

Анферова Маргарита Сергеевна – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); e-mail: gludkina@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79055220749; старший преподаватель.

Белевцев Андрей Михайлович – e-mail: ambelevtsev@yandex.ru; тел.: +79037691788; д.т.н.; профессор.

Anferova Margarita Sergeevna – Moscow Aviation Institute (National Research University); e-mail: gludkina@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79055220749; senior lecturer.

Belevtsev Andrey Michailovitch – e-mail: ambelevtsev@yandex.ru; phone: +79037691788; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 004.032

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-129-139

С.М. Гушанский, В.И. Божич, В.С. Потапов

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА КВАНТОВОГО КОДА ДЛЯ ИСПРАВЛЕНИЯ ОШИБОК

Квантовая коррекция ошибок (ККО) требуется в квантовых компьютерах для смягчения влияния ошибок на физические кубиты. Цель состоит в том, чтобы оптимизировать нейронную сеть для высокой производительности декодирования, сохраняя при этом минималистическую аппаратную реализацию. Ошибки, связанные с декогеренцией, можно уменьшить, приняв схемы ККО, которые кодируют несколько несовершенных физических кубитов в логическое квантовое состояние, аналогично классической коррекции ошибок. Актуальность данных исследований заключается в математическом и программном моделировании и реализации корректирующих кодов для исправления нескольких видов квантовых ошибок в рамках разработки и выполнения квантовых алгоритмов для решения классов задач классического характера. Научная новизна данного направления выражается в исключении одного из недостатков квантового вычислительного процесса. Разработка теории и принципов построения моделирующих систем, устойчивых к внешним помехам (зависимость искажения данных от зашумленности, зависимость ошибки квантового вычислительного процесса от меры и чистоты запутанности) для моделирования квантовых вычислений является динамичной областью, о чем свидетельствует большое количество существующих моделей отражающих те или иные квантовые вычислительные процессы и явления (квантовая телепортация, параллелизм, запутанность квантовых состояний) и научных трудов. Хотя квантовые вычисления еще не готовы к переходу от теории к практике, тем не менее, можно обоснованно догадываться какую форму, возможно, квантовый компьютер примет, или, что более важно для дизайнера языка программирования, по какому интерфейсу можно будет взаимодействовать с таким квантовым компьютером. Естественно применить уроки, извлеченные из программирования классических вычислений к квантовым вычислениям. Проведенный анализ работ данной области показал, что в настоящее время достигнут новый качественный уровень, открывающий перспективные возможности по реализации многокубитовых квантовых вычислений. Перспективы реализации и развития связаны не только с технологическими возможностями, но и с решением вопросов построения эффективных квантовых систем решения актуальных математических задач, задач криптографии и задач управления (оптимизации).

Моделирование; квантовый алгоритм; кубит; модель квантового вычислителя; запутывание; суперпозиция; квантовый оператор.

S.M. Gushanskiy, V.I. Bozhich, V.S. Potapov

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A QUANTUM CODE FOR ERROR CORRECTION

Quantum error correction (QEC) is required in quantum computers to mitigate the impact of errors on physical qubits. The goal is to optimize the neural network for high decoding performance while maintaining a minimalistic hardware implementation. The errors associated with decoherence can be reduced by adopting QEC schemes that encode multiple imperfect physical qubits into a logical quantum state, similar to classical error correction. The relevance of these studies lies in the mathematical and software modeling and implementation of corrective codes to correct several types of quantum errors in the development and implementation of quantum algorithms for solving classes of problems of a classical nature. The scientific novelty of this direction is expressed in the elimination of one of the shortcomings of the quantum computing process. The development of the theory and principles for constructing modeling systems that are resistant to external interference (dependence of data distortion on noise, dependence of the error of a quantum computing process on the measure and purity of entanglement) for modeling quantum computing is a dynamic area, as evidenced by a large number of existing models reflecting certain quantum computational processes and phenomena (quantum teleportation, parallelism, entanglement of quantum states) and scientific papers. Although quantum computing is not yet ready to move from theory to practice, it is nevertheless possible to reasonably guess what form a quantum computer might take, or, more importantly for programming language design, what interface it would be possible to interact with such a quantum computer. It is natural to apply the lessons learned from the programming of classical computing to quantum computing. The analysis of works in this area showed that a new qualitative level has now been reached, which opens up promising opportunities for the implementation of multi-qubit quantum computing. Prospects for implementation and development are associated not only with technological capabilities, but also with the solution of issues of building effective quantum systems for solving actual mathematical problems, cryptography problems and control (optimization) problems.

Modeling; quantum algorithm; qubit; model of a quantum computer; entanglement; superposition; quantum operator.

Введение. Вместо битов в традиционных компьютерах квантовые компьютеры [1] работают, контролируя и манипулируя квантовыми битами (кубитами [2]). Благодаря точному управлению квантовыми явлениями, такими как запутанность [3], такие устройства на основе кубитов в принципе могут превзойти свои классические аналоги. С этой целью были разработаны эффективные алгоритмы квантовых вычислений [4] с такими приложениями, как целочисленная факторизация [5], поиск, оптимизация и квантовая химия [6]. В настоящее время нет предпочтительной технологии кубитов; различные физические системы [7] изучаются для использования в качестве кубитов, включая фотоны, захваченные ионы [8], сверхпроводящие цепи [9] и спины в полупроводниках. Недостаток, общий для всех этих подходов, заключается в том, что трудно достаточно изолировать кубиты от воздействия внешнего шума [10], а это означает, что ошибки во время квантовых вычислений неизбежны. Напротив, биты в классическом компьютере обычно реализуются как надежные состояния включения/выключения транзисторных переключателей [11], которые различаются миллиардами электронов. Это обеспечивает классические биты с высокой допустимой погрешностью, что практически исключает отказы на физическом уровне. Для квантовых компьютеров, где кубиты реализованы как хрупкие квантовые системы [12], такой защиты от ошибок нет. Таким образом, любой квантовый компьютер с моделью схемы, основанный на текущих и будущих технологиях кубитов, потребует некоторого активного исправления ошибок [13].

Руководствуясь требованиями высокопроизводительных сетей связи и Интернета, существует хорошо разработанная теория классической коррекции ошибок. Однако адаптировать существующие классические методы для квантовой коррекции ошибок непросто. Кубиты подчиняются теореме о запрете клонирования, означающей, что квантовая информация не может быть продублирована так

же, как классическая информация. Кроме того, невозможно выполнить произвольные измерения кубитового регистра [14] из-за проблемы коллапса волновой функции. Первоначально опасались, что эти ограничения создадут непреодолимую проблему для жизнеспособности квантовых вычислений. Тем не менее, прорыв была достигнута в 1995 г. Питером Шором [15] в статье, предлагающей первую схему квантовой коррекции ошибок. Метод Шора [16] продемонстрировал, как квантовая информация может быть избыточно закодирована путем запутывания ее в расширенной системе кубитов. Последующие результаты продемонстрировали, что расширения этой техники в принципе могут быть использованы для произвольного подавления частоты квантовых ошибок при соблюдении определенных физических условий для самих кубитов. Именно благодаря этим разработкам в области квантовой коррекции ошибок область квантовых вычислений перешла от теоретического любопытства к практической возможности.

1. Классическое исправление ошибок. На заре классических вычислений ошибки были повсюду: ошибки памяти, ошибки в битах, передаваемых по каналу, неправильно применяемые инструкции и т. д. В настоящее время аппаратное обеспечение намного надежнее, но у нас также есть гораздо более совершенные «программные решения». ” для ошибок, в частности коды исправления ошибок. Такие коды берут строку данных и кодируют ее в более крупную строку («кодовое слово»), добавляя много избыточности, так что небольшая доля ошибок в кодовом слове не сможет уменьшить информацию о закодированных данных. Самый простой пример – это, конечно, повторяющийся код. Если мы хотим защитить бит b , мы можем повторить его три раза:

$$b \mapsto bbb.$$

Если хотим декодировать закодированный бит b из (возможно, поврежденно-го) 3-битного кодового слова, мы просто берем мажоритарное значение из 3 бит. Рассмотрим очень простую модель шума: каждый бит переворачивается (независимо от других битов) с вероятностью p . Тогда изначально, до применения кода, b имеет вероятность p перевернуться. Но если мы применим код повторения, вероятность того, что мажоритарное значение трех битов будет другим от b – это вероятность 2 или 3 битфлипов [17], которая равна $3p^2(1-p) + p^3 < 3p^2$. Следовательно, частота ошибок была снижена с p до менее чем $3p^2$. Если начальная частота ошибок p_0 была $< 1/3$, то новая частота ошибок $p_1 < 3p_0^2$ меньше, чем p_0 , и мы добились прогресса: частота ошибок в закодированном бите меньше, чем частота ошибок в не закодированном бите. Если бы мы хотели, чтобы он был еще меньше, мы могли бы соединить код с самим собой, т.е. повторить каждый из трех битов в коде три раза, чтобы длина кода стала равной 9. Это дало бы частоту ошибок $p_2 = 3p^2(1-p_1) + p_1^3 < 3p_1^3 < 27p_0^4$, что дает дальнейшее улучшение. Как мы видим, пока начальная частота ошибок p была не более $1/3$, мы можем уменьшить частоту ошибок до любого желаемого значения: к уровню конкатенации кодируют один «логический бит» в $3k$ «физических битов», но частота ошибок для каждого логического бита снижена до $\frac{1}{3}(3p_0)^{2^k}$. Это очень хорошая вещь: если начальная ошибка ниже $1/3$, то k уровней конкатенации увеличивают количество битов экспоненциально (в k), но уменьшают частоту ошибок в два раза экспоненциально быстро. Как правило, уже небольшой выбор k снижает частоту ошибок до незначительного уровня. Например, предположим, что мы хотим защитить некоторое полиномиальное (в некотором n) число битов для некоторого полиномиального числа временных шагов, и наша физическая частота ошибок является некоторой фиксированной величиной $p_0 < 1/3$. Выбор $k = 2 \log \log n$ уровней конкатенации

уже достаточно для этого, потому что тогда $p_k \leq \frac{1}{3}(3p_0)^{2^k} \approx 2^{-(\log n)^2} = n^{-\log n}$ стремится к 0 быстрее, чем любой многочлен. В этом случае, согласно границе объединения, даже вероятность существования ошибки где-либо среди наших полиномиально многих логических битов за полиномиальное количество временных шагов будет пренебрежимо малой. При таком выборе k каждый логический бит будет закодирован в $3^k = (\log n)^{2 \log_2 3}$ физических битов, поэтому мы увеличиваем количество битов только на полилогарифмический коэффициент.

2. От классической к квантовой коррекции ошибок. Классические информационные технологии используют двоичные кодировки, в которых данные представляются в виде последовательностей битов, принимающих значения «0» или «1». Основной принцип исправления ошибок заключается в том, что количество битов, используемых для кодирования заданного количества информации, увеличивается. Точный способ, которым достигается это избыточное кодирование, определяется набором инструкций, известным как код исправления ошибок. Простейшим примером кода с исправлением ошибок является трехбитовый повторяющийся код [18], кодировщик для которого дублирует каждое битовое значение $0 \rightarrow 000$ и $1 \rightarrow 111$. Более формально мы можем определить трехбитный кодер как отображение из необработанного двоичный алфавит B в кодовый алфавит C_3

$$B = \{0, 1\} \xrightarrow{\text{3-битовое кодирование}} C_3 = \{000, 111\}, \quad (1)$$

где закодированные битовые строки «000» и «111» называются логическими кодовыми словами кода C_3 . В качестве примера рассмотрим простой случай, когда мы хотим передать однобитовое сообщение «0» получателю в другом месте. Используя трехбитное кодирование, сообщение, которое мы отправим, будет кодовым словом «000».

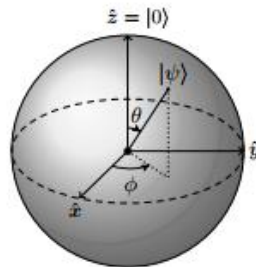


Рис. 1. В геометрическом представлении состояние кубита

$|\psi\rangle = \cos \frac{\theta}{2} |0\rangle + e^{i\varphi} \sin \frac{\theta}{2} |1\rangle$ можно представить в виде точки на поверхности сферы Блоха [19]

Теперь представьте, что сообщение подвергается единственной ошибке смежных битов во время передачи, так что получатель получает битовую строку «010». В этом сценарии получатель сможет сделать вывод, что предполагаемое кодовое слово «000» с помощью большинства голосов. То же самое будет верно для всех случаев, когда кодовое слово подвержено только одной ошибке. Однако, если кодовое слово подвержено двум ошибкам перестановки битов, большинство голосов приведет к неправильному кодовому слову. Последний сценарий, который следует рассмотреть, – это когда все три бита переворачиваются так, что кодовое слово «000» становится «111». В этом случае поврежденное сообщение также является кодовым словом: поэтому получатель не сможет узнать, что произошла ошибка.

Расстояние кода определяется как минимальное количество ошибок, которые таким образом заменят одно кодовое слово на другое. Мы можем связать расстояние d кода с количеством ошибок, которые он может исправить, следующим образом:

$$d = 2t + 1, \quad (2)$$

где t – количество ошибок, которые может исправить код. Ясно, что приведенное выше уравнение выполняется для трехбитового кода, где $t = 1$ и $d = 3$. В общем, коды исправления ошибок описываются в терминах нотации $[n, k, d]$, где n – общее количество битов в кодовом слове, k – количество закодированных битов (длина исходной битовой строки) и d – кодовое расстояние. В этом обозначении трехбитный код повторения помечен $[3, 1, 3]$.

3. От битов к кубитам. Вместо битов в классических системах фундаментальной единицей квантовой информации является кубит. Общее состояние кубита можно записать следующим образом

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, \quad (3)$$

где α и β – комплексные числа, удовлетворяющие условию $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. Подробности относительно обозначений, которые используем для представления квантовых состояний, можно найти в приложении А. Кубиты могут кодировать информацию в суперпозиции своих базовых состояний, что означает квантовые состояния имеют доступ к вычислительному пространству, которое масштабируется как 2^n , где n – общее количество кубитов. Именно за счет использования суперпозиции в сочетании с другими квантовыми эффектами, такими как запутанность, можно построить алгоритмы, обеспечивающие квантовое преимущество. Однако если такие алгоритмы когда-либо будут реализованы на текущем или будущем квантовом оборудовании [20], необходимо будет исправить ошибки кубитов.

4. Оцифровка квантовых ошибок. В классической информации биты находятся либо в состоянии «0», либо в состоянии «1». Следовательно, единственным типом ошибки, который следует учитывать, является переворот битов, который принимает 0 1 и наоборот. Напротив, общее состояние кубита, определенное в уравнении (3), может принимать континуум значений между его базисными состояниями [21]. С точки зрения при разработке кодов исправления ошибок это свойство проблематично, поскольку означает, что кубит подвержен бесконечному количеству ошибок. Чтобы проиллюстрировать это более ясно, полезно переписать общее состояние кубита в терминах геометрического представления, заданного формулой

$$|\psi\rangle = \cos \frac{\theta}{2} |0\rangle + e^{i\varphi} \sin \frac{\theta}{2} |1\rangle, \quad (4)$$

где амплитуды вероятности [22] поддерживают условие, что $\left| \cos \frac{\theta}{2} \right|^2 + \left| e^{i\varphi} \sin \frac{\theta}{2} \right|^2 = 1$.

В форме состояние кубита соответствует точке, определяемой углами θ и φ , на поверхности так называемой бловховской сферы. Пример состояния в этом представлении показан на рис. 1. Ошибки кубита могут возникать в результате различных физических процессов [23]. Простейшим случаем для изучения являются ошибки, которые заставляют кубит когерентно вращаться из одной точки на сфере Блоха в другую. Такие ошибки кубитов могут возникать, например, из-за систематических ошибок управления в оборудовании, с помощью которого реализуются кубиты. Математически когерентные ошибки [24] описываются унитарной [25] операцией $U(\delta\theta, \delta\varphi)$, которая изменяет состояние кубита следующим образом:

$$U(\delta\theta, \delta\varphi)|\psi\rangle = \cos \frac{\theta + \delta\theta}{2} |0\rangle + e^{i(\varphi + \delta\varphi)} \sin \frac{\theta + \delta\theta}{2} |1\rangle. \quad (5)$$

5. Поверхностный код. Задача создания квантовых кодов исправления ошибок заключается в поиске коммутирующих наборов стабилизаторов, которые позволяют обнаруживать ошибки, не нарушая закодированную информацию. Поиск таких наборов нетривиален, и для нахождения стабилизаторов с нужными свойствами требуются специальные конструкции кода. Реализация логического кубита с поверхностным кодом является ключевой целью многих усилий по созданию аппаратного обеспечения для квантовых вычислений.

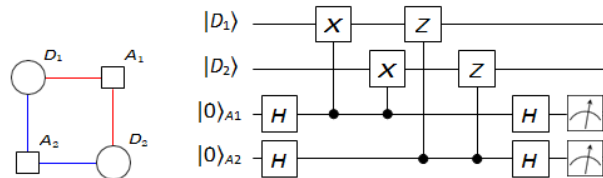


Рис. 2. Четырехтактный поверхностный код. а – изобразительное представление. Кодовые кубиты $D1$ и $D2$ представлены круглыми узлами; б – Эквивалентный четырехтактный поверхностный код в схемной записи

Поверхностные коды принадлежат к более широкому семейству так называемых топологических кодов. Общий принцип разработки топологических кодов заключается в том, что код строится путем «склеивания» повторяющихся элементов. С точки зрения фактической реализации конкретное преимущество поверхностного кода для современных аппаратных платформ заключается в том, что он требует взаимодействия только с ближайшими соседями. Это выгодно, поскольку многие платформы квантовых вычислений не могут выполнять высокоточные взаимодействия между кубитами на больших расстояниях.

6. Поверхностный код четырехтактный. Для поверхностных кодов полезно использовать графическое представление кодовых кубитов вместо обозначения схемы, которое мы использовали до сих пор. На рис. 2,а показан четырехтактный поверхностный код – фундаментальный строительный блок, вокруг которого строятся поверхностные коды. Круги на рис. 2,а представляют кодовые кубиты, а квадраты – вспомогательные кубиты. Красные ребра представляют управляемые X-вентильаторы, каждый из которых управляется вспомогательным кубитом А и воздействует на кубит данных D. Аналогичным образом синие ребра представляют управляемые Z-операции, каждая из которых управляется вспомогательным кубитом и воздействует на кубит данных. Эти контролируемые операции являются воротами, с помощью которых измеряются стабилизаторы четырехтактного цикла. Вспомогательный кубит $A1$ соединяется с кубитами данных $D1$ и $D2$ красными ребрами и, следовательно, измеряет стабилизатор $XD1 XD2$. Точно так же вспомогательный кубит $A2$ измеряет стабилизатор $ZD1 ZD2$. Для сравнения, четырехцикл показан в обозначениях квантовой схемы на рис. 2,б. Стабилизаторы четырехцикла $XD1 XD2$ и $ZD1 ZD2$ коммутируют друг с другом, поскольку нетривиально пересекаются на четном числе кодовых кубитов. В этом легко убедиться, просмотрев рис. 2,б. Кодовое слово $|0\rangle$ четырехциклового цикла можно подготовить, установив начальное состояние кодовых кубитов в $D1D2 = 00$ и следуя общей процедуре кодирования. Однако, поскольку четырехцикл имеет два кодовых кубита $n = 2$ и два стабилизатора $m = 2$, число кодируемых им логических кубитов равно $k = n, m = 0$. В результате четырехцикл сам по себе не является полезный код. Однако мы увидим, что работающие коды обнаружения и исправления могут быть сформированы путем объединения нескольких четырехциклов в квадратные решетки.

Алгоритм 1. Квантовое вариационное обучение для квантовых кодов с исправлением ошибок

Input: набор ошибок E , аппаратно-эффективный ВКС $U(\theta)$ с L слоями, приемлемое количество слоев L_{\max} , приемлемый допуск по стоимости C_{tol}^l .

Output: приближительный квантовый код с аппаратно-эффективным кодировщиком, обнаруживающим E .

while $L \leq L_{\max}$ и $C_{n,K,\varepsilon}^l(\theta) > C_{tol}^l$ **do**

while $C_{n,K,\varepsilon}^{l_2}(\theta)$ не сходится **do**

Выберите подмножество $\varepsilon_S \subset \varepsilon$.

Инициализируйте систему для K двоичных строк.

Запустите $U(\theta)$, выведите $\{|\psi_j\rangle\}$.

Измерьте наблюдаемые $E_\mu \in \varepsilon_S$.

Инициализируйте систему для K двоичных строк.

Запустите $U(\theta)E_\mu U(\theta)$ для $E_\mu \in \varepsilon_S$.

Реализуйте проективные измерения.

Оцените $C_{n,K,\varepsilon_S}^{l_2}(\theta)$ и его градиент.

Выполните шаг градиентного спуска, обновите θ .

end

if $C_{n,K,\varepsilon}^{l_2}(\theta) < 0,01$, **then**

while $C_{n,K,\varepsilon}^l(\theta)$ не сходится **do**

Инициализируйте систему для K двоичных строк.

Запустите $U(\theta)$, выведите $\{|\psi_j\rangle\}$.

Измерьте наблюдаемые $E_\mu \in \varepsilon$.

Инициализируйте систему для K двоичных строк.

Запустите $U(\theta)E_\mu U(\theta)$ для каждого $E_\mu \in \varepsilon$.

Оценка $C_{n,K,\varepsilon}^l(\theta)$ и его градиент.

Свести к минимуму $C_{n,K,\varepsilon}^l(\theta)$, обновить θ .

end

end

$L \leftarrow L + 1$.

end

$\theta_{opt} \leftarrow \theta$.

Return: θ_{opt} , $C_{n,K,\varepsilon}^l(\theta_{opt})$.

7. Отказоустойчивость. До сих пор при обсуждении кодов квантовой коррекции ошибок мы предполагали, что ошибки возникают только в определенных местах схемы. Например, на принципиальной схеме двухкубитного кода, показанной на рис. 2, ошибки ограничены областью, обозначенной буквой «E». При этом мы предполагаем, что весь аппарат, связанный с кодированием и выделением синдромов, работает безошибочно. Однако на практике это не так. Фактически, для многих технологий квантовых вычислений двухкубитные вентили, а также операции измерения могут быть доминирующими источниками ошибок. Таким образом, нереально предполагать, что какая-либо часть схемы не содержит ошибок. Код с квантовой коррекцией ошибок считается отказоустойчивым, если он может учитывать ошибки, возникающие в любом месте схемы. Существуют различные ме-

тоды модификации квантовых схем, чтобы сделать их отказоустойчивыми. Проще говоря, эти методы гарантируют, что небольшие погрешности на малых расстояниях не будут бесконтрольно распространяться по цепи. Модификация схемы квантовой коррекции ошибок для обеспечения отказоустойчивости может привести к значительным накладным расходам с точки зрения общего количества необходимых дополнительных вспомогательных кубитов. Например, процедура выделения отказоустойчивого синдрома, предложенная Шором, требует λ вспомогательных кубитов для измерения каждого стабилизатора, где λ – количество неидентичных элементов в стабилизаторе. В этой схеме для измерения двух стабилизаторов четырехкубитного кода, изображенного на рис. 5, потребуется восемь вспомогательных кубитов. Существуют более эффективные схемы, но отказоустойчивая версия кода всегда будет иметь повышенные накладные расходы по сравнению с оригинальной схемой. Для квантовой схемы с зашумленными вспомогательными измерениями не всегда возможно декодировать код исправления ошибок за один цикл извлечения синдрома. Чтобы проиллюстрировать это, рассмотрим случай, когда синдром $S = 10$ измеряется в трехкубитном коде. Этот синдром вызван ошибкой $X1$. Однако, если сами вспомогательные устройства подвержены ошибкам, то тот же самый синдром мог бы также возникнуть в результате ошибки вспомогательных кубит $A1$. Чтобы различать эти две возможности, необходимо провести два (или более) раунда измерений стабилизаторов и сравнить синдромы во времени. Следует отметить, что декодирование с течением времени таким способом, помимо любых других модификаций, необходимых для отказоустойчивости, будет снижать порог для кода. Например, порог для поверхностного кода с зашумленными вспомогательными измерениями составляет $\approx 1\%$ по сравнению с $\approx 10\%$ в идеальном случае.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В настоящее время активно развивается теория квантовых вычислений. Несмотря на то, что идея квантового компьютера была высказана еще Р. Фейнманом в 1982 г. До сих пор проводятся научные исследования по этой тематике. Исправление ошибок – одна из основных задач, стоящих перед квантовыми вычислительными устройствами. И без решения данной проблемы, дальнейшие успешные разработки в этой многообещающей области станут неэффективными. В данной работе численно смоделированы коды коррекции различных видов ошибок. Проанализированы основные препятствия и трудности на пути защиты канала [26] от шума, а также предложены некоторые методы их преодоления. Произведена реализация схем исправления основных типов квантовых ошибок.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-00916.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Calderbank A.R., Shor P.W.* Good quantum error-correcting codes exist // *Phys Rev A.* – 1996. – Vol. 54. – P. 1098-1106.
2. *Linke N.M., Gutierrez M., Landsman K.A., et al.* Fault-tolerant quantum error detection // *Science Advances.* – 2017. – 3 (10):e1701074. – <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701074>.
3. *Vuillot C.* Is error detection helpful on IBM 5q chips? // *Quantum Information and Computation.* – 2018. – Vol. 18, No. 11-12. – P. 0949-0964.
4. *Harper R., Flammia S.T.* Fault-tolerant logical gates in the IBM quantum experience // *Phys Rev Lett.* – 2019. – 122:080504. – <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.122.080504>.
5. *Wootton J.R., Loss D.* Repetition code of 15 qubits. *Physical Review A.* – 2018. – Vol. 97 (5). – <https://doi.org/10.1103/physreva.97.052313>.
6. *Aspuru-Guzik A., Dutoi A.D., Love P.J., et al.* Simulated quantum computation of molecular energies // *Science.* – 2005. – Vol. 309 (5741). – P. 1704-1707. – <https://science.sciencemag.org/content/309/5741/1704>.

7. Knill M., Laflamme R., and Zurek W. Threshold accuracy for quantum computation. *quantph/9610011*, 15 Oct 1996.
8. Гушанский С.М., Потапов В.С. Методика разработки и построения квантовых алгоритмов // Информатизация и связь. – 2017. – № 3. – С. 101-104.
9. Гушанский С.М., Поленов М.Ю., Потапов В.С. Реализация компьютерного моделирования системы с частицей в одномерном и двухмерном пространстве на квантовом уровне // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 3. – С. 223-233.
10. Гузик В.Ф., Гушанский С.М., Потапов В.С. Количественные характеристики степени запутанности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 3. – С. 76-86.
11. Kleppner D., Kolenkow R. *An Introduction to Mechanics* (Second ed.). – Cambridge: Cambridge University Press, 2014. – 49 p.
12. Потапов В.С., Гушанский С.М. Квантовые типы ошибок и методы их устранения, зависимость ошибки от меры и чистоты запутанности // Сб. трудов XIV Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов ИТCSAnY-2016. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2016. – Т. 3. – С. 123-129.
13. Gushansky S., Rykhovskiy V., Kozlovskiy A., Potapov V. Development of a scheme of a hardware accelerator of quantum computing for correction quantum types of errors // The 4-th Computational Methods in Systems and Software 2020, Czech Republic. – P. 64-73.
14. 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.
15. Guzik V., Gushanskiy S., Polenov M., Potapov V. Complexity Estimation of Quantum Algorithms Using Entanglement Properties // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, Bulgaria, 2016. – P. 20-26.
16. Guzik V., Gushanskiy S., Polenov M., Potapov V. Models of a quantum computer, their characteristics and analysis // 9th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). – Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2015. – P. 583-587.
17. Collier D. The Comparative Method. In: Finifter A.W. (ed.) *Political Sciences: The State of the Discipline II*. American Science Association. Washington, DC, 1993. – P. 105-119.
18. Olukotun K. *Chip Multiprocessor Architecture – Techniques to Improve Throughput and Latency*. – Morgan and Claypool Publishers, San Rafael, 2007.
19. 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*. – Vol. 176. – P. 121-136.
20. Williams C.P. *Explorations in Quantum Computing // Texts in Computer Science*. Chapter 2 “Quantum Gates”. – Springer, 2011. – P. 51-122.
21. Potapov V., Gushanskiy S., Guzik V., Polenov M. The Computational Structure of the Quantum Computer Simulator and Its Performance Evaluation // In: *Software Engineering Perspectives and Application in Intelligent Systems*. Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer, 2019. – Vol. 763. – P. 198-207.
22. Bennett C.H., Shor P.W., Smolin J.A., Thapliyal A.V. Entanglement-assisted Capacity of a Quantum Channel and the Reverse Shannon Theorem // *IEEE Transactions on Information Theory*. – 2002. – Vol. 48. – 2637.
23. Milner R.G. A Short History of Spin // In: *Contribution to the XV International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry*. – Charlottesville, Virginia, USA, September 9–13, 2013. – arXiv:1311.5016. 2013.
24. Hallgren H.S. An improved quantum Fourier transform algorithm and applications // In: *Proceedings of the 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, Redondo Beach, CA. – IEEE, 2000. – P. 515.
25. Boneh D., Zhandry M. Quantum-secure message authentication codes // In: *Proceedings of Eurocrypt*. – 2013. – P. 592-608
26. Potapov V., Gushansky S., Guzik V., Polenov M. Architecture and Software Implementation of a Quantum Computer Model // In: *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – Springer, 2016. – Vol. 465. – P. 59-68.

REFERENCES

1. Calderbank A.R., Shor P.W. Good quantum error-correcting codes exist, *Phys Rev A*, 1996, Vol. 54, pp. 1098-1106.
2. Linke N.M., Gutierrez M., Landsman K.A., et al. Fault-tolerant quantum error detection, *Science Advances*, 2017, 3 (10):e1701074. Available at: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701074>.
3. Vuillot C. Is error detection helpful on IBM 5q chips?, *Quantum Information and Computation*, 2018, Vol. 18, No. 11-12, pp. 0949-0964.
4. Harper R., Flammia S.T. Fault-tolerant logical gates in the IBM quantum experience, *Phys Rev Lett.*, 2019, 122:080504. Available at: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.122.080504>.
5. Wootton J.R., Loss D. Repetition code of 15 qubits, *Physical Review A*, 2018, Vol. 97 (5). Available at: <https://doi.org/10.1103/physreva.97.052313>.
6. Aspuru-Guzik A., Dutoi A.D., Love P.J., et al. Simulated quantum computation of molecular energies, *Science*, 2005, Vol. 309 (5741), pp. 1704-1707. Available at: <https://science.sciencemag.org/content/309/5741/1704>.
7. Knill M., Laflamme R., and Zurek W. Threshold accuracy for quantum computation. *quantph/9610011*, 15 Oct 1996.
8. Gushanskiy S.M., Potapov V.S. Metodika razrabotki i postroeniya kvantovykh algoritmov [Methodology of development and construction of quantum algorithms], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2017, No. 3, pp. 101-104.
9. Gushanskiy S.M., Polenov M.Yu., Potapov V.S. Realizatsiya komp'yuternogo modelirovaniya sistemy s chastitsey v odnomernom i dvukhmernom prostranstve na kvantovom urovne [Implementation of computer simulation of a system with a particle in one-dimensional and two-dimensional space at the quantum level], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 3, pp. 223-233.
10. Guzik V.F., Gushanskiy S.M., Potapov V.S. Kolichestvennye kharakteristiki stepeni zaputannosti [Quantitative characteristics of the degree of entanglement], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 3, pp. 76-86.
11. Kleppner D., Kolenkow R. An Introduction to Mechanics (Second ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 2014, 49 p.
12. Potapov V.S., Gushanskiy S.M. Kvantovye tipy oshibok i metody ikh ustraneniya, zavisimost' oshibki ot mery i chistoty zaputannosti [Quantum types of errors and methods of their elimination, the dependence of error on the measure and purity of entanglement], *Sb. trudov XIV Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov ITSaIU-2016* [Proceedings of the XIV All-Russian Scientific Conference of Young Scientists, graduate students and students of ITSaIU–2016]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2016, Vol. 3, pp. 123-129.
13. Gushanskiy S., Pykhovskiy V., Kozlovskiy A., Potapov V. Development of a scheme of a hardware accelerator of quantum computing for correction quantum types of errors, *The 4-th Computational Methods in Systems and Software 2020, Czech Republic*, pp. 64-73.
14. 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*, pp. 515.
15. Guzik V., Gushanskiy S., Polenov M., Potapov V. Complexity Estimation of Quantum Algorithms Using Entanglement Properties, *16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, Bulgaria, 2016*, pp. 20-26.
16. Guzik V., Gushanskiy S., Polenov M., Potapov V. Models of a quantum computer, their characteristics and analysis, *9th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2015, pp. 583-587.
17. Collier D. The Comparative Method. In: Finifter A.W. (ed.) *Political Sciences: The State of the Discipline II*. American Science Association. Washington, DC, 1993, pp. 105-119.
18. Olukotun K. Chip Multiprocessor Architecture – Techniques to Improve Throughput and Latency. Morgan and Claypool Publishers, San Rafael, 2007.
19. 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*, Vol. 176, pp. 121-136.
20. Williams C.P. Explorations in Quantum Computing, *Texts in Computer Science. Chapter 2 "Quantum Gates"*. Springer, 2011, pp. 51-122.

21. Potapov V., Gushanskiy S., Guzik V., Polenov M. The Computational Structure of the Quantum Computer Simulator and Its Performance Evaluation, In: *Software Engineering Perspectives and Application in Intelligent Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, 2019, Vol. 763, pp. 198-207.
22. Bennett C.H., Shor P.W., Smolin J.A., Thapliyal A.V. Entanglement-assisted Capacity of a Quantum Channel and the Reverse Shannon Theorem, *IEEE Transactions on Information Theory*, 2002, Vol. 48, 2637.
23. Milner R.G. A Short History of Spin, In: *Contribution to the XV International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry*. Charlottesville, Virginia, USA, September 9–13, 2013. arXiv:1311.5016. 2013.
24. Hallgren H.S. An improved quantum Fourier transform algorithm and applications, In: *Proceedings of the 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science, Redondo Beach, CA*. IEEE, 2000, pp. 515.
25. Boneh D., Zhandry M. Quantum-secure message authentication codes, In: *Proceedings of Eurocrypt*, 2013, pp. 592-608
26. Potapov V., Gushanskiy S., Guzik V., Polenov M. Architecture and Software Implementation of a Quantum Computer Model, In: *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, 2016, Vol. 465, pp. 59-68.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. Г.В. Куповых.

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

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

Божич Владимир Иванович – Ростовский государственный экономический университет; e-mail: vladimir.bozhich@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634375501; кафедра естественных и безопасности жизнедеятельности; к.т.н.; профессор.

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; the department of computer engineering; assistant.

Bozhich Vladimir Ivanovich – Rostov State Economic University; e-mail: vladimir.bozhich@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +78634375501; the department of natural science and life safety; cand. of eng. sc.; professor.

УДК 004.82

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-139-147

В.И. Данильченко, В.М. Курейчик

ПРИМЕНЕНИЕ ДИСТРИБУТИВНОЙ СЕМАНТИКИ ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ ЗНАЧИМЫХ СОЧЕТАНИЙ ЗАГОЛОВКОВ НЕСКОЛЬКИХ КОЛЛЕКЦИЙ ТЕКСТОВ ПРИ ФОРМАЛИЗАЦИИ ЛИНГВИСТИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассматриваются методы формирования специальных моделей представления различных наборов знаний в различных информационных системах. Работа посвящена применению дистрибутивной семантики при выделении значимых сочетаний в одной предметной области (ПрО) в рамках формализации лингвистической экспертной информации (ЛЭИ). В работе применяется подход к формализации ЛЭИ на основе набора аналитических методов, где в качестве моделей используется линейная алгебра. Такой подход дает