Грант РФФИ № 20-07-00916

Руководитель: Пуховский Валерий Николаевич, к.т.н., доцент

Тема проекта: Исследование и разработка принципов построения системы моделирования квантовых вычислений со встроенной аппаратной поддержкой

В настоящее время активно развивается теория квантовых вычислений. Несмотря на то, что квантовое вычислительное устройство обладает некоторыми особенностями, любая задача, предназначенная для классической ЭВМ, можно воспроизвести и на квантовой системе. Целью исследования является разработка методики для построения моделей квантовых систем с помощью симуляторов, используя аппаратные средства. Предметом исследования являются методы построения квантовых вычислительных устройств и систем. В процессе исследования использовались методы системного анализа и компьютерного моделирования, методы объектно-ориентированного проектирования. В решении задач построения модульной квантовых системы с архитектурой открытого типа были использованы современные языки высокого уровня. Разработана и промоделирована работа квантовой микроархитектуры с использованием алгоритма оптимизации квантового вычислительного процесса. Выведена универсальная методология моделирования алгоритмов квантовой природы при помощи использования аппаратного ядра и требований к взаимной работе программной и аппаратной составляющих для эффективной работы квантовой системы.

Квантовый ускоритель основан на идее, что любое конечное приложение содержит несколько вычислительных ядер, и свойства этих частей лучше выполняются с помощью конкретного ускорителя, который может быть, как показано на рис. 1, либо программируемыми вентильными матрицами (FPGA), либо графическими процессорами (GPU), нейронными процессорами (NPU), такими как тензорный процессор Google (TPU) и т. д.

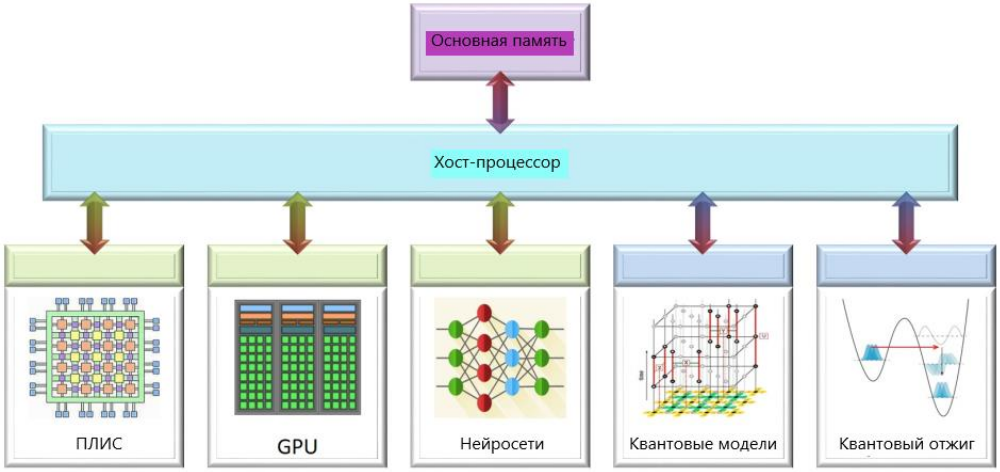

Рис. 1. Архитектура системы с гетерогенными ускорителями

Алгоритм оптимизации, исключающий тензорное произведение при моделировании

Следующий алгоритм (рис. 2) имеет место применения в программных ядрах различных т Матрица состоит из огромного числа элементов-нулей, не несущих информационной нагрузки. Основной задачей предложенного метода является вывод матрицы 2x2 в рамках однокубитового вентиля перемножения ее и вектора квантового состояния с помощью определенной последовательности шагов. Пусть имеем 3 квантовых бита, тогда описанная выше последовательность будет соответствовать приведенной на рис. 2. За отсутствием оптимизации необходимо произвести единственное взаимное взаимодействие с

регистрами за время $O(2^{4n}+2^{3n})$ и использовать $O(2^{2n}+2^{n})$ ячейками, n – количество кубитов. При использовании оптимизации набор операций будет соизмеримым с $O(2^{n-1})$, а объем памяти будет составлять $O(2^{n})$.

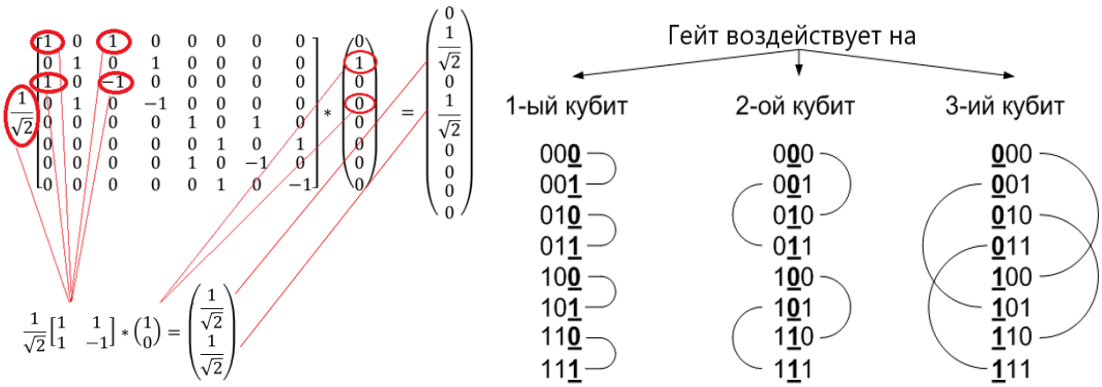

Рис. 2. Алгоритма оптимизации; порядок выбора квантового состояния по номеру квантового бита

Представим алгоритм, позволяющий увеличивать производительность квантового вычислительного устройства для операций с квантовыми битами (рис. 3).

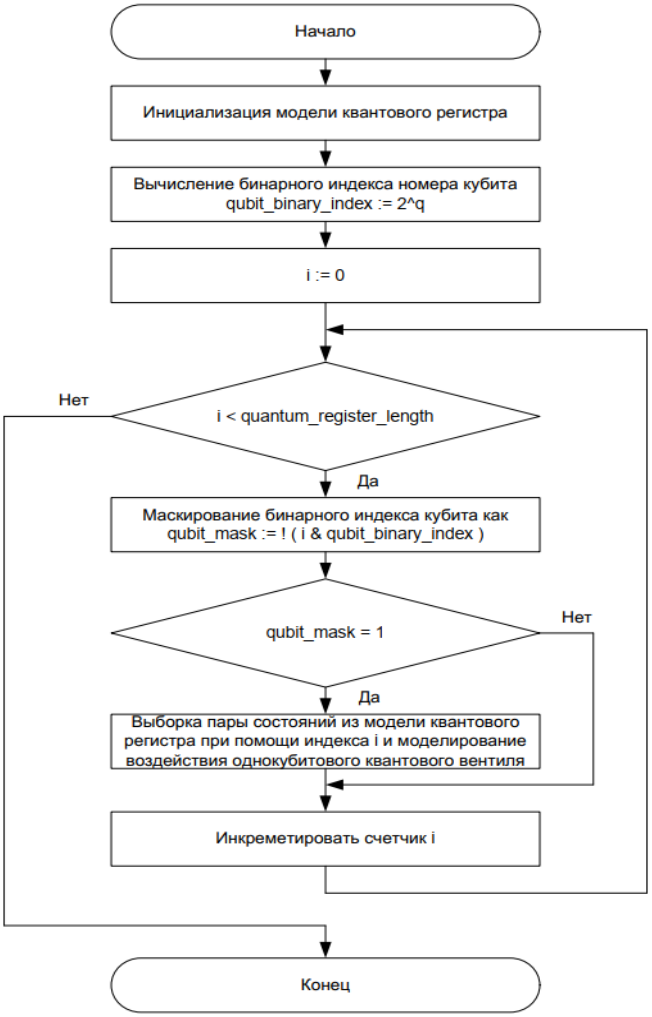

Рис. 3. Блок-схема оптимизационного алгоритма взаимодействия с однокубитовыми вентилями

В первую очередь выполняется инициализация квантового регистра, то есть происходит установка амплитуды (Amp = 1) для любого состояния регистра. Далее вычисляется бинарный индекс квантового бита, представляющего числовое значение с

установлением единицы в разряде, который соответствует порядковому номеру квантового бита, с которым производится взаимодействие. После циклично выполняется перебор состояний квантового регистра, а также вывод пары состояний, осуществляющей работу с вентилем. Для верного вывода применяется переменная маска, фильтрующая набор индексов состояния для соблюдения последовательности получения пар состояний. Алгоритм оканчивается после перебора всех квантовых состояний.

Полученные в ходе выполнения Проекта важнейшие результаты

За отчетный период были получены следующие научные результаты:

1. Разработана модель ускорителя с применением языка описания аппаратуры;

Были выполнены исследования, которые позволили разработать модель ускорителя с применением языка описания аппаратуры, благодаря своевременному анализу существующих моделей квантового компьютера и алгоритмов оптимизации данного класса моделей. А также создан ускоритель моделирования квантовых вычислений на ПЛИС для проведения исследований квантовых явлений и процессов. Создан интерфейс взаимодействия ускорителя с ПК, а также программы драйвера ускорителя и графической оболочки для отображения данных, полученных при вычислениях, что позволяет моделировать квантовые вычисления при помощи аппаратного ускорителя.

2. Создан интерфейс взаимодействия ускорителя с ПК и программы драйвера ускорителя, а также графической оболочки для отображения данных, полученных при вычислениях. Созданный интерфейс взаимодействия ускорителя с ПК, а также программы драйвера ускорителя и графической оболочки для отображения данных, полученных при вычислениях, позволяет моделировать квантовые вычисления при помощи аппаратного ускорителя. Данный процесс с точки зрения практического исследования и наблюдения закономерностей будет способствовать в разработке методики моделирования квантовых вычислений при помощи аппаратного ускорителя. Отдельным пунктом работ в рамках Проекта являлось исследование и разработка методики синтеза аппаратного ускорителя на основе алгоритмов оптимизации.

3. Разработана методика синтеза аппаратного ускорителя на основе алгоритмов оптимизации. Создана модель ускорителя при помощи языка описания аппаратуры (вычислительная система и программное обеспечение). Синтезирован ускоритель с использованием ПЛИС технологий. Определенное внимание было уделено взаимодействию ускорителя для моделирования квантовых вычислений с персональным компьютером. Также создана собственная методика синтеза аппаратного ускорителя на основе алгоритмов оптимизации, которые были предложены ранее в программных симуляторах, и их адаптация для аппаратной реализации.

Библиографический список публикаций по Проекту за 2021 год

1. Гушанский С.М., Божич В.И., Потапов В.С. Разработка метода оптимизации и распараллеливания вычислительного процесса в рамках квантовых ускорителей // Известия ЮФУ. Технические науки. 2021. № 3(220).
2. Потапов В. С., Гушанский С. М. Разработка и моделирование работы квантовой микроархитектуры с использованием алгоритма оптимизации квантового вычислительного процесса // Вестник СибГУТИ. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ , 2021. № 4. – С.76-83.
3. Гушанский С.М., Потапов В.С. Исследование стека квантовых ускорителей и разработка алгоритма оптимизации // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении «КомТех-2021»: материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием : в 2 т. / Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2021, Том 1. – С.88-99.

4. Мушаев А.Я. Эмуляция квантовых схем с использованием ПЛИС // Сборник статей VII Всероссийской научно-технической конференции 5–11 апреля 2021года «Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности». – Таганрог, 2021. – С.353-357.
5. (Принято к печати) Пуховский В.Н.? Гушанский С.М., Потапов В.С. Developing a Hardware Approach to Simulating Quantum Computing Using an Optimization Algorithm // 25th Pan-Hellenic Conference on Informatics 2021 .– ACM's International Conference Proceedings Series (ICPS)
6. (Принято к печати) Потапов В.С. Исследование и разработка функциональной схемы цифрового кубита на ПЛИС и квантового сопроцессора// Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2021)
7. (Принято к печати) Гушанский С.М., В.Н. Пуховский, Потапов В.С. Реализация вероятностного декодера глубокой нейронной сети для кодов стабилизатора// Известия ЮФУ. Технические науки
8. (Принято к печати) Гушанский С.М., Потапов В.С. Разработка и исследование методики построения вычислительной квантовой системы с использованием аппаратных средств оптимизации// Журнал «Информационные технологии и вычислительные системы»