УДК 530.145.82
DOI: 10.18384/2310-7251-2023-1-27-33

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАПУТАННЫХ КУБИТОВ

Евдокимов Н. В., Камалов Т. Ф., Волкова О. А., Хамис Хассан М. Х., Камалов Ю. Т.

Государственный университет просвещения
141014, Московская область, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24,
Российская Федерация

Аннотация

Цель: выявить сходство классических и квантовых корреляций. Сформировать концепцию моделирования запутанных состояний квантовых частиц на основе классических корреляций.

Процедура и методы. Проанализированы существующие подходы к квантовым вычислениям, в частности использование для квантовых вычислений запутанных состояний квантовых частиц. Проведено моделирование запутанных состояний на основе классических корреляций. Основное содержание исследования составляет анализ алгоритма классических корреляций.

Результаты. Проведённый анализ показал практическую реализуемость моделирования запутанных квантовых состояний классическими корреляциями. По итогам исследования сделан вывод о возможности моделирования запутанных квантовых состояний описанным в работе алгоритмом, а также предложена модель на радиоэлектронных компонентах. По заключению авторов статьи данная модель кубитов может стать недорогой альтернативой существующим решениям по моделированию квантовых вычислений.

Теоретическая и/или практическая значимость. Сформулировано предложение по моделированию запутанных состояний квантовых частиц при помощи алгоритма классических корреляций. В алгоритме дано описание параметров, отвечающих за запутанность и корреляцию моделей кубитов. Представлена программная модель с визуальным интерфейсом четырёхчастичного запутанного состояния. Модель может служить демонстрацией квантовых приложений, связанных с запутанными состояниями, таких, как телекоммуникационный криптографический квантовый протокол, неравенство Белла, а также может быть использована для моделирования квантовых вычислений, основанных на запутанных состояниях квантовых частиц.

Ключевые слова: квантовые частицы, моделирование кубитов, запутанные состояния, ЭПР-корреляции, квантовые вычисления

© CC BY Евдокимов Н. В., Камалов Т. Ф., Волкова О. А., Хамис Хассан М. Х., Камалов Ю. Т., 2023.

MODELING OF ENTANGLED QUBITS

N. Evdokimov, T. Kamalov, O. Volkova, M. H. Khamis Hassan, Y. Kamalov

State University of Education
ulitsa Very Voloshinoi 24, Mytishchi 141014, Moscow Region, Russian Federation

Abstract

Aim. The similarity of classical and quantum correlations is revealed. The concept of modeling entangled states of quantum particles based on classical correlations is presented.

Methodology. The existing approaches to quantum computing are analyzed, in particular, the use of entangled states of quantum particles for quantum computing. Entangled states are modeled based on classical correlations. The main content of the study is the analysis of the algorithm of classical correlations.

Results. The performed analysis demonstrates the practical feasibility of modeling entangled quantum states by classical correlations. Using the results of the study, a conclusion is made about the possibility of modeling entangled quantum states by the algorithm described in the work, and a model based on radio-electronic components is also proposed. It is shown that this qubit model can become an inexpensive alternative to existing solutions for modeling quantum computing.

Research implications. A proposal is formulated for modeling entangled states of quantum particles using the classical correlation algorithm. The algorithm describes the parameters responsible for the entanglement and correlation of qubit models. A software model with a visual interface of a four-particle entangled state is presented. The model can serve as a demonstration of quantum applications related to entangled states, such as telecommunications cryptographic quantum protocol, Bell's inequality, and can also be used to simulate quantum computing based on entangled states of quantum particles.

Keywords: quantum particles, qubit modeling, entangled states, EPR correlations, quantum computing

Введение

В работах [1; 2] предлагалась идея дополнения описания классической модели нелокальными переменными, которые уточняют поведение кубитов в полуклассическом приближении. Дополнительные нелокальные переменные представляют собой убывающий ряд, и поэтому можно установить любую точность моделирования кубитов в полуклассическом приближении, основываясь на технических возможностях классического компьютера или микроэлектронных элементов [3].

В настоящее время основными перспективными направлениями квантовых вычислений являются: квантовый отжиг (решение оптимизационных задач в предположении, что квантовое туннелирование даст выигрыш в сравнении с решением оптимизационных задач классическими алгоритмами отжига); вычисления на специально подготовленных запутанных состояниях квантовых частиц (более универсальный подход, так как позволяет реализовать широкий набор

квантовых алгоритмов и потому является прообразом универсального компьютера); прямое моделирование квантовых вычислений, требующее экспоненциального роста процессорных мощностей и памяти с ростом количества моделируемых кубитов.

Предполагается, что суть квантовых вычислений скрыта в особых коррелированных состояниях квантовых частиц, известных как запутанные. Как именно запутанные состояния позволяют достичь квантового превосходства, неизвестно. При этом квантовые корреляции не являются существенно квантовыми явлениями. Аналогичные корреляции можно получить в классической радиочастотной модели, где основой такой корреляции являются соотношения Мэнли-Роу для частот и фаз колебаний [4].

Согласно теореме Белла разница между классическими и квантовыми корреляциями составляет максимум $\sqrt{2}$ для случая с двумя частицами. За исключением этого различия, в остальном классические и квантовые корреляции схожи.

Это сходство открывает возможность для недорогой альтернативы в моделировании квантовых вычислений.

Алгоритм моделирования запутанных кубитов

Случайному процессу $\varphi(t)$, получаемому при помощи генератора случайных чисел, такому, что $\langle\varphi(t)\rangle = 0$, добавим случайную фазу θ в диапазоне $0 - 2\pi$. Модель случайной пары запутанных кубитов [5] представляет собой функцию двух переменных

$$f(t, \theta_{1,2}) = sign[sin(\varphi(t) + \theta_{1,2})] \quad (1)$$

где $\theta_{1,2}$ соответствует углу ориентации измерительной установки, задаваемому наблюдателем. У каждого из наблюдателей свой случайный угол ориентации, независимый и несогласованный с другим наблюдателем.

Для произвольного угла θ:

$$\langle f(t, \theta)\rangle = 0 \text{ и } f(t, \theta \pm \pi) = -f(\theta) \quad (2)$$

$f(t, \theta \pm \pi)$ и $f(t, \theta)$ – демонстрируют антикорреляцию.

$f(t, \theta)$ и $f(t, \theta \pm \frac{\pi}{2})$ – демонстрируют отсутствие корреляции.

$f(t, \theta \pm 2\pi)$ и $f(t, \theta)$ – демонстрируют корреляцию.

Таким образом, поведение моделей кубитов зависит от разности углов ориентации измерительных установок у наблюдателей:

- антикорреляция для разности углов равной $\pm\pi$;
- отсутствие корреляции для разности углов $\pm\pi/2$;
- корреляция для разности углов равной 2π.

То есть демонстрируется поведение аналогично поведению запутанной пары кубитов. Процесс $\varphi(t)$ может быть произвольной природы, в квантовом случае он может быть, например, следствием добавления в рассмотрение производных высшего порядка для реальной системы в отличие от идеальной.

В этой модели запутанность является следствием общего случайного процесса $\varphi(t)$, а корреляция проявляется в зависимости от случайного значения $\theta_{1,2}$, за-

даваемого каждым из наблюдателей. Очевидно, что в данной модели можно получить сколь угодно большое количество запутанных моделей кубитов с одинаковым процессом $\varphi(t)$.

На рис. 1 показана модель для четырёх запутанных кубитов, реализованная на языке программирования Python.

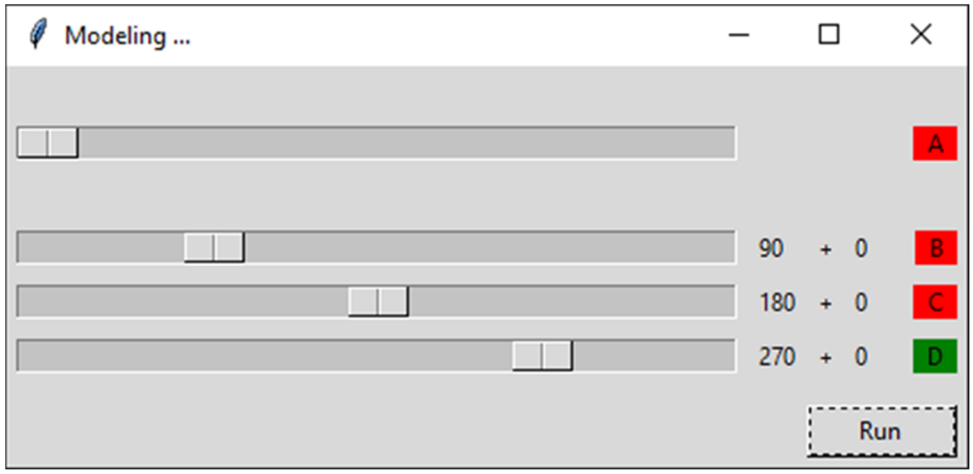

Рис. 1 / Fig. 1. Интерфейс программы моделирования запутанных состояний / Interface of the entangled state modeling program

Источник: по данным авторов

Все четыре канала A, B, C, D связаны между собой одним случайным процессом $\varphi(t)$. Управляющие ползунки имитируют ручки измерительного прибора и задают дополнительный угол поворота θ (в интерфейсе программы он указан в градусах). Канал A играет роль сигнального и в нём задано начальное смещение относительно остальных каналов на π. Также ползунок канала A задаёт смещение θ с отрицательным знаком, что эквивалентно дополнительному положительному смещению фазы относительно него в остальных трёх каналах (второе слагаемое). Видно, что измерения в каналах A и C коррелированы, A с B и A с D – некоррелированы, B и D – антикоррелированы.

Этот же алгоритм может быть реализован в виде отдельных разнесённых в пространстве радиоэлектронных модулей, например на основе микроконтроллеров. Блок-схема такого устройства показана на рис. 2. Каждый модуль реализует отдельный канал. В каждом модуле есть вход, также каждый модуль содержит управляющий элемент (ручку) для задания наблюдателем на этом модуле дополнительного углового сдвига. После выполнения вычисления результат отображается исполнительным устройством. В качестве входного сигнала, подаваемого на вход каждого из каналов, используется случайное число от отдельного модуля – генератора случайных чисел.

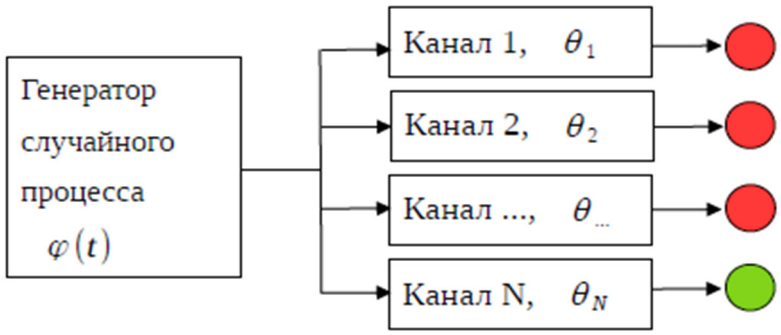

Рис. 2 / Fig. 2. Блок-схема радиоэлектронного устройства / Block diagram of an electronic device

Источник: составлено авторами

Заключение

Предложенный способ моделирования на классическом компьютере запутанных состояний кубитов является недорогой альтернативой существующим решениям по моделированию квантовых вычислений. Данная модель демонстрирует запутанность с использованием классического случайного процесса, и может быть использована для моделирования квантовых вычислений, основанных на запутанных состояниях квантовых частиц. Также модель может быть реализована в виде модульного радиоэлектронного устройства.

Статья поступила в редакцию 22.12.2023 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kamalov T. F. Axiomatization of classical and quantum physics of non-inertial reference frames // Quantum Computers and Computing. 2011. Vol. 11. No. 1. P. 52–57.
2. Rybakov Y. P., Kamalov T. F. Bell's Theorem and Entangled Solitons // International Journal of Theoretical Physics. 2016. Vol. 55. P. 4075–4080. DOI: 10.1007/s10773-016-3035-6.
3. A Simulation of a Virtual Qubits on a Classical Computer has Been Developed Recently / Garcia Zavala Y. M., Martinez Reyes M., Avila Aoki M. // CIENCIA ergo sum. 2011. Vol. 18. Núm. 2. P. 171–178.
4. Bell's inequalities and EPR – Bohm correlations: working classical radiofrequency model / Evdokimov N. V., Klyshko D. N., Komolov V. P., Yarochkin V. A. // Physics – Uspekhi. 1996. Vol. 39. Iss. 1. P. 83–98. DOI: 10.1070/PU1996v039n01ABEH000129.
5. Kamalov T. F., Rybakov Y. P. Probabilistic Simulation of Quantum Computation // Quantum Computers and Computing. 2006. Vol. 6. No. 1. P. 125–136.

REFERENCES

1. Kamalov T. F. Axiomatization of classical and quantum physics of non-inertial reference frames. In: *Quantum Computers and Computing*, 2011, vol. 11, no. 1, pp. 52–57.

2. Rybakov Y. P., Kamalov T. F. Bell's Theorem and Entangled Solitons. In: *International Journal of Theoretical Physics*, 2016, vol. 55, pp. 4075–4080. DOI: 10.1007/s10773-016-3035-6.
3. Garcia Zavala Y. M., Martinez Reyes M., Avila Aoki M. A Simulation of a Virtual Qubits on a Classical Computer has Been Developed Recently. In: *CIENCIA ergo sum*, 2011, vol. 18, núm. 2, pp. 171–178.
4. Evdokimov N. V., Klyshko D. N., Komolov V. P., Yarochkin V. A. Bell's inequalities and EPR – Bohm correlations: working classical radiofrequency model. In: *Physics – Uspekhi*, 1996, vol. 39, iss. 1, pp. 83–98. DOI: 10.1070/PU1996v039n01ABEH000129.
5. Kamalov T. F., Rybakov Y. P. Probabilistic Simulation of Quantum Computation. In: *Quantum Computers and Computing*, 2006, vol. 6, no. 1, pp. 125–136.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Камалов Тимур Фянович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры фундаментальной физики и нанотехнологии Государственного университета просвещения;
e-mail: timkamalov@gmail.com;
Волкова Ольга Алексеевна – аспирант кафедры фундаментальной физики и нанотехнологии Государственного университета просвещения;
e-mail: olka.volkova96@yandex.ru;
Евдокимов Николай Валерьевич – аспирант кафедры фундаментальной физики и нанотехнологии Государственного университета просвещения;
e-mail: nv.evdokimov@gmail.com;
Хамис Хассан Хосни Махер – аспирант кафедры фундаментальной физики и нанотехнологии Государственного университета просвещения;
e-mail: m.khamis@yandex.ru;
Камалов Юрий Тимурович – аспирант кафедры фундаментальной физики и нанотехнологии Государственного университета просвещения;
e-mail: kamalov@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Timur F. Kamalov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Department of Fundamental Physics and Nanotechnology, State University of Education;
e-mail: timkamalov@gmail.com;
Olga A. Volkova – Postgraduate student, Department of Fundamental Physics and Nanotechnology, State University of Education;
e-mail: olka.volkova96@yandex.ru;
Nikolay V. Evdokimov – Postgraduate student, Department of Fundamental Physics and Nanotechnology, State University of Education;
e-mail: nv.evdokimov@gmail.com;
Khamis Hassan Hosni Maher – Postgraduate student, Department of Fundamental Physics and Nanotechnology, State University of Education;
e-mail: m.khamis@yandex.ru;
Yuri T. Kamalov – Postgraduate student, Department of Fundamental Physics and Nanotechnology, State University of Education;
e-mail: kamalov@gmail.com.

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Моделирование запутанных кубитов / Евдокимов Н. В., Камалов Т. Ф., Волкова О. А., Хамис Хассан М. Х., Камалов Ю. Т. // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2023. № 1. С. 27–33.
DOI: 10.18384/2310-7251-2023-1-27-33.

FOR CITATION

Evdokimov N. V., Kamalov T. F., Volkova O. A., Khamis Hassan M. H., Kamalov Y. T. Modeling of entangled qubits. In*: Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2023, no. 1, pp. 27–33.
DOI: 10.18384/2310-7251-2023-1-27-33.