

ТЕЛЕПОРТАЦИЯ БЕЛЛОВСКИХ СОСТОЯНИЙ, ВЫПОЛНЕННАЯ НА ПЯТИКУБИТНОМ КВАНТОВОМ КОМПЬЮТЕРЕ ФИРМЫ ИВМ

В. П. Гердт^{а, б, 1}, Е. А. Коткова^{а, б, 2}, В. В. Воробьев^{а, б, 3}

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

В данной работе мы представим и сравним, посредством вычислительных экспериментов, две различные реализации одного из протоколов телепортации двухкубитных состояний. Наша первая реализация использует квантовый компьютер IBM Q, доступ к которому осуществляется через облачную платформу IBM Q Experience и программное обеспечение с открытым кодом Qiskit, которое образует виртуальный интерфейс для квантового компьютера. Другая наша реализация использует Feynman, классический симулятор квантовых вычислений, написанный на языке пользователя системы компьютерной алгебры Maple. Наши эксперименты с пятикубитным оборудованием в IBM Q Experience показывают, что накопление ошибок, вызванное искажением квантовых состояний в процессе вычисления, требует использования квантовых кодов, исправляющих ошибки, или технологического усовершенствования квантового оборудования, уменьшающего ошибки.

In this paper we present and compare via the computational experiments two distinct implementations of one of the two-qubit teleportation protocols. Our first implementation is done on the real IBM Q quantum computer available for use through IBM Q Experience online platform and open source quantum software development kit Qiskit, which offers a virtual interface for a quantum computer. Our second implementation uses Feynman, the classical simulator of quantum computation written in the user's language of computer algebra system Maple. Our experience with IBM Q Experience shows that the errors caused by distortion of quantum states in the course of computation require quantum error correction or technological improvement of quantum hardware to decrease errors.

PACS: 03.67.Bg; 03.67.Lx; 03.65.Ud

ВВЕДЕНИЕ

Квантовые вычисления и квантовая информатика являются многообещающими направлениями информационных технологий. Инициированные Ричардом Фейнманом [1] эти направления в последние годы развиваются со скоростью, позволяющей рассчитывать на то, что уже в ближайшие годы они приведут к решению ряда важных задач, являющихся «неподъемными» для классических компьютеров (квантовое превосходство). К таким за-

¹E-mail: gerdt@jinr.ru

²E-mail: ekaterina.a.kotkova@gmail.com

³E-mail: rus.vlavor@yandex.ru

дачам относится, например, целочисленная факторизация (разложение целого числа на простые множители), на трудности выполнения которой классическими компьютерами основаны наиболее распространенные криптосистемы (защита информации). Другая важная задача — это моделирование многочастичных квантовых систем, которое недоступно классическим компьютерам. Наряду с мировыми ИТ-гигантами Google, IBM, Intel, Microsoft и другими крупными компаниями (NASA, Huawei и др.), в гонку за создание квантового оборудования и его программного обеспечения (см. недавние обзорные работы [2, 3] и их библиографию), которые позволили бы добиться превосходства над современными суперкомпьютерами в решении, по крайней мере, одной конкретной вычислительной задачи, включилась созданная в 2013 г. небольшая, но успешная, фирма Rigetti (<https://www.rigetti.com/>), а для информационного обеспечения работ по данному направлению создана консалтинговая фирма IQT Research (<https://www.insidequantumtechnology.com/future-quantum-supremacy/>).

Все существующие на сегодняшний день квантовые компьютеры можно разбить на три группы: а) компьютеры универсального назначения, основанные на схемной модели квантового компьютеринга [4]; б) аналоговые квантовые компьютеры, позволяющие моделировать физические квантовые системы с помощью их имитации другими квантовыми системами (см. [5]); в) адиабатические квантовые компьютеры [6], реализующие квантовый отжиг и предназначенные для решения оптимизационных задач, важных, в частности, для (глубокого) машинного обучения.

Для квантовых компьютеров универсального типа вычисление состоит в преобразовании начального состояния квантового регистра — типично классического (битовой строки) — в конечное (определяемое рассматриваемой вычислительной задачей) путем воздействия на кубиты регистра малокубитными, т. е. одно-, двух- или трехкубитными, гейтами. После завершения требуемого вычисления производится считывание искомой информации из конечного состояния регистра (измерение). При этом вычислительная производительность квантового компьютера определяется не только количеством кубитов регистра, но и уровнем искажений (ошибок) промежуточных состояний квантового регистра, вносимых «шумящими» гейтами, и декогеренцией (разрушением суперпозиции). Существенное нарастание ошибок с ростом числа используемых гейтов и/или числа кубитов квантового регистра является серьезным препятствием на пути создания полномасштабных квантовых компьютеров.

В 2016 г. фирма IBM начала, на безвозмездной основе, предоставлять сторонним пользователям доступ через облако (IBM Cloud) к своим пятикубитным процессорам, созданным на основе сверхпроводящих кубитов и позволяющим, благодаря дружественному интерфейсу пользователя Qiskit (Quantum Information Science kit), проводить вычислительные эксперименты на реальном квантовом оборудовании. Через год после этого был открыт доступ к 14-кубитному процессору (IBM Q Melbourne). По информации из IBM, уже сотни тысяч пользователей воспользовались этой возможностью. В архиве (<https://arxiv.org/>) выложены десятки работ с результатами проделанных вычислений для решения различных задач. И во всех них выявляются заметные ошибки при выполнении квантовых вычислений. По этой причине требуется использование корректирующих кодов и/или технологические усовершенствования.

Для оценки производительности квантовых компьютеров, с учетом получающихся ошибок, в фирме IBM предложена количественная мера полезной производительности, т. е. такой, которая позволяет получить полезную информацию о вычисляемой величине,

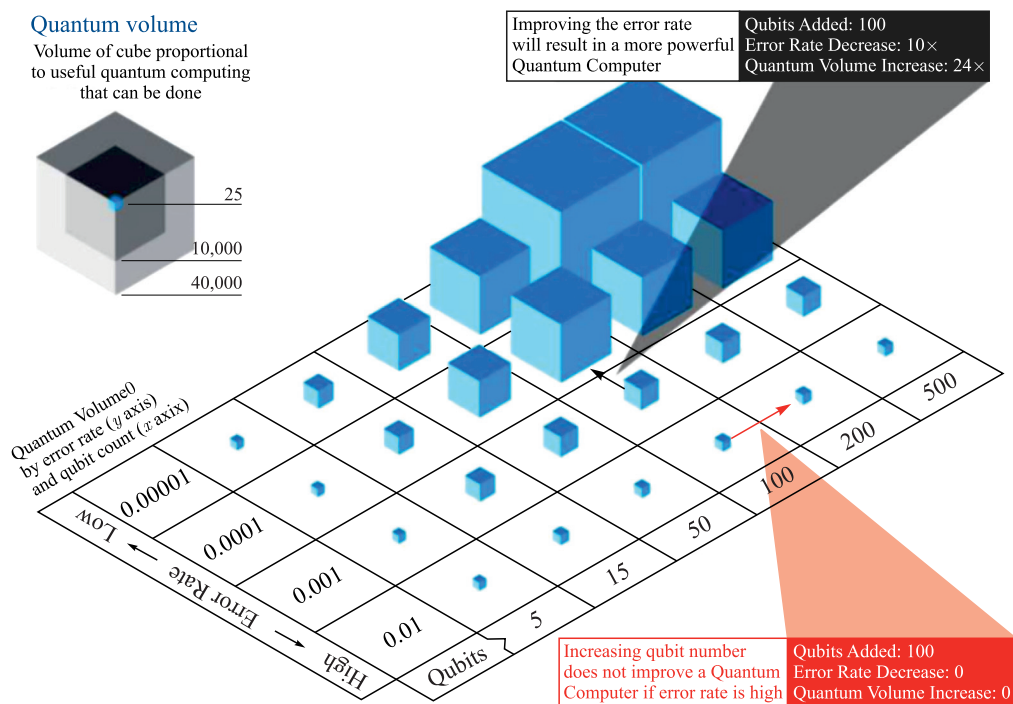


Рис. 1. Квантовый объем. 5-кубитные квантовые процессоры IBM Q и Qiskit

несмотря на присутствие ошибок. Эта мера называется квантовым объемом и зависит как от числа (полноценно) работающих кубитов, так и от величины получающихся ошибок. Идея этой меры показана на рис. 1.

В настоящей работе мы рассматриваем результаты моделирования двухкубитной квантовой телепортации белловских (или ЕПР) состояний, осуществляемой по протоколу, предложенному в работе [7]. Для этой цели нам достаточно любого из 5-кубитных процессоров IBM Q Tenerife и IBM Q Yorktown. А для сопоставления полученных результатов с результатами «идеального» квантового компьютера мы использовали в качестве последнего симулятор квантовых вычислений Feynman [8–12], являющийся пакетом программ на языке пользователя системы компьютерной алгебры Maple и предназначенный для моделирования квантовых вычислений и квантовых информационных процессов.

В квантовых компьютерах фирмы IBM (<https://www.research.ibm.com/ibm-q/>) используются сверхпроводящие кубиты — трансмоны¹. На рис. 2 показаны основные характеристики кубитов, входящих в 5-кубитные чипы IBM Q Tenerife и IBM Q Yorktown. Управление кубитами осуществляется микроволновыми импульсами, частота которых указана в первой строчке числовой таблицы. T1 и T2 характеризуют скорость, с которой происходит декогеренция состояний кубитов. T1 характеризует скорость потерь

¹<https://www.research.ibm.com/ibm-q/learn/what-is-ibm-q/>

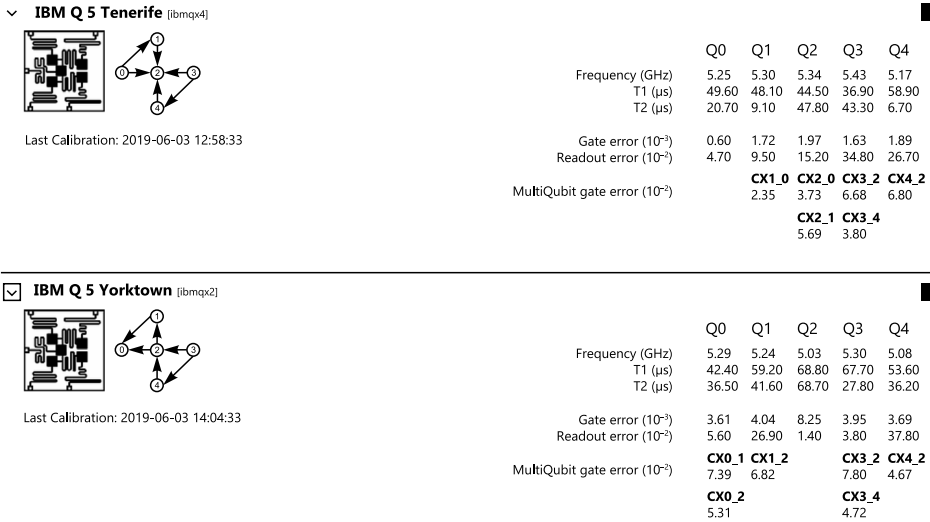


Рис. 2. 5-кубитные процессоры IBM Q

энергии кубитов из-за их взаимодействия с окружающим процессор оборудованием. При этом потери энергии приводят к изменению частоты. T2 характеризует скорость фазовых изменений у кубитов из-за взаимодействия с оборудованием. Следующие две строки показывают долю ошибок, возникающих из-за неточной работы однокубитных гейтов, действующих на кубиты при квантовом вычислении, и гейтов измерения (считывания информации). Нижние строки таблицы показывают величину ошибки двухкубитных гейтов — гейтов управления, которые обозначены в таблице в виде CX i _ j , где i — управляющий кубит, а j — управляемый. Порядок ошибок однокубитных гейтов — 10^{-3} , а для двухкубитных гейтов и гейтов измерения — 10^{-2} .

Взаимосвязи между кубитами, в смысле возможности составления из них двухкубитных гейтов, в которых один гейт является управляющим, а другой — управляемым, показаны на рис. 3. Каждая стрелка, исходящая из кубита, показывает, что он может быть управляющим, и указывает на кубит, который может быть управляемым. Чтобы квантовый компьютер был полноценным, необходимо восполнить отсутствующие междукубитные связи с помощью дополнительных гейтов. Мы делаем это ниже.

Квантовые компьютеры IBM Q могут быть доступны через облако (IBM cloud), как это сделано для их 5-кубитных и 14-кубитных версий, а подготовка заданий для них делается через удобный интерфейс пользователя облачной платформы IBM Q Experience

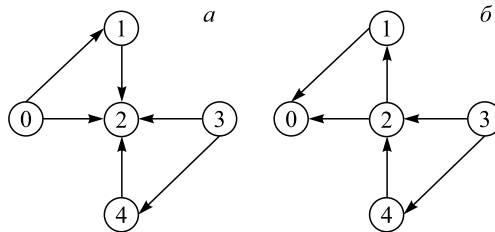


Рис. 3. Схемы связей кубитов в чипах IBM Yorktown (a) и IBM Tenerife (б)

либо при помощи установленного на компьютер фреймворка Qiskit, создающего среду квантового программирования с открытым исходным кодом.

Qiskit позволяет исследователям, преподавателям, разработчикам и энтузиастам начать работу с квантовым программированием. При этом, по желанию пользователя, в начале своей работы он может выбрать конкретное квантовое оборудование, например, IBM Q Tenerife. Если пользователь знает квантовую схему решения его задачи, состоящую из начального набора кубитов и последовательно действующих на них гейтов, то он может легко построить эту схему с помощью специального интерфейса Composer. Этот интерфейс предлагает пользователю начать построение схемы, выбрав нужное число кубитов и затем скомпоновать схему, выбирая последовательно элементы интерактивно доступной базы встроенных гейтов, выведенной на экран монитора пользователя, подводя курсор к нужному гейту, захватывая его и помещая на нужное место в схеме.

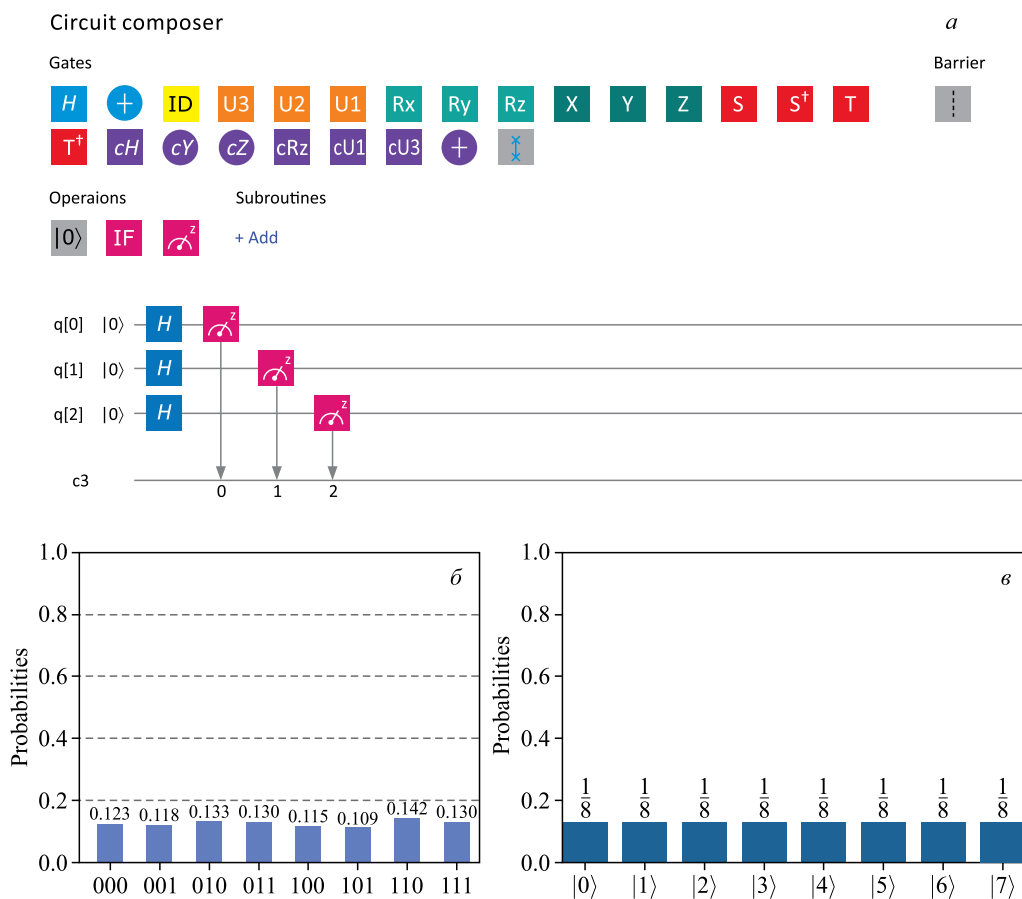


Рис. 4. Равновесная суперпозиция трех кубитов. а) Схема в интерфейсе Composer платформы IBM Q Experience; б) реализация на квантовом компьютере IBM Q Yorktown; в) в симуляторе Feynman

Таблица 1. Гейты, реализованные в IBM Q

Однокубитные гейты	Двух- и трехкубитные гейты
$U1(\lambda) = U(0, 0, \lambda) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\lambda} \end{pmatrix}$	$CNOT = cX = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$
$U2(\phi, \lambda) = U(\pi/2, \phi, \lambda) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & -e^{i\lambda} \\ e^{i\phi} & e^{i(\phi+\lambda)} \end{pmatrix}$	$cY = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & i & 0 \end{pmatrix}$
$U3(\theta, \phi, \lambda) = U(\theta, \phi, \lambda) = \begin{pmatrix} \cos \theta/2 & -e^{i\lambda} \sin \theta/2 \\ e^{i\phi} \sin \theta/2 & e^{i(\phi+\lambda)} \cos \theta/2 \end{pmatrix}$	$cZ = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$
$ID = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$	$cH = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 0 & 0 & 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \end{pmatrix}$
$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$	$cRz(\lambda) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-i\lambda/2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{i\lambda/2} \end{pmatrix}$
$X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$	$cU1(\lambda) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{i\lambda} \end{pmatrix}$
$Y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$	$cU3(\theta, \phi, \lambda) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \exp\left(-\frac{i(\phi+\lambda)}{2}\right) \cos \frac{\theta}{2} & -\exp\left(-\frac{i(\phi-\lambda)}{2}\right) \sin \frac{\theta}{2} \\ 0 & 0 & \exp\left(\frac{i(\phi-\lambda)}{2}\right) \sin \frac{\theta}{2} & \exp\left(\frac{i(\phi+\lambda)}{2}\right) \cos \frac{\theta}{2} \end{pmatrix}$
$Z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$	$SWAP = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

Продолжение табл. 1

Однокубитные гейты	Двух- и трехкубитные гейты
$Rx(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta/2) & -i \sin(\theta/2) \\ -i \sin(\theta/2) & \cos(\theta/2) \end{pmatrix}$	$ccX = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$
$Ry(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta/2) & -\sin(\theta/2) \\ \sin(\theta/2) & \cos(\theta/2) \end{pmatrix}$	
$Rz(\phi) = \begin{pmatrix} e^{-i\phi/2} & 0 \\ 0 & e^{i\phi/2} \end{pmatrix}$	
$S = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix}$	
$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\pi/4} \end{pmatrix}$	

В качестве примера рассмотрим построение с помощью Composer (и для сравнения), с использованием симулятора квантовых вычислений Feynman [8–12], равновесной 3-кубитной суперпозиции и с последующим измерением ее кубитов. Такая суперпозиция получается действием гейта Адамара H в классическом базисе [4]

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}, \quad |0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix},$$

на каждый из кубитов классического трехкубитного состояния $|000\rangle$ в соответствии с формулой $H|0\rangle = 1/\sqrt{2}(|0\rangle + |1\rangle)$:

$$H^{3\otimes} |000\rangle = \frac{1}{2\sqrt{2}} \{ |000\rangle + |001\rangle + |010\rangle + |011\rangle + |100\rangle + |101\rangle + |110\rangle + |111\rangle \}. \quad (1)$$

После помещения трех гейтов Адамара, на каждый кубит по одному, на рис. 4 мы показываем квантовую схему для выражения (1) (рис. 4, а) и его вычисления на квантовом компьютере IBM Q Yorktown (рис. 4, б) и симуляторе Feynman (рис. 4, в). Результаты, полученные на этом симуляторе, могут рассматриваться как полученные на «идеальном» квантовом компьютере. Мы видим, что квантовый компьютер вычисляет правую часть формулы (1) с численными ошибками — результат неточности действия гейтов Адамара и измерения (readout), как указано на рис. 2, а также, возможно, и декогеренции. В то же время симулятор Feynman выдает точную форму равновесной суперпозиции.

В табл. 1 мы показываем все гейты, которые реализованы в компьютере IBM Q Yorktown. Эти гейты образуют расширенную версию универсального набора гейтов, который (в случае идеальных гейтов) с любой заданной наперед точностью позволяет реализовать на квантовом компьютере любую унитарную матрицу. Стандартный универсальный

набор гейтов включает однокубитные гейты: Адамара H , фазовый S , $\pi/8$ -гейт T и двухкубитный гейт $CNOT \equiv cX$ (см. [4, гл. 2]).

В работе [7] был предложен протокол квантовой телепортации двухкубитных белловских состояний, использующий максимально запутанное трехкубитное состояние Гринберга–Хорна–Цайлингера $|GHZ\rangle$ [13]

$$|GHZ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|000\rangle + |111\rangle). \tag{2}$$

Квантовая схема протокола представлена на рис. 5. Она сконпонована из гейтов двух типов: однокубитного гейта Адамара и двухкубитного гейта $CNOT(cX)$. При этом если $\alpha = \pm\beta$ с $\alpha = 1/\sqrt{2}$ и входное значение второго кубита сверху равно $|0\rangle$ или $|1\rangle$, то на выходе схемы два ее самых нижних кубита будут содержать одно из состояний Белла (ЕПР). На рис. 6 показана генерация белловских состояний в схемной модели.

Теперь представим диаграмму связей между кубитами в схеме алгоритма квантовой телепортации с указанием направления связей, их кратности, а также того, над какими кубитами производится измерение (рис. 7). Заметим, что в схемах квантовых компьютеров IBM Q Yorktown и IBM Q Tenerife (см. рис. 3) имеются не все необходимые двухкубитные связи. Поэтому для реализации гейтов cX между несвязанными физически кубитами была использована комбинация из 4 гейтов cX (см. рис. 8, а). Также для изменения на-

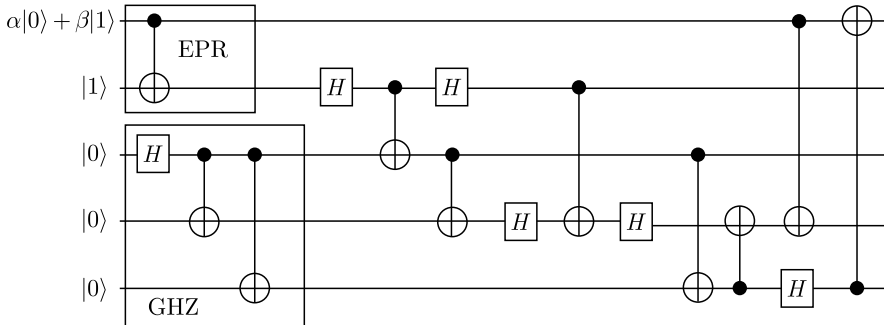


Рис. 5. Схема двухкубитной телепортации из [7]. Реализация протокола двухкубитной телепортации на IBM Q

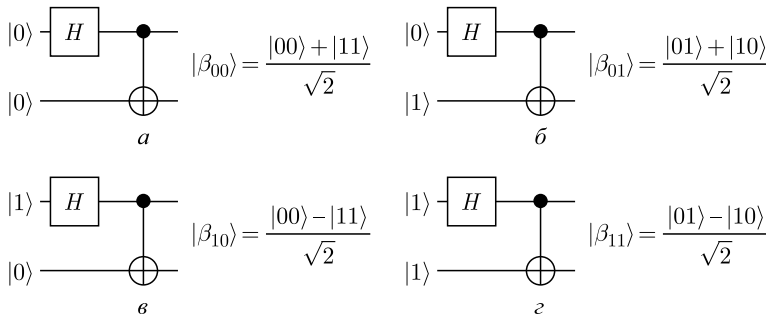


Рис. 6. Генерация состояний Белла [14, с. 497]

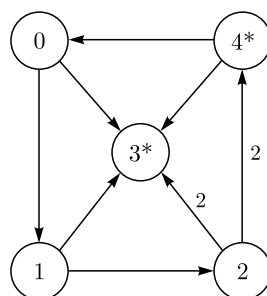


Рис. 7. Схема связей между кубитами в алгоритме квантовой телепортации с указанием кратности связей, * обозначены кубиты, для которых производится измерение

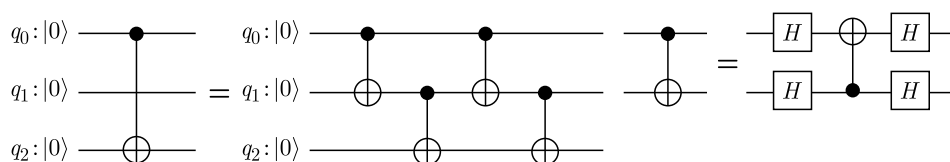


Рис. 8. а) Схема cX между несвязанными физически кубитами; б) изменение направления cX

правления связи между кубитами там, где это необходимо, была использована схема с введением дополнительных гейтов Адамара, представленная на рис. 8, б.

Сравнив схемы квантовых компьютеров (см. рис. 3) со схемой связей между кубитами схемы квантовой телепортации (рис. 5), можно видеть, что, во-первых, кубиту 3 квантовой схемы необходимо поставить в соответствие кубит 2 квантового компьютера, а во-вторых, для реализации какой-то из двух пар связей схемы: либо 0–1 и 2–4, либо 4–0 и 1–2 — требуется использование схемы на рис. 8, а. Поскольку каждый гейт вносит ошибку, следует, насколько это возможно, минимизировать количество гейтов. Так как кратность связи 2–4 схемы (в смысле числа гейтов cX между ними) равна 2, а у всех остальных вышеперечисленных связей кратность 1, при реализации необходимо кубитам 2 и 4 схемы поставить в соответствие кубиты квантового компьютера, физически связанные между собой.

Учитывая описанные выше ограничения, получим, что паре кубитов 2 и 4 исходной схемы соответствует либо пара кубитов 0 и 1 компьютера, либо пара 3 и 4. Поскольку производится измерение кубита 4 схемы, ему должен соответствовать кубит, ошибка измерения для которого небольшая. Также при возможности стоит отдать предпочтение той реализации, в которой чаще всего встречающиеся двухкубитные гейты имеют минимально возможный размер ошибок.

Таблица 2. Соответствие нумерации кубитов в исходной схеме телепортации и в реализациях на чипе IBM Q Yorktown

Исходная схема	Схема 1	Схема 2	Схема 3
0	0	0	3
1	1	1	4
2	3	4	1
3	2	2	2
4	4	3	0

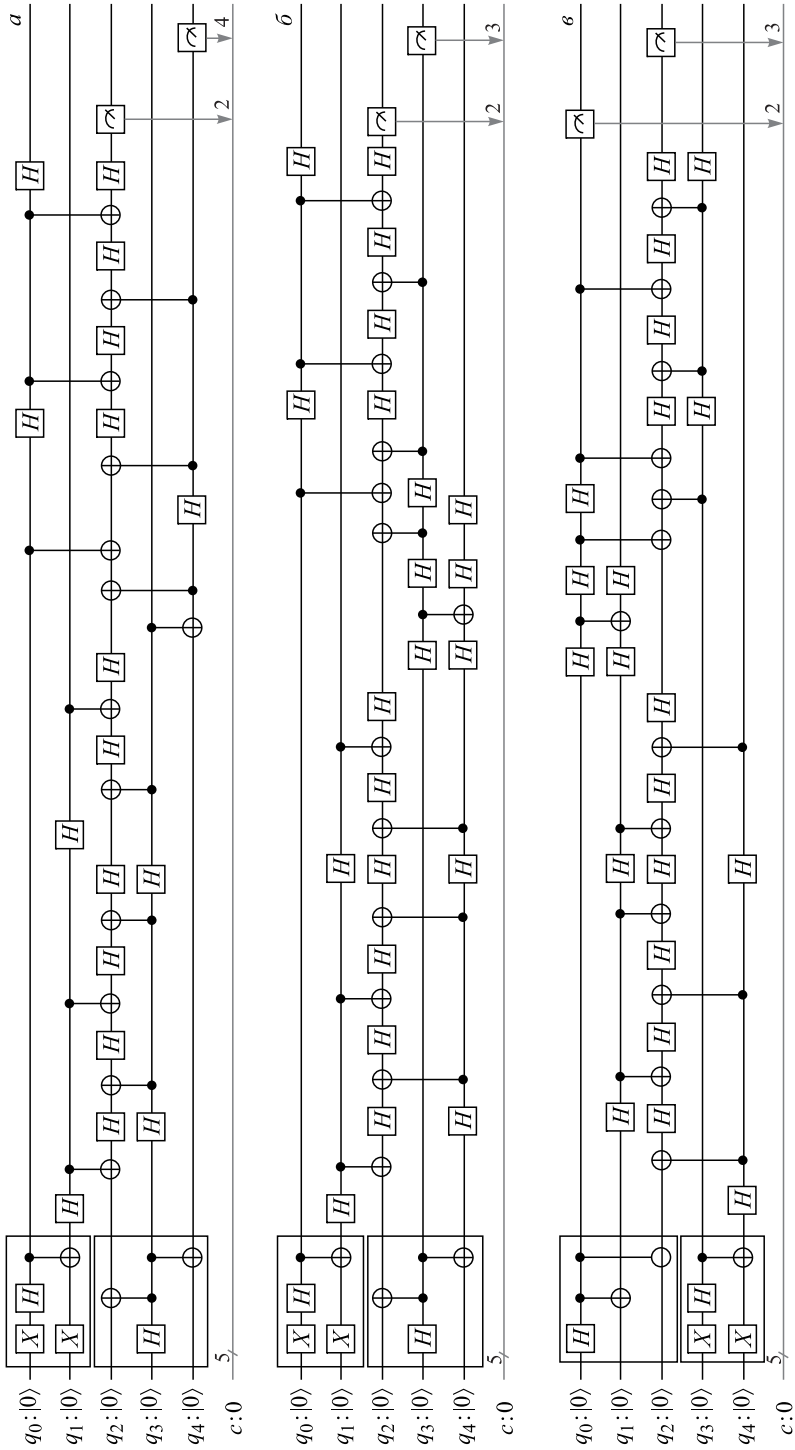


Рис. 9. Реализации квантовой телепортации состояния $|\beta_{11}\rangle$ на IBM Q Yorktown: а) схема 1; б) схема 2; г) схема 3

В зависимости от выбора кубитов получилось три варианта схемы квантовой телепортации на квантовом компьютере IBM Q Yorktown (табл. 2, нумерация кубитов сверху вниз), наиболее удовлетворяющих данным требованиям на момент их создания (рис. 9).

Необходимо сделать замечание относительно схем 2 и 3. В исходной квантовой схеме (см. рис. 7) в начале три нижних кубита переводятся в состояние формулы (2). Для сокращения числа использованных гейтов в схемах 2 и 3 сначала кубиты, соответствующие трем нижним кубитам, переводятся в данное состояние наиболее эффективным образом, а затем остальная часть схемы реализуется в соответствии с упорядочиванием кубитов из табл. 2.

Также была сделана реализация на квантовом компьютере IBM Q Tenerife. Несмотря на то, что порядок кубитов в ней (табл. 3) аналогичен порядку для схемы 3 квантового чипа IBM Q Yorktown, она имеет меньшую глубину, чем схема 3 IBM Q Yorktown за счет более подходящих направлений физических связей между кубитами компьютера.

Таблица 3. Соответствие нумерации кубитов в исходной схеме алгоритма и в реализации на чипе IBM Q Tenerife

Исходная схема	Схема на IBM Q Tenerife
0	3
1	4
2	1
3	2
4	0

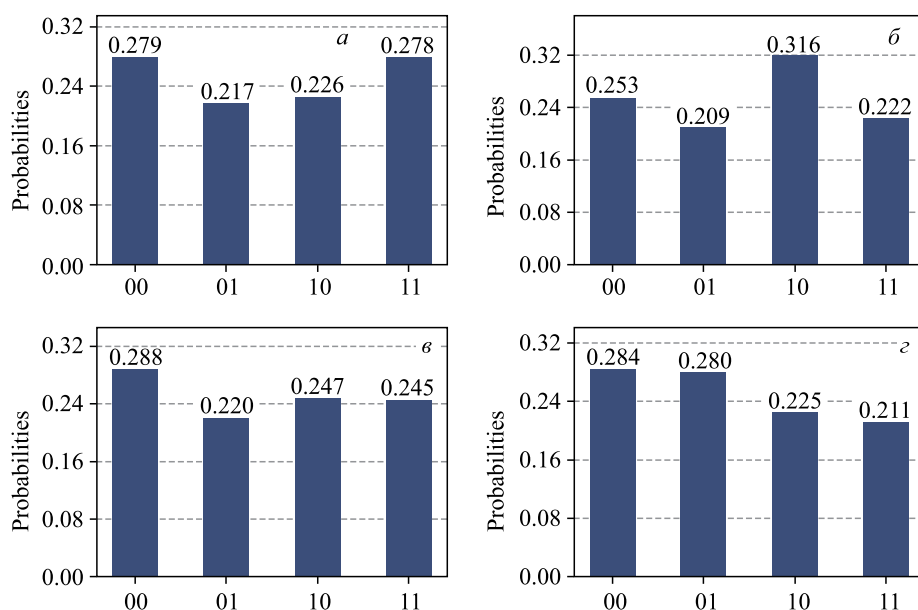


Рис. 10. Результаты квантовой телепортации состояний Белла на IBM Q Tenerife с измерением в классическом базисе. а) Состояние $|\beta_{00}\rangle$; б) состояние $|\beta_{01}\rangle$; в) состояние $|\beta_{10}\rangle$; г) состояние $|\beta_{11}\rangle$

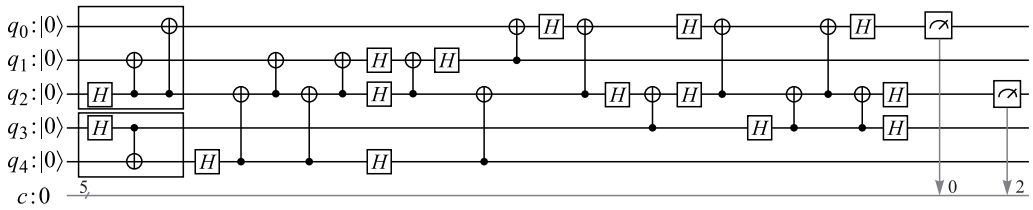


Рис. 11. Схема квантовой телепортации состояния Белла $|\beta_{00}\rangle$ на компьютере IBM Q Tenerife

Результаты данной реализации квантовой телепортации белловских состояний на IBM Q Tenerife показаны на рис. 10. Из него можно видеть, что только для состояния $|\beta_{00}\rangle$ вероятности наблюдения двухкубитных состояний, входящих в β_{00} (см. рис. 6), несколько больше, чем вероятности состояний $|01\rangle$ и $|10\rangle$, которые не входят в β_{00} .

Результаты вычисления на симуляторе Feynman выходных значений состояния 4-го и 5-го кубитов в оригинальной схеме телепортации (рис. 7), при различных входных белловских состояниях в левом верхнем углу, показаны на рис. 11. На графиках этого рисунка по оси абсцисс указаны десятичные номера классических двухкубитных состояний $|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle$.

Результаты нашего вычисления процесса квантовой телепортации белловских состояний с двумя пятикубитными компьютерами IBM Q Tenerife и IBM Q Yorktown фирмы IBM, доступными через облако IBM cloud, представлены на рис. 10, 12. Их сравнение с результатами (см. рис. 13) идеального (не допускающего искажений промежуточных квантовых состояний при их преобразовании в процессе квантового вычисления) квантового

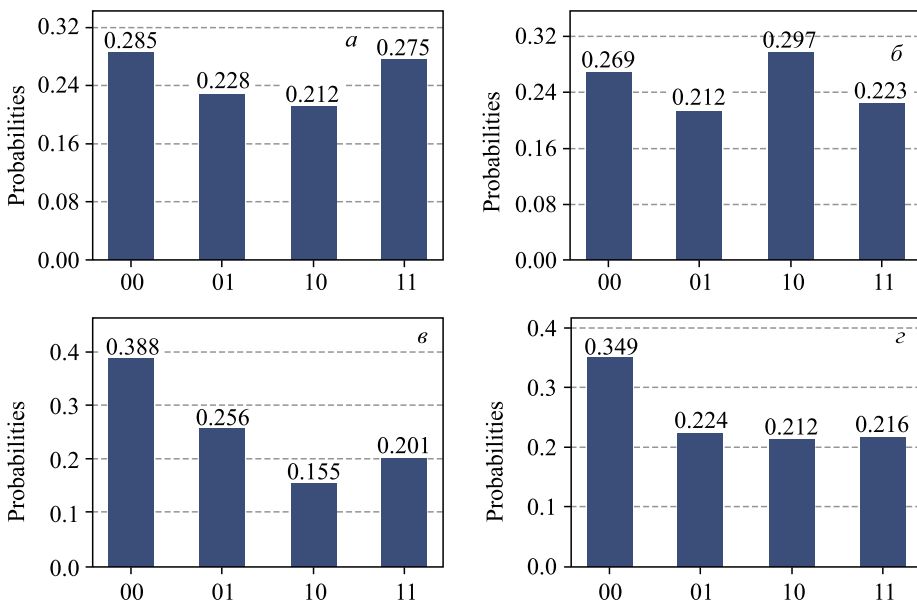


Рис. 12. Результаты схемы 3 квантовой телепортации состояний Белла на IBM Q Yorktown с измерением в базисе Адамара. а) Состояние $|\beta_{00}\rangle$; б) состояние $|\beta_{01}\rangle$; в) состояние $|\beta_{10}\rangle$ з) состояние $|\beta_{11}\rangle$

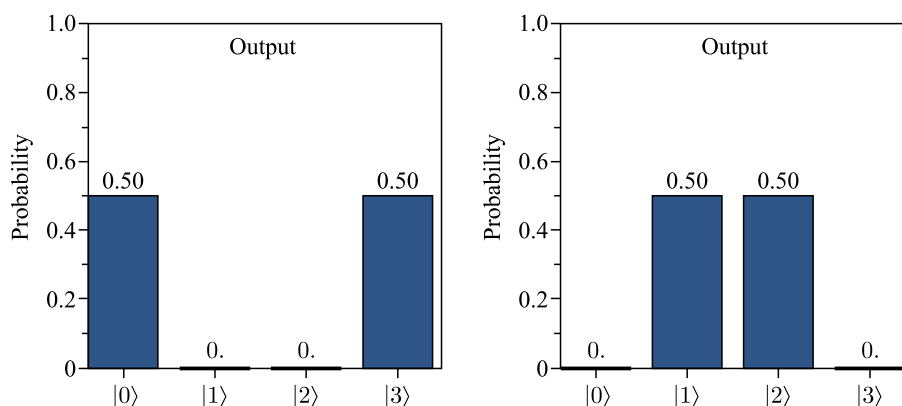


Рис. 13. Вычисление на симуляторе Feynman телепортации белловских состояний по оригинальному протоколу (рис. 5) и измерения результата в классическом базисе

компьютера, в качестве которого мы выбрали симулятор Feynman, представляющий собой пакет программ на языке Maple, показывает необходимость значительного уменьшения ошибок гейтов квантовых компьютеров, включая гейт измерения и ошибок, вызванных декогеренцией. Для уменьшения ошибок можно использовать методы корректирующих квантовых кодов (см. [14, part 4]) или технологические усовершенствования кубитов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Feynman R. P. Simulating Physics with Computers // Intern. J. Theor. Phys. 1982. V. 21, No. 6–7. P. 467–488.
2. Resch S., Karpuzcu U. R. Quantum Computing: An Overview Across the System Stack. arXiv:1905.07240 [quant-ph].
3. LaRose R. Overview and Comparison of Gate Level Quantum Software Platforms // Quantum. 2019. No. 3. P. 771–783; arXiv:0002077 [quant-ph].
4. Nielsen M. A., Chuang I. L. Quantum Computation and Quantum Information. 10th Anniversary Ed. Cambridge Univ. Press, 2010.
5. Georgescu I. M., Ashhab S., Nori F. Quantum Simulation // Rev. Mod. Phys. 2014. V. 86, No. 1. P. 153–185; arXiv:1308.6253 [quant-ph].
6. Albash T., Lidar D. A. Adiabatic Quantum Computation // Rev. Mod. Phys. 2018. V. 90, No. 1. P. 1–71; arXiv:1611.04471 [quant-ph].
7. Gorbachev V. N., Trubilko A. I. Quantum Teleportation of an Einstein–Podolsky–Rosen Pair Using an Entanglement Three-Particle State // J. Exp. Theor. Phys. 2000. V. 118, No. 5. P. 1036–1040; arXiv:9906110 [quant-ph].
8. Radtke T., Fritzsche S. Simulation of n -Qubit Quantum Systems. I. Quantum Registers and Quantum Gates // Comp. Phys. Commun. 2005. V. 173. P. 91–113.
9. Radtke T., Fritzsche S. Simulation of n -Qubit Quantum Systems. II. Separability and Entanglement // Comp. Phys. Commun. 2006. V. 175. P. 145–166.
10. Radtke T., Fritzsche S. Simulation of n -Qubit Quantum Systems. III. Quantum Operations // Comp. Phys. Commun. 2007. V. 176. P. 617–633.

11. Radtke T., Fritzsche S. Simulation of n -Qubit Quantum Systems. IV. Parametrization of Quantum States // *Comp. Phys. Commun.* 2008. V. 179. P. 647–664.
12. Radtke T., Fritzsche S. Simulation of n -Qubit Quantum Systems. V. Quantum Measurements // *Comp. Phys. Commun.* 2010. V. 181. P. 440–453.
13. Greenberger D., Horne M., Zeilinger A. Similarities and Differences between Two-Particle and Three-Particle Interference // *Fortschr. Phys.* 2000. V. 48, No. 4. P. 243–252; arXiv:0712.0921 [quant-ph].
14. Williams C. P. *Explorations in Quantum Computing*. London: Springer, 2011.

Получено 10 июня 2019 г.