

DOI: 10.22363/2224-7580-2022-4-121-129

ФАНТОМНЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

А.В. Белинский, В.В. Васильков

*Физический факультет Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова
Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские Горы, д. 1, стр. 2*

Аннотация. Описан новый вид формирования оптических изображений, обладающий несомненными преимуществами в определенных приложениях по сравнению с традиционными методами оптики. Использование нелинейно-оптических квантовых процессов позволяет получать жестко коррелированные в пространстве и во времени запутанные фотонные пары в ходе спонтанного параметрического трехфотонного рассеяния и встречного четырехфотонного смешения. Эту корреляцию можно использовать для построения фантомных изображений. Описан также волоконно-оптический вариант формирования фантомных изображений, пригодный для исследования труднодоступных полостей и органов человеческого организма, допускающих введения туда тонкого оптоволоконного жгута.

Ключевые слова: квантовые запутанные состояния, квантовые изображения, оптические системы, фантомные изображения, информационные технологии, квантовые измерения

Введение

Обычная методика построения изображений предполагает наличие оптической системы, направленной на освещенный объект и формирующей дошедшее до нее излучение, как правило, электромагнитное, в удобном для наблюдателя виде. История технической оптики насчитывает уже не одно столетие, вспомним хотя бы Галилея, Ньютона и Левенгука, поэтому, казалось бы, что может быть нового в этом весьма почтенном направлении физики? Но ускоренный и опережающий сам себя научно-технический прогресс даровал нам такие фантастические возможности формирования, обработки и регистрации различных видов излучения, не говоря уже об информационных технологиях, что разработчики систем построения изображений получили как бы второе дыхание. Лазеры и другие квантовые генераторы, матричные детекторы одиночных фотонов радикально преобразили не только лаборатории исследователей, но и аппаратуру обычных пользователей. Разумеется, коснулось это и методов формирования, анализа и обработки изображений. Здесь мы рассмотрим на первый взгляд весьма экзотические возможности построения так называемых фантомных изображений (ghost images),

которые, тем не менее, находят все более живой интерес и широкий круг приложений, обеспечивая явные преимущества по сравнению с традиционными методиками [1].

Квантовые фантомные изображения

Исторически именно они появились первыми среди широкого класса фантомных изображений. Правда, это название пришло гораздо позже, но и сейчас в энциклопедиях и научных статьях часто встречается понятие *двухфотонная оптика*, которое мы приписали подобного рода системам [2]. Почему? Дело в том, что обычные оптические системы не нуждаются в квантовом двухфотонном свете, а могут строить изображения при каком угодно освещении. Но появление параметрического рассеяния света [3] привело к целому ряду новых направлений квантовой оптики за счет гарантированной генерации жестко коррелированных в пространстве и во времени пар фотонов в так называемом квантовом запутанном состоянии.

В процессе параметрического рассеяния света фотоны накачки (p) распадаются на пары сигнальных (s) и холостых (i) фотонов с частотами

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i. \quad (1)$$

Помимо этого фактически закона сохранения энергии, должен сохраняться и импульс, следовательно, волновые векторы подчиняться соотношению (рис 1):

$$\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i. \quad (2)$$

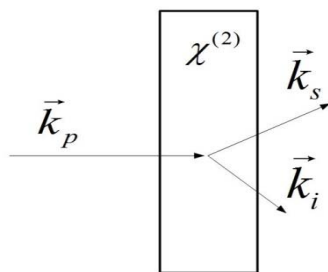


Рис. 1. В прозрачном нелинейном кристалле с квадратичной нелинейностью $\chi^{(2)}$ фотон накачки (p) может распадаться на пару сигнального (s) и холостого (i) фотонов

Кроме того, существует жесткая связь между поляризациями сигнального и холостого фотонов.

Физика процесса такова. В оптических кристаллах с квадратичной нелинейностью возможен процесс распада фотонов накачки на пары фотонов (бифотоны) с меньшей частотой и энергией. В вырожденном по частоте случае их энергия будет вдвое меньше. Соответственно, вдвое меньше будет и их импульс, но импульс – векторная величина, поэтому направления вылета этих фотонов из кристалла будут жестко регламентированы по отношению к

волновому вектору фотонов накачки (рис. 1). В вырожденном по частоте случае угол распространения сигнального фотона с направлением фотона накачки и соответствующий угол холостого фотона равны между собой по абсолютной величине и противоположны по знаку. Это очень напоминает закон отражения за исключением направления распространения одного из фотонов. Как зеркало может строить изображения, так и здесь появляется такая возможность. Но радикальное отличие в том, что освещается объект одним пучком света (например, сигнальным), а регистрация изображения осуществляется в другом (холостом).

Схема может быть такой, как на рис. 2. Коллимированное монохроматическое излучение лазера освещает нелинейный кристалл, в котором генерируются сигнальный и холостой пучки. Сигнальный – освещает частично пропускающий объект исследования, а в холостом с помощью объектива формируется его изображение на матрице детекторов. Одиночный детектор сигнального пучка регистрирует все фотоны, прошедшие через объект, разумеется, с учетом квантовой эффективности приемника. При построении изображения учитываются только одновременно зарегистрированные фотоны с помощью схемы совпадений или коррелятора интенсивностей. Восстановление пространственного распределения коэффициента пропускания объекта в современном варианте производится компьютером.

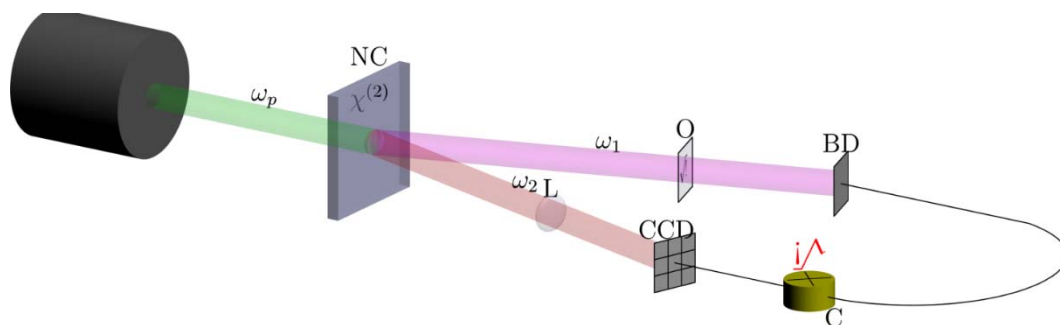


Рис. 2. Схема формирования фантомных изображений:

NC – нелинейный кристалл; ω_p – накачка; ω_1 и ω_2 – пучки запутанных пар фотонов (пучки расходятся вследствие использования неколлимированного процесса параметрического рассеяния); O – объект; BD – интегрирующий детектор в объектном канале; L – оптический объектив; CCD – матрица фотодетекторов в восстанавливающем канале; C – коррелятор интенсивностей

Схема, мягко говоря, не очень простая. В чем же смысл и оправдано ли такое радикальное усложнение?

Сам смысл термина двухфотонная оптика говорит о том, что изображение может быть получено только при одновременной регистрации пары фотонов в двух пространственно разделенных каналах. Какие преимущества следуют из этого факта?

Во-первых, исключается практически любая шумовая фоновая засветка, поскольку информативными оказываются только коррелированные во времени одновременно рожденные запутанные фотонные пары. Выигрыш в отношении сигнал/шум может достигать нескольких порядков.

Во-вторых, практически полностью исключены варианты несанкционированной утечки информации в каналах связи. Ведь восстановление изображения возможно только при одновременной обработке сигналов обоих каналов. Любой перехват одного из каналов не даст никакой информации злоумышленнику, поскольку он увидит лишь некоррелированный шум. Защита неприкосновенности информации практически полная, ибо каналы можно изолировать друг от друга весьма тщательно. А работа в режиме счета фотонов, которая предпочтительна и по соображениям максимально щадящего режима деликатного наблюдения легко повреждаемых объектов, дает возможность не только успешной криптографии, но и обнаружения минимальной утечки информации. Ведь если в одном канале число регистрируемых фотонов уменьшилось по сравнению с другим каналом, то, значит, что кто-то к нему подключился и надо переходить на другой вид связи.

Кроме того, использование невырожденного режима спонтанного параметрического рассеяния позволяет облучать объект светом одной спектральной составляющей, а регистрацию вести в другой области спектра. Наряду с режимом счета фотонов это дает возможность максимально бережного исследования биологических объектов и живых тканей. Перспективы использования этого преимущества в медицине мы обсудим в следующем разделе, а пока обратим внимание на возможный информационный выигрыш подобных систем.

Далее описано схемное решение [4], обеспечивающее, с одной стороны, сохранность объекта изучения за счет снижения интенсивности освещения, а с другой – повышение качества изображения. При этом улучшение соотношения сигнал/шум, характерное для фантомных изображений, формируемых схемой совпадений, остается в силе, то есть удастся объединить преимущества фантомных изображений с формированием обычных изображений.

Рассмотрим схему на рис. 3. В объектном канале вместо интегрирующего детектора – матрица фотоприемников, как и в восстанавливающем канале, на которой строится обыкновенное изображение исследуемого объекта при помощи оптического объектива. Матрица может помещаться также непосредственно за объектом. Итак, в рассматриваемой схеме регистрируется два квантовых изображения: обычное и фантомное. Последующая их компьютерная обработка дает возможность снизить минимально требуемое число фотонов, пронизывающих объект, и повысить качество изображения. Заметим, что предложенная схема отличается и от разностных измерений (см., например, [5]), поскольку, в отличие от них, полученные изображения обрабатываются не вычислением их разности. Это означает, в частности, то, что снимается жесткое условие абсолютной идентичности детекторов в объектном и восстанавливающем каналах. Кроме того, в силу радикально различных принципов работы этой и разностных схем, отличается и компоновка их оптических систем.

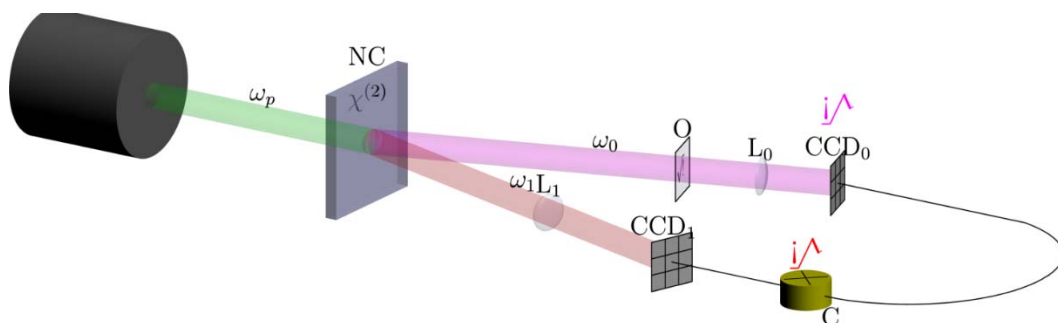


Рис. 3. Схема формирования пары квантовых изображений повышенной информативности: *NC* – нелинейный кристалл; ω_p – накачка;

ω_1 и ω_0 – пучки запутанных пар фотонов (пучки расходятся вследствие использования неколлинеарного процесса); *O* – объект; *L*₀, *L*₁ – оптические объективы; *CCD*₀, *CCD*₁ – матрицы фотодетекторов в объектном и восстанавливающем каналах; *C* – коррелятор интенсивностей

За счет чего достигается выигрыш? Прежде всего, за счет клонирования изображений, полученных различными способами и с разными информационными потерями. Современные компьютерные технологии позволяют использовать эту дополнительную информацию и выделить ее на фоне различных шумов.

Волоконная нелинейная оптика в формировании фантомных изображений

Рассмотрим еще один интересный вариант формирования фантомных изображений с помощью встречного четырехфотонного смешения в нелинейном волоконном жгуте. В отличие от спонтанного трехфотонного параметрического рассеяния, рассмотренного нами выше, четырехфотонный процесс предполагает распад двух фотонов накачки на сигнальный и холостой в среде с кубической нелинейностью, которая может быть изотропной. Причем генерация излучения допускается как в попутном, так и встречном направлениях. В последнем случае и фотоны накачки тоже должны быть встречными. Вырожденный по частоте режим реализуется при одинаковой частоте всех четырех пучков: двух пучков накачки, сигнального и холостого. Возможная геометрия формирования фантомных изображений показана на рис. 4. Такая схема имеет определенные преимущества перед трехфотонными процессами, касающиеся перспектив получения более высокого качества изображений. Но сейчас мы остановимся на волоконно-оптическом варианте, имеющем, как представляется, серьезные преимущества в части медицинских приложений. Дело в том, что волоконный световод можно запустить в желудок, сосуды и другие полые органы для непосредственного наблюдения.

Обычные методики предполагают введение съемочных камер в организм человека. Но размеры камер не всегда приемлемы, особенно в педиатрии в силу небольших размеров детских органов. Волоконные же жгуты могут быть весьма небольшого диаметра, порядка 1 мм, что решает проблему. Принципиально важно применение такого эндоскопа в детской хирургии, особенно

неонатальной хирургии недоношенных новорожденных, поскольку размеры и строение органов недоношенных новорожденных и детей раннего возраста с врожденными патологиями отличаются не только малыми размерами, но и нарушением структуры и анатомической формы.

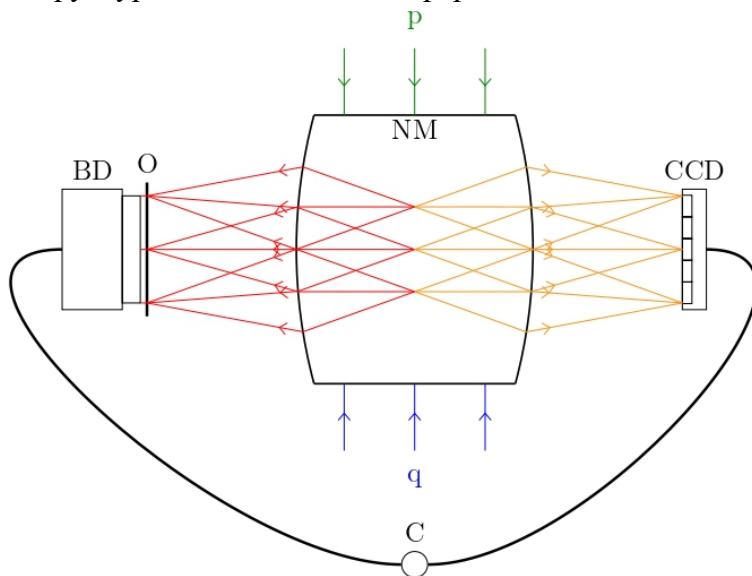


Рис. 4. Схема формирования фантомных изображений в процессе встречного четырехфотонного смещения:

p и q – встречные пучки лазерной накачки в нелинейной среде с кубической нелинейностью NM (в центре). Сигнальный и холостой пучки также направлены навстречу друг другу; O – частично прозрачный исследуемый объект; BD – интегрирующий детектор, не обладающий пространственным разрешением; CCD – матрица фотодетекторов, работающая в режиме счета фотонов, как и CD ; C – схема совпадений, соединенная с компьютером, который и воспроизводит изображение объекта O

Ультратонкие эндоскопы необходимы не только для выполнения диагностических процедур, но и при мониторинге в реальном времени во время оперативного вмешательства. Перспективным представляется так же применение таких систем при эндоваскулярных процедурах, как диагностических, так и хирургических.

Рассмотрим соответствующую схему на рис. 5. Используя жгут волокон, обладающих кубической нелинейностью, задача может быть решена. В середине жгута частично снята оплетка, и он облучается двумя поперечными встречными пучками накачки. Волокна могут быть, например, из плавленого кварца. Поскольку эффективность нелинейного преобразования небольшая, практически все волокна будут одинаково освещены. Требуемая для формирования фантомных изображений пространственная корреляция сигнального и холостого пучков достигается тем, что в обе стороны упорядоченного жгута пойдет всегда одинаковое количество фотонов в силу одновременности рождения сигнального и холостого.

Один торец жгута вплотную соединен с матрицей фотодетекторов, а изображение второго проецируется на исследуемый объект O , фотоны, прошедшие через него, регистрируются интегрирующим детектором BD . Таким

образом конструктивно реализуется алгоритм формирования фантомных изображений, основанный на пространственной корреляции фотонов.

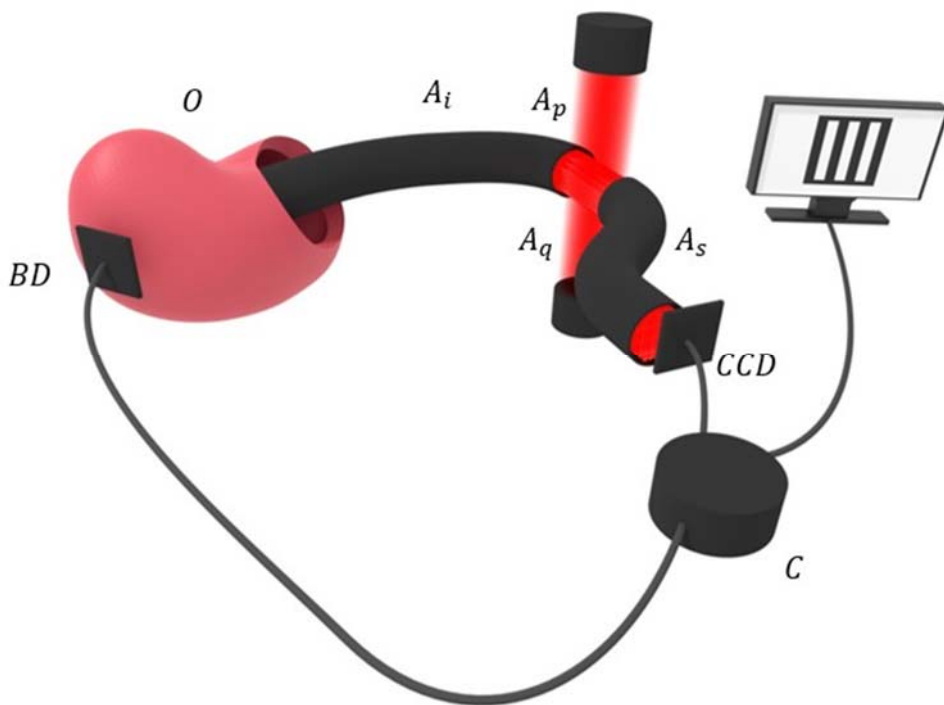


Рис. 5. Схема формирования фантомных изображений с помощью волоконного жгута. Встречные пучки накачки A_p и A_q пронизывают волоконный жгут в поперечном направлении.

Рождаемые пары фотонов разлетаются в разные стороны. В сигнальном плече A_s они регистрируются матрицей фотодетекторов CCD , а в холостом A_i – освещают объект O .

При необходимости можно использовать оптический объектив на конце жгута либо просто подвести жгут вплотную к исследуемому объекту. Интегрирующий однопиксельный детектор BD регистрирует прошедшее через объект излучение.

Сигналы с детекторов и корреляционной схемы (схемы совпадений) поступают в компьютер для последующей обработки и формирования цифрового изображения

Каковы преимущества этой схемы? Качество формируемых ею изображений принципиально ограничено только размером пикселя, то есть диаметром волокна и соответствующим размером фотодетекторов в матрице CCD . Оба торца световода всегда дают идентичное освещение как объекта, так и матрицы фотодетекторов CCD . Все это делает предложенную схему весьма привлекательной.

Основное принципиальное отличие этой схемы от рассмотренных выше в том, что там использовалась угловая пространственная корреляция запутанных пар фотонов, то есть направлений их распространения, что напоминало аналогию с зеркальным отражением. В данном же случае пространственная корреляция осуществляется в координатном пространстве: запутанные пары фотонов появляются одновременно в одном волокне и распространяются в противоположные стороны. Следовательно, упорядоченная структура волоконного жгута дает идентичные «вспышки» на обоих его торцах.

Как указывалось выше, волоконный жгут можно пропустить в труднодоступные для прямого наблюдения полости, например внутренние органы человека. А интегрирующий детектор может находиться снаружи, так как мягкие ткани частично прозрачны для красного излучения гелий-неонового лазера, например. Преимущества фантомных изображений, заключающиеся в щадящем режиме наблюдения, при этом осуществляются в полной мере.

Заключение

Рассмотренные, казалось бы, весьма экзотические способы формирования изображений, тем не менее, привлекают интерес исследователей не только из-за необычных оригинальных вариантов их реализации, но и в силу их незаменимости в некоторых приложениях. Щадящий режим облучения объектов, переход в различные области спектра, повышенная помехозащищенность, предельная конфиденциальность передачи информации – вот далеко не полный перечень преимуществ фантомных изображений.

Но более всего хотелось бы обратить внимание на несомненные перспективы встречного четырехфотонного смешения в оптоволоконном варианте. Здесь преимущества фантомных изображений могут реализоваться в полном объеме, гарантируя как щадящий режим наблюдения исследуемых объектов, так и потенциальную возможность проникновения в труднодоступные для прямого наблюдения полости.

Литература

1. Квантовое изображение / под ред. М. И. Колобова (ориг.), А. С. Чиркина (перев.). М.: Физматлит, 2009. 328 с.
2. *Белинский А. В., Клышко Д. Н.* Двухфотонная оптика: дифракция, голография, преобразование двумерных сигналов. ЖЭТФ. 1994. Т. 105. Вып. 3. С. 487–493. [*Belinskii A. V., Klyshko D. N.* JETP. 1994. Vol. 78. P. 259.]
3. *Клышко Д. Н.* Фотоны и нелинейная оптика. М.: Наука, 1980. 254 с.
4. *Балакин Д. А., Белинский А. В.* О возможности существенного повышения качества квантового фантомного изображения за счет регистрации дополнительного изображения в объектном канале // Квант. электрон. 2019. Т. 49, № 10. С. 967–973.
5. *Treps N., Delaubert V., Maître A. et al.* Quantum noise in multipixel image processing // Phys. Rev. A. 2005. Vol. 71 (1). P. 013820.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-12-00155).

GHOST IMAGES

A.V. Belinsky, V.V. Vasilkov

*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
1, build. 2, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation*

Abstract. A new type of optical imaging is described, which has undoubted advantages in certain applications in comparison with traditional optical methods. The use of nonlinear optical quantum processes makes it possible to obtain entangled photon pairs rigidly correlated in space and time in the course of spontaneous parametric three-photon scattering and counter-propagating four-photon mixing. This correlation can be used to construct ghost images. A fiber-optic version of the formation of phantom images is also described, which is suitable for the study of hard-to-reach cavities and organs of the human body, which allow the introduction of a thin fiber-optic bundle.

Keywords: quantum entangled states, quantum images, optical systems, ghost images, information technology, quantum measurements