

УДК 681.322

Коррекция ошибок квантовых битов в сверхпроводящих схемах

С.М. Гушанский, В.Е. Буглов*, М.А. Козловская

Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

* E-mail: buglov@sfnedu.ru

Аннотация. В данной статье проводится исследование процесса квантовой коррекции ошибок, возникающих в квантовых системах. В работе предложена схема квантового исправления ошибок, определяющая «точку безубыточности» и устраняющая ошибки, которые возникают вследствие потери энергии кубита, находящегося в суперпозиции состояний.

Ключевые слова: квантовая коррекция ошибок, квантовая система, принцип суперпозиции, резонатор

Correction of quantum bit errors in superconducting circuits

S.M. Gushansky, V.E. Buglov*, M.A. Kozlovskaya

Southern Federal University, Taganrog, Russia

* E-mail: buglov@sfnedu.ru

Abstract. In this article, we study the process of quantum error correction that occurs in quantum systems. In this paper, we propose a quantum error correction scheme that determines the "break-even point" and eliminates errors that occur due to the loss of energy of a qubit in a superposition of states.

Keywords: quantum error correction, quantum system, superposition principle, resonator

1. Введение

Процедура квантовой коррекция ошибок позволяет устранить ошибки, возникающие в процессе функционирования кубитов [3]. Поэтому данная процедура представляет собой важную составляющую квантового компьютера. Для реализации квантовой коррекции ошибок кубит необходимо закодировать в многомерном пространстве с использованием квантовых состояний, обладающих свойствами симметрии. При измерении наблюдаемых состояний кубита можно получить сведения, описывающие тип возникших ошибок, которые могут быть исправлены посредством простейших операций [2]. До сих пор не сформирован метод определения «точки безубыточности», в которой время жизни кубита превышает время жизни квантовой системы, в которой он находится [1]. В данной работе предпринимается попытка реализовать схему квантового исправления ошибок, определяющая «точку безубыточности» и устраняющая ошибки, которые возникают вследствие потери энергии кубита, находящегося в суперпозиции состояний. Предлагается квантовый алгоритм исправления ошибок, функционирующий на основе обратной связи в режиме реального времени с целью кодирования, мониторинга, декодирования и исправления потенциальных ошибок.

Процесс реализации схемы квантового исправления ошибок является сложным, так как необходимо использовать большое количество кубитов. Даже в идеальных условиях в процессе функционирования подобной схемы будут возникать непредвиденные ошибки, которые будут являться причиной экспоненциального повышения сложности работы квантового алгоритма. Кроме того, возникает проблема декогеренции. Главная цель схемы квантового исправления ошибок заключается в устранение естественно возникающих ошибок и определении «точки безубыточности».

Схема кодирования логических состояний в виде суперпозиции состояний представляет собой аппаратно-эффективную схему, в процессе функционирования которой возникает меньшее количество ошибок, чем в имеющихся схемах квантовой коррекции ошибок [5]. Когерентное состояние $|\alpha\rangle$ является стандартным состоянием оператора устранения ошибок вида $\hat{a}: \hat{a}|\alpha\rangle = \alpha|\alpha\rangle$. Используя принцип суперпозиции состояний, необходимо применять следующую функцию с целью определения доминирующей ошибки:

$$\hat{a}(c_0|C_\alpha^+\rangle + c_1|C_{i\alpha}^+\rangle) \propto \frac{c_0}{\sqrt{2}}(|\alpha\rangle - |-\alpha\rangle) + i \frac{c_1}{\sqrt{2}}(|i\alpha\rangle - |-i\alpha\rangle) = c_0|C_\alpha^-\rangle + ic_1|C_{i\alpha}^-\rangle, \quad (1)$$

где c_0 и c_1 – коэффициенты, удовлетворяющие условию: $|c_0|^2 + |c_1|^2 = 1$, а $|C_{(i)\alpha}^{\pm}\rangle = (|(i)\alpha\rangle \pm |-(i)\alpha\rangle)/\sqrt{2}$.

2. Схема квантовой коррекции ошибок

Определяя скачки фотонов в реальном времени при помощи квантовых измерений, можно выявить, как изменяется фазовое соотношение между базисными состояниями [4]. На основе такой информации закодированный кубит следует защитить от доминирующего канала ошибок системы.

На рисунке 1 представлена схема квантовой коррекции ошибок, включающая один передающий кубит, который соединён с двумя волновыми резонаторами, а также трансмон, применяемый в качестве механизма для определения ошибок, кодирования и декодирования логических состояний. Первый резонатор осуществляет хранение логических состояний, а второй выполняет вспомогательные считывания и управляющие воздействия.

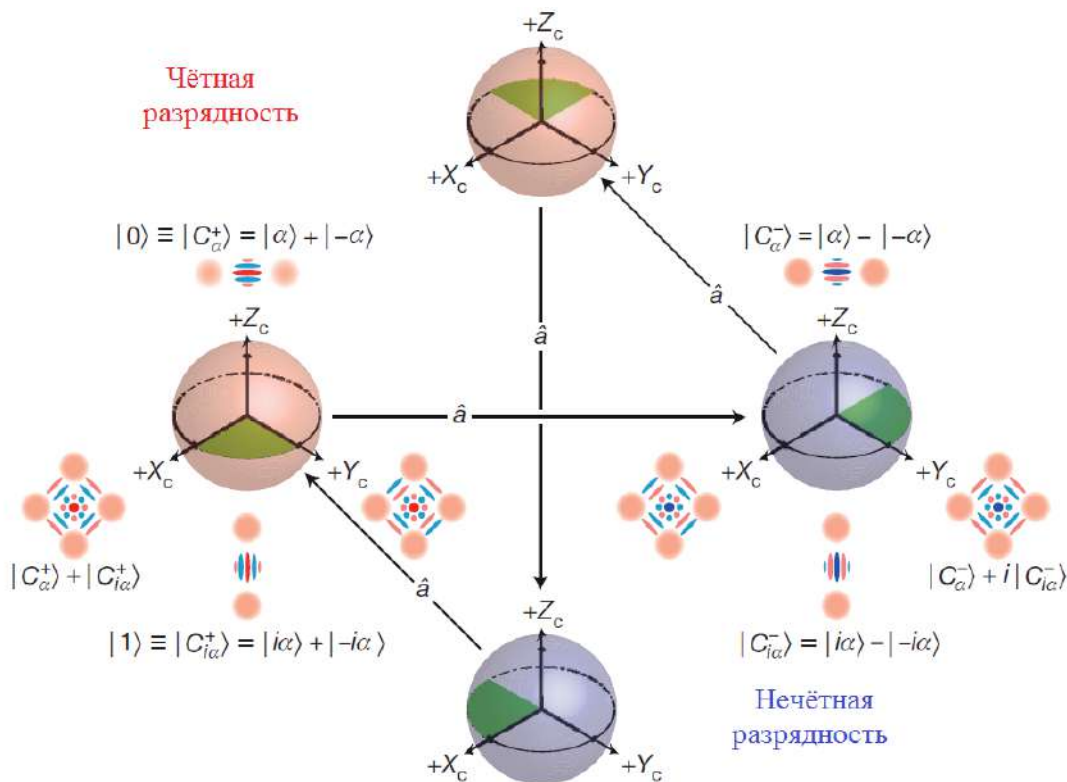


Рисунок 1. Схема квантовой коррекции ошибок.

В основе представленной квантовой схемы лежит квантовый управляющий контроллер, функционирующий в режиме реального времени. Данный контроллер

выполняет кодирование одной из шести точек в сфере Блоха в чётное логическое состояние. При этом количество проводимых измерений и время ожидания t_w между ними должно быть оптимальной величиной, чтобы сбалансировать риск пропуска скачков фотонов и возможного обратного воздействия измерений на состояния резонаторов.

Результатом работы квантовой схемы является запись в памяти в виде «0» (т. е. отсутствие ошибок) и «1» (т. е. наличие ошибки). Во время выполнения двух итераций возникают следующие состояния $\{00, 01, 10, 11\}$ с вероятностями $\{70.4\%, 13.7\%, 11.8\%, 4.1\%\}$ соответственно. Данные уровни вероятности подчеркивают преимущества предлагаемой аппаратно-эффективной схемы квантовой коррекции ошибок. Сведений о Гамильтониане, а также о точности измерения одной ошибки достаточно для того, чтобы инкапсулировать эволюцию логического кубита с исправлением ошибок.

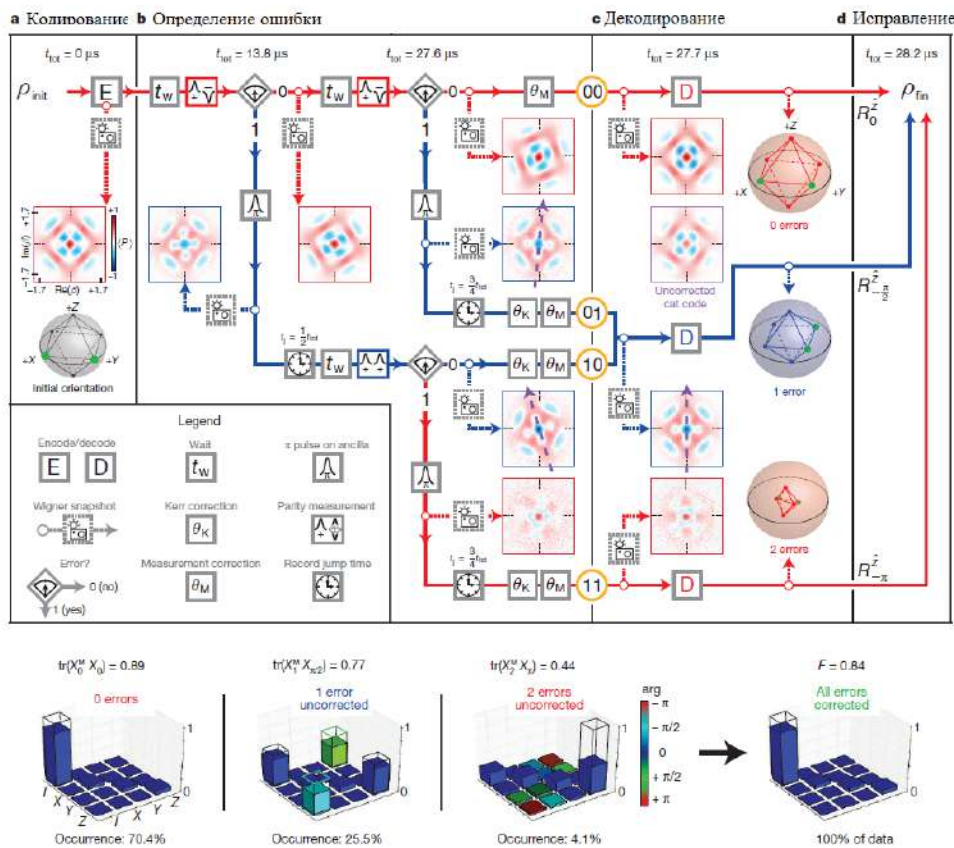


Рисунок 2. Двухэтапная коррекция квантовых ошибок, выполняемая на основе предлагаемой схемы квантовой коррекции ошибок.

В таблице 1 представлены характеристики логического кубита после его исправления квантовой схемой коррекции ошибок. Первые пять критериев, приведённых в данной таблице, могут быть преобразованы за счёт использования в

квантовой схеме квантового фильтра оценивания корректности исправления ошибки в момент времени t . Так как используемые резонаторы имеют дисперсионные связи в фазовом пространстве возникают неизвестные вращения, являющиеся причиной прямого распространения ошибки.

Таблица 1. Характеристики логического кубита после его исправления квантовой схемой коррекции ошибок.

| Виды отказов | Доминирующий источник | Максимальная частота $t_w \approx 0_{\mu s}$ | Оптимальная частота $t_w \approx 20_{\mu s}$ |
|--|---|--|--|
| | | Предполагаемое τ | |
| Двойные ошибки | Резонатор $\hat{\alpha} \cdot \hat{\alpha}$ | 40 мс | 1,7 мс |
| Неисправные ошибки | Резонатор $\hat{\alpha}'$ | 6 мс | 6 мс |
| Ошибка считывания | Трансмон T_ϕ | 7 мс | 2 мс |
| Обработка | Трансмон T_\uparrow | 300 мс | $900_{\mu s}$ |
| Нежелательные соединения | Резонатор $\hat{\alpha}'^2 \hat{\alpha}^2$ | 600 мс | 3 мс |
| Прямое распространение | Трансмон T_1 | $200_{\mu s}$ | $600_{\mu s}$ |
| Время жизни | Прогнозируемый | $200_{\mu s}$ | $320_{\mu s}$ |
| | Измеренный | – | $318_{\mu s}$ |
| Величина выигрыша при использовании логического кубита, содержащего ошибку | | 1,4 | 2,2 |
| Величина выигрыша при использовании кубита после его исправления | | 0,7 | 1,1 |

3. Вывод

Полученные результаты свидетельствуют о том, что предложенная квантовая схема коррекции ошибок защищает бит квантовой информации от искажения, а также продлевает время его жизни. Наличие обратной связи, функционирующей в режиме реального времени, на основе импульсов, которые зависят от эволюции квантовой системы, повышает производительность процедуры коррекции ошибок.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-07-00368.

Список литературы

1. Córcoles, A.D. Demonstration of a quantum error detection code using a square lattice of four superconducting qubits / Córcoles, A.D // Nat. Commun. – № 6. 69-79 p.

2. Taminiau, T.H. Universal control and error correction in multi-qubit spin registers in diamond / T.H. Taminiau, J. Cramer, T. van der Sar, V.V. Dobrovitski, R. Hanson. // Nature. Nanotechnol. – № 9. – 171-176 p.
3. Waldherr, G. Quantum error correction in a solid-state hybrid spin register / G. Waldherr // Nature. – № 506. – 204-207 p.
4. Гушанский, С.М. Декогеренция и квантовая коррекция ошибок / С.М. Гушанский, В.Е. Буглов, А.В. Козловский // «Приоритетные направления развития российской науки». – Саратов. – С.16-20.
5. Гушанский, С.М. Разработка подходов к предотвращению и устранению квантовых ошибок / С.М. Гушанский, В.С., Потапов, В.Ф. Гузик // «Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности». – Таганрог. – № 4. – С. 237-242.