Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н. Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ Фундаментальные науки

КАФЕДРА Прикладная математика

Отчет по лабораторной работе №1

на тему:

"Прямые методы решения систем линейных алгебраических уравнений"

Студент ФН2-51Б (Группа) ______ (Подпись, дата) И. Е. Дыбко (И. О. Фамилия)

Студент ФН2-51Б (Группа) ______ (Подпись, дата) С. И. Тихомиров (И. О. Фамилия)

Проверил ______ (Подпись, дата) А. О. Гусев (И. О. Фамилия)

2024 г.

Оглавление

1. Описание использованных алгоритмов 2

1.1. Метод Гаусса 2

1.2. Метод вращения Гивенса 3

2. Ответы на контрольные вопросы 4

3. Ответы на дополнительные вопросы 7

1. Описание использованных алгоритмов

1.1. Метод Гаусса

Для начала представим систему в виде расширенной матрицы. СЛАУ запишем в виде матрицы коэффициентов с добавлением столбца свободных членов (расширенная матрица).

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = b_m \end{cases}$$

Соответствующая расширенная матрица будет:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} & | & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} & | & b_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} & | & b_m \end{pmatrix}$$

Далее преобразуем расширенную матрицу к треугольному виду с нулями ниже главной диагонали. Цель — получить систему вида, где каждое уравнение имеет на одну переменную меньше:

$$\begin{cases} x_1 + a'_{12}x_2 + \dots + a'_{1n}x_n = b'_1 \\ x_2 + a'_{23}x_3 + \dots + a'_{2n}x_n = b'_2 \\ \vdots \\ x_n = b'_n \end{cases}$$

После того, как система приведена к треугольному виду, начинаем с последнего уравнения и поэтапно находим значения переменных:

$$x_n = b'_n$$

Подставляем x_n в предыдущее уравнение, чтобы найти x_{n-1}, и так далее, пока не будут найдены все переменные.

1.2. Метод вращения Гивенса

Метод Гивенса используется для нахождения QR-разложения путём последовательного применения элементарных вращений (матриц Гивенса), которые зануляют элементы под диагональю. Вращения Гивенса – это вращения в плоскости, которые применяются для зануления отдельных элементов матрицы, аналогично преобразованию отражений, но вращение воздействует только на две строки матрицы за раз.

Матрица вращения Гивенса $G(i, j, \theta)$ – это ортогональная матрица, которая зануляет элемент матрицы A в позиции a_{ij} (под диагональю), изменяя только строки i и j. Выглядит она следующим образом:

$$T_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & c & \dots & s & \\ & & \vdots & \ddots & \vdots & \\ & & -s & \dots & c & \\ & & & & & \ddots \end{pmatrix},$$

где:

$$c = \frac{a_{ii}}{\sqrt{a_{ii}^2 + a_{ji}^2}}, \qquad s = \frac{a_{ji}}{\sqrt{a_{ii}^2 + a_{ji}^2}}.$$

Для каждого элемента под диагональю создаётся соответствующее вращение Гивенса. При умножении матрицы A слева на матрицу T_{ij}, происходит зануление элемента a_{ij}.

Процесс последовательно повторяется для всех элементов под диагональю, в результате чего матрица A становится верхнетреугольной — это и есть матрица R. Также, будем домножать слева на T_{ij} матрицу перехода T (в начале матрицу T положим единичной), таким образом:

$$T = T_{n-1,n} \cdot \ldots \cdot T_{24} \cdot T_{23} \cdot T_{1,n} \cdot \ldots \cdot T_{13} \cdot T_{12}.$$

Матрица Q в свою очередь может быть найдена следующим образом: $Q = T^{-1} = T^T$.

Таким образом исходная система преобразуется к следующему виду $Rx = b^*$, где $b^* = Tb$, для решения которой достаточно применить обратный ход Гаусса.

2. Ответы на контрольные вопросы

1) **Каковы условия применимости метода Гаусса без выбора и с выбором ведущего элемента?**

   Без выбора ведущего элемента: Метод Гаусса может быть применен, если на всех шагах на главной диагонали не возникает нулевых элементов:

$$a_{ii}^{(i-1)} \neq 0, \quad i = 1, 2, \ldots, n.$$

   С выбором ведущего элемента: Метод с выбором ведущего элемента применим всегда, когда матрица невырожденная ($\det A \neq 0$).

2) **Докажите, что если $\det A \neq 0$, то при выборе главного элемента в столбце среди элементов, лежащих не выше главной диагонали, всегда найдется хотя бы один элемент, отличный от нуля.**

   Для любой невырожденной матрицы обязательно существует хотя бы один ненулевой элемент в каждом столбце среди элементов, которые находятся на главной диагонали или ниже ее. В противном случае хотя бы один столбец состоял бы из нулей, что привело бы к нулевому определителю, что противоречит условию ($\det A \neq 0$).

3) **В методе Гаусса с полным выбором ведущего элемента приходится не только переставлять уравнения, но и менять нумерацию неизвестных. Предложите алгоритм, позволяющий восстановить первоначальный порядок неизвестных.**

   Создадим дополнительный одномерный массив `order_arr`. Заполним его числами $0, 1, 2, \cdots, n-1$ по порядку. При перестановке переменных в дополнительном массиве будем менять элементы с соответствующими индексами. При выполнении элементарных преобразований, для того чтобы обратиться к элементу в i-той строке и j-том столбце, нужно обратиться к элементу `A[i][order_arr[j]]`.

4) **Оцените количество арифметических операций, требуемых для QR-разложения произвольной матрицы A размера $n \times n$.**

   (a) **Метод Грамма— Шмидта**

   Проекция вектора на другой вектор требует $2n$ операций. Для каждого из n столбцов вычисляется $n - 1$ проекций. Таким образом необходимо всего:

$$\sum = 2n(n-1)n = 2n^3 - 2n^2 \sim 2n^3.$$

(b) **Метод отражений Хаусхолдера**

Отражение Хаусхолдера для каждого столбца требует $2n^2$ операций, так как оно применяется ко всем элементам матрицы ниже диагонали. Для матрицы размером $n \times n$ таких отражений будет $n-1$. Таким образом необходимо всего:

$$\sum = 2n^2(n-1) = 2n^3 - 2n^2 \sim 2n^3.$$

(c) **Метод вращений Гивенса**

Метод вращений Гивенса использует последовательные вращения для зануления элементов матрицы. Вращение затрагивает только два элемента одновременно, что делает метод особенно эффективным для разреженных матриц ($\sum = n^2$). Для плотных матриц, как правило, требуется также $\sum = n^3$ операций, так как необходимо применять множество вращений ко всем элементам матрицы.

5) **Что такое число обусловленности и что оно характеризует? Имеется ли связь между обусловленностью и величиной определителя матрицы? Как влияет выбор нормы матрицы на оценку числа обусловленности?**

Числом обусловленности $M_A = \|A^{-1}\|\|A\|$ называется числом обусловленности матрицы A (и A^{-1} в силу симметрии формулы). Оно характеризует, насколько сильно ошибка в данных может повлиять на решение задачи.

Если матрица плохо обусловлена (большое число обусловленности), то матрица близка к вырожденной, что связано с малым значением определителя. Матрица с маленьким числом обусловленности близка к ортогональной или хорошо обусловленной. Норма матрицы влияет на оценку числа обусловленности: в зависимости от выбранной нормы $\|\cdot\|$ значение M_A может различаться.

6) **Как упрощается оценка числа обусловленности, если матрица является:**

(a) **диагональной;**
(b) **симметричной;**
(c) **ортогональной;**
(d) **положительно определенной;**
(e) **треугольной?**

(a) **Диагональная матрица:** $M_A = \frac{\max(|a_{ii}|)}{\min(|a_{ii}|)}$

(b) **Симметричная матрица:** оценка зависит только от собственных значений. Если матрица симметрична и положительно определена, то M_A можно оценить через отношение наибольшего и наименьшего собственных значений.

(c) **Ортогональная матрица:**$M_A = 1$, так как $A_{-1} = A_T$ и $\|A\| = \|A_{-1}\| = 1$

(d) **Положительно определенная:** оценка зависит от собственных значений; чем больше разброс, тем выше число обусловленности.

(e) **Треугольная матрицая:** число обусловленности зависит от отношения наибольшего и наименьшего диагональных элементов.

7) **Применимо ли понятие числа обусловленности к вырожденным матрицам?**

Для вырожденных матриц ($\det A = 0$) число обусловленности формально не определено, так как A^{-1} не существует. Однако, если матрица почти вырожденная, можно использовать псевдообратную матрицу A^+ для оценки обусловленности.

8) **В каких случаях целесообразно использовать метод Гаусса, а в каких — методы, основанные на факторизации матрицы?**

Метод Гаусса эффективен для решения систем линейных уравнений с квадратными матрицами, если матрица не слишком плохо обусловлена.

Методы факторизации предпочтительны, когда требуется решить несколько систем с одной и той же матрицей, но разными векторами правых частей. Они также более устойчивы при вычислениях с плавающей запятой и в случае плохо обусловленных матриц.

9) **Как можно объединить в одну процедуру прямой и обратный ход метода Гаусса? В чем достоинства и недостатки такого подхода?**

Можно объединить прямой и обратный ход метода Гаусса, используя модифицированную схему, где вычисления производятся непосредственно в ходе исключения. Это уменьшает количество операций ввода-вывода, но усложняет алгоритм и снижает его численную устойчивость.

10) **Объясните, почему, говоря о векторах, норму $\|\cdot\|_1$ часто называют октаэдрической, норму $\|\cdot\|_2$ — шаровой, а норму $\|\cdot\|_\infty$ — кубической.**

Норма $\|\cdot\|_1$ называется октаэдрической, потому что геометрическое место всех точек вектора с такой нормой образует октаэдр.

Норма $\|\cdot\|_2$ называется шаровой, потому что множество всех векторов с такой нормой образует сферу в евклидовом пространстве.

Норма $\| \cdot \|_\infty$ называется кубической, потому что множество точек с такой нормой образует гиперкуб (или куб в трёхмерном пространстве).

3. Ответы на дополнительные вопросы

1) **Вопрос №1 (Определение минора)**

   Минором порядка k матрицы A типа $m \times n$ называют определитель, который составлен из элементов этой матрицы, стоящих на пересечении произвольно выбранных k строк и k столбцов с сохранением порядка этих строк и столбцов.

2) **Вопрос №3 (Пример)**

   Возьмем матрицу

$$A = \begin{pmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & a_{03} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{30} & a_{31} & a_{32} & a_{34} \end{pmatrix}$$

   и массив

$$\texttt{order\_arr} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 \end{pmatrix},$$

   при смене смене нумерации неизвестных x_0 и x_1 матрица A будет иметь следующий вид

$$\begin{pmatrix} a_{01} & a_{00} & a_{02} & a_{03} \\ a_{11} & a_{10} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{20} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{30} & a_{32} & a_{34} \end{pmatrix}$$

   и массив $\texttt{order\_arr} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 & 3 \end{pmatrix}$.

   Чтобы найти элемент a_{21} надо братиться к элементу `A[2][order_arr[1]]`.

3) **Вопрос №5 (Число обусловленности = 200. Матрица хорошо обусловлена или нет?)**

   В зависимости от относительной погрешности задания коэффициентов правой части системы.

   Пример

   $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0,01 \end{pmatrix}$

   Число обусловленности $M_A = 200,005$. При этом относительная погрешность задания коэффициентов правой части системы в 1% привела к относительной погрешности ее решения в 100%.

4) **Вопрос №7 (На примере системы из 2-х уравнений дать геометрическую интерпритацию плохо обусловленной системы, вырожденной системы)**

Рассмотрим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} 0.00001x + 0.00034y = 0.00456, \\ 0.0005x + 3.123y = 1.234. \end{cases} \tag{1}$$

Число обусловлености у этой системы $M_A = 314094$.

Эти две прямые практически параллельны, но пересекаются в одной точке. Поскольку углы между ними очень малы ($1.68468°$ и $0.0091732°$ соответственно), малейшее изменение в коэффициентах системы может сильно изменить положение решения.

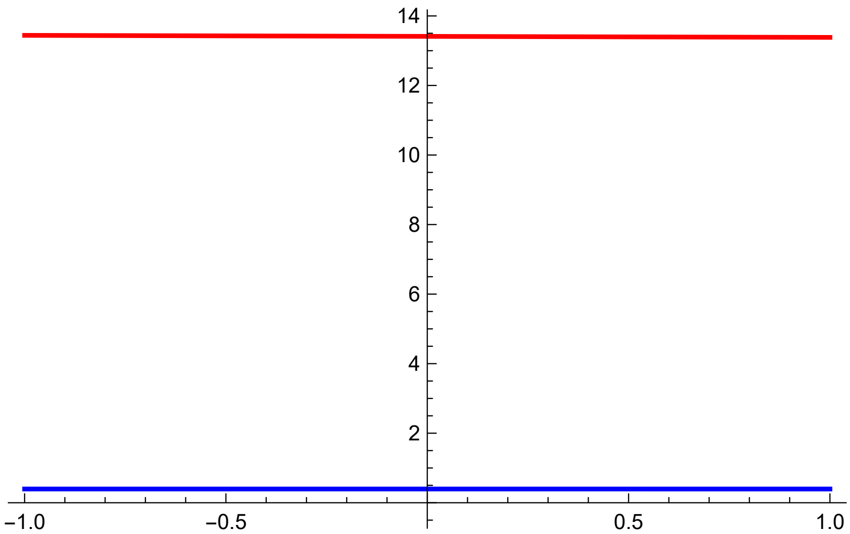

Рис. 1. График функций СЛАУ (1)

5) **Вопрос №8 (Подсчитать число операций в модифицированном матоде Гаусса)**

Поскольку модифицированная схема не уменьшает количество операций на этапе прямого хода, общая сложность остаётся $O(n^3)$. Основное преимущество – это оптимизация по числу операций ввода-вывода и экономия времени за счёт совмещения процессов. Но с точки зрения арифметической сложности, модифицированная схема метода Гаусса остаётся такой же, как и классический метод – $O(n^3)$.

6) **Вопрос №10 (Какие нормы называются эквивалентными? Картинки норм)**

Две нормы p и q, заданные на пространстве V называются **эквивалентными**, если $\forall x \in V, \exists \alpha, \beta \in \mathbb{R} : \alpha p(x) \leqslant q(x) \leqslant \beta p(x)$.

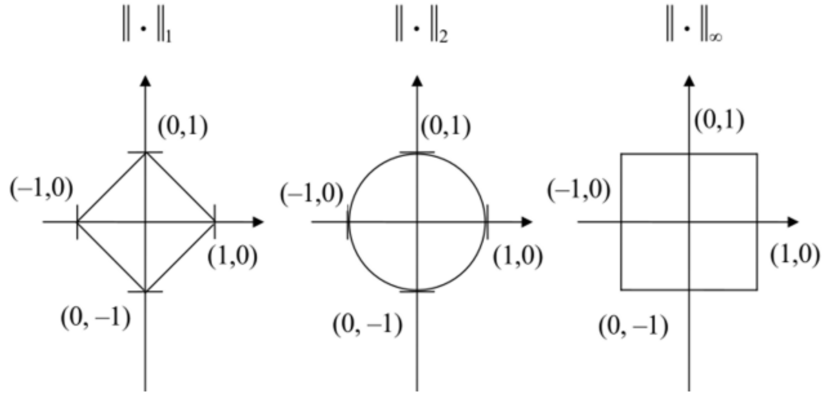

Рис. 2. Нормы