Методы оптимизации
Лекция 6: Введение в теорию двойственности

Александр Катруца

Московский физико-технический институт

10 марта 2021 г.

На прошлой лекции

- Общие условия оптимальности
- Сопряжённые функции
- Свойства сопряжённых функций

План на эту лекцию

- Двойственная функция её свойства
- Двойственная задача
- Коническая двойственность и связь с сопряжёнными функциями

Равносильные преобразования задач

Равносильные преобразования задач

Запись через надграфик

$$
\begin{aligned}
&\min_{\mathbf{x}} f_0(\mathbf{x}) \\
\text{s.t. } & g_i(\mathbf{x}) = 0,\ i = 1, \dots, m \\
& f_i(\mathbf{x}) \le 0,\ i = 1, \dots, p
\end{aligned}
\quad \Longrightarrow \quad
\begin{aligned}
&\min_{\mathbf{x},\, t} t \\
\text{s.t. } & g_i(\mathbf{x}) = 0,\ i = 1, \dots, m \\
& f_i(\mathbf{x}) \le 0,\ i = 1, \dots, p \\
& f_0(\mathbf{x}) \le t
\end{aligned}
$$

Равносильные преобразования задач

Запись через надграфик

$$
\begin{aligned}
&\min_{\mathbf{x}} f_0(\mathbf{x}) \\
\text{s.t. } & g_i(\mathbf{x}) = 0,\ i = 1, \dots, m \\
& f_i(\mathbf{x}) \leq 0,\ i = 1, \dots, p
\end{aligned}
\quad \Longrightarrow \quad
\begin{aligned}
&\min_{\mathbf{x},\, t} t \\
\text{s.t. } & g_i(\mathbf{x}) = 0,\ i = 1, \dots, m \\
& f_i(\mathbf{x}) \leq 0,\ i = 1, \dots, p \\
& f_0(\mathbf{x}) \leq t
\end{aligned}
$$

Преобразования ограничений

- $\mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{b} \to \mathbf{g}(\mathbf{x}) + \mathbf{y} = \mathbf{b},\ \mathbf{y} \geq 0$
- $\mathbf{x} \to \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2,\ \mathbf{x}_1 \geq 0,\ \mathbf{x}_2 \geq 0$
- Формирование блочных матриц

Равносильные преобразования задач

Запись через надграфик

$$\begin{aligned} &\min_{\mathbf{x}} f_0(\mathbf{x}) \\ \text{s.t. } & g_i(\mathbf{x}) = 0, \; i = 1, \dots, m \\ & f_i(\mathbf{x}) \le 0, \; i = 1, \dots, p \end{aligned} \quad \Longrightarrow \quad \begin{aligned} &\min_{\mathbf{x},\, t} t \\ \text{s.t. } & g_i(\mathbf{x}) = 0, \; i = 1, \dots, m \\ & f_i(\mathbf{x}) \le 0, \; i = 1, \dots, p \\ & f_0(\mathbf{x}) \le t \end{aligned}$$

Преобразования ограничений

- $\mathbf{g}(\mathbf{x}) \le \mathbf{b} \to \mathbf{g}(\mathbf{x}) + \mathbf{y} = \mathbf{b}, \; \mathbf{y} \ge 0$
- $\mathbf{x} \to \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2, \; \mathbf{x}_1 \ge 0, \; \mathbf{x}_2 \ge 0$
- Формирование блочных матриц

Перенос ограничений в целевую функцию

$$\min_{\mathbf{x} \in \mathcal{X}} f_0(\mathbf{x}) \Rightarrow \min_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n} f_0(\mathbf{x}) + \mathbb{I}_{\mathcal{X}}(\mathbf{x}), \quad \mathbb{I}_{\mathcal{X}}(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0, & \mathbf{x} \in \mathcal{X}, \\ +\infty, & \mathbf{x} \notin \mathcal{X}. \end{cases}$$

Задача оптимизации с функциональными ограничениями

$$
\begin{aligned}
&\min_{\mathbf{x} \in \mathcal{D}} f_0(\mathbf{x}) \\
\text{s.t. } & g_i(\mathbf{x}) = 0, \ i = 1, \ldots, m \\
& h_j(\mathbf{x}) \leq 0, \ j = 1, \ldots, p
\end{aligned}
$$

dom $f_0 = \mathcal{D} \subseteq \mathbb{R}^n$, $f_0(\mathbf{x}^*) = p^*$

Задача оптимизации с функциональными ограничениями

$$
\begin{align*}
&\min_{\mathbf{x} \in \mathcal{D}} f_0(\mathbf{x})\\
\text{s.t. } & g_i(\mathbf{x}) = 0, \; i = 1, \ldots, m\\
& h_j(\mathbf{x}) \leq 0, \; j = 1, \ldots, p
\end{align*}
$$

dom $f_0 = \mathcal{D} \subseteq \mathbb{R}^n$, $f_0(\mathbf{x}^*) = p^*$

Основная цель

Сформулировать условия оптимальности для таких задач

Задача оптимизации с функциональными ограничениями

$$\begin{aligned} &\min_{\mathbf{x} \in \mathcal{D}} f_0(\mathbf{x}) \\ \text{s.t. } & g_i(\mathbf{x}) = 0, \ i = 1, \ldots, m \\ & h_j(\mathbf{x}) \leq 0, \ j = 1, \ldots, p \end{aligned}$$

dom $f_0 = \mathcal{D} \subseteq \mathbb{R}^n$, $f_0(\mathbf{x}^*) = p^*$

Основная цель

Сформулировать условия оптимальности для таких задач

Лагранжиан $L : \mathcal{D} \times \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^p \to \mathbb{R}$

$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = f_0(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^{m} \lambda_i g_i(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^{p} \mu_j h_j(\mathbf{x})$$

- λ_i – множители Лагранжа для ограничений $g_i(\mathbf{x}) = 0, \ i = 1, \ldots, m$
- μ_j – множители Лагранжа для ограничений $h_j(\mathbf{x}) \leq 0, \ j = 1, \ldots, p$

Двойственная функция

Определение

Функция $g : \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^p \to \mathbb{R}$ такая что

$$g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = \inf_{\mathbf{x} \in \mathcal{D}} \left(f_0(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^{m} \lambda_i g_i(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^{p} \mu_j h_j(\mathbf{x}) \right)$$

называется *двойственной функцией*

Двойственная функция

Определение

Функция $g : \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^p \to \mathbb{R}$ такая что

$$g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = \inf_{\mathbf{x} \in \mathcal{D}} \left(f_0(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^{m} \lambda_i g_i(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^{p} \mu_j h_j(\mathbf{x}) \right)$$

называется *двойственной функцией*

Свойства

- Всегда вогнута
- Может равняться $-\infty$ для некоторых $(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$

Нижняя оценка оптимального значения функции

Утверждение

Если $\boldsymbol{\mu} \geq 0$, тогда $f_0(\mathbf{x}^*) = p^* \geq g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$

Нижняя оценка оптимального значения функции

Утверждение

Если $\boldsymbol{\mu} \geq 0$, тогда $f_0(\mathbf{x}^*) = p^* \geq g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$

Доказательство

Нижняя оценка оптимального значения функции

Утверждение

Если $\boldsymbol{\mu} \geq 0$, тогда $f_0(\mathbf{x}^*) = p^* \geq g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$

Доказательство

- Если $\hat{\mathbf{x}} \in \mathcal{D}$ и лежит в допустимом множестве, а также $\boldsymbol{\mu} \geq 0$, тогда

$$f_0(\hat{\mathbf{x}}) \geq L(\hat{\mathbf{x}}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) \geq \inf_{\mathbf{x} \in \mathcal{D}} L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$$

Нижняя оценка оптимального значения функции

Утверждение

Если $\boldsymbol{\mu} \geq 0$, тогда $f_0(\mathbf{x}^*) = p^* \geq g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$

Доказательство

- Если $\hat{\mathbf{x}} \in \mathcal{D}$ и лежит в допустимом множестве, а также $\boldsymbol{\mu} \geq 0$, тогда

$$f_0(\hat{\mathbf{x}}) \geq L(\hat{\mathbf{x}}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) \geq \inf_{\mathbf{x} \in \mathcal{D}} L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$$

- Минимизируя обе части по всем допустимым $\hat{\mathbf{x}}$, получим

$$p^* \geq g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$$

Двойственная задача

Определение

Двойственной задачей называется следующая задача

$$\begin{aligned} &\max g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) \\ \text{s.t. } &\boldsymbol{\mu} \geq 0 \end{aligned}$$

Двойственная задача

Определение

Двойственной задачей называется следующая задача

$$\max g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$$
$$\text{s.t. } \boldsymbol{\mu} \geq 0$$

- Всегда выпуклая задача

Двойственная задача

Определение

Двойственной задачей называется следующая задача

$$\max g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$$
$$\text{s.t. } \boldsymbol{\mu} \geq 0$$

- Всегда выпуклая задача
- Обозначим $d^* = g(\boldsymbol{\lambda}^*, \boldsymbol{\mu}^*)$

Двойственная задача

Определение

Двойственной задачей называется следующая задача

$$\max g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$$
$$\text{s.t. } \boldsymbol{\mu} \geq 0$$

- Всегда выпуклая задача
- Обозначим $d^* = g(\boldsymbol{\lambda}^*, \boldsymbol{\mu}^*)$
- Лучшая нижняя оценка для p^*, которую может дать двойственная функция

Двойственная задача

Определение

Двойственной задачей называется следующая задача

$$\begin{aligned} &\max g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) \\ \text{s.t. } &\boldsymbol{\mu} \geq 0 \end{aligned}$$

- Всегда выпуклая задача
- Обозначим $d^* = g(\boldsymbol{\lambda}^*, \boldsymbol{\mu}^*)$
- Лучшая нижняя оценка для p^*, которую может дать двойственная функция
- Вектора $(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$ называются допустимыми для двойственной задачи, если $\boldsymbol{\mu} \geq 0$ и $(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) \in \mathrm{dom}\ g$

Связь с сопряжённой функцией

Рассмотрим задачу

$$
\begin{aligned}
&\min f_0(\mathbf{x}) \\
\text{s.t. } &\mathbf{A}\mathbf{x} \leq \mathbf{b} \\
&\mathbf{C}\mathbf{x} = \mathbf{d}
\end{aligned}
$$

Тогда

$$
\begin{aligned}
g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) &= \inf_{\mathbf{x}} (f_0(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\mu}^\top(\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b}) + \boldsymbol{\lambda}^\top(\mathbf{C}\mathbf{x} - \mathbf{d})) = \\
&- \mathbf{b}^\top\boldsymbol{\mu} - \boldsymbol{\lambda}^\top\mathbf{d} + \inf_{\mathbf{x}} (f_0(\mathbf{x}) + (\mathbf{A}^\top\boldsymbol{\mu} + \mathbf{C}^\top\boldsymbol{\lambda})^\top\mathbf{x}) = \\
&- \mathbf{b}^\top\boldsymbol{\mu} - \boldsymbol{\lambda}^\top\mathbf{d} - f_0^*(-\mathbf{A}^\top\boldsymbol{\mu} - \mathbf{C}^\top\boldsymbol{\lambda})
\end{aligned}
$$

Области определений двойственной и сопряжённой функций связаны:

$$
\text{dom } g = \{(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) \mid -\mathbf{A}^\top\boldsymbol{\mu} - \mathbf{C}^\top\boldsymbol{\lambda} \in \text{dom } f_0^*\}
$$

Слабая и сильная двойственность

Слабая двойственность: $d^* \leq p^*$

Слабая и сильная двойственность

Слабая двойственность: $d^* \leq p^*$

- Всегда выполняется по построению двойственной задачи

Слабая и сильная двойственность

Слабая двойственность: $d^* \leq p^*$

- Всегда выполняется по построению двойственной задачи
- Нетривиальные нижние границы для (NP-)сложных задач

Слабая и сильная двойственность

Слабая двойственность: $d^* \le p^*$

- Всегда выполняется по построению двойственной задачи
- Нетривиальные нижние границы для (NP-)сложных задач

Сильная двойственность: $d^* = p^*$

Слабая и сильная двойственность

Слабая двойственность: $d^* \leq p^*$

- Всегда выполняется по построению двойственной задачи
- Нетривиальные нижние границы для (NP-)сложных задач

Сильная двойственность: $d^* = p^*$

- В общем случае НЕ выполняется

Слабая и сильная двойственность

Слабая двойственность: $d^* \leq p^*$

- Всегда выполняется по построению двойственной задачи
- Нетривиальные нижние границы для (NP-)сложных задач

Сильная двойственность: $d^* = p^*$

- В общем случае НЕ выполняется
- *Обычно* выполнена для выпуклых задач

Слабая и сильная двойственность

Слабая двойственность: $d^* \leq p^*$

- Всегда выполняется по построению двойственной задачи
- Нетривиальные нижние границы для (NP-)сложных задач

Сильная двойственность: $d^* = p^*$

- В общем случае НЕ выполняется
- *Обычно* выполнена для выпуклых задач
- Условия регулярности ограничений

Слабая и сильная двойственность

Слабая двойственность: $d^* \leq p^*$

- Всегда выполняется по построению двойственной задачи
- Нетривиальные нижние границы для (NP-)сложных задач

Сильная двойственность: $d^* = p^*$

- В общем случае НЕ выполняется
- *Обычно* выполнена для выпуклых задач
- Условия регулярности ограничений
- Может выполняться и для **невыпуклых** задач[1]

[1] Beck, Amir, and Yonina C. Eldar. "Strong duality in nonconvex quadratic optimization with two quadratic constraints." SIAM Journal on Optimization 17.3 (2006): 844-860.

Слабая и сильная двойственность

Слабая двойственность: $d^* \leq p^*$

- Всегда выполняется по построению двойственной задачи
- Нетривиальные нижние границы для (NP-)сложных задач

Сильная двойственность: $d^* = p^*$

- В общем случае НЕ выполняется
- *Обычно* выполнена для выпуклых задач
- Условия регулярности ограничений
- Может выполняться и для **невыпуклых** задач[1]
- Решение двойственной задачи даёт решение прямой задачи

[1] Beck, Amir, and Yonina C. Eldar. "Strong duality in nonconvex quadratic optimization with two quadratic constraints." SIAM Journal on Optimization 17.3 (2006): 844-860.

Условие оптимальности и зазор двойственности

Зазор двойственности: $f_0(\mathbf{x}) - g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$

Условие оптимальности и зазор двойственности

Зазор двойственности: $f_0(\mathbf{x}) - g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$

- Оценка точности решения

Условие оптимальности и зазор двойственности

Зазор двойственности: $f_0(\mathbf{x}) - g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$

- Оценка точности решения
- Доказательство корректности и сходимости алгоритма

Условие оптимальности и зазор двойственности

Зазор двойственности: $f_0(\mathbf{x}) - g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$

- Оценка точности решения
- Доказательство корректности и сходимости алгоритма

Теорема

Если $\hat{\mathbf{x}}$ лежит в допустимом множестве и найдутся допустимые $(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}})$ такие что

$$f_0(\hat{\mathbf{x}}) = g(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}),$$

то $\hat{\mathbf{x}}$ является решением задачи.

Условие оптимальности и зазор двойственности

Зазор двойственности: $f_0(\mathbf{x}) - g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$

- Оценка точности решения
- Доказательство корректности и сходимости алгоритма

Теорема

Если $\hat{\mathbf{x}}$ лежит в допустимом множестве и найдутся допустимые $(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}})$ такие что

$$f_0(\hat{\mathbf{x}}) = g(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}),$$

то $\hat{\mathbf{x}}$ является решением задачи.

Доказательство

Условие оптимальности и зазор двойственности

Зазор двойственности: $f_0(\mathbf{x}) - g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$

- Оценка точности решения
- Доказательство корректности и сходимости алгоритма

Теорема

Если $\hat{\mathbf{x}}$ лежит в допустимом множестве и найдутся допустимые $(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}})$ такие что

$$f_0(\hat{\mathbf{x}}) = g(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}),$$

то $\hat{\mathbf{x}}$ является решением задачи.

Доказательство

- По построению двойственной задачи: $p^* \geq g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$ для всех допустимых $(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$

Условие оптимальности и зазор двойственности

Зазор двойственности: $f_0(\mathbf{x}) - g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$

- Оценка точности решения
- Доказательство корректности и сходимости алгоритма

Теорема

Если $\hat{\mathbf{x}}$ лежит в допустимом множестве и найдутся допустимые $(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}})$ такие что

$$f_0(\hat{\mathbf{x}}) = g(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}),$$

то $\hat{\mathbf{x}}$ является решением задачи.

Доказательство

- По построению двойственной задачи: $p^* \geq g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$ для всех допустимых $(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$
- Тогда выполнено, что $f_0(\mathbf{x}) - p^* \leq f_0(\mathbf{x}) - g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$

Условие оптимальности и зазор двойственности

Зазор двойственности: $f_0(\mathbf{x}) - g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$

- Оценка точности решения
- Доказательство корректности и сходимости алгоритма

Теорема

Если $\hat{\mathbf{x}}$ лежит в допустимом множестве и найдутся допустимые $(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}})$ такие что

$$f_0(\hat{\mathbf{x}}) = g(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}),$$

то $\hat{\mathbf{x}}$ является решением задачи.

Доказательство

- По построению двойственной задачи: $p^* \geq g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$ для всех допустимых $(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$
- Тогда выполнено, что $f_0(\mathbf{x}) - p^* \leq f_0(\mathbf{x}) - g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$
- Если нашёлся допустимый $\hat{\mathbf{x}}$ и допустимые $(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}})$, такие что $f_0(\hat{\mathbf{x}}) = g(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}})$, то $f_0(\hat{\mathbf{x}}) - p^* \leq 0$

Условие оптимальности и зазор двойственности

Зазор двойственности: $f_0(\mathbf{x}) - g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$

- Оценка точности решения
- Доказательство корректности и сходимости алгоритма

Теорема

Если $\hat{\mathbf{x}}$ лежит в допустимом множестве и найдутся допустимые $(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}})$ такие что

$$f_0(\hat{\mathbf{x}}) = g(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}),$$

то $\hat{\mathbf{x}}$ является решением задачи.

Доказательство

- По построению двойственной задачи: $p^* \geq g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$ для всех допустимых $(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$
- Тогда выполнено, что $f_0(\mathbf{x}) - p^* \leq f_0(\mathbf{x}) - g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$
- Если нашёлся допустимый $\hat{\mathbf{x}}$ и допустимые $(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}})$, такие что $f_0(\hat{\mathbf{x}}) = g(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}})$, то $f_0(\hat{\mathbf{x}}) - p^* \leq 0$
- Так как p^* минимальное значение f_0, то $p^* = f_0(\hat{\mathbf{x}})$

Седловая точка

Определение седловой точки

Точка $\bar{\mathbf{x}}$ называется седловой точкой дифференцируемой функции f если она стационарная точка, то есть $f'(\bar{\mathbf{x}}) = 0$, но не является локальным экстремумом, то есть найдутся направления $\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2$ такие что $f(\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{d}_1) \le f(\bar{\mathbf{x}}) \le f(\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{d}_2)$

Седловая точка

Определение седловой точки

Точка $\bar{\mathbf{x}}$ называется седловой точкой дифференцируемой функции f если она стационарная точка, то есть $f'(\bar{\mathbf{x}}) = 0$, но не является локальным экстремумом, то есть найдутся направления $\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2$ такие что $f(\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{d}_1) \leq f(\bar{\mathbf{x}}) \leq f(\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{d}_2)$

Классический пример

Функция $f(x, y) = x^2 - y^2$, для которой точка $(0, 0)$ является седловой.

Седловая точка

Определение седловой точки

Точка $\bar{\mathbf{x}}$ называется седловой точкой дифференцируемой функции f если она стационарная точка, то есть $f'(\bar{\mathbf{x}}) = 0$, но не является локальным экстремумом, то есть найдутся направления $\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2$ такие что $f(\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{d}_1) \leq f(\bar{\mathbf{x}}) \leq f(\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{d}_2)$

Классический пример

Функция $f(x, y) = x^2 - y^2$, для которой точка $(0, 0)$ является седловой.

Частный случай

Если функция f зависит от двух переменных $f(\mathbf{x}, \mathbf{y})$, то точка $(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{y}})$ будет седловой, если $f(\bar{\mathbf{x}}, \mathbf{y}) \leq f(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{y}}) \leq f(\mathbf{x}, \bar{\mathbf{y}})$ для точек из области определения.

Условие оптимальности и седловая точка функции Лагранжа

$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = f_0(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^{m} \lambda_i g_i(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^{p} \mu_j h_j(\mathbf{x})$$

Условие оптимальности и седловая точка функции Лагранжа

$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = f_0(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^{m} \lambda_i g_i(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^{p} \mu_j h_j(\mathbf{x})$$

Теорема

Пусть $\hat{\mathbf{x}} \in \mathcal{D}$ и $(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}})$ допустимы. Тогда эквивалентны следующие условия

1) $\hat{\mathbf{x}}$ лежит в допустимом множестве и $f_0(\hat{\mathbf{x}}) = g(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}})$
2) для всех $\mathbf{x} \in \mathcal{D}$ и всех допустимых $(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$ выполнено

$$L(\hat{\mathbf{x}}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) \le L(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}) \le L(\mathbf{x}, \hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}),$$

   то есть точка $(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}})$ есть седловая точка функции Лагранжа
3) $\hat{\mathbf{x}}$ лежит в допустимом множестве, является точкой минимума функции $L(\mathbf{x}, \hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}})$ и выполнено $\hat{\mu}_j h_j(\hat{\mathbf{x}}) = 0$

Доказательство: $1) \to 2)$

- Для допустимого $\hat{\mathbf{x}}$ и произвольной допустимой пары $(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$ выполнено $L(\hat{\mathbf{x}}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = f_0(\hat{\mathbf{x}}) + \sum_{i=1}^{m} \lambda_i g_i(\hat{\mathbf{x}}) + \sum_{j=1}^{p} \mu_j h_j(\hat{\mathbf{x}}) =$ $f_0(\hat{\mathbf{x}}) + \sum_{j=1}^{p} \mu_j h_j(\hat{\mathbf{x}}) \leq f_0(\hat{\mathbf{x}})$ так как $\mu_j \geq 0$ и $h_j(\hat{\mathbf{x}}) \leq 0$

Доказательство: $1) \to 2)$

- Для допустимого $\hat{\mathbf{x}}$ и произвольной допустимой пары $(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$ выполнено $L(\hat{\mathbf{x}}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = f_0(\hat{\mathbf{x}}) + \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(\hat{\mathbf{x}}) + \sum_{j=1}^p \mu_j h_j(\hat{\mathbf{x}}) = f_0(\hat{\mathbf{x}}) + \sum_{j=1}^p \mu_j h_j(\hat{\mathbf{x}}) \leq f_0(\hat{\mathbf{x}})$ так как $\mu_j \geq 0$ и $h_j(\hat{\mathbf{x}}) \leq 0$
- Также $g(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}) = \inf\limits_{\mathbf{u} \in \mathcal{D}} L(\mathbf{u}, \hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}) \leq L(\mathbf{x}, \hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}})$ для любого $\mathbf{x} \in \mathcal{D}$

Доказательство: $1) \to 2)$

- Для допустимого $\hat{\mathbf{x}}$ и произвольной допустимой пары $(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$ выполнено $L(\hat{\mathbf{x}}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = f_0(\hat{\mathbf{x}}) + \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(\hat{\mathbf{x}}) + \sum_{j=1}^p \mu_j h_j(\hat{\mathbf{x}}) = f_0(\hat{\mathbf{x}}) + \sum_{j=1}^p \mu_j h_j(\hat{\mathbf{x}}) \leq f_0(\hat{\mathbf{x}})$ так как $\mu_j \geq 0$ и $h_j(\hat{\mathbf{x}}) \leq 0$
- Также $g(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}) = \inf\limits_{\mathbf{u} \in \mathcal{D}} L(\mathbf{u}, \hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}) \leq L(\mathbf{x}, \hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}})$ для любого $\mathbf{x} \in \mathcal{D}$
- Если $f(\hat{\mathbf{x}}) = g(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}})$, то выполнено

$$L(\hat{\mathbf{x}}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) \leq f_0(\hat{\mathbf{x}}) = g(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}) \leq L(\mathbf{x}, \hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}})$$

  для всех $\mathbf{x} \in \mathcal{D}$ и допустимых пар $(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$

Доказательство: $1) \to 2)$

- Для допустимого $\hat{\mathbf{x}}$ и произвольной допустимой пары $(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$ выполнено $L(\hat{\mathbf{x}}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = f_0(\hat{\mathbf{x}}) + \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(\hat{\mathbf{x}}) + \sum_{j=1}^p \mu_j h_j(\hat{\mathbf{x}}) = f_0(\hat{\mathbf{x}}) + \sum_{j=1}^p \mu_j h_j(\hat{\mathbf{x}}) \leq f_0(\hat{\mathbf{x}})$ так как $\mu_j \geq 0$ и $h_j(\hat{\mathbf{x}}) \leq 0$
- Также $g(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}) = \inf\limits_{\mathbf{u} \in \mathcal{D}} L(\mathbf{u}, \hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}) \leq L(\mathbf{x}, \hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}})$ для любого $\mathbf{x} \in \mathcal{D}$
- Если $f(\hat{\mathbf{x}}) = g(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}})$, то выполнено

$$L(\hat{\mathbf{x}}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) \leq f_0(\hat{\mathbf{x}}) = g(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}) \leq L(\mathbf{x}, \hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}})$$

  для всех $\mathbf{x} \in \mathcal{D}$ и допустимых пар $(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$
- Если $\mathbf{x} = \hat{\mathbf{x}}$ и $(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = (\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}})$, то $f(\hat{\mathbf{x}}) = L(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}})$

Доказательство: $2) \to 3)$

- Из правого неравенства в условии седловой точки следует, что $\hat{\mathbf{x}}$ точка минимума Лагранжиана

Доказательство: $2) \to 3)$

- Из правого неравенства в условии седловой точки следует, что $\hat{\mathbf{x}}$ точка минимума Лагранжиана
- Из левого неравенства следует, что

$$f_0(\hat{\mathbf{x}})+\sum_{i=1}^{m}\lambda_i g_i(\hat{\mathbf{x}})+\sum_{j=1}^{p}\mu_j h_j(\hat{\mathbf{x}}) \leq f_0(\hat{\mathbf{x}})+\sum_{i=1}^{m}\hat{\lambda}_i g_i(\hat{\mathbf{x}})+\sum_{j=1}^{p}\hat{\mu}_j h_j(\hat{\mathbf{x}})$$

Доказательство: $2) \to 3)$

- Из правого неравенства в условии седловой точки следует, что $\hat{\mathbf{x}}$ точка минимума Лагранжиана
- Из левого неравенства следует, что

$$f_0(\hat{\mathbf{x}})+\sum_{i=1}^{m}\lambda_i g_i(\hat{\mathbf{x}})+\sum_{j=1}^{p}\mu_j h_j(\hat{\mathbf{x}}) \le f_0(\hat{\mathbf{x}})+\sum_{i=1}^{m}\hat{\lambda}_i g_i(\hat{\mathbf{x}})+\sum_{j=1}^{p}\hat{\mu}_j h_j(\hat{\mathbf{x}})$$

- Или $\sum_{i=1}^m(\lambda_i - \hat{\lambda}_i)g_i(\hat{\mathbf{x}}) + \sum_{j=1}^p(\mu_j - \hat{\mu}_j)h_j(\hat{\mathbf{x}}) \le 0$ для всех допустимых $(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$

Доказательство: $2) \to 3)$

- Из правого неравенства в условии седловой точки следует, что $\hat{\mathbf{x}}$ точка минимума Лагранжиана
- Из левого неравенства следует, что

$$f_0(\hat{\mathbf{x}})+\sum_{i=1}^{m}\lambda_i g_i(\hat{\mathbf{x}})+\sum_{j=1}^{p}\mu_j h_j(\hat{\mathbf{x}}) \leq f_0(\hat{\mathbf{x}})+\sum_{i=1}^{m}\hat{\lambda}_i g_i(\hat{\mathbf{x}})+\sum_{j=1}^{p}\hat{\mu}_j h_j(\hat{\mathbf{x}})$$

- Или $\sum_{i=1}^{m}(\lambda_i - \hat{\lambda}_i)g_i(\hat{\mathbf{x}}) + \sum_{j=1}^{p}(\mu_j - \hat{\mu}_j)h_j(\hat{\mathbf{x}}) \leq 0$ для всех допустимых $(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$
- Пусть $\boldsymbol{\mu} = \hat{\boldsymbol{\mu}}$ и $\lambda_k = \hat{\lambda}_k \pm 1$, а остальные $\lambda_i = \hat{\lambda}_i$ для $i \neq k$, тогда $\pm g_k(\hat{\mathbf{x}}) \leq 0$, то есть $g_k(\hat{\mathbf{x}}) = 0$

Доказательство: $2) \to 3)$

- Из правого неравенства в условии седловой точки следует, что $\hat{\mathbf{x}}$ точка минимума Лагранжиана
- Из левого неравенства следует, что

$$f_0(\hat{\mathbf{x}}) + \sum_{i=1}^{m} \lambda_i g_i(\hat{\mathbf{x}}) + \sum_{j=1}^{p} \mu_j h_j(\hat{\mathbf{x}}) \leq f_0(\hat{\mathbf{x}}) + \sum_{i=1}^{m} \hat{\lambda}_i g_i(\hat{\mathbf{x}}) + \sum_{j=1}^{p} \hat{\mu}_j h_j(\hat{\mathbf{x}})$$

- Или $\sum_{i=1}^{m} (\lambda_i - \hat{\lambda}_i) g_i(\hat{\mathbf{x}}) + \sum_{j=1}^{p} (\mu_j - \hat{\mu}_j) h_j(\hat{\mathbf{x}}) \leq 0$ для всех допустимых $(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$
- Пусть $\boldsymbol{\mu} = \hat{\boldsymbol{\mu}}$ и $\lambda_k = \hat{\lambda}_k \pm 1$, а остальные $\lambda_i = \hat{\lambda}_i$ для $i \neq k$, тогда $\pm g_k(\hat{\mathbf{x}}) \leq 0$, то есть $g_k(\hat{\mathbf{x}}) = 0$
- Пусть $\boldsymbol{\lambda} = \hat{\boldsymbol{\lambda}}$, но $\mu_k = \hat{\mu}_k + 1$ и $\mu_j = \hat{\mu}_j$ для $j \neq k$, тогда $h_k(\hat{\mathbf{x}}) \leq 0$. Таким образом, $\hat{\mathbf{x}}$ лежит в допустимом множестве

Доказательство: $2) \to 3)$

- Из правого неравенства в условии седловой точки следует, что $\hat{\mathbf{x}}$ точка минимума Лагранжиана
- Из левого неравенства следует, что

$$f_0(\hat{\mathbf{x}})+\sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(\hat{\mathbf{x}})+\sum_{j=1}^p \mu_j h_j(\hat{\mathbf{x}}) \leq f_0(\hat{\mathbf{x}})+\sum_{i=1}^m \hat{\lambda}_i g_i(\hat{\mathbf{x}})+\sum_{j=1}^p \hat{\mu}_j h_j(\hat{\mathbf{x}})$$

- Или $\sum_{i=1}^m (\lambda_i - \hat{\lambda}_i) g_i(\hat{\mathbf{x}}) + \sum_{j=1}^p (\mu_j - \hat{\mu}_j) h_j(\hat{\mathbf{x}}) \leq 0$ для всех допустимых $(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$
- Пусть $\boldsymbol{\mu} = \hat{\boldsymbol{\mu}}$ и $\lambda_k = \hat{\lambda}_k \pm 1$, а остальные $\lambda_i = \hat{\lambda}_i$ для $i \neq k$, тогда $\pm g_k(\hat{\mathbf{x}}) \leq 0$, то есть $g_k(\hat{\mathbf{x}}) = 0$
- Пусть $\boldsymbol{\lambda} = \hat{\boldsymbol{\lambda}}$, но $\mu_k = \hat{\mu}_k + 1$ и $\mu_j = \hat{\mu}_j$ для $j \neq k$, тогда $h_k(\hat{\mathbf{x}}) \leq 0$. Таким образом, $\hat{\mathbf{x}}$ лежит в допустимом множестве
- Аналогично, если $\boldsymbol{\lambda} = \hat{\boldsymbol{\lambda}}$, но $\mu_k = 2\hat{\mu}_k$ или $\mu_k = 0$, а $\mu_j = \hat{\mu}_j$ для $j \neq k$, тогда $\hat{\mu}_k h_k(\hat{\mathbf{x}}) = 0$

Доказательство: $3) \to 1)$

- Так как $\hat{\mathbf{x}}$ точка минимума лагранжиана, то $g(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}) = \inf\limits_{\mathbf{z} \in \mathcal{D}} L(\mathbf{z}, \hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}) = L(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}) =$ $f_0(\hat{\mathbf{x}}) + \sum_{i=1}^m \hat{\lambda}_i g_i(\hat{\mathbf{x}}) + \sum_{j=1}^p \hat{\mu}_j h_j(\hat{\mathbf{x}})$

Доказательство: $3) \to 1)$

- Так как $\hat{\mathbf{x}}$ точка минимума лагранжиана, то $g(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}) = \inf\limits_{\mathbf{z} \in \mathcal{D}} L(\mathbf{z}, \hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}) = L(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}) =$ $f_0(\hat{\mathbf{x}}) + \sum_{i=1}^m \hat{\lambda}_i g_i(\hat{\mathbf{x}}) + \sum_{j=1}^p \hat{\mu}_j h_j(\hat{\mathbf{x}})$
- $\hat{\mathbf{x}}$ лежит в допустимом множестве, поэтому $g_i(\hat{\mathbf{x}}) = 0$ для $i = 1, \ldots, m$

Доказательство: $3) \to 1)$

- Так как $\hat{\mathbf{x}}$ точка минимума лагранжиана, то $g(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}) = \inf\limits_{\mathbf{z} \in \mathcal{D}} L(\mathbf{z}, \hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}) = L(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}) = f_0(\hat{\mathbf{x}}) + \sum_{i=1}^m \hat{\lambda}_i g_i(\hat{\mathbf{x}}) + \sum_{j=1}^p \hat{\mu}_j h_j(\hat{\mathbf{x}})$
- $\hat{\mathbf{x}}$ лежит в допустимом множестве, поэтому $g_i(\hat{\mathbf{x}}) = 0$ для $i = 1, \ldots, m$
- Так как выполнено $\hat{\mu}_j h_j(\hat{\mathbf{x}}) = 0$, где $j = 1, \ldots, p$, то в итоге $g(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}) = f_0(\hat{\mathbf{x}})$

Доказательство: $3) \to 1)$

- Так как $\hat{\mathbf{x}}$ точка минимума лагранжиана, то $g(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}) = \inf\limits_{\mathbf{z} \in \mathcal{D}} L(\mathbf{z}, \hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}) = L(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}) = f_0(\hat{\mathbf{x}}) + \sum_{i=1}^{m} \hat{\lambda}_i g_i(\hat{\mathbf{x}}) + \sum_{j=1}^{p} \hat{\mu}_j h_j(\hat{\mathbf{x}})$
- $\hat{\mathbf{x}}$ лежит в допустимом множестве, поэтому $g_i(\hat{\mathbf{x}}) = 0$ для $i = 1, \ldots, m$
- Так как выполнено $\hat{\mu}_j h_j(\hat{\mathbf{x}}) = 0$, где $j = 1, \ldots, p$, то в итоге $g(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}) = f_0(\hat{\mathbf{x}})$
- Таким образом, выполнено условие оптимальности

Условия Каруша-Куна-Таккера (ККТ)

Следствие

Пусть $\mathbf{x}^*$ решение задачи минимизации такое, что $\mathbf{x}^* \in \mathrm{int}(\mathcal{D})$, f_0, g_i, h_j дифференцируемы в $\mathbf{x}^*$ и выполнен критерий оптимальности $f_0(\mathbf{x}^*) = g(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}})$ для некоторой допустимой пары $(\hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}})$, тогда выполнено

$$\begin{cases} L'_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}^*, \hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}) = 0 \\ \hat{\mu}_k h_k(\mathbf{x}^*) = 0 \end{cases}$$

Условия ККТ

- $L'_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}^*, \hat{\boldsymbol{\lambda}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}) = 0$
- $\hat{\mu}_k h_k(\mathbf{x}^*) = 0$ — условия дополняющей нежёсткости
- $\hat{\boldsymbol{\mu}} \geq 0$
- $h_j(\mathbf{x}^*) \leq 0$
- $g_i(\mathbf{x}^*) = 0$

Анонс на следующую лекцию

- Следствие на предыдущем слайде требует наличия сильной двойственности
- Если задача выпукла и выполнено некоторое условие регулярности, то сильная двойственность выполняется. Этот факт будет доказан на следующей лекции.
- На следующей лекции обсудим, что меняется когда появляется выпуклость и докажем основную теорему для условий оптимальности

Переформулировка задачи

- Равносильные прямые задачи могут давать совершенно разные двойственные задачи

Переформулировка задачи

- Равносильные прямые задачи могут давать совершенно разные двойственные задачи
- Равносильное преобразование исходной задачи может дать более простую или полезную двойственную задачу

Переформулировка задачи

- Равносильные прямые задачи могут давать совершенно разные двойственные задачи
- Равносильное преобразование исходной задачи может дать более простую или полезную двойственную задачу

Стандартные приёмы

Переформулировка задачи

- Равносильные прямые задачи могут давать совершенно разные двойственные задачи
- Равносильное преобразование исходной задачи может дать более простую или полезную двойственную задачу

Стандартные приёмы

- Введение новых переменных

$$\min_{\mathbf{x}} \|\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b}\| \to \begin{array}{c} \min\limits_{(\mathbf{x},\mathbf{y})} \|\mathbf{y}\| \\ \text{s.t. } \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b} = \mathbf{y} \end{array}$$

Переформулировка задачи

- Равносильные прямые задачи могут давать совершенно разные двойственные задачи
- Равносильное преобразование исходной задачи может дать более простую или полезную двойственную задачу

Стандартные приёмы

- Введение новых переменных

$$\min_{\mathbf{x}} \|\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b}\| \to \begin{aligned} &\min_{(\mathbf{x},\mathbf{y})} \|\mathbf{y}\| \\ \text{s.t. } &\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b} = \mathbf{y} \end{aligned}$$

- Превращение явных ограничений в неявные

$$\begin{aligned} &\min_{\mathbf{x}\in\mathbb{R}^n} \mathbf{c}^\top \mathbf{x} \\ \text{s.t. } & -1 \leq \mathbf{x} \leq 1 \\ &\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \end{aligned} \to \begin{aligned} &\min_{-1\leq\mathbf{x}\leq 1} \mathbf{c}^\top \mathbf{x} \\ \text{s.t. } &\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \end{aligned}$$

Двойственная задача к задаче линейного программирования (LP)

- Исходная задача

$$
\begin{aligned}
&\min \mathbf{c}^\top \mathbf{x} \\
\text{s.t. } &\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \\
&\mathbf{x} \geq 0
\end{aligned}
$$

Двойственная задача к задаче линейного программирования (LP)

- Исходная задача

$$\begin{aligned} & \min \mathbf{c}^\top \mathbf{x} \\ \text{s.t. } & \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \\ & \mathbf{x} \geq 0 \end{aligned}$$

- Лагранжиан:
  $L = \mathbf{c}^\top \mathbf{x} + \boldsymbol{\lambda}^\top(\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b}) - \boldsymbol{\mu}^\top \mathbf{x} = (\mathbf{c} + \mathbf{A}^\top \boldsymbol{\lambda} - \boldsymbol{\mu})^\top \mathbf{x} - \boldsymbol{\lambda}^\top \mathbf{b}$

Двойственная задача к задаче линейного программирования (LP)

- Исходная задача

$$\begin{aligned} &\min \mathbf{c}^\top \mathbf{x} \\ \text{s.t. } &\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \\ &\mathbf{x} \geq 0 \end{aligned}$$

- Лагранжиан:
  $L = \mathbf{c}^\top \mathbf{x} + \boldsymbol{\lambda}^\top(\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b}) - \boldsymbol{\mu}^\top \mathbf{x} = (\mathbf{c} + \mathbf{A}^\top \boldsymbol{\lambda} - \boldsymbol{\mu})^\top \mathbf{x} - \boldsymbol{\lambda}^\top \mathbf{b}$
- Двойственная функция

$$g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = \begin{cases} -\boldsymbol{\lambda}^\top \mathbf{b}, & \mathbf{c} + \mathbf{A}^\top \boldsymbol{\lambda} - \boldsymbol{\mu} = 0, \\ -\infty, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Двойственная задача к задаче линейного программирования (LP)

- Исходная задача

$$
\begin{aligned}
&\min \mathbf{c}^\top \mathbf{x} \\
\text{s.t. } &\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \\
&\mathbf{x} \geq 0
\end{aligned}
$$

- Лагранжиан:
$L = \mathbf{c}^\top \mathbf{x} + \boldsymbol{\lambda}^\top(\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b}) - \boldsymbol{\mu}^\top \mathbf{x} = (\mathbf{c} + \mathbf{A}^\top \boldsymbol{\lambda} - \boldsymbol{\mu})^\top \mathbf{x} - \boldsymbol{\lambda}^\top \mathbf{b}$
- Двойственная функция

$$
g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = \begin{cases} -\boldsymbol{\lambda}^\top \mathbf{b}, & \mathbf{c} + \mathbf{A}^\top \boldsymbol{\lambda} - \boldsymbol{\mu} = 0, \\ -\infty, & \text{иначе.} \end{cases}
$$

- Двойственная задача

$$
\begin{aligned}
&\min \boldsymbol{\lambda}^\top \mathbf{b} \\
\text{s.t. } &\mathbf{A}^\top \boldsymbol{\lambda} + \mathbf{c} \geq 0
\end{aligned}
$$

Связь между неограниченностью и неразрешимостью

Теорема

Если допустимое множество в прямой задаче LP пусто, то двойственная задача не ограничена.

Связь между неограниченностью и неразрешимостью

Теорема

Если допустимое множество в прямой задаче LP пусто, то двойственная задача не ограничена.

Доказательство

Связь между неограниченностью и неразрешимостью

Теорема

Если допустимое множество в прямой задаче LP пусто, то двойственная задача не ограничена.

Доказательство

- Допустимое множество в прямой задаче $\{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \mid \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b},\ \mathbf{x} \geq 0\}$

Связь между неограниченностью и неразрешимостью

Теорема

Если допустимое множество в прямой задаче LP пусто, то двойственная задача не ограничена.

Доказательство

- Допустимое множество в прямой задаче $\{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \mid \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b},\ \mathbf{x} \geq 0\}$
- Если оно пустое, то по лемме Фаркаша найдётся вектор $\mathbf{p}$ такой что $\mathbf{p}^\top \mathbf{b} < 0$ и $\mathbf{p}^\top \mathbf{A} \geq 0$

Связь между неограниченностью и неразрешимостью

Теорема

Если допустимое множество в прямой задаче LP пусто, то двойственная задача не ограничена.

Доказательство

- Допустимое множество в прямой задаче $\{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \mid \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b},\ \mathbf{x} \geq 0\}$
- Если оно пустое, то по лемме Фаркаша найдётся вектор $\mathbf{p}$ такой что $\mathbf{p}^\top \mathbf{b} < 0$ и $\mathbf{p}^\top \mathbf{A} \geq 0$
- Двойственная задача

$$\begin{aligned} &\min \boldsymbol{\lambda}^\top \mathbf{b} \\ \text{s.t. } &\mathbf{A}^\top \boldsymbol{\lambda} + \mathbf{c} \geq 0 \end{aligned}$$

Связь между неограниченностью и неразрешимостью

Теорема

Если допустимое множество в прямой задаче LP пусто, то двойственная задача не ограничена.

Доказательство

- Допустимое множество в прямой задаче $\{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \mid \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b},\ \mathbf{x} \geq 0\}$
- Если оно пустое, то по лемме Фаркаша найдётся вектор $\mathbf{p}$ такой что $\mathbf{p}^\top \mathbf{b} < 0$ и $\mathbf{p}^\top \mathbf{A} \geq 0$
- Двойственная задача

$$
\begin{gathered}
\min \boldsymbol{\lambda}^\top \mathbf{b} \\
\text{s.t. } \mathbf{A}^\top \boldsymbol{\lambda} + \mathbf{c} \geq 0
\end{gathered}
$$

- Пусть $\hat{\boldsymbol{\lambda}} = \theta \mathbf{p}$, $\theta > 0$, тогда $\theta \mathbf{p}^\top \mathbf{b} \to -\infty$ и $\theta \mathbf{A}^\top \mathbf{p} + \mathbf{c} \geq 0$

Связь между неограниченностью и неразрешимостью

Теорема

Если допустимое множество в прямой задаче LP пусто, то двойственная задача не ограничена.

Доказательство

- Допустимое множество в прямой задаче $\{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \mid \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b},\ \mathbf{x} \geq 0\}$
- Если оно пустое, то по лемме Фаркаша найдётся вектор $\mathbf{p}$ такой что $\mathbf{p}^\top \mathbf{b} < 0$ и $\mathbf{p}^\top \mathbf{A} \geq 0$
- Двойственная задача

$$
\begin{aligned}
&\min \boldsymbol{\lambda}^\top \mathbf{b} \\
\text{s.t. } &\mathbf{A}^\top \boldsymbol{\lambda} + \mathbf{c} \geq 0
\end{aligned}
$$

- Пусть $\hat{\boldsymbol{\lambda}} = \theta \mathbf{p}$, $\theta > 0$, тогда $\theta \mathbf{p}^\top \mathbf{b} \to -\infty$ и $\theta \mathbf{A}^\top \mathbf{p} + \mathbf{c} \geq 0$
- Двойственная задача не ограничена

Зачем нужны конусы?

Обобщённое отношение частичного порядка

Пусть $\mathcal{K}$ выпуклый, замкнутый конус, $\mathcal{K} \cap -\mathcal{K} = \{0\}$. Тогда $\mathbf{x} \leq_{\mathcal{K}} \mathbf{y} \Leftrightarrow \mathbf{y} - \mathbf{x} \in \mathcal{K}$ — отношение частичного порядка (докажите аксиомы!).

Зачем нужны конусы?

Обобщённое отношение частичного порядка

Пусть $\mathcal{K}$ выпуклый, замкнутый конус, $\mathcal{K} \cap -\mathcal{K} = \{0\}$. Тогда $\mathbf{x} \leq_{\mathcal{K}} \mathbf{y} \Leftrightarrow \mathbf{y} - \mathbf{x} \in \mathcal{K}$ — отношение частичного порядка (докажите аксиомы!).

Пример: конус $\mathcal{K} = \mathbf{S}_+^n$

Пусть $\mathbf{X}, \mathbf{Y} \in \mathbf{S}^n$. Тогда $\mathbf{X} \leq_{\mathcal{K}} \mathbf{Y}$ означает, что $\mathbf{Y} - \mathbf{X} \in \mathbf{S}_+^n$

Зачем нужны конусы?

Обобщённое отношение частичного порядка

Пусть $\mathcal{K}$ выпуклый, замкнутый конус, $\mathcal{K} \cap -\mathcal{K} = \{0\}$. Тогда $\mathbf{x} \leq_{\mathcal{K}} \mathbf{y} \Leftrightarrow \mathbf{y} - \mathbf{x} \in \mathcal{K}$ — отношение частичного порядка (докажите аксиомы!).

Пример: конус $\mathcal{K} = \mathbf{S}_+^n$

Пусть $\mathbf{X}, \mathbf{Y} \in \mathbf{S}^n$. Тогда $\mathbf{X} \leq_{\mathcal{K}} \mathbf{Y}$ означает, что $\mathbf{Y} - \mathbf{X} \in \mathbf{S}_+^n$

Задача линейного программирования

$$
\begin{aligned}
&\min_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n} \mathbf{c}^\top \mathbf{x} \\
\text{s.t. } &\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \\
&x_i \geq 0
\end{aligned}
\qquad\qquad
\begin{aligned}
&\min_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n} \mathbf{c}^\top \mathbf{x} \\
\text{s.t. } &\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \\
&\mathbf{x} \in \mathbb{R}_+^n
\end{aligned}
$$

Зачем нужны конусы?

Обобщённое отношение частичного порядка

Пусть $\mathcal{K}$ выпуклый, замкнутый конус, $\mathcal{K} \cap -\mathcal{K} = \{0\}$. Тогда $\mathbf{x} \leq_{\mathcal{K}} \mathbf{y} \Leftrightarrow \mathbf{y} - \mathbf{x} \in \mathcal{K}$ — отношение частичного порядка (докажите аксиомы!).

Пример: конус $\mathcal{K} = \mathbf{S}^n_+$

Пусть $\mathbf{X}, \mathbf{Y} \in \mathbf{S}^n$. Тогда $\mathbf{X} \leq_{\mathcal{K}} \mathbf{Y}$ означает, что $\mathbf{Y} - \mathbf{X} \in \mathbf{S}^n_+$

Задача линейного программирования

$$
\begin{aligned}
&\min_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n} \mathbf{c}^\top \mathbf{x} \\
\text{s.t. } & \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \\
& x_i \geq 0
\end{aligned}
\qquad\qquad
\begin{aligned}
&\min_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n} \mathbf{c}^\top \mathbf{x} \\
\text{s.t. } & \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \\
& \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n_+
\end{aligned}
$$

Введение нелинейности

Использование декартового произведение трёх самосопряжённых конусов позволяет записать многие практически важные выпуклые задачи

Двойственность и обобщённые неравенства

Постановка задачи

$$
\begin{aligned}
&\min_{\mathbf{x} \in \mathcal{D}} f_0(\mathbf{x}) \\
\text{s.t. } & g_i(\mathbf{x}) = 0,\ i = 1, \dots, m \\
& h_j(\mathbf{x}) \preceq_{\mathcal{K}} 0,\ j = 1, \dots, p
\end{aligned}
$$

Двойственность и обобщённые неравенства

Постановка задачи

$$\min_{\mathbf{x} \in \mathcal{D}} f_0(\mathbf{x})$$

$$\text{s.t. } g_i(\mathbf{x}) = 0, \; i = 1, \ldots, m$$

$$h_j(\mathbf{x}) \leq_{\mathcal{K}} 0, \; j = 1, \ldots, p$$

Лагранжиан

$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = f_0(\mathbf{x}) + \langle \boldsymbol{\lambda}, \mathbf{g}(\mathbf{x}) \rangle + \langle \boldsymbol{\mu}, \mathbf{h}(\mathbf{x}) \rangle$$

- $h_j(\mathbf{x}) \leq_{\mathcal{K}} 0 \Leftrightarrow -h_j(\mathbf{x}) \in \mathcal{K}$
- условие $\langle \boldsymbol{\mu}, \mathbf{h}(\mathbf{x}) \rangle \leq 0 \Leftrightarrow \langle \boldsymbol{\mu}, -\mathbf{h}(\mathbf{x}) \rangle \geq 0$ или $\langle \boldsymbol{\mu}, \mathbf{u} \rangle \geq 0$, где $\mathbf{u} \in \mathcal{K}$ выполнено, если $\boldsymbol{\mu} \in \mathcal{K}^*$ или $\boldsymbol{\mu} \geq_{\mathcal{K}^*} 0$

Двойственность и обобщённые неравенства

Постановка задачи

$$\begin{aligned} &\min_{\mathbf{x} \in \mathcal{D}} f_0(\mathbf{x}) \\ \text{s.t. } & g_i(\mathbf{x}) = 0, \; i = 1, \ldots, m \\ & h_j(\mathbf{x}) \preceq_{\mathcal{K}} 0, \; j = 1, \ldots, p \end{aligned}$$

Лагранжиан

$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = f_0(\mathbf{x}) + \langle \boldsymbol{\lambda}, \mathbf{g}(\mathbf{x}) \rangle + \langle \boldsymbol{\mu}, \mathbf{h}(\mathbf{x}) \rangle$$

- $h_j(\mathbf{x}) \preceq_{\mathcal{K}} 0 \Leftrightarrow -h_j(\mathbf{x}) \in \mathcal{K}$
- условие $\langle \boldsymbol{\mu}, \mathbf{h}(\mathbf{x}) \rangle \leq 0 \Leftrightarrow \langle \boldsymbol{\mu}, -\mathbf{h}(\mathbf{x}) \rangle \geq 0$ или $\langle \boldsymbol{\mu}, \mathbf{u} \rangle \geq 0$, где $\mathbf{u} \in \mathcal{K}$ выполнено, если $\boldsymbol{\mu} \in \mathcal{K}^*$ или $\boldsymbol{\mu} \succeq_{\mathcal{K}^*} 0$

Двойственная задача

$$\begin{aligned} &\max g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) \\ \text{s.t. } & \boldsymbol{\mu} \succeq_{\mathcal{K}^*} 0 \end{aligned}$$

Двойственность для задачи конической оптимизации

- Стандартная форма

$$
\begin{aligned}
&\min \mathbf{c}^\top \mathbf{x} \\
\text{s.t. } &\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \\
&\mathbf{x} \geq_{\mathcal{K}} 0
\end{aligned}
$$

Двойственность для задачи конической оптимизации

- Стандартная форма

$$
\begin{aligned}
\min \ & \mathbf{c}^\top \mathbf{x} \\
\text{s.t. } & \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \\
& \mathbf{x} \geq_{\mathcal{K}} 0
\end{aligned}
$$

- Двойственная задача (аналогично LP)

$$
\begin{aligned}
\max \ & \boldsymbol{\lambda}^\top \mathbf{b} \\
\text{s.t. } & \mathbf{A}^\top \boldsymbol{\lambda} \leq_{\mathcal{K}^*} \mathbf{c}
\end{aligned}
$$

Двойственность для задачи конической оптимизации

- Стандартная форма

$$\begin{aligned} &\min \mathbf{c}^\top \mathbf{x} \\ \text{s.t. } &\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \\ &\mathbf{x} \geq_{\mathcal{K}} 0 \end{aligned}$$

- Двойственная задача (аналогично LP)

$$\begin{aligned} &\max \boldsymbol{\lambda}^\top \mathbf{b} \\ \text{s.t. } &\mathbf{A}^\top \boldsymbol{\lambda} \leq_{\mathcal{K}^*} \mathbf{c} \end{aligned}$$

- Если конус $\mathcal{K}$ самосопряжённый мы автоматически знаем, как выглядит двойственная задача!

Двойственная задача для SDP

- Исходная задача

$$
\begin{aligned}
&\min_{\mathbf{X}} \operatorname{trace}(\mathbf{C}\mathbf{X}) \\
\text{s.t. } &\operatorname{trace}(\mathbf{A}_i\mathbf{X}) = b_i \\
&\mathbf{X} \succeq 0
\end{aligned}
$$

Двойственная задача для SDP

- Исходная задача

$$
\begin{aligned}
&\min_{\mathbf{X}} \operatorname{trace}(\mathbf{C}\mathbf{X}) \\
\text{s.t. } &\operatorname{trace}(\mathbf{A}_i\mathbf{X}) = b_i \\
&\mathbf{X} \succeq 0
\end{aligned}
$$

- Двойственная задача

$$
\begin{aligned}
&\max_{\boldsymbol{\lambda}} \boldsymbol{\lambda}^\top \mathbf{b} \\
\text{s.t. } &\mathbf{C} - \sum_{i=1}^m \lambda_i \mathbf{A}_i \succeq 0
\end{aligned}
$$

Пример выпуклой задачи с положительным зазором двойственности

Рассмотрим задачу

$$\min x_2$$

$$\text{s.t.} \begin{bmatrix} x_2 + 1 & 0 & 0 \\ 0 & x_1 & x_2 \\ 0 & x_2 & 0 \end{bmatrix} \succeq 0$$

Пример выпуклой задачи с положительным зазором двойственности

Рассмотрим задачу

$$
\begin{aligned}
&\min x_2 \\
\text{s.t. } &\begin{bmatrix} x_2 + 1 & 0 & 0 \\ 0 & x_1 & x_2 \\ 0 & x_2 & 0 \end{bmatrix} \succeq 0
\end{aligned}
$$

- Допустимое множество:
  $x_2 \geq -1, x_1 \geq 0, -x_2^2 \geq 0, x_1(x_2 + 1) \geq 0, (x_2 + 1)(-x_2^2) \geq 0$

Пример выпуклой задачи с положительным зазором двойственности

Рассмотрим задачу

$$\min x_2$$

$$\text{s.t.} \begin{bmatrix} x_2+1 & 0 & 0 \\ 0 & x_1 & x_2 \\ 0 & x_2 & 0 \end{bmatrix} \succeq 0$$

- Допустимое множество:
  $x_2 \geq -1, x_1 \geq 0, -x_2^2 \geq 0, x_1(x_2+1) \geq 0, (x_2+1)(-x_2^2) \geq 0$
- $p^* = 0$

Пример выпуклой задачи с положительным зазором двойственности

Рассмотрим задачу

$$\min x_2$$

$$\text{s.t. } \begin{bmatrix} x_2 + 1 & 0 & 0 \\ 0 & x_1 & x_2 \\ 0 & x_2 & 0 \end{bmatrix} \succeq 0$$

- Допустимое множество: $x_2 \geq -1, x_1 \geq 0, -x_2^2 \geq 0, x_1(x_2+1) \geq 0, (x_2+1)(-x_2^2) \geq 0$
- $p^* = 0$

Двойственная задача имеет вид

$$\min -y_{11}$$

$$\text{s.t. } \mathbf{Y} \succeq 0$$

$$y_{11} + y_{32} + y_{23} = 1$$

$$y_{22} = 0$$

Пример выпуклой задачи с положительным зазором двойственности

Рассмотрим задачу

$$
\begin{aligned}
&\min x_2 \\
\text{s.t. } &\begin{bmatrix} x_2 + 1 & 0 & 0 \\ 0 & x_1 & x_2 \\ 0 & x_2 & 0 \end{bmatrix} \succeq 0
\end{aligned}
$$

- Допустимое множество: $x_2 \geq -1, x_1 \geq 0, -x_2^2 \geq 0, x_1(x_2+1) \geq 0, (x_2+1)(-x_2^2) \geq 0$
- $p^* = 0$

Двойственная задача имеет вид

$$
\begin{aligned}
&\min -y_{11} \\
\text{s.t. } &\mathbf{Y} \succeq 0 \\
&y_{11} + y_{32} + y_{23} = 1 \\
&y_{22} = 0
\end{aligned}
$$

- Допустимое множество: $y_{11} \geq 0, y_{22}y_{33} - y_{23}y_{32} \geq 0$

Пример выпуклой задачи с положительным зазором двойственности

Рассмотрим задачу

$$
\begin{aligned}
&\min x_2 \\
\text{s.t.}\ &\begin{bmatrix} x_2+1 & 0 & 0 \\ 0 & x_1 & x_2 \\ 0 & x_2 & 0 \end{bmatrix} \succeq 0
\end{aligned}
$$

- Допустимое множество:
  $x_2 \geq -1, x_1 \geq 0, -x_2^2 \geq 0, x_1(x_2+1) \geq 0, (x_2+1)(-x_2^2) \geq 0$
- $p^* = 0$

Двойственная задача имеет вид

$$
\begin{aligned}
&\min -y_{11} \\
\text{s.t.}\ &\mathbf{Y} \succeq 0 \\
&y_{11} + y_{32} + y_{23} = 1 \\
&y_{22} = 0
\end{aligned}
$$

- Допустимое множество: $y_{11} \geq 0, y_{22}y_{33} - y_{23}y_{32} \geq 0$
- $d^* = -1$

Главное

- Преобразования задач и их типы

Главное

- Преобразования задач и их типы
- Двойственная функция и её свойства

Главное

- Преобразования задач и их типы
- Двойственная функция и её свойства
- Двойственная задача и её свойства

Главное

- Преобразования задач и их типы
- Двойственная функция и её свойства
- Двойственная задача и её свойства
- Сильная двойственность и слабая двойственность

Главное

- Преобразования задач и их типы
- Двойственная функция и её свойства
- Двойственная задача и её свойства
- Сильная двойственность и слабая двойственность
- Обобщённые неравенства