

УДК [004.032]

Гушанский Сергей Михайлович, Мушаев Алтман Яшкулович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КВАНТОВОГО УСКОРИТЕЛЯ НА СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СХЕМАХ

В статье рассматривается интеграция квантовых вычислений в качестве ускорителя в системах высокопроизводительных вычислений (HPC). Приложения квантовых вычислений, особенно в областях, требующих интенсивных вы-

числений, таких как моделирование, оптимизация и дифференциальные уравнения квантовых систем, естественным образом совпадают с исследованиями HPC. В статье подчеркивается необходимость координации гибридных вычислений на классических и квантовых узлах, особенно с учетом того, что в будущих системах ожидается наличие нескольких квантовых ускорителей с различными характеристиками. В статье обсуждается необходимость адаптации подходов к решению проблем для эффективного использования квантовых ресурсов сообществу высокопроизводительных вычислений. В нем также делается упор на разработку квантовых ускорителей с упором на сверхпроводящие схемы, которые требуют передовых систем управления для точного манипулирования кубитами. Интеграция квантовых ускорителей в среды высокопроизводительных вычислений может произвести революцию в вычислительных методологиях, что потребует стратегического управления ресурсами и постоянных инноваций в системах квантового управления и разработке гибридных алгоритмов.

Квантовый ускоритель; квантовый алгоритм; кубит; модель квантового вычислителя; квантовое запутывание; суперпозиция; квантовый параллелизм.

Gushanskiy Sergey Mikhailovich, Mushaev Altman Yashkulovich

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A QUANTUM ACCELERATOR BASED ON SUPERCONDUCTING CIRCUITS

The article discusses the integration of quantum computing as an accelerator in high performance computing (HPC) systems. Quantum computing applications, especially in computationally intensive fields such as simulation, optimization, and differential equations of quantum systems, naturally overlap with HPC research. The paper highlights the need to coordinate hybrid computing on classical and quantum nodes, especially since future systems are expected to have multiple quantum accelerators with different characteristics. The paper discusses the need for the high-performance computing community to adapt problem-solving approaches to efficiently utilize quantum resources. It also focuses on the development of quantum accelerators, with an emphasis on superconducting circuits that require advanced control systems to precisely manipulate qubits. The integration of quantum accelerators into high-performance computing environments has the potential to revolutionize computing methodologies, requiring strategic resource management and ongoing innovation in quantum control systems and hybrid algorithm development.

Quantum accelerator; quantum algorithm; qubit; quantum computer model; quantum entanglement; superposition; quantum parallelism.

Введение

Цифровая революция сильно изменила наш образ жизни, значительно увеличив наши вычислительные возможности и демократизировав доступ к ним. Будь то поиск маршрута к следующей встрече, поездка туда на скоростном поезде или просто проверка погоды перед отъездом, мы полагаемся на сложные компьютерные расчеты, доступ к которым в основном осуществляется через Интернет. В этой ситуации суперкомпьютерные центры и центры обработки данных играют центральную роль, размещая значительные вычислительные ресурсы, к которым их пользователи могут получить удаленный доступ. Это специализированное аппаратное обеспечение предназначено для более эффективного выполнения определенных функций, чем другие системы, такие как центральные процессоры (ЦП), архитектура которого рассчитана на универсальное использование. Эффективность аппаратного ускорения также помогает решить важнейшую проблему отрасли: потребление энергии. Суперкомпьютеры потребляют значительное количество энергии: по оценкам, системам Top500 HPC требуется более 650 МВт в совокупности при работе на пиковой мощности [1]. Другие ускорители, особенно графические процессоры, получают повышенную производительность благодаря своей специализированной конструкции и/или повышенному параллелизму, но в конечном итоге полагаются на ту же вычислительную парадигму (обычно на основе «фон Неймана») или, по крайней мере, технологию (обычно на основе CMOS), что и оборудование общего назначения. В отличие от этого, квантовые компьютеры позволяют фундаментально изменить формулировку задач, снижая класс сложности некоторых ключевых приложений [2]. Это изменение лежит в основе их потенциального преимущества. Квантовые компьютеры кодируют информацию в виде квантовых битов (кубитов) и используют внешние сигналы (например, микроволны или лазеры) для управления ими. Используя свойства квантовой физики, они могут быть использованы квантовыми алгоритмами для достижения экспоненциального улучшения масштабирования ресурсов. Несколько таких квантовых алгоритмов уже разработаны [3].

1. Теория квантовых вычислений

Моделирование квантовых систем [4], например, для химии или исследования материалов, задач оптимизации и решения дифференциальных уравнений, например, для гидродинамики или финансового прогнозирования, являются одними из ключевых областей, в которых были идентифицированы квантовые алгоритмы [5]. На практике эти квантовые алгоритмы обычно являются частью более крупных вычислений, выполняемых в системах НРС [6]. Таким образом, координация полных гибридных вычислений между различными узлами классических и квантовых вычислений [7] имеет важное значение. Управление этими ресурсами становится еще более важным с учетом того, что будущие гибридные системы, вероятно, будут иметь несколько квантовых ускорителей, возможно, с разными характеристиками. Эти характеристики могут включать, например, количество кубитов [8], время их когерентности и точность вентиля. Как долго информация, хранящаяся в кубитах, является надежной, а точность вентиля зависит от качества операций (то есть вентилях [9]), которые необходимо выполнить. Потенциал квантового ускорения был четко определен суперкомпьютерными центрами: недавнее исследование показало, что 76% центров высокопроизводительных вычислений по всему миру планируют использовать эту технологию к 2023 году, а 71% планируют перейти на локальные квантовые вычисления к 2026 году. Более того, некоторые мероприятия по содействию интеграции этих систем продолжаются или были объявлены, в частности, европейскими странами и Европейской комиссией [10]. Рассмотрим последствия интеграции квантовых вычислений в качестве ускорителя высокопроизводительных вычислений и влияние, которое это оказывает на вычислительные подходы. Также будет проанализировано влияние различных архитектур развертывания на производительность гибридной классически-квантовой системы.

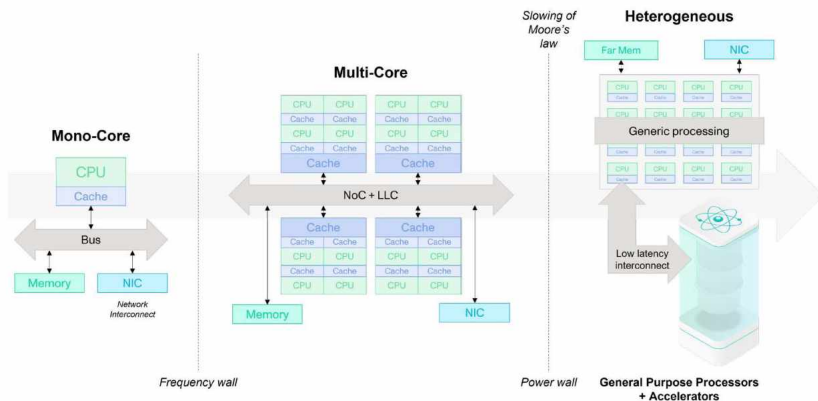


Рис. 1. Эволюция вычислительной архитектуры

Интеграция квантовых вычислений в НРС требует подхода, аналогичного подходу к другим ускорителям, которые мы видели в прошлом. Классический хост — это компьютер, который требует выполнения задач с помощью ускорителя. Хост перегружает эти задачи ускорителю, который выполняет задачи и возвращает желаемый результат. Разгрузка — это широко известный метод использования ускорителей, при котором отдельные ядра передаются на ускорители, чтобы они могли использовать эти ресурсы для своих специализированных превосходных возможностей, что приводит к сокращению общего времени принятия решения. Как будет обсуждаться позже, квантовые ускорители также могут получить выгоду от загрузки, когда часть классической обработки, необходимой для облегчения работы контроля качества, может выиграть от запуска в системе НРС. Успешная интеграция квантового ускорителя в среду НРС зависит от того, что сообщество пользователей НРС научится переосмысливать свои проблемы с учетом этих новых ресурсов; и это переосмысление должно осуществляться по нескольким различным направлениям.

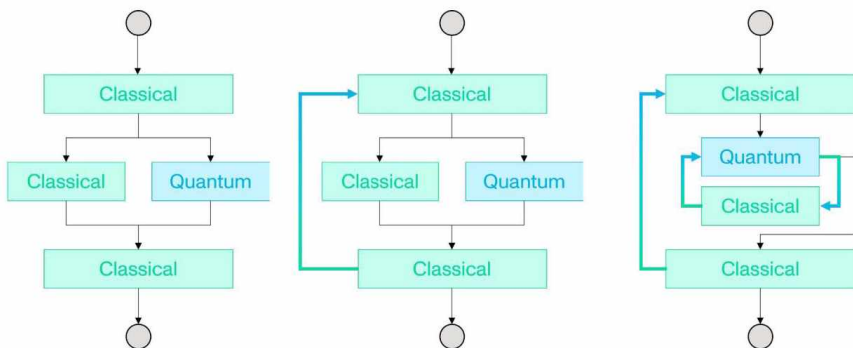


Рис. 2. Гибридные алгоритмы, использующие квантовое ускорение в (а) линейном и (б) итеративном рабочих процессах, а также (в) рабочем процессе, включающем работу по загрузке

Из-за присущей измерениям в квантовой механике вероятностной природы квантовый алгоритм должен повторяться несколько раз, и статистика результатов измерений обеспечивает желаемый результат работы алгоритма. Из-за этого квантовые алгоритмы больше всего напоминают классические методы прямого решения в том смысле, что промежуточные результаты бесполезны для решения проблемы, решением является только конечный результат. Из-за отсутствия использования методов прямого решения в высокопроизводительных вычислениях наш подход должен быть переосмыслен, и мы должны рассмотреть, какие части решаемых научных проблем могут быть оценены быстрее или точнее с помощью квантового компьютера. На этом этапе все ресурсы вычислений могут быть использованы с максимальной отдачей.

2. Разработка квантового ускорителя

Сверхпроводящие схемы – одна из ведущих технологий квантовых вычислений, направленная на решение сложных задач, недоступных классическим компьютерам. Предполагается разработка системы управления сверхпроводящими кубитами. Квантовые информационные процессоры требуют дорогостоящих электронных средств управления, которые могут точно манипулировать кубитами. Необходимо решить проблемы управления, разрабатывая модульное управляющее оборудование для нынешних и будущих сверхпроводниковых процессоров и открывая исходный код полного стека системы, чтобы к нему можно было получить доступ, улучшить

и использовать более широкое научное сообщество в области квантовой информатики.

Система объединяет радиочастотную систему FPGA (программируемая пользователем вентиляционная матрица), которая модулирует сигналы при комнатной температуре для манипулирования и измерения сверхпроводящих кубитов, охлажденных до криогенных температур.

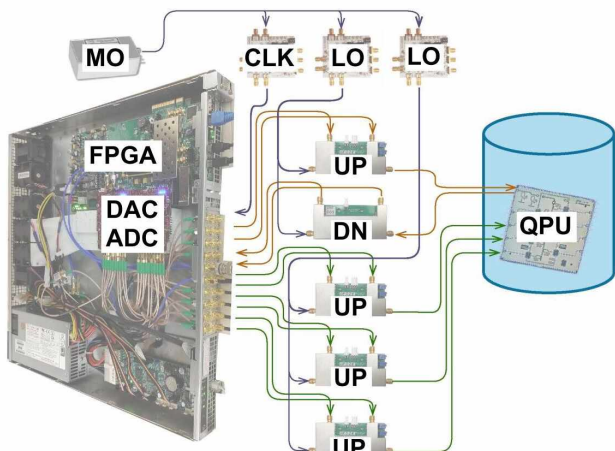


Рис. 3. Квантовый ускоритель на сверхпроводящих схемах

Заключение

В заключение отметим, что интеграция квантовых вычислений в качестве ускорителя в системах высокопроизводительных вычислений (HPC) является естественным прогрессом, учитывая значительное совпадение между приложениями квантовых вычислений и областями исследований, требующими больших вычислительных ресурсов. Квантовые алгоритмы показали себя многообещающими в таких областях, как моделирование квантовых систем, задачи оптимизации и дифференциальные уравнения, которые играют центральную роль в различных научных и промышленных приложениях. Поскольку квантовые алгоритмы обычно являются частью более крупных вычислений, выполняемых в системах HPC, решающее значение имеет координация гибридных вычислений на классических и квантовых узлах. Эта координация становится еще более важной, учитывая, что будущие гибридные системы, вероятно, будут включать в себя несколько квантовых ускорителей с различными характеристиками.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. N. C. Jones, J. D. Whitfield, P. L. McMahon, M.-H. Yung, R. V. Meter, A. Aspuru-Guzik, and Y. Yamamoto, Faster quantum chemistry simulation on fault-tolerant quantum computers, *New Journal of Physics* 14, 115023 (2012);
2. P. W. Shor, Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer, *SIAM J. Comput.* 26, 1484.1509 (1997);
3. A. W. Harrow, A. Hassidim, and S. Lloyd, Quantum algorithm for linear systems of equations, *Phys. Rev. Lett.* 103, 150502 (2009);
4. P. W. Shor, Scheme for reducing decoherence in quantum computer memory, *Phys. Rev. A* 52, R2493 (1995);
5. D. Gottesman, Stabilizer codes and quantum error correction (California Institute of Technology, 1997);
6. Bernstein, E., Vazirani U. Quantum complexity theory. In *Proceedings of the 25th ACM Symposium on the Theory of Computing*, pages 11 – 20, 1993;
7. *Кайе Ф.* Введение в квантовые вычисления [Текст] / Ф. Кайе, Р. Лафлам. – Москва; Ижевск: ПХД, 2009. – 360 с.;
8. *Guzik V.* Architecture and Software Implementation of a Quantum Computer Model / V. Guzik, S. Gushanskiy, M. Polenov, V. Potapov // 5th Computer Science On-line Conference 2016 (CSOS), Czech Republic, 2016. – P. 59 – 68;
9. *Guzik V., Gushanskiy S., Polenov M., Potapov V.* Development of Methodology for Entangled Quantum Calculations Modeling in the Area of Quantum Algorithms // 6th Computer Science On-line Conference 2017 (CSOS), Czech Republic, 2017. – P. 106 – 115;
10. *Бронштейн И. Н.* Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов [Текст] / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – Москва: Изд-во “Физматлит”, 1986. – 544 с.

Гушанский Сергей Михайлович – Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», e-mail: smgushanskiy@sfnu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 8(8634)371656; кафедра вычислительной техники, к.т.н., доцент.

Мушаев Алтман Яшкулович – Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», e-mail: mushaev@sfnu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 8(8634)371656; кафедра вычислительной техники, аспирант.

Gushanskiy Sergey Mikhailovich – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”; e-mail: smgushanskiy@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371656; the department of computer engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

Mushaev Altman Yashkulovich – Federal State Educational Institution of Higher Education “Southern Federal University”; e-mail: mushaev@sfedu.ru; 347928, Taganrog, lane. Nekrasovsky, 44; tel.: 8(8634)371656; Department of Computer Science; graduate student.