

№ 2⁺⁰
2019 [52]

ИЗВЕСТИЯ

научно-технический журнал

ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ



27 АПРЕЛЯ

день основания

Института инженерной физики





ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- 2 Зыкин С.И., Анцибор С.В., Ивахно Н.В.**
Математическая модель выбора начального сопротивления в дыхательном контуре на основании данных диагностической матрицы состояний
- 7 Смирнов В.А., Шеламов С.В.**
Анализ погрешностей схем аналого-цифровой обработки сигналов синусно-косинусного вращающегося трансформатора
- 11 Колчин А.В., Ионкина Е.Г., Безродный Б.Ф.**
О некоторых аспектах регистрации и обработки слабых электрических сигналов
- 14 Казаков Р.Р., Захаров В.Л., Смирнов Д.В.**
Современное состояние и перспективы развития оптико-электронных средств космических аппаратов
- 19 Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В.**
О возникающей перспективе переопределения длительности секунды и длины метра
- 22 Коннов С.А.**
Математическая модель диагностирования объекта электроэнергетического оборудования с классификацией технического состояния в нечеткой логической системе

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

- 26 Шевченко В.А.**
Верхняя аддитивная граница вероятности ошибки в канале связи с памятью при использовании кодирования и псевдослучайного перемежения
- 32 Квашенников В.В.**
Многомерные каскадные коды и алгоритмы итеративного декодирования
- 36 Светилов М.А.**
Методика оценки оперативности доведения сообщений в транспортной сети телекоммуникационной подсистемы АСУ общего назначения

- 39 Зеленевский В.В., Шмырин Е.В., Кургузов В.В.**

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- 43 Надеждин Е.Н., Шаранов Д.А., Шабалин О.В., Игнатенко И.А.**
К проблеме обеспечения конкурентоспособности программных продуктов отечественного производства
- 48 Иващенко О.Ю.**
Оперативная оптимизация временных параметров мероприятий РХБ-защиты специальных объектов

- 53 Каракашев А.В., Гусева А.С.**
Алгоритм повышения помехоустойчивости внедрения аутентификационных меток на основе сигналов с расширенным спектром

- 56 Каракашев А.В., Грибунин В.Г., Шеламов С.В.**
Сравнение криптографических и стеганографических методов имитозащиты мультимедийной информации при передаче по радиоканалу в условиях преднамеренных помех

- 60 Гнедин Р.В., Грибунин В.Г.**
Особенности обеспечения доверия в гетерогенной информационной системе

- 64 Стародубцев П.Е., Бухаров Е.О., Кудря Р.А., Смирнов Я.Д.**
Определение основных возможностей нарушителя безопасности информационных систем путем включения в топологию сети ложных сетевых информационных объектов

- 71 Антохин Е.А., Атакищев О.И., Панасенко Н.Н., Чернова П.Д.**
Обеспечение безопасности испытаний беспилотных летательных аппаратов военного и специального назначения

- 77 Захаров В.Л., Смирнов Д.В., Шаймарданов А.М.**
Математические модели систем автоматического управления с широтно-импульсной модуляцией

- 84 Захаров В.Л., Смирнов Д.В., Казаков Р.Р., Коробков А.А.**
Методика определения области разброса начальных параметров движения отделяющихся частей с учетом оперативных данных о состоянии атмосферы в районах падения

- 89 Смирнов Д.В., Коротин А.М.**
Определение в рамках методики построения систем контроля целостности ответственной информации в системах АЛС на базе широкоэмиттерного радиоканала процедуры обновления параметров безопасности

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

- 93 Бугаков И.А., Царьков А.Н.**
О «настоящем» искусственном интеллекте для освоения Арктики

НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ • НАУЧНЫЕ РЕЦЕНЗИИ • ОТЗЫВЫ

- 101 Емелин Н.М.**
Как повысить эффективность контроля качества Перечня рецензируемых изданий

- 103 Волков Г.Г., Масликов А.А., Смуров С.В., Царьков А.Н.**
О многокубитных схемах запутывания и телепортации на основе NV-центров в алмазе

106 СОБЫТИЯ

107 AUTHORS

109 ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

110 ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ СТАТЕЙ

Научно-технический журнал

ИЗВЕСТИЯ Института инженерной физики №2 (52) 2019

Издается с апреля 2006 г. Выходит ежеквартально

ISSN 2073-8110

Включен в «Перечень ВАК»
по научным специальностям:

05.11.16. Информационно-измерительные
и управляющие системы

05.12.13. Системы, сети и устройства телекоммуникаций
05.13.01. Системный анализ, управление
и обработка информации

05.13.19. Методы и системы защиты информации,
информационная безопасность

Главный редактор,
председатель редакционного совета
и редакционной коллегии

Алексей Николаевич Царьков

Президент – Председатель Правления МОУ «ИИФ»,
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор

Редакционный совет

Геннадий Иванович Азаров

главный научный сотрудник ФГУП «16 ЦНИИ МО РФ»
заслуженный деятель науки РФ, заслуженный
изобретатель РФ, лауреат Государственной
премии РФ, лауреат премии Правительства РФ,
доктор технических наук, профессор

Сергей Владимирович Дворянkin

начальник департамента Государственной
корпорации «РОСТЕХ» ОАО КРЭТ,
доктор технических наук, профессор

Николай Михайлович Емелин

главный научный сотрудник
ФГБНУ «Госметодцентр»,
заслуженный деятель науки и техники РСФСР,
доктор технических наук, профессор

Валерий Иванович Николаев

научный референт ОАО «Концерн «Созвездие»,
лауреат Государственной премии СССР,
лауреат премии Правительства РФ,
доктор технических наук, профессор

Владимир Георгиевич Редько

заместитель руководителя
Центра оптико-нейронных технологий
НИИ системных исследований РАН,
доктор физико-математических наук

Юрий Александрович Романенко

старший научный сотрудник
филиала ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор

Александр Викторович Синьговский

старший научный сотрудник
Европейского центра ядерных исследований (CERN),
Adjunct Assistant Professor
Университета Миннесоты (США),
кандидат физико-математических наук

Анатолий Васильевич Тодосийчук

главный советник аппарата Комитета ГД ФС РФ
по образованию и науке,
почетный работник науки и техники РФ,
доктор экономических наук, профессор

Александр Павлович Царёв

заведующий кафедрой компьютерных архитектур
и телекоммуникаций Западно-поморского
технологического университета (Польша),
доктор технических наук, профессор

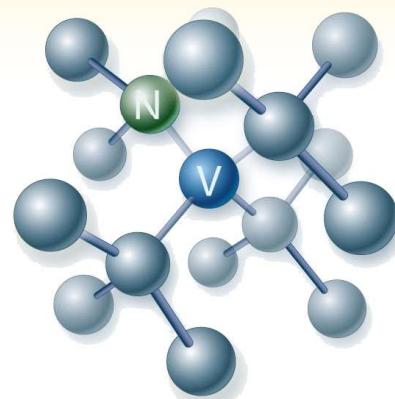
Игорь Анатольевич Шеремет

заместитель директора Российского фонда
фундаментальных исследований по науке,
член-корреспондент РАН,
доктор технических наук, профессор

УДК 539.182

**О МНОГОКУБИТНЫХ СХЕМАХ
ЗАПУТЫВАНИЯ И ТЕЛЕПОРТАЦИИ
НА ОСНОВЕ NV-ЦЕНТРОВ В АЛМАЗЕ**

**ON THE MULTI-QUBIT
ENTANGLEMENT SCHEMES AND
TELEPORTATION BASED ON NV-
CENTERS IN A DIAMOND**



Геннадий Германович Волков

*доктор физико-математических наук,
профессор
старший научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: gennadii.volkov@rambler.ru*

Александр Альбертович Масликов

*кандидат физико-математических наук,
доцент
заведующий комплексной
лабораторией физики
Филиал «Протвино»
Государственного университета «Дубна»
Адрес: 142281, Московская обл.,
г. Протвино, Северный проезд, д. 9
Тел.: +7(4967)31-01-92
E-mail: masspref@yandex.ru*

Сергей Владимирович Смуров

*почетный работник науки и техники РФ
доктор технических наук, профессор
Первый Вице-президент Института –
Главный конструктор
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: Svs_jif@mail.ru*

Алексей Николаевич Царьков

*заслуженный деятель науки РФ
доктор технических наук, профессор
Президент Института –
Председатель Правления Института
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210 Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967) 35-31-93
E-mail: tsarkov@iifmail.ru*

Аннотация

На основе парных запутываний спиновых кубитов NV-центров при комнатных температурах обсуждаются пути возможной телепортации на близких и дальних расстояниях между центрами отправителя и получателя.

Ключевые слова: многокубитные составные квантовые системы, типы квантовой запутанности, NV-центры в алмазе, спин-электрон и спин-ядерные кубиты, матрица плотности.

Summary

On the basis of pair entanglements of spin qubits of NV centers at room temperatures, possible ways of teleportation at close and long distances between the sender and receiver centers are discussed.

Keywords: multi-qubit composite quantum systems, types of quantum entanglement, NV-centers in diamond, spin-electron and spin-nuclear qubits, density matrix.

Успешное создание квантовой сети, способной распределять и обрабатывать запутанность между удаленными узлами, основано на соединении множества оптически активных узлов размещения, стационарных кубитов, разделенных десятками или сотнями километров, посредством обмена квантовой информацией, переносимой летающими кубитами, фотонами, распространяющимися либо в оптических волокнах, либо в окружающей атмосферной (космической) среде. Одной из наиболее перспективных платформ для стационарных кубитов квантовой сети является азотно-вакансионный

(NV) центр в алмазе, который, благодаря реализованным схемам оптической инициализации и считывания спин-электронных и спин-ядерных (азот ^{14}N спин $I=1$ и ^{15}N спин $I=1/2$) состояний, можно использовать как при криогенных, так и при комнатных температурах [1-3]. Основная цель состоит в том, чтобы объединить все эти элементарные составляющие блоки, чтобы продемонстрировать практическую реализацию квантовой сети на основе запутывания, поддерживаемой NV-центрами в алмазе в качестве стационарных кубитов и их надежной связи с фотонами-летающими кубитами.

Как мы уже отмечали, в мировой практике реализованы начинания в двух экспериментальных схемах запутывания спин-электронных состояний, спин-электрон-фотонных, спин электрон-ядерных состояний в системе двух твердотельных кубитов, соответствующих низким температурам, и при комнатных температурах [1-3]. При криогенных температурах к спин-селективным оптическим переходам можно обращаться по отдельности, что позволяет генерации связи между спин-фотон и спин-спиновой запутанностями (стационарный кубит–летающий кубит интерфейс), что позволило в этой схеме достигнуть запутанности и телепортации на лабораторных расстояниях между NV-центрами до 3-х метров и больше. В схемах при комнатной температуре аналогичные эксперименты с запутыванием были совершены при дистанции 25 нм между двумя NV-центрами. При комнатной температуре запутывание происходит между спин-электронными состояниями между двумя NV-центрами, благодаря дипольному спин-спин электронному взаимодействию. На сегодняшний день можно рассмотреть несколько вариантов создания телепортации при комнатной температуре:

I) Телепортация внутри двух НВЦ на близких расстояниях до 25-30 нм с 3-мя (4-мя кубитами) по протоколу на рис.2, где реализуется телепортация между двумя NV A и NV B центрами, находящимися на расстоянии $r_{AB} \approx 25-30$ нм, с двумя спин-электронными запутанными кубитами (на рисунке 2 NVA кубит 2 и NVB кубиты 3) и исходным кубитом (на рисунке 2 NVA кубит 1), подготовленным на ядерном спине азота ^{15}N (кутрит ^{14}N), которое должно быть телепортировано на электронный-спин NVB (на рисунке 1 кубит 3).

II) телепортация между двумя ($i=1, 2$) удаленными парами (NV A1, NVB1) (NVA2, NVB2) со своими спин-электронными кубитами (всего 4 спин-электронных кубита с соответствующим протоколом запутывания)

$\{ NV_{IA} \longleftrightarrow_{20-25nm} NV_{IB} \} \xleftrightarrow{3-5\text{метра}} \{ NV_{IIA} \longleftrightarrow_{20-25nm} NV_{IIB} \}$
и дополнительной станцией ИБС (проектное Измерение Состояний Белла), находящейся где-нибудь в третьем месте (протокол на рисунке 2.). Этот протокол использует передачу запутанности от одной пары запутанных кубитов друой паре кубитов. Для телепортации можно будет использовать как и в случае I) спин-ядерный кубит одного из NV-центров или добавить еще одну пару NV-центров и рассмотреть протокол с двух-кубитной телепортацией. Для обоих вариантов надо добиваться реализации:

1) построения связей («интерфейсы») между спин-электрон (ядро) стационарными кубитами NV и спин-фотон- летающими кубитами;

2) осуществления измерения Белловских состояний для передачи информационного кубита от отправителя до получателя, используя уже построенные запутанные состояния между ними. Это очень важный момент, который следует учитывать для любой многокубитной схемы телепортации с использованием NV-центров, которая может быть еще должна быть разработана до самых тонких деталей, поскольку измерение Белла действительно является основной экспериментальной проблемой;

3) схема должна быть реализована как можно быстрее, так как запутанное состояние между двумя сближенными NV центрами нестабильно.

Так, измеренные времена жизни запутанных состояний ψ^\pm, ϕ^\pm ограниченные спиновой дефазировкой, составляют $T_2^* \approx 20 - 30$ мкс.

Два электронных спина NVA и NVB взаимодействуют через свои магнитные моменты согласно гамильтониану взаимодействия

$$H_{AB} \approx \hbar \kappa_{\text{дип}} S_{zA} S_{zB}$$

с дипольной силой взаимодействия

$$\kappa_{\text{дип}} = \kappa_0 (3 \overline{\cos^2 \theta} - 1), \quad \kappa_0 = \frac{\mu_0 \gamma_{NV}^2 \hbar}{6\pi r^3} \approx 3 \cdot 10^{23} / r^3 \text{ кГц}$$

Чтобы создать запутывание высокой точности, необходимо условие сильной связи, $\kappa_{\text{дип}} > 1/T_2^*$, где T_2^* – соответствующее время дефазировки.

Измеренная дипольная константа связи $k_{\text{дип}} \approx 5 \text{ кГц}$ путем использования кутрита двух спинов в паре NV может быть увеличена в 4 раза $k_{\text{дип}} \approx 20 \text{ кГц}$. Измеренные значения для дипольного взаимодействия допускают между двумя дефектами максимальное расстояние 30 нм.

С самого начала Алиса владеет состоянием, которое должно быть телепортировано (кубит 1)

$$|\psi\rangle_1 = \alpha|0\rangle_1 + \beta|1\rangle_1.$$

Алиса и Боб имеют по одному кубиту спутанной пары (кубиты 2 и 3) в совместном состоянии

$$|\psi^-\rangle_{23} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|01\rangle_{23} - |10\rangle_{23}).$$



Рис. 1. Протокол телепортации по Беннету и др.

Объединенное состояние всех трех кубитов можно переписать как

$$|\psi\rangle_{123} = \frac{1}{2} (|\phi^+\rangle_{12} (\alpha|1\rangle_3 - \beta|0\rangle_3) + |\phi^-\rangle_{12} (\alpha|1\rangle_3 + \beta|0\rangle_3) + |\psi^+\rangle_{12} (-\alpha|1\rangle_3 - \beta|0\rangle_3) - |\psi^-\rangle_{12} (\alpha|1\rangle_3 + \beta|0\rangle_3))$$

где $|\phi^\pm\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle \pm |11\rangle)$,
 $|\psi^\pm\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle \pm |10\rangle)$ – четыре состояния Белла.

Чтобы телепортировать квантовое состояние, Алиса выполняет совместное измерение на своих кубитах (кубиты 1 и 2) в базисе Белла, проецируя кубит Боба в состояние, которое вплоть до унитарной операции (U) зависит от результата измерения Алисы. Алиса отправляет результат через классический канал связи Бобу, который затем может восстановить исходное состояние $|\psi\rangle_1$, применив соответствующее локальное преобразование (U).

Телепортация подсистемы, в которой запутанная пара превращается в протокол обмена перепутывания, где два удаленных состояния могут запутаться без прямого взаимодействия. Следуя возможности создания телепортации на основе NV-центров при комнатной температуре, целесообразно для начала рассмотреть в лабораторных условиях систему, состоящую из двух пар $\{NV_{IA}, NV_{IB}\}$ и $\{NV_{IA}, NV_{IB}\}$, разнесенных на дистанцию 3-5 метра.

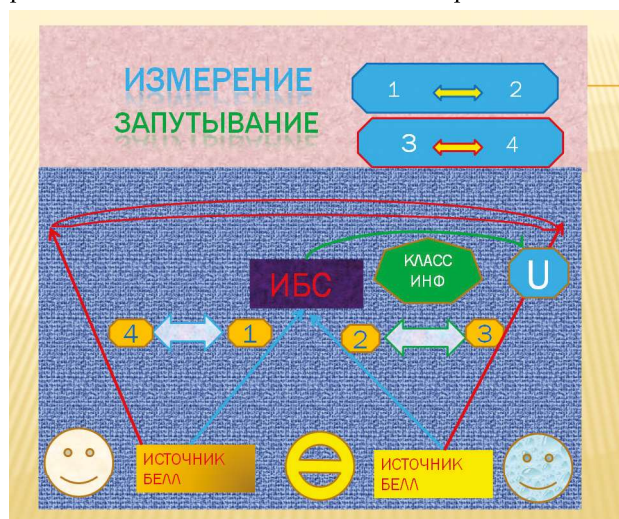


Рис. 2. Запутывание через обмен запутанными состояниями

Такая система описывается гамильтонианом

$$H = \sum_{i=1,2} (H_A^i + H_B^i + H_{AB}^i),$$

где H_A^i и H_B^i – гамильтонианы двух $i=I, II$ пар независимых центров;

H_{AB}^I, H_{AB}^{II} описывают для каждой пары $i=I, II$ дипольные взаимодействия между NV_{IA} и NV_{IB}, NV_{IIA} и NV_{IIB} .

Протокол перестановки запутывания реализуется посредством генерации двух запутанных пар, «0» и «1» и кубитов «2» и «3», например, максимально запутанных синглетных состояний

$$|\psi^-\rangle_{01} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1\rangle_0 |0\rangle_1 - |0\rangle_0 |1\rangle_1)$$

$$|\psi^-\rangle_{23} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1\rangle_2 |0\rangle_3 - |0\rangle_2 |1\rangle_3),$$

где $|H\rangle$ и $|V\rangle$ обозначают состояния горизонтальной и вертикальной поляризации соответственно.

Квантовое состояние

$$|\psi\rangle_{0123} = |\psi^-\rangle_{01} \otimes |\psi^-\rangle_{23}$$

$$|\psi\rangle_{0123} = \frac{1}{2} (|\psi^+\rangle_{03} \otimes |\psi^+\rangle_{12} - |\psi^-\rangle_{03} \otimes |\psi^-\rangle_{12} - |\phi^+\rangle_{03} \otimes |\phi^+\rangle_{12} + |\phi^-\rangle_{03} \otimes |\phi^-\rangle_{12})$$

Следовательно, так называемое измерение состояния Белла (ИБС) между кубитами «1» и «2» приводит к случайному получению одного из четырех максимально запутанных состояний Белла $|\psi^\pm\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1\rangle_1 |0\rangle_2 \pm |0\rangle_1 |1\rangle_2)$, $|\phi^\pm\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1\rangle_1 |1\rangle_2 \pm |0\rangle_1 |0\rangle_2)$

с равной вероятностью 1/4. Посредством этого измерения кубиты «0» и «3» проецируются в то же запутанное состояние, что и кубитов «1» и «2». Таким образом, перепутывание меняется от кубитов «0-1» и «2-3» к кубитам «1-2» и «0-3». Эту процедуру также можно рассматривать как телепортацию состояния кубита «1» на кубит «3» или кубит «2» на кубит «0».

Литература

1. Doldeet F. // Nature Phys, 2013. №9. Pp.139-143.
2. Bernien H. // Nature, 2014. V.497.
3. Смуров С.В., Масликов А.А., Волков Г.Г. Идеи и методы генерации запутывавния твердотельных спин-кубитов. Квантовая запутанность двух систем // Известия Института инженерной физики, 2019. №1(51). С.58-65.