

Методы оптимизации  
Введение в численные методы оптимизации.  
Градиентный спуск

Александр Катруца

Московский физико-технический институт

7 апреля 2020 г.

## На прошлой лекции

- ▶ Двойственная функция и двойственная задача
- ▶ Зазор двойственности
- ▶ Условие Слейтера
- ▶ Сильная и слабая двойственность

# Постановка задачи

$$\begin{aligned} & \min_{x \in S} f_0(x) \\ \text{s.t. } & f_j(x) = 0, \quad j = 1, \dots, m \\ & g_k(x) \leq 0, \quad k = 1, \dots, p \end{aligned}$$

где  $S \subseteq \mathbb{R}^n$ ,  $f_j : S \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $j = 0, \dots, m$ ,  $g_k : S \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $k = 1, \dots, p$

- ▶ Все функции как минимум непрерывны
- ▶ Задачи нелинейной оптимизации в общем случае являются **численно неразрешимыми!**

# Некоторые аналитические результаты

# Некоторые аналитические результаты

## Необходимое условие первого порядка

Если  $x^*$  точка локального минимума дифференцируемой функции  $f(x)$ , тогда

$$f'(x^*) = 0$$

# Некоторые аналитические результаты

## Необходимое условие первого порядка

Если  $x^*$  точка локального минимума дифференцируемой функции  $f(x)$ , тогда

$$f'(x^*) = 0$$

## Необходимое условие второго порядка

Если  $x^*$  точка локального минимума дважды дифференцируемой функции  $f(x)$ , тогда

$$f'(x^*) = 0 \quad \text{и} \quad f''(x^*) \succeq 0$$

# Некоторые аналитические результаты

## Необходимое условие первого порядка

Если  $x^*$  точка локального минимума дифференцируемой функции  $f(x)$ , тогда

$$f'(x^*) = 0$$

## Необходимое условие второго порядка

Если  $x^*$  точка локального минимума дважды дифференцируемой функции  $f(x)$ , тогда

$$f'(x^*) = 0 \quad \text{и} \quad f''(x^*) \succeq 0$$

## Достаточное условие

Пусть  $f(x)$  дважды дифференцируемая функция, и пусть точка  $x^*$  удовлетворяет условиям

$$f'(x^*) = 0 \quad f''(x^*) \succ 0,$$

тогда  $x^*$  является точкой строгого локального минимума функции  $f(x)$

# Зачем нужны численные методы?

- ▶ Для задач большой размерности аналитическое выражение может быть трудно вычислить



# Зачем нужны численные методы?

- ▶ Для задач большой размерности аналитическое выражение может быть трудно вычислить
- ▶ Чаще всего аналитического выражения для решения нет

# Особенности численного решения

- ▶ Точно решить задачу принципиально невозможно из-за погрешности машинной арифметики

# Особенности численного решения

- ▶ Точно решить задачу принципиально невозможно из-за погрешности машинной арифметики
- ▶ Необходимо задать критерий обнаружения решения

# Особенности численного решения

- ▶ Точно решить задачу принципиально невозможно из-за погрешности машинной арифметики
- ▶ Необходимо задать критерий обнаружения решения
- ▶ Необходимо определить, какую информацию о задаче использовать

# Как создаются численные методы?

- ▶ Способы численного решения уравнений из условий оптимальности

# Как создаются численные методы?

- ▶ Способы численного решения уравнений из условий оптимальности
- ▶ Замена целевой функции её **простой** аппроксимацией

# Как создаются численные методы?

- ▶ Способы численного решения уравнений из условий оптимальности
- ▶ Замена целевой функции её **простой** аппроксимацией
- ▶ Сведение условных задач к безусловным с сохранением множества решений

## Общая схема

- ▶ Начальная точка  $x_0$
- ▶ Желаемая точность  $\varepsilon$

```
def GeneralScheme(x, epsilon):  
    while StopCriterion(x) > epsilon:  
        OracleResponse = RequestOracle(x)  
        UpdateInformation(I, x, OracleResponse)  
        x = NextPoint(I, x)  
    return x
```



# Вопросы

1. Какие критерии остановки могут быть?

# Вопросы

1. Какие критерии остановки могут быть?
2. Что такое оракул и зачем он нужен?

# Вопросы

1. Какие критерии остановки могут быть?
2. Что такое оракул и зачем он нужен?
3. Что такое информационная модель?

# Вопросы

1. Какие критерии остановки могут быть?
2. Что такое оракул и зачем он нужен?
3. Что такое информационная модель?
4. Как вычисляется новая точка?

# Критерии остановки

1. Сходимость по аргументу:

$$\|x_k - x^*\|_2 < \varepsilon$$

# Критерии остановки

1. Сходимость по аргументу:

$$\|x_k - x^*\|_2 < \varepsilon$$

2. Сходимость по функции:

$$\|f_k - f^*\|_2 < \varepsilon$$

# Критерии остановки

1. Сходимость по аргументу:

$$\|x_k - x^*\|_2 < \varepsilon$$

2. Сходимость по функции:

$$\|f_k - f^*\|_2 < \varepsilon$$

3. Выполнение необходимого условия

$$\|f'(x_k)\|_2 < \varepsilon$$

# Критерии остановки

1. Сходимость по аргументу:

$$\|x_k - x^*\|_2 < \varepsilon$$

2. Сходимость по функции:

$$\|f_k - f^*\|_2 < \varepsilon$$

3. Выполнение необходимого условия

$$\|f'(x_k)\|_2 < \varepsilon$$

4. Зазор двойственности

$$f_k - g(\lambda_k, \mu_k) \leq \varepsilon$$



Что такое оракул?



# Что такое оракул?

## Почти определение

Оракулом называют некоторое абстрактное устройство, которое отвечает на последовательные вопросы метода

# Что такое оракул?

## Почти определение

Оракулом называют некоторое абстрактное устройство, которое отвечает на последовательные вопросы метода

## Аналогия из ООП

- ▶ оракул – это виртуальный метод базового класса
- ▶ каждая задача – производный класс
- ▶ оракул определяется для каждой задачи отдельно согласно общему определению в базовом классе

# Что такое оракул?

## Почти определение

Оракулом называют некоторое абстрактное устройство, которое отвечает на последовательные вопросы метода

## Аналогия из ООП

- ▶ оракул – это виртуальный метод базового класса
- ▶ каждая задача – производный класс
- ▶ оракул определяется для каждой задачи отдельно согласно общему определению в базовом классе

## Концепция чёрного ящика

1. Единственной информацией, получаемой в ходе работы итерационного метода, являются ответы оракула
2. Ответы оракула являются **локальными**

# Информация о задаче

1. Каждый ответ оракула даёт **локальную** информацию о поведении функции в точке
2. Агрегируя все полученные ответы оракула, обновляем информацию о **глобальном** виде целевой функции:
  - ▶ кривизна
  - ▶ направление убывания
  - ▶ etc

Вычисление следующей точки

## Вычисление следующей точки

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k h_k$$

# Вычисление следующей точки

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k h_k$$

## Линейный поиск

1. Сначала выбирается направление  $h_k$
2. Далее определяется «оптимальное» значение  $\alpha_k$



# Вычисление следующей точки

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k h_k$$

## Линейный поиск

1. Сначала выбирается направление  $h_k$
2. Далее определяется «оптимальное» значение  $\alpha_k$

## Метод доверительных областей

1. Выбирается  $\alpha$ -окрестность  $x_k$
2. В этой окрестности строится упрощённая **модель** целевой функции
3. Далее определяется направления  $h_k$ , минимизирующее модель целевой функции и не выводящее точку  $x_k + h_k$  за пределы области

# Как сравнивать методы оптимизации?

Для заданного класса задач сравнивают следующие величины:

## 1. Сложность

- ▶ аналитическая: число обращений к оракулу для решения задачи с точностью  $\varepsilon$
- ▶ арифметическая: общее число всех вычислений, необходимых для решения задачи с точностью  $\varepsilon$

## 2. Скорость сходимости

## 3. Эксперименты

# Скорости сходимости

## 1. Сублинейная

$$\|x_{k+1} - x^*\|_2 \leq Ck^\alpha,$$

где  $\alpha < 0$  и  $0 < C < \infty$

# Скорости сходимости

## 1. Сублинейная

$$\|x_{k+1} - x^*\|_2 \leq Ck^\alpha,$$

где  $\alpha < 0$  и  $0 < C < \infty$

## 2. Линейная (геометрическая прогрессия)

$$\|x_{k+1} - x^*\|_2 \leq Cq^k,$$

где  $q \in (0, 1)$  и  $0 < C < \infty$

# Скорости сходимости

## 1. Сублинейная

$$\|x_{k+1} - x^*\|_2 \leq Ck^\alpha,$$

где  $\alpha < 0$  и  $0 < C < \infty$

## 2. Линейная (геометрическая прогрессия)

$$\|x_{k+1} - x^*\|_2 \leq Cq^k,$$

где  $q \in (0, 1)$  и  $0 < C < \infty$

## 3. Сверхлинейная

$$\|x_{k+1} - x^*\|_2 \leq Cq^{k^p},$$

где  $q \in (0, 1)$ ,  $0 < C < \infty$  и  $p > 1$

# Скорости сходимости

## 1. Сублинейная

$$\|x_{k+1} - x^*\|_2 \leq Ck^\alpha,$$

где  $\alpha < 0$  и  $0 < C < \infty$

## 2. Линейная (геометрическая прогрессия)

$$\|x_{k+1} - x^*\|_2 \leq Cq^k,$$

где  $q \in (0, 1)$  и  $0 < C < \infty$

## 3. Сверхлинейная

$$\|x_{k+1} - x^*\|_2 \leq Cq^{k^p},$$

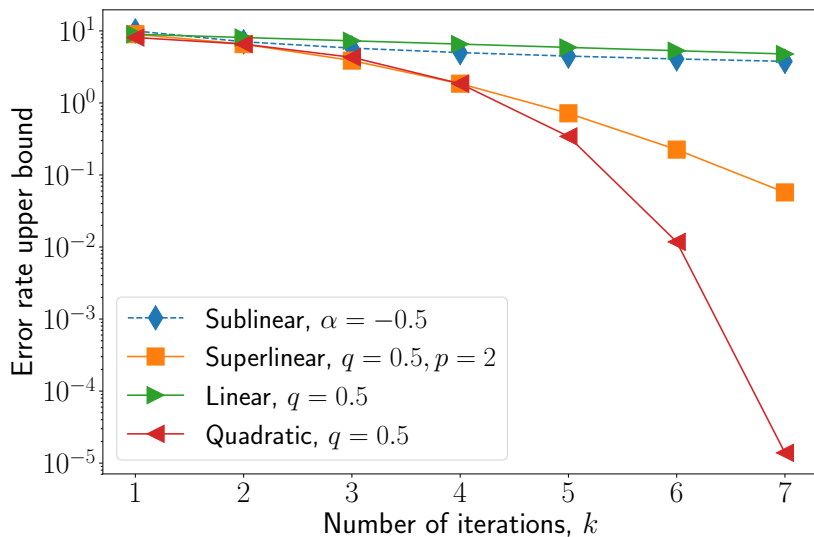
где  $q \in (0, 1)$ ,  $0 < C < \infty$  и  $p > 1$

## 4. Квадратичная

$$\|x_{k+1} - x^*\|_2 \leq C\|x_k - x^*\|_2^2, \quad \text{или} \quad \|x_{k+1} - x^*\|_2 \leq Cq^{2^k}$$

где  $q \in (0, 1)$  и  $0 < C < \infty$

## Сравнение скоростей сходимости



# Значение теорем сходимости



# Значение теорем сходимости

(Б.Т. Поляк Введение в оптимизацию, гл. 1, § 6)

## Что дают теоремы сходимости

- ▶ класс задач, для которых применим метод

# Значение теорем сходимости

(Б.Т. Поляк Введение в оптимизацию, гл. 1, § 6)

## Что дают теоремы сходимости

- ▶ класс задач, для которых применим метод
  - ▶ выпуклость

# Значение теорем сходимости

(Б.Т. Поляк Введение в оптимизацию, гл. 1, § 6)

## Что дают теоремы сходимости

- ▶ класс задач, для которых применим метод
  - ▶ выпуклость
  - ▶ гладкость

# Значение теорем сходимости

(Б.Т. Поляк Введение в оптимизацию, гл. 1, § 6)

## Что дают теоремы сходимости

- ▶ класс задач, для которых применим метод
  - ▶ выпуклость
  - ▶ гладкость
- ▶ качественное поведение метода

# Значение теорем сходимости

(Б.Т. Поляк Введение в оптимизацию, гл. 1, § 6)

## Что дают теоремы сходимости

- ▶ класс задач, для которых применим метод
  - ▶ выпуклость
  - ▶ гладкость
- ▶ качественное поведение метода
  - ▶ существенно ли начальное приближение

# Значение теорем сходимости

(Б.Т. Поляк Введение в оптимизацию, гл. 1, § 6)

## Что дают теоремы сходимости

- ▶ класс задач, для которых применим метод
  - ▶ выпуклость
  - ▶ гладкость
- ▶ качественное поведение метода
  - ▶ существенно ли начальное приближение
  - ▶ по какому функционалу есть сходимость

# Значение теорем сходимости

(Б.Т. Поляк Введение в оптимизацию, гл. 1, § 6)

## Что дают теоремы сходимости

- ▶ класс задач, для которых применим метод
  - ▶ выпуклость
  - ▶ гладкость
- ▶ качественное поведение метода
  - ▶ существенно ли начальное приближение
  - ▶ по какому функционалу есть сходимость
- ▶ оценку скорости сходимости

# Значение теорем сходимости

(Б.Т. Поляк Введение в оптимизацию, гл. 1, § 6)

## Что дают теоремы сходимости

- ▶ класс задач, для которых применим метод
  - ▶ выпуклость
  - ▶ гладкость
- ▶ качественное поведение метода
  - ▶ существенно ли начальное приближение
  - ▶ по какому функционалу есть сходимость
- ▶ оценку скорости сходимости
  - ▶ теоретическая оценка без проведения экспериментов



# Значение теорем сходимости

(Б.Т. Поляк Введение в оптимизацию, гл. 1, § 6)

## Что дают теоремы сходимости

- ▶ класс задач, для которых применим метод
  - ▶ выпуклость
  - ▶ гладкость
- ▶ качественное поведение метода
  - ▶ существенно ли начальное приближение
  - ▶ по какому функционалу есть сходимость
- ▶ оценку скорости сходимости
  - ▶ теоретическая оценка без проведения экспериментов
  - ▶ определение факторов, которые влияют на сходимость

# Значение теорем сходимости

(Б.Т. Поляк Введение в оптимизацию, гл. 1, § 6)

## Что дают теоремы сходимости

- ▶ класс задач, для которых применим метод
  - ▶ выпуклость
  - ▶ гладкость
- ▶ качественное поведение метода
  - ▶ существенно ли начальное приближение
  - ▶ по какому функционалу есть сходимость
- ▶ оценку скорости сходимости
  - ▶ теоретическая оценка без проведения экспериментов
  - ▶ определение факторов, которые влияют на сходимость
  - ▶ иногда заранее можно выбрать число итераций для достижения заданной точности

# Значение теорем сходимости

# Значение теорем сходимости

(Б.Т. Поляк Введение в оптимизацию, гл. 1, § 6)

Что НЕ дают теоремы сходимости

- ▶ сходимость метода *ничего не говорит* о целесообразности его применения

# Значение теорем сходимости

(Б.Т. Поляк Введение в оптимизацию, гл. 1, § 6)

Что НЕ дают теоремы сходимости

- ▶ сходимость метода *ничего не говорит* о целесообразности его применения
- ▶ оценки сходимости зависят от неизвестных констант

# Значение теорем сходимости

(Б.Т. Поляк Введение в оптимизацию, гл. 1, § 6)

Что НЕ дают теоремы сходимости

- ▶ сходимость метода *ничего не говорит* о целесообразности его применения
- ▶ оценки сходимости зависят от неизвестных констант
- ▶ учёт ошибок округления и точности решения вспомогательных задач

# Классификация методов

# Классификация методов

## Порядок метода

- ▶ Методы нулевого порядка: оракул возвращает только значение функции  $f(x)$



# Классификация методов

## Порядок метода

- ▶ Методы нулевого порядка: оракул возвращает только значение функции  $f(x)$
- ▶ Методы первого порядка: оракул возвращает значение функции  $f(x)$  и её градиент  $f'(x)$

# Классификация методов

## Порядок метода

- ▶ Методы нулевого порядка: оракул возвращает только значение функции  $f(x)$
- ▶ Методы первого порядка: оракул возвращает значение функции  $f(x)$  и её градиент  $f'(x)$
- ▶ Методы второго порядка: оракул возвращает значение функции  $f(x)$ , её градиент  $f'(x)$  и гессиан  $f''(x)$ .

# Классификация методов

## Порядок метода

- ▶ Методы нулевого порядка: оракул возвращает только значение функции  $f(x)$
- ▶ Методы первого порядка: оракул возвращает значение функции  $f(x)$  и её градиент  $f'(x)$
- ▶ Методы второго порядка: оракул возвращает значение функции  $f(x)$ , её градиент  $f'(x)$  и гессиан  $f''(x)$ .

**Q:** существуют ли методы более высокого порядка?

# Классификация методов

## Порядок метода

- ▶ Методы нулевого порядка: оракул возвращает только значение функции  $f(x)$
- ▶ Методы первого порядка: оракул возвращает значение функции  $f(x)$  и её градиент  $f'(x)$
- ▶ Методы второго порядка: оракул возвращает значение функции  $f(x)$ , её градиент  $f'(x)$  и гессиан  $f''(x)$ .

**Q:** существуют ли методы более высокого порядка?

## Использование истории

# Классификация методов

## Порядок метода

- ▶ Методы нулевого порядка: оракул возвращает только значение функции  $f(x)$
- ▶ Методы первого порядка: оракул возвращает значение функции  $f(x)$  и её градиент  $f'(x)$
- ▶ Методы второго порядка: оракул возвращает значение функции  $f(x)$ , её градиент  $f'(x)$  и гессиан  $f''(x)$ .

**Q:** существуют ли методы более высокого порядка?

## Использование истории

### 1. Одношаговые методы

$$x_{k+1} = \Phi(x_k)$$

# Классификация методов

## Порядок метода

- ▶ Методы нулевого порядка: оракул возвращает только значение функции  $f(x)$
- ▶ Методы первого порядка: оракул возвращает значение функции  $f(x)$  и её градиент  $f'(x)$
- ▶ Методы второго порядка: оракул возвращает значение функции  $f(x)$ , её градиент  $f'(x)$  и гессиан  $f''(x)$ .

**Q:** существуют ли методы более высокого порядка?

## Использование истории

### 1. Одношаговые методы

$$x_{k+1} = \Phi(x_k)$$

### 2. Многошаговые методы

$$x_{k+1} = \Phi(x_k, x_{k-1}, \dots)$$

- ▶ Введение в численные методы оптимизации
- ▶ Общая схема работы метода
- ▶ Способы сравнения методов оптимизации
- ▶ Зоопарк задач и методов

# Методы спуска

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k h_k$$

так что

$$f(x_{k+1}) < f(x_k)$$



# Методы спуска

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k h_k$$

так что

$$f(x_{k+1}) < f(x_k)$$

## Определение

Направление  $h_k$  называется *направлением убывания*

# Методы спуска

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k h_k$$

так что

$$f(x_{k+1}) < f(x_k)$$

## Определение

Направление  $h_k$  называется *направлением убывания*

## Замечание

Существуют методы, которые не требуют монотонного убывания функции от итерации к итерации

# Градиентный спуск

Глобальная оценка сверху на функцию  $f$  в точке  $x_k$ :

$$f(y) \leq f(x_k) + \langle f'(x_k), y - x_k \rangle + \frac{L}{2} \|y - x_k\|_2^2 \equiv g(y),$$

где  $\lambda_{\max}(f''(x)) \leq L$  для всех допустимых  $x$ .

# Градиентный спуск

Глобальная оценка сверху на функцию  $f$  в точке  $x_k$ :

$$f(y) \leq f(x_k) + \langle f'(x_k), y - x_k \rangle + \frac{L}{2} \|y - x_k\|_2^2 \equiv g(y),$$

где  $\lambda_{\max}(f''(x)) \leq L$  для всех допустимых  $x$ .

Справа – квадратичная форма, точка минимума которой имеет аналитическое выражение:

$$g'(y^*) = 0$$

$$f'(x_k) + L(y^* - x_k) = 0$$

$$y^* = x_k - \frac{1}{L} f'(x_k) \equiv x_{k+1}$$

Этот способ позволяет оценить значение шага как  $\frac{1}{L}$ .

# Выбор шага

- ▶ Постоянный  $\alpha_k \equiv \text{const} < \frac{2}{L}$
- ▶ Убывающая последовательность, такая что  $\sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k = \infty$ ,  
например  $\frac{1}{k}$ ,  $\frac{1}{\sqrt{k}}$ , etc
- ▶ Адаптивный поиск: правила Армихо, Вольфа, Гольдштейна и другие
- ▶ Наискорейший спуск: поиск лучшего  $\alpha_k$

## Важно

Лучший размер шага даёт не столь существенное теоретическое ускорение сходимости

## Сходимость к стационарной точке

$$\begin{aligned} f(x_{k+1}) &\leq f(x_k) + \langle f'(x_k), x_{k+1} - x_k \rangle + \frac{L}{2} \|x_{k+1} - x_k\|_2^2 = \\ &f(x_k) - \alpha_k \|f'(x_k)\|_2^2 + \frac{L\alpha_k^2}{2} \|f'(x_k)\|_2^2 = \\ &f(x_k) - \left( \alpha_k - \frac{L\alpha_k^2}{2} \right) \|f'(x_k)\|_2^2 \end{aligned}$$

## Сходимость к стационарной точке

$$\begin{aligned} f(x_{k+1}) &\leq f(x_k) + \langle f'(x_k), x_{k+1} - x_k \rangle + \frac{L}{2} \|x_{k+1} - x_k\|_2^2 = \\ &= f(x_k) - \alpha_k \|f'(x_k)\|_2^2 + \frac{L\alpha_k^2}{2} \|f'(x_k)\|_2^2 = \\ &= f(x_k) - \left( \alpha_k - \frac{L\alpha_k^2}{2} \right) \|f'(x_k)\|_2^2 \end{aligned}$$

► Условие убывания:  $\alpha_k - \frac{L\alpha_k^2}{2} > 0 \Rightarrow \alpha_k < \frac{2}{L}$

## Сходимость к стационарной точке

$$\begin{aligned} f(x_{k+1}) &\leq f(x_k) + \langle f'(x_k), x_{k+1} - x_k \rangle + \frac{L}{2} \|x_{k+1} - x_k\|_2^2 = \\ &f(x_k) - \alpha_k \|f'(x_k)\|_2^2 + \frac{L\alpha_k^2}{2} \|f'(x_k)\|_2^2 = \\ &f(x_k) - \left( \alpha_k - \frac{L\alpha_k^2}{2} \right) \|f'(x_k)\|_2^2 \end{aligned}$$

- ▶ Условие убывания:  $\alpha_k - \frac{L\alpha_k^2}{2} > 0 \Rightarrow \alpha_k < \frac{2}{L}$
- ▶  $\alpha_k^* = \arg \max_{\alpha_k} \left( \alpha_k - \frac{L\alpha_k^2}{2} \right) = \frac{1}{L}$



## Сходимость к стационарной точке

$$\begin{aligned} f(x_{k+1}) &\leq f(x_k) + \langle f'(x_k), x_{k+1} - x_k \rangle + \frac{L}{2} \|x_{k+1} - x_k\|_2^2 = \\ &= f(x_k) - \alpha_k \|f'(x_k)\|_2^2 + \frac{L\alpha_k^2}{2} \|f'(x_k)\|_2^2 = \\ &= f(x_k) - \left( \alpha_k - \frac{L\alpha_k^2}{2} \right) \|f'(x_k)\|_2^2 \end{aligned}$$

- ▶ Условие убывания:  $\alpha_k - \frac{L\alpha_k^2}{2} > 0 \Rightarrow \alpha_k < \frac{2}{L}$
- ▶  $\alpha_k^* = \arg \max_{\alpha_k} \left( \alpha_k - \frac{L\alpha_k^2}{2} \right) = \frac{1}{L}$
- ▶  $f(x_k) - f(x_{k+1}) \geq \frac{1}{2L} \|f'(x_k)\|_2^2$

## Сходимость к стационарной точке

$$\begin{aligned} f(x_{k+1}) &\leq f(x_k) + \langle f'(x_k), x_{k+1} - x_k \rangle + \frac{L}{2} \|x_{k+1} - x_k\|_2^2 = \\ &= f(x_k) - \alpha_k \|f'(x_k)\|_2^2 + \frac{L\alpha_k^2}{2} \|f'(x_k)\|_2^2 = \\ &= f(x_k) - \left( \alpha_k - \frac{L\alpha_k^2}{2} \right) \|f'(x_k)\|_2^2 \end{aligned}$$

- ▶ Условие убывания:  $\alpha_k - \frac{L\alpha_k^2}{2} > 0 \Rightarrow \alpha_k < \frac{2}{L}$
- ▶  $\alpha_k^* = \arg \max_{\alpha_k} \left( \alpha_k - \frac{L\alpha_k^2}{2} \right) = \frac{1}{L}$
- ▶  $f(x_k) - f(x_{k+1}) \geq \frac{1}{2L} \|f'(x_k)\|_2^2$
- ▶  $\frac{1}{2L} \sum_{k=0}^T \|f'(x_k)\|_2^2 \leq f(x_0) - f(x_{T+1}) \leq f(x_0) - f^*$

## Сходимость к стационарной точке

$$\begin{aligned} f(x_{k+1}) &\leq f(x_k) + \langle f'(x_k), x_{k+1} - x_k \rangle + \frac{L}{2} \|x_{k+1} - x_k\|_2^2 = \\ &= f(x_k) - \alpha_k \|f'(x_k)\|_2^2 + \frac{L\alpha_k^2}{2} \|f'(x_k)\|_2^2 = \\ &= f(x_k) - \left( \alpha_k - \frac{L\alpha_k^2}{2} \right) \|f'(x_k)\|_2^2 \end{aligned}$$

- ▶ Условие убывания:  $\alpha_k - \frac{L\alpha_k^2}{2} > 0 \Rightarrow \alpha_k < \frac{2}{L}$
- ▶  $\alpha_k^* = \arg \max_{\alpha_k} \left( \alpha_k - \frac{L\alpha_k^2}{2} \right) = \frac{1}{L}$
- ▶  $f(x_k) - f(x_{k+1}) \geq \frac{1}{2L} \|f'(x_k)\|_2^2$
- ▶  $\frac{1}{2L} \sum_{k=0}^T \|f'(x_k)\|_2^2 \leq f(x_0) - f(x_{T+1}) \leq f(x_0) - f^*$
- ▶  $f$  ограничена снизу,  $\|f'(x_k)\|_2 \rightarrow 0, k \rightarrow \infty$

# Сходимость для выпуклой функции

## Теорема

Пусть  $f$  выпуклая функция с Липшицевым градиентом и  $\alpha = \frac{1}{L}$ , тогда градиентный спуск сходится как

$$f(x_{k+1}) - f^* \leq \frac{2L\|x - x_0\|_2^2}{k + 4} = \mathcal{O}(1/k)$$

## Сходимость для сильно выпуклой функции

- ▶ Следствие сильной выпуклости

$$f(z) \geq f(x_k) + \langle f'(x_k), z - x_k \rangle + \frac{\mu}{2} \|z - x_k\|_2^2$$

- ▶ Минимизируя обе части по  $z$

$$f(x^*) \geq f(x_k) - \frac{1}{2\mu} \|f'(x_k)\|_2^2, \quad \|f'(x_k)\|_2^2 \geq 2\mu(f(x_k) - f^*)$$

- ▶ Вспомним, что для  $\alpha_k \equiv \frac{1}{L}$

$$f^* \leq f(x_{k+1}) \leq f(x_k) - \frac{1}{2L} \|f'(x_k)\|_2^2$$

- ▶ И наконец получим линейную сходимость

$$f(x_{k+1}) - f^* \leq \left(1 - \frac{1}{\kappa}\right) (f(x_k) - f^*)$$

# Теорема для сильно выпуклой функции

## Теорема

Пусть  $f$  с Липшицевым градиентом и  $\mu$  сильно выпукла,  $\alpha_k = \frac{2}{\mu+L}$ , тогда градиентный спуск сходится как

$$f(x_k) - f^* \leq \frac{L}{2} \left( \frac{L - \mu}{L + \mu} \right)^{2k} \|x_0 - x^*\|_2^2$$

Что влияет на линейную скорость сходимости?

$$q^* = \frac{L - \mu}{L + \mu} = \frac{L/\mu - 1}{L/\mu + 1} = \frac{\kappa - 1}{\kappa + 1},$$

где  $\kappa$  - оценка числа обусловленности  $f''(x)$ .

**Q:** что такое число обусловленности матрицы?

## Что влияет на линейную скорость сходимости?

$$q^* = \frac{L - \mu}{L + \mu} = \frac{L/\mu - 1}{L/\mu + 1} = \frac{\kappa - 1}{\kappa + 1},$$

где  $\kappa$  - оценка числа обусловленности  $f''(x)$ .

**Q:** что такое число обусловленности матрицы?

- ▶ При  $\kappa \gg 1$ ,  $q^* \rightarrow 1 \Rightarrow$  оооочень медленная сходимость.  
Например при  $\kappa = 100$ :  $q^* \approx 0.98$



## Что влияет на линейную скорость сходимости?

$$q^* = \frac{L - \mu}{L + \mu} = \frac{L/\mu - 1}{L/\mu + 1} = \frac{\kappa - 1}{\kappa + 1},$$

где  $\kappa$  - оценка числа обусловленности  $f''(x)$ .

**Q:** что такое число обусловленности матрицы?

- ▶ При  $\kappa \gg 1$ ,  $q^* \rightarrow 1 \Rightarrow$  *очень медленная* сходимости. Например при  $\kappa = 100$ :  $q^* \approx 0.98$
- ▶ При  $\kappa \simeq 1$ ,  $q^* \rightarrow 0 \Rightarrow$  *ускорение* сходимости. Например при  $\kappa = 4$ :  $q^* = 0.6$

## Что влияет на линейную скорость сходимости?

$$q^* = \frac{L - \mu}{L + \mu} = \frac{L/\mu - 1}{L/\mu + 1} = \frac{\kappa - 1}{\kappa + 1},$$

где  $\kappa$  - оценка числа обусловленности  $f''(x)$ .

**Q:** что такое число обусловленности матрицы?

- ▶ При  $\kappa \gg 1$ ,  $q^* \rightarrow 1 \Rightarrow$  *очень медленная* сходимости. Например при  $\kappa = 100$ :  $q^* \approx 0.98$
- ▶ При  $\kappa \simeq 1$ ,  $q^* \rightarrow 0 \Rightarrow$  *ускорение* сходимости. Например при  $\kappa = 4$ :  $q^* = 0.6$

**Q:** какая геометрия у этого требования?

# Can we do better?

## Что нам известно

- ▶ Для выпуклых функций с Липшицевым градиентом градиентный спуск сходится как  $\mathcal{O}(1/k)$
- ▶ Для сильно выпуклых функций с Липшицевым градиентом градиентный спуск сходится с линейной скоростью  $q = \frac{\kappa-1}{\kappa+1}$

**Q:** есть ли методы, которые сходятся быстрее, и как это выяснить?

## Нижние оценки сходимости

Для обоих классов функций существуют такие «плохие» функции, для которых выполнены следующие оценки **снизу**

## Нижние оценки сходимости

Для обоих классов функций существуют такие «плохие» функции, для которых выполнены следующие оценки **снизу**

- ▶ для выпуклых функций с Липшицевым градиентом

$$f(x_{k+1}) - f^* \geq \frac{3L\|x_0 - x^*\|_2^2}{32(k+1)^2}$$

## Нижние оценки сходимости

Для обоих классов функций существуют такие «плохие» функции, для которых выполнены следующие оценки **снизу**

- ▶ для выпуклых функций с Липшицевым градиентом

$$f(x_{k+1}) - f^* \geq \frac{3L\|x_0 - x^*\|_2^2}{32(k+1)^2}$$

- ▶ для сильно выпуклых функций с Липшицевым градиентом

$$f(x_{k+1}) - f^* \geq \frac{\mu}{2} \left( \frac{\sqrt{\kappa} - 1}{\sqrt{\kappa} + 1} \right)^{2k} \|x_0 - x^*\|_2^2$$

## Нижние оценки сходимости

Для обоих классов функций существуют такие «плохие» функции, для которых выполнены следующие оценки **снизу**

- ▶ для выпуклых функций с Липшицевым градиентом

$$f(x_{k+1}) - f^* \geq \frac{3L\|x_0 - x^*\|_2^2}{32(k+1)^2}$$

- ▶ для сильно выпуклых функций с Липшицевым градиентом

$$f(x_{k+1}) - f^* \geq \frac{\mu}{2} \left( \frac{\sqrt{\kappa} - 1}{\sqrt{\kappa} + 1} \right)^{2k} \|x_0 - x^*\|_2^2$$

Эти оценки справедливы для таких методов, что

$$x_{k+1} = x_0 + \text{span}(f'(x_0), \dots, f'(x_k))$$

# Оптимальные методы

Про методы, которые в той или иной степени достигают нижних оценок, будет рассказано на следующей лекции:

- ▶ метод сопряжённых градиентов
- ▶ метод тяжёлого шарика
- ▶ градиентный метод Нестерова



# Резюме

- ▶ Общая схема работы методов оптимизации
- ▶ Скорости сходимости
- ▶ Градиентный спуск
- ▶ Свойства и сходимость
- ▶ Нижние оценки