

Студент: Вячеслав Головин  
 Направление: Машинное обучение и анализ данных  
 Филиал: НИУ ВШЭ – Санкт-Петербург  
 Дата: 6 июня 2022 г.

## Контрольная работа №2 (вариант 11)

**Задача 1** Найти наилучшее приближение  $A_1$  ранга 2 матрицы  $A$  по норме  $\|\cdot\|_2$  и вычислить  $\|A - A_1\|_2$ , где

$$A = \begin{pmatrix} -8 & -42 & 9 & 40 \\ 10 & 48 & -54 & -2 \\ -67 & -12 & 36 & -22 \end{pmatrix}.$$

Сначала выполним сингулярное разложение  $A = U\Sigma V^T$ . Матрица  $V$  состоит из собственных векторов  $A^T A$ .

$$A^T A = \begin{pmatrix} 4653 & 1620 & -3024 & 1134 \\ 1620 & 4212 & -3402 & -1512 \\ -3024 & -3402 & 4293 & -324 \\ 1134 & -1512 & -324 & 2088 \end{pmatrix} \quad V = \frac{1}{11} \begin{pmatrix} -6 & -6 & 7 & 0 \\ -6 & 6 & 0 & 7 \\ 7 & 0 & 6 & 6 \\ 0 & -7 & -6 & 6 \end{pmatrix} \quad \lambda = (9801, 4356, 1089, 0)$$

Корни из собственных значений  $\lambda$  будут лежать на главной диагонали матрицы  $\Sigma$

$$\Sigma = \begin{pmatrix} 99 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 66 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 33 & 0 \end{pmatrix}$$

Далее, воспользовавшись соотношением  $AV = U\Sigma$ , рассчитаем  $U$

$$U = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & -2 & -2 \\ -2 & 1 & -2 \\ 2 & 2 & -1 \end{pmatrix}$$

Теперь, воспользовавшись теоремой Эккарта–Янга, найдём  $A_1$

$$A_1 = U\Sigma_r V^T = U \begin{pmatrix} 99 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 66 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} V^T = \begin{pmatrix} 6 & -42 & 21 & 28 \\ 24 & 48 & -42 & -14 \\ -60 & -12 & 42 & -28 \end{pmatrix}$$

Погрешность приближения

$$\|A - A_1\|_2 = \|\Sigma - \Sigma_r\|_2 = 33$$

**Задача 2** Оценить относительную погрешность приближенного решения  $(1, 1)$  системы  $Ax = b$  по нормам  $\|\cdot\|_1$  и  $\|\cdot\|_2$  с помощью числа обусловленности матрицы  $A$ , где

$$A = \begin{pmatrix} 4.99 & 0.02 \\ -4.83 & -8.01 \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} 5.0 \\ -12.98 \end{pmatrix}$$

Очевидно, что решение  $\hat{x} = (1, 1)$  получается при округлении  $A$  и  $b$  до целочисленных значений. Таким образом

$$\hat{A} = \begin{pmatrix} 5 & 0 \\ -5 & -8 \end{pmatrix} \quad \varepsilon_A = \hat{A} - A = \begin{pmatrix} 0.01 & -0.02 \\ -0.17 & 0.01 \end{pmatrix} \quad \hat{b} = \begin{pmatrix} 5 \\ -13 \end{pmatrix} \quad \Delta b = \hat{b} - b = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.02 \end{pmatrix}$$

Погрешность решения относительно некоторой нормы  $\|\cdot\|$  определяется выражением

$$\delta x \leq \frac{\kappa(A)}{1 - \kappa(A)\delta A}(\delta A + \delta b),$$

где  $\kappa(A) = \|A\| \|A^{-1}\|$  – число обусловленности матрицы  $A$ ;  $\delta A = \|\varepsilon_A\|/\|A\|$ ,  $\delta b = \|\Delta b\|/\|b\|$ . Обратная матрица

$$A^{-1} = \frac{1}{|A|} \begin{pmatrix} -8.01 & -0.02 \\ 4.83 & 4.99 \end{pmatrix} = \frac{1}{39.87} \begin{pmatrix} 8.01 & 0.02 \\ -4.83 & -4.99 \end{pmatrix}$$

Погрешность по норме  $\|\cdot\|_1$ :

$$\delta x \leq \frac{9.82 \cdot 0.32}{1 - 9.82 \cdot 0.32 \cdot (0.18/9.82)} \left( \frac{0.18}{9.82} + \frac{0.02}{17.98} \right) = \frac{3.16}{1 - 3.16 \cdot 0.018} (3.16 + 0.001) = 0.065$$

Погрешность по норме  $\|\cdot\|_2$  (наибольшее сингулярное число):

$$\delta x \leq \frac{9.79 \cdot 0.25}{1 - 9.79 \cdot 0.25 \cdot (0.17/9.78)} \left( \frac{0.17}{9.78} + \frac{0.02}{13.91} \right) = 0.047$$

**Задача 3** Найти приближенно обратную матрицу к матрице  $A$  и оценить погрешность приближения относительно равномерной нормы  $\|\cdot\|_1$  если элементы матрицы  $A$  известны с абсолютной погрешностью 0.01.

$$A \approx \begin{pmatrix} 2 & -3 \\ 8 & -7 \end{pmatrix}$$

Если погрешность элементов матрицы  $A$  равна 0.01, то  $\|\varepsilon_A\|_1 = 0.02$ . Приближенное значение обратной матрицы, число обусловленности и относительное возмущение:

$$A^{-1} = \frac{1}{10} \begin{pmatrix} -7 & 3 \\ -8 & 2 \end{pmatrix} \quad \kappa(A) = \|A\|_1 \|A^{-1}\|_1 = 10 \cdot \frac{15}{10} = 15 \quad \delta A = \frac{\|\varepsilon_A\|_1}{\|A\|_1} = 0.002$$

Погрешность приближения

$$\delta A^{-1} = \frac{\kappa(A)\delta A}{1 - \kappa(A)\delta A} = \frac{15 \cdot 0.002}{1 - 15 \cdot 0.002} = \frac{0.03}{0.97} = 0.031$$

**Задача 4** Найти самую влиятельную вершину в ориентированном графе с помощью алгоритма PageRank с коэффициентом ослабления  $1 - \beta = 0.85$ , где матрица смежности графа равна

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

Сначала составим матрицу  $P$ , которая отличается от матрицы смежности тем, что сумма всех элементов, принадлежащих одному столбцу, равна 1.

$$P = \begin{pmatrix} 0.5 & 0 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.33 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.33 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0.2 & 0.33 & 1 \end{pmatrix}$$

Далее составим матрицу  $P'$ , которая является взвешенной суммой матриц  $P$  и  $Q$  ( $\forall i, j : q_{ij} = 1/n = 0.2$ )

$$P' = (1 - \beta)P + \beta Q = \begin{pmatrix} 0.455 & 0.03 & 0.2 & 0.03 & 0.03 \\ 0.03 & 0.88 & 0.2 & 0.03 & 0.03 \\ 0.03 & 0.03 & 0.2 & 0.313 & 0.03 \\ 0.03 & 0.03 & 0.2 & 0.313 & 0.03 \\ 0.455 & 0.03 & 0.2 & 0.313 & 0.88 \end{pmatrix}$$

Возьмем начальное решение  $x = (0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2)^T$  и применим алгоритм PageRank, т.е. будем итерационно выполнять обновления  $x \leftarrow P'x$ . Результаты приведены в таблице:

№ итерации $k$	$x_k$				
0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
1	0.149	0.234	0.121	0.121	0.121
2	0.114	0.249	0.085	0.085	0.467
3	0.093	0.256	0.068	0.068	0.514
4	0.081	0.260	0.061	0.061	0.537
5	0.075	0.261	0.058	0.058	0.549
10	0.069	0.262	0.055	0.055	0.559
100	0.069	0.262	0.054	0.054	0.560

Видим, что самой влиятельной является 5 вершина.

**Задача 5** Найти значение  $f(A)$  функции  $f(l) = e^{l+2}$ , где

$$A = \begin{pmatrix} -24 & 7 & -6 \\ -84 & 24 & -20 \\ 36 & -10 & 10 \end{pmatrix}$$

...

**Задача 6** Найти собственные значения методом вращений (метод Якоби) для матрицы

$$A = \begin{pmatrix} 4 & 1 & 1 \\ 1 & 8 & 3 \\ 1 & 3 & 8 \end{pmatrix}$$

Первая итерация метода Якоби:

$$T_{ij} = T_{23} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \\ 0 & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix}, \quad A_1 = T_{23}^T A T_{23} = \begin{pmatrix} 4 & \sqrt{2} & 0 \\ \sqrt{2} & 11 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \end{pmatrix} \quad T_1 = E T_{23} = T_{23}$$

Вторая итерация:

$$T_{ij} = T_{12} = \begin{pmatrix} 0.982 & 0.191 & 0 \\ -0.191 & 0.982 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad A_2 = T_{12}^T A_1 T_{12} = \begin{pmatrix} 3.725 & 0 & 0 \\ 0 & 11.275 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \end{pmatrix} = \Lambda,$$

$$T_2 = T_1 T_{12} = \begin{pmatrix} 0.982 & 0.191 & 0 \\ -0.135 & 0.694 & -0.707 \\ -0.135 & 0.694 & 0.707 \end{pmatrix} = T$$

Диагональные элементы  $\Lambda$  – собственные числа, а соответствующие им столбцы  $T$  – собственные векторы матрицы  $A$ .

**Задача 7** Решить задачу линейного программирования и найти “теневые цены”, отвечающие каждому ограничению.

$$16x_1 + 108x_2 + 24x_3 \rightarrow \min$$

$$\begin{cases} -10x_1 + 6x_2 + 8x_3 \geq 4 \\ 4x_1 + 6x_2 - 7x_3 \geq 2 \\ x_1 \geq 0; x_2 \geq 0; x_3 \geq 0 \end{cases}$$

...

**Задача 8** Решить систему линейных уравнений методом итераций, преобразовав, если нужно, систему.

$$\begin{cases} 22x + 5y + 4z = 2 \\ 2x + 26y + 2z = 9 \\ 1x + 4y + 23z = 1 \end{cases}$$

Определить номер итерации, после которой погрешность приближения по каждой координате не превосходит 0.01 и найти соответствующее приближенное решение. За нулевое приближение принять вектор  $x_0 = [0, 0, 0]^T$ .

Преобразуем нашу систему к виду  $X = PX + b$  (здесь и далее  $X = (x, y, z)^T$ ). Для этого выразим  $x$ ,  $y$  и  $z$  из 1, 2 и 3 уравнения, соответственно.

$$\begin{cases} x = -\frac{5}{22}y - \frac{2}{11}z + \frac{1}{11} \\ y = -\frac{1}{13}x - \frac{1}{13}z + \frac{9}{26} \\ z = -\frac{1}{23}x - \frac{4}{23}y + \frac{1}{23} \end{cases} \quad P = \begin{pmatrix} 0 & -5/22 & -2/11 \\ -1/13 & 0 & -1/13 \\ -1/23 & -4/23 & 0 \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} 1/11 \\ 9/26 \\ 1/23 \end{pmatrix}$$

Нетрудно заметить, что  $\|P\|_1 < 1$ , соответственно итерационный метод должен сходиться к истинному решению системы. В случае произвольной матричной нормы, согласованной с векторной, число итераций определяется выражением

$$k = \left\lceil \ln \left( \frac{1 - \|P\|}{|X_1 - X_0|} \varepsilon \right) / \ln \|P\| \right\rceil,$$

где  $\varepsilon = |X_k - \hat{X}|$ , а  $X_1 - X_0 = b$  при  $X_0 = (0, 0, 0)^T$ .

Очевидно, что если погрешность приближения по 1-норме не превосходит 0.01, то и приближение по каждой координате  $\leq 0.01$ . Тогда число итераций

$$k_1 = \left\lceil \ln \left( \frac{1 - 0.401}{0.481} 0.01 \right) / \ln 0.401 \right\rceil = \lceil 4.8 \rceil = 5$$

Но такое же утверждение справедливо и для 2-нормы, при этом число необходимых итераций

$$k_2 = \left\lceil \ln \left( \frac{1 - 0.328}{0.361} 0.01 \right) / \ln 0.328 \right\rceil = \lceil 3.6 \rceil = 4$$

оказывается меньше.

В таблице представлены полученные с помощью итерационного метода результаты. Видно, что после 4 итераций действительно достигается требуемая точность.

№ итерации $k$	$x_k$	$y_k$	$z_k$
0	0	0	0
1	0.091	0.346	0.043
2	0.004	0.336	-0.021
3	0.018	0.347	-0.015
4	0.015	0.345	-0.017
...			
100	0.015	0.346	-0.017

**Задача 9** Найти неявное выражение кривой  $f(x, y) = 0$  по данной параметризации

$$x = \frac{t}{t^2 + 2} \quad y = \frac{t^2 + 1}{t^3 - t^2 + 1}$$

...