

Квантовые вычисления, квантовая теория и искусственный интеллект

В.С. Магомадов

Чеченский государственный университет, Грозный

Аннотация: в этой статье рассматриваются последние достижения в сфере квантовых вычислений. Статья нацелена на то, чтобы выявить основные проблемы, возникающие в процессе разработки компьютера, основанного на квантовых вычислениях. Кроме того, рассматривается то, что уже сделано для того, чтобы решить эти проблемы. В дополнение к этому, в статье рассматриваются различные варианты применения квантовых вычислений, н-р, их применение в сфере искусственного интеллекта и поиска.

Ключевые слова: квантовая физика, квантовые вычисления, квантовый компьютер, квантовое программирование, квантовая теория поля, искусственный интеллект, квантовый поиск, квантовая схема, кубиты, квантовые алгоритмы, машина Тьюринга.

Квантовая теория поля несомненно является одним из самых важных достижений XX века. Она предоставляет единую структуру для выдвижения различных теорий физики. После более чем 50 лет с момента ее зарождения, квантовая теория объединилась с информатикой, являющейся еще одним важным интеллектуальным триумфом XX века. В результате, возникла новая сфера под названием «Квантовый компьютер».

Квантовые компьютеры были впервые упомянуты лауреатом нобелевской премии по физике, Фейнманом [1] в 1982 году. Он понял, что ни один классический компьютер не сможет симулировать определенные квантовые явления без экспоненциального замедления, и, таким образом, осознал, что квантовые механические эффекты могут предложить что-то новое для вычислений. В 1985 году, идеи Фейнмана были рассмотрены в деталях и формализованы Дойчем [2, 9], где он описал квантовую машину Тьюринга. В частности, Дойч представил технику квантового параллелизма, основанную на Принципе суперпозиции в квантовой механике, посредством которой квантовая машина Тьюринга может кодировать множество входов на одной ленте и выполнять расчет на всех входах одновременно. Далее, он

предложил, что квантовые компьютеры могут выполнять определенные виды вычислений, которые классические компьютеры выполняют неэффективно.

Одним из самых важных продвижений в этой области стала работа Шора [3] в 1994 году. Исследовав силу квантового параллелизма, он разработал алгоритм полиномиального времени на квантовом компьютере для простых множителей. В 1996 году, Гровер [4] предложил еще одно применение квантовому компьютеру, и разработал квантовый алгоритм для поиска одного элемента в неотсортированной базе данных в квадратном корне времени, которое это заняло бы на классическом компьютере. Так как поиск в базе данных и простые множители являются центральной проблемой информатики и криптографии, соответственно, и квантовые алгоритмы для них являются намного быстрее, чем классические, работа Шора и Гровера стимулировали интенсивное исследование квантового компьютера. С тех пор, квантовый компьютер является крайне интересной и быстро растущей областью исследований.

В связи с тем, что он революционизировал саму идею информатики, квантовый компьютер заставляет нас пересмотреть различные сферы информатики, и искусственный интеллект (ИИ) не является исключением. Грубо говоря, ИИ имеет две цели: (1) инженерная цель – разработать интеллектуальные машины; и (2) научная цель – понять интеллектуальное поведение людей, животных и машин [5]. Исследователи ИИ, в основном, используют приемы информатики, чтобы достичь и инженерную, и научную цели. Маккарти [6] указал на то, что «вычислительный интеллект» является более подходящим именем для предмета ИИ, чтобы обозначить ключевую роль, которую играют компьютеры в ИИ. Естественно, быстрое развитие квантового компьютера приводит нас к тому, что мы должны задать вопрос: как может эта новая техника информатики помочь нам в достижении целей ИИ. Кажется очевидным то, что квантовый компьютер внесет значительный

вклад в достижение инженерной цели ИИ посредством его применения в различных системах ИИ, чтобы ускорить вычислительный процесс, но, на самом деле, очень сложно разрабатывать квантовые алгоритмы для решения определенных проблем ИИ, которые были бы более эффективными, чем существующие классические алгоритмы для той же задачи. На данный момент, также остается непонятным, как квантовый компьютер может быть использован для достижения научной цели ИИ, и пока что не существует серьезного исследования, преследующего эту проблему. Вместо этого, есть огромный объем литературы, посвященной приложениям квантовой теории в ИИ и наоборот, но не через квантовый компьютер. Можно увидеть из существующих работ, что из-за присущего ей вероятностного характера, квантовая теория может быть связана с числовым ИИ более спонтанным способом, чем с логическим ИИ.

Данная статья имеет две задачи: (1) дать краткое введение в квантовый компьютер; и (2) исследовать связи между квантовым компьютером, квантовой теорией и ИИ.

Квантовый компьютер

Фундаментальные принципы квантового компьютера хорошо заложены в базовом аппарате квантовой информатики. Чтобы продемонстрировать силу квантового компьютера, в статье будет использоваться Алгоритм Дойча-Йожи, который считается одним из лучших примеров.

Кубит и квантовые регистры

Базовой единицей данных в квантовом компьютере является кубит, который может быть физически представлен двухуровневой квантово-механической системой, н-р, горизонтальные и вертикальные поляризации фотона, или верхнее и нижнее вращение одного электрона. Математически,

кубит представлен единичным вектором в двумерном комплексном гильбертовом пространстве, и может быть записан, используя обозначения Дирака следующим образом:

$$|\psi\rangle = \alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle,$$

где $|0\rangle$ и $|1\rangle$ являются двумя базисными состояниями, и α_0 и α_1 являются сложными числами, где $|\alpha_0|^2 + |\alpha_1|^2 = 1$. Состояния $|0\rangle$ и $|1\rangle$ называются вычислительными базисными состояниями кубитов. Они соответствуют состояниям 0 и 1 классических битов. Числа α_0 и α_1 называются амплитудами вероятности состояния $|\psi\rangle$. Поразительной разницей между классическими битами и кубитами является то, что последние могут быть в суперпозиции $|0\rangle$ и $|1\rangle$ в виде уравнения (1). Пример состояния кубита это:

$$|-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle). \quad (1)$$

Квантовая машина Тьюринга и квантовый автомат

Модели квантовых вычислений имеют в качестве своих предков исследования связей между физикой и вычислениями. В 1973, чтобы понять термодинамику классических вычислений, Беннет [7] подчеркнул, что логически обратимая операция не нуждается в рассеивании любой энергии и обнаружил, что логически обратимая машина Тьюринга является теоретической возможностью. В 1980, Бениофф [8] создал квантовую механическую модель машины Тьюринга. Его конструкция является первым квантовым механическим описанием компьютера, но это не реальный квантовый компьютер, потому что эта машина может существовать в чисто квантовом состоянии между шагами вычисления, но в конце каждого шага вычисления машина возвращается в одно из ее классических состояний. Первая действительно квантовая машина была описана Дойчем [7] в 1985. В

его машине лента может существовать в квантовых состояниях тоже. В этом состоит разница от машины Бениоффа.

В сфере классических вычислений, конечный автомат и автомат с магазинной памятью широко используются в дизайне и реализации языков программирования [10]. Несколько квантовых обобщений конечного автомата и автомата с магазинной памятью были введены в конце 1990-х [7]. Эти определения квантового автомата в основном отличаются там, где позволяют квантовые измерения. Например, квантовый автомат, упомянутый в [7], можно обследовать только после того, как все символы ввода были прочтены, в то время как квантовый автомат, упомянутый в [8], можно обследовать после прочтения каждого символа.

Недавно, были найдены несколько новых применений квантового автомата; например, принципы квантового автомата были применены в интерактивных системах проверки [6]. Однако, данное применение не означает, что квантовый автомат может быть использован в компилировании квантовых языков программирования.

Квантовая схема

Модель схемы квантовых вычислений была также предложена Дойчем [8]. Грубо говоря, квантовая схема состоит из последовательности квантовых вентилях, связанных квантовыми проводами, несущими кубиты. Яо (7) показал, что модель квантовой схемы эквивалентна квантовой машине Тьюринга в том смысле, что они могут симулировать друг друга в полиномиальном времени. С тех пор, квантовые схемы стали самыми популярными моделями квантовых вычислений, в которых выражаются существующие квантовые алгоритмы.

Синтез квантовых схем является крайне важным для квантовых вычислений из-за того, что в текущих технологиях очень сложно реализовать

квантовые вентили, действующие на трех или более кубитах. Еще в 1995 году, было показано, что любой квантовый вентиль может быть (приблизительно) разложен на схему, состоящую только из вентилях CNOT и маленький набор кубитовых вентилях [2]. Недавно, были найдены более эффективные алгоритмы синтеза для квантовых схем.

Некоторые авторы проявили инициативу для упрощения и оптимизации квантовых схем. Цель состоит в том, чтобы разработать методы и приемы для уменьшения количества квантовых вентилях в квантовой схеме и глубины квантовой схемы. Из-за сложности реализации крупных квантовых схем, эта проблема даже больше важнее в квантовых вычислениях, чем в классических вычислениях. Текущее исследование включает в себя: (1) специальные методы для упрощения квантовых схем для специальных классов вычислений; (2) общие методы; например, была представлена локальная техника оптимизации для квантовых схем, основанная на шаблонах [3].

В текущей литературе, квантовые схемы в основном изображаются, как диаграммы схем, и рассуждения о квантовых схемах обычно проводятся через основательное исследование их действий на различных состояниях ввода. Очевидно, что диаграммы схем для сложных квантовых алгоритмов были бы слишком большими. Чтобы дать возможность для выполнения алгебраических манипуляций на квантовых схемах, был создан алгебраический язык [4], в котором квантовые схемы могут быть удобно выражены в том виде, который похож на представление классических схем, использующих выражения Boolean. Однако, алгебраического языка недостаточно для поддержки алгебраической манипуляции квантовых схем. Нам по-прежнему необходимо установить различные алгебраические законы для квантовых схем, которые будут играть роль, схожую с той, что играет алгебра Boolean для классических схем.

Квантовое программирование

Наш опыт с классическими вычислениями полагает, что, когда квантовые компьютеры станут доступными в будущем, квантовое программное обеспечение будет играть ключевую роль в их эксплуатации. К сожалению, современные методологии разработки программного обеспечения не подходят квантовым компьютерам из-за значительной разницы между сущностью мира классических вычислений и мира квантовых вычислений. Чтобы заложить прочный фундамент для будущих методологий разработки квантового программного обеспечения, критически важно систематически исследовать квантовое программирование [3-7].

Понимание поведения сложных конструкций квантовой программы является крайне важным для квантового программирования. Некоторые свойства высокого уровня, такие как цикл и рекурсия предоставлены в языке СелингераQFC [2]. В [7], была представлена общая схема программ с квантовым циклом. Основная разница между квантовыми циклами и классическими циклами исходит из квантовых измерений в «охране» цикл. В пространстве фиксированного конечномерного состояния, необходимое и достаточное условие, под которым программа с квантовым циклом завершается на заданном входе, было найдено используя жорданову нормальную форму сложных матриц. В частности, было доказано, что небольшое нарушение либо на унитарном преобразовании в цикле, либо на измерении в охране цикла может заставить любой квантовый цикл (почти) завершиться.

Потенциальное применение квантовых вычислений в сфере искусственного интеллекта.

Идея использования квантовых вычислений в ИИ является весьма привлекательной как для исследователей квантовых вычислений, так и для

исследователей ИИ. Исследователи квантовых вычислений надеются найти больше квантовых алгоритмов, демонстрирующих значительное увеличение скорости вычислений по сравнению с классическими алгоритмами. Они ведут поиск новых проблем, соответствующих этой цели, и некоторые проблемы ИИ кажутся хорошими кандидатами. С другой стороны, ИИ-сообщество верит, что квантовые вычисления показывают значительный потенциал для проблем, неразрешимых в настоящий момент.

Квантовые алгоритмы для обучения

Возможно, единственная сфера, где квантовые вычисления и ИИ встретились плодотворным образом, является машинное обучение. Существуют несколько трудов, посвященных квантовому обобщению теории компьютерного обучения. Их цель состоит в том, чтобы найти некие квантовые алгоритмы, являющиеся более эффективными, чем существующие классические алгоритмы для обучения определенных классических объектов, таких как функции Boolean. Это исследование тесно связано с теорией квантовой сложности [5].

Квантовые алгоритмы для проблем разрешимости

Многие проблемы разрешимости могут быть сформулированы в виде дерева принятия решений. Фархи и Гатман [8] показали, что квантовые алгоритмы, основанные на эволюции Гамильтониана, могут решить проблемы разрешимости, представленные классом деревьев решения, являющихся экспоненциально более быстрыми, чем классические случайные блуждания. Однако, это не подразумевает какое-либо преимущество квантовых вычислений над классическими вычислениями, потому что они также могут быть быстро решены другими классическими алгоритмами.

Квантовый поиск

Большая часть ранних исследований в сфере ИИ связана с методами поиска. С одной стороны, это может быть связано с тем, что многие проблемы ИИ могут быть сведены к поиску; например, планирование, доказательство теоремы и извлечение информации, а с другой стороны, компьютеры могут выполнять эти задачи намного быстрее, чем люди. Алгоритм Гровера [7] показывает, что квантовые компьютеры могут делать это даже быстрее, чем классические компьютеры. Естественно, люди надеются, что квантовые вычисления будут широко использованы в ИИ для решения различных проблем, связанных с поиском. Многие полагают, что квантовый поиск будет одним из первых методов квантовых вычислений, которые будут играть важную роль в ИИ. В 1999 году, Хогг [4] описал в деталях проблему того, как алгоритмы квантового поиска могут быть применены в ИИ. Но до этих пор, 10 лет спустя, очень мало существует успешных применений квантового поиска.

Литература

1. Душкин Р.В. Квантовые вычисления и функциональное программирование. Москва, 2014. 33 с.
2. Малыхина М.П., Герасимов Д.А. Симуляция квантовых вычислений. Краснодар: КГТУ, 2016. 9 с.
3. Сасскинд Л., Фридман А. Квантовая механика. Санкт-Петербург: Питер, 2015. С. 225-227.
4. Федотов И.Е. Модели параллельного программирования. Москва: Солон-Пресс, 2012. С. 182-183.
5. Флейгин О. Парадоксы квантового мира. Москва: Эксмо, 2012. С. 129 -131.
6. Дойч Д. Структура реальности. Наука параллельных вселенных. Москва: Альпина нон-фикшн, 2015. С. 114-117.
7. Reiffel, E., Polak, W. Quantum Computing: A Gentle Introduction. Cambridge, Massachusetts: TheMITpress, 2011. pp. 67-69.



8. Wichert, A. Principles of Quantum Artificial Intelligence. Hackensack: World Scientific Publishing Co, Pte. Ltd., 2014. pp. 77-78.
9. Кучма Н.А. Биокomпьютер в реальных процессах. Инженерный вестник Дона, 2013, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2129.
10. Филатов В.А., Козырь О.Ф. Модель поведения автономного сценария в задачах управления распределенными информационными ресурсами. Инженерный вестник Дона, 2013, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1771.

References

1. Dushkin R.V. Kvantovye vychislenija i funkcional'noe programmirovanie [Quantum Computing and Functional Programming]. Moskva, 2014. 33 p.
 2. Malyhina M.P., Gerasimov D.A. Simuljacija kvantovyh vychislenij [Simulation of Quantum Computations]. Krasnodar: KGTU, 2016. 9 p.
 3. Sasskind L., Fridman A. Kvantovajamehanika [Quantum Mechanics]. Sankt-Peterburg: Piter, 2015. pp. 225-227.
 4. Fedotov I.E. Modeli parallel'nogo programmirovaniija [Models of Parallel Programming]. Moskva: Solon-Press, 2012. pp. 182-183.
 5. Flejgin O. Paradoksy kvantovogo mira [Paradoxes of the Quantum World]. Moskva: Jeksmo, 2012. pp. 129 -131.
 6. Dojch D. Struktura real'nosti. Nauka parallel'nyh vseleennyh [The Structure of Reality. The Science of Parallel Universes]. Moskva: Al'pina non-fikshn, 2015. pp. 114-117.
 7. Reiffel, E., Polak, W. Quantum Computing: A Gentle Introduction. Cambridge, Massachusetts: The MIT press, 2011. pp. 67-69.
 8. Wichert, A. Principles of Quantum Artificial Intelligence. Hackensack: World Scientific Publishing Co, Pte. Ltd., 2014. pp. 77-78.
 9. Kuchma N.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2129.
-



10. Filatov V.A., Kozyr' O.F. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №3. URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1771.