

РАСЧЕТ РЕЛАКСАЦИОННОЙ ДИНАМИКИ КУБИТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ MPI И CUDA КВАНТОВЫМ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

А.В. Волков, М.В. Денисенко

*Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского
E-mail: on_ton@mail.ru*

В работе рассматривается реально существующий квантовый прибор – потоковый кубит [1] (логический элемент квантового компьютера), находящийся в сильном электромагнитном поле, и исследуется принцип работы устройства в реальных условиях шума с использованием экспериментальной методики амплитудной спектроскопии [2, 3]. Потоковый кубит представляет собой сверхпроводящую петлю с тремя джозефсоновскими переходами [1], имеющую макроскопический размер и возможность управления за счет электромагнитных импульсов.

Для моделирования диссипативной динамики в работе используется квантовый метод Монте-Карло (МК) [4], который может быть эффективно реализован на современных многопроцессорных системах и системах с использованием GPU. Результатом моделирования является получение единичных квантовых траекторий и интерференционных картин вероятностей переходов в сильных электромагнитных полях, которые позволяют извлечь дополнительную информацию о параметрах кубита и шума. Итак, главная цель – разработка и оптимизация алгоритма с использованием GPU-ускорителей и современных технологий параллельной обработки данных (MPI, CUDA) для расчета релаксационной динамики квантовых приборов и применение данной программы к конкретному прибору – потоковому кубиту.

С точки зрения квантовой механики, кубит представляет собой типичную двухуровневую систему. Для изучения когерентной динамики кубитов в сильных полях в последнее время применяется новая экспериментальная методика – амплитудная спектроскопия [2, 3], в основе которой лежит метод получения информации с помощью функции отклика по амплитудам постоянного и переменного поля на фиксированной частоте сигнала. При моделировании результатов реальных экспериментов в рамках данной методики необходимо учитывать взаимодействие системы с резервуаром. Заметим, что эксперименты проводятся при низких температурах (~мК), поэтому вклад шума квазичастичных состояний (фермионных возбуждений) мал, следовательно, процессы релаксации могут описываться только фононным резервуаром с большим числом степеней свободы. Управление состояниями потокового кубита осуществляется внешними полями, которые и являются главным источником шума.

Обычно для численного расчета релаксационной динамики квантовых систем используют уравнение для оператора плотности, содержащее N^2 переменных, где N – размерность гамильтониана. За счет использования квантового метода МК удается свести задачу к решению уравнения для волновой функции системы $|\Psi_{(i)}(t)\rangle$ (i – номер траектории), содержащего N переменных и описывающего динамику системы с эффек-

тивным

гамильтонианом

Вигнера–Вайскопфа

$$\hat{H}_{eff} = \hat{H}_s - \frac{i\hbar\Gamma}{4} \hat{I}$$

($\hat{H}_s = 1/2((\varepsilon + A \cos \omega t)\sigma_z + \Delta\sigma_x)$ – гамильтониан кубита, \hat{I} – единичная матрица)

$$\frac{\partial}{\partial t} |\Psi_{(i)}(t)\rangle = -\frac{i}{\hbar} \hat{H}_{eff} |\Psi_{(i)}(t)\rangle.$$

В процессе эволюции динамика системы может испытывать квантовые скачки [5], что соответствует диссипативной динамике. Таким образом, в момент времени $t' = t + \Delta t$ вектор состояний определяется оператором σ_z , который отвечает за дефазировку системы $|\Psi_{(i)}(t + \Delta t)\rangle = \lambda \sigma_z |\Psi_{(i)}(t)\rangle$, где λ – нормировочная константа. Вероятность квантовых скачков определяется следующим выражением: $P^{(i)}(t) = 1/2 \Delta t |\Psi_{(i)}(t)|^2$.

После i -го прохода по времени, мы получаем квантовую траекторию, представляющую одну реализацию эксперимента – диссипативную динамику одного кубита, пример которой приведен на рис. 1. Естественно, что данная траектория построена при фиксированных значениях управляющего параметра ε , ответственного за постоянное магнитное поле в системе, и амплитуды A переменного поля.

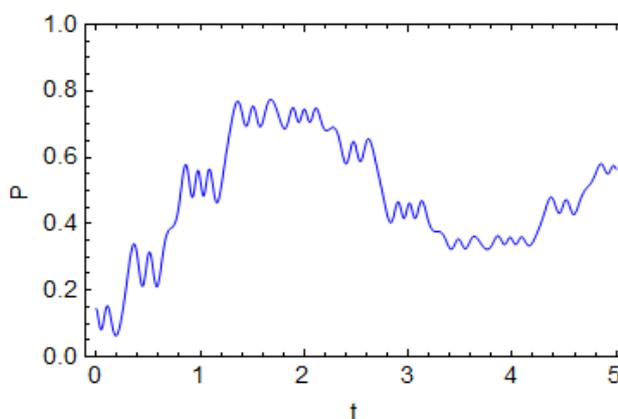


Рис.1. Населенность верхнего уровня кубита для 15360 реализаций

Таблица 1. Время расчета населенности верхнего уровня для CPU и GPU в зависимости от числа реализаций

Число реализаций	Время расчета на CPU, сек	Время расчета на GPU, сек
980	17,082	0,609
1980	35,303	0,656
3840	68,166	0,686
7680	136,454	0,874
15360	272,705	1,654
30720	545,458	3,260

В табл. 1. представлены характерные времена, требуемые для вычисления с одинарной точностью населенности верхнего уровня кубита на CPU (Intel Core i7 960 использовалось 1 ядро) и на GPU (Nvidia Tesla C1060). Версия для GPU создана с использованием технологии CUDA. Видно, что графические ускорители позволяют существенно сократить время расчета, и поэтому их использование является целесообразным при решении данной задачи.

Известно, что в реальных экспериментах (см. например [3]) получают данные о поведении квантового прибора в зависимости от начальных условий и параметров задачи. Например, для потокового кубита – это интерференционные зависимости вероятностей

населенности $P(A, \varepsilon)$ возбужденного уровня кубита от амплитуд постоянного ε и переменного A магнитных полей, которые в качестве примера рассчитаны в рамках данной работы. Благодаря этому возможно повышение производительности работы программы за счет использования Кластерной системы, узлы которой содержат GPU, на каждом из которых значение вероятности населенности рассчитывается независимо. Для обеспечения работы нескольких GPU мы использовали технологию программирования для систем с распределенной памятью MPI.

Для расчета интерференционной картины (см. рис. 2), наблюдаемой в недавних экспериментах [2, 3], была выбрана 2D-сетка (A, ε) 100×100 точек, таким образом, было необходимо рассчитывать 10000 усредненных квантовых траекторий, каждая из которых была усреднена по 15360 реализациям, и соответственно вероятность населенности возбужденного уровня в момент окончания длительности импульса.

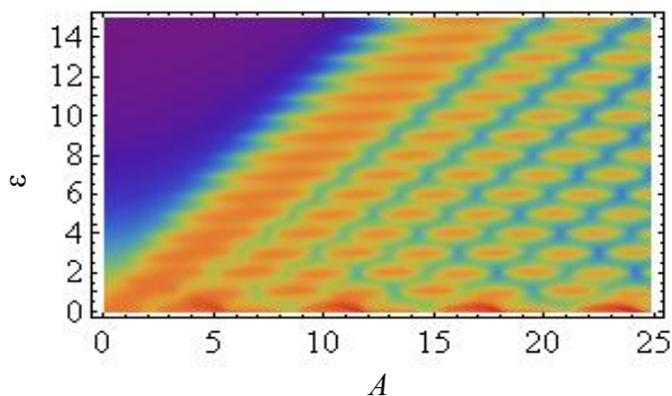


Рис. 2. Результаты расчета интерференционной картины для возбужденного уровня системы

На рис. 3 представлены данные о приросте производительности вычислений в зависимости от количества используемых графических ускорителей. Эта зависимость близка к линейной, что говорит о хорошем масштабировании задачи при переходе к множеству GPU, эффективность при использовании 20 GPU составляет 97%.

Таким образом, квантовый метод Монте-Карло позволяет исследовать релаксационную динамику кубита, в том числе в применении к активно развивающемуся на сегодняшний день методу амплитудной спектроскопии. А также показано, что данный метод идеально подходит для использования графических ускорителей, что позволяет за меньшее время моделировать и предсказывать результаты дорогостоящих реальных экспериментов над кубитами.

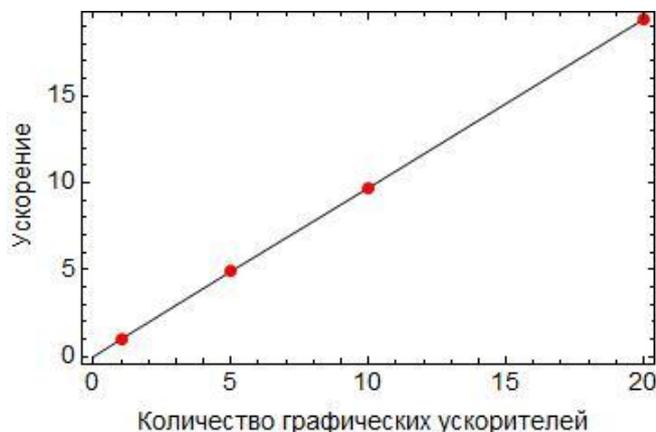


Рис. 3. Ускорение работы алгоритма в зависимости от числа использованных GPU по сравнению с одним GPU

Авторы выражают благодарность Аркадию Михайловичу Сатанину, Сергею Ба-
стракову и Александру Гельману за обсуждение работы и полезные замечания. Работа
выполнена при поддержке группы компаний «Т-Платформы».

Литература

1. G. Wendin and V.S. Shumeiko, in Handbook of Theoretical and Computational Nano-
technology, edited by M. Rieth and W. Schommers (American Scientific, New York, 2006).
2. Berns D.M. et al. Nature 455, 51 (2008).
3. Oliver W.D. and Valenzuela S.O. Quantum Inf. Process. 8, 261 (2009).
4. Plenio M.B., Knight P.L. Rev. Mod. Phys. 70, 101 (1998).
5. Гельман А.И., Сатанин А.М., ФТТ 52(11), 2094 (2010).