

Оптимизация последовательностей биполярных импульсов для реализации квантовых операций алгоритмом AlphaZero

М.А.Сергеев
Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского
Нижний Новгород, Россия
mas_135@mail.ru

М.В. Бастракова
Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского
Нижний Новгород, Россия
mar.denisenko@gmail.com

В.А.Вожаков
Научно-исследовательский
институт ядерной физики им. Д.В.
Скобелева МГУ
Москва, Россия
sevozh@yandex.ru

И.И.Соловьев
Научно-исследовательский
институт ядерной физики им. Д.В.
Скобелева МГУ
Москва, Россия
igor.soloviev@gmail.com

Аннотация—Показана возможность реализации высокоточных квантовых логических операций в сверхпроводниковом кубите за счет контроля состояниями биполярными последовательностями пикосекундных однокубитных импульсов потока. Изучается возможность улучшения методов нахождения данных последовательностей за счет использования одного из новейших алгоритмов машинного обучения с подкреплением AlphaZero.

Ключевые слова— кубит, машинное обучение, обучение с подкреплением, AlphaZero

1. ВВЕДЕНИЕ

Среди возможных реализаций кубита – базовой ячейки квантового процессора – одним из самых перспективных кандидатов является сверхпроводниковый кубит специального типа – трансмон, который является базовой ячейкой квантовых процессоров Google, IBM, Rigetti. Для трансмонов разработаны быстрые протоколы управления посредством электромагнитного поля, позволяющие эффективно совершать квантовые гейтовые операции с достаточно высокой точностью [1]. Однако при масштабировании таких систем существует проблема, связанная с дополнительными каналами декогеренции за счет огромного числа электроники для индексного управления каждым кубитом в регистре. В связи с этим развиваются альтернативные подходы к управлению трансмонов, нацеленные на борьбу с возникающими проблемами. Одним из таких подходов является использование длительных последовательностей управляющих импульсов с широким спектром – коротких (длительность \sim пс) униполярных импульсов (Single Flux Quantum, SFQ), генерируемых в цепях быстрой квантовой логики. Данный способ успешно зарекомендовал себя при управлении основных однокубитных операций [2, 3], когда с помощью модифицированной последовательности униполярных импульсов SCALLOP [3] удалось продемонстрировать реализацию операций на временах ~ 20 нс с той же точностью исполнения как и в микроволновой технике. В данной работе представлена модификация такой схемы управления, включающая в себя возможность использовать импульсы различной полярности, что

позволяет ускорить операции до 6 нс. Однако встаёт вопрос о подборе управляющего сигнала для кубита с заданными параметрами. Для этого, были рассмотрены возможные подходы к решению оптимизационной задачи управления кубитом. Известно, что подавляющее большинство алгоритмов для оптимизации квантовой динамики основываются на эвристических или сугубо стохастических подходах (например, метод координатного спуска или генетические алгоритмы). Для подобных алгоритмов существенным ограничением является сильная зависимость конечной точности от изначальных предположений (гиперпараметров), а также необходимость полного повторного применения алгоритма даже при небольшом изменении параметров системы. В свою очередь, машинное обучение с использованием нейросетей и алгоритмов обучения с подкреплением, одним из которых является AlphaZero [4], позволяет достигать высокой точности результатов и при этом обладает возможностью ее при изменении параметров системы, даже не требуя полного переобучения. В данной работе изучается принцип работы алгоритма AlphaZero и особенности его применения для проблемы оптимизации гейтовых кубитных операций. Помимо этого, исследуется динамика обучения нейросети при различных наборах гиперпараметров. Приводится сравнение этих подходов и обсуждается возможность их применения для нахождения управляющего сигнала для совершения двухкубитных операций.

2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ И ПОДХОДОВ

Гамильтониан сверхпроводникового кубита-трансмона может быть представлен в виде:

$$H = \omega a^\dagger a - \frac{\mu}{2} a^\dagger a (a^\dagger a - 1) + \varepsilon(t)(a^\dagger + a), \quad (1)$$

где ω – собственная частота кубита, $a(a^\dagger)$ – операторы уничтожения (рождения), μ – коэффициент нелинейности системы, $\varepsilon(t)$ – последовательность биполярных импульсов, которое в зависимости от калибровки может быть интерпретировано как управляющее магнитное поле в интерферометре или напряжение на джозефсоновском переходе. В данной работе мы полагаем, что на трансмон вида (1) на

тактовой частоте Ω подается последовательность коротких прямоугольных импульсов, которая описывается функцией $\varepsilon(t)$. При этом характерная длительность каждого импульса удовлетворяет условию $\tau \ll \omega^{-1}$, так что управляющую функцию можно записать в виде:

$$\varepsilon(t) = \sum_{j=1}^M \alpha_j \theta \left(t - \left(jd - \frac{\tau}{2} \right) \right) \theta \left(t - \left(jd + \frac{\tau}{2} \right) \right), \quad (2)$$

где $d = 2\pi / \Omega$ – интервал действия импульсов, θ – функция Хэвисайда, амплитуда внешнего воздействия α_j , отвечает за поляризацию импульса в последовательности, j и M – номер импульса в последовательности и общее количество импульсов.

Динамика состояний трансмона (1), изучалась на основе численного решения уравнения Шредингера, при учете вышележащих уровней относительно кубитного подпространства состояний.

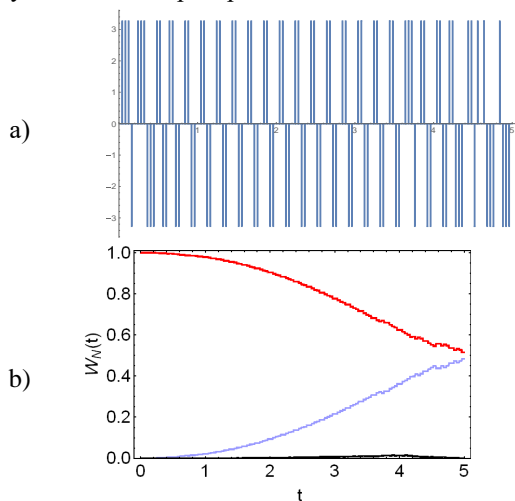


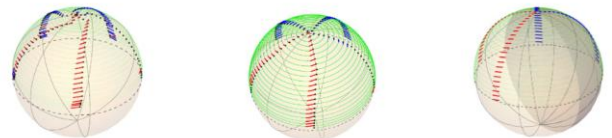
Рис. 1. (а) Последовательность биполярных импульсов (1). (б) Динамика квантовой операции $U_{\pi/2}$ для данной последовательности. Параметры системы: $\omega = 5 * 2\pi$ [ГГц], $\mu = 0.25 * 2\pi$ [ГГц], $\tau = 0.004$, $A = 3$, $M = 125$

Критерием качества последовательности была выбрана утечка в вышележащие состояния $L = \sum_{i=2}^N W_i(t) \leq 10^{-4}$

Импульсное воздействие (2) численно оптимизировалось с помощью алгоритма AlphaZero для различных параметров трансмона (значений частот, нелинейности). В качестве примера на рис. 1 (а) приведена управляющая последовательность из 125 импульсов разной полярности (2) оптимизированная при типичных значениях: $\omega = 5$ ГГц и $\mu = 250$ МГц. Населенности $W_N(t)$ базисных состояний (основного ($N = 0$) и первого возбужденного уровня ($N = 1$) кубита) при заданном воздействии испытывают аналог осцилляций Раби, показанные на рис. 1 (б), что в данном случае соответствует квантовой операции $U_{\pi/2}$. Время операции составляет ~ 5 нс, что примерно в 2 раза быстрее, чем в случае управления трансмоном импульсами одной полярности [4]. Ускорение связано с увеличением общего количества импульсов в последовательности и оптимизацией интерференции состояний в интервалах между импульсами.

После длительного периода начального обучения, с помощью алгоритма AlphaZero были получены

семейства последовательности импульсов для квантовой операции $U_{\pi/2}$, создающих минимальную утечку для набора входных параметров, которые были взяты из экспериментальных работ, например, частота кубита 3-7 ГГц, нелинейность 200-400 МГц. Помимо этого, была показана эффективность использования машинного обучения по сравнению с не подразумевающими нейросеть алгоритмами при переносе готовой нейросети в систему с другим набором параметров на примере с генетическим алгоритмом. В частности, визуализация операции $U_{\pi/2}$ на сфере Блоха позволяет продемонстрировать преимущество алгоритма AlphaZero в точности его результатов наглядно.



(а) Генетический алг-м (б) Нейросеть (с) Идеальный случай

Рис. 2. Визуализация квантовой операции $U_{\pi/2}$ на сфере Блоха для последовательностей импульсов, полученных (а): генетическим алгоритмом и (б): алгоритмом AlphaZero. (с): Теоретическое представление идеальной операции $U_{\pi/2}$. Параметры системы: $\omega = 5 * 2\pi$ [ГГц], $\mu = 0.25 * 2\pi$ [ГГц], $\tau = 0.004$, $A = 3$, $M = 125$

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты работы показывают возможность ускорения операций с трансмонами за счет использования в управляющих последовательностях одноквантовых импульсов инвертированных по напряжению. Использование алгоритма машинного обучения AlphaZero позволяет получить требуемую последовательность импульсов для выполнения заданной квантовой операции и для любого набора входных параметров кубита (частота, нелинейность, тактовая частота генератора, амплитуда) с минимальной утечкой в высоколежащие состояния.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана грантом РФФ № 22-72-10075. М.В.Б. благодарит стипендию фонда "Базис" за поддержку.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Krantz, P. A quantum engineer's guide to superconducting qubits / P. Krantz, M. Kjaergaard, F. Yan, T. P. Orlando, S. Gustavsson, W. D. Oliver // Phys. Rev. Applied. – 2019. – Vol. 6(2). – P. 021318.
- [2] McDermott, R. Accurate Qubit Control with Single Flux Quantum Pulses / R. McDermott, M. G. Vavilov // Phys. Rev. Applied. – 2014. – Vol. 2(1). – P. 01400
- [3] Leonard Jr., E. Digital coherent control of a superconducting qubit / E. Leonard, Jr., M. A. Beck, J. Nelson, B.G. Christensen, T. Thorbeck, C. Howington // Phys. Rev. Applied. – 2019. – Vol. 11(1). – P. 014009.
- [4] Dalgaard, M., Global optimization of quantum dynamics with AlphaZero deep exploration / M. Dalgaard, F. Motzoi, J. J. Sørensen, J. Sherson // npj Quantum Inf. – 2020. – Vol. 6(6).