



Аксиально-симметричные пучки Эрмита-Гаусса и протокол BB84 на их основе для канала квантовой криптографии Космос-Земля

А. Л. Соколов¹, В. М. Петров², В. Ю. Венедиктов³,
Д. Д. Решетников²

¹ Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения» (АО «НПК «СПП»), Москва, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³ Кафедра лазерных измерительных и навигационных систем, Санкт-Петербургский электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия.

В работе приводится описание системы передачи квантовой информации с помощью пучков Эрмита-Гаусса, образованных векторной суперпозицией мод Эрмита-Гаусса с индексами 10 и 01. Показано, что аксиальная поляризационная симметрия таких пучков, не чувствительная к поворотам относительно оптической оси, является предпочтительной для космических систем квантовой криптографии и может быть использована при модификации известного протокола BB84. Обсуждается возможность как создания, так и детектирования таких пучков для передачи поляризационного протокола при помощи четырех аксиально-симметричных поляризационных устройств на основе радиального поляризатора.

Ключевые слова: квантовая криптография, поляризационный протокол, аксиально-симметричная поляризационная структура, радиальный поляризатор, спиральный вращатель

Axially Symmetric Hermite-Gaussian Beams and the BB84 Protocol for the Space-Earth Quantum Cryptography Channel

A. L. Sokolov¹, V. M. Petrov², V. Yu. Venediktov²,
D. D. Reshetnikov²

¹ JSC "Research-and-production corporation "Precision system and Instruments" (RPC PSI), Moscow, Russia

² Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

³ Department of Laser ³Measurement and Navigation Systems, St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia

The paper provides a description of Hermite-Gaussian beams with an axially symmetric polarization structure generated by a vector superposition of Hermite-Gaussian modes with the indices 10 and 01. It is shown that the axial polarization symmetry makes such beams insensitive to the rotations relative to the optical axis that makes such a modification of the well-known BB84 protocol preferred for the quantum space cryptography systems. The possible creation and detection of such beams within the framework of a polarization protocol transmission using the devices with a radial polarizer is discussed.

Keywords: quantum cryptography, polarization protocol, axially symmetric polarization structure, radial polarizer, spiral rotator

Article received: 04.09.2023

Article accepted: 13.10.2023

INTRODUCTION

The development of quantum cryptography systems [1] is driven by the need to protect information in the up-to-date communication networks. The use of various types of spatially structured beams can be one of the efficient solutions to the problem



Статья получена: 04.09.2023

Статья принята 13.10.2023

ВВЕДЕНИЕ

Развитие систем квантовой криптографии [1] обусловлено необходимостью защиты информации в современных коммуникационных сетях. Использование различных типов пространственно-структурированных пучков может быть одним из эффективных решений задачи по оптической передаче информации в реальных условиях турбулентности среды как по классическим, так и по квантовым каналам связи.

На сегодняшний день выполнен большой объем теоретических и экспериментальных работ в данной области, ежегодно публикуется большое количество статей. Так, например, исследовано влияние турбулентности атмосферного канала на распространение векторных пучков Лагерра-Гаусса и Бесселя-Гаусса и на пропускную способность канала [2, 3], продемонстрирована передача высших мод пучков Лагерра-Гаусса в реальных условиях городской турбулентности на расстояние 1,6 км с использованием длины волны 809 нм [4], экспериментально продемонстрирована скорость рассылки ключа со скоростью не менее 120 Мбит/с с использованием спектрального, поляризационного и мультиплексирования по орбитальному угловому моменту на длине волны 1550,12 нм (193,4 ТГц) [5]. В последнем примере имитация турбулентности атмосферы осуществлялась при помощи двух двумерных фазовых модуляторов света, обеспечивающих турбулентность, соответствующую величине параметра Рытова $\delta_R^2 = 0,2$. Экспериментально продемонстрирована квантовая рассылка ключа через вихревое оптическое волокно длиной 60 м. В этом случае использовалась пара запутанных фотонов, получаемых в результате процесса спонтанного параметрического рассеяния на длине волны 405 нм [6]. Активно ведутся работы по исследованию распространения гауссовых и вихревых пучков в условиях атмосферной турбулентности на значительные расстояния до 1000 м [7].

Особое место занимают задачи передачи информации на расстояния более тысячи километров с помощью низкоорбитальных космических аппаратов, оснащенных соответствующим оборудованием [8–11]. Если еще в 2017 году в работе [9] сообщалось о достигнутой скорости передачи ключа в «несколько килогерц» на спутник, находящийся на расстоянии 1200 км от Земли, то в 2021 году уже сообщалось об «интегрированной волоконно-

of optical data transmission in real turbulence conditions, both through the classical and quantum communication channels.

At present, a large number of theoretical and experimental works has been performed in this area, and a large number of articles have been published. For example, the influence of atmospheric channel turbulence on the propagation of Laguerre-Gaussian and Bessel-Gaussian vector beams and on the channel capacity has been studied [2, 3]; the transmission of higher modes of Laguerre-Gaussian beams in the real conditions of urban turbulence over a distance of 1.6 km has been demonstrated using a wavelength of 809 nm [4]; a key distribution rate of at least 120 Mbit/s has been experimentally demonstrated using the spectral, polarization and orbital angular momentum multiplexing at a wavelength of 1550.12 nm (193.4 THz) [5]. In the last example, the simulation of atmospheric turbulence has been performed using two two-dimensional phase light modulators, providing the turbulence corresponding to the value of the Rytov parameter $\delta_R^2 = 0,2$. The quantum key distribution through a vortex optical fiber with the length of 60 m has been experimentally confirmed. In this case, a pair of entangled photons has been used, obtained as a result of the spontaneous parametric scattering at a wavelength of 405 nm [6]. The works are actively performed to study the propagation of Gaussian and vortex beams under the atmospheric turbulence conditions over the significant distances, up to 1000 m [7].

A special place is held by the data transmission issues over distances of more than a thousand kilometers using the low-orbiting spacecrafts with the appropriate equipment [8–11]. If back in 2017, the paper [9] reported the achieved key transmission speed of “several kilohertz” to a satellite located at a distance of 1200 km from the Earth, then in 2021 it was already reported about an “integrated fiber-optic and satellite network” with a total length 4600 km and the secret key transmission to the satellite at a speed of 47.8 kBit/s [10]. It shall be noted that the possible application of beams with an axially symmetric polarization structure in the space systems, i. e., having the spatial polarization modulation in a plane orthogonal to the propagation direction, as the base beams that form a polarization cryptographic key is shown in the paper [11].

Almost all well-known papers devoted to the quantum key distribution (QKD) apply the BB84 protocol that uses two bases, each of which contains two photon states. In the first basis, the photon is linearly polarized in a vertical or horizontal way (0° or 90°); in



оптической и спутниковой сети» общей протяженностью 4600 км и скоростью передачи секретного ключа на спутник со скоростью 47,8 кБит/с [10]. Отметим, что возможность использования в космических системах пучков с аксиально-симметричной поляризационной структурой, т.е. обладающих пространственной модуляцией поляризации в плоскости, ортогональной направлению распространения, в качестве базовых пучков, формирующих поляризационный криптографический, ключ показана в работе [11].

Практически во всех известных работах по квантовой рассылке ключа (КРК) в космосе применяется протокол BB84, использующий два базиса, каждый из которых содержит по два состояния фотона. В первом базисе фотон линейно поляризован вертикально или горизонтально (0° или 90°), во втором – фотон линейно поляризован диагонально (45° или 135°). Это, в частности, обусловлено неустойчивостью «фазовых» протоколов при распространении света в турбулентной атмосфере.

Вместе с тем необходимо отметить, что применение протокола BB84 с использованием базисов, основанных на линейной поляризации фотонов, для задач КРК для низкоорбитальных космических аппаратов имеет свои трудности, связанные с необходимостью в каждый момент времени фиксировать положение плоскости поляризации света как передающей, так и приемной системами на земле и в космосе. Анализ показывает, что в передающих оптико-лазерных системах состояние поляризации существенно изменяется для различных точек полусферы [12]. В случае поляризационного протокола это означает зависимость двух развернутых на 45° систем координат от взаимной ориентации передающего телескопа и космического аппарата.

Данную зависимость можно устранить, если использовать пучки с аксиально-симметричной поляризационной структурой [13-15].

Отдельными задачами является как получение пучков с заданной аксиальной поляризационной структурой, так и их детектирование. Способы их получения можно разделить на два основных: первый – это внутрирезонаторные методы, когда вместо основной моды лазера генерируются моды первого порядка [16, 17], и внерезонаторные методы с помощью дифракционных оптических элементов [18]. В [19] было показано, что пучки второго порядка образуются при отражении линейно поляризованного пучка от углового отражателя [20, 21], в частности, при наличии

the second basis, the photon is linearly polarized in a diagonal way (45° or 135°). In particular, this is due to the instability of the “phase” protocols during the propagation of light in a turbulent atmosphere.

At the same time, it should be noted that the application of the BB84 protocol using bases based on linear polarization of photons for the tasks of low-orbit spacecraft has its difficulties associated with the need to fix the position of the plane of polarization of light at each moment of time, both transmitting and receiving systems on earth and in space. The analysis shows that in the transmitting optical and laser systems, the polarization condition is changed significantly for different points of the hemisphere [12]. In the case of the polarization protocol, this means the dependence of two coordinate systems rotated by 45° on the relative orientation of the transmitting telescope and the spacecraft.

This dependence can be eliminated if the beams with an axially symmetric polarization structure are used [13-15].

The separate tasks are both obtaining the beams with a given axial polarization structure and their detection. Their generation methods can be divided into two main ones: the first group include the intracavity methods, when the first-order modes are generated instead of the main laser mode [16, 17], and the extracavity methods using the diffractive optical elements [18]. The paper [19] has shown that the second-order beams are generated when a linearly polarized beam is reflected from an angle reflector [20, 21]. In particular, a second-order optical vortex is generated in the presence of a special interference coating of the faces. The beam detection issue can be solved either by using a device that acts as a radial polarizer [15], or by using a device similar to the diffraction sorter, for example, [22].

The purpose of this paper is to propose an implementation of the well-known BB84 protocol for a space-based quantum data transmission system. A feature of such an implementation shall be its invariance in relation to the rotation around the z axis coinciding with the beam propagation direction.

1. BEAMS WITH AN AXIALLY SYMMETRIC POLARIZATION STRUCTURE

In the case of an axially symmetric polarization structure, regardless of the radial coordinate in the beam cross-sectional plane, each azimuth value corresponds to a certain orientation of the vector oscillation plane \vec{E} that is changed so that when returning to the original azimuth value, this plane makes an

специального интерференционного покрытия граней, формируется оптический вихрь второго порядка. Задача детектирования пучков может быть решена или при помощи использования устройства, выполняющего роль радиального поляризатора [15], или при помощи устройства, аналогичному дифракционному сортеру, см., например, [22].

Цель настоящей работы – предложить реализацию известного протокола BB84 для космической системы передачи квантовой информации. Особенностью такой реализации должна быть ее инвариантность относительно поворота вокруг оси z , совпадающей с направлением распространения пучка.

1. ПУЧКИ С АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ СТРУКТУРОЙ

В случае аксиально-симметричной поляризационной структуры, независимо от радиальной координаты в плоскости поперечного сечения пучка, каждому значению азимута соответствует определенная ориентация плоскости колебаний вектора \vec{E} , которая изменяется так, что при возвращении к исходному значению азимута эта плоскость совершает целое число оборотов. Поляризационно-симметричные структуры имеют по две модификации, в зависимости от направления поворота плоскости колебаний вектора \vec{E} .

Поляризационная структура этих пучков инвариантна к повороту относительно оси пучка: состояние поляризации сохраняется вдоль радиус-вектора r для произвольного азимутального угла φ (рис. 1).

В данной работе пучки с аксиально-симметричной поляризационной структурой предлагаются использовать при передаче квантовых ключей в космическом пространстве по протоколу BB84.

В табл. 1 показано, как формируются аксиально-симметричные структуры, составляющие набор для модифицированного поляризационного протокола. Базовыми ортогональными поляризационными структурами поляризационного

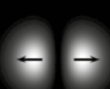
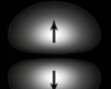
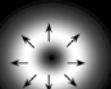
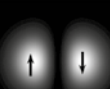
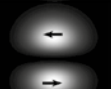
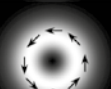
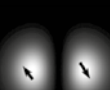
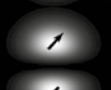
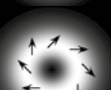
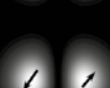
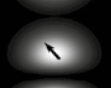
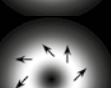


Рис. 1. Геометрия распространения пучков с аксиальной симметрией: 1 – передатчик, (расположен на земле), 2 – приемник (расположен на спутнике); φ – угол поворота радиус-вектора r , z – направление распространения

Fig. 1. Propagation geometry of the beams with axial symmetry: 1 – transmitter (located on the ground), 2 – receiver (located on the satellite); φ – rotation angle of the radius vector r , z – direction of propagation

Таблица 1. Формирование четырех базовых пучков с помощью мод Эрмита-Гаусса первого порядка: R-пучок (РП-пучок); А-пучок (АП-пучок); LR – ЛСП-пучок; RR – ПСП-пучок

Table 1. Generation of four basic beams using the first-order Hermite-Gauss modes: R-beam (RP-beam); A-beam (AP-beam); LR – LTP beam; RR – RTP beam

	Обозначение Designation	Первая мода First mode	Вторая мода Second mode	Совокупность мод Set of modes	Матрица Джонса Jones matrix
1	РП-пучок RP-beam				$\vec{D}_R = \begin{pmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{pmatrix}$
2	АП-пучок AP-beam				$\vec{D}_A = \begin{pmatrix} -\sin \varphi \\ \cos \varphi \end{pmatrix}$
3	ЛСП-пучок LTP-beam				$\vec{D}_{LR} = \begin{pmatrix} -\sin(\varphi + 45^\circ) \\ \cos(\varphi + 45^\circ) \end{pmatrix}$
4	ПСП-пучок RTP-beam				$\vec{D}_{RR} = \begin{pmatrix} \cos(\varphi + 45^\circ) \\ \sin(\varphi + 45^\circ) \end{pmatrix}$



протокола являются пучки, образованные векторной суперпозицией линейно-поляризованных мод Эрмита-Гаусса с индексами 10 и 01 (табл. 1). Это: *радиальная* поляризационная структура – вектор \vec{E} в каждой точке поперечной плоскости ориентирован вдоль радиуса (РП-пучок), *азимутальная* – вектор \vec{E} направлен в каждой точке по касательной к концентрическим окружностям (АП-пучок), и две ортогональные поляризационные структуры, обладающие аксиальной симметрией, которые развернуты на 45° относительно РП-пучка и АП-пучка: право-скрученная (ПСП-пучок) и левоскрученная (ЛСП-пучок). Векторы Джонса в табл. 1 записаны в цилиндрическом базисе, где φ – азимутальный угол.

Взаимодействие базовых пучков с радиальными поляризационными элементами удобно демонстрировать в специальном поляризационном (спиральном) базисе.

2. СПИРАЛЬНЫЕ БАЗИСЫ

Для удобства математических выкладок используем спиральные базисы, которые задаются с помощью двух матриц [8]:

$$P = \begin{pmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi \\ -\sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix},$$

$$N = \begin{pmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix}. \quad (1)$$

где φ – азимутальный угол, отсчитываемый от так называемой нулевой полуоси, в направлении которой матрицы становятся единичными.

Матрица P описывает переход вектора Джонса \vec{D} из декартова в спиральный P -базис, где соответствующий вектор Джонса будем обозначать индексом \vec{p} , а матрица N – в спиральный N -базис с индексом \vec{n} . Если нулевая полуось согласована с осью X декартова базиса, то имеем:

$$\vec{D}_p = P\vec{D}, \vec{D}_n = N\vec{D}. \quad (2)$$

Преобразование матрицы Джонса T_d из декартового поляризационного базиса в матрицу T_p в спиральном базисе и обратно осуществляется следующим образом:

$$T_p = PT_dN, T_d = NT_pP. \quad (3)$$

Собственными для спирального базиса являются поляризационные структуры РП-пучка и АП-пучка,

integer number of revolutions. The polarization-symmetric structures have two modifications depending on the rotation direction of the vector oscillation plane \vec{E} .

The polarization structure of these beams is invariant to the rotation relative to the beam axis: the polarization condition is maintained along the radius vector r for an arbitrary azimuth angle φ (Fig. 1).

In this paper, the beams with an axisymmetric polarization structure are proposed to be used when transmitting the quantum keys in outer space using the BB84 protocol.

Table 1 shows how the axially symmetric structures that make up the set for the modified polarization protocol are generated.

The basic orthogonal polarization structures of the polarization protocol are the beams formed by a vector superposition of linearly polarized Hermite-Gaussian modes with the indices 10 and 01 (Table 1). This is a *radial* polarization structure, since the vector \vec{E} at each point of the transverse plane is oriented along the radius (RP-beam), and an *azimuth* polarization structure, since the vector \vec{E} is directed at each point at a tangent to the concentric circles (AP-beam), and two orthogonal polarization structures with axial symmetry that are rotated at 45° relative to the RP-beam and AP-beam: right-twisted (RTP-beam) and left-twisted (LTP-beam). The Jones vectors in Table 1 are recorded in a cylindrical basis, where φ is the azimuth angle.

It is convenient to demonstrate the interaction of basic beams with the radial polarization elements in a special polarization (spiral) basis.

2. SPIRAL BASES

For the convenience of mathematical manipulations, the spiral bases that are specified using two matrices [8] are used:

$$P = \begin{pmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi \\ -\sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix},$$

$$N = \begin{pmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix}. \quad (1)$$

where φ is the azimuth angle, measured from the so-called neutral semi-axis, in the direction of which the matrices become unitary.

The matrix P describes transition of the Jones vector \vec{D} from the Cartesian to spiral P -basis, where the relevant Jones vector will be denoted by the index \vec{p} , and the matrix N describes transition to the spiral N -basis



у которых вектор \vec{E} вращается против часовой стрелки при изменении азимутального угла φ , при этом поляризационная структура не изменяется при поворотах осей координат.

При преобразовании из декартова базиса в спиральный \vec{p} -базис векторы Джонса данных пучков приобретают следующий вид:

$$\vec{D}_{Rp} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{D}_{Ap} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Для N-базиса собственными являются поляризационные структуры с поворотом плоскости колебаний вектора \vec{E} по часовой стрелке. В этом случае поляризационная структура изменяется при повороте декартового базиса.

Векторы Джонса ПСП-пучка и ЛСП-пучка в спиральном базисе имеют вид:

$$\vec{D}_{RRp} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \vec{D}_{LRp} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

3. РАДИАЛЬНЫЙ ПОЛЯРИЗАТОР И УСТРОЙСТВА НА ЕГО ОСНОВЕ

Необходимым устройством для реализации передачи квантового ключа, а именно для идентификации различных базовых состояний, является *радиальный* поляризатор (РП). Оси пропускания радиального поляризатора направлены вдоль поперечного радиуса $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ($\varphi = const$). В азимутальном направлении, т.е. при ориентации вектора \vec{E} по касательным к концентрическим окружностям, пропускание равно нулю. Покажем, как РП может быть получен с помощью обычного линейного поляризатора, расположенного между двух спиральных вращателей [23].

Матрицы Джонса положительного P и отрицательного N спирального вращателя в декартовом базисе имеют вид:

$$P = \begin{pmatrix} \cos(\varphi - \alpha) & \sin(\varphi - \alpha) \\ -\sin(\varphi - \alpha) & \cos(\varphi - \alpha) \end{pmatrix}, \quad N = \begin{pmatrix} \cos(\varphi - \alpha) & -\sin(\varphi - \alpha) \\ \sin(\varphi - \alpha) & \cos(\varphi - \alpha) \end{pmatrix}. \quad (6)$$

где φ – азимутальный угол, отсчитываемый от горизонтальной оси X декартова базиса в поперечном сечении пучка; α – угол, который составляет нулевую полуось спирального вращателя с осью X.

with the index \vec{n} . If the neutral semi-axis is consistent with the X-axis of the Cartesian basis, then we have:

$$\vec{D}_p = P\vec{D}, \vec{D}_n = N\vec{D}. \quad (2)$$

Transformation of the Jones matrix T_d from the Cartesian polarization basis to the matrix T_p in the spiral basis and vice versa is performed as follows:

$$T_p = PT_dN, T_d = NT_pP. \quad (3)$$

The polarization structures of the RP beam and the AP beam are intrinsic to the spiral basis, in which the vector \vec{E} is rotated counterclockwise when the azimuth angle φ is changed, while the polarization structure does not change when the coordinate axes are rotated.

When transforming from the Cartesian basis to the spiral \vec{p} -basis, the Jones vectors of these beams acquire the following form:

$$\vec{D}_{Rp} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{D}_{Ap} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

The polarization structures with a clockwise rotation of the vector \vec{E} oscillation plane are intrinsic for the N-basis. In this case, the polarization structure is changed when the Cartesian basis is rotated.

The Jones vectors of the RTP beam and LTP beam in a spiral basis have the following form:

$$\vec{D}_{RRp} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \vec{D}_{LRp} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

3. RADIAL POLARIZER AND DEVICES ON ITS BASIS

A necessary device for implementing the quantum key transmission, namely for identifying various basic states, is a *radial* polarizer (RP). The radial polarizer transmission axes are directed along the transverse radius $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ($\varphi = const$). In the azimuth direction, i. e. when the vector \vec{E} is oriented tangent to the concentric circles, the transmission is equal to zero. We will show how the RP can be obtained using a conventional linear polarizer located between two spiral rotators [23].

The Jones matrices of the positive P and negative N spiral rotator in the Cartesian basis have the following form:



Спиральные вращатели могут быть полярными или неполярными, в зависимости от того, изменяют ли они свой знак для обратной волны.

Пусть нулевая полуось двух спиральных вращателей разного знака совпадает с осью X декартова базиса. Расположим идеальный линейный поляризатор между этими двумя вращателями так, что ось его наибольшего пропускания составляла угол β с осью X. Матрица Джонса данного поляризационно-неоднородного устройства будет иметь следующий вид:

$$T_r(\beta) = \begin{pmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\beta & -\sin\beta \\ \sin\beta & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{pmatrix} \cos\beta & \sin\beta \\ -\sin\beta & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi \\ -\sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} = \\ = \begin{pmatrix} \cos^2(\varphi+\beta) & \sin(\varphi+\beta)\cos(\varphi+\beta) \\ \sin(\varphi+\beta)\cos(\varphi+\beta) & \sin^2(\varphi+\beta) \end{pmatrix}. \quad (7)$$

При $\beta=0$ данное поляризационное устройство является радиальным поляризатором, который без потерь пропускает РП-пучок, вектор \vec{E} которого ориентирован вдоль поперечного радиуса (вектор Джонса \vec{D}_R) и полностью поглощает АП-пучок с азимутальной поляризационной структурой (вектор Джонса \vec{D}_A).

Радиальный поляризатор формирует из линейно поляризованного света пучок с радиальной поляризационной структурой, независимо от ориентации плоскости колебаний вектора \vec{E} – поляризационного азимута ψ , однако при этом изменяется интенсивность пучка:

$$T_r(0)\vec{D}(\psi) = \begin{pmatrix} \cos^2\varphi & \sin\varphi\cos\varphi \\ \sin\varphi\cos\varphi & \sin^2\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\psi \\ \sin\psi \end{pmatrix} = \\ = \begin{pmatrix} \cos\varphi \\ \sin\varphi \end{pmatrix} \cos(\varphi-\psi), \quad (8)$$

где вектор Джонса линейно поляризованного света записан в виде:

$$\vec{D}(\psi) = \begin{pmatrix} \cos\psi \\ \sin\psi \end{pmatrix}.$$

Потери в этом случае достигают 50%.

$$P = \begin{pmatrix} \cos(\varphi-\alpha) & \sin(\varphi-\alpha) \\ -\sin(\varphi-\alpha) & \cos(\varphi-\alpha) \end{pmatrix}, \\ N = \begin{pmatrix} \cos(\varphi-\alpha) & -\sin(\varphi-\alpha) \\ \sin(\varphi-\alpha) & \cos(\varphi-\alpha) \end{pmatrix}. \quad (6)$$

where φ is the azimuth angle measured from the horizontal X-axis of the Cartesian basis in the cross section of the beam; α is the angle made by the *neutral* semi-axis of the spiral rotator with the X-axis.

The spiral rotators can be polar or non-polar, depending on whether they change their sign for a reverse wave.

Let the neutral semi-axis of two spiral rotators with various signs coincide with the X-axis of the Cartesian basis. Let us place an ideal linear polarizer between these two rotators so that the axis of its greatest transmission makes an angle β with the X axis. The Jones matrix of this polarization-inhomogeneous device will have the following form:

$$T_r(\beta) = \begin{pmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\beta & -\sin\beta \\ \sin\beta & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{pmatrix} \cos\beta & \sin\beta \\ -\sin\beta & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi \\ -\sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} = \\ = \begin{pmatrix} \cos^2(\varphi+\beta) & \sin(\varphi+\beta)\cos(\varphi+\beta) \\ \sin(\varphi+\beta)\cos(\varphi+\beta) & \sin^2(\varphi+\beta) \end{pmatrix}. \quad (7)$$

When $\beta=0$, this polarization device is a radial polarizer that transmits the RP-beam without any losses, the vector \vec{E} of which is oriented along the transverse radius (Jones vector \vec{D}_R) and completely absorbs the AP beam with an azimuth polarization structure (Jones vector \vec{D}_A).

A radial polarizer generates a beam with a radial polarization structure from the linearly polarized light, regardless of the orientation of the vector \vec{E} oscillation plane – polarization azimuth ψ , however, the beam intensity is changed:

$$T_r(0)\vec{D}(\psi) = \begin{pmatrix} \cos^2\varphi & \sin\varphi\cos\varphi \\ \sin\varphi\cos\varphi & \sin^2\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\psi \\ \sin\psi \end{pmatrix} = \\ = \begin{pmatrix} \cos\varphi \\ \sin\varphi \end{pmatrix} \cos(\varphi-\psi), \quad (8)$$



Из циркулярно-поляризованного света радиальный поляризатор формирует оптический вихрь с радиальной поляризационной структурой:

$$T_r(0)\bar{D} = \begin{pmatrix} \cos^2 \varphi & \sin \varphi \cos \varphi \\ \sin \varphi \cos \varphi & \sin^2 \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{pmatrix} \exp(i\varphi), \quad (9)$$

при этом потери равны 50%.

Если в (5) переставить местами спиральные вращатели, то получается уже *гиперболический* поляризатор, собственными состояниями поляризации которого являются векторы Джонса, у которых в отличие от РП-пучка и АП-пучка вектор \vec{E} вращается по часовой стрелке при увеличении азимутального угла

$$\bar{D}_{N1r} = \begin{pmatrix} \cos \varphi \\ -\sin \varphi \end{pmatrix}, \quad \bar{D}_{N1a} = \begin{pmatrix} \sin \varphi \\ -\cos \varphi \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Если в (5) использовать полярные фарадеевские спиральные вращатели, то данное устройство будет представлять собой радиальный поляризатор для одного направления и гиперболический поляризатор для противоположного. Соответственно в одну сторону будет проходить без потерь \bar{D}_{N1r} , а в другую сторону – \bar{D}_{N1a} .

Матрица Джонса радиального поляризатора в спиральном P-базисе имеет вид:

$$T_p = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Соответственно матрица Джонса гиперболического поляризатора имеет аналогичный вид в спиральном N-базисе.

Радиальный поляризатор, развернутый на угол β , в спиральном базисе имеет вид

$$T_p(\beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2 \beta & \sin \beta \cos \beta \\ \sin \beta \cos \beta & \sin^2 \beta \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Кроме радиального поляризатора, для анализа криптографического ключа требуется иметь еще три устройства. Во-первых, это радиальный поляризатор, развернутый на 90° , или, другими словами, *аксиальный* поляризатор, который пропу-

where the Jones vector of linearly polarized light is described as follows:

$$\bar{D}(\psi) = \begin{pmatrix} \cos \psi \\ \sin \psi \end{pmatrix}.$$

In this case, the losses reach 50%.

The radial polarizer generates an optical vortex with a radial polarization structure based on the circularly polarized light:

$$T_r(0)\bar{D} = \begin{pmatrix} \cos^2 \varphi & \sin \varphi \cos \varphi \\ \sin \varphi \cos \varphi & \sin^2 \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{pmatrix} \exp(i\varphi), \quad (9)$$

In this case the losses are equal to 50%.

If we rearrange the spiral rotators in (5), then we obtain a *hyperbolic* polarizer, the eigenstates of polarization of which are the Jones vectors, in which, unlike the RP beam and the AP beam, the vector \vec{E} is rotated clockwise as the azimuth angle increases:

$$\bar{D}_{N1r} = \begin{pmatrix} \cos \varphi \\ -\sin \varphi \end{pmatrix}, \quad \bar{D}_{N1a} = \begin{pmatrix} \sin \varphi \\ -\cos \varphi \end{pmatrix}. \quad (10)$$

If polar Faraday spiral rotators are used in (5), then this device will be a radial polarizer for one direction and a hyperbolic polarizer for the opposite direction. Accordingly, \bar{D}_{N1r} will pass in one direction without any losses, and \bar{D}_{N1a} – in the other direction.

The Jones matrix of a radial polarizer in a spiral P-basis has the following form:

$$T_p = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Accordingly, the Jones matrix of the hyperbolic polarizer has a similar form in the spiral N-basis.

The radial polarizer, rotated by β , has the following form in a spiral basis:

$$T_p(\beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2 \beta & \sin \beta \cos \beta \\ \sin \beta \cos \beta & \sin^2 \beta \end{pmatrix}. \quad (12)$$



скает без потерь АП-пучков. Матрица Джонса этого устройства в спиральном базисе имеет вид

$$T_{ap} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

что соответствует подстановке в (12) $\beta = 90^\circ$.

Радиальный поляризатор, развернутый на угол 45° , описывается в спиральном базисе матрицей Джонса:

$$T_p(45^\circ) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Данное поляризационное устройство полностью пропускает закрученный ПСП-пучок и полностью гасит ортогонально поляризованный ЛСП-пучок (4). Для двух других поляризационных структур (3) пропускание является частичным.

Заметим, что если применять устройство, состоящее из линейного поляризатора и двух спиральных вращателей (7), то, поворачивая линейный поляризатор на угол $\pm 45^\circ$, мы получаем два устройства для пропускания ПСП-пучка и ЛСП-пучка.

Совокупное действие четырех поляризационно-неоднородных устройств на базовые состояния поляризации модифицированного квантового ключа иллюстрирует табл. 2.

4. ОПИСАНИЕ ПРОТОКОЛА

Положение плоскости колебаний вектора \vec{E} на выходе из оптико-лазерной системы изменяется в широких пределах. Это создает проблемы при определении ориентации базовой системы координат при передаче поляризационного ключа с земли на борт и обратно. Применение поляризационно-симметричных структур позволяет решить данную проблему.

В системе лазерной связи с квантовой криптографией по предлагаемому протоколу формируются четыре фотона из осесимметричных пучков четырех видов, показанных в табл. 2, с помощью четырех устройств с использованием радиального поляризатора в четырех ориентациях. В приемной части соответственно применяются такие же четыре поляризационных устройства.

Первое поляризационное устройство – радиальный поляризатор, который гасит АП-пучок и пропускает РП-пучок. В спиральном базисе имеем:

$$\begin{aligned} T_p(0)\bar{D}_{Rp} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \\ T_p(0)\bar{D}_{Ap} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (14)$$

In addition to the radial polarizer, three more devices are required to analyze the cryptographic key. Firstly, it is a radial polarizer, rotated by 90° , or, in other words, an *axial* polarizer that transmits the AP beam without any losses. The Jones matrix of this device in a spiral basis has the following form:

$$T_{ap} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

that corresponds to the substitution in (12) $\beta = 90^\circ$.

The radial polarizer rotated by 45° is described by the Jones matrix in a spiral basis:

$$T_p(45^\circ) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

This polarization device completely transmits the twisted RTP beam and completely quenches the orthogonally polarized LTP beam (4). For the other two polarization structures (3), the transmission is partial.

It should be noted that if we use the device consisting of a linear polarizer and two spiral rotators (7), then rotation of the linear polarizer by an angle of $\pm 45^\circ$ will lead to two devices for transmitting the RTP beam and the LTP beam.

The combined effect of four polarization inhomogeneous devices on the basic polarization states of the modified quantum key is shown in Table 2.

4. DESCRIPTION OF PROTOCOL

The position of the vector \vec{E} oscillation plane at the output of the optical laser system varies over a wide range. It creates problems when determining the orientation of the reference coordinate system during the polarization key transmission from the ground aboard and back. The use of polarization-symmetric structures allows to solve this problem.

The laser communication system with quantum cryptography according to the proposed protocol generates four photons on the basis of four types of axially symmetric beams shown in Table 2 using four devices with a radial polarizer in four orientations. The same four polarizing devices are used in the receiver portion, accordingly.

The first polarization device is a radial polarizer that quenches the AP beam and transmits the RP beam. The following matrix is obtained in the spiral basis:

$$\begin{aligned} T_p(0)\bar{D}_{Rp} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \\ T_p(0)\bar{D}_{Ap} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (14)$$

Второе поляризационное устройство – это радиальный поляризатор, развернутый на 90°, который гасит РП-пучок и пропускает АП-пучок. Данные воздействия описываются следующим образом:

$$T_{rp}(90^\circ)\bar{D}_{Rp} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$T_{rp}(90^\circ)\bar{D}_{Ap} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Третье поляризационное устройство – это радиальный поляризатор, развернутый на 45°, который гасит ЛСП-пучок и пропускает ПСП-пучок. Имеем в спиральном базисе

The second polarization device is a radial polarizer rotated by 90° that quenches the RP beam and transmits the AP beam. These impacts are described as follows:

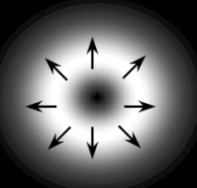
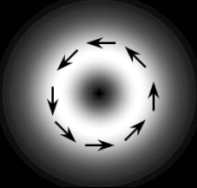
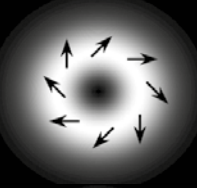
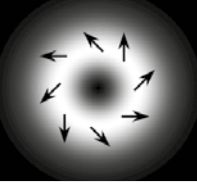
$$T_{rp}(90^\circ)\bar{D}_{Rp} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$T_{rp}(90^\circ)\bar{D}_{Ap} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (15)$$

The third polarization device is a radial polarizer rotated by 45° that quenches the LTP beam and transmits the RTP beam. The following matrices are available in the spiral basis:

Таблица 2. Результат воздействия поляризационных элементов на пучки

Table 2. Result of the influence of polarizing elements on the beams

Ориентация осей пропускания в пространстве Orientation of transmission axes in the space	Устройство Device				
	Вид поляризационной структуры исходного пучка Type of polarization structure of the initial beam	Радиальный поляризатор Radial polarizer	Радиальный поляризатор, развернутый на 90° Radial polarized rotated by 90°	Радиальный поляризатор, развернутый на 45° Radial polarized rotated by 45°	Радиальный поляризатор, развернутый на -45° Radial polarized rotated by -45°
РП-пучок RP-beam		Пропускает Transmission	Не пропускает No transmission	Частично пропускает Partial transmission	Частично пропускает Partial transmission
АП-пучок AP-beam		Не пропускает No transmission	Пропускает Transmission	Частично пропускает Partial transmission	Частично пропускает Partial transmission
ЛСП-пучок LTP-beam		Частично пропускает Partial transmission	Частично пропускает Partial transmission	Не пропускает No transmission	Пропускает Transmission
ПСП-пучок RTP-beam		Частично пропускает Partial transmission	Частично пропускает Partial transmission	Пропускает Transmission	Не пропускает No transmission



$$T_p(45^\circ)\bar{D}_{RRp} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix},$$

$$T_p(45^\circ)\bar{D}_{LRp} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Четвертое поляризационное устройство – это радиальный поляризатор, развернутый на -45° , который гасит ПСП-пучок и пропускает ЛСП-пучок. Имеем

$$T_p(-45^\circ)\bar{D}_{RRp} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$T_p(-45^\circ)\bar{D}_{LRp} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Таким образом, нами показано, что применение пучков Эрмита-Гаусса с аксиально-симметричной поляризационной структурой является аналогичным известному протоколу BB84 в спиральном базисе, однако, предложенная практическая реализация обладает инвариантностью к повороту относительно оси распространения z .

Практическая реализация может быть осуществлена следующим образом. На входе оптико-лазерной системы наведения должен находиться узкополосный лазер и четвертьволновая пластинка для генерации света с круговой поляризацией. Такой свет независимо от ориентации телескопа передающей системы сохранит круговую поляризацию. На выходе из системы наведения необходимо расположить поляризационное устройство, которое формирует четыре базовых пучка с различной осесимметричной поляризационной структурой. Например, это может быть радиальный поляризатор между двух спиральных вращателей, который поворачивается в четыре положения или сортер. Важным условием является совпадение оптической оси пучка и радиального поляризатора. Этого можно достигнуть, используя систему наведения с соосным пучком, который обладает достаточной мощностью и возможно другой длиной волны, например, 532 нм, что удобно при юстировке системы. Заметим, что, кроме аксиально-симметричной поляризационной структуры, пучки на выходе будут обладать свойствами оптического вихря, поскольку, согласно (9), фазовая структура пучков изменяется пропорционально азимутальному углу. Как известно [24 и др.], оптические вихри обладают большей устойчивостью к флуктуациям атмосферы, чем обычный лазерный пучок.

$$T_p(45^\circ)\bar{D}_{RRp} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix},$$

$$T_p(45^\circ)\bar{D}_{LRp} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

The fourth polarization device is a radial polarizer rotated by -45° that quenches the RTP beam and transmits the LTP beam. The following is obtained:

$$T_p(-45^\circ)\bar{D}_{RRp} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$T_p(-45^\circ)\bar{D}_{LRp} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Thus, we have shown that the use of Hermite-Gaussian beams with an axially symmetric polarization structure is similar to the well-known BB84 protocol in a spiral basis. However, the proposed practical implementation is invariant to the rotation relative to the propagation axis z .

The practical implementation can be performed as follows. The narrow-band laser and a quarter-wave plate shall be located at the input of the optical-laser guidance system for generating the circularly polarized light. Regardless of the telescope orientation of the transmitting system, such light shall retain its circular polarization. It is necessary to place a polarization device generating four basic beams with various axially symmetric polarization structures at the output of the guidance system. For example, it could be a radial polarizer between two spiral rotators that is rotated into four positions or a sorter. An important condition is coincidence of the optical axis of the beam and the radial polarizer. This can be achieved by using a guidance system with a coaxial beam having the sufficient power and possibly a different wavelength, for example, 532 nm, that is convenient for the system alignment. It should be noted that, in addition to the axially symmetric polarization structure, the output beams will have the properties of an optical vortex, since, according to (9), the phase beam structure is changed proportionally to the azimuth angle. As it is known [24, etc.], the optical vortices are more resistant to the atmospheric fluctuations than a conventional laser beam.

If the laser initially generates an RP beam, then it is sufficient to apply a polarization rotator, for example, a Faraday rotator that twists the polarization structure of the RP beam into an AP beam, a RTP beam, or an LTP beam.

Если лазер изначально генерирует РП-пучок, то достаточно применить поляризационный вращатель, например, фарадеевский, которые скручивает поляризационную структуру РП-пучка в АП-пучок, ПСП-пучок или ЛСП-пучок.

На космическом аппарате должно располагаться ответное устройство в виде вращающегося радиального поляризатора и соответствующий ретранслятор.

В качестве иллюстрации возможности генерации рассматриваемых здесь пучков на рис. 2 приведены полученные экспериментально изображения поперечного сечения пучка, прошедшего сквозь турбулентную среду, а также фрагмент интерференционной картины с изображением «вилки», что подтверждает факт наличия оптического вихря.

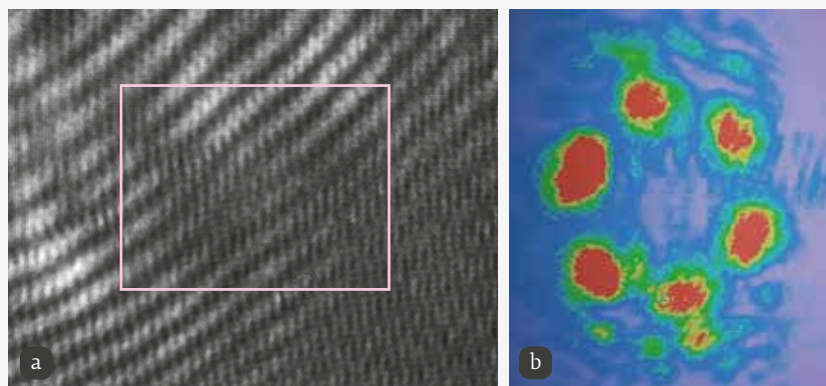


Рис. 2. Эксперимент – слева: прохождение аксиально-поляризованного пучка, представляющего суперпозицию мод Эрмита-Гаусса через турбулентную среду; справа: наличие «вилки» в интерференционной картине (изображения получены в интерферометре с использованием угольковых отражателей в качестве зеркал [20])

Fig. 2. An experiment – Left: passage of an axially polarized beam representing a superposition of Hermite-Gauss modes through a turbulent medium; On the right: the presence of a “fork” in the interference pattern (the images were obtained in an interferometer using the retroreflectors as the mirrors [20])

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предложенная в настоящей работе реализация протокола BB84 с использованием пучков, обладающих аксиальной симметрией состояния поляризации, инвариантна по отношению к повороту относительно оси распространения пучка, что делает ее устойчивой для случая даже существенного изменения состояния поляризации в различных точках небесной полусферы. Такая проблема является характерной для систем квантовой рассылки ключа в космосе через низкоорбитальные космические аппараты.

Практическая реализация пучков Эрмита-Гаусса с аксиально-симметричной поляризационной структурой не вызывает трудностей [16–19, 21]. Существенной на сегодняшний день, на наш взгляд, является проблема детектирования пучков в криптографических системах передачи информации. Важным этапом в этом смысле явилась бы практическая реализация спиральных поляризационных вращателей, например, на жидкокристаллических пленках, и, соответственно, радиальных поляризаторов. Существуют также возможности реализации таких устройств на основе «тонких» графеновых слоев [25–27] или электрических управляемых дифракционных решеток [28], или рефракционного биконического аксикона [29].

The spacecraft shall have a response device in the form of a rotating radial polarizer and a relevant transponder.

As an illustration of the possible generation of beams considered in this paper, Fig. 2 shows the experimentally obtained images of the cross section of a beam passing through a turbulent medium, as well as a fragment of the interference pattern with a “fork” image that confirms the presence of an optical vortex.

DISCUSSION OF RESULTS, CONCLUSIONS

The implementation of the BB84 protocol proposed in this paper using beams with axial symmetry of the polarization state is invariant with respect to rotation relative to the beam propagation axis, which makes it stable for the case of even a significant change in the polarization state at various points of the celestial hemisphere. Such a problem is typical for quantum key distribution systems in space via low-orbit spacecraft.

The practical implementation of Hermite-Gauss beams with an axially symmetric polarization structure does not cause difficulties [16–19, 21]. In our opinion, the issue of beam detection in the cryptographic data transmission systems is rather critical. An important step would be the practical implementation of spiral polarization rotators, for example, with the liquid-crystal films, and, accordingly, radial polarizers.



Концептуальная проблема реализации систем передачи квантовых ключей состоит в том, что принцип унитарности преобразования в квантовой оптике требует отсутствия оптических потерь в системе регистрации, поскольку ведет к потере состояния запутанности фотонов. Поэтому, строго говоря, такие устройства, как сортеры, дифракционные решетки и т.д., не могут быть использованы в системах с «истинным» источником фотонов. Однако до последнего времени в большинстве практических случаев в системах КРК в качестве источника фотонов используется высокостабильный узкополосный лазер (как, например, в [30, 31]), что снимает вопрос о потерях в системе регистрации отдельных фотонов.

АВТОРЫ

- А. Л. Соколов, д. т. н., проф., руководитель направления, Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения» (АО «НПК «СПП»), Москва, Россия.
ORCID: 0000-0001-6164-7615
- В. М. Петров, д. ф.-м. н. (радиофизика), д. ф.-м. н. (оптика), профессор, кафедра Общей физики-1, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия.
ORCID: 0000-0002-8523-0336
- В. Ю. Венедиктов, д. ф.-м. н., профессор, главный научный сотрудник, Кафедра лазерных измерительных и навигационных систем, Санкт-Петербургский электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия.
ORCID: 0000-0055-1234-5678
- Д. Д. Решетников, аспирант, кафедра Общей физики-1, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия.
ORCID: 0009-0001-5587-3306

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов. Результаты исследования были обсуждены и представлены в рукописи, представляющей собой совместную работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bykovskij A. YU., Kompanec I. N.** Kvantovaya kriptografiya i kombinovannye skhemy kommunikacionnyh setej na ee osnove. *Kvantovaya elektronika*. 2018; 48 (9): 777. DOI 10.1070/QEL16732. (In Russ.).
Быковский А. Ю., Компанец И. Н. Квантовая криптография и комбинированные схемы коммуникационных сетей на ее основе. *Квантовая электроника*. 2018; 48 (9): 777. DOI 10.1070/QEL16732.
2. **Mirhosseini M., Magana-Loaiza O. S., O'Sullivan M. N. et al.** High-dimensional quantum cryptography with twisted light. *New J. Phys.* 2015; 17: 033033. DOI 10.1088/1367-2630/17/3/033033.
3. **Doster T., Watnik A.** Laguerre-Gauss and Bessel-Gauss beams propagation through turbulence: analysis of channel efficiency. *Appl. Opt.* 2016; 55 (36): 10239. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.55.010239>.
4. **Lavery M. P. J., Peuntinger C., Gunthner K. et al.** Free-space propagation of high-dimensional structured optical fields in an urban environment. *Sci. Adv.* 2017; 3 (10): e1700552. DOI: 10.1126/sciadv.1700552.
5. **Z. Qu, Djordjevic I. B.** High-speed free-space optical continuous-variable quantum key distribution enabled by three-dimensional multiplexing. *Opt. Express*. 2017; 25 (7): 7919. <https://doi.org/10.1364/OE.25.007919>
6. **Sit A., Fickler R., Alsairi F. et al.** Quantum cryptography with structured photons through a vortex fiber. *Opt. letters*. 2018; 43 (17): 4108. <https://doi.org/10.1364/OL.43.004108>.

There are also implementation possibilities for such devices based on “thin” graphene layers [25–27] or electrically controlled diffraction gratings [28], or refractive biconic axicon [29].

The conceptual issue of such system implementation is that the principle of transmission unitarity in the quantum light theory requires the absence of optical losses in the detection system, since it leads to the loss of the photon entanglement state. Therefore, in the strict sense, such devices as the sorters, diffraction gratings, etc. cannot be used in the systems with a “true” photon source. However, up to the present time, in most practical cases, the QKD systems have used a highly stable narrow-band laser as a photon source (as, for example, in [30, 31]) that has disallowed the issue of losses in the individual photon detection systems.

AUTHORS

- A. L. Sokolov, Doctor of Technical Sciences, Prof., Head of Department, JSC “Research and-production corporation “Precision system and Instruments” (RPC PSI), Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0001-6164-7615
- V. M. Petrov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences (radiophysics), Doctor of Physical and Mathematical Sciences (optics), professor, Department of General Physics No. 1, Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia
ORCID: 0000-0002-8523-0336
- V. Yu. Venediktov, Dr. of Sciences (Phys.&Math.), Professor, Chief Researcher, Department of Laser Measurement and Navigation Systems, St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”, St. Petersburg, Russia.
ORCID: 0000-0055-1234-5678
- D. D. Reshetnikov, Ph. D. Student, Department of General Physics No.1, Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that they have no conflict of interest. The study results were discussed and indicated in the manuscript being a joint paper.



- Акентьев А. С., Садовников М. А., Соколов А. Л., Симонов Г. В. Поляризационный анализ системы наведения квантово-оптических систем. *Оптика и спектроскопия*. 2017; 122 (6): 1044. <https://doi.org/10.7868/S0030403417060022>.
13. Nesterov A. V., Niz'ev V. G., Sokolov A. L. Lazernoe izluchenie s osesimmetrichnym sostoyaniem polarizatsii. *Vestnik MEI*. 1999; 2, 76. (In Russ.). Нестеров А. В., Низьев В. Г., Соколов А. Л. Лазерное излучение с осесимметричным состоянием поляризации. *Вестник МЭИ*. 1999; 2:76.
 14. Tovar A. Production and propagation of cylindrically polarized Laguerre-Gaussian laser beams. *J. Opt. Soc. Am. A*. 1998; 15: 2705. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.15.002705>.
 15. Ishchenko E. F., Sokolov A. L. *Polyarizacionnaya optika* (uchebnoe posobie, izd. 3). М.: Изд. – во. ФИЗМАТЛИТ. 2019. ISBN 978-5-9221-1838-5 (In Russ.). Ищенко Е. Ф., Соколов А. Л. Поляризационная оптика (учебное пособие, изд. 3). М.: Изд. – во. ФИЗМАТЛИТ. 2019. ISBN 978-5-9221-1838-5.
 16. Dorn R., Quabis S., Leuchs G. Generation of a radially polarized doughnut mode of high quality. *Appl. Phys. B*. 2005; 81 (5): 597. DOI: 10.1007/s00340-005-1887-1.
 17. Niz'ev V. G., Yakunin V. P., Turkin N. G. Generaciya polarizacionno-neodnorodnyh mod v moshchnom CO₂-lazere. *Kvantovaya elektronika*. 2009; 39 (6): 505. <https://doi.org/10.1070/QE2009v039n06ABEH013962>. (In Russ.). Низьев В. Г., Якунин В. П., Туркин Н. Г. Генерация поляризационно-неоднородных мод в мощном CO₂-лазере. *Квантовая электроника*. 2009; 39 (6): 505. <https://doi.org/10.1070/QE2009v039n06ABEH013962>.
 18. *Difrakcionnaya nanofotonika*. /Pod red. V. A. Sojfer. М.: Fizmatlit. 2011. ISBN 978-5-9221-1237-6. (In Russ.). *Дифракционная нанопотоника*. /Под ред. В. А. Соифера. М.: Физматлит. 2011. ISBN 978-5-9221-1237-6.
 19. Sokolov A. L. Optical vortices with axisymmetric polarization structure. *J. Opt. Soc. Am. A*. 2013; 30 (7): 1350. <http://dx.doi.org/10.1364/JOSAA.30.001350>.
 20. Sadovnikov M. A., Sokolov A. L. Prostranstvennaya polarizacionnaya struktura izlucheniya, formiruemaya ugolkovymi otrazhatel'nyimi s nemetalizirovannymi gran'yami. *Optika i spektroskopiya*. 2009; 107(2): 213–218, ISSN 0030-4034. (In Russ.). Садовников М. А., Соколов А. Л. Пространственная поляризационная структура излучения, формируемая уголковыми отражателями с неметаллизированными
- гранями. *Оптика и спектроскопия*. 2009; 107(2): 213–218, ISSN 0030-4034.
21. A. L. Sokolov Optical vortices with axisymmetric polarization structure, *Opt. Eng.*, 56 (1) 014109-1-9 (2017). <http://dx.doi.org/10.1117/1.OE.56.1.014109>
 22. G. Ruffato, M. Girardi, M. Massari. A compact diffractive sorter for high-resolution demultiplexing of orbital angular momentum beams, *Scientific reports*, 8 (2018) 10248, DOI:10.1038/s41598-018-28447-1
 23. Sokolov A. L. Comparative Analysis of the Characteristics of Polar and Non-Polar Spiral Polarization Rotators. *Opt. and Photon. J.* 2020; 10, 13. DOI: 10.4236/opj.2020.102002.
 24. Paterson C. Atmospheric Turbulence and Orbital Angular Momentum of Single Photons for Optical Communication. *Phys. Rev. Letters*. 2005; 94:153901. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.94.153901>
 25. Klimchitskaya G. L., Korikov C. C., Petrov V. M. Theory of reflectivity of graphene-coated material plates. *Phys. Rev. B*. 2015;92: 125419. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.92.125419>.
 26. Klimchitskaya G. L., Korikov C. C., Petrov V. M. Erratum: Theory of reflectivity of graphene-coated material plates. *Phys. Rev. B*. 2016; 93, 159906(E). DOI: 10.1103/PhysRevB.92.125419.
 27. Klimchitskaya G. L., Mostepanenko V. M., Petrov V. M. Impact of chemical potential on the reflectance of graphene in the infrared and microwave domains. *Phys. Rev. A*. 2018; 98: 023809-1-10. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.98.023809>
 28. Petrov V. M., Karaboue C., Petter J., Tschudi N., Bryksin V. V., Petrov M. P. A dynamic narrow-band tunable optical filter. *Appl. Phys. B*. 2003;76:41–44. <https://doi.org/10.1007/s00340-002-1052-z>.
 29. Khorin P. A., Degtyarev S. A., Khonina S. N. Application Study of a Refractive Biconical Axicon for Azimuthal and Radial Polarization Detection. *Photonics Russia*. 2023;17(5): 394–404. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2023.17.5.394.406
 30. Gleim A. V., Chistyakov V. V., Bannik O. L. et al. Sideband quantum communication at 1 Mbit/s on a metropolitan area network. *Journal of Optical Technology*. 2017; 24:362. DOI: 10.1364/JOT.84.000362.
 31. Vashukevich E. A., Lebedev V. V., Ilichev I. V., Agruzov P. M., Shamrai A. V., Petrov V. M., Golubeva T. Yu. Broadband Chip-Based Source of Quantum Noise with Electrically Controllable Beam Splitter. *Phys. Rev. Applied*. 2022; 17(6): 064039. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.17.064039.



ТЕЛЕГРАММ КАНАЛ
НАУЧНОГО ИЗДАТЕЛЬСТВА
ТЕХНОСФЕРА:



- Онлайн репортажи с крупнейших выставок отрасли
- Анонсы мероприятий с участием технических экспертов отрасли
- Скидки на журналы издательства до 25%
- Конкурсы и розыгрыши от ведущих компаний
- Книжные новинки и презентации новых выпусков журналов

Подписывайтесь и оставайтесь в курсе главных событий научно-технической сферы

