложению подходит в качестве минимума выражения $\|A - B\|_F$ среди матриц ранга k . Однако, мы с вами не знаем, а есть ли другие минимумы. Оказывается, что этот вопрос можно исследовать и ситуация следующая:

1. Пусть $A = U\Sigma V^t$ – сингулярное разложение некоторой матрицы A и $\sigma_k = \sigma_{k+1}$. Тогда матрица B_k ранга k , на которой достигается минимум $\|A - B\|_F$, не единственная. Пример легко увидеть на единичной матрице $A = E$. Тогда для любой ортогональной матрицы U получим $A = UEU^t$ – некоторое сингулярное разложение. Если $U = (u_1 | \dots | u_n)$, то матрица $u_1 u_1^t$ дает приближение ранга 1. Меняя матрицу U , можно получить разные приближения. Например, если $U = E$, то $e_1 e_1^t$ будет еще одним примером, где e_1, \dots, e_n – стандартный базис.
2. Пусть $A = U\Sigma V^t$ – сингулярное разложение некоторой матрицы A и $\sigma_k > \sigma_{k+1}$. Тогда матрица B_k ранга не больше k , на которой достигается минимум $\|A - B\|_F$, единственная и имеет ранг k . Делается это так. Мы можем считать, что матрица $A = \Sigma$ диагональная. Теперь надо взять произвольную матрицу B ранга не больше k , на которой достигается минимум. Тогда во всех оценках в доказательстве утверждения 273 будут равенства. То есть в частности (здесь r – ранг A):

$$\sum_{i=r+1}^n |B_i|^2 = 0$$

А значит в матрице B ненулевыми могут быть только первые r столбцов. Теперь нужно посмотреть на неравенство $|\sigma_i e_i - B_i| \geq |\text{ort}_U(\sigma_i e_i)|$ при $1 \leq i \leq r$. В нем равенство достигается при условии $B_i = \text{pr}_U(\sigma_i e_i)$. Наконец рассмотрим релаксированную задачу с t_i в самом конце. Если $\sigma_k > \sigma_{k+1}$, то эта задача имеет единственное решение $t_1 = \dots = t_k = 0$ и $t_{k+1} = \dots = t_m = 1$. Значит

$$|\text{ort}_U(e_1)| = \dots = |\text{ort}_U(e_k)| = 0 \quad |\text{ort}_U(e_{k+1})| = \dots = |\text{ort}_U(e_m)| = 1$$

Условие $|\text{ort}_U(e_i)| = 0$ при $1 \leq i \leq k$ означает, что $e_1, \dots, e_k \in U$, а значит

$$B_1 = \text{pr}_U(\sigma_1 e_1) = \sigma_1 e_1, \dots, B_k = \text{pr}_U(\sigma_k e_k) = \sigma_k e_k.$$

Теперь смотрим на $|\text{ort}_U(e_{k+i})| = 1$. Так как e_{k+i} имеют длину 1, то по теореме Пифагора $e_{k+i} = \text{ort}_U(e_{k+i})$, то есть $B_{k+i} = \text{pr}_U(\sigma_{k+i} e_{k+i}) = 0$. Значит B совпадает с Σ_k , что и требовалось.