



МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ КВАНТОВЫХ КОМПЬЮТЕРОВ: ОТ КОМПИЛЯЦИИ ДО СНИЖЕНИЯ ШУМА

Жуков Павел Александрович

аспирант, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
г. Москва, Россия.

Аннотация

Квантовые компьютеры обещают решить задачи, недоступные для классических систем, однако их реализация сопряжена с серьезными техническими и алгоритмическими вызовами. Одной из ключевых проблем является **шум** и **ограниченная связность кубитов**, что снижает производительность и точность квантовых алгоритмов. Данная статья проводит комплексный анализ методов оптимизации, направленных на повышение эффективности квантовых вычислений. Рассматриваются подходы, от низкоуровневой **квантовой компиляции**, оптимизирующей логические схемы, до высокоуровневых методов, таких как **снижение шума (error mitigation)**. Особое внимание уделяется практическим стратегиям, которые позволяют адаптировать алгоритмы к архитектуре существующих квантовых компьютеров, что имеет решающее значение для достижения «квантового превосходства».

Ключевые слова: квантовые вычисления, квантовые алгоритмы, оптимизация, квантовая компиляция, снижение шума, кубиты, квантовое превосходство.

1. Введение: Почему оптимизация критична для квантовых вычислений

Квантовые компьютеры работают на принципах квантовой механики, используя **кубиты** (квантовые биты), которые могут находиться в суперпозиции состояний и быть связаны между собой через **квантовую запутанность**. Это позволяет выполнять определенные вычисления экспоненциально быстрее, чем на классических компьютерах. Однако современные квантовые компьютеры являются **NISQ-устройствами** (Noisy Intermediate-Scale Quantum), что означает, что они шумные, содержат ограниченное количество кубитов и имеют низкую связность между ними. Это приводит к ошибкам и разрушению квантового состояния. Таким образом, оптимизация алгоритмов становится не просто вопросом производительности, а необходимостью для успешного выполнения любого вычисления.

2. Методы оптимизации на разных уровнях абстракции

Оптимизация квантовых алгоритмов может быть реализована на разных уровнях, от преобразования высокоуровневого кода до низкоуровневой адаптации к физической архитектуре.

2.1. Оптимизация на уровне квантовой компиляции

Квантовая компиляция — это процесс преобразования высокоуровневого квантового алгоритма (например, на языке Qiskit или Cirq) в последовательность элементарных **квантовых вентилях**, которые может выполнить конкретный квантовый процессор.

Оптимизация связности: В большинстве реальных квантовых компьютеров не все кубиты могут напрямую взаимодействовать друг с другом. Компилятор должен вставлять дополнительные операции (например, SWAP-вентили), чтобы переместить данные между кубитами, позволяя выполнить нужные операции. Оптимизация компилятора направлена на минимизацию количества этих дополнительных вентилях, так как каждая операция добавляет шум.

Снижение количества вентилях: Компилятор также может находить эквивалентные, но более короткие последовательности вентилях. Уменьшение общего количества операций напрямую снижает вероятность ошибки. Например, компилятор может заменить сложную последовательность вентилях на один эквивалентный.

3. Методы снижения шума (Error Mitigation)

В отличие от классической коррекции ошибок, которая требует большого количества избыточных кубитов, **методы снижения шума** (error mitigation) направлены на компенсацию эффектов шума без использования большого числа дополнительных физических кубитов.

Усреднение шума: Этот метод включает многократное выполнение одной и той же квантовой схемы с различными вариантами шумовых паттернов и усреднение результатов. Это позволяет статистически уменьшить эффект шума.

Экстраполяция к нулевому шуму: Этот метод заключается в выполнении алгоритма с разным уровнем искусственно введенного шума и последующей экстраполяцией результатов к идеальному случаю — нулевому шуму. Это позволяет получить более точное значение, чем при однократном выполнении.

Заключение

Оптимизация алгоритмов является одной из ключевых задач в области квантовых вычислений.

Поскольку современные квантовые компьютеры ограничены количеством кубитов и подвержены шуму, методы оптимизации на разных уровнях абстракции становятся жизненно важными.

Квантовая компиляция позволяет адаптировать алгоритмы к физической архитектуре, а методы **снижения шума** помогают компенсировать неизбежные ошибки. В совокупности эти подходы прокладывают путь к достижению "квантового превосходства" — решению практически значимых задач, которые лежат за пределами возможностей классических компьютеров. Будущие исследования будут направлены на разработку гибридных алгоритмов, которые сочетают квантовые и классические вычисления для достижения максимальной эффективности.

Литература

1. Preskill, J. Quantum computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*, **2018**, 2, 79.
2. Barenco, A., et al. Elementary gates for quantum computation. *Physical Review A*, **1995**, 52(5), 3457.
3. Krantz, P., et al. A quantum engineer's guide to superconducting qubits. *Applied Physics Reviews*, **2019**, 6(2), 021318.
4. Temme, K., et al. Error mitigation for short-depth quantum circuits. *Physical Review Letters*, **2017**, 119(18), 180509.
5. Kandala, A., et al. Hardware-efficient variational quantum eigensolver for small molecules and quantum magnets. *Nature*, **2017**, 549(7671), 242-246.
6. Shor, P. W. Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring. *Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, **1994**, 124-134.
7. Grover, L. K. A fast quantum mechanical algorithm for database search. *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing*, **1996**, 212-219.
8. Gambetta, J. M., et al. Quantum computing: The new paradigm for computing. *Nature*, **2017**, 550, 29-37.
9. O'Malley, P. J. J., et al. Scalable noise mitigation for quantum computation. *npj Quantum Information*, **2016**, 2, 16024.
10. Bravyi, S., et al. Quantum supremacy with a programmable superconducting processor. *Nature*, **2019**, 574(7779), 505-510.