20. *Chastikova V.A., Zherlitsyn S.A., Voylova D.O.* Neyrosetevaya sistema biometricheskoy identifikatsii lichnosti po golosu [Neural network system for biometric identification of a person by voice], *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Adygea State University. Series 4: Natural, mathematical and technical sciences], 2023, No. 1 (316), pp. 70-79.
21. *Artyushina L.A., Troitskaya E.A.* Nekotorye podkhody k otsenke informativnosti parametrov identifikatsii pol'zovateley po klaviaturnomu pocherku na osnove povedencheskoy biometrii [Some approaches to assessing the information content of user identification parameters based on keyboard handwriting based on behavioral biometrics], *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer technologies, control, radio electronics], 2022, No. 22, pp. 30-38.
22. *Sharipov R.R., Sitnikov A.N.* Problemy pri razrabotke sistem raspoznavaniya pol'zovateley po klaviaturnomu pocherku [Problems in developing user recognition systems based on keyboard handwriting], *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2019, Vol. 22, No. 10, pp. 143-147.
23. *Eremenko Yu.I., Olyunina Yu.S.* Ob opredelenii naibolee znachimykh parametrov klaviaturnogo pocherka s pomoshch'yu regressionnogo analiza [On determining the most significant parameters of keyboard handwriting using regression analysis], *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii* [Control systems and information technologies], 2018, No. 2 (72), pp. 28-31.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Р.А. Дьяченко

Частикова Вера Аркадьевна – Кубанский государственный технологический университет; e-mail: chastikova_va@mail.ru; г. Краснодар, Россия; тел.: +79184635536; кафедра кибербезопасности и защиты информации; к.т.н.; доцент.

Любич Денис Андреевич – e-mail: denis23042002mail.ru; тел: +79886042610; кафедра кибербезопасности и защиты информации; студент.

Chastikova Vera Arkadyevna – Kuban State Technological University; e-mail: chastikova_va@mail.ru; Krasnodar, Russia; phone: +79184635536; the department of cybersecurity and information protection; cand. of eng. sc.; associate professor.

Lyubich Denis Andreevich – e-mail: denis23042002mail.ru; phone: +79886042610; the department of cybersecurity and information protection; student.

УДК 004.032 DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-162-174

С.М. Гушанский, В.С. Потапов

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫХ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ, ПОДАВЛЕНИЯ И КОРРЕКЦИИ ОШИБОК В КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЯХ

В последние годы квантовые информационные системы привлекают все большее внимание исследователей в области информатики и физики. Однако, внедрение и практическое применение квантовых вычислений ограничено влиянием шумов и ошибок, которые возникают в квантовых системах. Для реализации эффективного управления и повышения надежности квантовых информационных систем необходимо разработать методы, способные подавлять и корректировать ошибки в процессе квантовых вычислений. Цель данной работы состоит в разработке и исследовании модели управления, основанной на помехоустойчивых квантовых вычислениях, а также методов подавления и коррекции ошибок в квантовых вычислениях. В работе предлагается комбинация различных подходов, включающих использование кодов коррекции ошибок, алгоритмов подавления шумов и методов оптимального управления квантовыми информационными системами. В ходе исследования

была разработана модель управления, которая позволяет эффективно обрабатывать информацию в квантовых системах, учитывая наличие шумов и ошибок. Были проведены эксперименты с использованием реальных квантовых устройств, чтобы оценить эффективность предложенной модели. Результаты экспериментов показывают, что разработанный метод способен значительно улучшить надежность и точность квантовых вычислений. Предложенная модель управления на основе помехоустойчивых квантовых вычислений и методы подавления и коррекции ошибок представляют собой значимый вклад в развитие квантовых информационных систем. Дальнейшее развитие и оптимизация предложенного подхода могут привести к созданию более надежных и эффективных квантовых систем, способных к решению сложных вычислительных задач.

Моделирование; квантовая ошибка; кубит; модель квантовой системы; запутывание; суперпозиция; квантовый оператор.

S.M. Gushanskiy, V.S. Potapov

DEVELOPMENT AND STUDY OF A CONTROL MODEL BASED ON NOISE-RESISTANT QUANTUM COMPUTING, SUPPRESSION AND CORRECTION OF ERRORS IN QUANTUM COMPUTING

In recent years, quantum information systems have attracted increasing attention of researchers in the field of computer science and physics. However, the introduction and practical application of quantum computing is limited by the influence of noise and errors that occur in quantum systems. To implement effective control and improve the reliability of quantum information systems, it is necessary to develop methods that can suppress and correct errors in the process of quantum computing. The purpose of this work is to develop and study a control model based on noise-immune quantum computing, as well as methods for suppressing and correcting errors in quantum computing. The paper proposes a combination of different approaches, including the use of error correction codes, noise suppression algorithms, and methods for optimal control of quantum information systems. In the course of the study, a control model was developed that allows efficient processing of information in quantum systems, taking into account the presence of noise and errors. Experiments were carried out using real quantum devices to evaluate the effectiveness of the proposed model. The experimental results show that the developed method can significantly improve the reliability and accuracy of quantum computing. The proposed control model based on noise-immune quantum computing and methods for suppressing and correcting errors represent a significant contribution to the development of quantum information systems. Further development and optimization of the proposed approach can lead to the creation of more reliable and efficient quantum systems capable of solving complex computational problems.

Modeling; quantum error; qubit; model of a quantum system; entanglement; superposition; quantum operator.

Введение. Квантовые информационные системы [1] обещают революционизировать область вычислений и информационных технологий, предоставляя огромный потенциал для решения сложных задач, которые на сегодняшний день остаются недоступными для классических компьютеров. Квантовые вычисления [2] основываются на принципах квантовой механики [3], что позволяет использовать явления, такие как квантовая суперпозиция и запутанность [4], для эффективной и параллельной обработки информации. Однако на пути к реализации полноценных квантовых вычислений стоят значительные технические и фундаментальные вызовы. Квантовые системы чрезвычайно чувствительны к воздействию внешних помех [5], что приводит к ошибкам в ходе вычислений. Такие ошибки могут быстро разрушить результаты квантовых вычислений и снизить эффективность системы. В данном исследовании фокусируемся на разработке и исследовании модели управления на основе помехоустойчивых квантовых вычислений, направленной на подавление и коррекцию ошибок в квантовых вычислениях. Целью является создание эффективного метода управления квантовыми информацион-

ными системами, который позволит минимизировать влияние помех и ошибок на результаты квантовых вычислений. Для достижения данной цели предполагается изучение современных методов квантовой коррекции ошибок [6] и разработка новых подходов к управлению квантовыми системами. Также будет проведен анализ различных типов помех, которые могут возникать в квантовых вычислениях, и исследованы методы их подавления. Исследование может включать разработку новых квантовых алгоритмов с учетом коррекции ошибок, а также определение оптимальных стратегий управления для различных типов квантовых информационных систем. Квантовая коррекция ошибок является процессом обнаружения и исправления ошибок, которые могут возникать в квантовых системах в результате взаимодействия с окружающей средой или внутренних помех. Ошибки могут включать декогеренцию [7], ошибки гейтов, ошибки измерения и другие нежелательные эффекты, которые могут искажать квантовое состояние системы.

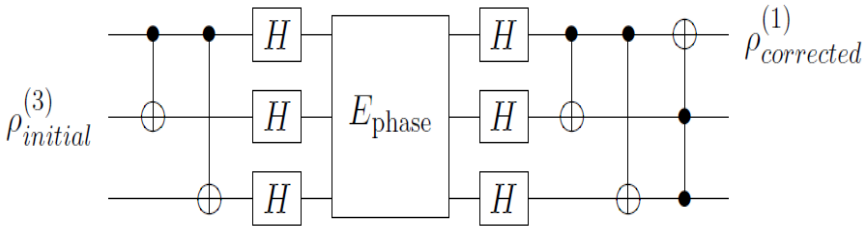

Рис. 1. Схема исправления фазовой ошибки

Основные принципы квантовой коррекции ошибок основаны на использовании квантовой избыточности и квантовой параллельности. Ключевые идеи включают в себя кодирование информации, измерение квантовых состояний и обратную связь для исправления ошибок. Одним из примеров метода квантовой коррекции ошибок является код Шора [8]. Он использует квантовое кодирование и измерение для обнаружения и исправления ошибок в квантовых состояниях. Код Шора включает в себя использование квантовых битов (кубитов [9]) и дополнительных проверочных кубитов, которые позволяют обнаруживать ошибки и восстанавливать исходное состояние. Процесс квантовой коррекции ошибок обычно включает следующие шаги:

1. Квантовое кодирование [10]: исходная информация кодируется в состояния кубитов таким образом, чтобы обнаружить и исправить ошибки. Для этого используются специальные квантовые коды, такие как код Шора или коды стабилизации.

2. Измерение и проверка: кубиты проверяются на наличие ошибок путем измерения и сравнения с ожидаемыми результатами. Если обнаруживается ошибка, система переходит к следующему шагу.

3. Обратная связь и исправление: если ошибка обнаружена, используется обратная связь для коррекции состояния кубитов. Это может включать применение операций коррекции ошибок или перекодирование состояния [11] для исправления ошибок.

4. Повторение процесса: шаги 2 и 3 могут повторяться несколько раз для достижения более высокой точности и надежности исправления ошибок.

Квантовая коррекция ошибок является активной областью исследований в квантовой информатике, и существуют различные подходы и методы для реализации этого процесса. Некоторые из них включают применение поверхностных кодов, кодов Китаева, кодов Стейнера [12] и других помехоустойчивых кодов. Ос-

новная сложность квантовой коррекции ошибок заключается в сохранении квантовой суперпозиции и когерентности состояний при исправлении ошибок. Взаимодействие с окружающей средой может приводить к декогеренции и потере когерентности, что затрудняет процесс исправления ошибок. Поэтому разработка эффективных методов квантовой коррекции ошибок требует учета этих факторов и разработки алгоритмов, способных сохранять когерентность квантовых состояний. Составим формальную постановку задач:

- Разработка математической модели квантовых вычислений, учитывающей возможность возникновения ошибок и помех в квантовых системах.
- Исследование методов коррекции ошибок, применимых к квантовым вычислениям, с целью обеспечения надежности и точности результатов.
- Разработка метода, направленного на повышение помехоустойчивости в квантовых вычислениях.
- Разработка модели управления, которая включает в себя систему мониторинга и адаптации квантовых вычислений, позволяющую эффективно реагировать на возможные ошибки и помехи.
- Проведение экспериментов и исследований, чтобы оценить эффективность разработанных методов и модели управления в реальных квантовых вычислительных системах.
- Анализ и обобщение результатов исследований с целью улучшения помехоустойчивости и надежности квантовых вычислений.

1. Модель управления на основе помехоустойчивых квантовых вычислений, подавления и коррекции ошибок в квантовых вычислениях. Квантовые системы страдают от шума из-за того, что вентили подвержены ошибкам. Кроме того, кубиты страдают от декогеренции, т.е. кубиты спонтанно взаимодействуют с окружающей средой и теряют состояния. Следовательно, вывод квантовой схемы ошибочен. Более глубокая квантовая схема требует больше времени для выполнения и подвержена влиянию декогеренции. Большее количество вентилей [13] в схеме также увеличивает накопление ошибки вентиля. Параллельные операции вентилей на разных кубитах могут влиять на производительность друг друга, что известно, как перекрестные помехи.

1.1. Ошибка гейтов. Квантовые вентили реализуются импульсами [14], и импульсы могут быть ошибочными. Например, рассмотрим вентиль R_$Y(\pi/2)$. Из-за вариации импульс, предназначенный для $\pi/2$ оборота, может не привести к точному $\pi/2$ обороту, и он может занижать или перекручивать, что приводит к ошибочной логической операции. В результате сбои шлюза вызваны ошибочными логическими операциями. Для существующих систем ошибки вентилей с двумя кубитами (например, ошибка CNOT [15]) на порядок больше, чем ошибки вентилей с одним кубитом. Квантовая схема с большим количеством вентилей будет накапливать больше отказов вентилей, что снижает надежность квантовой программы. Следовательно, целью компиляции и устойчивого к ошибкам отображения является уменьшение количества вентилей в квантовой схеме.

1.2. Релаксация и дефазировка. Декогеренция связана с коротким временем жизни кубита. Кубиты могут взаимодействовать с окружающей средой и самопроизвольно терять свое сохраненное состояние. Например, на рис. 2 показан эффект релаксации, один из видов декогеренции. В результате релаксации [16] кубит в состоянии 1 спонтанно теряет энергию и оказывается в состоянии 0. Декогерентизация кубита обычно характеризуется временем релаксации T1 и временем дефазировки T2. Если время стробирования равно tg, то примерно 1–exp(–tg/T1) – это вероятность ошибки [17], при которой состояние |1> будет демпфировано. Это означает, что если время операции велико, кубит будет терять свое состояние.

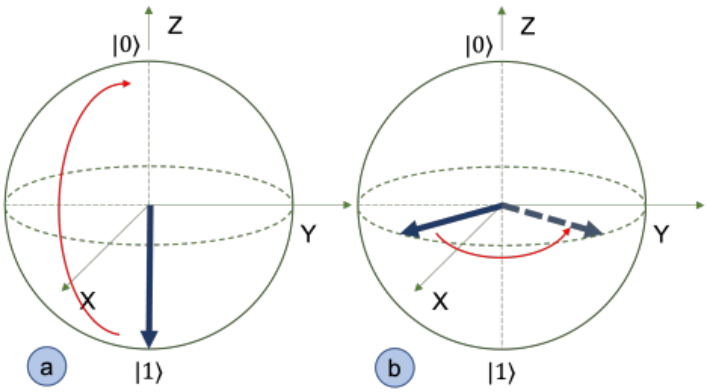

Рис. 2. Иллюстрация: а – релаксации и б – дефазировки состояний кубита

1.3. Ошибка измерения. Чтение кубита, содержащего состояние 1, может привести к состоянию 0 и наоборот из-за ошибки считывания; это возникает из-за несовершенства измерительной схемы. Вероятность ошибки считывания можно определить количественно с помощью простого метода. Это влечет за собой подготовку кубита во всех двоичных состояниях (т.е. 0 и 1 для одного кубита) и его считывание (как подготовка, так и измерение несколько раз). Кубиты на машинах IBM изначально установлены в 0 состояний по умолчанию. Следовательно, чтобы подготовить состояние «1», к состоянию 0 необходимо применить вентиль квантового NOT(X). В идеале, если повторим процесс подготовки состояния 0 или 1 и считывания N раз, он должен все время генерировать 0 или 1. Однако из-за ошибки считывания в некоторых случаях может быть прочитан перевернутый бит. Например, скажем, состояние 0 подготовлено и измерено 1000 раз. Из этих 1000 попыток 900 раз считывается 0, а остальные 100 раз считывается 1. Таким образом, коэффициент ошибки измерения $M(01)$ будет равен 100/1000 = 0,1 (Mxy обозначает вероятность считывания состояния 'y', в то время как подготовленный состояние 'x', таким образом, $M(00)$ = 900 1000 = 0,90). Для характеристики считывания с несколькими кубитами применяется тот же протокол. Однако количество двоичных состояний, которые необходимо подготовить и прочитать, будет больше. Например, чтобы охарактеризовать систему с 3 кубитами, необходимо подготовить и измерить 23 = 8 бинарных состояний (000, 001, 010, ..., 110 и 111) (каждое N раз). В отличие от ошибки затвора и декогеренции, которые зависят от количества затворов в схеме, ошибка считывания не зависит от количества затворов. Это зависит исключительно от читаемого состояния.

1.4. Ошибка перекрестных помех. Перекрёстные помехи [18] – ещё один вид ошибок, присутствующих в квантовых системах. Эффект операции вентиля на одном кубите теоретически не должен зависеть от того, что происходит с другими кубитами. Импульсы используются для создания квантовых вентилей. Однако стробирующий импульс, предназначенный для одного кубита, может случайно возбудить нежелательный кубит, что известно как «перекрестные помехи». Перекрёстные помехи могут вызвать условную зависимость в ошибках вентилей.

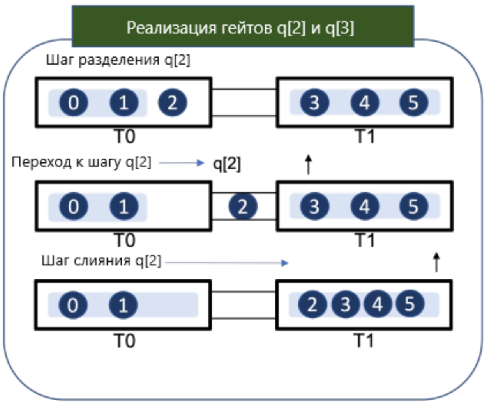

Рис. 3. Обзор потока программы для квантовых систем

Входные данные представляют собой грубую оценку решения, а выходные данные представляют собой несколько улучшенное приближение. Затем этот вывод используется в качестве предположения для следующей итерации, и с каждым циклом результат становится ближе к правильному решению. Проблема разбивается на ряд более мелких задач, которые можно оценить независимо в вариационном алгоритме, при этом сумма всех выходных данных соответствует интересующему приблизительному решению. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет выполнен эвристический критерий остановки, что обычно эквивалентно достижению энергетического порога.

Проблема сначала устанавливается, а затем транслируется/оптимизируется с помощью программного обеспечения, чтобы ее можно было эффективно решить с помощью аппаратного обеспечения или симуляторов в любой вычислительной экосистеме. Программный пакет обычно содержит языки программирования, компиляторы для сопоставления алгоритмов с машинами, инструменты моделирования, отладки и оптимизации, помогающие в эффективной реализации алгоритмов в системах. Инструменты моделирования, в частности для квантовых компьютеров, могут позволить программисту моделировать каждую квантовую операцию и отслеживать квантовое состояние, которое возникновения, а также его прогрессирования во времени. Эти возможности необходимы для отладки как приложений, так и нового оборудования. Оценщики ресурсов и другие инструменты оптимизации позволят быстро оценить производительность и ресурсы кубитов, необходимые для запуска различных квантовых алгоритмов. Это позволяет компилятору преобразовывать желаемые вычисления в эффективную форму, сводя к минимуму количество кубитов или операций с кубитами, необходимых для рассматриваемого оборудования. Эвристика оптимизации также будет зависеть от типа оборудования, на котором будет выполняться квантовая программа. Каждое оборудование представляет собой уникальный набор задач. В этом разделе мы рассмотрим эвристики компиляции, сопоставления и оптимизации, используемые для двух наиболее распространенных квантовых аппаратных средств – сверхпроводящих квантовых компьютеров и квантовых компьютеров с ловушками ионов. В результате этого наблюдения было разработано несколько алгоритмов отображения с учетом шума [19], [20]. Ключевой стратегией является приоритизация менее ошибочных кубитов для выполнения большинства операций гейтов. Чтобы повысить вероятность успеха программы, предлагается использовать дисперсию кубитов. В модели выбирается набор кубитов с наивысшей совокупной силой связи. Совокупная

сила связи [21] отражает две вещи: (а) кубит связан с большим количеством соседей, что благоприятно для оптимальной маршрутизации, и (б) операции с двумя кубитами между кубитом и его соседями будут менее ошибочными. В некоторых исследованиях предлагаются два подхода, (а) поиск изоморфного подграфа [23] и (б) жадный поиск [24], чтобы найти лучшее распределение программных (логических) кубитов по аппаратным кубитам [22].

1.5. Описание разработанной модели управления на основе помехоустойчивых квантовых вычислений. С учетом теоретического базиса описанных квантовых примитивов разработана модель управления на основе помехоустойчивых квантовых вычислений, подавления и коррекции ошибок в квантовых вычислениях основана на вариационных квантовых схемах (ВКС). ВКС широко используются в краткосрочных квантовых алгоритмах для различных задач, таких как подготовка основного состояния, оценка собственной энергии, сжатие квантовых данных, компиляция квантовых схем. Дадим чистое состояние продукта в качестве входных данных, итеративно обновите параметры схемы на основе результатов измерений и, наконец, выведем желаемое состояние. В ВКС выходные состояния служат базовыми состояниями квантового кода, а его кодировщик задается квантовой схемой. Предположим, у нас есть устройство с аппаратным графом подключения G. Вершины обозначают кубиты, а ребра обозначают соседние пары кубитов. К каждому кубиту можно применять однокубитные гейты, а к соседним кубитам − двухкубитные гейты. Мы стремимся найти K-мерный ККИО, который может обнаруживать набор ошибок $\varepsilon = E_\mu$, а схема кодирования должна быть как можно более мелкой. Перед запуском алгоритма разрабатываем многоуровневую ВКС, которая эффективна для графа связности. Обозначим количество слоев ВКС как L, максимально допустимое количество слоев как Lmax, эволюцию ВКС как U(θ), где θ − параметры схемы. Начинаем с L = 1 и выбираем начальное θ случайным образом. Кроме того, тщательно выбираем k = log(K) физических кубитов для подготовки логических данных, где логарифм дается по основанию 2. Сначала инициализируем выбранные кубиты одной из K бинарных строк |0>, |1>, …, |K – 1>, а остальные кубиты инициализируем $|0\rangle^{\otimes(n-k)}$. Эти состояния охватывают пространство входного кода

$$C_{in} = span\{|0\rangle|0\rangle^{\otimes(n-k)},...,|K-1\rangle|0\rangle^{\otimes(n-k)}\}, \quad (1)$$

где C_{in} − код с расстоянием d = 1. Функции стоимости можно оценить, запустив определенные схемы и выполнив измерения. Для оценки $\langle\psi_j|E_\mu|\psi_j\rangle$ подготавливаем начальное состояние $|j-1\rangle|0\rangle^{\otimes(n-k)}$, эволюционируем систему с ВКС U(θ), затем измеряем локальную наблюдаемую E_μ. Если ошибки E_{μ_1}, E_{μ_2}, … коммутируют, их можно измерить одновременно в одном измерении. Чтобы оценить $|\langle\psi_i|E_\mu|\psi_j\rangle|$, начинаем с $|j-1\rangle|0\rangle^{\otimes(n-k)}$, затем последовательно эволюционируем систему с U(θ), E_μ и U(θ), затем измеряем конечное состояние в вычислительном базисе. Измерениям помогает постселекция: сначала измеряем n-k вспомогательных кубитов, если результат $|0\rangle^{n-k}$, измеряем оставшиеся k кубитов. Обозначим вероятность получения двоичной строки $|i-1\rangle|0\rangle^{\otimes(n-k)}$ как p_{ij},

$\left\langle \psi_j \left| E_\mu \right| \psi_j \right\rangle = \sqrt{p_{ij}}$. В приведенном выше описании предполагаем, что набор ошибок E состоит только из ошибок Паули. Не имеет значения, включает ли E неунитарные или неэрмитовы члены. С этим справится добавление вспомогательных кубитов или вращения Паули. Оптимизация θ состоит из двух этапов. Первый и основной этап – это мини-пакетное обучение. После выборки начального θ минимизируем $C^{l_2}_{n,K,\varepsilon}$ с мини-пакетным градиентным спуском. В рамках каждой итерации отбираем подмножество $\mathcal{E}_S \subset \mathcal{E}$, оцениваем соответствующую частичную «2-нормовую функцию стоимости C» и ее градиент с помощью измерений, затем выполним один градиентный спуск со скоростью обучения η. Необходимое количество измерений для оценки $C^{l_2}_{n,K,\varepsilon}(\theta)$ с точностью до аддитивной ошибки имеет порядок $O(K^2 \mid \varepsilon_S \mid^2 / \varepsilon^2)$. Градиент можно оценить с помощью конечной разности или комбинации цепного правила и правила сдвига параметра. Мини-пакетный градиентный спуск обеспечивает более надежную сходимость и позволяет избежать попадания в ловушку локального минимума. Повторяем выборку и градиентный спуск до сходимости. Причина, по которой сначала минимизируем $C^{l_2}_{n,K,\varepsilon}$, заключается в том, что она сходится намного быстрее, чем $C^{l_1}_{n,K,\varepsilon}$. Кроме того, $C^{l_2}_{n,K,\varepsilon}$ дифференцируемо, а $C^{l_1}_{n,K,\varepsilon}$ – нет. Если набор ошибок E состоит из слишком большого числа членов, многообещающим альтернативным методом является построение «классических теней» для каждого базисного состояния $\left| \psi_j \right\rangle$, а затем использование теней для классической оценки функций стоимости. После обучения мини-пакетов, если $C^{l_2}_{n,K,\varepsilon}$ относительно мало (например, $C^{l_2}_{n,K,\varepsilon}$ < 0,01), оцениваем $C^{l_1}_{n,K,\varepsilon}$ и подстроить параметры θ относительно него, так как $C^{l_1}_{n,K,\varepsilon}$ напрямую связано с неточностью кода.

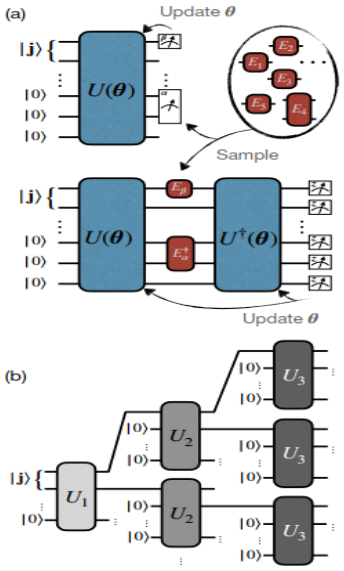

Рис. 4. Схематическая иллюстрация разработанной модели и конкатенации квантового кода

Используем метод Пауэлла, безградиентный оптимизатор для тонкой настройки. Если $C_{n,K,\varepsilon}^{l_1}$ меньше приемлемого допуска стоимости $C_{tol}^{l_1}$, останавливаем оптимизацию и выводим окончательные параметры θ. Устанавливаем толерантность как

$$C_{tol}^{l_1} \equiv 1 \times 10^{-6}. \quad (2)$$

1.5.1. Уменьшение ошибок измерения. Окончательное состояние квантовой схемы измеряется после завершения ее выполнения. Однако из-за ошибки считывания чтение кубита, содержащего 1, может привести к 0 и наоборот; это возникает из-за несовершенства схемы измерения. Например, измерение одного кубита выполняется в два этапа в сверхпроводящем квантовом оборудовании IBM: (а) выполнение считывающего импульса на канале считывания кубита и (б) запись связанного сигнала [25], который измеряет энергетическое состояние кубита, на канал приобретения. Сигнал, собранный в ходе сбора данных, суммируется для получения единого комплексного значения, которое затем наносится на график I-Q плоскости, где 0 и 1 означают отдельные кластеры [26]. Чтобы классифицировать измеренное состояние (0 или 1) из мнимой и действительной составляющих комплексного значения, IBM в настоящее время использует линейный классификатор.

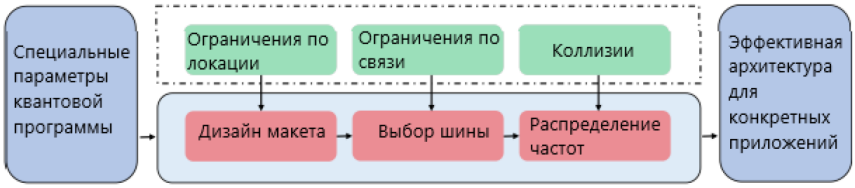

Рис. 5. Модель управления на основе помехоустойчивых квантовых вычислений

Для обучения классификатора используется синтетический набор данных. Чтобы построить этот набор данных, кубит многократно подготавливается в состояниях 0 и 1, после чего выполняются операции измерения. Входными объектами для классификатора являются действительные и мнимые компоненты, а фактические состояния – это метки. Когда истинное состояние ближе к 1, ошибка значительно увеличивается. Значительная зона перекрытия, создаваемая линейной границей решения между состояниями 1 и 1, способствует увеличению ошибки.

2. Сравнительный анализ моделей управления на основе помехоустойчивых квантовых вычислений, подавления и коррекции ошибок в квантовых вычислениях. Выполним сравнительный анализ различных моделей управления на основе помехоустойчивых квантовых вычислений, подавления и коррекции ошибок в квантовых вычислениях, который позволяет выделить достоинства каждой модели и понять, в каких сценариях они могут быть наиболее эффективными.

3-кубитный код:

♦ Достоинства: прост в реализации и эффективен для исправления одиночных ошибок в квантовых состояниях. Это может быть полезно для квантовых вычислений с небольшим числом кубитов, где существует высокая вероятность возникновения одиночных ошибок.

♦ Ограничения: не способен обрабатывать множественные ошибки и не предоставляет полного решения для более сложных видов помех.

Код исправления X+Z ошибок:

♦ Достоинства: обеспечивает более высокую помехоустойчивость, так как способен обрабатывать как ошибки по X-оси, так и по Z-оси, что увеличивает общую надежность квантовых вычислений.

♦ Ограничения: сложнее в реализации и требует дополнительных ресурсов. Эффективен при наличии множественных ошибок, но не всегда является оптимальным выбором для простых систем.

Код Шора:

♦ Достоинства: один из наиболее мощных и продвинутых методов коррекции ошибок в квантовых вычислениях. Может обрабатывать как одиночные, так и множественные ошибки, а также производить детекцию ошибок без их исправления.

♦ Ограничения: требует значительных вычислительных и ресурсных затрат. Реализация и применение сложны.

Код "переворота":

♦ Достоинства: прост в реализации и может эффективно исправлять ошибки на основе инверсии состояний кубитов. Подходит для систем с ограниченным числом кубитов.

♦ Ограничения: не так мощен, как некоторые другие коды коррекции ошибок, и не способен обрабатывать сложные виды помех.

Разработанная модель имеет ряд преимуществ согласно показателям, представленным в табл. 1. Общими достоинствами всех моделей являются увеличение надежности квантовых вычислений, снижение вероятности ошибок и увеличение точности результатов. Однако каждая модель имеет свои ограничения и требует сбалансированного выбора в зависимости от конкретных задач и ресурсов.

Таблица 1

Сравнительный анализ моделей управления на основе помехоустойчивых квантовых вычислений, подавления и коррекции ошибок в квантовых вычислениях

	Код "переворота"	**Код Шора**	**3-кубитный код**	**Разработанная модель**
Процент исправленной ошибки, %	80	86	87	91
Время выполнения, мс	1120	1450	1050	1090
Сложность выполнения	O(log n)	O(n)	O(n2)	O(n)
Сложность интеграции в вычислительный процесс	O(n3)	O(n3)	O(n)	O(log n)

Заключение. В статье рассмотрены технологии квантового оборудования, которые находятся в центре исследований, а также стек квантового программного обеспечения с упором на эвристики компиляции, сопоставления и оптимизации.

В последние несколько лет квантовые вычисления переживают устойчивый период роста. Однако чтобы обещания квантовых вычислений стали реальностью, нужны инновации на разных уровнях вычислительного стека. Только улучшения аппаратного обеспечения и изобретения новых квантовых алгоритмов будет не-

достаточно, и нужен промежуточный стек, который устранит разрыв между алгоритмом и аппаратным обеспечением. Поскольку полноценное исправление ошибок на устройствах будет невозможно, устранение ошибок – это способ двигаться вперед в обозримом будущем. Поэтому были рассмотрены различные типы ошибок, с которыми сталкиваются квантовые системы, их влияние на производительность программы, а также рассмотрели недавнюю литературу, касающуюся оптимизации и смягчения влияния шума на надежность квантовой программы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Bernstein E., Vazirani U.* Quantum complexity theory // In Proceedings of the 25th ACM Symposium on the Theory of Computing. – 1993. – P. 11-20.
2. *Кайе Ф., Лафламм Р.* Введение в квантовые вычисления. – М.; Ижевск: РХД, 2009. – 360 с.
3. *Phillips D.E., Eleischnauer A., Mair A., Walsworth P.L., Lukin M.D.* Storage of light in Atomic Vapor // Physical Review Letters. – Januar 2001. – Vol. 86, No. 05.
4. *Guzik V., Gushanskiy S., Polenov M., Potapov V.* Complexity Estimation of Quantum Algorithms Using Entanglement Properties // 16th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference (SGEM). – Bulgaria, 2016. – P. 20-26.
5. *Eckert A., Jozsa R.* Quantum Computation and Shor's Factoring Algorhitm // Rev. Mod. Phys. – 1996. – 68 (3). – P. 733-753.
6. *Altaisky M.V., Zolnikova N.N., Kaputkina N.E., Krylov V.A., Lozovik Yu.E., S. Dattani Nikesh.* Entanglement in a quantum neural network based on quantum dots. – URL: http://arxiv.org/pdf/ 1512.01141v1.pdf (дата обращения: 20.06.2023).
7. *Barenco A., Bennett C.H., Cleve R. et al.* Elementary gates for quantum computation // Phys. Rev. A. – 1995 – Nov. – Vol. 52, No. 5. – P. 3457-3467.
8. *Maurer P.C., Kucsko G., Latta C., Jiang L., Yao N.Y., Bennett S.D., M.D. Lukin.* Room-Temperature Quantum Bit Memory Exceeding One Second // Science. – 2012. – 336, 1283.
9. *Boneh D. and Lipton R.J.* Quantum cryptanalysis of hidden linear functions // In Don Coppersmith, editor, CRYPTO '95, Lecture Notes in Computer Science. – Springer – Verlag, 1995. – P. 424-437.
10. *Rieffel E., Polak W.* An introduction to quantum computing nonphysicists // ACM Computing Serveys. – 2000. – Vol. 32, No 3. – P. 300-335.
11. *Kim Y.H., Kulik S.P., Shih Y.* Quantum Teleportation with a Complete Bell State Measurement // J. Mod. Opt. – 2001. – 49, Issue 1. – P. 221-236.
12. *Du-an L.-M., Lukin M.D., Cirac J.I., Zoller P.* Long-distance quantum communication with atomic ensembles and linear optics // Nature. – November 2001. – Vol. 414.
13. *Kak S.* On Quantum Neural Computing // Inf. Sci. – 1995. – Vol. 83. – P. 143-160.
14. *Christof Zalka.* Grover's quantum searching algorithm is optimal // Phys. Rev. A60. – 1999. – P. 2746-2751.
15. *Neumann P., et al.* Quantum register based on coupled electron spins in a room-temperature solid // Nature Physics. – 2010. – P. 1-5. – DOI: 10.1038/NPHYS1536.
16. *Marshall A.* Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry // Mass Spectrom Rev. – 17. – P. 1-35.
17. *Werner R.F.* Quantum states with Einstein – Podolsky – Rosen correlations admitting a hidden-variable model // Phys. Rev. A. – 1989. – Vol. 40. – P. 4277.
18. *Китаев А., Шень А., Вялый М.* Классические и квантовые вычисления. – М.: МЦНМО, 1999. – 192 с.
19. *Гузик В.Ф., Гушанский С.М., Ляпунцова Е.В., Потапов В.С.* Основы теории построения квантовых компьютеров и моделирование квантовых алгоритмов: монография. – М.: Физматлит, 2019. – 285 с.
20. *Richard G. Milner.* A Short History of Spin // Contribution to the XVth International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry. – Charlottesville, Virginia, USA, September 9 - 13, 2013. – arXiv:1311.5016.
21. *Raedt K.D., Michielsen K., De Raedt H., Trieu B., Arnold G., Marcus Richter, Th Lip-pert, Watanabe H., and Ito N.* Massively parallel quantum computer simulator // Computer Physics Communications. – 176. – P. 121-136.

22. *Boixo S., Isakov S.V., Smelyanskiy V.N., Babbush R., Ding N., Jiang Z., Martinis,J.M., and Neven H.* Characterizing quantum supremacy in near-term devices // arXiv pre-print arXiv:1608.00263.
23. *Stierhoff G.C., Davis A.G.* A History of the IBM Systems Journal In: IEEE Annals of the History of Computing. – Vol. 20, Issue1. – P. 29-35.
24. *Collier, David.* The Comparative Method. In Ada W. Finifter, ed. Political Sciences: The State of the Discipline II. Washington, DC: American Science Association. – P. 105-119.
25. *Hales S. Hallgren* An improved quantum Fourier transform algorithm and applications // Proceedings of the 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science. November 12–14, 2000. – 515 p.
26. *Kleppner D., Kolenkow R.* An Introduction to Mechanics. – 2nd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2014. – 49 p.

REFERENCES

1. *Bernstein E., Vazirani U.* Quantum complexity theory, *In Proceedings of the 25th ACM Symposium on the Theory of Computing*, 1993, pp. 11-20.
2. *Kaye F., Laflamm R.* Vvedenie v kvantovye vychisleniya [Introduction to Quantum Computing]. Moscow; Izhevsk: RKhD, 2009, 360 p.
3. *Phillips D.E., Eleischnauer A., Mair A., Walsworth P.L., Lukin M.D.* Storage of light in Atomic Vapor, *Physical Review Letters*, Januar 2001, Vol. 86, No. 05.
4. *Guzik V., Gushanskiy S., Polenov M., Potapov V.* Complexity Estimation of Quantum Algorithms Using Entanglement Properties, *16th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference (SGEM)*. Bulgaria, 2016, pp. 20-26.
5. *Eckert A., Jozsa R.* Quantum Computation and Shor's Factoring Algorhitm, *Rev. Mod. Phys*., 1996, 68 (3), pp. 733-753.
6. *Altaisky M.V., Zolnikova N.N., Kaputkina N.E., Krylov V.A., Lozovik Yu.E., S. Dattani Nikesh.* Entanglement in a quantum neural network based on quantum dots. Available at: http://arxiv.org/pdf/ 1512.01141v1.pdf (accessed 20 June 2023).
7. *Barenco A., Bennett C.H., Cleve R. et al.* Elementary gates for quantum computation, *Phys. Rev. A*, 1995 – Nov., Vol. 52, No. 5, pp. 3457-3467.
8. *Maurer P.C., Kucsko G., Latta C., Jiang L., Yao N.Y., Bennett S.D., M.D. Lukin*. Room-Temperature Quantum Bit Memory Exceeding One Second, *Science*, 2012, 336, 1283.
9. *Boneh D. and Lipton R.J.* Quantum cryptanalysis of hidden linear functions, *In Don Coppersmith, editor, CRYPTO '95, Lecture Notes in Computer Science*. Springer – Verlag, 1995, pp. 424-437.
10. *Rieffel E., Polak W.* An introduction to quantum computing nonphysicists // ACM Computing Serveys. – 2000. – Vol. 32, No 3. – P. 300-335.
11. *Kim Y.H., Kulik S.P., Shih Y.* Quantum Teleportation with a Complete Bell State Measurement, *J. Mod. Opt.*, 2001, 49, Issue 1, pp. 221-236.
12. *Du-an L.-M., Lukin M.D., Cirac J.I., Zoller P.* Long-distance quantum communication with atomic ensembles and linear optics, *Nature*, November 2001, Vol. 414.
13. *Kak S.* On Quantum Neural Computing, *Inf. Sci.*, 1995, Vol. 83, pp. 143-160.
14. *Christof Zalka.* Grover's quantum searching algorithm is optimal, *Phys. Rev*. A60, 1999, pp. 2746-2751.
15. *Neumann P., et al.* Quantum register based on coupled electron spins in a room-temperature solid, *Nature Physics*, 2010, pp. 1-5. DOI: 10.1038/NPHYS1536.
16. *Marshall A.* Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry, *Mass Spectrom Rev*., 17, pp. 1-35.
17. *Werner R.F.* Quantum states with Einstein – Podolsky – Rosen correlations admitting a hidden-variable model, *Phys. Rev. A*, 1989, Vol. 40, pp. 4277.
18. *Kitaev A., Shen' A., Vyalyy M.* Klassicheskie i kvantovye vychisleniya [Classical and quantum computing]. Moscow: MTSNMO, 1999, 192 p.
19. *Guzik V.F., Gushanskiy S.M., Lyapuntsova E.V., Potapov V.S.* Osnovy teorii postroeniya kvantovykh komp'yuterov i modelirovanie kvantovykh algoritmov: monografiya [Fundamentals of the theory of constructing quantum computers and modeling of quantum algorithms: monograph]. Moscow: Fizmatlit, 2019, 285 p.

20. *Richard G. Milner.* A Short History of Spin, *Contribution to the XVth International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry*. Charlottesville, Virginia, USA, September 9 - 13, 2013. arXiv:1311.5016.
21. *Raedt K.D., Michielsen K., De Raedt H., Trieu B., Arnold G., Marcus Richter, Th Lip-pert, Watanabe H., and Ito N.* Massively parallel quantum computer simulator, *Computer Physics Communications*, 176, pp. 121-136.
22. *Boixo S., Isakov S.V., Smelyanskiy V.N., Babbush R., Ding N., Jiang Z., Martinis,J.M., and Neven H.* Characterizing quantum supremacy in near-term devices, *arXiv pre-print arXiv:1608.00263*.
23. *Stierhoff G.C., Davis A.G.* A History of the IBM Systems Journal In: IEEE Annals of the History of Computing, Vol. 20, Issue1, pp. 29-35.
24. *Collier, David.* The Comparative Method. In Ada W. Finifter, ed. Political Sciences: The State of the Discipline II. Washington, DC: American Science Association, pp. 105-119.
25. *Hales S. Hallgren* An improved quantum Fourier transform algorithm and applications, *Proceedings of the 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science. November 12–14, 2000*, P. 515.
26. *Kleppner D., Kolenkow R.* An Introduction to Mechanics. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2014, 49 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Ю.А. Кравченко.

Гушанский Сергей Михайлович – Южный федеральный университет; e-mail: smgushanskiy@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371656; кафедра вычислительной техники; к.т.н.ж доцент.

Потапов Виктор Сергеевич – e-mail: vpotapov@sfedu.ru; тел.: 88634371656; кафедра вычислительной техники; ассистент.

Gushanskiy Sergey Mikhailovich – Southern Federal University; e-mail: smgushanskiy@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371656; the department of computer engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

Potapov Viktor Sergeevich – e-mail: vpotapov@sfedu.ru; phone: +78634371656; the department of computer engineering; assistant.

УДК 621.396.946 DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-174-191

Махмуд Хуссейн Ахмед Махмуд, К.Е. Румянцев,
Аль-Бегат Адиль Хамид Шакир

АНАЛИЗ ВОСХОДЯЩЕГО ЛАЗЕРНОГО КАНАЛА СПУТНИКОВОЙ КОММУНИКАЦИИ В УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

По сравнению с традиционной спутниковой радиосвязью методы лазерной связи демонстрируют более высокую производительность с точки зрения доступных скоростей передачи данных, а также гарантируют снижение массогабаритных показателей, уменьшение веса и мощности аппаратуры на летательном аппарате. В системе спутниковой связи лазерный передатчик генерирует узкий пучок модулированного излучения. Лазерный луч, распространяющийся в атмосфере по направлению к оптическому приемнику, может испытывать значительные случайные флуктуации оптической интенсивности из-за турбулентности, что приводит к потере мощности и ухудшению характеристик системы. В системе с мультиплексированием поднесущих (SCM) несколько несущих информацию радиосигналов электрически модулируются на разных поднесущих радиочастотах. Аналоговые или цифровые сигналы, несущие информацию, могут иметь различные форматы модуляции. Высокая устойчивость к воздействию турбулентности атмосферы достигается с помощью однополосной модуляции. Оптическое излучение с одной боковой полосой (OSSB) обычно генерируется с использованием модулятора Маха-Цендера (MZM) с двумя