

Децентрализованная оптимизация в условиях Поляка-Лоясевича

Николай Савельев

Московский физико-технический институт

*Курс: Моя первая научная статья
(практика, В.В. Стрижов)/Группы 774, 794, весна 2020
Консультант: А. Н. Безносиков*

Цель работы

Предложить метод решения больших систем уравнений, производящий вычисления на децентрализованных системах.

Метод решения

Сведение задачи решения системы уравнений к задаче децентрализованной ограниченной оптимизации, для которой возможен переход к задаче композитной оптимизации, но уже без ограничений.

- ① *Hamed Karimi, Julie Nutini, and Mark W. Schmidt* Linear convergence of gradient and proximal-gradient methods under the polyak- lojasiewicz condition. CoRR, abs/1608.04636, 2016.
- ② *Xinlei Yi, Shengjun Zhang, Tao Yang, Karl H. Johansson, Tianyou Chai* Linear Convergence for Distributed Optimization Under the Polyak-Łojasiewicz Condition. 2019.
- ③ *А. В. Гасников* Универсальный метод для задач стохастической композитной оптимизации. 2016.
- ④ *А. В. Гасников*. Современные численные методы оптимизации, метод универсального градиентного спуска. 2018.

Постановка задачи: ограниченная оптимизация

Требуется решить систему уравнений:

$$\begin{cases} f_1(x) = 0, \\ f_2(x) = 0, \\ \dots \\ f_m(x) = 0, \end{cases} \quad f_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, \quad i = 1, \dots, m.$$

Эквивалентная задача оптимизации:

$$g(x) := \sum_{i=1}^m f_i^2(x) \rightarrow \min_{x \in \mathbb{R}^n}. \quad (\text{EQ})$$

Задача оптимизации в децентрализованном виде:

$$\begin{aligned} \min_{x_i \in \mathbb{R}^n} \quad & \sum_{i=1}^m f_i^2(x_i), \\ \text{s.t.} \quad & x_1 = x_2 = \dots = x_m, \end{aligned} \quad (\text{DC})$$

где x_1, \dots, x_m — векторы решений на каждом из вычислителей.

Постановка задачи: композитная оптимизация

Пусть G – граф связи вычислителей децентрализованной системы; $K \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – матрица Кирхгофа графа G ;
 $W = K \otimes I_n \in \mathbb{R}^{nm \times nm}$ – матрица для контроля совпадения решений; $X \in \mathbb{R}^{nm}$ – вектор из x_1, \dots, x_m ; $F(X) = \sum_{i=1}^m f_i^2(x_i)$.

Эквивалентная запись задачи (3):

$$\begin{aligned} \min_{X \in \mathbb{R}^{nm}} \quad & F(X), \\ \text{s.t.} \quad & W^{1/2}X = 0. \end{aligned} \tag{LO}$$

При смягчении жестких условий возможен переход к задаче композитной оптимизации:

$$\min_{X \in \mathbb{R}^{nm}} \quad F(X) + R \|W^{1/2}X\|, \tag{CO}$$

где R – оптимизируемый параметр.

Предположения

Предположение 1

Граф G связный.

Предположение 2

Множество решений задачи (EQ) непусто.

Предположение 3

Градиент каждой из функций f_1, \dots, f_m удовлетворяет условию Липшица.

Предположение 4

Функция g удовлетворяет условию Поляка-Лоясиевича, то есть для всех $x \in \mathbb{R}^n$ выполнено $\frac{1}{2} \|\nabla g(x)\|^2 \geq \nu(g(x) - g^*)$, где $g^* = \min_{x \in \mathbb{R}^n} g(x)$, $\nu > 0$ – некоторая константа.

Децентрализованный градиентный метод

Вернемся к задаче:

$$\min_{X \in \mathbb{R}^{nm}} F(X) + R \|W^{1/2} X\|. \quad (\text{CO})$$

Пусть B_i – матрица из столбцов матрицы $W^{1/2}$, с номерами от $i \cdot n$ до $(i + 1) \cdot n - 1$ включительно.

Шаг децентрализованного метода для i -го вычислителя

$$x_i^{k+1} = x_i^k - h_i \cdot (f_i(x_i^k) \cdot \nabla f_i(x_i^k) + R \cdot B_i^T W^{1/2} X^k),$$

x_i^0 – произвольное начальное приближение,

$h_i > 0$ – фиксированный шаг.

Теорема

В предположениях 1-4 децентрализованный градиентный метод для задачи (CO) имеет линейную скорость сходимости.

Численный эксперимент

Сгенерированные данные

Рассматривается система линейных уравнений:

$$Ax = b,$$

где $A \in \mathbb{R}^{9 \times 9}$ – положительноопределенная матрица с заданным числом обусловленности $\mu(A)$,
 $b \in \mathbb{R}^9$ – произвольный вектор. a_i – i -я строка матрицы A .

Цель эксперимента

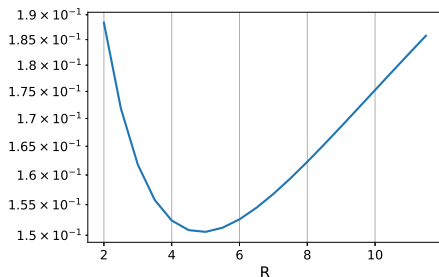
Сравнить предложенный метод с градиентным спуском при разных числах обусловленности матрицы A .

Шаг децентрализованного метода для i -го вычислителя

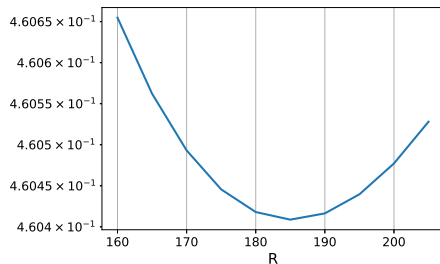
$$\begin{aligned} x_i^{k+1} &= x_i^k - h_i \cdot ((a_i^T x_i^k - b_i) \cdot a_i + R \cdot B_i^T W^{1/2} X^k), \\ x_i^0 &= 0; h_i = 1/\lambda_{\max}(a_i a_i^T + R \cdot B_i^T B_i). \end{aligned}$$

Оптимизация параметра R

$$\mu(A) = 10:$$



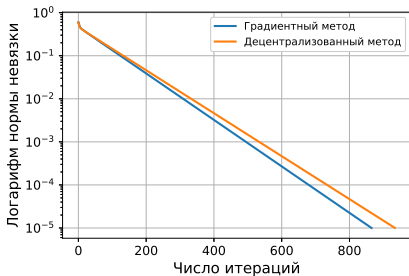
$$\mu(A) = 82:$$



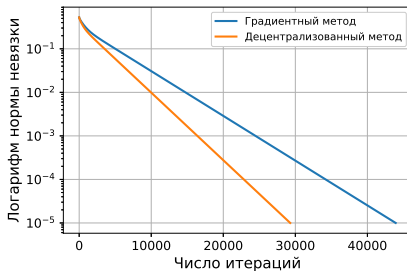
По вертикальной оси обоих графиков отложены логарифмы норм невязок решения после 1000 итераций децентрализованного метода на каждом вычислителе.

Сравнение с градиентным методом

$$\mu(A) = 10:$$



$$\mu(A) = 82:$$



Предложенный децентрализованный метод менее чувствителен к обусловленности матрицы A , чем градиентный метод.

- ❶ Задача решения системы уравнений представлена в виде задачи композитной оптимизации.
- ❷ Предложен децентрализованный метод решения задачи композитной оптимизации.
- ❸ Децентрализованный метод сравнивается с градиентным методом.
- ❹ Децентрализованный метод эффективнее градиентного метода для линейных систем с плохо обусловленной матрицей.