

Раздел I. Алгоритмы обработки информации

УДК 004.032

DOI 10.18522/2311-3103-2023-5-6-16

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

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СХЕМ С ОПТИМИЗАЦИЕЙ ПО ГЛУБИНЕ В АЛГОРИТМЕ КВАНТОВОЙ ПРИБЛИЖЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Одной из основных проблем, с которой сталкиваются исследователи в области квантовых вычислений, является проблема шума в квантовых системах. Шум может существенно ограничивать производительность квантовых алгоритмов. Именно в этом контексте актуализируется наше исследование, направленное на разработку и оптимизацию квантовых алгоритмов с фокусом на глубине. Глубина квантовых цепей – это один из критически важных параметров в разработке квантовых алгоритмов. Оптимизированные схемы с улучшенной глубиной имеют потенциал существенно снизить влияние шума, что, в свою очередь, должно привести к повышению эффективности. Мы стремимся предложить решения, которые не только учитывают технические ограничения, но и предоставляют практически применимые результаты для квантовых вычислений в контексте оптимизационных задач. В рамках данного исследования проводится анализ применения квантового алгоритма приближенной оптимизации для решения сложных задач комбинаторной оптимизации. Однако в процессе использования данного алгоритма сталкиваемся с серьезным ограничением – шумом в квантовой системе, что существенно снижает его эффективность. Для преодоления влияния шума и повышения эффективности квантовых алгоритмов, было предложено несколько методов. В данной статье представлен жадный эвристический алгоритм, направленный на уменьшение воздействия шума. Основная цель этого алгоритма заключается в поиске остова дерева минимальной высоты. Это, в свою очередь, приводит к сокращению общей глубины квантовых схем и минимизации количества вентилей CNOT, что является ключевым моментом в оптимизации квантовых вычислений. Через проведение численного анализа было продемонстрировано, что предложенный жадный эвристический алгоритм способен существенно увеличить вероятность успешного завершения каждой итерации в задаче поиска максимального разреза в графе в 10 раз. Кроме того, исследование подтверждает, что средняя глубина квантовой схемы, созданной предложенным эвристическим алгоритмом, все еще линейно зависит от размера входных данных, но угол наклона этой линейной зависимости снижается с 1 до 0,11 благодаря использованию предложенного метода.

Моделирование; квантовый алгоритм; кубит; модель квантового компьютера; запутанность; суперпозиция; квантовый оператор.

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

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF DEPTH OPTIMIZED CIRCUITS IN QUANTUM APPROXIMATE OPTIMIZATION ALGORITHM

One of the main challenges faced by researchers in the field of quantum computing is the problem of noise in quantum systems. Noise can significantly limit the performance of quantum algorithms. It is in this context that our research, aimed at the development and optimization of quantum algorithms with a focus on depth, is updated. The depth of quantum circuits is one of the critical parameters in the development of quantum algorithms. Optimized circuits with improved depth have the

potential to significantly reduce the impact of noise, which in turn should lead to improved efficiency. We aim to provide solutions that not only address technical constraints, but also provide practical results for quantum computing in the context of optimization problems. This study analyzes the use of a quantum approximate optimization algorithm for solving complex combinatorial optimization problems. However, in the process of using this algorithm we encounter a serious limitation – noise in the quantum system, which significantly reduces its efficiency. To overcome the influence of noise and improve the efficiency of quantum algorithms, several methods have been proposed. This paper presents a greedy heuristic algorithm aimed at reducing the impact of noise. The main goal of this algorithm is to find a spanning tree of minimum height. This, in turn, reduces the overall depth of quantum circuits and minimizes the number of CNOT gates, which is key to optimizing quantum computing. Through numerical analysis, it was demonstrated that the proposed greedy heuristic algorithm is capable of significantly increasing the probability of successful completion of each iteration in the problem of finding the maximum cut in a graph by 10 times. Moreover, the study confirms that the average depth of the quantum circuit generated by the proposed heuristic algorithm is still linearly dependent on the size of the input data, but the slope of this linear dependence is reduced from 1 to 0.11 by using the proposed method.

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

Введение. Квантовые алгоритмы приближенной оптимизации (КАПО) представляет собой гибридный метод, который объединяет квантовые и классические вычисления для решения задач комбинаторной оптимизации. Этот алгоритм работает на основе специальных математических структур, таких как проблемный гамильтониан и миксерный гамильтониан H_p , которые используются для кодирования задачи оптимизации. В процессе выполнения КАПО применяются две параметризованные унитарные операции $U(\theta, \gamma)$ и $U(\theta, \beta)$, которые последовательно воздействуют на начальное квантовое состояние $U(H_p; \gamma) = \exp(-i\gamma H_p)$ и $U(H_M; \beta) = \exp(-i\beta H_M)$. Параметры этих операций инициализируются случайным образом, и после нескольких итераций, они обновляются с использованием классического оптимизатора. Этот процесс повторяется с обновленными параметрами, и целью является приближение к оптимальному решению задачи оптимизации.

В литературе также рассматривались методы смягчения, которые позволяют уменьшить воздействие шума на выполнение КАПО и других гибридных квантово-классических алгоритмов. Эти методы включают в себя изменения в гамильтониане миксера и функции стоимости, направленные на снижение шума и увеличение скорости сходимости алгоритма. Одним из ключевых аспектов улучшения производительности квантовых схем является уменьшение ошибок, вызванных вентилями CNOT. Эти вентили являются источником ошибок в современных квантовых устройствах, и методы оптимизации с целью уменьшения их воздействия на шум играют важную роль в совершенствовании квантовых алгоритмов. Таким образом, КАПО исследует различные аспекты оптимизации в квантовых вычислениях, и его развитие может привести к созданию более эффективных квантовых алгоритмов, что делает его перспективным направлением для будущих исследований в области квантовой вычислительной технологии.

1. КАПО на основе максимального разреза графа и поиска в глубину. Традиционный подход к параметризации квантовых схем (ПАКПО) основан на двух параметризованных унитарных операторах: $U(H_p; \gamma) = \exp(-i\gamma H_p)$ и $U(H_M; \beta) = \exp(-i\beta H_M)$. При работе с графом $G = (V, E)$, где $|V| = n$, квантовая схема инициализируется суперпозицией n кубитов, что представляет собой один шаг инициализации с глубиной 1. Точно так же оператор $U(\theta, \beta)$ применяется ко всем кубитам одновременно. Оператор $U(\theta, \gamma)$ зависит от гамильтониана задачи и может быть представлен уравнением (2).

Схема для реализации оператора, соответствующего ребру (j, k), представлена на рис. 1. На каждом шаге может выполняться несколько таких операторов одновременно, соответствующих непересекающимся рёбрам. Например, на рисунке 2 операторы $U(\theta, \alpha)$ и $U(\theta, \beta)$ выполняются одновременно на одном шаге.

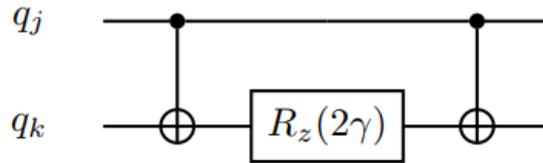


Рис. 1. Схема для оператора $U(\theta, \gamma)$

В оставшейся части статьи термин "ПАКПО" будет использоваться для обозначения параметризованных квантовых схем для задачи максимального разреза графа. В данном контексте граф $G = (V, E)$ является связным, неориентированным и невзвешенным, где $|V| = n$ и $|E| = m$. Для полноты изложения на рис. 2 представлена схема для случая $p = 1$, соответствующая 2-регулярному графу с четырьмя вершинами.

$$U(H_p, \gamma) = \prod_{(j,k) \in E} U(H^{(j,k)}_p) = \prod_{(j,k) \in E} \exp(-i\gamma(\frac{I - Z_j Z_k}{2})) \quad (1)$$

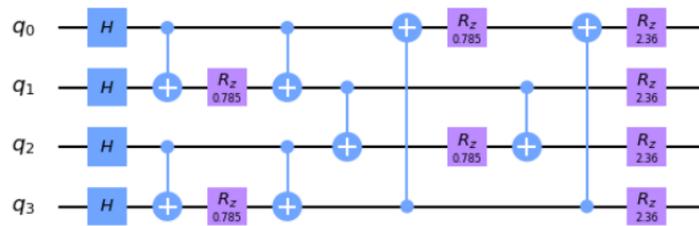


Рис. 2. Схема АКПО для $p = 1$, соответствующая 2-регулярному графу с четырьмя вершинами

2. Оптимизация квантовой схемы на основе поиска в глубину. В данной работе рассматривается метод оптимизации выполнения квантовых схем, основанный на деревьях и операторах Адамара-Коэнси. Данный метод предназначен для уменьшения количества вентилях CNOT (контроля над соседним кубитом) в квантовых схемах. Метод начинается с выбора корневой вершины в графе и создания дерева, которое представляет собой ациклический подграф графа, содержащий все вершины и $n - 1$ ребро. Затем схема Адамара-Коэнси разделяется на две части: одну с операторами, связанными с ребрами в дереве, и другую с операторами, связанными с другими ребрами. Операторы, связанные с ребрами в дереве, должны быть выполнены в определенном порядке, учитывая их положение в дереве. Если ребро появляется раньше другого в дереве, то оператор, соответствующий этому ребру, должен быть выполнен раньше. Для ребер, которые включены в дерево, операторы применяются с условиями управления и цели вентиля CNOT, где управление – вершина u , инцидентная ребру, уже находящемуся в дереве, и цель – вершина v . Это обеспечивает оптимизацию выполнения операторов для квантовых схем, снижая количество вентилях CNOT. Однако этот метод может быть неэффективным для больших графов, так как он увеличивает глубину схемы, что может привести к превышению времени когерентности оборудования.

Увеличение глубины также делает схему более уязвимой к декогеренции, что требует баланса между уменьшением числа вентилей CNOT и увеличением глубины схемы. Важным результатом работы является выявление ограничений метода оптимизации на основе деревьев для случаев, когда увеличение глубины схемы может стать проблемой.

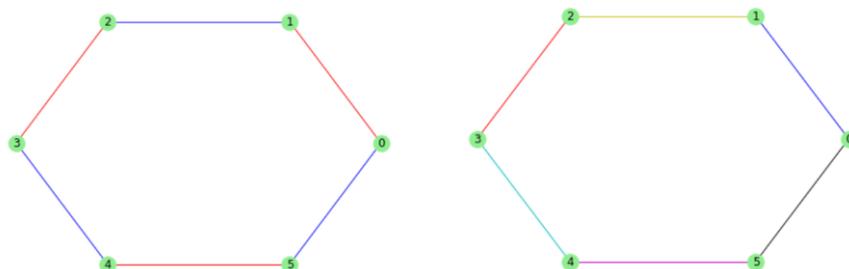


Рис. 3. Этапы работы для $U(H_p; \gamma)$ для традиционного АКПО и оптимизированного на основе поиска в глубину

Этот метод оптимизации, направленный на сокращение числа вентилей CNOT, может быть применен к любому корневному остовному дереву, при условии выполнения двух указанных выше условий относительно упорядочения ребер в дереве. Метод поиска в глубину, фактически, представляет собой способ построения корневого остовного дерева для графа. Далее, вместо того чтобы специально искать конкретное дерево, мы сосредотачиваемся на поиске корневого остовного дерева для графа G , что соответствует описанной цели.

3. Формулировка задачи оптимизации. Сосредоточимся исключительно на оптимизации оператора $U(H)$, который связан с каждым ребром. Под термином "схема" или "глубина" мы будем иметь в виду исключительно схему, соответствующую оператору $U(H)$. Максимальная высота дерева с n вершинами равна $n - 1$, что также соответствует глубине соответствующей схемы. Мы можем утверждать, что остовное дерево с более низкой высотой может привести к схеме с меньшей глубиной. В этом случае, использование поиска в ширину (BFS) может предоставить остовное дерево с минимальной высотой. Однако на рис. 4,а,б показаны два дерева с разной высотой, но с одинаковой глубиной схемы. На этих рисунках значения, связанные с ребрами, показывают уровень, на котором можно применять оператор, соответствующий данному ребру, для оптимизации (т.е. уменьшения количества вентилей CNOT). Схема, соответствующая обоим деревьям, как показано на рис. 5, остается одинаковой. Эти два дерева и соответствующая им схема наглядно демонстрируют, что простое снижение высоты дерева не гарантирует получения схемы с меньшей глубиной. Таким образом, использование поиска в ширину (BFS) вместо поиска в глубину (DFS) не всегда приведет к созданию схемы с меньшей глубиной.

На иллюстрации, изображенной на рис. 4, представлены два дерева разной высоты, и каждое ребро дерева имеет целочисленную метку, которая указывает на шаг, на котором можно применить оператор $U(H)$ к этому ребру. Максимальное значение этих меток соответствует глубине контура. Высота первого дерева равна 3, а второго – 2. Однако важно отметить, что оба дерева приводят к одной и той же схеме, изображенной на рис. 5.

Причина, по которой дерево в правой части с высотой 2 на рис. 4 не способно сократить глубину схемы, заключается в том, что вентили CNOT, соответствующие двум соседним ребрам, не могут выполняться на одном и том же шаге. Следо-

вательно, простое уменьшение высоты остоного дерева недостаточно для сокращения глубины схемы. Кроме того, на рис. 6 представлены два дерева с одинаковой высотой, но разной длиной цепей.

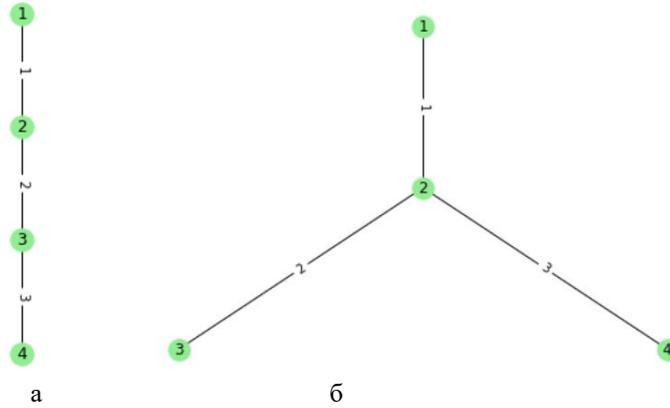


Рис. 4. (а) Остоное дерево высоты 3; (б) Остоное дерево высоты 2

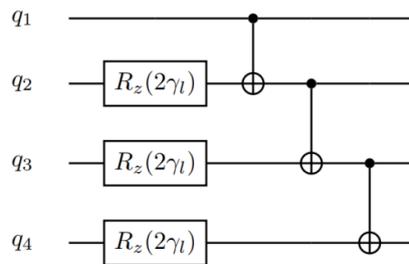


Рис. 5. Квантовая схема $U(H_p; \gamma)$, соответствующая обоим деревьям на рис. 4

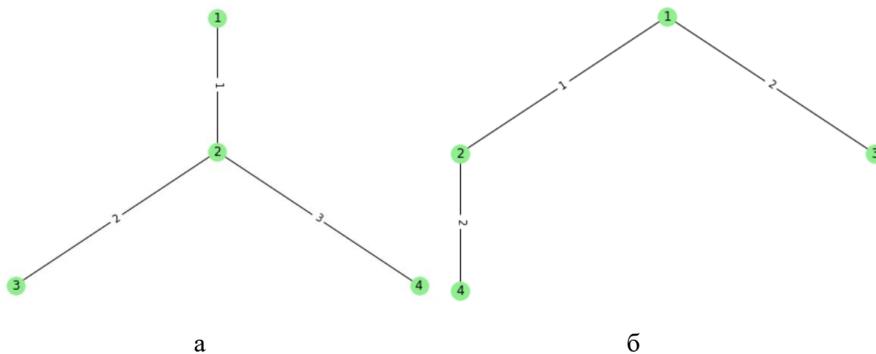


Рис. 6. (а) Пример дерева высоты 2; (б) Еще один пример дерева высоты 2

Теперь определим несколько терминов, чтобы легко уточнить требования к корневому остоному дереву, которое приведет к схеме с меньшей глубиной.

1. Коэффициент ветвления [16]. Коэффициент ветвления вершины v определяется как количество вершин, обнаруженных в корневом остоном дереве из v .

2. Уровень: если вершина v обнаружена в корневом остоном дереве из вершины u , то уровень вершины v равен уровню вершины $u + 1$. Уровень корневой вершины равен 0.

3. Отложенный старт: Отложенный старт [17] определяется как явление, при котором вершины v_1, \dots, v_k обнаруживаются в остоном дереве из одной вершины v и принадлежат одному уровню. Это связано с тем, что смежные ребра имеют общую вершину, и одновременные операции CNOT невозможны с общим управляющим или целевым кубитом [18]. Поэтому операция, соответствующая ребру (v, v_i) , задерживается до тех пор, пока все операции, соответствующие ребрам (v, v_j) не заполнены. Оператор $U(H^{(v, v_i)}_p)$ можно использовать раньше всего на уровне $v + i$.

4. Реализация функции стоимости. Предложим функцию стоимости, учитывающую следующие наблюдения:

1) Если коэффициенты ветвления вершин очень высоки, то соответствующий контур [19] будет страдать от задержки старта, что приведет к увеличению глубины. С другой стороны, если коэффициент ветвления вершин очень мал, то высота дерева, а значит, и глубина цепи будут увеличиваться.

2) Между двумя вершинами u и v лучше разветвить вершину на более низком уровне дерева, чтобы у ребер в этой ветви все еще была возможность выполняться параллельно с другими ребрами на более высоком уровне даже после задержки.

3) Для графов с меньшим количеством вершин коэффициент ветвления должен быть низким, чтобы избежать увеличения глубины из-за отложенного старта. Однако по мере увеличения числа вершин необходимо допускать более высокий коэффициент ветвления, чтобы уменьшить высоту дерева. Принимая во внимание все три критерия, указанные выше, предложим функцию стоимости C_v , которая будет связана с каждой вершиной v . Пусть n будет количеством вершин в графе, l_v и v_{bf} будут уровнем и текущим коэффициентом ветвления вершины v соответственно, и B – максимальный коэффициент ветвления, определенный для любой вершины остоного дерева, тогда $C_v = (n - l_v)(B - v_{bf})$. При выращивании остоного дерева из корневой вершины к дереву добавляется то ребро $(v; w)$, для которого функция стоимости C_v максимальна. Заметим здесь, что для нового ребра $(v; w)$ функция стоимости не зависит от вершины w , а на вершине v , из которой это ребро обнаружено. Предлагаемый алгоритм избегает ветвления в вершине, для которой $v_{bf} \geq B$.

На самом деле, когда $v_{bf} = B$, функция стоимости имеет вклад 0. Таким образом, если для двух вершин $u \neq v$, $v_{bf} = v_{bf} < B$, алгоритм выбирает для ветвления ту вершину, которая имеет более низкий уровень. Это гарантирует, что отложенный запуск будет ближе к корню, так что у этих ветвей все еще есть возможность для параллельного выполнения с некоторыми ветвями более высокого уровня. Кроме того, если $v_{bf} > B$, произведение с $(n - 1)$ приводит к значительно низким значениям для низкого l . Это сильно препятствует ветвлению более чем B на более низких уровнях дерева, чтобы предотвратить чрезмерно отложенный запуск. Алгоритм 1 представляет, как сгенерировать остоное дерево [20], которое имеет компромисс между высотой дерева и коэффициентом ветвления.

Алгоритм 1. Генерация корневого связующего дерева на основе функции стоимости

Вход: граф $G = (V; E)$, $|V| = n$, $|E| = m$; максимальный коэффициент ветвления B .

Результат: корневое остовное дерево T графа G .

$T = \{\}$.

$u_{bf} \leftarrow 0$ для всех вершин u .

$r \leftarrow$ случайно выбранная начальная вершина.

Посещенная вершина = $\{r\}$.

$r_{bf} = r_{bf} + 1$.

ребра_для_добавления = $\text{neigh}(r)$.

while $|\text{Посещенная_вершина}| < n$ do

$e = \text{ребра_для_добавления}[0]$.

$c = 0$.

 для всех ребер $= (u; v) \in$ массиву добавления ребер выполнить

$$C_v = (n - l_v)(B - v_{bf}).$$

 если $C_v > c$, то

$$c = C_v.$$

$e = \text{край}$.

 конец, если

конец цикла

$$T = T \cup \{e\}$$

Посещенная_вершина = $\text{Посещенная_вершина} \cup \{y\}$, где $e = (x; y)$.

$$x_{bf} = x_{bf} + 1$$

Удалите все ребра формы $(*; q)$ из ребер, которые нужно добавить.

для всех ребер $= (p; q) \in \text{neigh}(y)$ выполнить

 если $q \notin \text{Посещенная_вершина}$, то

$$\text{Ребра_для_добавления} = \text{ребра_для_добавления} \cup \{\text{edge}\}$$

 конец цикла если

конец цикла

конец

Давайте проиллюстрируем работу метода поиска в глубину и предлагаемого алгоритма на примере графа, изображенного на рис. 7. Сначала на рис. 8 мы представим традиционную схему с вероятностью КАПО (первого достижения цели) $p = 1$ для данного графа. Затем на рис. 9 мы представим два остовных дерева этого графа. Первое остовное дерево на рис. 9,а создается с использованием метода поиска в глубину, в то время как второе дерево на рис. 9,б создается с использованием алгоритма 1 с параметром $B = 3$. На рис. 10,а,б мы демонстрируем оптимизированные схемы для КАПО с вероятностью $p = 1$ для графа на рис. 7. Оптимизированные схемы создаются с использованием метода поиска в глубину и алгоритма 1 соответственно. Значения параметров γ и β выбираются случайным образом.

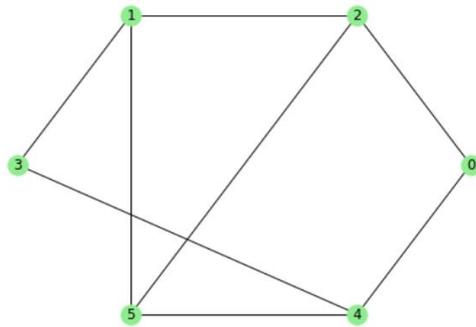


Рис. 7. Пример графа, состоящего из шести вершин

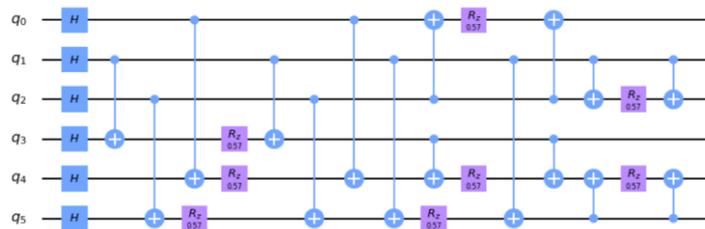


Рис. 8. Традиционная схема КАПО $p = 1$, соответствующая $U(H_p; \gamma)$ для графа на рис. 7

Глубина схем на рис. 8, а также на рис. 10,а,б составляет 11, 14 и 12, соответственно. Эти значения были получены с использованием функции `.depth()` [21] в рамках программы Qiskit [22].

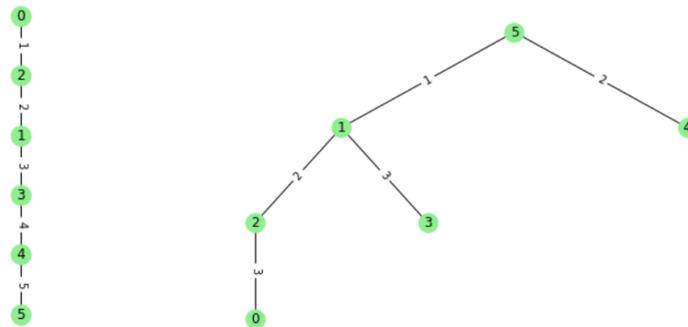


Рис. 9. Два остовных дерева графа. Левое дерево было создано с применением метода поиска в глубину, в то время как правое дерево сформировано с применением алгоритма 1 с параметром $B = 3$

Подчеркнем, что как в случае оптимизированных схем [23], так и в сравнении с традиционным методом Адамара-Каши, оба оптимизированных варианта требуют большей глубины. Тем не менее, можно утверждать, что оптимизированная схема, представленная на рис. 10,б, можно считать более предпочтительной, так как она требует на 5 вентилей CNOT меньше, чем схема на рис. 8, при увеличении глубины всего лишь на 1.

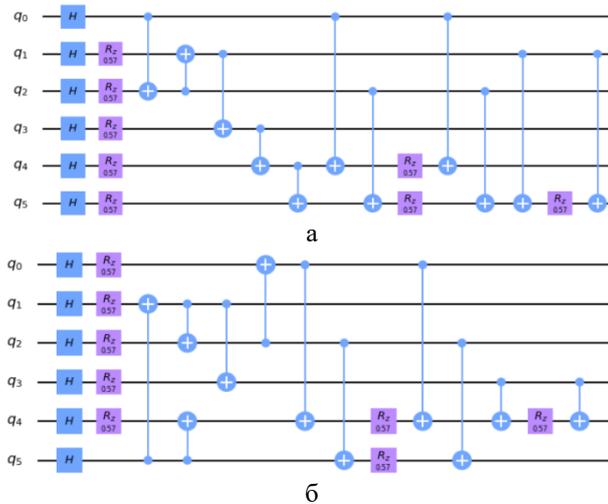


Рис. 10 (а) Оптимизированная схема с использованием метода поиска в глубину, (б) Оптимизированная схема с использованием предложенного алгоритма 1

Заключение. На данный момент активно разрабатывается теория квантовых вычислений [24], несмотря на то, что идея квантовых компьютеров была предложена еще Р. Фейнманом в 1982 году. Научные исследования в этой области продолжаются. В данной статье предлагается эвристический алгоритм с полиномиальным временем, который находит остоное дерево с корнем [25], сохраняя сокращение числа вентилей CNOT, но при этом ограничивая увеличение глубины. Этот метод способен снизить увеличение глубины по сравнению с аналогичными методами, что, в свою очередь, повышает вероятность успешного выполнения алгоритма. Это обусловлено сохранением сокращения элементов CNOT и снижением увеличения глубины, что делает схему менее чувствительной к ошибкам релаксации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Farhi E., Goldstone J., and Gutmann S. A quantum approximate optimization algorithm, *arXiv preprint arXiv:1411.4028*, 2014.
2. Cerezo M., Arrasmith A., Babbush R., Benjamin S., Endo S., Fujii K., McClean J., Mitarai K., Yuan X., Cincio L., et al. Variational quantum algorithms, *arXiv preprint arXiv:2012.09265*, 2020.
3. Linke N.M., Gutierrez M., Landsman K.A., et al. Fault-tolerant quantum error detection, *Science Advances*, 2017, 3 (10): e1701074. Available from: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701074>.
4. Vuillot C. Is error detection helpful on IBM 5q chips?, *Quantum Information and Computation*, 2018, Vol. 18, No. 11-12, pp. 0949-0964.
5. Barron G. and Wood C. Measurement error mitigation for variational quantum algorithms, *arXiv preprint arXiv:2010.08520*, 2020.
6. Endo S., Benjamin S., and Li Y. Practical quantum error mitigation for near-future applications, *Physical Review X*, 2018, 8 (3):031027.
7. Endo S., Cai Z., Benjamin S., and Yuan X. Hybrid quantum-classical algorithms and quantum error mitigation, *Journal of the Physical Society of Japan*, 2021, 90 (3):032001.
8. Zhu L., Tang H., Barron G., Calderon-Vargas F., Mayhall N., Barnes E., and Economou S. An adaptive quantum approximate optimization algorithm for solving combinatorial problems on a quantum computer, *arXiv preprint arXiv:2005.10258*, 2020.

9. Larkin J., Jonsson M., Justice D., and Guerreschi G. Evaluation of quantum approximate optimization algorithm based on the approximation ratio of single samples, *arXiv e-prints, pages arXiv-2006*, 2020.
10. Barkoutsos P., Nannicini G., Robert A., Tavernelli I., and Woerner S. Improving variational quantum optimization using cvar, *Quantum*, 2020, 4:256.
11. Harper R, Flammia S.T. Fault-tolerant logical gates in the IBM quantum experience, *Phys. Rev. Lett.*, 2019, 122:080504. Available from: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.122.080504>.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Olukotun K. Chip Multiprocessor Architecture – Techniques to Improve Throughput and Latency. Morgan and Claypool Publishers, San Rafael, 2007.
17. 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.
18. Williams C.P. Explorations in Quantum Computing, *Texts in Computer Science*, Chapter 2. Quantum Gates. Springer, 2011, pp. 51-122.
19. 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.
20. Rahman M. and Kaykobad M. Complexities of some interesting problems on spanning trees, *Information Processing Letters*, 2005, 94 (2), pp. 93-97.
21. 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, 48, 2637.
22. Hector A. et al. Qiskit: An open-source framework for quantum computing, 2019.
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. Boneh D., Zhandry M. Quantum-secure message authentication codes, *In: Proceedings of Eurocrypt*, 2013, pp. 592-608;
25. 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, pp. 59-68.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Боженюк.

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

Потапов Виктор Сергеевич – e-mail: vitya-potapov@rambler.ru; тел.: 88634371656; кафедра вычислительной техники; ассистент.

Божич Владимир Иванович – Таганрогский институт имени А.П. Чехова (филиал) ФГБОУ ВО "РГЭУ (РИНХ)", e-mail: vladimir.bozhich@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634601812; кафедра биолого-географического образования и здоровьесберегающих дисциплин; д.т.н.; профессор.

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

Potapov Victor Sergeevich – e-mail: vitya-potapov@rambler.ru; phone: +78634371656; the department of computer engineering; assistant.

Bozhich Vladimir Ivanovich – FSBEI HE “RSEU (RINH)”, Taganrog Institute A.P. Chekhov, e-mail: vladimir.bozhich@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +78634601812; the department of biological and geographical education and health preserving disciplines; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 004.738.2

DOI 10.18522/2311-3103-2023-5-16-34

Ю.А. Заргарян, Е.В. Заргарян, В.И. Кошенский, К.О. Кирсанов
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ПОДАВЛЕНИЯ
БЕСПРОВОДНЫХ СИГНАЛОВ

Использование устройств с беспроводной передачей данных в современном мире давно стало обыденностью. К подобным устройствам относятся смарт-часы, беспроводные наушники и гарнитуры. Такие устройства обеспечивают мобильность и удобство отсутствием проводов и высокой функциональностью. Одним из существенных недостатков использования беспроводных устройств является снижение эффективности восприятия окружающего мира человеком, в частности это касается слухового канала информации. Особенно остро такая проблема возникает при переходе железнодорожных путей пешеходами в наушниках. В данной работе предлагается решение такой проблемы, рассматривается система избирательного подавления беспроводной связи, а именно сигналов Bluetooth и Wi-Fi. Такая система на базе уникальных алгоритмов имеет возможность обнаружения приближения пешеходов к железнодорожным переходам с помощью видеокамер, а также на основе сканирования и анализа эфира окружающих беспроводных сетей может избирательно подавлять сигналы Bluetooth и Wi-Fi в зоне действия установки. Таким образом, система отключает беспроводные устройства пешеходов вблизи железнодорожных переходов, тем самым привлекает их внимание к запрещающему сигналу светофора, светомушовой сигнализации и приближающему поезду. Система работает на основе главного управляющего микроконтроллера, который с помощью реле контролирует подачу электропитания на включение подавителя только при обнаружении в радиусе досягаемости беспроводных сигналов, которые необходимо подавить, или при наличии пешеходов в поле зрения видеокамер. Кроме того, система подразумевает метод оценки паттернов поведения пешеходов при подавлении беспроводной связи на основе нейросетей по распознаванию образов с последующей интерпретацией полученных данных. Это позволит собрать статистическую информацию с целью анализа реакции людей на работу системы вблизи железнодорожных переходов.

Избирательное подавление; беспроводные сигналы; сигналы Bluetooth и Wi-Fi; уникальные алгоритмы; обнаружение пешеходов; сканирование эфира; повышение безопасности; железнодорожный переход; паттерны поведения.

Yu.A. Zargaryan, E.V. Zargaryan, V.I. Koshensky, K.O. Kirsanov
DEVELOPMENT OF A SYSTEM OF SELECTIVE SUPPRESSION
OF WIRELESS SIGNALS

The use of devices with wireless data transmission has long become commonplace in today's world. Such devices include smart watches, wireless headphones and headsets. Such devices provide mobility and convenience with the absence of wires and high functionality. One of the significant disadvantages of using wireless devices is a decrease in the efficiency of human perception of the surrounding world, in particular it concerns the auditory channel of information. Especially