О.К. Евсеев, С.М. Гушанский, В.Ф. Гузик

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ КВАНТОВОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЯ

Классические компьютеры строятся на принципах использования конечных множеств состояний и последовательного выполнения операций. Это приводит к фундаментальным ограничениям возможностей их развития.

По другим принципам организуется работа квантовых компьютеров. Квантовый компьютер или, что корректнее, вычислитель [1] – вычислительное устройство, работающее по законам квантовой физики на бесконечном множестве состояний и имеющее экспоненциальную производительность за счёт квантового параллелизма вычислений. Подобные особенности позволяют реализовывать вычисления по экспоненциальным алгоритмам при полиномиальных затратах времени, т.е., к примеру, задача факторизации многоразрядных чисел более не будет являться неразрешимой за конечный интервал времени.

Одна из отличительных особенностей квантового вычислителя – принципиально иные способы алгоритмического описания способа решения задачи [4]. Квантовые алгоритмы имеют крайне мало общего с классическими и, несмотря на кажущуюся простоту, слабо поддаются логическому синтезу. Просчитать работу алгоритма можно, прибегнув к матричному математическому аппарату, что является очень трудоёмким процессом при отсутствии специализированного ПО. Использование же немногих существующих физических моделей не доступно для рядового разработчика.

В данный момент существует множество программных моделей квантовых вычислителей, обладающих той или иной степенью универсальности. Задача подобных моделей – математически просчитать работу квантовой вычислительной системы под действием последовательности специфических управляющих воздействий.

Целью данной работы является синтез универсальной программной модели квантового вычислителя, позволяющей проводить полный цикл разработки и отладки квантовых алгоритмов. В её основу положен матричный метод математического моделирования квантовых вычислений [2] и общепринятый подход к представлению алгоритмов квантовых вычислений в виде схем.

В отличие от классического компьютера, работающего с состояниями из конечного числа битов, квантовый компьютер работает с конечными наборами элементарных состояний, называемых q-битами. Каждый q-бит имеет два выделенных состояния (к примеру, для спинов то это состояния «спин вверх» и «спин вниз»). Выделенные (базисные) состояния определяют только базовые состояния системы, но также возможны и любые линейные комбинации базисных состояний с комплексными коэффициентами. Состояние такой системы выражается пси-функцией [3] и описывается выражением:

$$\psi(x) = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle. \qquad (1)$$

Эта запись в точности соответствует разложению вектора двумерного комплексного пространства по базису $|0\rangle$ и $|1\rangle$ (рис.1).

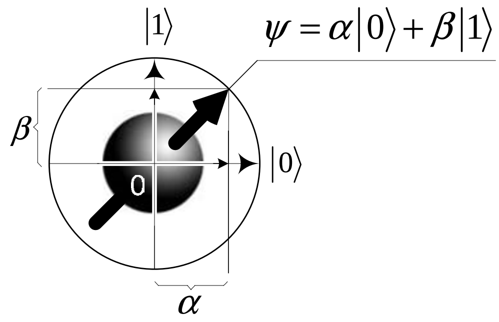

Рис.1. Квантовый бит

Величины α и β в выражении (1.1) являются амплитудами вероятности состояния логического нуля и логической единицы. Определить, в каком именно состоянии находится бит, можно, измерив его пси-функцию. Измерение даст нам состояние $|0\rangle$ с вероятностью $|\alpha|^2$, либо $|1\rangle$ с вероятностью $|\beta|^2$. Это накладывает на амплитуды нормирующее ограничение:

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1. \qquad (2)$$

Для реализации вычислительного процесса может использоваться несколько q-битов, образующих q-битовый ансамбль [3]. Состояние q-бита можно представить вектором в двухмерном комплексном векторном пространстве с выделенным ортонормированным базисом $\{|0\rangle, |1\rangle\}$. Возможные состояния систем из *n* q-битов, в которой состояние каждой частицы описывается вектором в двухмерном пространстве, образует пространство состояний размерностью 2^n. Этот факт приводит к экспоненциальному росту пространства состояний и гипотетическому экспоненциальному увеличению эффективности вычислений.

Пространство состояний системы нескольких микрочастиц описывается через тензорное произведение пространств состояний частиц системы [1], причём размерность полученного пространства состояний будет равна произведению размерностей пространств стояний микрочастиц, образующих систему.

Тензорное произведение 2-х пространств с базисами $\{l_i\}$ и $\{m_j\}$ даёт пространство с базисом из элементов $l_i \otimes m_j$ и, соответственно размерностью $i \times j$. В случае квантового бита базис выглядит как $\mathrm{C}^2 = \{|0\rangle, |1\rangle\}$, для 2-х квантовых бит $(\mathrm{C}^2)^{\otimes 2} = \{|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle\}$, для n – $(\mathrm{C}^2)^{\otimes n} = \{|x_1, x_2, \dots x_n\rangle\}$, $x_i \in \{0, 1\}$. Так для двух q-битов, с базисом $\{|0\rangle, |1\rangle\}$, будет получен базис $\{|0\rangle \otimes |0\rangle, |0\rangle \otimes |1\rangle, |1\rangle \otimes |0\rangle, |1\rangle \otimes |1\rangle\}$, т.е. $\{|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle\}$.

Пси-функция такой системы будет иметь вид:

$$\Psi_2' = \Psi_1 \otimes \Psi_1 = \begin{bmatrix} \langle 0|\alpha_0 \\ \langle 1|\beta_0 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} \langle 0|\alpha_1 \\ \langle 1|\beta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle 00|\alpha_0\alpha_1 \\ \langle 01|\alpha_0\beta_1 \\ \langle 10|\beta_0\alpha_1 \\ \langle 11|\beta_0\beta_1 \end{bmatrix}. \tag{3}$$

В общем случае состояние ансамбля из n q-битов описывается пси-функцией вида:

$$\Psi_n = \sum_{k=0}^{2^n-1} \lambda_k |k\rangle, \tag{4}$$

где

$$\sum_{k=0}^{2^n-1} |\lambda_k|^2 = 1 \text{ и } k = \overline{0, 2^n - 1}. \tag{5}$$

Существуют наборы операторов, отражающих формализованные воздействия на квантовую систему. Размерность оператора соответствует размерности рассматриваемой подсистемы.

Приведу пример: воздействие оператора CN, называемого квантовым мультиплексором приводит к обмену состояниями 3-го и 4-го бита подсистемы.

$$CN \times \Psi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} c_{00} \\ c_{01} \\ c_{10} \\ c_{11} \end{pmatrix} \begin{matrix} |00\rangle \\ |01\rangle \\ |10\rangle \\ |11\rangle \end{matrix} = \begin{pmatrix} c_{00} \\ c_{01} \\ c_{11} \\ c_{10} \end{pmatrix} \begin{matrix} |00\rangle \\ |01\rangle \\ |10\rangle \\ |11\rangle \end{matrix}. \tag{6}$$

Если A − множество (унитарных) операторов, то квантовая схема в базисе A − это последовательность операторов $U_1[A_1], U_2[A_2], \ldots U_l[A_l]$, где $U_j \in A$ и A_j − множество q-битов. Параметры выбранной квантовой системы вместе с квантовой схемой и задают квантовое вычисление.

Условное обозначение оператора представлено на рис.2. Каждая горизонталь квантовой схемы (см. рис.2) соответствует одному биту системы.

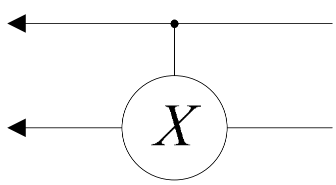

Рис.2. Условное обозначение оператора

Квантовая схема может иметь вид (рис.3):

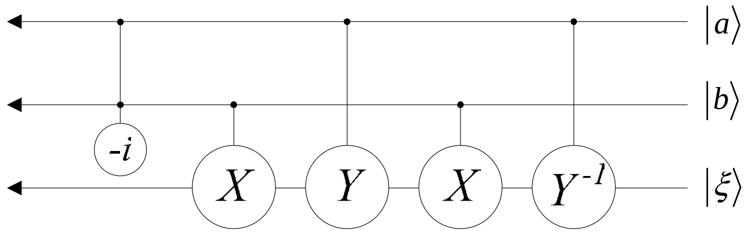

Рис.3. Квантовая схема оператора Тоффли

Данная схема реализует оператор Тоффли, выполняющий перестановку значений бита $\left|\xi\right\rangle$ под управлением битов $\left|a\right\rangle$ и $\left|b\right\rangle$.

$$-iXYX^{-1}Y^{-1}\otimes\left|a\right\rangle\otimes\left|b\right\rangle\otimes\left|\xi\right\rangle=\begin{cases}\sigma_x\otimes\left|\xi\right\rangle,\ \textit{при}\ \ a=b=1\\ \quad I\otimes\left|\xi\right\rangle,\ \textit{иначе}\end{cases}. \tag{7}$$

Для квантового вычисления может также временно задействоваться условно пустая память, реализованная в том же квантовом регистре [2]. Дополнительная память возвращается в исходном виде после окончания вычисления.

Произвольная функция F(x) вычисляется данной квантовой схемой, если после применения последовательности операторов U к начальному состоянию системы $\left|\psi,0^{N-n}\right\rangle$, на 1-ых m q-битах с большой вероятностью будет получено её значение [2]. (Остальные q-биты участвуют в вычислении в качестве временной памяти.)

Очевидно, что квантовый алгоритм решения задачи будет выглядеть, как последовательность квантовых схем, применяемая к начальным условиям данной задачи.

Разрабатываемая программная модель производит моделирование квантового вычисление по принципу: «определение набора q-бит – инициализация пси-функций – выбор базиса квантовой схемы – графическое построение схемы в выбранном базисе – организация пошаговой эволюции квантовой схемы – интерпретация результатов моделирования в виде выходной пси-функции»

Программа состоит из 3-х компонентов:

1. Редактор матричных библиотек.
2. Схемопостроитель и математическая моделирующая подсистема.
3. Подсистема интерпретации результатов.

Редактор библиотек (рис.4) позволяет создавать матрицы, используемые при построении квантовых схем и описывающие формализованные воздействия на q-биты вычислительной системы. Матрицы сохраняются в файл библиотек, подключаемый к модели.

Моделирующая подсистема состоит из средства инициализации q-битов (рис.5), схемопостроителя (рис.6) и, непосредственно, подсистемы реализующей работу математического аппарата, описывающего квантовые вычисления.

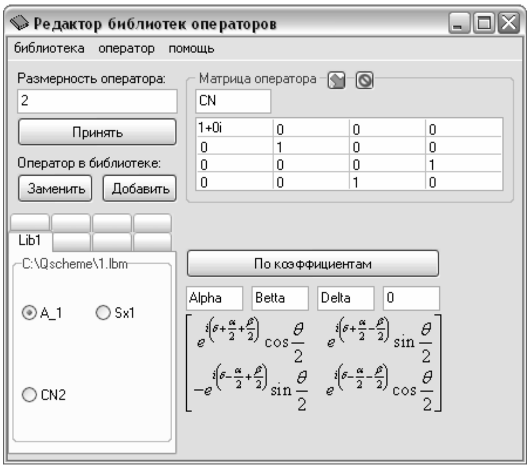

Рис.4. Окно редактора матричных библиотек

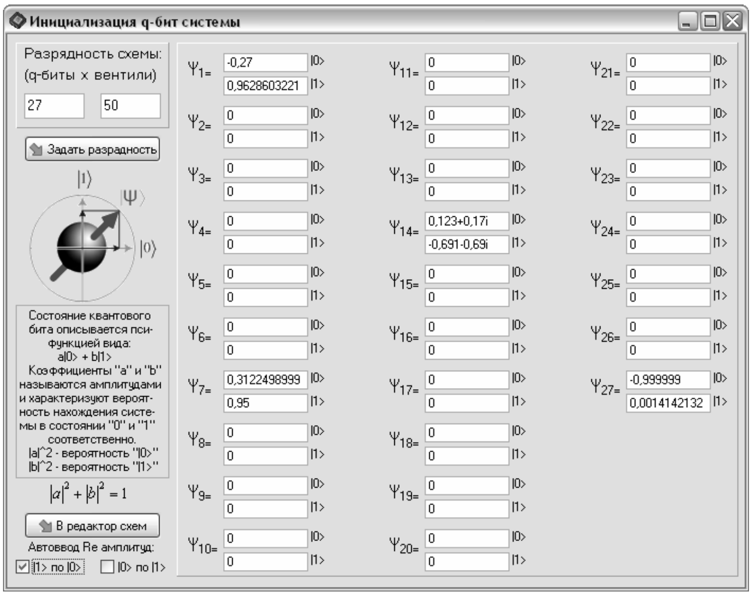

Рис.5. Окно инициализации квантовых бит

Квантовая схема набирается из операторов, включённых в библиотеку, выбранную в качестве базисной. Сама схема задаётся графически по общепринятым правилам. Горизонтали представляют q-биты. Эволюция системы организуется посредством применения операторов к подсистемам квантовых бит и может быть представлена конечной последовательностью состояний пси-функций системы.

Процесс моделирования, фактически, определяется последовательностью прохождения «вертикалей» схемы с соответствующими операторами, т.е. следованием временных срезов, характеризующих эволюцию пси-функции системы q-битов.

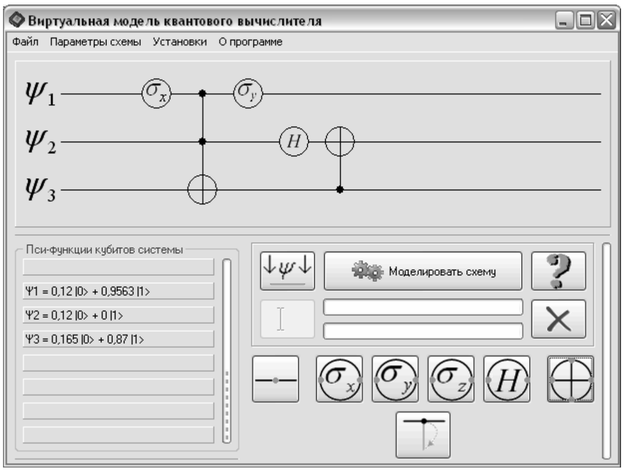

Рис.6. Редактор квантовых схем

Результат вычисления представляется последним из серии значений последовательности пси-функций, получаемых в ходе работы моделирующей подсистемы. Амплитуды выходной пси-функции могут быть использованы для построения гистограммы выходной вероятности.

Данная модель реализует общепринятый математический подход к описанию квантовых вычислительных процессов и может служить универсальным инструментом синтеза и проверки квантовых алгоритмов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Квантовый компьютер и квантовые вычисления // Регулярная и хаотическая динамика / Под ред. *Садовничего В.А.* – Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 1999. – 262 с.
2. *Риффель Э., Полак В.* Основы квантовых вычислений // Квантовый компьютер и квантовые вычисления. – Москва: Квантовый компьютер и квантовые вычисления, 2000. т. 1, № 1.
3. *Гузик В.Ф., Гушанский С.М., Погорелов Р.А.* Моделирование работы квантового кода коррекции с многократным использованием кодирующей ансциллы // УСиМ, №5(205). – С. 3-7.
4. *Гузик В.Ф., Гушанский С.М.* Моделирование квантовых схем // Известия ТРТУ. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005, №9(53). – С. 66.

Ю.В. Чернухин, М.В. Крамарь

ПРОБЛЕМЫ СИНТЕЗА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ТРАНСЛЯЦИОННОГО МОДУЛЯ МУЛЬТИТРАНСЛЯТОРА ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЧЕВЫХ СООБЩЕНИЙ

В науке и технике повсеместно используются различные формальные языки и прежде всего языки программирования. Все они построены по образу и подобию естественных языков со значительным упрощением, а именно с помощью формальных грамматик. Большинство используемых грамматик – контекстно-независимые (контекстно-свободные). Это означает, что правило для такой грамматики имеет вид: <символ1> -> <символ2> <символ3>, где в левой части находится всего один символ. Такие грамматики достаточно просты, однако они не