DOI: 10.17117/na.2015.10.03.086

<http://ucom.ru/doc/na.2015.10.03.086.pdf>

Поступила (Received): 30.10.2015

Гузик В.Ф., Гушанский С.М., Кубраков Е.С. Метод для связи программной модели квантового компьютера с аппаратным ускорителем

Guzik V.F., Gushanskiy S.M., Kubrakov E.S.
**Method of connection of quantum computer program
model with hardware accelerator**

В работе сделана попытка рассмотреть участие аппаратного ускорителя в процессе моделирования квантовых вычислений. Так как на сегодняшний день существует огромное количество различных симуляторов квантового компьютера, была предложена структура связи вычислительного ядра, программной модели и аппаратного ускорителя при помощи промежуточного представления – специальных команд, направленных на управление и передачу данных в системе моделирования

Ключевые слова: квантовый компьютер, моделирование, симуляция, квантовый алгоритм, аппаратный ускоритель

The article describes integration of hardware accelerator in the process of quantum computer modeling. Nowadays, there is a variety of different quantum computer simulators. It was suggested a connection structure of computing engine, program model and hardware accelerator using intermediate level – a set of special commands that are used for control and data transport in the modeling system

Key words: quantum computer, modeling, simulation, quantum algorithm, hardware accelerator

Гузик Вячеслав Филиппович

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой

Южный федеральный университет

г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42

Guzik Vyacheslav Filippovich

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Department

Southern federal university

Rostov-on-Don, Bolshaya Sadovaya st., 105/42

Гушанский Сергей Михайлович

Кандидат технических наук, доцент

Южный федеральный университет

г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42

Gushansky Sergey Mikhaylovich

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

Southern federal university

Rostov-on-Don, Bolshaya Sadovaya st., 105/42

Кубраков Евгений Сергеевич

Аспирант

Южный федеральный университет

г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42

Kubrakov Evgeny Sergeevich

Graduate

Southern federal university

Rostov-on-Don, Bolshaya Sadovaya st., 105/42

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант
№ НК 15-01-01270\15.

В настоящее время моделирование квантовых вычислений является одной из наиболее перспективных тем в индустрии информационных технологий. Физические квантовые компьютеры, которые сейчас демонстрируются, являются либо единичными экземплярами [1], либо не могут быть использованы для выполнения на них квантовых алгоритмов в силу недостаточной производительности [2]. Однако математический аппарат квантовых вычислений является универсальным для любого типа физического устройства.

Трудности, которые возникают при моделировании квантовых вычислений, связаны с матричной механикой и огромного количества информации, которое необходимо обрабатывать при симуляции квантового алгоритма, используя вычислительное устройство с классической архитектурой.

Весь процесс квантовых вычислений условно можно разделить на три составляющие. Если взять наиболее известные квантовые алгоритма Шора и Гровера [3, 4], то в них можно проследить, что весь процесс вычислений делится на 3 составляющие: инициализация квантового регистра, основной цикл работы алгоритма, измерение результатов алгоритма. Вычисления носят вероятностный характер, поэтому важным является отдельное выделение процессов инициализации и измерения состояния квантового регистра. Инициализация квантового регистра как правило происходит через установление выбранной амплитуды конкретного состояния. Измерение результатов приводит к коллапсу волновой функции, что в свою очередь подразумевает выделение одного состояния квантового регистра из множества возможных. Причем вероятность того, что определенное состояние получится на выходе при измерении, напрямую связано с его амплитудой. На основании утверждений, приведенных выше, можно представить схему взаимодействия структурных элементов квантового вычислителя.

Рис. 1. Схема взаимодействия структурных элементов квантового вычислителя

На сегодняшний день представлено достаточно большое количество симуляторов квантового компьютера [5]. Причем помимо программных симуляторов также используются подходы с использованием многопроцессорных систем и аппаратных средств [6] в виде ПЛИС [7, 8, 9]. Наиболее перспективным подходом является прием с использованием аппаратного ускорителя, как дополняющего программную модель модуля, необходимого для увеличения производительности при симуляции квантовых алгоритмов.

Описание метода для связи программной модели квантового компьютера с аппаратным ускорителем рассматривается с целью поддержки принципа модульности, так как при исследовании квантового алгоритма на начальных эта-

пах нет необходимости в моделировании квантового регистра, содержащего большое количество кубитов [10]. При таком подходе появляется возможность комбинировать различные подсистемы при моделировании; например, иметь в качестве вычислительного ядра аппаратный ускоритель, а в качестве графической подсистемы вывода сферу Блоха [11].

При разработке интерфейса для взаимодействия с аппаратным ускорителем моделирования работы квантового компьютера необходимо руководствоваться подходами, которые на данный момент используются. Существует несколько вариантов использования аппаратуры для создания проблемно-ориентированного комплекса для решения задач по симуляции вычислений. Один из подходов имеет начало в таком абстрактном представлении квантовых вычислений как квантовая сеть [11].

Рис. 2. Пример квантовой сети

Сеть представляет собой диаграмму, на которой изображены линии, которые можно интерпретировать как состояния кубитов в зависимости от времени. На данных линиях располагаются квантовые вентили – операции, разрешенные в квантовом компьютере, которые являются полностью обратимыми. Обратимость данных операций связана непосредственно с физической реализацией квантового компьютера и законами сохранения энергии, согласно которым квантовый компьютер в процессе своей работы не затрачивает энергии на сами вычисления. Затраты энергии в квантовом компьютере происходят при вводе и выводе информации.

Данный подход предполагает использование перепрограммируемой аппаратуры, для чего используются устройства ПЛИС [7]. Алгоритм представляется в виде квантовой сети, и физически на ПЛИС создаются блоки, моделирующие квантовые вентили. Для каждого отдельного алгоритма, который необходимо выполнить, ПЛИС перепрограммируется, что влияет на количество возможных циклов моделирования разных алгоритмов. Однако такой подход ориентируется на то, что квантовые вычисления носят вероятностный характер, и поэтому одного прогона алгоритма может быть недостаточно для оценки результата, для чего вводится некоторая величина ошибки на каждом шаге вычислений, которая может влиять на конечный результат и в действительности моделирует влияние внешних факторов. Основным недостатком такого подхода является то, что аппаратный ресурс ПЛИС ограничен по сравнению с ресурсом программной реализации и хранением информации о вентилях и кубитах в памяти компьютера.

Другим вариантом аппаратной реализации является построение проблемно-ориентированного процессора [8, 9], у которого в качестве макрокоманд используются операции, производимые квантовыми вентилями. Такой

процессор является повторением программных симуляторов с поправкой на то, что операции по изменению состояния модели квантового регистра выполняются не на центральном процессоре или видеокарте, а на устройстве, оптимизированном непосредственно под задачу симуляции работы квантового вычислителя. Структурную схему такого вычислителя можно представить следующим образом:

Рис. 3. Структурная схема проблемно-ориентированного аппаратного вычислителя для моделирования квантового компьютера

Блоки «Устройство управления» (УУ) и «Память микропрограммы» (ПМ) являются стандартными при реализации ускорителей. Главными функциями УУ являются осуществление инициализации данных, организация выборки и исполнение команды из ПМ. Также УУ необходимо получать данные извне и правильно их обрабатывать. Однако поскольку существует большое количество интерфейсов, то схема контроллера интерфейса здесь не рассматривается и будем условно предполагать, что данные поступают с шины X, данные на которой формируются контроллером интерфейса ускорителя.

Далее следуют блоки специфичные для ускорителя квантовых вычислений, а именно «Блок расчета последовательности и выборки состояний из ОЗУ» (БРПВС) и «Схема коммутации/выборки из ОЗУ» (СК). БРПВС реализует алгоритм, который ищет последовательность состояний, в зависимости от операции (однокубитовая или многокубитовая) и кубита(ов) на который будет применяться данное воздействие. Сигналы выборки с БРПВС поступают на вход СК, которая определяет как наиболее эффективно извлечь данные из «блока ОЗУ» (БО), так как ОЗУ может быть несколько для увеличения производительности и организации параллелизма вычислений.

«Блок параллельных АЛУ» (БПА) и «Схема перестановки состояний» (СПС) осуществляют непосредственно операции над данными извлеченными из ОЗУ. Данные блоки получают и возвращают информацию из СК как показано на рисунке 9.

По окончании вычислений УУ посылает сигнал в блок ОЗУ для выдачи результата на шину Y. Как и в случае получения данных, шину Y можно рассматривать как контроллер интерфейса, по которому осуществляется связь с ПК.

Главными особенностями данного аппаратного подхода к моделированию квантовых вычислений является осуществление параллелизма как для однокубитовых операций, так и для многокубитовых [12].

Существенным различием в двух выше описанных подходах является способ управления и воздействия на модель квантового регистра, что должно учитываться при разработке интерфейса для большего охвата возможных аппаратных устройств, связанных с моделированием квантового компьютера. В первом случае квантовая сеть, реализованная на ПЛИС, хранит состояние квантовой системы. Во втором случае состояние системы хранится в оперативной памяти аппаратного ускорителя.

В качестве устройства управления ускорителем выступает персональный компьютер. Для удобства реализации интерфейса необходимо произвести разделение его на несколько подсистем, среди которых выделяются: подсистема управления и вывода, подсистема интерпретации команд и подсистема связи с моделирующим устройством. Также стоит учесть, что при моделировании имеется возможность подключения аппаратного ускорителя и работа без него с программным ядром. На стороне устройства дополнительно создается подсистема приема и отправки команд.

Рис. 4. Структура подсистем интерфейса взаимодействия

Подсистема управления и вывода является прикладным программным интерфейсом для системы моделирования. Команды от системы управления поступают в подсистему интерпретации, которая переводит прикладные команды в промежуточное представление, понятное для программного ядра модели и подсистемы связи с аппаратным ускорителем, моделирующим квантовые вычисления. В свою очередь существует и обратный порядок действий, так как полученные данные от программной модели или устройства для моделирования могут быть представлены пользователю в различной форме. Для передачи данных ускорителю не является принципиальным, по какому протоколу будут переданы данные, так как на сегодняшний день имеется огромный выбор протоколов, отличающихся по простоте реализации и скорости передачи данных.

Подсистема связи с устройством является драйвером конкретного аппаратного ускорителя, так как принцип построения аппаратных устройств для моделирования квантовых вычислений может отличаться, как было показано ранее. Также она выполняет функции перевода данных, полученных от устрой-

ства в промежуточное представление для связи с компонентами подсистемы управления и вывода. Подсистема приема/отправки команд занимается верификацией принятых ускорителем данных, а также подготавливает данные, которые необходимо передать на ПК.

Наиболее важным в представленной на рисунке 4 схеме является промежуточное представление, которое использует система интерпретации для связи с программным ядром модели.

Перед началом моделирования система моделирования производит перевод конкретных функций прикладного интерфейса, из которых состоит моделируемый квантовый алгоритм, к промежуточному представлению. Если аппаратный ускоритель имеет память для хранения микропрограммы, то промежуточное представление управляющих команд передается на устройство, переводится в микрокоманды понятные устройству и сохраняется. Если память отсутствует, как в случае с первым вариантом реализации аппаратного моделирующего устройства, то по окончании моделирования все данные сразу передаются на ПК, так как для более гибкого управления необходимо устройство для хранения промежуточного результата.

Также имеется одна команда ввода данных, которая инициализирует модель квантового регистра в самом начале вычислений. Сами управляющие команды и далее в устройстве микрокоманды не содержат каких-то перманентных значений. Все состояние моделируемой системы хранится в модели квантового регистра.

Далее, в зависимости от того, необходим ли сразу результат введенного алгоритма, либо отладка, дается выбор опции для моделирования. При условии того, что управляющие команды хранятся в памяти микропрограммы устройства, можно пошагово проследить ход выполнения каждый раз давая сигнал ускорителю к выполнению моделирования следующего воздействия квантового вентиля на модель квантового регистра.

При моделировании работы квантового компьютера стоит учитывать тот факт, что приходится работать с данными большой размерности. Например, для моделирования работы квантового регистра с количеством кубитов 32 необходимо 2^{32} ячеек памяти. Поэтому необходимо дать возможность при моделировании копировать не все данные из устройства, а только определенную порцию, в зависимости от интересующих значений модели квантового регистра.

а)	Тип команды вентиль	Номер квантового вентилья	Кубит 1	Кубит 2	Кубит 3
б)	Тип команды инициализация	Маска для кубитов, которые при инициализации должны иметь амплитуду равную 1			
в)	Тип команды вывода	Нижняя граница вывода (номер начального квантового состояния)	Верхняя граница вывода (номер конечного квантового состояния)		
г)	Тип команды следующая команда	*при пошаговом выполнении			

**Рис. 5. а) Тип команды вентиль б) Тип команды инициализация
в) Тип команды вывод г) Тип команды следующая команда**

Можно дать схематичные изображения некоторых команд промежуточного представления, которые были описаны.

Представленный в работе метод для связи программной модели с аппаратным ускорителем является попыткой рассмотреть участие в моделировании квантовых вычислений дополнительного аппаратного вычислительного ядра, обеспечивающего большую производительность по сравнению с симуляторами, основанными на программных ядрах. Также интерфейс не исключает возможности работы системы моделирования с использованием программной модели на начальных этапах исследования квантовых алгоритмов. Благодаря дополнительному слою команд промежуточного представления удастся сохранить подключение к системе моделирования как программных моделей, так и аппаратных ускорителей для большей производительности квантовых алгоритмов при симуляции.

Список используемых источников:

1. Troels F. Ronnow, Zhihui Wang, Joshua Job, Sergio Boixo, Sergei V. Isakov, David Wecker, John M. Martinis, Daniel A. Lidar, Matthias Troyer. *Defining and detecting quantum speedup* // *Science*. 2014. Vol. 345. P. 420-424.
2. Nanyang Xu, Jing Zhu, Dawei Lu, Xianyi Zhou, Xinhua Peng, Jiangfeng Du. *Quantum Factorization of 143 on Dipolar-Coupling NMR system* // *Phys. Rev. Lett.* 2012. Vol. 109. Iss. 26.
3. Shor P. *Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring* // *Foundations of Computer Science: Conference Publications*. 1994. P. 124-134.
4. Grover L.K. *Quantum Mechanics Help in Searching for a Needle in a Haystack*. // *Phys. Rev. Lett.* 1997. Vol. 78 (2). P. 325-328.
5. Гузик В.Ф., Гушанский С.М., Евсеев О.К. Классификация архитектурных подходов к реализации моделей квантовых вычислителей // *Высокопроизводительные вычислительные системы* // *Труды молодых ученых ЮФУ и ЮНЦ РАН. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ*, 2011. С. 26-31.
6. Richter M., Arnold G., Trieu B., Lippert T. *Massively Parallel Quantum Computer Simulations: Towards Realistic Systems* // *John von Neumann Institute for Computing, NIC series*. 2007. Vol. 38. P. 61-68.
7. Khalid A.U. *FPGA Emulation of Quantum Circuits: master of Computer Engineering thesis: 31.10.2005*. McGill University. 2005. 73 p.
8. Кубраков Е.С. Аппаратные стратегии моделирования квантового компьютера // *X Ежегодная научная конференция студентов и аспирантов базовых кафедр Южного научного центра РАН: тезисы докладов*. Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2014. С. 71-72.
9. Кубраков Е.С., Гузик В.Ф., Гушанский С.М. Моделирование квантовых вычислений с точки зрения аппаратного подхода с применением алгоритма оптимизации // *Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета*, 2015. С. 90-94.
10. Schumacher B. *Quantum coding*. // *Phys. Rev.* 1995. Vol. A51 (4). P. 2738-2747.
11. Валиев К., Кокин А. *Квантовые компьютеры: надежды и реальность*. Ижевск: РХД, 2004. 320 с.
12. Гузик В.Ф., Гушанский С.М., Кубраков Е.С. Алгоритм оптимизации воздействия при моделировании однокубитовых и двухкубитовых квантовых вентилей // *Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2014)*. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета. 2015. Т. 1. С. 35-42.