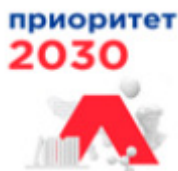


УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
Дом учёных им. М. Горького РАН

ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ
ИМПЕРАТОРА АЛЕКСАНДРА I (Российская Федерация)

УНИВЕРСИТЕТ МОА «ДОКТОР АНТОНИО НУНЬЕС ХИМЕНЕС» (Куба)



Посвящается 80-летию
со дня рождения
доктора технических
наук, профессора
И.Б. Арефьева

АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ, НА ТРАНСПОРТЕ И В ЛОГИСТИКЕ

Труды
XXVI Международной научно-практической конференции
молодых ученых, студентов и аспирантов

Санкт-Петербург, 21–23 апреля 2026 г.

Санкт-Петербург
Медиапапир
2026

©А.Н. Авдеев, Е.Е. Майоров

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения», Российская Федерация

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕМНОВОГО СОСТОЯНИЯ ФОТОНА И МОДОВОГО УПЛОТНЕНИЯ ЗАКРУЧЕННОГО СВЕТА В КВАНТОВЫХ КОММУНИКАЦИЯХ

Аннотация. В современной физике ученые смогли достичь передачи информации при помощи света без потерь. Областью таких исследований занимается фотоника. В реальных условиях эксперимент часто становится проблематичным или совсем невыполнимым из-за добавочных условий среды и нестабильного состояния системы. Главным образом будет являться обход таких состояний при помощи инновационных решений. С помощью данных ученые передают информацию в космос на спутники, и получают важнейшую информацию о природе. В настоящей работе пойдет речь о вопросах распространения вихревой световой волны в природе для передачи информации в космосе и на дальних расстояниях. В статье будет рассмотрен принцип модового уплотнения. Предложено теоретическое решение связи модового уплотнения с темновым состоянием фотона.

Ключевые слова. Свет, фотон, темновой, состояние, атом, мода, уплотнение, момент, передача, частота.

Введение. Фотоника — наука, основанная на использовании света для выполнения задач, с которыми традиционно справлялась электроника. Если электроника работает с помощью электронов, то фотоника использует фотоны — частицы света. Эта область охватывает генерацию, управление и обнаружение света [1].

Ключевым событием, инициировавшим становление фотоники как самостоятельной научной дисциплины, следует считать создание первого лазера. Теоретические основы квантовой электроники были разработаны Н.Г. Басовым, А.М. Прохоровым и Ч. Таунсом в 1950-х годах, за что в 1964 году они были удостоены Нобелевской премии [2,3]. Практическая реализация лазера на рубине была осуществлена Т. Майманом в 1960 году. Появление когерентного источника света высокой интенсивности открыло принципиально новые возможности для управления световыми потоками и изучения нелинейных оптических явлений.

Современный этап развития фотоники характеризуется расширением области ее применения за пределы телекоммуникаций и включает такие направления, как лазерная обработка материалов, биомедицинская диагностика, создание оптических методов хранения информации, а также развитие кремниевой фотоники, позволяющей интегрировать оптические компоненты с

электронными схемами на едином чипе. Активно развиваются направления нанофотоники, исследующей взаимодействие света с наноструктурированными материалами, радиофотоники, ориентированной на обработку сверхвысокочастотных сигналов оптическими методами, и квантовой фотоники, изучающей возможности использования квантовых состояний света для передачи и обработки информации. Фотоника в настоящее время представляет собой динамично развивающуюся междисциплинарную область, определяющую технологический прогресс в широком спектре направлений.

В настоящей статье речь пойдет о закрученном фотонном пучке, который также получил название модовое уплотнение. Такой способ передачи информации представили ученые из университета ИТМО. В университете исследования в области модового уплотнения и закрученных фотонных пучков ведутся сразу в нескольких направлениях, охватывая как фундаментальные аспекты взаимодействия такого света с веществом, так и прикладные задачи по созданию компонентов для систем связи нового поколения, включая разработку методов генерации многоканальных структур, известных как «орбитальные гребенки», создание перестраиваемых элементов на основе углеродных нанотрубок для терагерцового диапазона и диагностику орбитального углового момента у массивных частиц.

Основная часть. Одним из ключевых направлений является разработка методов эффективного кодирования информации с использованием орбитального углового момента света. Ученые Нового физтеха ИТМО предложили использовать для этого не одну проекцию орбитального углового момента, а целую их группу, формируя так называемую «орбитальную гребенку». В этой структуре каждая отдельная волна гребенки соответствует вихревому пучку с уникальным значением орбитального углового момента, что позволяет создать множество независимых каналов передачи данных, аналогично различным частотам в радиосвязи[4]. Технология создания такой гребенки в ИТМО является оригинальной и более простой по сравнению с аналогами: лазерный луч проходит через дифракционную решетку с топологическим дефектом, превращаясь в вихревой пучок, затем через нелинейный кристалл, где его частота удваивается и формируется устойчивая к искажениям структура, которая на выходе преобразуется в «орбитальную гребенку», напоминающую по форме окружность, пример представлен на рис.1.

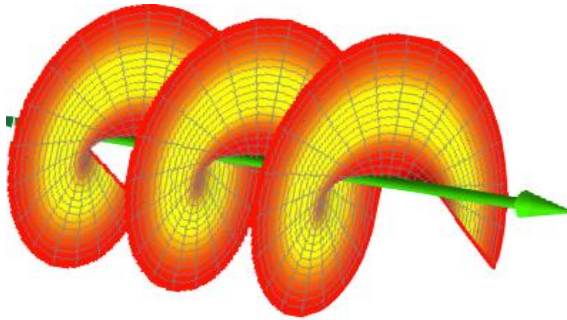


Рис.1. Пример закрученного пучка фотонов

Для фотона мы выделяем два угловых момента – спиновый и орбитальный. Спиновый угловой момент фотона связан с поляризацией и имеет всего два состояния правой и левой поляризации. В случае с орбитальным угловым моментом фотон связан с формой волнового фронта и теоретически имеет бесконечное число состояний. Математически наличие орбитального углового момента у фотона описывается фазовым множителем $\exp(il\varphi)$, где l представляет собой топологический заряд — целое число, определяющее степень закрученности волнового фронта, а φ — азимутальный угол в поперечном сечении пучка. Именно этот фазовый множитель создает спиральную структуру волнового фронта: при обходе вокруг центра пучка фаза изменяется на величину $2\pi l$, что приводит к появлению фазовой сингулярности на оси и формированию характерного кольцевого распределения интенсивности с темным центром, известного как оптический вихрь [4]. Оптический вихрь при $l=1$ представлен на рис.2.

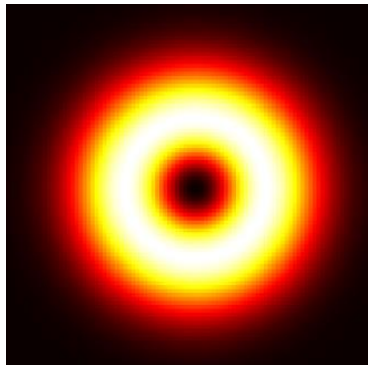


Рис.2. Оптический вихрь при $l = 1$

Для улучшения передачи информации на фотоны предлагается использовать явление темнового состояния фотона [5]. Физическая природа этого явления коренится в квантовой интерференции и требует для своей реализации трехуровневых атомных систем. Если представить атом, у которого есть два нижних энергетических уровня, которые обозначаются как первое и второе состояния, и один общий возбужденный уровень, доступный с обоих нижних. Такая конфигурация называется Лямбда-схемой [6]. Если воздействовать на такой атом двумя лазерными лучами, слабым пробным, который нужно сделать прозрачным, и мощным управляющим, то при точной настройке частот два возможных пути возбуждения атома, один через поглощение пробного фотона, другой через взаимодействие с управляющим лазером, начинают интерферировать друг с другом. Причем интерференция носит деструктивный характер — амплитуды вероятностей этих двух путей взаимно уничтожаются. В результате атом оказывается в суперпозиции двух нижних состояний, которая полностью исключает возможность перехода в возбужденное состояние. Эта суперпозиция и есть то самое темновое состояние. Атом скрывается в ней, становясь неспособным поглотить фотон пробного луча. Среда, состоящая из множества таких атомов, переведенных в темновое состояние, демонстрирует эффект электромагнитно-индуцированной прозрачности — на фоне широкой линии поглощения возникает узкое окно, где свет проходит практически без потерь [7].

Атомная система с энергетической структурой типа Λ -схемы представлена на рис.3. При этом в первых двух состояниях возникает суперпозиция, которая даёт эффект прозрачности. Соответственно, переход из первого во второе состояние не наблюдается.

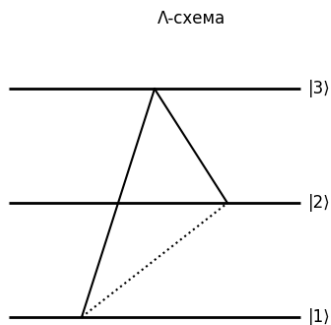


Рис.3. Лямбда-схема трёхуровневого состояния

Состояния будут описываться оператором Гамильтона в дипольном приближении:

$$\widehat{H} = \widehat{H}_a + \widehat{H}_i \quad (1)$$

\widehat{H}_a – Гамильтониан атома, описывающий энергию изолированного атома; \widehat{H}_i – Гамильтониан взаимодействия, описывающий энергию взаимодействия атома с внешним полем.

Свободный атом:

$$\widehat{H}_a = \hbar\omega_1|1\rangle\langle 1| + \hbar\omega_2|2\rangle\langle 2| + \hbar\omega_3|3\rangle\langle 3| \quad (2)$$

При взаимодействии:

$$\widehat{H}_i = -d_{13}E_p|1\rangle\langle 3| - d_{23}E_c|2\rangle\langle 3| \quad (3)$$

d_{13} — дипольный момент перехода $|1\rangle\langle 3|$; d_{23} – дипольный момент перехода $|2\rangle\langle 3|$; E_p – поле пробного лазера; E_c – поле контролирующего лазера;

Преобразование во вращающуюся систему координат:

$$|\psi\rangle = c_1|1\rangle + c_2\exp(-i(\omega_p - \omega_c)t)|2\rangle + c_3\exp(-i\omega_p t)|3\rangle \quad (4)$$

c_1, c_2, c_3 – амплитуды трёх состояний; $|1\rangle, |2\rangle, |3\rangle$ – состояния атомов; ω_p – частота пробного лазера; ω_c – частота контролирующего лазера;

Темновое состояние описывается через комплексные частоты Раби, они пропорциональны амплитудам полей и дипольным моментам переходов:

$$|d\rangle = \frac{(\Omega_c|1\rangle - \Omega_p|2\rangle)}{\sqrt{|\Omega_p|^2 + |\Omega_c|^2}} \quad (5)$$

$|d\rangle$ – темновое состояние; Ω_p – частота Раби пробного поля, связывающая первое и третье состояния; Ω_c – частота Раби контролирующего поля, связывающая второе и третье состояния; Темновое состояние – это суперпозиция состояний $|1\rangle$ и $|2\rangle$. Условие темнового состояния, при котором наблюдается электромагнитно-индуцированная прозрачность:

$$\langle d|3\rangle = 0 \quad (6)$$

Энергия системы после перехода атома из одного состояния в другое для демонстрации улучшенного взаимодействия атомов при хранении и передачи информации является суммой произведения энергий на амплитуду вероятности перехода атомов из основных состояний в возбужденное:

$$E_d = \sum_{i=1}^n \hbar \omega |c_i|^2 \quad (7)$$

c_i – амплитуда вероятности для i -го атома.

Темное состояние действует как квантовая память. Информация кодируется в относительных фазах атомных состояний, при считывании энергия возвращается в поле, а фазовая структура $e^{i\varphi}$ восстанавливается. В экспериментах с атомами рубидия удалось достичь контролируемого хранения и высвобождения света за счет коллективных атомных состояний. Это подтверждает, что энергия после перехода действительно сохраняется и может быть использована для модуляции. Такие модуляции являются более устойчивыми к помехам, так как атомы рубидия стабильны в квантово-механических переходах и среда не критично влияет на них. С помощью этого принципа возможно объединение создания темнового состояния фотона между атомами и дальнейший перенос информации на фотоны, которые в последующем создадут модовое уплотнение. Это даст стабильный и сильный прирост передачи информации в космосе.

Заключение. Проведено теоретическое исследование темнового состояния фотона для создания электромагнитно-индуцированной прозрачности в модуляторе перед переносом информации. Предложена теоретическая установка для улучшения переноса информации на большие расстояния без помех с помощью двух эффектов: темнового состояния фотона и модового уплотнения.

Библиографический список

1. Швебер С. Введение в релятивистскую квантовую теорию поля. –М.: ИЛ, 1963. – 843с
2. Басов Н. Г., Крохин О. Н. Квантовая электроника. – Москва: Наука, 1976, –с. 45–52.
3. Фейнберг, Е. Л. (2000). "Чарльз Таунс и создание лазера." В сборнике: Физики о физиках. Москва: Янус-К. 2000, – с.107–130.
4. Соломонов, А. И. Перестраиваемые оптические вихри с управляемым топологическим зарядом / А. И. Соломонов, М. В. Рыбин // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. — Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2024. — URL: <https://kmu.itmo.ru/digests/article/11975>
5. Van Enk, S. J., Kimble, H. J., & Cirac, J. I. (1999). Quantum communication with dark photons. *Physical Review A*, 59(4), 2659. DOI: 10.1103/PhysRevA.59.2659
6. Волович И. В., Козырев С. В. Манипуляция состояниями вырожденной квантовой системы // Труды Математического института имени В.А. Стеклова. — 2016. — Т. 294. — С. 256–267. DOI: 10.1134/S037196851603016X
7. Флейшхауэр, М. Электромагнитно-индуцированная прозрачность и темные поляритоны / М. Флейшхауэр, А. Имамоглу // Успехи физических наук. — Москва, 2007. — Т. 177, № 6. — С. 617–648. — URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2007/6/c/>