Первая глава.

Современные компьютеры – и в теории(Машины Тьюринга), и на практике основаны на классической физике. Они ограничены, тем фактом, что система может быть только в одном состоянии. Используя современные знания в квантовой физике, можем предложить концепцию квантовой системы, которая может находится в суперпозиции нескольких различных состояний одновременно. Более того, территориально разделенные квантовые системы могут быть переплетены друг с другом и благодаря этому, операции перестают быть локальными.

Квантовые вычисления рассматривают вычислительные мощности и другие свойства компьютеров, спроектированные на основе принципов квантовой механики. Основная задача состоит в поиске квантовых алгоритмов, которые значительно быстрее любого классического алгоритма, решающего такую же проблему. Впервые формальная модель универсального квантового компьютера была предложена П. Бениоффом и развита Д. Дойчем.

Преимущества и слабости квантовых вычислений.

Важнейшим преимуществом квантовой системы является квантовый параллелизм – возможность регистра находиться одновременно во всех своих состояниях. Классический n-битный регистр может находиться только в одном состоянии, в то время как n-битный квантовый регистр находится сразу во всех 2N базисных состояниях. Для получения однозначного ответа для квантовых вычислений необходимо провести преобразование состояния таким образом, чтобы нужный ответ получил бы большую амплитуду, то есть проявился при измерении с большей вероятностью.

Слабости квантовых вычислений являются продолжением их сильных сторон: ответ можно получить, лишь в результате измерения, которое является вероятностным процессом и приводит к безвозвратной потере информации об амплитудах полученных базисных состояний. Кроме того, в классических алгоритмах можно прервать вычисления, если ответ уже получен. Квантовые алгоритмы всегда выполняются до конца, что также требует специальной организации. Еще одна особенность квантовых вычислений – обратимость используемых преобразований – не представляет проблемы, если нет ограничений на размер квантового регистра. Однако при довольно умеренных ограничениях вычислений многих функций оказывается затруднено, а соответствующие задачи в таких моделях с ограничениями могут иметь экспоненциальную сложность.

Перечислим 3 основных мотиваций изучения квантовых компьютеров:

1. Процесс миниатюризации, который сделал современные компьютеры мощными и дешевыми, практически достиг микро-уровней, на которых проявляются квантовые эффекты. Производители чипов склонны перейти к большим размерам чтобы подавить эти эффекты, но стоит попробовать сработаться с ними, открывая путь к дальнейшей миниатюризации.
2. Использование квантовых эффектов позволяет значительно ускорить некоторые вычисления и даже реализовать некоторые вещи, недоступные классическим компьютерам. Основная цель данной работы – демонстрация этих идей.
3. Одна из задач теории компьютерной науки звучит как «выявить возможности и ограничения самого допустимо-сильного вычислительного устройства, которое может позволить нам природа».

Когда же будет построен квантовый компьютер?

Первый 2х-кубитный компьютер был построен в 1997, а в 2001 5ти-кубитный компьютер успешно разложил число 15. На текущий момент, самый большой квантовый компьютер имеет несколько десятков кубит.

Хотя, уже доступны компьютеры с небольшим количеством кубит, практическая реализация более мощного квантового компьютера выглядит достаточно трудной задачей. Квантовая система всегда взаимодействует со своим окружением. Это взаимодействие влияет на состояние системы, вызывая потерю данных. Процесс влияния окружения на квантовую систему называется декогерированием. Проблема шумов и декогерирования в теории может быть решена с помощью квантового исправления ошибок и устойчивых алгоритмов вычисления, но эти проблемы все еще не решены на практике. Давид П. ДиВинцензо предложил список необходимых условий(критерии ДиВинцензо) для идентификации системы как квантового компьютера. (DiVincenzo, David P. (2000-04-13). "The Physical Implementation of Quantum Computation").

Критерии ДиВинцензо:

1. Масштабируемая физическая система с четко выраженными кубитами. Нам необходим квантовый регистр из кубитов для хранения информации, так же как и классическому компьютеру требуется память. Самый простой способ физически реализовать кубит – использовать 2х уровневую квантовую систему. Для примера, электрон или фотон могут быть кубитами.
2. Возможность инициализировать состояние кубитов как начальное |00…0>
3. Время на декогерирование значительно длиннее, чем время на простейшую операцию.
4. Универсальный набор квантовых вентилей
5. Возможность измерения кубитов
6. Возможность

Квантовое состояние представляет собой суперпозицию классических состояний, которые можно измерить или применить унитарную операцию. Представим, что некая физическая система, которая может быть в N различных классических состояний. Назовем эти состояния |1>, |2>, …,|N>. Грубо говоря, под классическим понимается состояние, в котором система может быть измерена. Квантовое состояние |φ> это суперпозиция классических состояний: |φ> = α1|1> + α2|2> + · · · + αN|N>, где αi – комплексное число. Таким образом, можно сказать, что система в квантовом состоянии находится во всех классических состояниях одновременно. Говоря математическим языком, состояние |1>, . . . , |N> формирует ортонормальный базис N-размерного Гильбертова пространства, в котором квантовое состояние |φ> является вектором. С квантовым состоянием можно проводить 2 операции: измерить и изменить унитарно, без измерения.

Как мы уже выяснили, информация может быть закодирована и использована на основе принципов квантовой механики. Задача обработки квантовой информации состоит в решении определенного класса проблем, которых не могут решить классические компьютеры за приемлемое время.

Кубиты и квантовая память

В классических вычислениях единицей информации является бит, которые может быть 0 или 1. В квантовых вычислениях используются квантовые биты(кубиты), которые могут быть в суперпозиции 0 и 1. Рассмотрим систему, которая может быть в двух базовых состояниях, назовем их |0> и |1>. Будем идентифицировать эти состояния как векторы (1, 0) и (0, 1) соответственно. Представим кубит как α0|0> + α1|1>, |α0|^2+ |α1|^2= 1. Квантовому компьютеру необходимо как минимум 10^2 – 10^3 кубит, для выполнения алгоритмов, более эффективных, чем их классические аналоги.

Вторая глава

Измерение по вычислительному базису Measurement in the computational basis

Допустим, мы измеряем состояние |φ>, в таком случае, мы увидим только одно классическое состояние |j>. Конкретное |j> неизвестно заранее, оно проявится с вероятностью |αj|^2, что представляет собой квадратичную норму соответствующей частоты aj (|a + ib| =√a2+ b2). При этом, после измерения квантовое состояние |φ> пропадает и остается классическое состояние |j>. Другими словами, измерение |φ> разрушает квантовую суперпозицию |φ> до классического состояния |j>, а вся остальная информация из αi пропадает.

Унитарные преобразования.

Вместо измерения |φ>, также можно применить к нему некоторый оператор, то есть поменять состояние на |ψ> = β1|1> + β2|2> + · · · + βN|N>. Квантовая механика допускает применение к квантовым состояниям только линейных операторов. Это значит, что если мы рассматриваем состояние |φ> как N-мерный вектор (α1, . . . , αN)^T, то применение оператора, изменяющего |φ> на |ψ> соответствует умножению |φ> на NxN комплексную матрицу U://формула

Ранние алгоритмы.

Два наиболее крупных достижения квантовых алгоритмов — это алгоритм Шора для факторизации числа и алгоритм поиска Гровера. Для начала, опишем некоторые идеи, предшествующие им. Все квантовые алгоритмы работают с очередями в той или иной форме. Представим N-битный ввод x = (x0,…,xn-1) ∈ {0, 1}^N. Обычно мы имеем N=2^n, поэтому мы можем получить доступ к биту xi, используя n-битный индекс i. В данном случае ввод можно представить как N-битную память, в которой мы можем получить доступ к любому элементу по его индексу. Представим в виде квантовой операции Ox: |i, 0> → |i, xi>. Первые n кубитов в состоянии также называются адресными кубитами или адресными регистрами, в то время как следующий n+1 кубит называется целевым кубитом.