

# Методы оптимизации.

## Семинар 6. Выпуклые функции.

Александр Катруца

Московский физико-технический институт,  
Факультет Управления и Прикладной Математики

9 октября 2019 г.

- Производная по скаляру
- Производная по вектору
- Производная по матрице
- Производная сложной функции

# Определения функций

## Выпуклая функция

Функция  $f : X \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  называется выпуклой (**строго выпуклой**), если  **$X$  — выпуклое множество** и для

$\forall \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 \in X$  и  $\alpha \in [0, 1]$  ( $\alpha \in (0, 1)$ ) выполнено:

$$f(\alpha \mathbf{x}_1 + (1 - \alpha) \mathbf{x}_2) \leq (<) \alpha f(\mathbf{x}_1) + (1 - \alpha) f(\mathbf{x}_2)$$

## Вогнутая функция

Функция  $f$  вогнутая (строго вогнутая), если  $-f$  выпуклая (строго выпуклая).

## Сильно выпуклая функция

Функция  $f : X \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  называется сильно выпуклой с константой  $m > 0$ , если  $X$  — выпуклое множество и для  $\forall \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 \in X$  и  $\alpha \in [0, 1]$  выполнено:

$$f(\alpha \mathbf{x}_1 + (1 - \alpha) \mathbf{x}_2) \leq \alpha f(\mathbf{x}_1) + (1 - \alpha) f(\mathbf{x}_2) - \frac{m}{2} \alpha (1 - \alpha) \|\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2\|_2^2$$

# Определения множеств

## Надграфик (эпиграф)

Надграфиком функции  $f$  называется множество  $\text{epi} f = \{(\mathbf{x}, y) : \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n, y \in \mathbb{R}, y \geq f(\mathbf{x})\} \subset \mathbb{R}^{n+1}$

## Множество подуровней (множество Лебега)

Множество подуровня функции  $f$  называется следующее множество  $C_\gamma = \{\mathbf{x} | f(\mathbf{x}) \leq \gamma\}.$

## Квазивыпуклая функция

Функция  $f$  называется квазивыпуклой, если её область определения и множество подуровней для любых  $\gamma$  выпуклые множества.

# Критерии выпуклости

## Дифференциальный критерий первого порядка

Функция  $f$  выпукла  $\Leftrightarrow$  она определена на выпуклом множестве  $X$  и  $\forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in X \subset \mathbb{R}^n$  выполнено:

$$f(\mathbf{y}) \geq f(\mathbf{x}) + (\nabla f(\mathbf{x}))^T (\mathbf{y} - \mathbf{x})$$

## Дифференциальный критерий второго порядка

Непрерывная и дважды дифференцируемая функция  $f$  выпукла  $\Leftrightarrow$  она определена на выпуклом множестве  $X$  и  $\forall \mathbf{x} \in \mathbf{relint}(X) \subset \mathbb{R}^n$  выполнено:

$$\nabla^2 f(\mathbf{x}) \succeq 0.$$

## Связь с надграфиком

Функция выпукла  $\Leftrightarrow$  её надграфик выпуклое множество.

## Ограничение на прямую

Функция  $f : X \rightarrow \mathbb{R}$  выпукла тогда и только тогда, когда  $X$  выпуклое множество и выпукла функция  $g(t) = f(\mathbf{x} + t\mathbf{v})$  на множестве  $\{t | \mathbf{x} + t\mathbf{v} \in X\}$  для всех  $\mathbf{x} \in X$  и  $\mathbf{v} \in X$ .

# Критерии сильной выпуклости

## Дифференциальный критерий первого порядка

Функция  $f$  сильно выпукла с константой  $m \Leftrightarrow$  она определена на выпуклом множестве  $X$  и  $\forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in X \subset \mathbb{R}^n$  выполнена:

$$f(\mathbf{y}) \geq f(\mathbf{x}) + (\nabla f(\mathbf{x}))^\top (\mathbf{y} - \mathbf{x}) + \frac{m}{2} \|\mathbf{y} - \mathbf{x}\|^2$$

## Дифференциальный критерий второго порядка

Непрерывная и дважды дифференцируемая функция  $f$  сильно выпукла с константой  $m \Leftrightarrow$  она определена на выпуклом множестве  $X$  и  $\forall \mathbf{x} \in \text{relint}(X) \subset \mathbb{R}^n$  выполнено:

$$\nabla^2 f(\mathbf{x}) \succeq mI.$$

# Примеры

1. Квадратичная функция:  $f(x) = \frac{1}{2}x^T Px + q^T x + r$ ,  
 $x \in \mathbb{R}^n$ ,  $P \in S^n$

# Примеры

1. Квадратичная функция:  $f(x) = \frac{1}{2}x^T P x + q^T x + r$ ,  
 $x \in \mathbb{R}^n$ ,  $P \in S^n$
2. Нормы в  $\mathbb{R}^n$



# Примеры

1. Квадратичная функция:  $f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}\mathbf{x}^T\mathbf{P}\mathbf{x} + \mathbf{q}^T\mathbf{x} + r$ ,  
 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ ,  $\mathbf{P} \in \mathbf{S}^n$
2. Нормы в  $\mathbb{R}^n$
3.  $f(\mathbf{x}) = \log(e^{x_1} + \dots + e^{x_n})$ ,  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$  — гладкое приближение максимума

# Примеры

1. Квадратичная функция:  $f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}\mathbf{x}^T\mathbf{P}\mathbf{x} + \mathbf{q}^T\mathbf{x} + r$ ,  
 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ ,  $\mathbf{P} \in \mathbf{S}^n$
2. Нормы в  $\mathbb{R}^n$
3.  $f(\mathbf{x}) = \log(e^{x_1} + \dots + e^{x_n})$ ,  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$  — гладкое приближение максимума
4. Логарифм детерминанта:  $f(\mathbf{X}) = -\log \det \mathbf{X}$ ,  $\mathbf{X} \in \mathbf{S}_{++}^n$

# Примеры

1. Квадратичная функция:  $f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}\mathbf{x}^T\mathbf{P}\mathbf{x} + \mathbf{q}^T\mathbf{x} + r$ ,  
 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ ,  $\mathbf{P} \in \mathbf{S}^n$
2. Нормы в  $\mathbb{R}^n$
3.  $f(\mathbf{x}) = \log(e^{x_1} + \dots + e^{x_n})$ ,  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$  — гладкое приближение максимума
4. Логарифм детерминанта:  $f(\mathbf{X}) = -\log \det \mathbf{X}$ ,  $\mathbf{X} \in \mathbf{S}_{++}^n$
5. Множество выпуклых функций — выпуклый конус

# Примеры

1. Квадратичная функция:  $f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}\mathbf{x}^T\mathbf{P}\mathbf{x} + \mathbf{q}^T\mathbf{x} + r$ ,  
 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ ,  $\mathbf{P} \in \mathbf{S}^n$
2. Нормы в  $\mathbb{R}^n$
3.  $f(\mathbf{x}) = \log(e^{x_1} + \dots + e^{x_n})$ ,  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$  — гладкое приближение максимума
4. Логарифм детерминанта:  $f(\mathbf{X}) = -\log \det \mathbf{X}$ ,  $\mathbf{X} \in \mathbf{S}_{++}^n$
5. Множество выпуклых функций — выпуклый конус
6. Поэлементный максимум выпуклых функций:  
 $f(\mathbf{x}) = \max\{f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x})\}$ ,  $\text{dom } f = \text{dom } f_1 \cap \text{dom } f_2$

# Примеры

1. Квадратичная функция:  $f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}\mathbf{x}^T\mathbf{P}\mathbf{x} + \mathbf{q}^T\mathbf{x} + r$ ,  
 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ ,  $\mathbf{P} \in \mathbf{S}^n$
2. Нормы в  $\mathbb{R}^n$
3.  $f(\mathbf{x}) = \log(e^{x_1} + \dots + e^{x_n})$ ,  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$  — гладкое приближение максимума
4. Логарифм детерминанта:  $f(\mathbf{X}) = -\log \det \mathbf{X}$ ,  $\mathbf{X} \in \mathbf{S}_{++}^n$
5. Множество выпуклых функций — выпуклый конус
6. Поэлементный максимум выпуклых функций:  
 $f(\mathbf{x}) = \max\{f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x})\}$ ,  $\text{dom } f = \text{dom } f_1 \cap \text{dom } f_2$
7. Расширение на бесконечное множество функций: если для  $\mathbf{y} \in \mathcal{A}$  функция  $f(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  выпуклая функция по  $\mathbf{x}$ , тогда  $\sup_{\mathbf{y} \in \mathcal{A}} f(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  выпукла по  $\mathbf{x}$

# Примеры

1. Квадратичная функция:  $f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}\mathbf{x}^T\mathbf{P}\mathbf{x} + \mathbf{q}^T\mathbf{x} + r$ ,  
 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ ,  $\mathbf{P} \in \mathbf{S}^n$
2. Нормы в  $\mathbb{R}^n$
3.  $f(\mathbf{x}) = \log(e^{x_1} + \dots + e^{x_n})$ ,  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$  — гладкое приближение максимума
4. Логарифм детерминанта:  $f(\mathbf{X}) = -\log \det \mathbf{X}$ ,  $\mathbf{X} \in \mathbf{S}_{++}^n$
5. Множество выпуклых функций — выпуклый конус
6. Поэлементный максимум выпуклых функций:  
 $f(\mathbf{x}) = \max\{f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x})\}$ ,  $\text{dom } f = \text{dom } f_1 \cap \text{dom } f_2$
7. Расширение на бесконечное множество функций: если для  $\mathbf{y} \in \mathcal{A}$  функция  $f(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  выпуклая функция по  $\mathbf{x}$ , тогда  $\sup_{\mathbf{y} \in \mathcal{A}} f(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  выпукла по  $\mathbf{x}$
8. Максимальное собственное значение:  $f(\mathbf{X}) = \lambda_{\max}(\mathbf{X})$

# Неравенство Йенсена

## Неравенство Йенсена

Для выпуклой функции  $f$  выполнено следующее неравенство:

$$f\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i \mathbf{x}_i\right) \leq \sum_{i=1}^n \alpha_i f(\mathbf{x}_i),$$

где  $\alpha_i \geq 0$  и  $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ .

или в бесконечномерном случае:  $p(x) \geq 0$  и  $\int_X p(x) = 1$

$$f\left(\int_X p(x) x dx\right) \leq \int_X f(x) p(x) dx$$

при условии, что интегралы существуют.

1. Неравенство Гёльдера
2. Неравенство о среднем арифметическом и среднем геометрическом
3.  $f(\mathbf{E}(x)) \leq \mathbf{E}(f(x))$
4. Выпуклость множества  $\{x \mid \prod_{i=1}^n x_i \geq 1\}$



- Выпуклая функция
- Надграфик и множество подуровня функции
- Критерии выпуклости функции
- Неравенство Йенсена