

Содержание

1	Линейная Алгебра	2
1.1	Линейное (векторное) пространство	2
1.2	Линейная зависимость и независимость векторов	2
1.3	Размерность линейного пространства. Базис.	2
1.4	Подпространство	3
1.5	Системы линейных уравнений	3
1.5.1	Частный случай. Число уравнений равно числу неиз- вестных.	3
1.5.2	Общий случай	4
1.6	Решение систем линейных уравнений. Метод Гаусса.	4
1.7	Евклидово пространство	5
1.7.1	Скалярное произведение	5
1.7.2	Угол между векторами, длина вектора	5
1.8	Операторы и базис	6
1.8.1	Ортонормированный базис	6
1.9	Линейные операторы	7
1.9.1	Ядро и образ оператора	7
1.9.2	Собственные числа и собственные векторы	7
1.10	Определитель матрицы	7
1.11	Уравнение прямой. Пересечение прямых.	7
2	Математический анализ	7
2.1	Вещественные числа	7
2.1.1	Принцип математической индукции	8
2.1.2	Принцип Архимеда	8
2.2	Последовательности. Предел последовательности.	8
2.3	Функции и непрерывность	8
2.3.1	Функции. Предел функции	9
2.3.2	Непрерывность функции	9
3	Теория вероятностей	9
3.1	Вероятностная модель эксперимента	9
3.2	Вероятностное пространство	10
3.3	Классическое определение вероятности	10
3.4	Неравенства Маркова и Чебышева	10
4	Комбинаторика	11
5	Теория графов	11
5.1	Потоки и сети	11

1 Линейная Алгебра

1.1 Линейное (векторное) пространство

Линейное пространство – это набор элементов (векторов), для которых определена операция сложения и умножения на число. Эти операции должны подчиняться определенному набору аксиом.

Детальная статья в Википедии (в которой в том числе перечислены все аксиомы): Векторное пространство.

Примеры линейных (векторных) пространств:

- Множество векторов на плоскости.
- Множество всех матриц размерности $m \times n$.
- Множество всех многочленов степени не выше n :
$$f(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots + a_n \cdot x^n$$

1.2 Линейная зависимость и независимость векторов

Рассмотрим набор векторов v_1, v_2, \dots, v_n . Данный набор векторов является **линейно зависимым**, если существуют такие числа a_1, a_2, \dots, a_n , что хотя бы одно из этих чисел не равно нулю, и при этом выполнено равенство

$$a_1 \cdot v_1 + a_2 \cdot v_2 + \dots + a_n \cdot v_n = 0$$

Если же равенство выше равно нулю только в том случае, если все числа a_1, a_2, \dots, a_n равны нулю, то данный набор векторов называется **линейно независимым**.

1.3 Размерность линейного пространства. Базис.

Рассмотрим линейное пространство L . Рассмотрим набор из n векторов

$$v_1, v_2, \dots, v_n$$

принадлежащих этому пространству. Предположим, что этот набор векторов является линейно независимым и при этом любой набор из $n + 1$ векторов из этого же пространства является линейно зависимым. В таком случае L называется n -мерным векторным пространством, и размерность этого пространства $\dim(L) = n$.

Вектора v_1, v_2, \dots, v_n образуют **базис** этого линейного пространства. Любой вектор $u \in L$ можно единственным образом представить в виде линейной комбинации векторов базиса.

1.4 Подпространство

Множество векторов

$$u_1, u_2, \dots, u_m$$

принадлежащих L , образует **подпространство** M , если для этих векторов заданы те же операции сложения и умножения на число, что и в исходном пространстве, и при этом любой вектор u , который является результатом выполнения этих операций, также принадлежит M .

1.5 Системы линейных уравнений

Урок на Stepik: Существование систем линейных уравнений.

1.5.1 Частный случай. Число уравнений равно числу неизвестных.

Рассмотрим следующую систему линейных уравнений:

$$\begin{aligned}a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 &= b_1 \\a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 &= b_2 \\a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 &= b_3\end{aligned}$$

В такой системе количество уравнений совпадает с количеством неизвестных. Запишем систему в следующем виде:

$$x_1 \cdot \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ a_{31} \end{pmatrix} + x_2 \cdot \begin{pmatrix} a_{12} \\ a_{22} \\ a_{32} \end{pmatrix} + x_3 \cdot \begin{pmatrix} a_{13} \\ a_{23} \\ a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}$$

В таком виде задачу о нахождении решения данной системы можно рассматривать как задачу о представлении вектора \mathbf{b} в виде линейной комбинации векторов \mathbf{a}_1 , \mathbf{a}_2 и \mathbf{a}_3 .

Если вектора \mathbf{a}_1 , \mathbf{a}_2 и \mathbf{a}_3 образуют базис, то решение у такой системы существует при любом векторе \mathbf{b} , причем такое решение будет единственным. Если же эти вектора базис не образуют, то решение у системы будет существовать только в том случае, если вектор \mathbf{b} будет принадлежать подпространству, порождаемому векторами \mathbf{a}_1 , \mathbf{a}_2 и \mathbf{a}_3 , причем решений в таком случае будет бесконечно много.

Аналогичные утверждения верны и для системы линейных уравнений с n уравнениями и n неизвестными.

1.5.2 Общий случай

Рассмотрим теперь более общий случай. А именно, рассмотрим систему, состоящую из n линейных уравнений с m неизвестными:

$$\begin{aligned}a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1m}x_m &= b_1 \\a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2m}x_m &= b_2 \\&\dots \\a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nm}x_m &= b_n\end{aligned}$$

Перепишем систему в следующем виде:

$$x_1 \cdot \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ \dots \\ a_{n1} \end{pmatrix} + x_2 \cdot \begin{pmatrix} a_{12} \\ a_{22} \\ \dots \\ a_{n2} \end{pmatrix} + \dots + x_m \cdot \begin{pmatrix} a_{1m} \\ a_{2m} \\ \dots \\ a_{nm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_n \end{pmatrix}$$

В таком виде задачу о нахождении решения для данной системы уравнений можно рассматривать как задачу о представлении вектора \mathbf{b} в виде линейной комбинации векторов $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_m$, каждый из которых является элементом n -мерного линейного пространства.

Рассмотрим линейное подпространство минимальной размерности, которое содержит все эти m векторов. Такое подпространство также называется линейной оболочкой, образуемой данными векторами. Размерность такого подпространства (линейной оболочки) называется **рангом** системы линейных уравнений.

Касательно существования решения для системы таких уравнений. Возможны два случая:

- Если вектор b не принадлежит данной линейной оболочке, то решений у системы нет.
- Если вектор b принадлежит данной линейной оболочке то, решение существует. При этом если $n = m$, то решение будет единственным, так как набор векторов $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_m$ будет образовывать базис. Если же число векторов больше, чем размерность линейной оболочки, то система будет иметь бесконечно много решений.

1.6 Решение систем линейных уравнений. Метод Гаусса.

Урок на Stepik: Решение систем линейных алгебраических уравнений. Метод Гаусса.

Основная идея метода Гаусса заключается в том, чтобы с помощью операций сложения и умножения на число последовательно исключать переменные, приводя матрицу коэффициентов к треугольному (диагональному

виду). Имея матрицу в таком виде, можно затем последовательно найти значения всех неизвестных.

1.7 Евклидово пространство

1.7.1 Скалярное произведение

Для двух векторов u, v , принадлежащих некоторому линейному пространству L , скалярным произведением называется операция, которая этим двум векторам сопоставляет некоторое вещественное число:

$$(u, v) = c : c \in \mathbb{R}.$$

При этом такая операция должна удовлетворять 4-м аксиомам:

1. $(x, y) = (y, x)$
2. $(\lambda x, y) = \lambda \cdot (x, y) \quad \forall \lambda \in \mathbb{R}$
3. $(x_1 + x_2, y) = (x_1, y) + (x_2, y)$
4. $(x, x) \geq 0$

Линейное (векторное) пространство с введенной на нем вышеописанной операцией скалярного произведения, называется **Евклидовым пространством**.

Для векторов $x = (x_1, x_2, \dots, x_n), y = (y_1, y_2, \dots, y_n) \in \mathbb{R}^n$ примером скалярного произведения может выступать сумма произведений их координат:

$$(u, v) = x_1 \cdot y_1 + x_2 \cdot y_2 + \dots + x_n \cdot y_n$$

1.7.2 Угол между векторами, длина вектора

Для векторов на плоскости скалярное произведение можно ввести следующим образом:

$$(x, y) = |x| \cdot |y| \cdot \cos(x, y)$$

Выразим отсюда косинус угла между векторами:

$$\cos(x, y) = \frac{(x, y)}{|x| \cdot |y|} = \cos(\alpha)$$

Из этого выражения получим, что **угол между векторами** можно найти следующим образом:

$$\alpha = \arccos \left(\frac{(x, y)}{|x| \cdot |y|} \right)$$

Рассмотрим теперь выражение для скалярного произведения, в котором $y = x$.

$$(x, x) = |x| \cdot |x| \cdot \cos(x, x) = |x|^2$$

Отсюда получим, что **длина вектора** x есть

$$|x| = \sqrt{(x, x)}$$

То есть, если мы знаем, чему равно скалярное произведение, то мы можем найти угол между векторами, а также длину вектора.

Данные понятия можно обобщить на случай произвольного векторного пространства. А именно, длину произвольного вектора x можно определить как квадратный корень из скалярного произведения этого вектора на самого себя:

$$|x| = \sqrt{(x, x)}$$

Угол ϕ между произвольными векторами x, y есть

$$\phi = \arccos \left(\frac{(x, y)}{|x| \cdot |y|} \right)$$

Для векторов на плоскости скалярное произведение будет равно нулю, если векторы ортогональны, то есть $\phi = \frac{\pi}{2}$. Два произвольных вектора будем называть **ортогональными**, если их скалярное произведение равно нулю.

1.8 Операторы и базис

Урок на Stepik: Ортогональный базис.

1.8.1 Ортонормированный базис

Рассмотрим набор векторов $\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ таких, что

1. $(e_i, e_j) = 0 \quad \forall i, j : i \neq j.$
2. $(e_i, e_j) = 1 \quad \forall i, j : i = j.$

Такой набор векторов называется ортонормированным набором векторов в линейном пространстве со скалярным произведением.

Уроки на Stepik:

- Как произвольный базис преобразовать в ортонормированный
- Метод наименьших квадратов

1.9 Линейные операторы

Оператор $A : A \cdot x = y$ называется линейным оператором, если выполнены следующие аксиомы:

1. $A \cdot (x_1 + x_2) = A \cdot x_1 + A \cdot x_2$
2. $A(\lambda x) = \lambda \cdot Ax$

1.9.1 Ядро и образ оператора

...

1.9.2 Собственные числа и собственные векторы

...

1.10 Определитель матрицы

Урок на Stepik: Определитель матрицы.
Статья в Wiki: Determinant.

1.11 Уравнение прямой. Пересечение прямых.

...

2 Математический анализ

2.1 Вещественные числа

Урок на Stepik: Вещественные числа.

Введем понятие вещественных чисел аксиоматически. Вещественные числа, это такие числа, которые удовлетворяют определенному набору аксиом.

Первый набор аксиом касается алгебраической структуры чисел. Рассмотрим две операции – операции сложения и умножения на число, которые любой паре вещественных чисел сопоставляют вещественное число: $\mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Такие операции должны удовлетворять 9-ти аксиомам:

- Ассоциативность и коммутативность по сложению и умножению.
- Существование нейтрального и обратного элемента (для сложения и умножения).
- Дистрибутивность.

Второй набор аксиом касается порядковой структуры (отношение порядка). Для любых двух вещественных чисел x и y мы должны уметь определять, является ли x меньшим, либо равным y ($x \leq y$). Такое отношение порядка должно удовлетворять следующему набору аксиом:

- Рефлексивность: $x \leq x$
- Транзитивность: $x \leq y, y \leq z \Rightarrow x \leq z$
- Антисимметричность $x \leq y, y \leq x \Rightarrow x = y$
- Любые два вещественных числа должны быть сравнимы, то есть $\forall x, y$ можно однозначно сказать, верно ли, что $x \leq y$
- Если $x \leq y$, то $x + z \leq y + z$
- Если $0 \leq x$ и $0 \leq y$, то $0 \leq xy$

Аксиома полноты: $\forall A, B \subset \mathbb{R}$ и $\forall x, y : x \in A, y \in B$ и при этом $x \leq y$, найдется $z \in R$, такое, что $x \leq z \leq y$.

2.1.1 Принцип математической индукции

...

2.1.2 Принцип Архимеда

...

2.2 Последовательности. Предел последовательности.

Последовательностью будем называть произвольное отображение из множества натуральных чисел в множество вещественных чисел: $\mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$. Примеры последовательностей:

- $x_n = n^2$
- $x_n = \frac{1}{n}$

Число a называется **пределом** последовательности $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$ если

$$\forall \epsilon > 0 \exists N : \forall n > N |x_n - a| < \epsilon.$$

2.3 Функции и непрерывность

Окрестностью точки a будем называть любой интервал U_a вида $(a - \epsilon, a + \epsilon)$. Проколотой окрестностью будем называть окрестность вида $U_a \setminus a$.

Будем говорить, что a — предельная точка множества $E \subset \mathbb{R}$ если пересечение любой проколотой окрестности точки a с этим множеством не пусто:
 $\dot{U}_a \cap E \neq \emptyset$.

2.3.1 Функции. Предел функции

Функцией $f : (\mathbb{E} \subset \mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$ будем называть некоторое правило, по которому каждому элементу множества E ставится в соответствие некоторое вещественное число.

Определение предела функции (по Коши). Число A называется пределом функции $f : \mathbb{E} \rightarrow \mathbb{R}$, если

$$\forall \epsilon > 0 \exists \delta > 0 : \forall x \in E : x \neq a, |x - a| < \delta \implies |f(x) - A| < \epsilon$$

Определение на языке пределов: A – предел функции f в точке a , если для любой последовательности $\{x_n\} \in E$, такой, что $x_n \neq a$ и $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$ выполнено $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = A$.

2.3.2 Непрерывность функции

Пусть $f : \mathbb{E} \rightarrow \mathbb{R}$ и $a \in E$, причем a – предельная точка множества E . Тогда f непрерывна в точке a если

$$\lim_{x \rightarrow a} f(x) = f(a)$$

Эквивалентное определение. Функция f непрерывна в точке a , если

$$\forall \epsilon > 0 \exists \delta > 0 : |x - a| < \delta \implies |f(x) - f(a)| < \epsilon$$

3 Теория вероятностей

Урок на Stepik: Теория вероятностей.

3.1 Вероятностная модель эксперимента

Рассмотрим эксперимент, в котором возможно конечное число исходов

$$\Omega = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$$

Каждое w_i будем называть **элементарными событиями**, Ω – **пространством элементарных событий** (пространством исходов). Рассмотрим примеры.

1. Подбрасывание монетки. Пространство элементарных исходов состоит из двух событий – орел или решка.

$$\Omega = \{Heads, Tails\}$$

2. Подбрасывание игральной кости.

$$\Omega = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

3. n -кратное подбрасывание монеты.

$$\Omega = \{w : w = (a_1, a_2, \dots, a_n), a_i = Heads \mid Tails\}$$

Событием будем называть любое подмножество множества элементарных исходов. Формально A - событие, если $A \subset \Omega$.

3.2 Вероятностное пространство

Пусть $\Omega = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ - пространство элементарных событий. Рассмотрим набор вещественных чисел p_1, \dots, p_n таких, что $p_i \geq 0$ и $\sum_{i=1}^n p_i = 1$. Назовем эти числа вероятностями элементарных событий. Тогда **вероятностью события** $A \subseteq \Omega$ будем называть сумму вероятностей элементарных событий из множества A :

$$P(A) = \sum_{i: w_i \in A} p_i$$

Свойства:

1. $P(\emptyset) = 0, P(\Omega) = 1$
2. $0 \leq P(A) \leq 1$
3. Если $A \cap B = \emptyset$, то $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$
4. $P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$
5. $P(\bar{A}) = 1 - P(A)$
6. $P(\bigcup_{k=1}^n A_k) \leq \sum_{k=1}^n P(A_k)$
7. $P(\bigcup_{k=1}^n A_k) = \sum_{k=1}^n P(A_k) + \sum_{j < k} P(A_j \cap A_k) - \dots$

3.3 Классическое определение вероятности

Пусть $\Omega = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$, при этом $p_1 = p_2 = \dots = p_n = \frac{1}{N}$. Тогда вероятностью события A будем называть отношение мощности множества A к мощности множества всех элементарных исходов:

$$P(A) = \frac{|A|}{|\Omega|}$$

3.4 Неравенства Маркова и Чебышева

...

4 Комбинаторика

...

5 Теория графов

...

5.1 Потоки и сети

Урок на Stepik: Потоки и сети.

Под **сетью** будем понимать некоторый ориентированный граф $G(V, E, s, t, c)$, где

- V - множество вершин
- E - множество ребер
- Существует вершина $s \in V$ такая, что $\text{indeg}(s) = 0$. Будем называть такую вершину **исток**ом.
- Существует вершина $t \in V$ такая, что $\text{outdeg}(t) = 0$. Будем называть такую вершину **сток**ом.
- Задана функция $c : E \rightarrow \mathbb{R}^+$, которая любому ребру $(x, y) \in E$ ставит в соответствие некоторое вещественное неотрицательное число $c(x, y)$.

Функцию $c(x, y)$ будем называть **пропускной способностью** этой цепи.

Рассмотрим функцию f , которая каждому ребру графа G ставит в соответствие вещественное неотрицательное число $f(x, y)$. Пусть для функции f выполняются следующие ограничения:

- Для всех ребер $(x, y) \in E$ верно, что $f(x, y) \leq c(x, y)$.
- Для любой вершины y отличной от s и t верно, что

$$\sum_{x:(x,y) \in E} f(x, y) = \sum_{z:(y,z) \in E} f(y, z)$$

Тогда $f(x, y)$ будем называть **потоком**, проходящим через ребро (x, y) . **Величиной потока** будем называть величину Q , определяемую так:

$$Q = \sum_{x:(s,x) \in E} f(s, x)$$

Рассмотрим разбиение множества всех вершин графа G на два множества S и T : $s \in S$ и $t \in T$. Рассмотрим множество ребер $R(S, T)$, исходящих из вершин множества S и входящих в вершины множества T . Будем называть такое множество **разрезом**. **Пропускной способностью** $C(S, T)$ данного разреза будем называть следующую величину:

$$C(S, T) = \sum_{(x, y) \in R} c(x, y)$$

Заметим, что никакой поток Q не может превосходить величины $C(S, T)$ никакого из разрезов $R(S, T)$. Рассмотрим разрез, в котором пропускная способность минимальна.

Утверждение (Теорема Форда-Фалкерсона). Величина максимального потока в сети совпадает величиной пропускной способности минимального разреза.