

УДК 004.001

В.Ф. Гузик, С.М. Гушанский, Е.С. Кубраков**УСКОРЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ
С ПРИМЕНЕНИЕМ АППАРАТНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ
И РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ**

В последние несколько десятков лет остро стоит проблема по созданию квантового компьютера, использующего для вычислений квантомеханические эффекты, такие как квантовый параллелизм и квантовая запутанность. С помощью данных механизмов квантовый вычислитель способен решать некоторые из задач NP-класса за полиномиальное время. В настоящее время имеются прототипы устройств данного класса, но добиться эффективного решения запланированных задач с их помощью пока не представляется возможным из-за ряда сложностей в реализации. Однако существует математический аппарат, описывающий поведение квантовых частиц при помощи волновой функции. Этого аппарата достаточно, чтобы создавать решаемые эффективно только на квантовом вычислителе квантовые алгоритмы. Отсюда возникает необходимость в рассмотрении уже эффективности тех алгоритмов, которые были предложены для вычисления на квантовом компьютере. Единственным вариантом такой проверки является моделирование механизмов квантовых вычислений при помощи ныне существующих устройств с классической архитектурой. Так как эффективно промоделировать работу квантовой системы на устройствах с классической архитектурой не представляется возможным, остается предлагать методики для ускорения моделирования квантовых вычислений на классических системах.

Квантовые вычисления; моделирование квантовых вычислений; ускорение квантовых вычислений; распределенные вычисления.

V.F. Guzik, S.M. Gushansky, E.S. Kubrakov**ACCELERATING OF MODELING OF QUANTUM COMPUTING USING
HARD ACCELERATORS AND DISTRIBUTED COMPUTING**

In the past few decades the problem of creating quantum computer is one of the most important. Quantum computer uses the quantum mechanics such as quantum parallelism and quantum entanglement. Using this mechanisms quantum computer is able to solve some of the problems of NP-class in polynomial time. In our days the prototypes of such class of devices are created, but they can't be used for effective solving of the planned problems because of difficulties of realization. However, mathematical apparatus that describes the behavior of quantum particles using wave function exists. This apparatus allows creating algorithms that can be effectively solved only on quantum computer. Hence it's a problem of investigation of effectiveness of new quantum algorithms. The only option is modeling quantum system on classical devices. But the quantum system can't be modeled effectively on classical devices, hence it's suggested to use methodic of accelerating of modeling of quantum computing.

Quantum computing; modeling of quantum computer; accelerating of quantum computing; distributed computing.

Введение. При моделировании квантовых вычислений вводятся такие понятия, как кубит [1] и суперпозиция [2]. Сам квантовый регистр состоит из набора кубит, которые образуют между собой квантовую суперпозицию состояний квантового регистра. Из этого следует, что квантовый регистр хранит все возможные $N = 2^n$ значения, в отличие от регистра классического компьютера, хранящего только одно значение.

Квантовые вычисления состоят в изменении состоянии квантового регистра при помощи квантовых вентилях [3]. Эволюция системы кубит при моделировании может быть представлена при помощи следующих математических операций:

тензорного произведения для создания матрицы преобразования (данная матрица отражает соответствующий ей квантовый вентиль (гейт)) и перемножения матрицы преобразования на такую же матрицу либо на вектор-столбец, хранящий вероятности начальных состояний квантовой системы.

Для ускорения вычислений, применяющихся при моделировании квантовых процессов, предлагаются следующие способы: редукция матрицы преобразования с использованием теории графов [4] и распараллеливание вычислительного процесса с применением аппаратных ускорителей и распределенных вычислений.

В данной статье рассмотрен второй способ ускорения моделирования с использованием существующих средств распараллеливания.

Квантовый алгоритм поиска Гровера. Для сравнения результатов моделирования был выбран квантовый алгоритм поиска Гровера [5, 6], который находит решение уравнения $f(x) = 1$, где $f(x)$ есть булева функция от n переменных. При решении данной задачи на квантовом компьютере сложность алгоритма составляет $O(\sqrt{N})$, на классическом компьютере используется линейный поиск, поэтому необходимо $O(N)$ обращений к функции f .

В начале алгоритма происходит выравнивание вероятностей всех состояний квантового регистра при помощи гейта, выполняющего преобразование Адамара [3] ко всем кубитам. Далее производится набор итераций, где каждая итерация состоит из преобразования поворота фазы и диффузии [6]. На практике оптимальное количество итераций составляет порядка $\frac{\pi}{4}\sqrt{N}$, где N – количество состояний квантового регистра.

Для реализации гейтов, используемых в алгоритме Гровера, необходимо математическое ядро, которое выполняет две основные операции:

- 1) расчёт матрицы преобразования гейта для заданной системы кубит;
- 2) перемножение матрицы преобразования на вектор состояний.

В качестве примера приведем вычисления квантового алгоритма Гровера для системы из трех кубитов в системе Mathcad. Искомое значение положим равным шести (начиная с 0).

Алгоритм начинается с вычисления матрицы преобразования для гейта Уолша–Адамара:

$$W = H_0 \otimes H_1 \otimes \dots \otimes H_{n-1}, \quad (1)$$

где $H_i, i \in [0, n - 1]$ – преобразование Адамара или матрица вида

$$H_i := \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Полученный при этом оператор Уолша–Адамара имеет вид

$$W = \begin{pmatrix} 0.354 & 0.354 & 0.354 & 0.354 & 0.354 & 0.354 & 0.354 & 0.354 \\ 0.354 & -0.354 & 0.354 & -0.354 & 0.354 & -0.354 & 0.354 & -0.354 \\ 0.354 & 0.354 & -0.354 & -0.354 & 0.354 & 0.354 & -0.354 & -0.354 \\ 0.354 & -0.354 & -0.354 & 0.354 & 0.354 & -0.354 & -0.354 & 0.354 \\ 0.354 & 0.354 & 0.354 & 0.354 & -0.354 & -0.354 & -0.354 & -0.354 \\ 0.354 & -0.354 & 0.354 & -0.354 & -0.354 & 0.354 & -0.354 & 0.354 \\ 0.354 & 0.354 & -0.354 & -0.354 & -0.354 & -0.354 & 0.354 & 0.354 \\ 0.354 & -0.354 & -0.354 & 0.354 & -0.354 & 0.354 & 0.354 & -0.354 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Далее необходимо вычислить гейты поворота и диффузии. Гейт поворота представляет матрицу, которая действует как единичный оператор на все состояния кроме искомого:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Гейт диффузии для системы из трех кубит представляет матрица вида

$$D = \begin{pmatrix} -0.75 & 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & -0.75 & 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & 0.25 & -0.75 & 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & 0.25 & 0.25 & -0.75 & 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 & -0.75 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 & -0.75 & 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 & -0.75 & 0.25 \\ 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 & -0.75 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Элементы оператора диффузии $i \neq j$, где $i \in [0, n - 1]$, $j \in [0, n - 1]$, имеют значение $\frac{2}{N}$, где N – количество состояний квантового регистра. Элементы с индексами $i = j$ имеют значения $-1 + \frac{2}{N}$.

После вычисления всех необходимых матриц преобразований основные шаги для вычисления алгоритма Гровера имеют вид

$$\text{Result} := D \cdot R \cdot D \cdot R \cdot W \cdot \text{Vector} = \begin{pmatrix} -0.088 \\ -0.088 \\ -0.088 \\ -0.088 \\ -0.088 \\ -0.088 \\ 0.972 \\ -0.088 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Количество итераций операторов D и R составляет:

$$\frac{\pi}{4} \sqrt{N}. \quad (7)$$

Результаты экспериментов. Чтобы как можно полно отразить эффекты ускорения, рассмотрены различные варианты систем, аппаратных средств и инструментов для распараллеливания. Варианты предложенных систем находятся в табл. 1.

Таблица 1

Варианты инструментов и систем для распараллеливания

Инструмент для ускорения	Архитектура системы
Без инструмента для ускорения	Однопроцессорная, общая память
OpenMP	Многопроцессорная, общая память
MPI	Многопроцессорная, распределенная память

В качестве языка для разработки был выбран язык VC++, так как его использование позволило произвести исследования для всех рассматриваемых в статье архитектур. Инструменты, которые были выбраны для исследования, представляют одни из наиболее популярных средств для параллельных вычислений на кластерах.

OpenMP – открытый стандарт для распараллеливания программ на языках Си, Си++ и Фортран. Описывает совокупность директив компилятора, библиотечных процедур и переменных окружения, которые предназначены для программирования многопоточных приложений на многопроцессорных системах с общей памятью.

MPI – программный интерфейс (API) для передачи информации, который позволяет обмениваться сообщениями между процессами, выполняющими одну задачу.

Результаты эксперимента представлены на рис. 1.

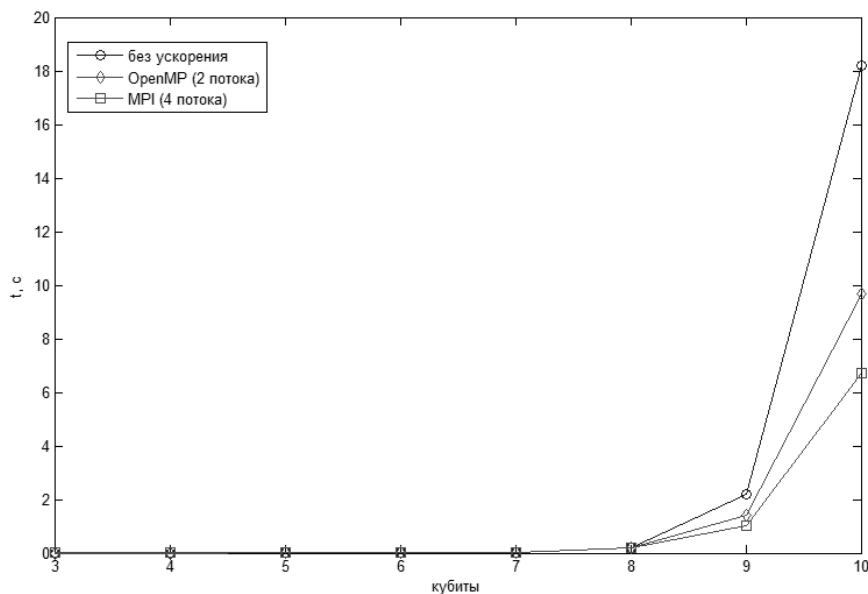


Рис. 1. Результаты эксперимента

Заключение. В ходе исследования была продемонстрирована возможность ускорения моделирования квантовых вычислений при помощи распределенных вычислений. Данный подход находит своё применение на практике в написании математических ядер, которые направлены не только на реализацию моделирования квантовых вычислений, но и на увеличение производительности вычислений и количества моделируемых кубитов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Schumacher B.* Quantum coding // *Phys. Rev.* – 1995. – Vol. A51, № 4. – P. 2738-2747.
2. *Monroe C., Meekhof D.M., King B.E., Wineland D.J.* A “Schrodinger Cat” Superposition State of an Atom // *Science.* – 1996. – Vol. 272. – P. 1131-1135.
3. *Barenco A., Bennett C.H., Cleve C., DiVincenzo D.P., Margolus N., Shor P., Sleater T., Smolin J.A., Weinfurter H.* Elementary gates for Quantum Computation // *Phys. Rev.* – 1995. – Vol. A52, № 5. – P. 3457-3467.
4. *Viamontes G.F., Markov I.L., Hayes J.P.* Graph-based Simulation of Quantum Computation in the Density Matrix Representation // *Quantum Information and Computation.* – 2005. – Vol. 5, № 2. – P. 113-130.
5. *Grover L.K.* Quntum Mechanics Help in Searching for a Needle in a Haystack // *Phys. Rev. Lett.* – 1997. – Vol. 78, № 2. – P. 325-328.
6. *Валиев К.А., Кокин А.А.* Квантовые компьютеры: надежды и реальность // *Регулярная и хаотическая динамика.* – Ижевск, 2001. – С. 92-95.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Л.П. Фельдман.

Гузик Вячеслав Филиппович – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: gvf@favt.tsure.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Энгельса, 1, ГСП-17А; тел.: 88634371737; кафедра вычислительной техники; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор,

Гушанский Сергей Михайлович – кафедра вычислительной техники; к.т.н.; доцент.

Кубраков Евгений Сергеевич – кафедра вычислительной техники; магистрант.

Guzik Vyacheslav Filippovich – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: gvf@favt.tsure.ru; GSP-17A, 1, E’ngel’sa street, Taganrog, 347928, Russia; phone: 88634371737; the department of computer engineering; head the department; dr. of eng. sc.; professor.

Gushnsky Sergey Michailovich – the department of computer engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

Kubrakov Evgeny Sergeevich – the department of computer engineering; postgraduate student.

УДК 004.4’42

Ю.В. Чернухин, М.Ю. Поленов, Д.В. Булгаков

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ МОДЕЛЕЙ НЕЙРОСЕТЕВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МУЛЬТИТРАНСЛЯЦИИ

Описывается подход к трансляции моделей устройств с языков описания аппаратуры на примере генерации моделей компонент нейропроцессорной сети управления мобильным роботом. Данный подход, реализуемый на основе средств многоязыковой трансляции (Мультитрансляторе), позволяет при помощи создаваемых трансляционных модулей переводить модели с различных языков описания аппаратуры в SimuLink-модели, что существенно расширяет возможности исследования и моделирования различных систем управления объектами за счет использования в цикле проектирования функционала среды виртуального моделирования MATLAB. Рассмотренный подход к использованию многоязыковой трансляции для решения задач перевода моделей особенно эффективен на этапе логического синтеза компонент нейросетевых систем управления и получения структурного описания в mdl-формате из описания проекта системы на языках описания аппаратуры.

Нейропроцессорная сеть; языки описания аппаратуры; многоязыковая трансляция; мультитранслятор; трансляционный модуль; SimuLink-модели.