

# Линейная алгебра

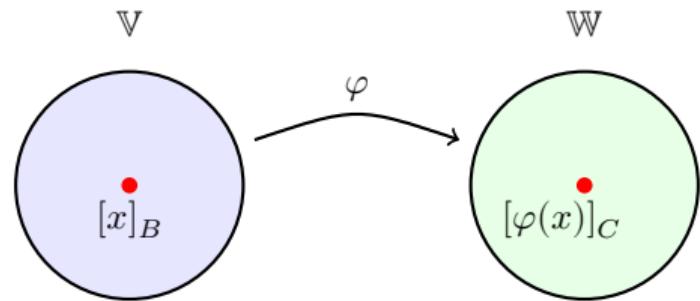
Линейные отображения и их матричное представление.

Глеб Карпов

МНад ФКН ВШЭ

# Линейные отображения

Введение и мотивация



## Линейные отображения

### Определение

Пусть  $V, W$  — векторные пространства. Отображение  $\varphi : V \rightarrow W$  называется линейным, если

1.  $\varphi(\mathbf{u} + \mathbf{v}) = \varphi(\mathbf{u}) + \varphi(\mathbf{v})$  для всех  $\mathbf{u}, \mathbf{v} \in V$
2.  $\varphi(\alpha\mathbf{v}) = \alpha\varphi(\mathbf{v})$  для всех  $\mathbf{v} \in V$  и всех скаляров  $\alpha \in \mathbb{R}$ .

Свойства 1 и 2 вместе иногда объединяют в одно:

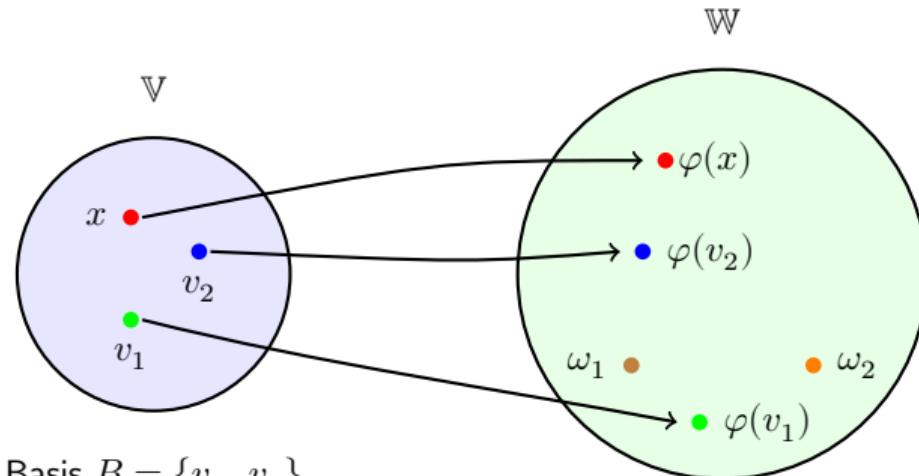
$$\varphi(\alpha\mathbf{u} + \beta\mathbf{v}) = \alpha\varphi(\mathbf{u}) + \beta\varphi(\mathbf{v}), \quad \forall \mathbf{u}, \mathbf{v} \in V, \quad \forall \alpha, \beta \in \mathbb{R}.$$

## Аналитическое представление отображения

## Матричное представление линейного отображения

Основные действующие лица

$$\varphi : \mathbb{V} \longrightarrow \mathbb{W}$$



$$\text{Basis } B = \{v_1, v_2\}$$

$$\text{Basis } C = \{\omega_1, \omega_2\}$$

## Матричное представление линейного отображения

- На этом этапе мы подключаем аппарат линейной алгебры и предполагаем, что в пространствах  $\mathbb{V}$  и  $\mathbb{W}$ . Предположим, что  $\varphi : V \rightarrow W$ , набор векторов  $B = \{v_1, v_2\}$  образует базис в  $\mathbb{V}$ , а набор векторов  $C = \{\omega_1, \omega_2\}$  образует базис в  $\mathbb{W}$ .

Мы хотим исследовать, как  $\varphi$  действует на произвольный  $x \in \mathbb{V}$ . По свойствам базиса можем представить  $x$  как:

$$x = x_1 v_1 + x_2 v_2, \quad [x]_B = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$$

И используем это разложение вместе со свойствами линейного преобразования:

$$\varphi(x) = \varphi(x_1 v_1 + x_2 v_2) = x_1 \varphi(v_1) + x_2 \varphi(v_2).$$

## Матричное представление линейного отображения

- На этом этапе мы подключаем аппарат линейной алгебры и предполагаем, что в пространствах  $\mathbb{V}$  и  $\mathbb{W}$ . Предположим, что  $\varphi : V \rightarrow W$ , набор векторов  $B = \{v_1, v_2\}$  образует базис в  $\mathbb{V}$ , а набор векторов  $C = \{\omega_1, \omega_2\}$  образует базис в  $\mathbb{W}$ .

Мы хотим исследовать, как  $\varphi$  действует на произвольный  $x \in \mathbb{V}$ . По свойствам базиса можем представить  $x$  как:

$$x = x_1 v_1 + x_2 v_2, \quad [x]_B = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$$

И используем это разложение вместе со свойствами линейного преобразования:

$$\varphi(x) = \varphi(x_1 v_1 + x_2 v_2) = x_1 \varphi(v_1) + x_2 \varphi(v_2).$$

- Вывод: чтобы узнать результат действия функции  $\varphi(x)$  достаточно только знать, как функция действует на базисные векторы пространства  $\mathbb{V}$  в нашем примере это  $\varphi(v_1), \varphi(v_2)$ . Помните, что  $\varphi(v_1), \varphi(v_2)$  — это тоже векторы, т.е. абстрактные элементы, жители векторного пространства  $\mathbb{W}$ .

## Матричное представление линейного отображения

Давайте посмотрим на элементы  $\varphi(v_1)$ ,  $\varphi(v_2)$  в базисе  $C$ :

$$\begin{aligned}\varphi(v_1) &= a_{11}\omega_1 + a_{21}\omega_2, \\ \varphi(v_2) &= a_{12}\omega_1 + a_{22}\omega_2\end{aligned}$$

Теперь вернемся к  $\varphi(x) = x_1\varphi(v_1) + x_2\varphi(v_2)$ .

$$\begin{aligned}\varphi(x) &= x_1(a_{11}\omega_1 + a_{21}\omega_2) + x_2(a_{12}\omega_1 + a_{22}\omega_2) = \\ &= (a_{11}x_1 + a_{12}x_2)\omega_1 + (a_{21}x_1 + a_{22}x_2)\omega_2 = \\ &= \gamma_1\omega_1 + \gamma_2\omega_2\end{aligned}$$

- Мы получили разложение элемента  $\varphi(x)$  по базису пространства  $\mathbb{W}$ . Можем записать координаты как:

$$[\varphi(x)]_C = \begin{pmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 \end{pmatrix}$$

## Умножение матрицы на вектор... снова...

Наконец:

$$[\varphi(x)]_C = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = A_\varphi [x]_B.$$

Wow!

### 💡 Матрица линейного преобразования

Для любого линейного преобразования существует его матрица, которая через mat-vec связывает координаты аргумента функции с координатами значения функции в выбранных заранее базисах.

Если у нас есть два базиса  $B = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  и  $C = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m\}$ , то матрица линейного преобразования  $L_{\varphi, (B,C)}$  строится как:

$$L_{\varphi, (B,C)} = \begin{pmatrix} | & | & \cdots & | \\ [\varphi(v_1)]_C & [\varphi(v_2)]_C & \cdots & [\varphi(v_n)]_C \\ | & | & \cdots & | \end{pmatrix},$$

где  $[\varphi(v_i)]_C$  — это координаты образа базисного вектора  $v_i$  в базисе  $C$ .

## Матричное представление линейного отображения

### Общий многомерный случай

Предположим, что существует линейное преобразование  $\varphi : \mathbb{V} \rightarrow \mathbb{W}$ , набор векторов  $B = \{v_1, \dots, v_n\}$  образует базис в  $\mathbb{V}$ , а набор векторов  $C = \{\omega_1, \dots, \omega_m\}$  образует базис в  $\mathbb{W}$ .

Мы хотим исследовать, как  $\varphi$  действует на произвольный  $x \in \mathbb{V}$ .

$$x = x_1 v_1 + \dots + x_n v_n,$$

$$\varphi(x) = \varphi(x_1 v_1 + \dots + x_n v_n) = x_1 \varphi(v_1) + \dots + x_n \varphi(v_n).$$

Помните, что  $\varphi(v_1), \dots, \varphi(v_n)$  — это векторы, т.е. абстрактные элементы векторного пространства  $\mathbb{W}$ .

## Матричное представление линейного отображения

Общий многомерный случай

Давайте посмотрим на  $\varphi(v_1), \dots, \varphi(v_n)$  в базисе  $C$ :

$$\varphi(v_1) = a_{11}\omega_1 + a_{21}\omega_2 + \dots + a_{m1}\omega_m,$$

$$\varphi(v_2) = a_{12}\omega_1 + a_{22}\omega_2 + \dots + a_{m2}\omega_m,$$

⋮

$$\varphi(v_n) = a_{1n}\omega_1 + a_{2n}\omega_2 + \dots + a_{mn}\omega_m$$

Теперь вернемся к  $\varphi(x) = x_1\varphi(v_1) + \dots + x_n\varphi(v_n)$ .

$$\varphi(x) = x_1(a_{11}\omega_1 + \dots + a_{m1}\omega_m) + x_2(a_{12}\omega_1 + \dots + a_{m2}\omega_m)$$

$$+ x_n(a_{1n}\omega_1 + \dots + a_{mn}\omega_m)$$

## Матричное представление линейного отображения

Общий многомерный случай

$$\begin{aligned}\varphi(x) &= x_1 (a_{11}\omega_1 + \dots + a_{m1}\omega_m) + x_2 (a_{12}\omega_1 + \dots + a_{m2}\omega_m) \\&\quad + x_n (a_{1n}\omega_1 + \dots + a_{mn}\omega_m) \\&= (a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n)\omega_1 + (a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n)\omega_2 \\&\quad + (a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n)\omega_m\end{aligned}$$

## Умножение матрицы на вектор... снова...

Наконец:

$$[\varphi(x)]_C = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = A_\varphi [x]_B.$$

Wow!

Для построения матрицы  $A_\varphi$  линейного отображения  $\varphi$  нам нужно знать только координаты образов базисных векторов:  $\varphi(v_1), \dots, \varphi(v_n)$ , т.е.

$$v_1 \xrightarrow{\varphi} a_1 = \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ \vdots \\ a_{m1} \end{pmatrix}, v_2 \xrightarrow{\varphi} a_2 = \begin{pmatrix} a_{12} \\ a_{22} \\ \vdots \\ a_{m2} \end{pmatrix}, \dots, v_n \xrightarrow{\varphi} a_n = \begin{pmatrix} a_{1n} \\ a_{2n} \\ \vdots \\ a_{mn} \end{pmatrix}$$