

КВАНТОВАЯ ГОЛОГРАФИЯ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ. ОБЗОР

*Н.К. Павлычева, Э.Р. Муслимов, Н.А. Петрановский,
А.Р. Насыбуллин, И.И. Нуреев, О.Г. Морозов*

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

Аннотация. Голографию определяют как метод записи и восстановления волновых полей, основанный на регистрации и восстановлении интерференционной картины, формируемой волнами, исходящими от объекта и опорного луча. Зарегистрированную интерференционную картину называют голограммой. Ключевым свойством голографии является когерентность, которая требуется для извлечения информации о фазе посредством интерференции с опорным лучом. Без когерентности голография невозможна. Квантовая голография обладает всеми преимуществами голографии, однако в ней присутствуют и эффекты, позволяющие создавать голограммы принципиально новыми методами. Квантовую голографию можно использовать не только для построения изображений, но и для получения характеристик квантовых состояний. Квантовая запутанность (а не когерентность) является источником квантового голографического пространства. Цель настоящей статьи заключается в попытке отразить развитие квантовой голографии за последние двадцать лет и понять, как квантовая голография и ее приложения позволят решить задачи разработки новых методов и средств квантовой криптографии, телекоммуникаций и сенсорики для реализации многосенсорных распределенных квантовых измерений.

Ключевые слова: квантовая голография, квантовые изображения, квантовая память, голографическая телепортация, квантовая стеганография изображений, квантовая метрология, квантовые голограммы, трансферт технологий.

Введение

Слово «голография» происходит от греческих слов «холос» – полный и «графо» – пишу и представляет собой принцип получения объемных изображений предметов при помощи излучения лазера. Голограмма фиксирует не само изображение предмета, а структуру отраженной от него световой волны (ее амплитуду и фазу). Для получения голограммы необходимо, чтобы на фотографическую пластинку одновременно попали два когерентных световых пучка: предметный, отраженный от снимаемого объекта; и опорный – приходящий непосредственно от лазера. Свет обоих пучков интерферирует, создавая на пластинке чередование очень маленьких темных и светлых участков – картину интерференции [1].

На экспонированной таким образом и проявленной пластинке отсутствует какое-либо изображение, однако его в зашифрованном виде содержит система интерференционных полос и точек, и, если голограмму просветить как диапозитив лазерным светом той же частоты, что была использована при записи, возникнет трехмерное восстановленное изображение снятого предмета, словно «висящего» в пространстве. Меняя точку наблюдения, можно заглянуть за предметы на первом плане и увидеть детали, ранее скрытые от взгляда. Свет, проходя сквозь систему полос и точек голограммы, благодаря дифракции, воспроизводит волновой фронт, исходивший от снятого предмета [1].

Таким образом, голографию определяют как метод записи и восстановления волновых полей, основанный на регистрации и восстановлении интерференционной картины, формируемой волнами, исходящими от объекта и опорного пучка [2]. Зарегистрированную интерференционную картину называют голограммой.

По мере развития голографии появились компьютерная и цифровая голографии [3]. В компьютерной голографии голограмма создается путем цифрового вычисления голографической интерференционной картины и печати ее на маске или пленке для последующего освещения источником когерентного света, физическая интерференция световых волн заменяется вычислительной фазой, на которой компьютер с помощью расчетов определяет картину распределения интенсивностей света [4]. В цифровой голографии голограмма записывается с использованием средств цифровой записи, а восстановление комплексной амплитуды объектного волнового поля и формирование изображения реализуется путем численной процедуры преобразования цифровой голограммы [5].

Концепция использования цифровых голограмм для модификации каналов связи нашла свое применение и для связи в свободном пространстве [3]. Вихревые пучки дают как возможность мультиплексирования канала связи, так и обладают устойчивостью к случайным искажениям в среде распространения. Методы обнаружения вихревых пучков при помощи синтезированных пространственных фильтров основаны на корреляционной фильтрации. Именно инвариантность многоканальных корреляционных фильтров к сдвигу и стала основным мотивом применения таких фильтров для распознавания наборов вихревых пучков, прошедших через естественную искажающую среду. Как формирование исходных пучков, так и распознавание прошедших через случайную среду осуществляется голографическими элементами с несущей частотой. Свойство цифровых голограмм формировать структурированные вихревые пучки оказалось весьма востребовано также для реализации класса поляризационных преобразований различными методами – с использованием анизотропных кристаллов, в интерферометрических системах, с использованием интерференционных поляризаторов. Оказалось, также, что и для распознавания поляризационных состояний векторных пучков возможно применение вихревого фазового фильтра, работающего в скалярном приближении.

Прогресс в развитии методов и технологий цифровой голографии позволил перейти к решению задач дифракционной нанофотоники, в частности, на новом уровне вернуться к проблеме аналоговых оптических вычислений, и созданию на этой основе прорывных информационных технологий [3].

Очевидно, что, сделав шаг от пространственной технологии к наноразмерной, голография не могла не использовать преимущества квантовой механики, реализованные в квантовой криптографии, квантовых телекоммуникациях, квантовых вычислениях и т.д. Тому свидетельствует и принципиальная схожесть голографии и квантового распределения ключей, голографии и технологий счета фотонов, голографии и построения фантомных изображений и т.д. Например, в голографии с фазовым сдвигом используется четыре изображения интенсивности эталонного оптического поля с фазами $\theta \in \{0, \pi/2, \pi, 3\pi/2\}$, которое взаимодействует с неизвестным полем для восстановления его фазового профиля. В то же время в квантовой криптографии Алиса (легальный абонент, передатчик) изменяет фазу радиочастотного сигнала, используемого для модуляции оптической несущей, среди четырех значений $0; \pi$ и $\pi/2; 3\pi/2$, которые образуют пару сопряженных базисов для кодирования состояния фотона. Таким образом, квантовые и голографические технологии очень близки.

Классическая голография – интеллектуальная технология управления направлением, цветом и поляризацией света, но у нее есть ограничения, такие как помехи от нежелательных источников света и сильная чувствительность к механическим нестабильностям. Процессы квантовых технологий освобождают голографию от этих ограничений классической когерентности и вводят голографию в квантовую сферу. Использование запутанных фотонов предлагает новые способы создания более четких и детализированных голограмм, что открывает новые возможности для практического применения этой техники.

Экспериментальная технология, из рамок которой еще не вышла квантовая голография, может иметь важные применения во многих областях, выходящих за рамки того, что могут достичь современные голограммы. Одним из таких приложений может быть медицинская визуализация и биосенсорика, где голография уже используется в микроскопии для тщательного изучения деталей деликатных образцов, которые часто почти прозрачны. Она позволяет создавать изображения с более высоким разрешением и низким уровнем шума, которые могут выявить мелкие детали клеток и получить знания о процессах передачи информации на клеточном уровне. Работа также может быть важна для квантовых компьютеров, связи и сенсорики. Прототипы этих технологий используют запутанные фотоны.

Цель настоящей статьи заключается в попытке отразить развитие квантовой голографии от первых статей начала века «Quantum holography» (2001г.) [6] до последних работ «Polarization entanglement-enabled quantum holography» (2021г.) [7], в названии которых, что не трудно заметить, есть отличие только в одном слове, поскольку запутанность лежит в основе квантовой голографии, но пройденный путь огромен. При этом хотелось бы понять, как квантовая голография и ее приложения позволят нам решить основную задачу одного из разделов проекта КНИТУ-КАИ по программе ПСАЛ-2030 - разработка научных основ проектирования методов и средств интегральной микроволновой фотоники и квантовой сенсорики для реализации многосенсорных распределенных измерений на примере решения пассивных и активных задач радиолокации и проведения сравнительного анализа степени улучшения метрологических и технико-экономических характеристик, достигнутых новыми интегральными оптическими и квантовыми средствами, в том числе квантовой голографией, сопряженными с аппаратом микроволновых и терагерцовых преобразований.

1. Квантовая голография

Квантовая голография обладает всеми преимуществами голографии, однако в ней присутствуют и эффекты, позволяющие создавать голограммы принципиально новыми методами.

С помощью квантовой голографии была получена голограмма одиночного фотона: фотон с неизвестной поляризацией столкнули с эталонным и зарегистрировали, как наложился друг на друга их волновые функции [8]. Для реконструкции волновой функции отдельной световой частицы была использована квантовая двухфотонная интерференция (эффект Хонга-Оу-Манделя). Это позволило получить пространственное распределение неизвестной частицы. Схематически эксперимент представлен на рис. 1.

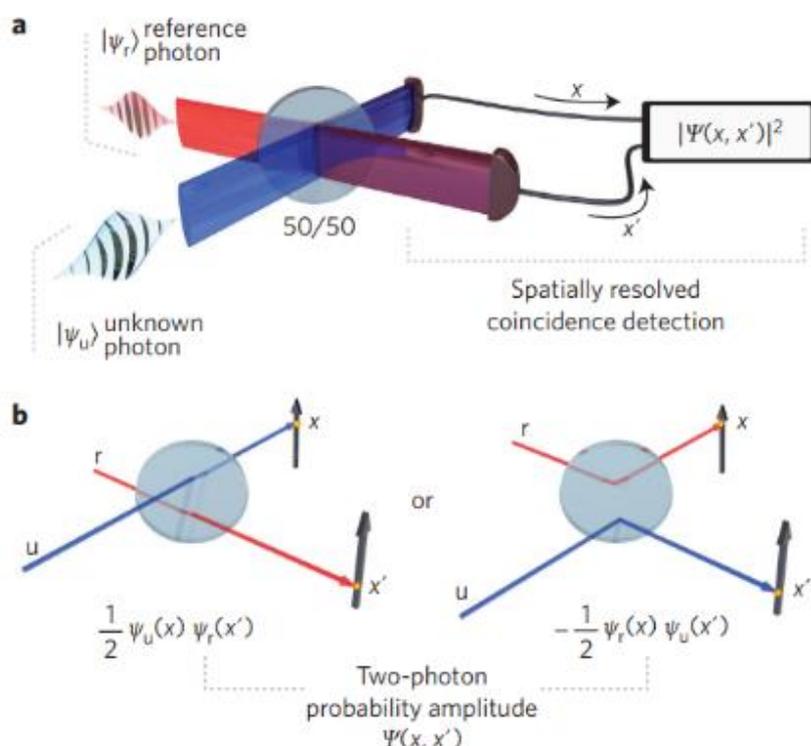


Рис.1. Квантовая интерференция двух пространственно структурированных фотонов: аналогия классической голографии (a); амплитуды вероятности двух классически исключающих, но квантово-механически сосуществующих сценариев (b) прохождения через светоделитель (слева) и отражения от светоделителя (справа)[8]

На рис. 1,*a* по аналогии с классической голографией, многократно перекрывают неизвестный фотон с эталонным (известным) фотоном с постоянным локальным профилем фазы на светоделителе 50/50. События совпадения, локализованные в x и x' , обеспечивают совместное распределение вероятностей, которое чувствительно к любым различиям между квантовыми волновыми функциями фотонов, включая локальные изменения их фаз. На рис. 1,*b* показано, что пространственно локализованные события совпадения (x, x') возникают в результате неразрушающего вмешательства амплитуд вероятности двух классически исключающих, но квантово-механически сосуществующих сценариев. Слева: неизвестный фотон в x и эталонный фотон в x' прошли через светоделитель. Справа: оба фотона, локализованные наоборот в x' и x , были отражены от светоделителя. Было предположено, что в будущем станет возможно аналогичным образом восстанавливать волновые функции и более сложных квантовых объектов, включая некоторые атомы.

Основной вывод [6]: квантовая запутанность – источник голографического пространства!!! В [7] создана квантовая голограмма уже без сложения двух волн. Схема эксперимента представлена на рис. 2.

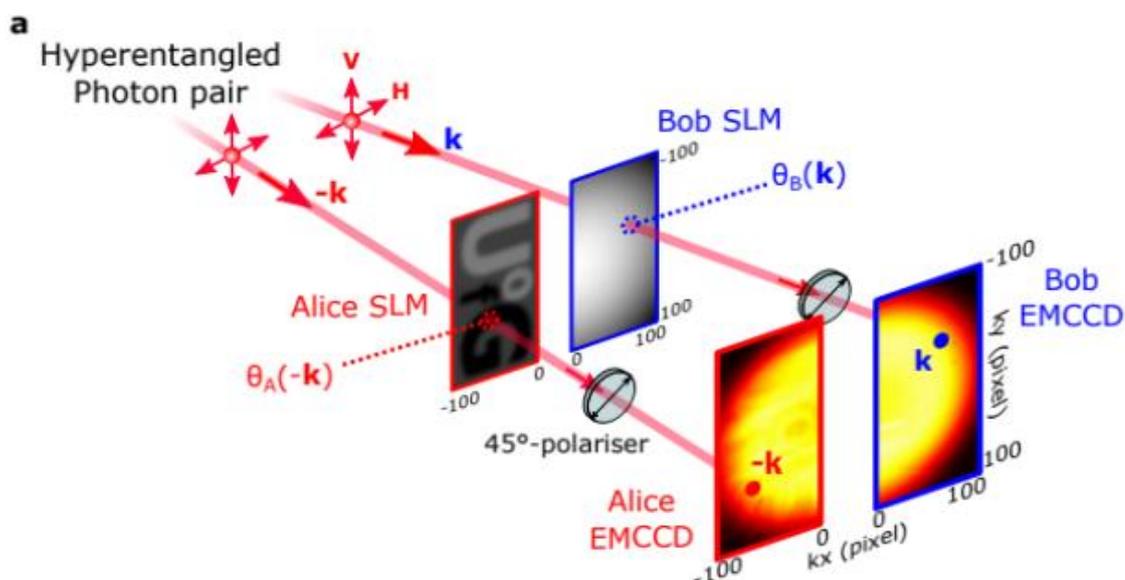


Рис.2. Схема эксперимента [7]

Эксперимент напоминал оптический, но в квантовой голографии присутствуют и эффекты, позволяющие создавать голограммы принципиально новыми методами.

Как и в оптических экспериментах, они использовали лазерный луч, который разделили на два пучка с помощью нелинейного кристалла. Кристалл позволил создать запутанные фотоны, находящиеся в связанных квантовых состояниях, т.е., когда что-то изменяет свойства (направление движения и поляризация) фотона в одном пучке, это влияет и на свойства запутанного с ним фотона в другом. Один поток фотонов попадал в пространственный модулятор света, содержащий изображаемый предмет. В качестве предмета использовали буквы «UofG» (аббревиатура названия университета) на жидкокристаллическом дисплее, а также кусочки скотча, капли силиконового масла и птичье перо. Второй поток фотонов проходил через другой модулятор, чтобы избавиться от фазовых искажений, вызванных двулучепреломлением в нелинейном кристалле. Оба пучка после прохождения модуляторов попадали на цифровые камеры. Используемые в эксперименте ПЗС-камеры имели очень высокое разрешение, до 10000 пикселей на изображение каждого запутанного фотона.

В квантовом эксперименте использовано уникальное свойство запутанных фотонов: их способность влиять друг на друга без каких-либо взаимодействий. Из-за этого влияния между сдвигами фаз отдельных пучков появились корреляции, которых оказалось достаточно для построения изображения.

На рис. 2 пара запутанных фотонов проходит через два модулятора (SLM) и регистрируется двумя камерами (EMCCD). Один из модуляторов регистрирует фотоны с положительным поперечным импульсом по оси x , другой – с отрицательным. Чтобы создать голограмму, один из модуляторов необходим для измерения корреляций интенсивности на обеих камерах, в том числе при наличии системных помех в виде постороннего рассеянного света. Наличие помех не помешало получить изображение с четкими контурами, так что новый метод голографии менее восприимчив к внешним воздействиям, чем классическая интерференция.

В работе также подтверждено неравенство Клаузера-Хорна-Шимони-Хольта, для чего в эксперименте также был использован второй модулятор. Это неравенство является прямым следствием теоремы Белла, позволяющей экспериментально доказать существование квантовой запутанности. Подтвердив это неравенство, ученые показали, что квантовую

голографию можно использовать не только для построения изображений, но и для получения характеристик квантовых состояний. Было отмечено, что голограмму можно получить и без второго модулятора. В таком случае перед камерой, регистрирующей второй пучок, нужно было бы установить вращающийся поляризатор, а фазовые искажения учесть в компьютерной модели.

Разработанный в [7] процесс освобождает систему от ограничений классической когерентности и вводит голографию в квантовую сферу.

2. Квантовая голографическая телепортация

Одной из составляющих гипотетической «Теории всего» является голографический принцип. Он утверждает, что гравитация в трехмерном объеме может быть описана квантовой теорией на двумерной поверхности, ограничивающей этот объем. Однако понимание того, каким образом информация о взаимодействии, имеющем место в пространстве большей размерности, может быть получена из пространства меньшей размерности, до сих пор остается неизвестной. Квантовая запутанность может быть ключом к решению этого вопроса. При помощи квантовой теории, используя данные о квантовой запутанности в двух измерениях, можно вычислить плотность вакуумной энергии, которая в трехмерном пространстве проявляет себя в гравитационном взаимодействии. Это аналогично тому, как при рентгеновском обследовании о состоянии (трехмерных) органов в теле становится известно по их (двумерным) снимкам. Как одно из предположений, в статье [9] рассмотрена квантовая версия голографического принципа QНР [10-11]. Согласно QНР, или квантовой голографии, информация, закодированная граничной поверхностью, составляет один кубит (на единицу площади Планка) вместо классического бита. Авторы вводят фермионные поля в объеме, граничной поверхностью которого является двумерная сфера. Удвоение фермионных степеней свободы и использование преобразований Боголюбова приводят к тому, что пары ребер спиновой сети пронзают граничную поверхность двойными проколами, создавая пиксели области, кодирующие кубит.

В соответствии с принципами квантовой физики возможна квантовая телепортация – передача произвольного квантового состояния электромагнитного поля или другого объекта из одного места в другое с помощью классического обмена информацией в комбинации с квантовым каналом, использующим перепутанные состояния [12].

В первых схемах телепортации рассматривались, в основном, одномодовые поля. Использование протокола, позволяющего телепортировать пространственно многомодовые состояния поля, дает возможность значительно увеличить число каналов, по которым может быть осуществлена параллельная телепортация. Такая телепортация названа квантовой голографической телепортацией. Одной из особенностей квантовой голографической телепортации является возможность управления выполнением голографической телепортацией с помощью оптических элементов, помещаемых на пути распространения пучка. Еще одна важная особенность – при квантовой голографической телепортации входной сигнал обладает большим числом степеней свободы.

В [12] считается, что квантовую голографическую телепортацию можно рассматривать как обобщение на квантовую область традиционной голографии.

3. Квантовая память

Запись квантовых состояний света на атомную среду с возможностью их хранения и последующего восстановления является одним из главных вопросов квантовой коммуникации и информатики. Основная цель квантовой памяти – хранение световых импульсов без разрушения их квантовых состояний, т.е. нахождение таких систем хранения, которые

могли бы обеспечить возможность записи, сохранения и последующего считывания одновременно двух некоммутирующих переменных.

В [13] обсуждается вариант квантовой памяти, основанный на адиабатическом приближении во взаимодействии света с веществом. Адиабатическое приближение может быть применено для системных процессов, развивающихся на временах, много больших времени жизни атомного состояния. Главное – проблема запоминания поперечного распределения света на квантовом уровне, продольное - не рассматривается. Были выбраны простейшие формы сигнального и управляющего импульсов. В результате оптимизация сводится к подбору приемлемого соотношения между безразмерной длиной ячейки и безразмерными длительностями импульсов при записи и при считывании. Такой существенно более простой путь приводит к весьма схожим значениям эффективности по сравнению с методом [14], особенно если расчет производить не для гауссова профиля.

В [15] представлена многомодовая схема квантовой памяти, которую можно рассматривать как тонкую квантовую голограмму. Эта голограмма сохраняет такие квантовые особенности изображения, как многоходовая суперпозиция и перепутанные квантовые состояния. На рис. 3 представлены этапы записи квантовой голограммы с помощью неразрушающего взаимодействия с использованием обратной связи.

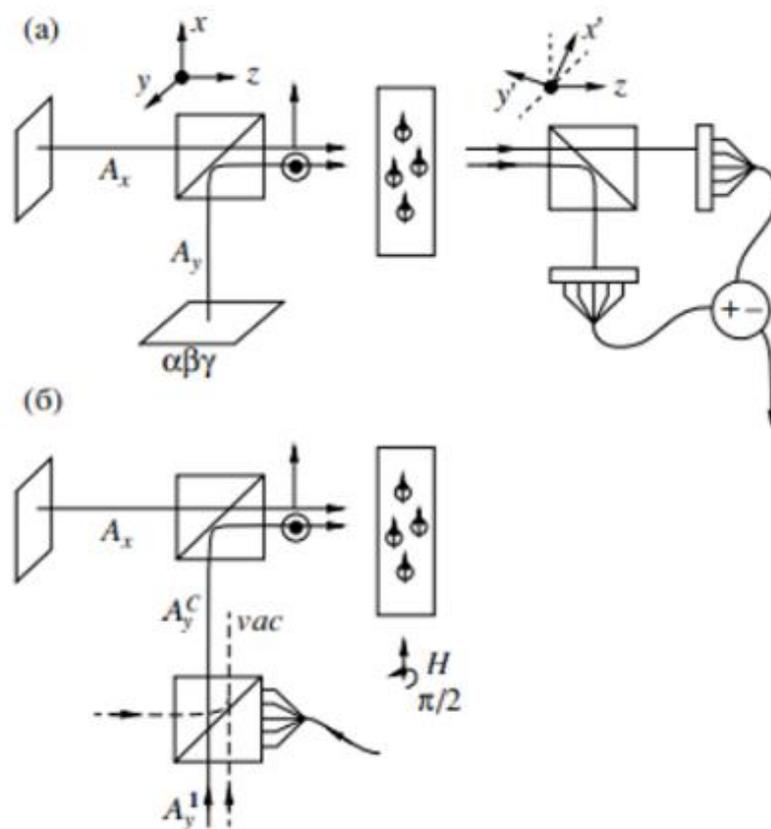


Рис.3. Два этапа записи квантовой голограммы:

а – первый проход света и измерение; б – второй проход с использованием обратной связи [15]

В представленной схеме обратная связь осуществляется через неразрушающее взаимодействие с управляющей световой волной, промодулированной сигналом обратной связи. В процессе записи для воздействия на ансамбль неподвижных атомов используются измерение поляризационных параметров прошедшей световой волны и обратная связь. По мнению авторов, информационная емкость квантовой голограммы с обратной связью будет

значительно превосходить информационную емкость пространственно одномодовой квантовой памяти.

Авторы работы [16] отмечают, что в создании квантовой памяти ключевой проблемой остается реализация управляемого высокоэффективного интерфейса, обеспечивающего обратимый перенос кубитов (ниже микроволновых фотонов) из волноводного тракта, или квантовых процессоров в квантовую память с последующим восстановлением фотонов в произвольный момент времени. Предложена схема (рис. 4) многорезонаторной квантовой памяти с переключателем, которая имеет большие функциональные возможности для сохранения сигнальных фотонов и позволяет не слишком быстро подключать квантовую память к внешним устройствам.

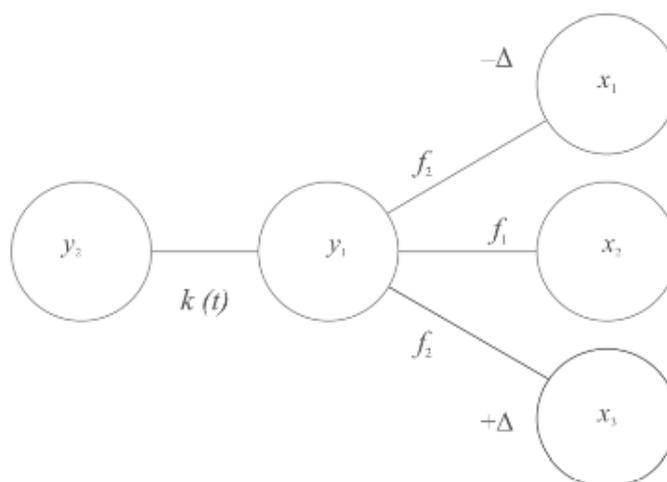


Рис.4. Схема четырехрезонаторной квантовой памяти, соединенной через переключатель с внешним резонатором [16]

Схема квантовой памяти включает 4 резонатора, 3 из которых ($x_{1,2,3}(t)$) связаны с общим резонатором $y_1(t)$, соединенным через контролируемую связь $k(t)$ с внешним резонатором (сверхпроводящим сигнальным кубитом) $y_2(t)$.

На взгляд авторов, несомненный интерес представляет реализация предложенной квантовой памяти на системе оптических резонаторов, в частности, на компактных Фабри–Перо резонаторах, позволяющих универсальную перестройку параметров микрорезонаторной ячейки со значительным усилением взаимодействия моды поля с атомами.

В [17] предлагается новый метод хранения и извлечения изображений в запутанных квантовых системах. Авторы использовали 2-кубитное (или 3-кубитное) запутанное квантовое состояние для представления цветов 3 пикселей (или 5 пикселей) цветных или серых изображений и разработали квантовые схемы для хранения изображений в запутанных квантовых системах.

Кроме того, в работе иллюстрируют, как извлекать изображения, хранящиеся в запутанных квантовых системах, и анализируют, что для получения правильного запутанного квантового состояния требуется максимальное количество измерений. Благодаря использованию преимуществ свойств суперпозиции и запутанности квантовых состояний предложенный метод улучшает способность сжатия изображений.

4. Квантовые изображения

Квантовая обработка изображений является важной проблемой при разработке квантовых компьютеров. Квантовая обработка изображений обычно включает в себя квантовые представления изображений, алгоритмы квантовой обработки изображений и измерение

квантового изображения. Среди них квантовое представление изображений является важной частью квантовой обработки изображений. В области квантовых изображений основным шагом является построение соответствующего представления квантового изображения для хранения информации об изображении, переносимой спектральной энергией.

В [18] представлены и проанализированы последние результаты исследований квантового представления изображений. Впервые представление квантового изображения решетки кубитов было предложено в 2003 году Венегас-Андрача и Бозе. Позже Латорре и др. предложили квантовое представление, называемое реальным. Ле и др. предложили в 2011 году метод представления изображений, основанный на квантовой запутанности в квантовом гибком представлении квантовых изображений FRQI (гибкое представление квантовых изображений) [19]. Эти три представления стали классическими в области квантового изображения и хорошо зарекомендовали себя при хранении и получении изображений. Отмечено, что представление квантового изображения FRQI, хорошо зарекомендовавшее себя при хранении и получении изображений, использует нормализованное состояние для хранения информации о местоположении и информации о цвете каждого пикселя на изображении, что значительно уменьшает количество кубитов, необходимых в процессе подготовки квантового изображения. Кроме того, FRQI может одновременно осуществлять геометрическое преобразование и цветовое преобразование изображений. Поэтому это представление применяется для поиска в базе данных изображений, технологиях квантового водяного знака, технологиях квантового кино и др. [20]. Однако в последние годы представления квантовых изображений были в значительной степени расширены.

Отмечается, что квантовая обработка изображений – междисциплинарная комплексная область, которая в настоящее время находится в зачаточном состоянии. Исследования в основном сосредоточены на разработке инструментов обработки.

В [21] предложен алгоритм квантового обнаружения краев изображения, который использует улучшенный оператор Собеля (Sobel) для повышения производительности, чтобы решить проблему неудовлетворительных традиционных методов обнаружения. В практическом применении объем обрабатываемых данных изображения резко возрастает, и вычислительная мощность классического компьютера становится ограничением. Квантовая обработка информации может эффективно ускорить многие классические задачи благодаря квантово-механическим характеристикам, таким как квантовая суперпозиция, запутанность, параллелизм. Предлагаемый метод использует новое улучшенное квантовое представление для хранения квантовых изображений, которое сохраняет все пиксели изображения в наложенном состоянии, реализуя параллельные вычисления. Улучшенный оператор Собеля с восемью направлениями используется для вычисления градиента серого, а квантовая схема предназначена для реализации квантового обнаружения границ. Улучшенный алгоритм может обнаруживать больше деталей по краям и обладает высокой адаптивностью. Рабочий процесс извлечения краев квантового изображения представлен на рис. 5.

5. Квантовые фантомные изображения

Существуют объекты, прямое оптическое наблюдение которых затруднено. Это в первую очередь полутонные биологические объекты, особо чувствительные к пронизывающему их излучению. Фантомные изображения – один из вариантов решения этой проблемы. Для формирования фантомных изображений необходим источник коррелированных световых пучков, один из которых взаимодействует с объектом, а другой – нет. При этом в объектном канале детектор дает информацию только о полной интенсивности прошедшего излучения.

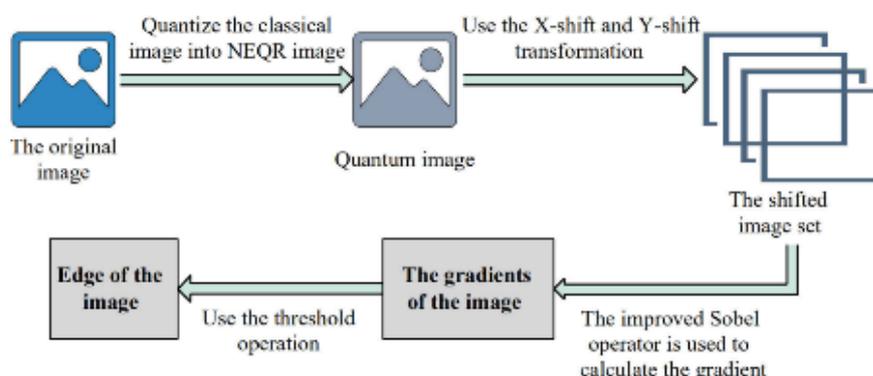


Рис.5. Рабочий процесс извлечения краев квантового изображения [21]

Сопряженный пучок не взаимодействует с объектом, но регистрируется ПЗС-матрицей, допуская измерение пространственной корреляционной функции интенсивности между двумя каналами [22, 23]. Название «фантомное изображение» отражает тот факт, что результат измерений получают из сканирования положения фотона, который никогда не проходит сквозь объект, а лишь просто коррелирован с «прощупывающим» фотоном. В стандартной схеме наблюдения изображения имеются источник света, облучающий объект, набор оптических элементов, строящих изображение, и система регистрации. При формировании и детектировании фантомного изображения (ghost image) для извлечения информации о неизвестном объекте используется корреляция между двумя пучками.

В [24] приведены две схемы наблюдения фантомных изображений. Схема наблюдения со сканирующим детектором приведена на рис. 6.

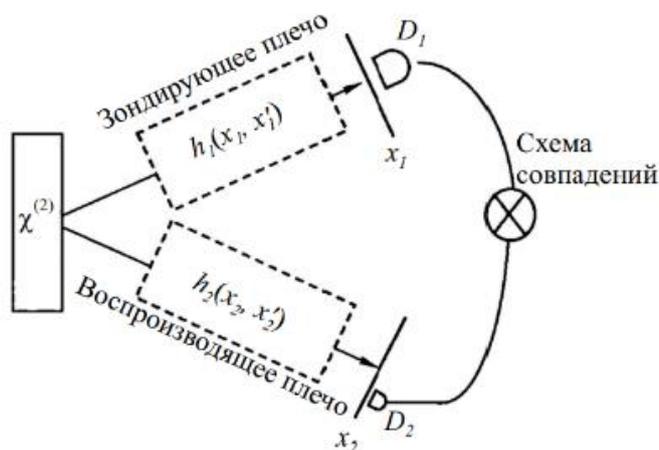


Рис. 6. Схема наблюдения фантомных изображений со сканирующим детектором [24]

Фотоны из пары, находящейся в запутанном состоянии, разделяются в пространстве, и каждый из них распространяется по своему оптическому пути — зондирующему и воспроизводящему. Название «фантомное изображение» отражает тот факт, что результат измерений получают из сканирования положения фотона, который никогда не проходит сквозь объект, а лишь просто коррелирован с «прощупывающим» фотоном.

Прямое детектирование фотона в зондирующем плече не несет информации о пространственной структуре объекта в плоскости x_1 , потому что детектор D_1 является интегрирующим, т. е. он фиксирован в определенном положении, отвечая только за регистрацию фотона в широком возможном телесном угле его существования, не давая информации о

его поперечной координате. В то же время детектор D_2 – точечный, он сканирует поперечную координату фотона в воспроизводящем плече при многократном повторении испускания запутанных пар фотонов. Таким образом, информация об объекте восстанавливается из измерения числа парных фотоотсчетов, т. е. взаимных совпадений, как функция поперечной координаты фотона воспроизведения.

Во второй схеме наблюдения фантомных изображений, вместо сканирующего детектора D_2 используется матрица неподвижных детекторов (рис. 7). В этом случае процесс значительно ускоряется, т. к. при сканировании происходит существенная потеря числа зарегистрированных парных фотоотсчетов.

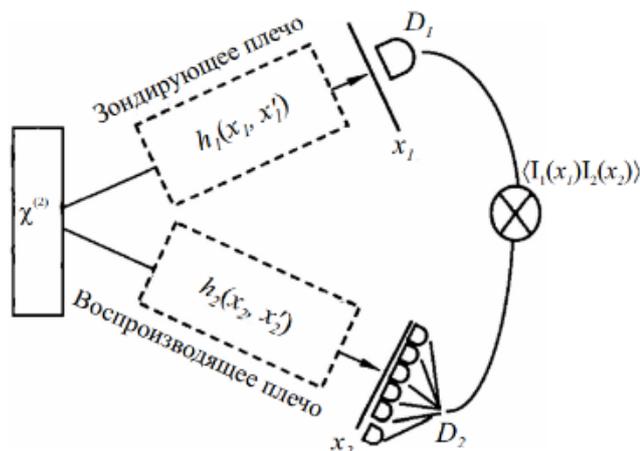


Рис. 7. Схема наблюдения фантомных изображений с матрицей детекторов [24]

В работе [25] изучается применение многомодовых запутанных квантовых состояний света, которые позволяют создать одновременно несколько фантомных изображений (мультиплексировать фантомные изображения) с различающимися частотами. Рассматривается мультиплексирование фантомных изображений с использованием параметрического распада фотонов накачки на два фотона с разными частотами и последующего их смешения в том же кристалле с фотонами накачки. Схема мультиплексирования фантомного изображения приведена на рис. 8.

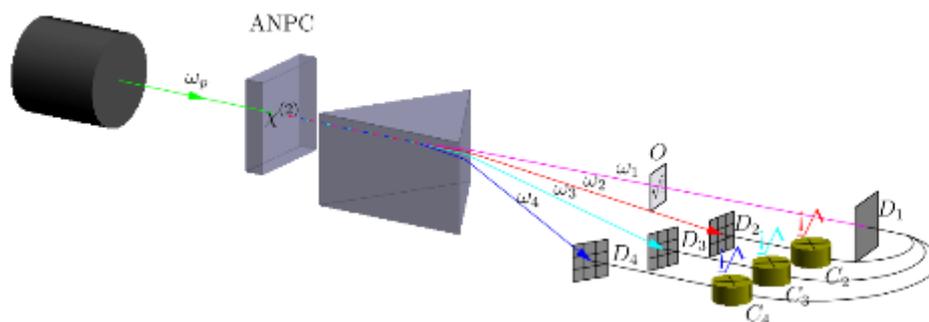


Рис. 8. Схема формирования мультиплицированных фантомных изображений: ANPC – аперiodически поляризованный нелинейный кристалл; ω_p – частота накачки; $\omega_1, \dots, \omega_4$ – частоты, на которых генерируются запутанные состояния; O – объект; D_n – фотодетекторы в объектном ($n = 1$) и восстанавливающих ($n = 2, \dots, 4$) каналах; C_n – корреляторы интенсивностей. Объективы в каналах не показаны [25]

Источником излучения служат связанные параметрические процессы, в которых формируются четырехчастотные запутанные световые поля. На кристалл падает монохроматическое излучение накачки с частотой ω_p . В кристалле фотоны накачки распадаются на два фотона, частоты которых ω_1 и ω_2 связаны: $\omega_p = \omega_1 + \omega_2$. Мультиплексирование фантомных изображений позволяет увеличить помехозащищенность, поскольку увеличивает количество передаваемой информации, что может быть использовано для улучшения качества интерпретации полученных данных.

Одним из важных аргументов в пользу использования квантовых фантомных изображений является обеспечение наиболее щадящих условий освещения для исследуемого объекта, когда воздействие излучения на объект (иногда необратимое) минимально. Это особенно важно при облучении живых объектов, например, путем облучения рентгеновскими лучами.

В [26] предлагается новое схематическое решение, которое обеспечивает, с одной стороны, безопасность объекта исследования за счет снижения интенсивности света, а с другой стороны, улучшение качества изображения. Более того, увеличение отношения сигнал/шум, характерного для фантомных изображений, генерируемых схемой совпадения, остается в силе, т. е. можно объединить преимущества метода фантомного изображения с преимуществами обычного формирования изображения.

Рассмотрим рис. 9, на котором изображена схема формирования пары квантовых изображений.

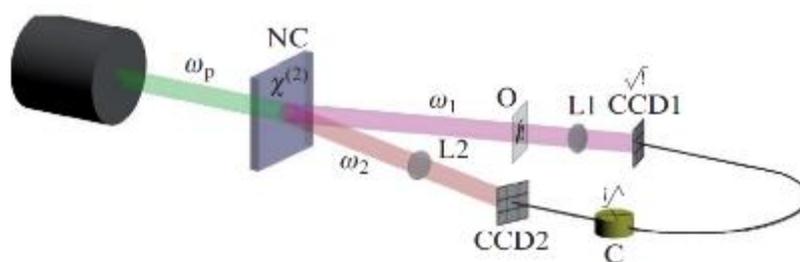


Рис. 9. Схема формирования пары квантовых изображений [26]:
 NC – нелинейный кристалл; O – объект; L1, L2 – оптические линзы;
 CCD1, CCD2 – матрицы фотоприемников в объектном и опорном каналах;
 C – коррелятор интенсивности; ω_p – частота квантов накачки пучка;
 ω_1 и ω_2 – частоты запутанных пар фотонов

В объектном канале, как и в опорном канале, вместо интегрирующего детектора используется матрица, на которой с помощью оптической линзы формируется обычное изображение исследуемого объекта. В случае рентгеновского облучения матрица размещается непосредственно за объектом, так как в области рентгеновского излучения хорошо работают только отражающие оптические системы с большими углами падения, и качество изображения оставляет желать лучшего. Таким образом, в рассматриваемой схеме регистрируются два квантовых изображения, обычное изображение и фантомное. Их последующая компьютерная обработка позволяет уменьшить минимально необходимое количество фотонов, проникающих через объект, и улучшить качество изображения.

В лазерных технологиях и дистанционном зондировании созданию фантомных изображений в первую очередь препятствуют высокие требования, связанные с вычислительными затратами. В [27] предлагается реализация квантовой схемы фантомного изображения, в которой узоры спеклов и фазовая маска кодируются с использованием квантового представления изображений. Для достижения этой цели сформировано несколько квантовых модулей (квантовый накопитель, квантовый множитель и квантовый делитель), введенных в механизм квантового фантомного изображения (QGI).

Основные достижения следующие:

1) С использованием квантовой суперпозиции был разработан квантовый регистр для расширения возможностей хранения квантового спекла. Кроме того, используя квантовые элементы (т. е. элементы Адамара и CNOT), была сгенерирована действительно случайная последовательность спекла, на основе которой качество изображения призраков было улучшено за счет корректировки частоты дискретизации спекла.

2) Используя квантовый параллелизм, для облегчения выполнения визуализации фантомов, были разработаны некоторые универсальные модули квантовой арифметики (такие как модули ACC, MUL и DIV) с низкой вычислительной сложностью.

Результаты исследования перспективны в области квантового шифрования изображений.

6. Квантовая стеганография изображений

Концепции криптографии и стеганографии не являются новыми. Двумя основными недостатками классической криптографии являются распределение ключей и безопасность. С быстрым развитием квантовых коммуникаций квантовое кодирование информации привлекло внимание экспертов всего мира, оно обеспечивает более безопасный и эффективный способ обработки информации по сравнению с классической обработкой информации.

В [28] рассматриваются вопросы использования квантовых подходов в криптографической системе и в области стеганографии. Стеганография – процесс сокрытия информации различных типов медиафайлов (аудио, текст, изображения и видео) в других медиафайлах. Схема квантовой стеганографии для изображения основана на новом усовершенствованном квантовом представлении (NEQR - Novel Enhanced Quantum Representation) [29] для квантовых изображений. В предлагаемой схеме три этапа аутентификации обеспечивают следующее: (а) преобразование пикселей в биты, (б) затем преобразование этих битов в кубиты квантовых изображений и (с) помещение кубитов в квантовое изображение обложки. Последний этап выполняется с помощью процесса скремблирования Арнольда [30]. Предлагаемая схема обеспечивает хорошую видимость и высокую емкость встраивания. Основываясь на результатах моделирования, можно сказать, что эффективность предложенной схемы квантовой стеганографии для изображения высока.

Квантовая стеганография может обеспечить безопасность передачи секретной информации за счет незаметности секретного канала [31].

В [32] предлагается протокол квантовой стеганографии изображений, основанный на квантовом расширении изображения и алгоритме поиска Гровера. Новый алгоритм использует представление квантового логарифмически полярного изображения (QUALPI – quantum algorithm log-polar image) для подготовки квантового изображения перед использованием метода квантового расширения для формирования суперпозиции нескольких копий изображения. Затем он встраивает секретное сообщение в одну квантовую копию изображения с определенным закодированным углом поворота. Чтобы точно извлечь встроенное секретное сообщение, используется алгоритм поиска Гровера для поиска правильной квантовой копии изображения. Блок-схема нового протокола квантовой стеганографии изображений с большой полезной нагрузкой приведен на рис. 10.

Основываясь на квантовой неопределенности и квантовых теоремах о неклонировании, новый алгоритм может не только обеспечить хорошую незаметность и безопасность, но и большую полезную нагрузку благодаря хорошей масштабируемости кодирования алгоритма.

7. Квантовая метрология

За последние 20 лет создание источников запутанных фотонов привели к возрождению квантово-оптической интерферометрии. Оптическая интерферометрия использовалась для проверки основ квантовой механики и реализации некоторых новых идей, связанных с квантовой запутанностью, таких как квантовая телепортация, криптография, литография, вычислительные логические элементы и квантовая метрология.

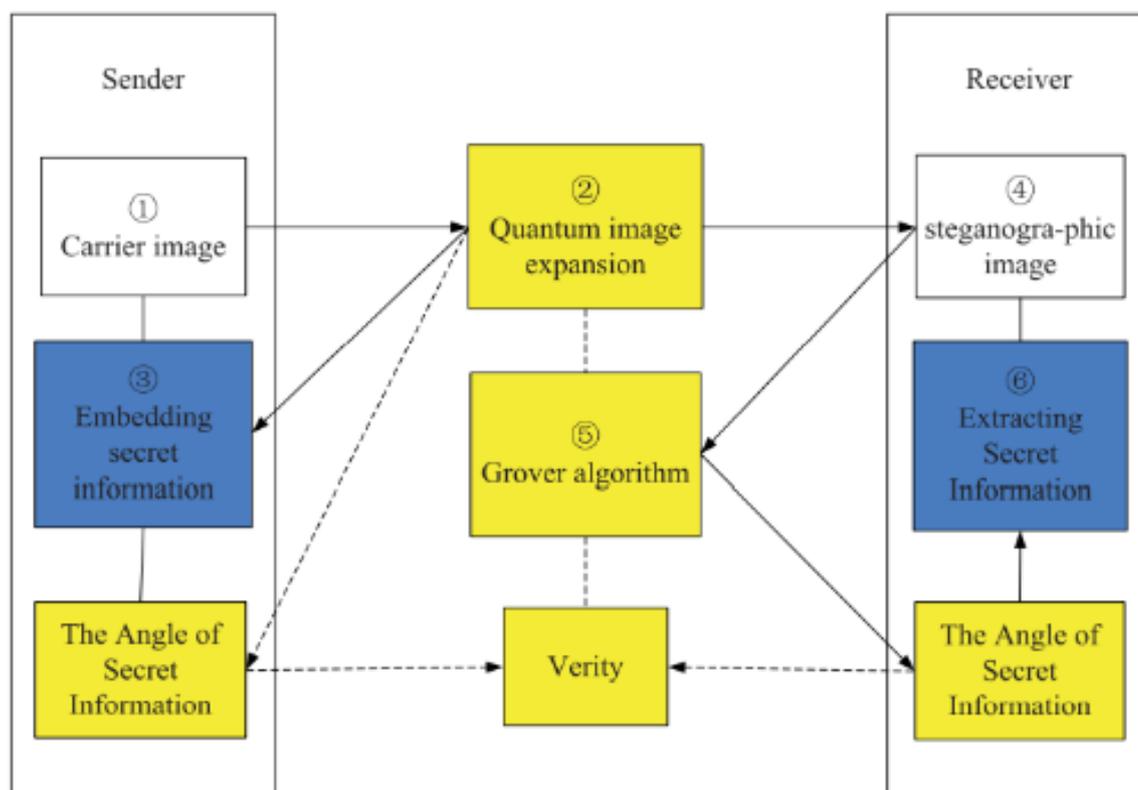


Рис. 10. Блок-схема нового протокола [32]

В [33] представлен краткий обзор квантовой оптической метрологии с акцентом на квантовые технологии, которые были продемонстрированы с состояниями $N00N$. Обзор не претендует на полноту и отсылает читателей к более ранним публикациям, например, [34-37], в которых сообщается о новых способах, которые были разработаны для использования квантовой оптической запутанности в квантовой метрологии.

В частности, в [37] описан эксперимент (рис. 11), в котором для измерения концентрации белка крови в буферном растворе использовали $N00N$ состояний при $N = 2$.

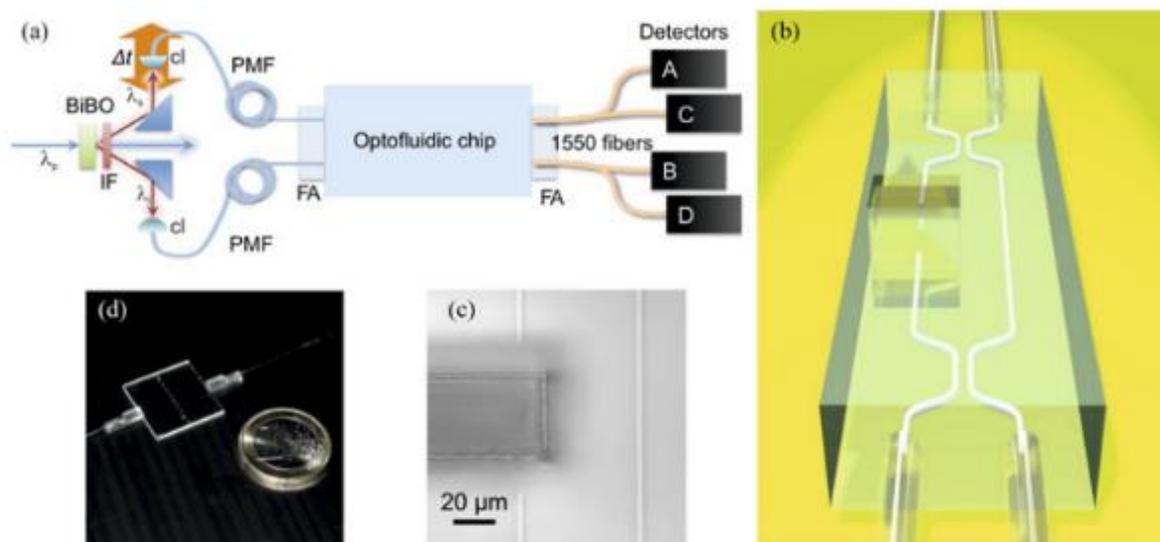


Рис. 11. Квантовая метрология в оптожидкостном устройстве: схема экспериментальной установки (а); схема интерферометра Маха-Цендера MZI (b); вид сверху опто-жидкостного интерфейса (с); изображение устройства с несколькими интерферометрами и микроканалами на чипе (d) [37]

На рис. 11,а приведена схема экспериментальной установки: лазер с накачкой при $\lambda_p=392,5$ нм генерирует пары направленных вниз фотонов при $\lambda_s = \lambda_i = 785$ нм в кристалле BiBO. IF – интерференционный фильтр, cl – объективы, PMF – волокна, поддерживающие поляризацию, а FA – волоконная матрица.

На рис. 11,б представлена схема MZI, подключенного к микроканалу. Жидкостный канал имеет прямоугольное поперечное сечение $500 \text{ мкм} \times 55 \text{ мкм}$ и простирается сверху до нижней поверхности стеклянной подложки (толщина 1 мм). MZI состоит из двух направленных ответвителей 50:50 и имеет два плеча одинаковой геометрической длины.

На рис. 11,с дан вид сверху опто-жидкостного интерфейса, на рис. 11,д – изображение устройства с несколькими интерферометрами и микроканалами на чипе вместе с волоконными решетками для соединения входного и выходного света.

В эксперименте использовалось опто-жидкостное устройство, состоящее из волноводного интерферометра, одно плечо которого проходит через микрофлюидный канал, содержащий раствор. Зависящий от концентрации показатель преломления раствора вызывает относительный сдвиг фазы между двумя плечами интерферометра, который затем обнаруживается с помощью детектирования совпадающего числа фотонов. Состояния $N=2$ $N00N$ были сгенерированы с использованием интерференции Хонга-Оу-Манделя с запутанными парами фотонов от источника параметрического преобразования вниз. На выходе для сбора фотонов использовался массив телекоммуникационных оптических волокон, которые были обнаружены с помощью детектирования совпадений на четырех однофотонных лавинных фотодиодах.

Предполагается, что запутанность фотонов можно использовать для преодоления предела дифракции Рэлея в лидарных измерительных системах, а квантовую иллюминацию на запутанных фотонах для решения задач радиолокационного типа.

8. Голограммы для терагерцового диапазона и создания оптических вихрей

Благодаря уникальным свойствам терагерцового (ТГц) излучения, ТГц-визуализация является эффективным методом неразрушающего контроля в биомедицине, материаловедении и т.д. Из-за относительно большой длины волны ТГц-излучения разрешение изображения обычно находится на уровне сотен микрометров или даже миллиметров, что стало важным фактором, ограничивающим его применение во многих областях.

Цифровая ТГц-голография, представляющая собой комбинацию технологии ТГц-диапазона и цифровой голографии, является конкурентоспособным методом решения этой проблемы. Она позволяет одновременно реконструировать амплитудное и фазовое распределения изображений контролируемого объекта.

В [38] продемонстрирована линейная ТГц-голография без линз на чипе для достижения пространственного разрешения 40 мкм, соответствующего $\sim 0,7\lambda$, с числовой апертурой $\sim 0,87$. Установка основана на мощном непрерывном ТГц-лазере с частотой 5,24 ТГц ($\lambda = 57,25$ мкм) и матрице детекторов-микроболометров высокого разрешения (640×512 пикселей) с шагом 17 мкм (рис. 12).

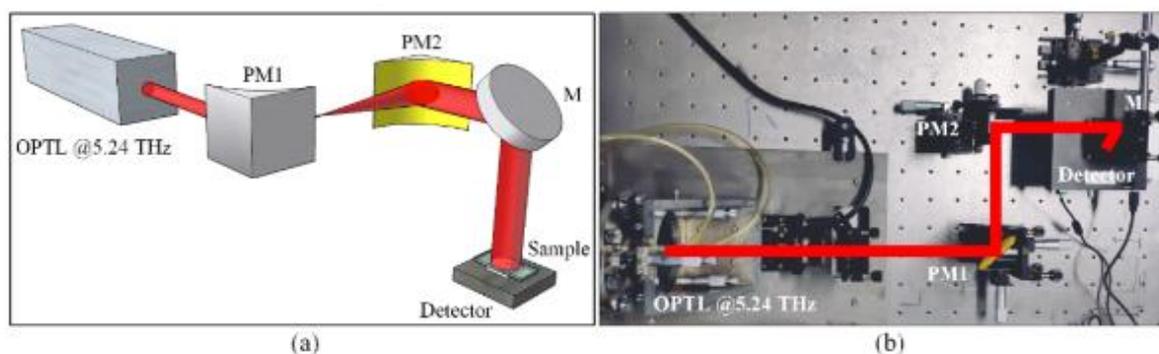


Рис. 12. Схематическое (а) и реальное (б) изображение экспериментальной установки [38]

На рис. 12 изображены: PM1 и PM2 – конфокальные внеосевые параболические зеркала с золотым покрытием с фокусным расстоянием 50,8 мм и 101,6 мм соответственно. Выходной ТГц-лазерный луч диаметром ~ 10 мм расширяется и коллимируется до ~ 20 мм, так что матрица детекторов может быть полностью покрыта ТГц-волной. Волна, рассеянная образцом, образует объектную волну, в то время как нерассеянная часть освещения образует опорную волну. Результирующая интерференционная картина называется встроенной голограммой.

Встроенная голография на чипе страдает от артефактов двойного изображения, которые затрудняют реконструкцию. Для решения этой проблемы предложена итеративная оптимизация, в которой ограничение обычного объекта и ограничение разреженности L1 могут быть объединены для эффективного восстановления сложного распределения амплитуды выборки. Поскольку информация о фазе теряется во время записи голограммы, голографическую реконструкцию можно рассматривать как проблему восстановления фазы. Структура оптимизации, а также алгоритм множественных ограничений, основанный на разреженности для решения этой обратной задачи, основанные на разреженности, могут быть применены к голографии и в других диапазонах волн без ограничения длины волны.

Оптические вихревые решетки (OVA) вызвали значительный интерес у исследователей в связи с их многообещающими перспективами, начиная от классической и заканчивая квантовой физикой. Принимая изолированный идеальный оптический вихрь (POV) в качестве элемента матрицы, диаметр которого не зависит от его топологического заряда

(ТС), в [39] предлагаются комбинированные голограммы только для фазы сложных массивов POV. Предложенная схема (рис. 13) позволяет динамически управлять несколькими кольцами, ТС, эксцентриситетом, размером и количеством оптических вихрей.

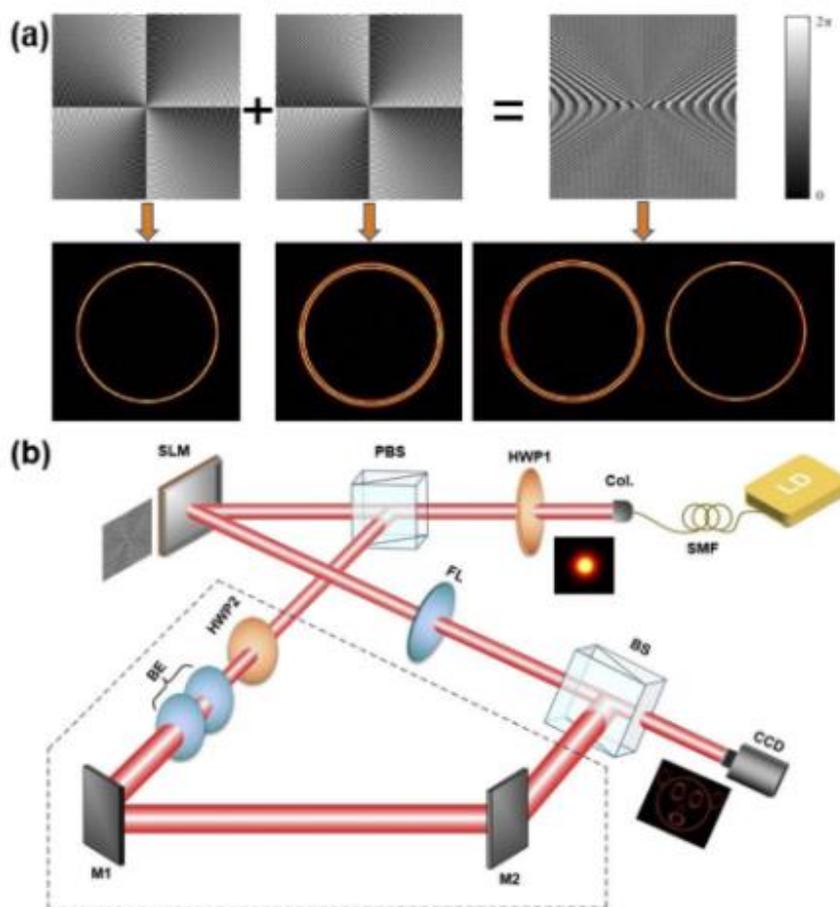


Рис. 13. Процесс формирования голографической решетки для создания матрицы POV (a) и экспериментальный макет для его реализации (b) [39]

На рис. 13,b показаны: LD – лазерный диод; SMF – одномодовое волокно; Col – коллиматор; HWP1-2 – полуволновая пластина; PBS – поляризационный светоделитель; SLM – пространственный модулятор света; FL – линза Фурье; BE – расширитель лучей; M1-2 – зеркала; BS – светоделитель; CCD – инфракрасная ПЗС-камера. Содержимое пунктирной рамки представляет собой интерференционный оптический путь.

Помимо традиционного элемента POV с одним кольцом, авторы создали библиотеку для получения оптимизированного элемента POV с двойным кольцом. При выборе нескольких выборочных степеней свободы генерируется ряд массивов POV, которые не только демонстрируют универсальность метода, но и раскрывают аналитические взаимосвязи между заданными параметрами и шаблонами интенсивности.

Отдельно следует выделить научную школу Уфимского государственного авиационного технического университета (УГАТУ), занимающуюся вопросами применения вихревых лучей для различных областей знания, в том числе с перспективой их использования в квантовой сенсорике [40-44].

В [43] обсуждаются три основных метода, которые обычно используются для генерации оптических лучей с орбитальным угловым моментом (ОУМ). Эти методы включают

использование элементов дифракционной оптики (DOE), метаповерхностей (MS) и фотонных интегральных схем (PIC) для создания плоскостных и внеплоскостных ОУМ. Кроме того, также было представлено развитие методов обнаружения ОУМ.

В [42] представлена принципиальная схема микроволновой фотонной системы RoF с вихревыми сигналами, в которой радиочастота определяется разностью длин волн двух лазеров. Предполагается, что генерация вихревого сигнала может осуществляться через вихревую волоконно-оптическую периодическую структуру, которую можно получить по технологии, аналогичной изготовлению длиннопериодных волоконных брэгговских решеток, записанных голографическими методами. Параметры решетки моделируются в предположении, что на заданный вихревой элемент воздействует основная световодная мода (LP01), а отражается мода высшего порядка (LP11). Было обнаружено, что искажение вихревого сигнала можно уменьшить, введя аподизацию и чирпирование этой периодической структуры. Были оценены следующие оптимальные параметры: функции множителя аподизации и чирпа, при которых искажения амплитуды и фазы вихревого сигнала, а также появление нежелательного углового искажения будут минимальными. Показано, что такие решетки можно использовать в системах адресных датчиков [45-50], использующих орбитальный угловой момент (ОУМ) световой волны в качестве уникального адреса датчика.

Заключение

Анализ рассмотренных разработок в области квантовой голографии позволяет сделать вывод о том, что квантовая голография является динамически развивающейся наукой. Исследования проводятся в следующих направлениях:

- совершенствование квантовых экспериментов;
- использование в экспериментах запутанных фотонов;
- распространение подходов квантовой голографии на терагерцовый диапазон;
- создание оптических вихревых решеток;
- использование квантовой запутанности в квантовой метрологии;
- квантовая обработка и измерения изображений;
- квантовые фантомные изображения;
- применение квантовой голографии при создании квантовой памяти;
- квантовая стеганография.

Квантовая голография обладает всеми преимуществами голографии, однако в ней присутствуют и эффекты, позволяющие создавать голограммы принципиально новыми методами. Показано, что квантовую голографию можно использовать не только для построения изображений, но и для получения характеристик квантовых состояний.

Весьма важными представляются исследования, посвященные квантовой обработке изображений. Отмечается, что квантовая обработка изображений – междисциплинарная комплексная область, которая в настоящее время находится в зачаточном состоянии. Исследования в основном сосредоточены на разработке инструментов обработки.

Анализируя существующее приборное обеспечение в области квантовой голографии следует отметить, что практически все направления исследований в квантовой голографии требуют большой вычислительной мощности компьютеров, поэтому много работ посвящено созданию алгоритмов обработки (протоколов), позволяющих несколько минимизировать эти затраты. Для реализации физических экспериментов используют лазеры, нелинейные кристаллы, позволяющие создать запутанные фотоны, находящиеся в связанных квантовых состояниях, ПЗС-камеры очень высокого разрешения.

Все сказанное подтверждает: квантовая запутанность является источником голографического пространства.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о перспективности применения квантовой голографии в целях разработки научных основ проектирования методов и средств интегральной микроволновой/терагерцовой фотонной и квантовой сенсорики для реализации квантовых многосенсорных распределенных измерений на примере решения пассивных и активных лидарных задач и задач радиолокации, а также проведения сравнительного анализа степени улучшения метрологических и технико-экономических характеристик, достигнутых новыми интегральными оптическими и квантовыми средствами, сопряженными с аппаратом микроволновых и терагерцовых преобразований.

Источники финансирования, благодарности

Научные исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения проекта КНИТУ-КАИ по программе стратегического академического лидерства «Приоритет – 2030».

Список литературы

1. Интернет-магазин “HOLOSHOP.RU” [сайт]. – Орел. –URL: [https:// www.holoshop.ru](https://www.holoshop.ru) (дата обращения 15 июня 2022г.). – Текст электронный.
2. Кольер, Р. Оптическая голография / Р. Кольер, К.Беркхарт, Л. Лин; пер. с англ. – М.: Мир. - 1973. - 672 с.
3. Одинокоев С.Б. Цифровая голография – от математической идеи до реальных приложений компьютерной оптики / С.Б. Одинокоев, Г.И. Грейсух, Г.Г. Левин // VI Международная конференция и молодёжная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2020). - С. 757-769.
4. Slinger Ch. Computer-Generated Holography as a Generic Display Technology/ Ch. Slinger, C. Cameron, M. Stanley // Computer. - 2005. - V. 38, № 8. - P.46–53.
5. Schnars U. Digital hologram recording, numerical reconstruction and related techniques / U. Schnars, W. Jueptner // Spriger -Verlag. - 2004. - 164 p.
6. Ayman F. Abouraddy, Bahaa E. A. Saleh, Alexander V. Sergienko and Malvin C. Teich Quantum holography/ Ayman F. Abouraddy, Bahaa E. A. Saleh, Alexander V. Sergienko and Malvin C. // OPTICS EXPRESS. – 2001. - Vol. 9, No.10. – P. 498-505.
7. Defienne H. Polarization entanglement-enabled quantum holography/ H. Defienne, B. Ndagano, A.Lyons, D.Faccio // Nature Physics. - 2021. - V. 17. - P. 591–597.
8. Chrapkiewicz R. Hologram of a single photon / R. Chrapkiewicz, M. Jachura, K. Banaszek, W.Wasilewski // Nature Photonics. - 2016. - V. 10. - Pp. 576–579.
9. Gerry C. C. Introductory Quantum Optics / C.C. Gerry P.L. and P.L. Knight // Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2005.
10. Zizzi P. Quantum Holography from Fermion Fields / P. Zizzi // Quantum Rep. - 2021. - №3. - P.576–591.
11. Zizzi P.A. Holography, Quantum Geometry and Quantum Information Theory/ P.A. Zizzi // Entropy 2000. – 2. - 39.
12. Zizzi, P.A. Quantum Computation toward Quantum Gravity / P.A. Zizzi // Gen. Relativ. Gravit. – 2001. – 33. - 1305.
13. Самбурская К. Квантовая голография при резонансном адиабатическом взаимодействии полей с атомной средой в Λ -конфигурации / К. Самбурская, Т. Голубева, Ю. Голубев, Е. Giacobino //ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ. – 2011. – Т.110, № 5ю - С. 827–839.

14. Alexey V. Gorshkov. Photon storage in Λ -type optically dense atomic media. II. Free-space model / Alexey V. Gorshkov, Axel André, Mikhail D. Lukin, and Anders S. Sørensen // *Phys. Rev. A*. 76. – 033805. – Published 7 September 2007.
15. Васильев Д.В. Квантовая память для изображений с использованием обратной связи / Д.В. Васильев, И.В. Соколов, Е.С. Polzik // *Оптика и спектроскопия*. - 2009. - Т.106. - №6.- С. 962-968.
16. Моисеев С.А. Многорезонаторная квантовая память с переключателем / С.А. Моисеев, Н. С. Перминов. // *Письма в ЖЭТФ*. - 2020. - Т.111, вып. 9. - С. 602 – 607.
17. Haisheng Li. Image Storage, Retrieval and Compression in Entangled Quantum Systems / Haisheng Li, Qingxin Zhu, Rigui Zhou, Yonghua Pu, Lan Song // 2014 IEEE International Conference on Progress in Informatics and Computing. - P.237-241.
18. Su, J. A New Trend of Quantum Image Representations / J. Su, X. Guo, C. Liu, and L. Li. // *ACCESS*. - 2020. - 3039996. - V. 8. - 2020. - P. 214520.
19. Le P. Q. A flexible representation of quantum images for polynomial preparation, image compression, and processing operations / P. Q. Le, F. Dong, and K. Hirota // *Quantum Inf. Process.* – 2011, Feb. - V. 10. - No. 1. - P. 63–84.
20. Wang B. Quantum representation of indexed images and its applications/ B. Wang, M.-Q. Hao, P.-C. Li, and Z.-B. Liu// *Int. J. Theor. Phys.* - 2020, Feb. -V. 59. - No. 2. - P. 374–402.
21. Ma Y. Demonstration of Quantum Image Edge Extration Enhancement through Improved Sobel Operator / Y. Ma, H. Ma, and P. Chu. // *IEEE Access*. - 2020. - P. 210277 – 210285.
22. Белинский А. В. Двухфотонная оптика: дифракция, голография, преобразование двумерных сигналов / А. В. Белинский, Д. Н. Клышко // *ЖЭТФ*. - 1994. - 105, № 3. - С. 487.
23. Белинский А. В. О «парадоксе» Карла Поппера и его связи с принципом неопределенностей Гейзенберга и квантовыми фантомными изображениями// *ВМУ. Серия 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ*. - 2018. - № 5. - С.3–11.
24. Балакин Д. А., Белинский А. В. Редукция мультиплексированных квантовых фантомных изображений// *ВМУ. Серия 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ*. - 2019. - № 1. - С. 10–16.
25. Balakin D.A., Belinsky A.V. On the possibility of a significant improvement in the quality of a quantum ghost image by registering an additional image in the object channel / D.A. Balakin, A.V. Belinsky // *Quantum Electronics*. – 2019. - 49 (10). – P. 967 –973.
26. Yan F. Circuit-Based Modular Implementation of Quantum Ghost Imaging / F. Yan, K. Chen, A.M. Ilyasu, and K. Hirota // *Access*. – IEEE. - 2020. - P. 23054 - 23068.
27. Квантовое изображение: учебное пособие / М. И. Колобов. - Москва: ФИЗМАТЛИТ. - 2009. - 524 с.
28. Chandana K. C. Efficient and Secure Communication of Quantum Image Steganography using 3-way’s of Authentication / K. C.Chandana, V.Geetha// 2019. - 1st International Conference on Advances in Information Technology. - IEEE - P. 19352702.
29. Zhang Y. NEQR: a novel enhanced quantum representation of digital images / Y. Zhang, K. Lu, Y.H. Gao, M. Wang // *Quantum Inf. Process.* - 12 (2013). - P. 2833- 2860.
30. Pradeep, A. High security identity tags using spiral resonators/ A. Pradeep, S. Mridula, and P. Mohanan, // *Comput. Mater. Continua*. - V. 52. - No. 3. - P. 187–196. - 2016.
31. Cao Y. Coverless information hiding based on the molecular structure images of material/ Y. Cao, Z. Zhou, X. Sun, and C. Gao // *Comput. Mater. Continua*. - 2018. - V. 54. -No. 2. - P. 197–207.
32. Z. Qu, Z. Li, G. Xu, S. Wu , and X. Wang. Quantum Image Steganography Protocol Based on Quantum Image Expansion and Grover Search Algorithm// *IEEE Access*. 2019. p. P. 50849-50857.
33. Jonathan P. Dowling. Quantum Optical Technologies for Metrology, Sensing, and Imaging / Jonathan P. Dowling and Kaushik P. Seshadreesan // *J. of Lightwave Tech.* - 2015. - V. 33, №12. - P. 2359- 2370.

34. R. Demkowicz - Dobrzanski. The elusive Heisenberg limit in quantum-enhanced metrology / R. Demkowicz-Dobrzanski, J. Kolodynski, and M. Guta // *Nat. Commun.* - 2012. - №3, - P. 1063.
35. Escher B. M. General framework for estimating the ultimate precision limit in noisy quantum-enhanced metrology / B. M. Escher, R. L. de Matos Filho, and L. Davidovich // *Nat. Phys.* 2011. - V. 7. - №5. - P. 406–411.
36. Bardhan B. R. Effects of phase fluctuations on phase sensitivity and visibility of path-entangled photon fock states / B. R. Bardhan, K. Jiang, and J. P. Dowling // *Phys. Rev. A.* - 2013. - № 88. - P. 023857.
37. Crespi A. Measuring protein concentration with entangled photons / A. Crespi, M. Lobino, J. C. F. Matthews and all. // *Appl. Phys. Lett.* - 2012. - V. 100. - №23. - P. 233704.
38. Li Z. Sparsity-based continuous wave terahertz lens-free on-chip holography with subwavelength resolution / Li Z., Yan Q., Qin Y., et al. // *Optics Express.* - 2019. - V. 27. - No. 2. - P. 702 – 712.
39. Wang H. Tailoring a complex perfect optical vortex array with multiple selective degrees of freedom / H. Wang, S. Fu, and C. Ga. // *Optics Express.* - 2021. - V. 29. - No. 7. - P. 10811.
40. Stepanov Ivan V. Wavelength-Tunable Vortex Beam Emitter Based on Silicon Micro-Ring with PN Depletion Diode / Ivan V. Stepanov, Denis M. Fatkhiev, Vladimir S. Lyubopytov and all. // *Sensors.* – 2022. - 22(3). P. 929.
41. Valery H. Bagmanov, Albert Kh. Sultanov, Ivan K. Meshkov, Azat R. Gizatulin, Raoul R. Nigmatullin and Airat Zh. Sakhabutdinov. Propagation and Transformation of Vortexes in Linear and Nonlinear Radio-Photon Systems // *Fibers* 2022, 10(1), 4.
42. Vinogradova I. Influence of Two-Frequency Radiation Intensity Fluctuations on the Output Signal of a Vortex Optical Fiber Forming OAM Address in Polyharmonic Sensor Technology / Irina Vinogradova, Azat Gizatulin, Ivan Meshkov, and all.// *Photonics.* – 2021. - 8(9). – P. 351.
43. Fatkhiev Denis M. Recent Advances in Generation and Detection of Orbital Angular Momentum Optical Beams—A Review / Denis M. Fatkhiev, Muhammad A. Butt, Elizaveta P. Grakhova and All. // *Sensors.* – 2021. - 21(15). – P. 4988.
44. Gizatulin A. Generation of Vortex Optical Beams Based on Chiral Fiber-Optic Periodic Structures / Azat Gizatulin, Ivan Meshkov, Irina Vinogradova and all. // *Sensors* 2020. - 20(18). – P. 5345.
45. Morozov O. Addressed Combined Fiber-Optic Sensors as Key Element of Multisensor Greenhouse Gas Monitoring Systems / Oleg Morozov, Yulia Tunakova, Safaa M. R. H. Hussein and all. // *Sensors.* – 2022. - 22(13). – P. 4827.
46. Muslimov E. R. Digital Holographic Positioning Sensor for a Small Deployable Space Telescope / Eduard R. Muslimov, Airat Zh. Sakhabutdinov and all. // *Appl. Sci.* – 2022. - 12(9). – P.4427.
47. Agliullin T. Addressed Fiber Bragg Structures in Load-Sensing Wheel Hub Bearings / Timur Agliullin, Robert Gubaidullin, Airat Sakhabutdinov and all. // *Sensors.* – 2020. - 20(21). – P.6191.
48. Morozov O. Multi-Addressed Fiber Bragg Structures for Microwave-Photonic Sensor Systems / Oleg Morozov, Airat Sakhabutdinov, Vladimir Anfinogentov and all. // *Sensors.* – 2020. - 20(9). – P. 2693.
49. Аглиуллин Т.А. Многоадресные волоконные брэгговские структуры в радиофотонных сенсорных системах / Аглиуллин Т.А., Анфиногентов В.И., Мисбахов Р.Ш. и др.// Труды учебных заведений связи. - 2020. - Т. 6. - № 1. - С. 6-13.
50. Морозов О.Г. Адресные волоконные брэгговские структуры в квазираспределённых радиофотонных сенсорных системах / О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов // Компьютерная оптика. - 2019. - Т. 43. - № 4. - С. 535-543.

QUANTUM HOLOGRAPHY AND ITS APPLICATIONS. REVIEW

*N.K. Pavlycheva, E.R. Muslimov, N.A. Petranovsky,
A.R. Nasybullin, I.I Nureev, O.G. Morozov*

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
10, K. Marx st., Kazan, 420111, Russian Federation

Annotation. Holography is defined as a method of recording and restoring wave fields based on the registration and restoration of an interference pattern formed by waves emanating from an object and a reference beam. The registered interference pattern is called a hologram. A key property of holography is coherence, which is required to extract phase information through interference with the reference beam. Holography is impossible without coherence. Quantum holography has all the advantages of holography, but it also contains effects that make it possible to create holograms using fundamentally new methods. Quantum holography can be used not only to construct images, but also to characterize quantum states. Quantum entanglement, not coherence is the source of the quantum holographic space. The purpose of this article is to try to reflect the development of quantum holography over the past twenty years and understand how quantum holography and its applications will solve the problem of developing new methods and means of quantum cryptography, telecommunications and sensorics for the implementation of multisensor distributed measurements.

Keywords: quantum holography, quantum images, quantum memory, holographic teleportation, quantum image steganography, quantum metrology, quantum holograms, technology transfer

Статья поступила в редакцию: 15.06.2022