

Раздел IV. Машинное обучение и нейронные сети

УДК 004.383

DOI 10.18522/2311-3103-2025-6-229-239

Н.А. Бочаров, Н.Б. Парамонов

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ БОРТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Современные робототехнические комплексы решают всё более сложные задачи, что предъявляет повышенные требования к быстродействию и эффективности бортовых вычислительных систем. Традиционные методы наращивания производительности (масштабирование аппаратуры, параллельные вычисления и др.) уже приближаются к своим пределам, поэтому возникает необходимость поиска принципиально новых подходов. Квантовые вычисления рассматриваются как перспективное направление, способное значительно превзойти классические вычислительные мощности в ряде задач. В этой связи целью данного исследования является изучение применимости квантовых вычислений для бортовых вычислительных систем робототехнических комплексов (РТК). Для достижения поставленной цели проведён всесторонний анализ требований (производительность, энергопотребление, массогабаритные показатели, надёжность и др.), предъявляемых к бортовым вычислительным системам РТК. Оценён потенциал квантовых алгоритмов в решении типовых задач робототехники, в том числе оптимизационных задач и задач машинного обучения, и проведено их имитационное моделирование с последующим сравнением результатов с классическими методами. Кроме того, рассмотрены текущие ограничения современных квантовых компьютеров (например, ограниченное число кубитов и проблемы декогеренции) и на основе тенденций развития технологий сделан прогноз их совершенствования в ближайшие годы. Проведённое исследование подтверждает перспективность применения квантовых вычислений для решения задач оптимизации и машинного обучения, которые являются ключевыми для интеллектуальных РТК. Однако текущие технологические ограничения (габариты, требования к условиям работы и нестабильность квантовых процессоров) пока не позволяют использовать квантовые компьютеры непосредственно на борту. Тем не менее, предложены направления дальнейших исследований и рассмотрены возможные сценарии постепенного внедрения квантовых вычислений в архитектуру РТК в ближайшие 5–15 лет, например, по мере миниатюризации квантовых процессоров и развития методов их интеграции в бортовые системы. Таким образом, по мере устранения существующих барьеров квантовые вычислители могут со временем стать неотъемлемой частью бортовых систем управления РТК, обеспечивая качественный скачок в их производительности.

Бортовые вычислители; бортовые вычислительные системы; робототехника; квантовые вычисления; квантовые компьютеры; моделирование.

N.A. Bocharov, N.B. Paramonov

PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF QUANTUM COMPUTING IN ONBOARD COMPUTING SYSTEMS OF ROBOTIC COMPLEXES

Modern robotic systems are solving increasingly complex tasks, imposing higher demands on the speed and efficiency of onboard computing systems. Traditional methods of increasing performance (scaling hardware, parallel computing, etc.) are approaching their limits, necessitating the search for fundamentally new approaches. Quantum computing is considered a promising direction that could significantly surpass classical computational capabilities in certain tasks. In this regard, the goal of this study is to explore the applicability of quantum computing for onboard computing systems in robotic complexes (RCs). To achieve this goal, a comprehensive analysis of the requirements (performance, energy consumption, size and weight constraints, reliability, etc.) for onboard computing systems of RCs has been conducted. The potential of quantum algorithms in solving typical robotic tasks, including optimization prob-

lems and machine learning, has been assessed, followed by simulation modeling and comparison with classical methods. Additionally, current limitations of modern quantum computers (e.g., limited qubit count and decoherence issues) have been examined, and a forecast has been made regarding their development in the coming years based on technological trends. The study confirms the promising application of quantum computing for solving optimization and machine learning problems, which are critical for intelligent RCs. However, current technological limitations (size, operational conditions, and instability of quantum processors) do not yet allow for their direct use onboard. Nevertheless, directions for further research have been proposed, and possible scenarios for the gradual integration of quantum computing into RC architectures over the next 5–15 years have been considered, particularly as quantum processors become more compact and methods for integrating them into onboard systems improve. Thus, as existing barriers are overcome, quantum computers may eventually become an integral part of onboard control systems for RCs, providing a significant leap in their performance.

Onboard computers; robotics; quantum computing; modeling.

Введение. Управление современными автономными робототехническими комплексами (РТК) осуществляются с помощью специализированных бортовых вычислительных систем (БВС) [1]. Развитие возможностей сенсорных систем, систем глобальной навигации, рост вычислительной мощности и совершенствование алгоритмов позволяют создавать БВС, обладающие широкими интеллектуальными возможностями. Современные и перспективные технологии искусственного интеллекта на основе искусственных нейронных сетей требуют существенного роста вычислительных мощностей для обеспечения высоких выходных показателей. Вместе с этим нерешенной остается проблема обеспечения надежности БВС, основным методом решения которой остается введение различного рода избыточности. В том числе – резерва производительности [2].

Совокупность этих условий диктует необходимость дальнейшего роста вычислительной мощности БВС. Однако, существующие технологии кремниевой микроэлектроники приближаются к своему пределу и уже не успевают увеличивать производительность вычислительных устройств соответственно увеличению потребности вычислительных ресурсов новыми алгоритмами. Такие задачи в робототехнических комплексах сейчас выполняются с помощью высокопараллельных устройств, например, графических процессоров. Квантовые компьютеры способны предложить новые подходы к решению таких задач за счёт явлений суперпозиции и квантового параллелизма. Хотя полностью “квантовых” роботов в ближайшее время не предвидится, в литературе уже обсуждались концепции квантовых роботов [3, 4].

Целью данной работы является исследование применимости квантовых вычислений для БВС РТК. Приведены оценки ускорения основных задач РТК с использованием квантовых вычислений, полученные на моделирующем стенде.

Основы квантовых вычислений. Кубиты и принцип суперпозиции. Квантовый бит или кубит – базовый элемент информации в квантовом компьютере. В отличие от классического бита, принимающего значение 0 или 1, кубит может находиться в состоянии суперпозиции двух базовых состояний одновременно. Математически состояние кубита выражается как линейная комбинация:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, \alpha^2 + \beta^2 = 1$$

где $|0\rangle$ и $|1\rangle$ – базисные состояния, а комплексные коэффициенты α и β определяют амплитуды вероятностей этих состояний. При измерении квантовое состояние коллапсирует в одно из базисных значений, нарушая суперпозицию. Кроме того, два и более кубита могут находиться в состоянии запутанности. Суперпозиция и запутанность принципиально отличают квантовые вычисления от классических и позволяют обрабатывать сразу множество состояний параллельно.

Квантовые вычисления осуществляются с помощью квантовых логических гейтов (вентилей), которые представляют собой унитарные преобразования над состояниями кубитов. Квантовый гейт – это матрица размером $2^m \times 2^m$, где m – количество кубитов, на которые воздействует гейт. Квантовая схема – это последовательность преобразований из конечного набора гейтов. Результат ее работы вероятностный.

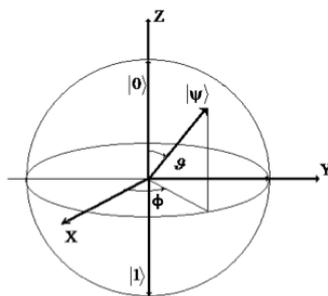


Рис. 1: Сфера Блоха – геометрическая визуализация состояния одного кубита.

Главным отличием квантовой модели является экспоненциальный рост размерности состояния системы с числом кубитов: n кубитов описываются 2^n амплитудами. Это означает, что квантовый регистр из n кубитов может охватить суперпозицию 2^n разных значений одновременно. Квантовые алгоритмы стремятся использовать это свойство, проводя вычисления одновременно над множеством вариантов решения (квантовый параллелизм). В некоторых задачах это приводит к существенному ускорению по сравнению с лучшими классическими алгоритмами.

Современные достижения в области квантовых компьютеров. На сегодняшний день ведущими центрами разработки квантовых компьютеров являются IBM, Google, Rigetti, IonQ и др., которые создали прототипы квантовых процессоров с различными архитектурами. Такие эксперименты показали принципиальную работоспособность квантовых устройств для задач, непосильных классическим вычислительным системам, хотя практическая полезность продемонстрированной задачи пока ограничена.

Помимо сверхпроводящих кубитов (IBM и Google), развиваются и другие технологии: ионные ловушки (IonQ и др.) – где роль кубитов выполняют холодные ионы, захваченные электромагнитным полем; фотонные квантовые компьютеры (Xanadu); квантово-отжиговые устройства (D-Wave) – специализированные системы для решения оптимизационных задач методом квантового отжига.

Одной из главных проблем на пути создания полезных квантовых компьютеров остаётся высокая ошибкообразующая среда: кубиты чрезвычайно чувствительны к помехам, быстро теряют когерентность, а квантовые логические операции пока имеют ненулевую вероятность ошибки (типичные показатели – ошибки порядка 10^{-3} – 10^{-4} на элементарный шаг).

Ожидается, что в течение следующих лет количество кубитов и их качество (коэффициенты когерентности, точность операций) будут значительно расти. Согласно публичной «дорожной карте» IBM, к 2025 году планируется создать многокластерную систему с суммарно >1000 кубитами, а к 2033 году – квантовый комплекс с тысячами логических кубитов.

Требования к БВС РТК. БВС РТК часто работают в условиях жёстких ограничений по массо-габаритным параметрам и энергопотреблению (так называемые ограничения SWaP – Size, Weight and Power). С ростом уровня автономности вычислительная нагрузка ещё более возрастает. Таким образом, в современных РТК наблюдается конфликт между стремлением повысить производительность вычислений и жёсткими ограничениями на бортовые ресурсы. Кроме того, для отдельных сфер (например, космические аппараты, длительно автономные роботы) критичны требования надёжности и отказоустойчивости: БВС должна стабильно работать в условиях неблагоприятных воздействий.

БВС РТК должны обеспечивать решение широкого круга задач: обработка сигналов с датчиков (лидаров, камер, радаров), одновременная локализация и построение карты (SLAM), планирование маршрутов и траекторий движения, распознавание объектов, контроль за исполнением задач, коммуникация с другими агентами и т.д. Многие из этих задач предъявляют высокие требования к производительности из-за их алгоритмической

сложности. Современные системы зачастую используют нейросетевые алгоритмы, что требует наличия производительных GPU/TPU прямо на роботе для выполнения инференса нейронных сетей. Таким образом, в БВС РТК важно сочетание высокой производительности с энергоэффективностью и надёжностью.

В большинстве робототехнических применений важно гарантировать выполнение вычислительных задач в жёстких временных рамках (реальное время) для безопасного управления. Классические БВС достигают этого проверенными архитектурами, например, резервированием модулей, использованием операционных систем реального времени, детерминистских алгоритмов.

Подводя итог, можно сказать, что идеальный вычислитель для РТК должен сочетать высокую производительность с низкими массогабаритными показателями и энергопотреблением, а также обеспечивать надёжную работу в режиме реального времени.

Применимость квантовых вычислений в БВС РТК. Современные квантовые компьютеры далеки от того, чтобы удовлетворять ограничениям по размеру и энергии, необходимым для бортового применения. Большинство действующих квантовых процессоров представляют собой стационарные установки, требующие криогенного охлаждения до мили-Кельвиновых температур, массивной вакуумной изоляции и чувствительного оборудования для управления кубитами. Кроме того, квантовые процессоры чрезвычайно чувствительны к вибрациям и внешним воздействиям: даже малейшее электромагнитное или механическое возмущение приводит к потере когерентности кубитов. Для робототехники, где платформа подвержена постоянным динамическим нагрузкам, это критическое ограничение.

Однако необходимо отметить параллельные усилия по миниатюризации и «облегчению» квантовых вычислителей. К примеру, Quantum Brilliance разрабатывает квантовый акселератор на основе центров азота-вакансия в искусственном алмазе, способный работать без охлаждения и обладающий форм-фактором, близким к печатной плате [5]. Планируется, что к 2025 году такой ускоритель будет содержать порядка 50 кубитов в корпусе размером с видеокарту. На данный момент подобные устройства – экспериментальные прототипы, но тенденция очевидна: прогресс в квантовой элементной базе идёт в сторону уменьшения систем и ослабления экстремальных требований.

Несмотря на данные сложности, можно выделить области робототехники, где даже ограниченные возможности квантовых вычислений могли бы дать серьезные преимущества, и где поэтому их внедрение наиболее перспективно:

- ◆ Автономные наземные системы. Крупные беспилотные автомобили, роботы для складской логистики или военной техники, которые обладают большей грузоподъёмностью и энергоресурсами.

- ◆ Стационарные или крупные морские/воздушные системы. Роботы, установленные на кораблях, больших подводных аппаратах или стационарных платформах, могут размещать громоздкое оборудование. Если, например, подводный исследовательский аппарат обеспечен судном-носителем, на борту судна может находиться квантовый компьютер, помогающий в сложных вычислениях. Для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) ситуация сложнее: малые дроны сильно ограничены в массе, а крупные беспилотники наподобие UAV самолётного типа имеют больше возможностей, но всё же в воздухоплавании вес и надёжность – первостепенные факторы. Вероятно, авиационные РТК станут одной из последних сфер, где квантовый сопроцессор появится на борту.

- ◆ Многоагентные и облачные робототехнические системы. Здесь квантовые вычисления могут применяться не на каждом роботе, а в облачной инфраструктуре, связывающей целый рой роботов. Например, рой дронов или колония роботов может отправлять задачи оптимизации или обучения на мощный квантовый сервер, а затем получать решения. Пока квантовые вычислители громоздки, подобная архитектура «робот + квантовое облако» выглядит наиболее практически осуществимой.

Зачем же робототехническим комплексам может понадобиться такая экзотическая и сложная технология, как квантовый компьютер? Ответ кроется в тех самых задачах, которые либо вообще не решаются классическими методами при увеличении масштаба, либо

решение требует непомерных ресурсов или времени. Если квантовый алгоритм предлагает хотя бы полиномиальное ускорение, а тем более экспоненциальное, для ключевой задачи робота, это может стать революционным преимуществом. Примеры включают:

- ◆ Комбинаторные задачи оптимизации. Планирование маршрутов для десятков одновременно движущихся роботов, распределение сотен задач между роботами, оптимизация логистических операций – все эти задачи крайне тяжёлые вычислительно. Квантовые алгоритмы могут дать квадратичный выигрыш (Grover-подобные поисковые методы) или приблизительный экспоненциальный (вариационные алгоритмы).

- ◆ Обработка больших массивов сенсорных данных. В условиях, когда робот оснащён множеством датчиков высокого разрешения, объем данных может зашкаливать. Квантовые методы обработки сигналов (например, квантовое преобразование Фурье) потенциально могут справляться с такими объёмами эффективнее.

- ◆ Квантовое машинное обучение для когнитивных функций. Если роботу требуется распознавать сложные образы, прогнозировать поведение окружающих объектов или обучаться новым навыкам на лету, квантовые машинные learning-алгоритмы могут предоставить ускорение.

Таким образом, квантовые вычисления для РТК оправданы там, где без них задача либо не решается вовремя, либо решается неоптимально.

Квантовые алгоритмы для задач РТК. В робототехнике множество задач сводятся к поиску оптимального решения среди очень большого числа вариантов: планирование пути, распределение целей между роботами, оптимизация энергопотребления, разбиение области на секторы патрулирования и т.д. Одним из наиболее известных квантовых алгоритмов является алгоритм Гровера – квантовый алгоритм неструктурированного поиска [6]. Он находит требуемый элемент среди N возможных за $O(\sqrt{N})$ шагов, тогда как классическому полному перебору нужно $O(N)$ операций. В уже упоминавшейся концепции «квантового робота» было продемонстрировано, что квантовый поиск может уменьшить сложность типового задания с $O(2^N)$ до около $O(N\sqrt{N})$.

Для задач оптимизации комбинаторного типа разработаны специальные алгоритмы, такие как квантовый отжиг и квантовый алгоритм приближённой оптимизации QAOA [7]. Квантовый отжиг эффективно находит приближенные решения NP-трудных задач (например, задачи о назначениях, раскраски графов, оптимального маршрута). QAOA же может выполняться на универсальном квантовом компьютере, чередуя квантовые эволюции и классические шаги оптимизации. Для ряда типичных задач (кластеризация, покрытие, max-cut на графе) уже на малых примерах QAOA демонстрирует конкурентные результаты с классическими жадными алгоритмами.

Квантовое машинное обучение (QML). Роботы всё шире применяют методы искусственного интеллекта и машинного обучения – от распознавания объектов камерой до принятия решений с помощью обученных моделей. Квантовое машинное обучение обещает ускорить некоторые из таких алгоритмов. Например, для задач восприятия часто применяется метод основных компонент (PCA) [8] для снижения размерности данных (выделения главных особенностей изображения или облака точек). Был предложен квантовый алгоритм для PCA (так называемый квантовый PCA), который обеспечивает экспоненциальное ускорение по сравнению с классическим алгоритмом на матрицах большой размерности.

Навигационные задачи часто требуют решения систем линейных алгебраических уравнений – например, при вычислении местоположения методом триангуляции или при фильтрации (внутри фильтра Калмана робот решает матричные уравнения). Существует квантовый алгоритм для решения линейных уравнений – алгоритм Гарроу–Хассидима–Ллойда (HHL) [9], который при определённых условиях решает систему значительно быстрее классических методов линейной алгебры. Теоретически HHL достигает временной сложности $O(\text{poly}(\log N))$ для матрицы размера $N \times N$ (при разреженной матрице и некоторых дополнительных допущениях), тогда как лучшая классическая сложность – $O(N^3)$, либо $O(N^2)$ для разреженных матриц. Даже упрощённая оценка даёт ускорение с $O(N^3)$ до $O(N^2)$.

Другой аспект – квантовые преобразования Фурье (QFT), лежащие в основе многих квантовых алгоритмов. QFT выполняется за $O(n^2)$ операций (для 2^n -размерного вектора), тогда как классическое дискретное преобразование Фурье (DFT) – за $O(N \log N)$. В задачах обработки сигналов радаров, сонаров, лидаров, где необходимо быстро анализировать спектры сигналов, квантовый подход может теоретически ускорить вычисления.

Моделирование и оценка результатов. На текущем этапе развития квантовых вычислений основным способом испытать квантовый алгоритм в задаче робототехники является использование квантовых симуляторов – программных инструментов, которые эмулируют работу квантового компьютера на классической машине. Авторами статьи разработан моделирующий стенд для оценки эффективности решения задач БВС РТК с помощью квантовых компьютеров (далее – моделирующий стенд) [10], являющийся эффективной реализацией процесса квантовых вычислений для отечественной аппаратно-программной платформы. Моделирующий стенд был реализован в виде комплекса экспериментальных программ на доверенной высокопроизводительной аппаратно-программной среде «Эльбрус».

При разработке моделирующего стенда учитывался опыт зарубежных разработок в области моделирования квантовых вычислений, таких как QuEST, Intel Quantum Simulator, Qiskit, Quantum Inspire и др. Разработанный моделирующий стенд состоит из трёх частей: интерфейсной, веб-приложения и вычислительной и функционирует в двух режимах:

1. Режим чистого состояния, в котором регистр представлен вектором состояния. В данном режиме достигается максимальная производительность за счет относительно невысоких потребностей в оперативной памяти. Количество моделируемых кубитов около 30 на персональном компьютере и до 40 на суперкомпьютере.

2. Режим смешанного состояния, в котором регистр представлен матрицей плотности. Необходимая оперативная память при увеличении числа кубитов растет с квадратичной зависимостью по сравнению с режимом чистых состояний. Число моделируемых кубитов около 15.

Результатом работы моделирующего стенда в стандартном режиме является гистограмма распределения состояний кубитов после серии измерений. На рис. 2 представлено основное окно программы после выполнения алгоритма Гровера для 9 кубитов.

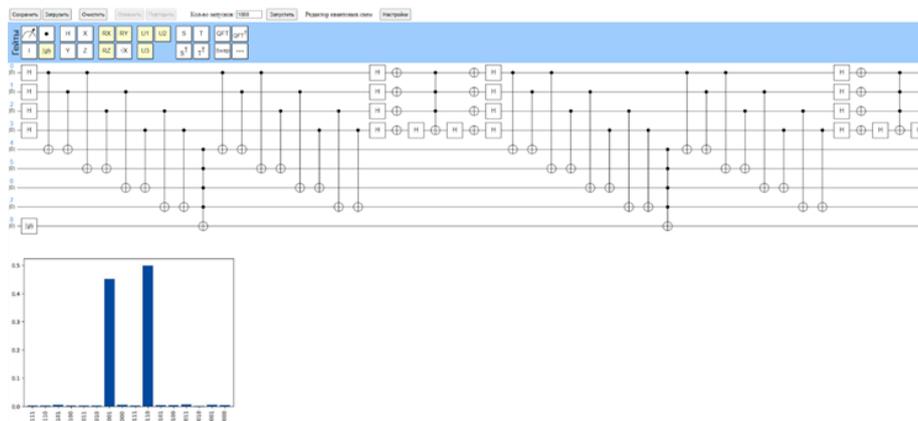


Рис. 2. Основное окно программной модели после выполнения алгоритма Гровера для 9 кубитов

С использованием разработанного моделирующего стенда проведены эксперименты по оценке эффективности квантовых алгоритмов на типовых задачах РТК.

Планирование пути робототехнических комплексов. Эффективное планирование движения является ключевой проблемой при реализации многих робототехнических систем. В настоящее время существует большое количество частных решений данной задачи,

однако говорить о её общем успешном решении пока рано. Большинство из решений является узкоспециализированным и не может быть адаптировано для более широкого круга прикладных задач [11]. Одной из частных задач, решаемых при планировании маршрутов робототехнических комплексов, является задача коммивояжера. В качестве исходных данных на площади S берется множество N вершин графов, которые связаны между собой дорожно-транспортной сетью. Из возможных вариантов маршрутов необходимо выбрать близкий к оптимальному маршрут движения коммивояжера между вершинами графа.

Алгоритм, основанный на полном переборе вариантов, не является самым эффективным в смысле быстродействия. В работе [12] доказано, что не существует алгоритма решения, имеющего степенную сложность. Всё это делает задачу коммивояжера трансовычислительной для ЭВМ с последовательным выполнением операций, если n хоть сколько-нибудь велико.

Рассмотрим квантовый подход к решению этой задачи. Представим задачу в терминах графов: города представляются в виде вершин, а пути в виде рёбер. Заданные расстояния между городами кодируются в виде фаз. Каждый город соединён с другими городами с определённой стоимостью, связанной с каждым соединением. Строятся унитарные операторы, собственными векторами которых являются состояния вычислительного базиса, а собственными значениями – различные комбинации этих фаз. К определённым собственным состояниям применяется алгоритм оценки фаз, что даёт все возможные суммарные расстояния для всех маршрутов. Результаты перебираются с помощью алгоритма квантового поиска минимума для получения наименьшего возможного расстояния и пройденного маршрута. Это даёт квадратичное ускорение по сравнению с классическим методом перебора для большого числа городов. Данный квантовый алгоритм кодируется в следующую квантовую схему (рис. 3):

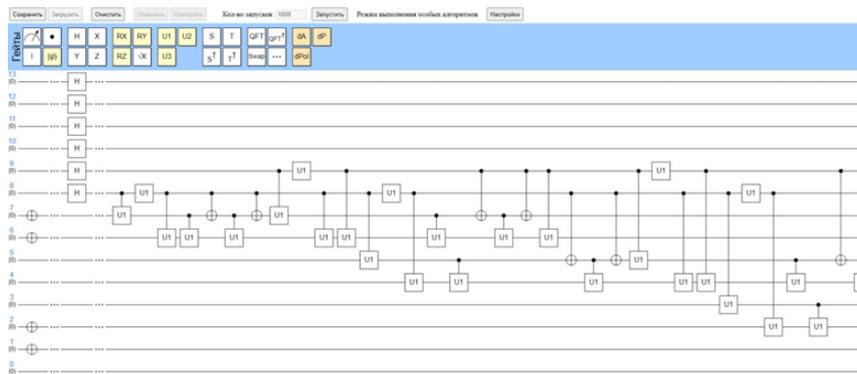


Рис. 3. Квантовая схема задачи коммивояжера для первого собственного значения

Вышеописанный процесс должен быть выполнен для всех собственных значений, чтобы найти общее расстояние для всего маршрута. После этого с помощью алгоритма квантового поиска находим минимальное из этих расстояний. Таким образом, требуемое время зависит от числа собственных состояний.

Используя предложенный алгоритм, можно создать базу данных всех возможных маршрутов, которые могут быть проложены с указанием расстояния до каждого из них. Сложность нахождения минимума составляет $O(\sqrt{N})$, соответственно сложность всей задачи при решении с помощью квантового алгоритма составит $O(\sqrt{(N-1)!})$. При этом классический алгоритм имеет сложность $O((N-1)!)$. Таким образом, даже при небольших $N = 10$ квантовый алгоритм имеет преимущество $(10-1)!/\sqrt{(10-1)!} \sim 600$ раз. С ростом N ускорение растёт экспоненциально: при $N=20$ ускорение составит $3,5 \cdot 10^8$.

Техническое зрение наземных робототехнических комплексов. Важной частью любой процедуры обнаружения объектов на изображении является обнаружение краёв, который используется в современных классических алгоритмах обработки изображений

для выделения структуры объектов/функций, и может занимать до 50% времени на обработку. Квантовая обработка изображений позволяет в некоторых случаях получить экспоненциальное ускорение [13] по сравнению с классической обработкой изображений.

В общем случае классические алгоритмы обнаружения границ основаны на вычислении градиентов изображения, то есть на определении мест на изображении для переходов интенсивности от тёмного к светлому (или от светлого к тёмному). Следовательно, наихудшая временная сложность для большинства из них составляет $O(2^n)$ [16]. Это означает, что для определения градиентов необходимо обрабатывать каждый пиксель в отдельности.

Квантовые алгоритмы обнаружения границ, такие как QSobel [14], обеспечивают экспоненциальное ускорение по сравнению с существующими классическими алгоритмами обнаружения границ. Однако в алгоритме есть несколько шагов, которые делают его весьма неэффективным, например, операция CNOT и квантовый «чёрный ящик» для вычисления градиентов всех пикселей. Для обеих операций на сегодняшний день не известно ни одной эффективной практической реализации. Эта проблема решается использованием алгоритма Quantum Hadamard Edge Detection (QHED) [15]. Схема алгоритма представлена на рис. 4.

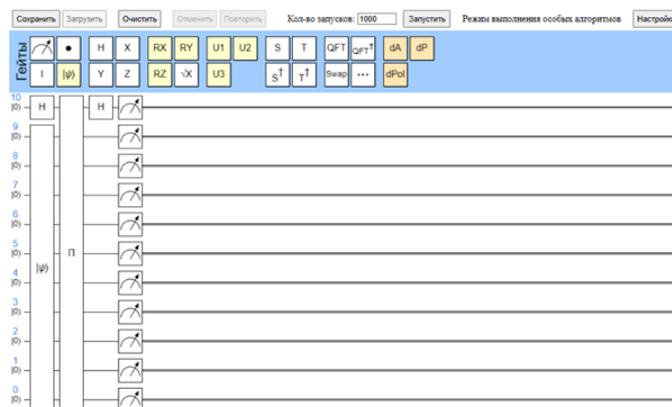


Рис. 4. Схема квантового алгоритма обнаружения границ

С другой стороны, алгоритм QSobel имеет сложность $O(n^2)$ и использует представление изображения FRQI для кодирования $N \times N$ -пиксельного изображения ($N=2^n$) в n -кубитной квантовой системе. Однако представление изображения FRQI имеет сложный процесс подготовки состояния ($O(n)+O(\log^2 n)$) в худшем случае и требует большего количества кубитов ($1+2N$) для хранения данных изображения.

В алгоритме QHED применена более эффективная схема кодирования изображения (QPIE), использующая амплитудное кодирование, что приводит к экспоненциальному уменьшению числа используемых кубитов ($n=\lceil \log_2 N \rceil$). Однако временная сложность этапа подготовки состояния для кодирования изображения с помощью QPIE несколько выше, чем у FRQI — $O(n^2)$. Поскольку QHED эффективно использует свойство гейта H, удаётся достичь временной сложности процедуры обнаружения границ $O(1)$ (без учёта подготовки состояния и перестановки амплитуд) в размере, что значительно меньше, чем для QSobel. Таким образом, алгоритм QHED даёт суперэкспоненциальное ускорение по сравнению с классическими алгоритмами и полиномиальное по сравнению с алгоритмом QSobel.

Ещё один аспект, на который необходимо обратить внимание для обеспечения работы квантового алгоритма, — это количество измерений, которое необходимо провести для получения значительной точности алгоритма. Как правило, для квантовой схемы требуется $O(2^n)$ измерений, чтобы получить хорошую точность выходных вероятностей. Однако, если задача состоит только в том, чтобы обнаружить некоторые специфические закономерности в изображении, можно провести измерение одной локальной наблюдаемой с числом измерений порядка $O(n^2)$ [14].

Таким образом, вычислительная сложность между классическим и квантовым без учёта измерений отличается в 2^n раз. При учёте необходимости n^2 измерений для $n=10$ разница составит $2^{10}/10^2 = 10,24$ раз. Добавим учёт времени, необходимого на кодирование изображения в квантовый регистр $2^n/n^2/n^2$. При $n=10$ разница составит $2^{10}/10^2/10^2 = 5,12$. С ростом n ускорение растёт экспоненциально. При $n=20$ ускорение составит 1310 раз.

Ограничения и перспективы. Несмотря на впечатляющий прогресс, квантовые компьютеры всё ещё находятся на ранней стадии развития и сталкиваются с серьёзными препятствиями на пути к практическому применению [17]. Одним из главных ограничений является декогеренция кубитов – утрата квантовых свойств под воздействием внешней среды [18].

Другой серьёзный вызов – масштабируемость [19]. Хотя число кубитов в экспериментальных процессорах растёт, удержание связности и управляемости всех этих кубитов – сложная инженерная задача. Требуется масштабировать системы охлаждения, электронику для управления и чтения кубитов, подвод сигнальных линий. Для бортовых систем это прямо сейчас выглядит неприемлемо.

Также программное обеспечение и алгоритмы квантовых компьютеров пока в значительной степени отстают от классических [20]. Разработчикам приходится осваивать новые подходы к программированию, зачастую на уровне квантовых схем и матриц, что порогово по сложности.

Наконец, стоимость и доступность: квантовые вычислители сейчас чрезвычайно дороги в изготовлении и обслуживании, и доступны лишь в нескольких лабораториях в мире или через облачные сервисы. Даже когда они станут коммерческими, это всё ещё будут дорогие устройства, требующие специальных условий.

С учётом указанных ограничений, можно считать, что массового появления квантовых вычислителей на каждом роботе ожидать не стоит в ближайшем десятилетии. Однако для отдельных, наиболее требовательных приложений, первые образцы могут появиться уже через 5-10 лет. Для полноценных же бортовых квантовых компьютеров, которые работают на роботе автономно, без внешней инфраструктуры, потребуются комнатнотемпературные кубиты, интегрируемые в компактный корпус. При оптимистичном сценарии, первые прототипы таких устройств могут появиться к концу 2020-х – началу 2030-х годов, но их внедрение в реальную робототехнику займёт ещё время для доводки надёжности.

Заключение. Настоящее исследование посвящено анализу потенциала квантовых вычислений в составе бортовых вычислительных комплексов робототехнических систем. Сформулированный авторами прогноз можно резюмировать следующим образом. Краткосрочный горизонт ($\approx 5-7$ лет) предполагает сугубо вспомогательное использование квантовых ресурсов: вычисления будут выполняться вне самого робота, в удалённых квантовых центрах, решая задачи пред- и пост-обработки – миссионное планирование, маршрутизацию, крупные оптимизационные расчёты, где допустимы задержки, связанные с передачей данных. Среднесрочный интервал ($\approx 7-15$ лет) ожидаемо характеризуется появлением гибридных архитектур, в которых робот запрашивает облачный квантовый модуль для вычисления критически важных подзадач, оставаясь при этом в контуре реального времени. Долгосрочная перспектива (15+ лет) предусматривает интеграцию квантовых сопроцессоров непосредственно в бортовую аппаратуру, что позволит перенести часть вычислительной нагрузки на внутренние ресурсы и тем самым вывести автономность и энергоэффективность РТК на принципиально новый уровень.

Для верификации данных прогнозов авторы разработали специализированный стенд имитационного моделирования, на котором оценена производительность характерных квантовых алгоритмов. Результаты подтверждают, что при использовании квантовых вычислителей возможен экспоненциальный выигрыш по времени решения ключевых задач РТК – навигации, планирования траекторий и технического зрения – что, в свою очередь, обосновывает предложенный поэтапный сценарий их внедрения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Романов А.М. Обзор аппаратно-программного обеспечения систем управления роботов различного масштаба и назначения. Ч. 3. Экстремальная робототехника // Российский технологический журнал. – 2020. – Т. 8, № 3 (35). – С. 14-32.
2. Бочаров Н.А. Моделирование алгоритмов катастрофоустойчивости групп роботов на программно-аппаратной платформе "Эльбрус" // Радиопромышленность. – 2019. – № 3. – С. 8-14.
3. Соколов О.А., Бербер М.О. Перспективы использования квантовых компьютеров в космической авиации // Научный лидер. – 2023. – № 21 (119).
4. Mannone M., Seidita V., Chella A. Quantum computing for swarm robotics: a local-to-global approach // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. – 2025. – Vol. 383. – Art. 20240139.
5. Doherty M. Quantum accelerators: a new trajectory of quantum computers // *Digitale Welt*. – 2021. – Vol. 5, No. 2. – P. 74-79.
6. Grover L.K. Quantum mechanics helps in searching for a needle in a haystack // *Physical Review Letters*. – 1997. – Vol. 79, No. 2. – P. 325-328.
7. Farhi E., Goldstone J., Gutmann S. A quantum approximate optimization algorithm // arXiv preprint. – 2014. – arXiv:1411.4028 [quant-ph].
8. Peruzzo A., McClean J., et al. A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor // *Nature Communications*. – 2014. – Vol. 5. – Art. 4213.
9. Harrow A.W., Hassidim A., Lloyd S. Quantum algorithm for solving linear systems of equations // *Physical Review Letters*. – 2009. – Vol. 103, No. 15. – P. 150502.
10. Кирилюк М.А., Бочаров Н.А. Разработка программной модели квантовых вычислений и моделирование работы квантовых алгоритмов на платформе "Эльбрус" // Вестник Концерна ВКО "Алмаз – Антей". – 2022. – № 1. – С. 93-101.
11. Жулев В.И., Левушкин В.С., Неуен Т.Н. Планирование локальной траектории автомобиля-робота в реальном времени // Вестник РГРТУ. – 2013. – № 4. – Вып. 46. – С. 18-23.
12. Рейндогльд Э., Део Н. Комбинаторные алгоритмы решения задачи коммивояжера. Теория и практика. – М.: Мир, 2000. – 480 с.
13. Ruan Yue, Xiling Xue, Yuanxia Shen. Quantum Image Processing: Opportunities and Challenges // *Mathematical Problem in Engineering*. – 2021. – <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2021/6671613/>.
14. Zhang, Yi, Kai Lu, and YingHui Gao. QSobel: a novel quantum image edge extraction algorithm // *Science China Information Sciences*. – 2015. – 58.1. – P. 1-13. – <https://link.springer.com/article/10.1007/s11432-014-5158-9>.
15. Yao, Xi-Wei, et al. Quantum image processing and its application to edge detection: theory and experiment // *Physical Review X* 7.3. – 2017. – 031041. – <https://arxiv.org/abs/1801.01465>.
16. Katiyar Sunil Kumar, and Arun P.V. Comparative analysis of common edge detection techniques in context of object extraction // arXiv preprint. – 2014. – arXiv:1405.6132. – <https://arxiv.org/abs/1405.6132>.
17. Preskill J. Quantum Computing in the NISQ era and beyond // *Quantum*. – 2018. – Vol. 2. – P. 79.
18. Acharya R., Aleiner I., Allen R. M. et al. Suppressing quantum errors by scaling a surface code logical qubit // *Nature*. – 2023. – Vol. 614, No. 7949. – P. 676-681.
19. Bruzewicz C. D., Chiaverini J., McConnell R., Sage J. M. Trapped-ion quantum computing: Progress and challenges // *Applied Physics Reviews*. – 2019. – Vol. 6, No. 2. – P. 021314.
20. Memon Q. A., Al Ahmad M., Pecht M. Quantum Computing: Navigating the Future of Computation, Challenges, and Technological Breakthroughs // *Quantum Reports*. – 2024. – Vol. 6, No. 4. – P. 627-663.

REFERENCES

1. Romanov A.M. Obzor apparatno-programmnogo obespecheniya sistem upravleniya robotov razlichnogo masshtaba i naznacheniya. Ch. 3. Ekstremal'naya robototekhnika [Review of hardware and software for robot control systems of various scales and purposes. Part 3. Extreme robotics], *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* [Russian Technological Journal], 2020, Vol. 8, No. 3 (35), pp. 14-32.
2. Bocharov N.A. Modelirovanie algoritmov katastrofoustoychivosti grupp robotov na programmno-apparatnoy platforme "El'brus" [Modeling Disaster Resistance Algorithms for Robot Groups on the Elbrus Hardware and Software Platform], *Radiopromyshlennost'* [Radio Industry], 2019, No. 3, pp. 8-14.
3. Sokolov O.A., Berber M.O. Perspektivy ispol'zovaniya kvantovykh komp'yutеров v kosmicheskoy aviatsii [Prospects for Using Quantum Computers in Space Aviation], *Nauchnyy lider* [Scientific Leader], 2023, No. 21 (119).
4. Mannone M., Seidita V., Chella A. Quantum computing for swarm robotics: a local-to-global approach, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2025, Vol. 383, Art. 20240139.
5. Doherty M. Quantum accelerators: a new trajectory of quantum computers, *Digitale Welt*, 2021, Vol. 5, No. 2, pp. 74-79.

6. Grover L.K. Quantum mechanics helps in searching for a needle in a haystack, *Physical Review Letters*, 1997, Vol. 79, No. 2, pp. 325-328.
7. Farhi E., Goldstone J., Gutmann S. A quantum approximate optimization algorithm, *arXiv preprint*, 2014. arXiv:1411.4028 [quant-ph].
8. Peruzzo A., McClean J., et al. A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor, *Nature Communications*, 2014, Vol. 5, Art. 4213.
9. Harrow A.W., Hassidim A., Lloyd S. Quantum algorithm for solving linear systems of equations, *Physical Review Letters*, 2009, Vol. 103, No. 15, pp. 150502.
10. Kirilyuk M.A., Bocharov N.A. Razrabotka programmnoy modeli kvantovykh vychisleniy i modelirovanie raboty kvantovykh algoritmov na platforme "El'brus" [Development of a software model of quantum computing and modeling of quantum algorithms on the Elbrus platform], *Vestnik Kontserna VKO "Almaz – Antey"* [Bulletin of the Almaz-Antey Air and Space Defense Concern], 2022, No. 1, pp. 93-101.
11. Zhulev V.I., Levushkin V.S., Nguen T.N. Planirovanie lokal'noy traektorii avtomobilya-robota v real'nom vremeni [Planning a local trajectory of a robotic car in real time], *Vestnik RGRU* [Bulletin of the Russian State Radio Engineering University], 2013, No. 4, Issuep. 46, pp. 18-23.
12. Reyndog'l'd E., Deo N. Kombinatornye algoritmy resheniya zadachi kommvoyazhera. Teoriya i praktika [Combinatorial algorithms for solving the traveling salesman problem. Theory and practice]. Moscow: Mir, 2000, 480 p.
13. Ruan Yue, Xiling Xue, Yuanxia Shen. Quantum Image Processing: Opportunities and Challenges, *Mathematical Problem in Engineering*. 2021. Available at: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2021/6671613/>.
14. Zhang, Yi, Kai Lu, and Yinghui Gao. QSobel: a novel quantum image edge extraction algorithm, *Science China Information Sciences*, 2015, 58.1, pp. 1-13. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11432-014-5158-9>.
15. Yao, Xi-Wei, et al. Quantum image processing and its application to edge detection: theory and experiment, *Physical Review*, X 7.3, 2017, 031041. Available at: <https://arxiv.org/abs/1801.01465>.
16. Katiyar Sunil Kumar, and Arun P.V. Comparative analysis of common edge detection techniques in context of object extraction, *arXiv preprint*, 2014, arXiv:1405.6132. Available at: <https://arxiv.org/abs/1405.6132>.
17. Preskill J. Quantum Computing in the NISQ era and beyond, *Quantum*, 2018, Vol. 2, pp. 79.
18. Acharya R., Aleiner I., Allen R. M. et al. Suppressing quantum errors by scaling a surface code logical qubit, *Nature*, 2023, Vol. 614, No. 7949, pp. 676-681.
19. Bruzewicz C. D., Chiaverini J., McConnell R., Sage J. M. Trapped-ion quantum computing: Progress and challenges, *Applied Physics Reviews*, 2019, Vol. 6, No. 2, pp. 021314.
20. Memon Q. A., Al Ahmad M., Pecht M. Quantum Computing: Navigating the Future of Computation, Challenges, and Technological Breakthroughs, *Quantum Reports*, 2024, Vol. 6, No. 4, pp. 627-663.

Бочаров Никита Алексеевич – ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука»; e-mail: bocharov.na@phystech.edu; г. Москва, Россия; тел.: +79167346437; д.т.н.; зам. руководителя управления – главный научный сотрудник.

Парамонов Николай Борисович – ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука»; e-mail: paramonov_n_b@rambler.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79166213432; д.т.н.; профессор; руководитель управления – главный научный сотрудник.

Bocharov Nikita Alexeevich – JSC «INEUM»; e-mail: bocharov.na@phystech.edu; Moscow, Russia; phone: +79167346437; dr. of eng. sc.; deputy chief of department – chief scientific officer.

Paramonov Nikolay Borisovich – JSC «INEUM»; e-mail: paramonov_n_b@rambler.ru; Moscow, Russia; phone: +79166213432; dr. of eng. sc.; professor; chief of department – chief scientific officer.