

КВАНТОВЫЕ СЕНСОРЫ



Сергей Кулик,
научный руководитель
Центра квантовых
технологий физического
факультета МГУ
имени М. В. Ломоносова,
доктор физико-
математических наук,
профессор

Бурное развитие новой области знаний, получившей в последнее десятилетие название квантовой обработки информации, привело к появлению сквозной технологии – «Квантовые технологии», передовые научно-технические решения, создающие высокотехнологичные продукты и сервисы и оказывающие значительное влияние на рост экономики и формирование новых рынков. К таким относятся те технологии, которые одновременно охватывают несколько трендов или отраслей. Традиционно эта технология делится на три субтехнологии: *квантовые вычисления, квантовые коммуникации и квантовые сенсоры*, которые тесно связаны между собой. Прежде всего их связь определяется общими законами квантовой физики, а также возможностями, которые в последнее время получили экспериментаторы в виде обширного инструментария – единого для трех субтехнологий. Именно эти возможности доступа к индивидуальным квантовым объектам (атомам, ионам, молекулам, фотонам, базовым сверхпроводниковым элементам) стали отличительной особенностью так называемой *второй квантовой революции*.

Существенной чертой квантовых технологий является значительная доля фундаментальных исследований в цепочке продвижения по уровню технологической готовности создаваемых продуктов; в целом он пока невысок. Такая цепочка включает следующие этапы: фундаментальная научно-исследовательская работа – прикладная НИР – опытно-конструкторская работа – технология – продукт. Однако ряд разработок уже сегодня доведен до конкретных изделий, которые вышли на рынок. Речь идет об инновациях в области квантовой коммуникации и квантовых сенсорах.

Под квантовой сенсорикой понимается создание измерительных устройств, основанных на квантовых эффектах. Предполагается, что квантовые сенсоры будут иметь параметры, намного превышающие имеющиеся у классических аналогов. К числу таких характеристик относятся не только чувствительность (в смысле минимального значения регистрируемого сигнала) и пространственное/временное разрешение, но и рабочий диапазон измеряемых значений, время отклика или анализа, относительная воспроизводимость (например, частоты в стандартах времени), энергопотребление, габариты, сложность обслуживания, срок службы, стоимость производства и эксплуатации и т.д.

К основным инструментам, позволяющим реализовать такие характеристики, относят:

- фундаментальные наработки в области взаимодействия света и вещества, выполненные во второй половине XX – начале XXI вв.;
- специфические свойства квантовых состояний, такие как суперпозиции, перепутывание;
- особенности квантовых систем, проявляющиеся при квантовых измерениях.

Именно использование свойств суперпозиции, перепутывания обеспечит в перспективе максимально возможную чувствительность измерения за счет преодоления стандартного квантового предела (под ним понимается предел точности измерений, к которому подошли классические методы, не использующие свойства суперпозиции, перепутанности или сжатия; например, для фотонов стандартным квантовым пределом является предел «дробового шума»). Эти свойства лежат в основе ряда разрабатываемых сенсоров.

СУПЕРПОЗИЦИИ (квантовая когерентность)

Волновые функции квантовых объектов представляют собой линейную комбинацию (суперпозицию) базисных состояний $|0\rangle$ и $|1\rangle$ с амплитудами c_1 и c_2 :

$$|\Psi\rangle = c_1|0\rangle + c_2|1\rangle, |c_1|^2 + |c_2|^2 = 1.$$

ПЕРЕПУТЫВАНИЕ

$$|\Psi_{1,2}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\{|0_1\rangle|1_2\rangle + |1_1\rangle|0_2\rangle\}$$

Квантовое состояние составной системы «1, 2» определено лучше, чем состояния подсистем «1» и «2»; для широкого класса двухкомпонентных квантовых систем состояние составной системы является чистым и описывается волновой функцией, в то время как состояния подсистем оказываются смешанными и описываются

матрицей плотности. Соответственно, энтропия совместного состояния оказывается равной нулю, в то время как энтропия подсистем максимальна.

ИЗМЕРЕНИЕ

Измерение квантовой системы приводит к классическим вероятностным исходам (постулат Борна).

Если над квантовой системой, находящейся в состоянии $|\Psi\rangle$, производится измерение, которое описывается оператором M_m , то вероятности исходов различных измерений определяются по правилу $p_m = \langle\Psi|E_m|\Psi\rangle$, где введены положительно определенные операторы – они известны в квантовой механике как POVM-элементы (positive operator valued measure), связанные с измерениями:

$$E_m = M_m^\dagger M_m, \sum_m E_m = I.$$

Сегодня известно большое количество сенсоров различных физических величин, начиная от магнитных и электрических полей, заканчивая датчиками времени, частоты, вращения, температуры и давления. Парадоксально, но принцип действия их квантовых аналогов (квантовых сенсоров) зачастую основан на глобальном недостатке квантовых систем – их чрезвычайной чувствительности к внешним возмущениям. Фактически квантовый сенсор представляет собой зонд (рис. 1), который благодаря этому свойству извлекает информацию о том или ином свойстве физического мира.

Например, если в качестве зонда использовать спин примесного атома (его ядра) в твердотельной матрице, то внешнее магнитное поле будет его поворачивать. Зависимость магнитного поля от времени приведет к аналогичной зависимости спина. Измерение и обработка результатов измерения его направления позволит оце-

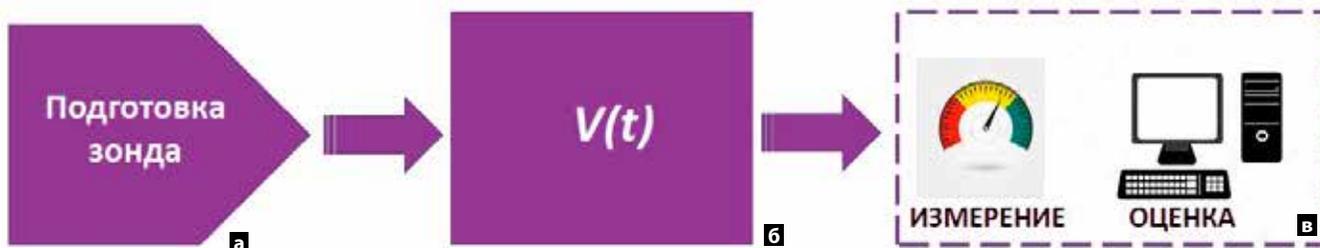


Рис. 1. Принцип действия квантового сенсора-зонда: а) подготовка зонда; б) воздействие на зонд внешнего возмущения $V(t)$; в) измерение состояния зонда и математическая обработка результатов для оценки измеряемого воздействия

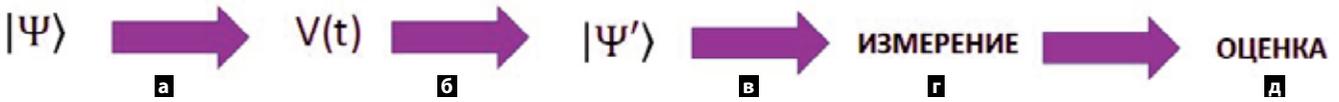


Рис. 2. Эволюция процесса преобразования состояния квантового объекта (зонда) от начального состояния (а), его взаимодействие с измеряемым физическим объектом (б) посредством оператора $V(t)$, преобразование в результате взаимодействия к новому состоянию (в) вплоть до измерения (г) и оценки (д)

нить эволюцию внешнего магнитного поля. Такие сенсоры востребованы, например, в медицине.

Несмотря на то, что квантовая сенсорика как отдельная область исследований появилась совсем недавно, многие подходы к решению задач квантового зондирования были хорошо известны и являются результатом развития таких направлений физики, как спектроскопия высокого разрешения, квантовая оптика, взаимодействие излучения с веществом и др. Эти подходы используют эффекты атомной интерферометрии, ядерного магнитного резонанса, лазерного охлаждения, метрологии, магнитометрии. Однако существенные надежды возлагаются на зондирование посредством отдельных квантовых объектов – например, на уровне одиночных атомов.

Как определить, что такое квантовый сенсор помимо того, что это «измерительное устройство, основанное на квантовых эффектах»? (В качестве дополнительного материала рекомендуем прекрасный обзор по технологии квантовой сенсорики [1]). Постараемся выделить и перечислить отличительные признаки квантовых сенсоров – иногда их называют критериями, аналогично известным критериям Ди Винченцо в квантовых вычислениях.

1. *Использование квантового объекта (зонда) для измерения физической величины (классической или квантовой).* При этом сам объект характеризуется квантованной структурой энергетических уровней – это электронные, магнитные, колебательные состояния сверхпроводящих или спиновых кубитов, нейтральных атомов или ионов.

2. *Применение квантовой когерентности* (например, в виде пространственной или временной суперпозиции) для измерения физической величины.

3. *Использование свойства перепутанности* для улучшения чувствительности измерений, то есть с более высокой точностью/чувствительностью, чем это имеет место при классических измерениях.

4. *Возможность приготовления (инициализации) квантовой системы* в известных состояниях и выполнения операции считывания (измерения) этих состояний.

5. *Когерентное манипулирование* (обычно с помощью полей, зависящих от времени). Это условие не строго обязательно для всех протоколов; примеры, выходящие за рамки этого критерия – измерение времен релаксации.

Далее неизменно возникает вопрос: как же работает квантовый сенсор? Приведем расширенную, по сравнению с изображенной на рис. 1, схему (рис. 2).

Квантовая система (зонд) взаимодействует с соответствующим физическим объектом $V(t)$, например электрическим или магнитным полем.

Взаимодействие количественно оценивается параметром вида $\gamma = \partial^q E / \partial V^q$, который связывает изменения энергии перехода E_k с изменением внешнего параметра $V(t)$. В большинстве ситуаций связь либо линейная ($q = 1$), либо квадратичная ($q = 2$). Взаимодействие с $V(t)$ приводит к сдвигу энергетических уровней квантовой системы, что и подлежит измерению.

Введенный параметр γ тесно связан с так называемой внутренней чувствительностью сенсора – величиной, пропорциональной фактору

$$\frac{1}{\gamma \sqrt{T_\chi}}$$

где T_χ – время релаксации системы. Из формулы следует, что для оптимизации чувствительности необходимо, чтобы параметр γ был достаточно большим. Например, этого можно добиться путем выбора соответствующей физической системы в качестве сенсора.

Также очевидно, что время релаксации T_χ должно быть достаточно длительным.

Следуя логике схем, показанных на рис. 1, 2, остановимся на работе типичного (но не единственного) протокола квантового сенсора (под ним в квантовой обработке информации понимают последовательность действий,

необходимых для достижения результата). Этот протокол состоит из следующих этапов (рис. 3):

1. Инициализация зонда в известном базисном состоянии $|0\rangle$.

2. Преобразование к удобному начальному состоянию $|\psi_0\rangle$.

3. Эволюция под действием преобразования за время t :

$$|\psi(t)\rangle = \hat{U}_H(0, t)|\psi_0\rangle = c_0|\psi_0\rangle + c_1|\psi_1\rangle.$$

4. Преобразование в суперпозицию наблюдаемых состояний

$$|\alpha\rangle = \hat{U}_b|\psi(t)\rangle = c'_0|0'\rangle + c'_1|1'\rangle.$$

5. Измерение конечного состояния по дихотомной схеме Бернулли с вероятностями p и $1-p$.

6. Повторение шагов 1–5 N раз для оценки вероятности измерения.

7. Измерение вероятности p как функции времени для оценки величины сигнала $V(t)$.

Приведенный пример протокола квантового сенсора – не единственно возможный. Например, полупроводниковый сенсор одиночных фотонов на основе лавинных фотодиодов работает совершенно по другому сценарию: здесь слабое электромагнитное поле является «затравкой» для лавинообразного процесса в полупроводниковой гетероструктуре. Лавина формирует макроскопический импульс напряжения, который регистрируется классическим счетчиком; при этом каждый импульс ассоциируется с приходом отдельного фотона. Вероятность возникновения лавины – это одна из базовых характеристик такого сенсора, отклик которого на предельно слабое световое поле и регистрируется соответствующим прибором – «счетчиком фотонов».

Развитие рынка квантовых сенсоров предполагает создание основного количества инновационных продуктов, технологий и отдельных отраслевых решений в рамках трех основных групп:

- часы, гравиметры, гироскопы, акселерометры;
- сенсоры электрического и магнитного поля;
- квантовая метрология.

Использование сенсоров, входящих в первые две группы, сводится к задачам в области создания инерциальных навигационных и магнитометрических систем для навигации в условиях отсутствия сигнала GPS. Действительно, гравитационные и магнитные поля Земли характеризуются небольшими аномалиями, которые варьируются от места к месту. Чувствительный гравиметр или магнитометр может проводить точные измерения локальных полей и сравнивать их



Рис. 3. Пример протокола квантового сенсора

с картами этих аномалий, чтобы позволить ориентироваться на местности без задействования каких-либо систем связи. По аналогии в основу автономных инерциальных навигационных систем могли бы лечь и квантовые акселерометры.

Другие варианты использования этого типа сенсоров:

- высокоточные часы и квантовые стандарты частоты могут найти коммерческое применение, например, для коррекции финансовых сделок и динамического регулирования потребления энергии электрическими сетями;
- с помощью гравиметров можно проводить сейсмографическое прогнозирование землетрясений и извержений вулканов, подземную разведку запасов нефти и газа, оценивать прочность грунта под крупными строительными объектами без необходимости бурения скважин;

- *квантовые акселерометры перспективны для обеспечения беспилотного режима движения транспортных средств;*
- *квантовые магнитометры могут оказаться востребованными в биомедицине, например, для улучшения чувствительности измерения магнитного поля в магнитной резонансной томографии.*

Квантовые сенсоры также востребованы для создания усовершенствованных образцов лидаров и радаров для решения задач разведки, наблюдения и рекогносцировки. Здесь наиболее известными разработками являются так называемые технологии скрытых (hidden) изображений и квантовой подсветки (quantum illumination). Однако несмотря на то, что соответствующие демонстрационные эксперименты были выполнены более 10 лет назад, существенного прогресса в продвижении к конечным продуктам к настоящему времени не наблюдается. По оценке специалистов, навигационные устройства из первых двух групп квантовых сенсоров будут созданы в пределах нескольких лет, а радарные и лидарные системы – в течение 10 и более лет. По объему рынка квантовые сенсоры уступают двум другим субтехнологиям: если в 2020 г. он оценивался в 414 млн долл., то к 2030 г., по оценкам OSA Industry Development Associates, он достигнет уровня 2 млрд долл. (соответственно, квантовые вычисления – 33 млн и 50 млрд долл., квантовые коммуникации – 84 млн и 7 млрд).

Мировые лидеры по квантовой сенсорике – США и Великобритания; исследования также ведутся в Австралии, Канаде, странах Евросоюза и Китае. В Российской Федерации в рамках реализации соглашения о намерениях между правительством и государственной корпорацией «РОСТЕХ» в 2019 г. была разрабо-

тана дорожная карта по развитию этой высокотехнологичной области. Однако в силу ряда причин она так и не была запущена, несмотря на то, что ряд предлагаемых в ней сенсоров имел высокий уровень готовности – прежде всего в области навигации и метрологии.

Что касается устройств квантовой метрологии, то в эту группу преимущественно вошли сенсоры, которым не нашлось место в первых двух. Наиболее перспективными и востребованными представляются счетчики фотонов в видимом и ближнем ИК-диапазонах, квантовые датчики случайных чисел, а также устройства абсолютной квантовой фотометрии. Последние представляют собой пример технологии, разработанной и апробированной в СССР и РФ, – создание нового поколения фотометрических устройств и эталонов на принципах квантовой механики [2].

В качестве примера квантового сенсора, основанного на перепутанных состояниях фотонов, приведем элегантную идею, предложенную Д.Н. Клышко [3] и доработанную группой Л.А. Кривицкого [4]. Перепутанные пары фотонов рождаются в двух (1 и 2) макроскопических областях толщиной L , разделенных зазором толщиной d (рис. 4).

Квантовая интерференция возникает как результат когерентного сложения амплитуд $F^{(1)}$ и $F^{(2)}$ пар фотонов: $F = F^{(1)} + F^{(2)} \exp(i\Delta\phi)$, где $\Delta\phi \equiv \phi_p - (\phi_s + \phi_i)$ – фазовый набег между сигнальными (s), холостыми (i) фотонами, а также фотонами на частоте лазерной накачки (p).

В результате интенсивность регистрируемого поля на сигнальной частоте оказывается

$$I_s(\omega_s, \theta_s) \propto \sin^2 \left[\frac{\Delta_z L}{2} \right] \times \cos^2 \left[\frac{\Delta_z L + \Delta_z^2 d}{2} \right].$$

Здесь $\Delta_z = k_{z_p} - k_{z_s} - k_{z_i}$ – т.н. волновая расстройка, пропорциональная фазовому сдвигу $\Delta\phi$.

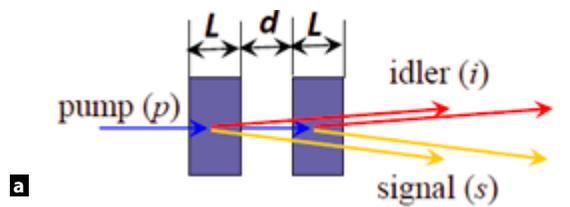
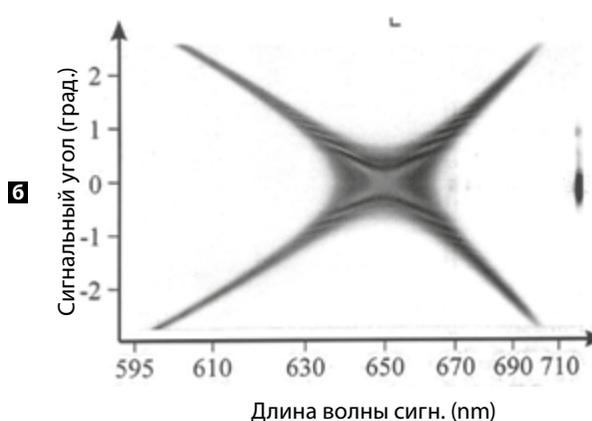


Рис. 4: а) схема для наблюдения квантовой интерференции пар фотонов, испущенных из двух макроскопических областей толщиной L (прямоугольники голубого цвета), разделенных зазором d ; б) распределение интенсивности сигнальных и холостых фотонов при трехфотонной интерференции (эксперимент)



| Физическая система/тип | Кубит | Измеряемая величина | Хар. частота | Инициализация | Чтение |
|--|--|---|--------------|---|-----------------------|
| Нейтральные атомы | | | | | |
| Атомный пар II-III | Атомный спин | Магнитное поле, Вращение, Частота/Время | DC-10ПГц | Оптическая | Оптическое |
| Холодные атомы II-III | Атомный спин | Магнитное поле, Ускорение, Частота/Время | DC-10ПГц | Оптическая | Оптическое |
| Ионы в ловушках | | | | | |
| II-III | Долгоживущее электронное состояние, Колебательная мода | Электрическое поле, Сила, Вращение, Частота/Время | МГц | Оптическая | Оптическое |
| | | | ТГц | Оптическая | Оптическая |
| Ридберговские атомы | | | | | |
| II-III | Ридберговские состояния | Электрическое поле | DC, ПГц | Оптическая | Оптическое |
| Твердотельные спины (ансамбли) | | | | | |
| ЯМР-сенсоры II | Ядерный спин | Магнитное поле | DC | Температурная | Pick up coil |
| NV-сенсоры (ансамбли) II | Электронный спин | Магнитное поле, Электрическое поле, Температура, Давление, Вращение | DC-ПГц | Оптическая | Оптическое |
| Твердотельные спины (одиночные спины) | | | | | |
| P донор в Si II | Электронный спин | Магнитное поле | DC-ПГц | Термическая | Электрическое |
| Полупроводниковые квантовые точки II | Электронный спин | Магнитное поле | DC-ПГц | Электрическая, Оптико-электрическая, Оптическая | |
| Одиночный NV-центр II | Электронный спин | Магнитное поле, Электрическое поле, Температура, Давление, Вращение | DC-ПГц | Оптическая | Оптическое |
| Сверхпроводящие цепи | | | | | |
| SQUID II | Ток сверхпроводимости | Магнитное поле | DC-10ПГц | Термическая | Электрическое |
| Потоковый кубит II | Циркуляционный ток | Магнитное поле | DC-10ПГц | Термическая | Электрическое |
| Зарядовый кубит II | Зарядовые соб. состояния | Магнитное поле | DC-10ПГц | Термическая | Электрическое |
| Элементарные частицы | | | | | |
| Мюон II | Мюонный спин | Магнитное поле | DC | Радиоактивный распад | Радиоактивный распад |
| Нейтрон II | Ядерный спин | Магнитное поле, Гравитация | DC | Брагговское рассеяние | Брагговское рассеяние |
| Другие сенсоры | | | | | |
| Одноэлектронный транзистор I | Зарядовые соб. состояния | Электрическое поле | DC-100 МГц | Термическая | Электрическое |
| Оптомеханика I | Фононы | Сила, ускорение, Масса, Магнитное поле | нГц-МГц | Термическая | Оптическое |
| Интерферометр II-III | Фотоны, Атомы, Молекулы | Смещение, Показатель преломления | | | |

Таблица. Классификация квантовых сенсоров

Это выражение по структуре очень похоже на известную формулу, которая описывает дифракцию плоской волны на двух щелях в классической оптике – огибающая $\sin c^2 \left[\frac{\Delta_x L}{2} \right]$ промодулирована функцией $\cos^2 \left[\frac{\Delta_x L + \Delta_x^2 d}{2} \right]$. Только роль модуляционной функции играет фазовый вклад $\Delta\phi$, сформированный на трех частотах в зазоре d между двумя кристаллами. На рис. 4б четко видна интерференционная модуляция частотно-углового распределения интенсивности пар фотонов, структура которой позволяет измерять дисперсионные свойства среды-зазора в широком спектральном диапазоне. В частности, возможно проводить прецизионные измерения на частоте холостых фотонов в далеком ИК-диапазоне, измеряя распределение интенсивности на частоте сигнальных фотонов в видимой области спектра [3].

В заключение сравним известные на сегодняшний день сенсоры (таблица). Они отсортированы по таким признакам, как физическая платформа реализации сенсора (кубита), измеряемой величине (тип физического поля), харак-

терному времени отклика и/или диапазону частот, способу реализации начального и конечного состояний сенсора. Римскими цифрами I, II и III показаны перечисленные группы. Таблица представляет прежде всего методический интерес, поскольку показывает широту функционального охвата измеряемых величин и многообразие предлагаемых реализаций сенсоров. ■

Работа выполнена при поддержке Программы развития МГУ имени М.В. Ломоносова, проект №23А-Ш06-05.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. C. L. Degen, F. Reinhard, P. Cappellaro. Quantum sensing. *Reviews of Modern Physics*. 2017. V. 89. P. 035002.
2. Д.Н. Клышко, А.Н. Пенин. Перспективы квантовой фотометрии // *Успехи физических наук*. 1987. Т. 152. №4. С. 653–665.
3. Д.Н. Клышко. Интерференция Рамзея при двухфотонном параметрическом рассеянии света // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 1993. №104. P. 2676-2684.
4. D.A. Kalashnikov, A.V. Paterova, S.P. Kulik, L. Krivitsky. Infrared Spectroscopy with Visible Light // *Nature Photonics*. 2016. №10. С. 98–101.