

Software System for Efficient Implementation of Numerical Algorithms Based on a Lexical Analyzer and a DBMS

Valentina Aleeva and Pavel Manatin

South Ural State University (National Research University)

Russian Supercomputing Days
Moscow, 2026

Актуальность исследования

- ▶ Одной из актуальных проблем в области параллельных вычислений является автоматизированное проектирование эффективных программ.
- ▶ Для решения этой проблемы для численных алгоритмов может применяться авторская концепция Q -детерминанта.

Цель и задачи исследования

Цель данного исследования — разработка программной системы автоматизированного проектирования и исполнения программ для эффективной реализации численных алгоритмов на основе лексического анализа представлений алгоритмов в форме Q-детерминантов и хранения результатов анализа в базе данных.

Для достижения цели решаются следующие задачи.

- 1) Проектирование и реализация программной системы.
- 2) Проведение вычислительных экспериментов и анализ их результатов.

Теоретическая основа исследования

- ▶ Теоретической основой исследования является концепция Q -детерминанта.
- ▶ Концепция Q -детерминанта — один из подходов к распараллеливанию численных алгоритмов.
- ▶ Концепция основана на универсальном описании численных алгоритмов — представлении в форме Q -детерминанта.

Алгоритмическая проблема

Алгоритмическая проблема может быть представлена в виде

$$\bar{y} = F(N, B),$$

где $N = \{n_1, \dots, n_k\}$ — множество параметров размерности проблемы или пустое множество,

B — множество входных данных,

$\bar{y} = (y_1, \dots, y_m)$ — множество выходных данных, F является вычислимой функцией параметров N .

Кратко о понятии Q -детерминанта алгоритма

- ▶ Пусть $\mathcal{A}$ — численный алгоритм для решения алгоритмической проблемы,
 Q — множество операций, используемых алгоритмом $\mathcal{A}$,
 B — множество входных и $\bar{y} = (y_1, \dots, y_m)$ — множество выходных данных алгоритма $\mathcal{A}$.
- ▶ Для каждого y_i ($i = 1, \dots, m$) строится Q -терм, который описывает все способы вычисления y_i в зависимости от B в соответствии с алгоритмом $\mathcal{A}$.
- ▶ Алгоритм $\mathcal{A}$ определяет свой Q -детерминант, как набор Q -термов.
- ▶ С помощью Q -детерминанта фактически выполняется логический анализ алгоритма $\mathcal{A}$, позволяющий строить все возможные вычисления y_i ($i = 1, \dots, m$) по B согласно алгоритму.

Примеры представления алгоритмов в форме Q -детерминантов

- ▶ Алгоритм умножения плотных матриц сразу представлен в форме Q -детерминанта $c_{ij} = \sum_{s=1}^k a_{is} b_{sj}$ ($i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m$).
 Q -детерминант состоит из nm безусловных Q -термов.
- ▶ Однако численные алгоритмы чаще не представлены в форме Q -детерминанта, но их представление можно найти.

- 1) Представление в форме Q -детерминанта алгоритма, реализующего метод Гаусса—Жордана решения СЛАУ (n — размер матрицы):

$$x_j = \{(u_1, w_1^j), \dots, (u_{n!}, w_{n!}^j)\} (j = 1, \dots, n).$$

Q -детерминант состоит из n условных Q -термов длины $n!$.

- 2) Представление в форме Q -детерминанта алгоритма, реализующего метод Якоби решения СЛАУ (n — размер матрицы, ε — точность вычислений):

$$x_i = \{(\|\bar{x}^1 - \bar{x}^0\| < \varepsilon, x_i^1), \dots, (\|\bar{x}^k - \bar{x}^{k-1}\| < \varepsilon, x_i^k), \dots\} (i = 1, \dots, n).$$

Q -детерминант состоит из n условных бесконечных Q -термов.

Q-эффективная реализация алгоритма

- ▶ Реализацией алгоритма $\mathcal{A}$, представленного в форме Q -детерминанта, называется вычисление Q -термов.
- ▶ Если реализация такова, что Q -термы вычисляются одновременно (параллельно) и при вычислении каждого из них операции выполняются по мере их готовности, то реализация называется *Q-эффективной*.
- ▶ Если алгоритм допускает распараллеливание, то его Q -эффективная реализация полностью использует ресурс параллелизма алгоритма.
- ▶ Реализация алгоритма называется *выполнимой*, если одновременно необходимо выполнять конечное непустое число операций.

Принципы организации программных систем автоматизированного проектирования и исполнения программ для эффективной реализации численных алгоритмов

Опыт разработки на основе концепции Q -детерминанта программных систем автоматизированного проектирования и исполнения программ для эффективной реализации численных алгоритмов дает возможность сделать вывод, что они должны включать подсистемы для решения следующих задач.

- 1) Получение представлений Q -эффективных реализаций алгоритмов с помощью представлений алгоритмов в форме Q -детерминантов и их сохранение.
- 2) Выполнение представлений Q -эффективных реализаций алгоритмов.

Принципы организации программных систем автоматизированного проектирования и исполнения программ для эффективной реализации численных алгоритмов

- ▶ Для формирования представлений алгоритмов в форме Q -детерминантов может применяться подсистема для генерации Q -детерминантов численных алгоритмов программной Q -системы, которая предназначена для исследования ресурсов параллелизма численных алгоритмов.
- ▶ Эта подсистема использует для описания алгоритмов блок-схемы в формате JSON.

Программная система для эффективной реализации численных алгоритмов на основе лексического анализатора и СУБД

В состав программной системы входят:

- 1) программа для формирования представления Q -эффективной реализации численного алгоритма с помощью лексического анализатора и сохранения представления в базе данных;
- 2) программа для выполнения представления Q -эффективной реализации численного алгоритма (Q -вычислитель) для общей и распределенной памяти.

Программная система для эффективной реализации численных алгоритмов на основе лексического анализатора и СУБД

- ▶ Для представлений Q -эффективных реализаций алгоритмов разработана специальная структура данных, состоящая из подструктур, каждая из которых описывает вычисление одного из элементов выходных данных алгоритма.
- ▶ Лексический анализатор спроектирован в соответствии с парадигмой объектно-ориентированного программирования.
- ▶ Для формирования представления Q -эффективной реализации алгоритма с использованием специальной структуры данных лексический анализатор анализирует Q -термы представления алгоритма в форме Q -детерминанта рекурсивным способом.

Программная система для эффективной реализации численных алгоритмов на основе лексического анализатора и СУБД

- ▶ Если выходная переменная вычисляется с помощью безусловного Q -терма, то соответствующая ей подструктура содержит одну строку, представляющую собой этот безусловный Q -терм.
- ▶ Если выходная переменная вычисляется с помощью условного Q -терма, то соответствующая ей подструктура содержит строки, описывающие пары условного Q -терма: первая из строк для пары представляет собой безусловный Q -терм пары, а остальные строки — выражения с одной операцией сравнения, полученные лексическим анализатором из логического Q -терма пары.
- ▶ Представление Q -эффективной реализации алгоритма хранится в базе данных в виде описанной специальной структуры данных.

Программная система для эффективной реализации численных алгоритмов на основе лексического анализатора и СУБД

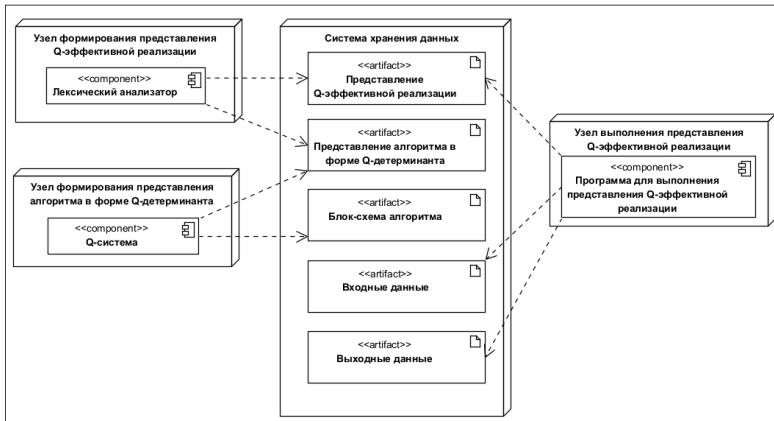


Рис. 2. Диаграмма размещения компонентов программной системы

Программная система для эффективной реализации численных алгоритмов на основе лексического анализатора и СУБД

Система реализована на C++ с использованием следующих библиотек и компонентов.

- ▶ **JSON for Modern C++** библиотека для синтаксического анализа JSON.
- ▶ **libpq** для взаимодействия с СУБД PostgreSQL.
- ▶ **компилятор GNU C++** с поддержкой OpenMP.

В качестве СУБД использовалась PostgreSQL.

Вычислительные эксперименты проводились на суперкомпьютере
“Торнадо ЮУрГУ”.

Вычислительные эксперименты

Производительность лексического анализатора на алгоритмах умножения плотных квадратных матриц и Дейкстры представлена в таблицах.

Таблица: Алгоритм умножения матриц

Порядок квадратной матрицы	2	5	10	20	30	40	50
Размер представления, Кбайт	0.4	8	58	482	1647	3928	7701
Время выполнения, с	0.7	1.7	5.5	12.0	39.9	61.4	84.5
Порядок квадратной матрицы	60		70	80	90	100	
Размер представления, Кбайт	13340		21220	31717	49013	62098	
Время выполнения, с	102.4		145.5	199.3	396.4	6812.6	

Таблица: Алгоритм Дейкстры

Количество вершин графа	3	4	5
Размер представления, Кбайт	8	1014	648918
Время выполнения, с	5.4	104.9	139518.6

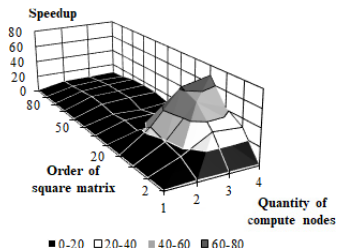
Вычислительные эксперименты

- ▶ При исследовании были определены динамические характеристики Q -вычислителя:
 - 1) ускорение – отношение времени выполнения последовательной программы ко времени выполнения параллельной программы;
 - 2) эффективность – отношение ускорения к количеству используемых вычислительных ядер.
- ▶ Последовательная программа – параллельная программа, выполняемая на одном ядре одного вычислительного узла.
- ▶ В других случаях на каждом вычислительном узле используются все 12 процессорных ядер и максимально возможное количество нитей, выполняющихся одновременно, равное 24.
- ▶ Измерения для каждой конфигурации проводились несколько раз и в качестве результата рассматривалось среднее значение.

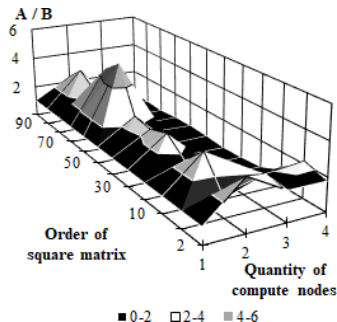
Вычислительные эксперименты

- ▶ Результаты данного исследования были сравнены с результатами предыдущего исследования, когда для хранения представлений Q -эффективных реализаций использовалась файловая система.
- ▶ На следующих далее рисунках время выполнения представлений Q -эффективных реализаций в данном исследовании, обозначенное через B , сравнивается со временем выполнения в предыдущем исследовании, обозначенным через A .
- ▶ Следовательно, отношение A/B можно интерпретировать как ускорение выполнения представлений Q -эффективных реализаций программной системой, использующей СУБД, по сравнению с программной системой, использующей файловую систему,

Вычислительные эксперименты



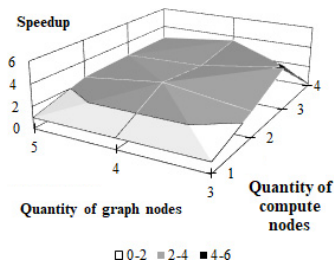
(a) Алгоритм умножения матриц



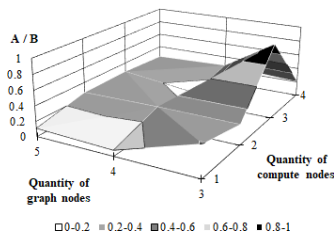
(b) Алгоритм умножения матриц (по сравнению с предыдущим исследованием)

Рис. 3. Ускорение Q-эффективной реализации алгоритма умножения матриц

Вычислительные эксперименты



(a) Алгоритм Дейкстры



(b) Алгоритм Дейкстры (по сравнению с предыдущим исследованием)

Рис. 4. Ускорение Q-эффективной реализации алгоритма Дейкстры

Заключение

- 1) Разработанная программная система реализует автоматическое построение и выполнение представлений Q -эффективных реализаций численных алгоритмов.
- 2) Вместе с тем по производительности она уступает обычным программным реализациям алгоритмов.
- 3) Однако, по мнению авторов, представление Q -эффективной реализации алгоритма в формате базы данных является перспективным и исследование следует продолжать.
- 4) Дальнейшие исследования по разработке программных систем для эффективной реализации численных алгоритмов будут направлены на уменьшение размеров представлений алгоритмов в форме Q -детерминантов, повышение быстродействия выполнения алгоритмов и использование искусственного интеллекта (ИИ).
- 4) Интеграция концепции Q -детерминанта и ИИ открывает большие перспективы для дальнейших исследований.

**Доклад окончен.
Благодарю за внимание!**