

Суперкомпьютерное моделирование джозефсоновских кубитов

М.В. ДЕНИСЕНКО, А.М. САТАНИН

Кафедра теоретической физики физического факультета ННГУ

Элементарным узлом квантового компьютера является кубит – устройство, которое может находиться не только в двух состояниях, но и в суперпозиции этих состояний. Перспективными являются кубиты, реализуемые на джозефсоновских переходах – тонких сверхпроводящих проволоках, в которые «вмонтированы» слабые связи – диэлектрические прослойки. Переход Джозефсона ведет себя аналогично квантовому нелинейному маятнику, два нижних уровня которого функционируют как кубит. Численное моделирование динамики связанных кубитов крайне затратно, поскольку число состояний растет экспоненциально с ростом числа кубитов. В данной работе для моделирования динамики джозефсоновских кубитов используется метод квантовых траекторий (квантовый метод Монте-Карло). Благодаря естественному параллелизму этот метод допускает эффективное ускорение с использованием графических ускорителей (GPU) и кластерных методов распараллеливания.

В последнее время наметился существенный прогресс в разработке и реализации кубитов – элементарных рабочих элементов квантового компьютера [1]. В этом необычном устройстве для вычислений используются не стандартные (классические) алгоритмы, а процессы квантовой природы, так называемые квантовые алгоритмы, в основе которых лежат квантово-механические эффекты, такие как квантовый параллелизм и квантовая запутанность.

Как известно, в обычных компьютерах информация кодируется с помощью двоичного кода (0 и 1), единицей информации является бит, что схематично можно изобразить стрелочкой с двумя фиксированными положениями: верх и низ (см. рис. 1 (а)). В квантовом компьютере логическими элементами являются кубиты, которые могут находиться не только в базисных состояниях «вверх» и «вниз», но и в суперпозиции состояний нуля и единицы [2]. Зачастую схематично кубит изображают единичным вектором, соединяющим начало координат с точкой на сфере, называемой сферой Блоха (см. рис. 1(б)). Если на данной сфере за точками закрепить какую-то определенную «информацию», то, как это ни парадоксально, в кубит можно записать бесконечное число информации!

Джозефсоновские кубиты. Одним из перспективных кандидатов на роль логического элемента квантового компьютера являются джозефсоновские кубиты (названные так по имени английского физика Б. Джозефсона, который впервые предсказал возможность протекания сверхпроводящего тока через диэлектрическую прослойку). Данный кубит представляет собой сверхпроводящую петлю, прерванную тремя джозефсоновскими переходами (3JJ-кубит) (рис. 2). Логическими состояниями являются направления незатухающего тока, циркулирующего в сверхпроводящей петле. Например, Дж. Моои (J.E. Mooij) с сотрудниками был предложен и реализован кубит с двумя дополнительными джозефсоновскими переходами [3] (см. рис. 2(а)). Перспективным является кубит, разработанный Е. Ильичёвым с сотрудниками, в котором осуществлена связь кубита с высокочастотным резонансным колебательным контуром (см. рис. 2(б)), что позволяет диагностировать работу перехода в переменном поле [4].

Джозефсоновские кубиты обладают малой диссипацией, хорошей устойчивостью к шумам, масштабируемостью и относительно простым способом управления со-

стояниями, что важно в квантовой информатике при передаче, хранении и обработке информации.

Амплитудная спектроскопия. В последнее время большое внимание уделяется вопросу спектроскопического исследования кубитов как одному из способов получения информации об энергетических уровнях системы кубитов, о населенностях уровней, о шумах, действующих на систему, и т.д. Первоначально управление состояниями джозефсоновских кубитов и исследование динамических процессов (раби-осцилляций) осуществлялось путем воздействия электромагнитного резонансного слабого поля с частотой, сравнимой с расстоянием между уровнями кубитов. Благодаря этому был продемонстрирован контроль населенностей кубитов. В системе связанных кубитов в пределе слабых полей были продемонстрированы перепутанные состояния, методика «неразрушающих измерений», выполнены измерения времен декогеренции и параметров кубитов.

В связи с этим огромный интерес вызывает метод амплитудной спектроскопии [5], в основе которой лежит получение информации о системе с помощью функции отклика по амплитудам постоянного и переменного поля сигнала при фиксированной частоте. В результате экспериментов, основанных на методе амплитудной спектроскопии, получены интерференционные картины (пример из работы [5] приведен на рисунке 3), которые называют «алмазными линиями» (diamond lines). Наблюдается аналогия формирования интерференционной картины Ландау – Зинера – Штюкельберга населенностей кубита с интерферометром Маха – Цендера. Анализируя интерференционные картины населенностей, можно извлечь дополнительную информацию об энергетических уровнях кубита и параметрах шума, действующих на систему.

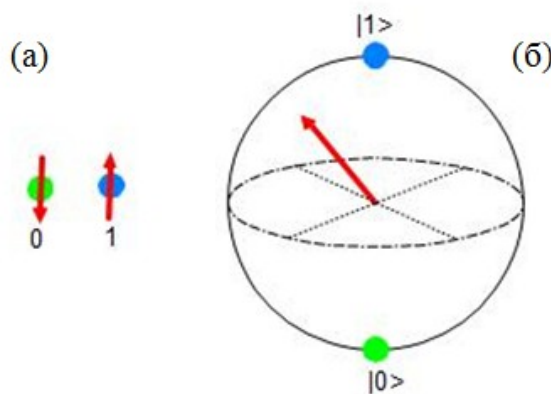


Рисунок 1.
Схематическое изображение бита (а) и кубита (б)

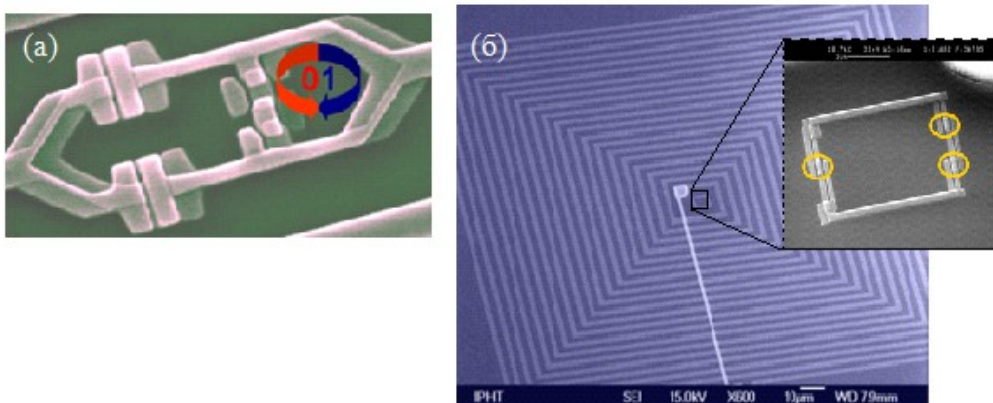


Рисунок 2.

Примеры реализации 3JJ-кубита: (а) индуктивно связанного с СКВИДом [3] и (б) связанного со сверхпроводящей управляемой катушкой [4]. На вставке справа представлен кубит с тремя слабыми связями (желтые кривые), расположенный в центре катушки

Квантовый метод Монте-Карло. Для анализа бездиссипативной динамики кубитов в периодическом внешнем поле необходимо решить уравнение Шредингера [6], а для учета диссипативных процессов – уравнение для матрицы плотности [7]. Моделирование диссипативной динамики удобно выполнить в рамках квантового метода Монте-Карло [8, 9], который идеально подходит для решения задачи на многопроцессорных системах, особенно для систем на базе GPU-ускорителей. Процесс моделирования состоит в многократном численном генерировании квантовых траекторий (аналог «однократных измерений» над квантовой системой) и получении усредненных интерференционных картин для вероятностей переходов в сильных электромагнитных полях, которые позволяют извлечь дополнительную информацию о параметрах кубита и шума.

Приведем пример получения развертки населенности кубита по амплитуде внешнего бигармонического сигнала и по относительной фазе смешиваемых импульсов. Населенность определяется численным решением уравнения Шредингера на времени действия импульса. Было установлено, что изменение формы бигармонического сигнала влияет на населенности уровней, что позволяет управлять динамикой системы, варьируя параметры поля, при этом система проявляет особенности, которые невозможно увидеть при подаче монохроматического сигнала [6]. Показано, что при относительных фазах смешиваемых импульсов θ , кратных $\pi/2$, возможно динамическое пленение населенностей при изменении амплитуды подаваемого сигнала (см. рис. 4). Данный эффект может быть использован для квантового контроля состояний при считывании и записи информации в кубит. Отмеченные интерференционные эффекты качественно согласуются с результатами эксперимента и могут быть использованы для калибровки ультракоротких импульсов.

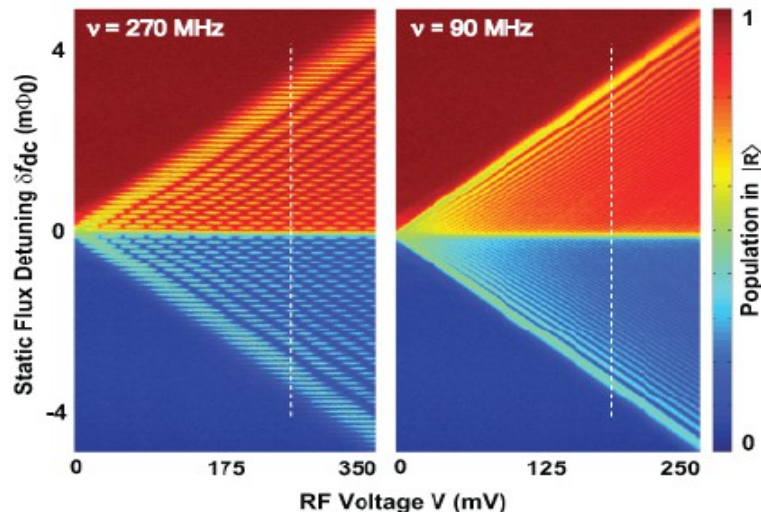


Рисунок 3.

Типичная интерференционная картина для потокового кубита [5] при изменении амплитуды переменного радиочастотного поля (V) и постоянного смещения кубита (δf_{dc})

Процессы релаксации можно рассматривать как взаимодействие кубита с бозонным резервуаром с большим числом степеней свободы. Согласно квантовому методу Монте-Карло, вместо уравнения для матрицы плотности многократно решается уравнение Шредингера, в котором присутствует случайный шум, имитирующий результат взаимодействия с термостатом [8]. Как известно, уравнение для матрицы плотности приводит к системе линейных уравнений, включающих N^2 комплексных переменных, где N – это размерность гильбертова пространства. Квантовый метод Монте-Карло позволяет рассматривать N комплексных переменных (вектор состояний), вычисление которых можно произвести на различных процессорах. Важно, что этот метод допускает распараллеливание, поэтому решение уравнения Шредингера для каждой реализации случайного процесса можно проводить независимо. Поскольку реализации статистически независимы, отсутствует необходимость обмена данными между блоками и потоками внутри отдельных блоков, создаваемых на GPU, на каждом процессоре выполняется одна и та же подпрограмма, что позволяет обеспечить параллелизм на уровне данных. В частности, расчет населенности кубита ведется независимо при заданном смещении ε_0 и амплитуде сигнала A . Для ориентации укажем, что использование GPU (Nvidia Tesla C1060) позволяет достичь ускорения примерно в 170 раз по сравнению с работой программы на CPU [8, 9].

Расчеты населенности кубита в зависимости от смещения уровней кубита и амплитуды бигармонического сигнала представлены на рис. 5. Как видно, учет дефазировки приводит к уширению резонансов и полному их перекрытию при $\Gamma \approx \omega/2\pi$ (рис. 5), где Γ – скорость затухания фазы. При развертке по смещению ε_0 и амплитуде переменного поля A , при фиксированной частоте сигнала ω и относительной фазе θ наблюдается асимметрия интерференционной картины (см. рис. 5(б)). Также различим и наклон полос интерференции к оси A , который сохраняется при $\Gamma \gg \omega/2\pi$. Это может быть использовано для динамического контроля состояний кубита посредством подбора разности фаз между гармониками и их относительной интенсивности, а также по степени «замытия» интерференционных картин можно определять параметры шума.

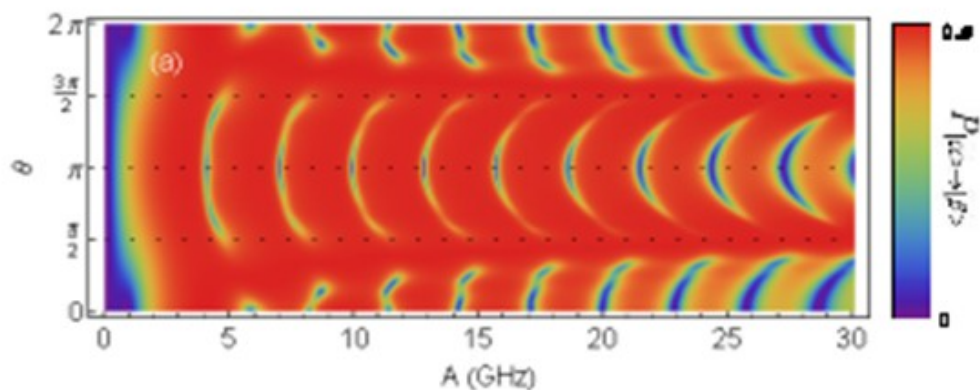


Рисунок 4.

Населенность возбужденного состояния кубита в зависимости от относительной фазы бигармонического сигнала и амплитуды переменного поля

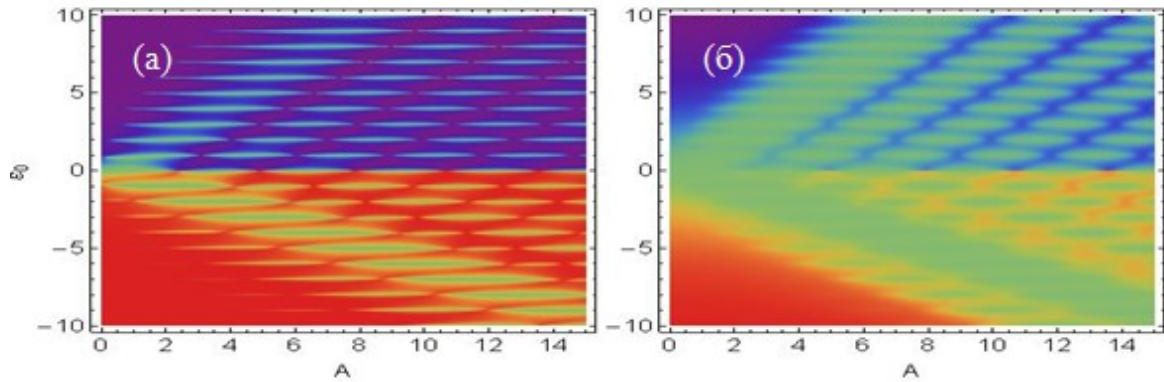


Рисунок 5.

Резонансное возбужденное состояний кубита в переменном поле (а) без диссипации $\Gamma = 0$; (б) с диссипацией $\Gamma = 0,09$, при $\theta = \pi$. Пики соответствуют резонансным переходам, а их ширины содержат информацию о параметрах кубитов

Результаты расчета населенности двух связанных кубитов (вероятности найти систему на соответствующих уровнях) методом Монте-Карло представлены на рис. 6. В отсутствие переменного поля у двух кубитов имеются четыре уровня, населенность которых зависит от коэффициента связи кубитов, их параметров, амплитуды зондирующего поля и шумовых характеристик. Предполагалось, что кубиты в начальный момент времени находились в основном состоянии. На рисунке 6 приведены результаты численного моделирования вероятностей переходов с использованием описанного ранее квантового метода Монте-Карло. Новые нелинейные эффекты были обнаружены в результате расчёта перехода $1 \rightarrow 4$ (рис. 6(д) и (е)), когда могут возникать дробные резонансы. Их характерная особенность – возникновение пиков при нецелых значениях управляющего параметра кубитов ε_0 , а также отсутствие смещения при изменении константы связи J . Для объяснения этого эффекта была предложена теория возмущений по туннельным константам кубитов. Данный переход также объяснен качественно и в рамках резонансной теории возмущений, и выяснено, что возбуждение происходит за счет виртуальных переходов.

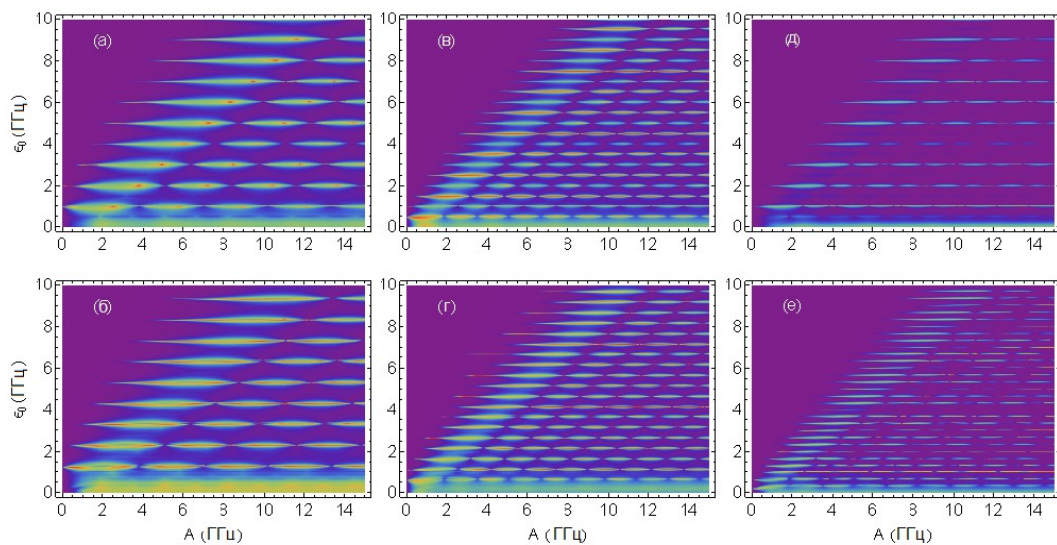


Рисунок 6.

Интерференционные картины вероятностей переходов $\bar{P}_{1 \rightarrow 2}$ (а, б), $\bar{P}_{1 \rightarrow 3}$ (в, г) и $\bar{P}_{1 \rightarrow 4}$ (д, е) для двух джозефсоновских кубитов

Основные выводы. Развита в работе численная методика расчета вероятностей переходов кубитов в сильных полях естественным образом распространяется на более сложные системы для изучения спектров искусственных квантовых объектов: квантовых ям, квантовых точек, квантовых проволок. Проведенные расчеты позволяют промоделировать динамику многокубитных систем, изучить качественно характеристики переходов и определить параметры кубитов.

Отметим, что некоторые программные компоненты ранее были использованы в учебном процессе и отражены в учебном пособии [9].

Работа поддержана грантом РФФИ 14-07-00582 и программой СИ7 02.В.49.21.0003 МОН РФ и ННГУ.

Литература

1. *Devoret M.H., Schoelkopf R.J.* Superconducting circuits for quantum Information: An outlook // *Science* 339, 1163 (2013).
2. Нильсен М., Чанг И. Квантовые вычисления и квантовая информация. М.: Мир, 2006. 824 с.
3. *Mooij J. E. et al.* Josephson persistent-current qubit // *Science* 285, 1036 (1999).
4. *Greenberg Ya. S. et al.* Low-frequency characterization of quantum tunneling in flux qubits // *Phys. Rev. B* 66, 214525 (2002).
5. *Berns D.M. et al.* Coherent quasiclassical dynamics of a persistent current qubit // *Phys. Rev. Lett.* 97, 150502 (2006).
6. *Satanin A.M., Denisenko M.V., Ashhab S., Nori F.* Amplitude spectroscopy of two coupled qubits // *Phys. Rev. B* 85, 184524 (2012).
7. *Satanin A.M., Denisenko M.V., Gelman A.I., Nori F.* Amplitude and phase control of Josephson qubits by biharmonic electromagnetic pulses // *Phys. Rev. B* 90, 104516 (2014).
8. Волков В.А., Денисенко М.В., Сатанин А.М. Алгоритм расчета диссипативной динамики кубитов на суперкомпьютерном комплексе с использованием GPU-ускорителей // *Вестник ННГУ*, № 5(2), с. 42–48 (2012).
9. Денисенко М.В., Сатанин А.М., Применение гетерогенных вычислительных систем и технологии CUDA для моделирования физических процессов: Учебно-методическое пособие. Нижний Новгород: Фонд образовательных электронных ресурсов, 2012.

