

Оптическая система связи на основе вихревых бессель-гауссовых пучков

И.П. Лукин

*Институт оптики атмосферы СО РАН
634055, Томск, Россия, пл. Академика Зюева, 1, lukin_ip@iao.ru*

Вихревые бессель-гауссовы лазерные пучки являются одним из перспективных типов вихревых пучков, поскольку в известной степени обладают свойством инвариантности. В данной работе представлена оптическая система связи, использующая вихревые бессель-гауссовы лазерные пучки. Стратегия обнаружения данной оптической системы связи основывается на ортогональности вихревых бессель-гауссовых лазерных пучков. Передатчик кодирует символы сообщения в значения топологических зарядов вихревых бессель-гауссовых лазерных пучков. На приемнике многоканальный корреляционный детектор по величине корреляционных метрик взаимной когерентности полей вихревых бессель-гауссовых пучков определяет величину топологического заряда, т.е. символ сообщения. Представлены результаты теоретического исследования корреляционных метрик взаимной когерентности на приемной апертуре полей вихревых бессель-гауссовых пучков с различными топологическими зарядами в турбулентной атмосфере. Выражение для функции взаимной когерентности второго порядка вихревых бессель-гауссовых пучков в турбулентной атмосфере с различными топологическими зарядами получено в параксиальном приближении с использованием расширенного принципа Гюйгенса—Френеля. При построении решения применялась квадратичная аппроксимация функции, описывающей искажающее влияние случайных неоднородностей среды. Проведен анализ корреляционных метрик взаимной когерентности на приемной апертуре полей бессель-гауссовых пучков с различными топологическими зарядами в зависимости от оптической толщи атмосферной турбулентности. Показано, что возможность оптической системы связи, использующей бессель-гауссовы пучки, на основе кодирования по топологическому заряду пучка с многоканальным корреляционным детектором на приемнике не ограничена существенно искажающим влиянием атмосферной турбулентности.

Ключевые слова: оптический вихрь, бессель-гауссов пучок, оптическая система связи, атмосферная турбулентность, когерентность, средняя интенсивность; optical vortex, Bessel-Gaussian beam, optical communication system, atmospheric turbulence, coherence, mean intensity.

Введение

Конкретное использование оптических мод, несущих орбитальный угловой момент, в оптических системах коммуникации глубоко и всесторонне обсуждалось в обзорной статье [1]. Производительность приемника прямого обнаружения в виде массива кольцевых детекторов проанализирована в работе [2] для беспроводной оптической системы связи, использующей вихревые лазерные пучки. Сравнение производительности оптических систем связи, использующих соответственно «идеальные» вихревые пучки и вихревые лагерь-гауссовы пучки, проведено в публикации [3], при этом показано, что первая из оптических систем связи дает меньшую частоту ошибок при той же мощности приема. В исследовании [4] символы сообщений кодируются в радиальном индексе коаксиальных вихревых лагерь-гауссовых пучков, а на приемнике обнаружение достигается благодаря ортогональности этих пучков. Оптическая система связи свободного пространства, предназначенная для оптического вихревого мультиплексирования и демультиплексирования большого объема, представлена в работе [5], где в процессе детектирования используется вихревая решетка Дамманна. Влияние усреднения апертуры на обнаружение топологического заряда рассмотрено в статье [6], результаты которой дают количественную оценку эффективности детектора топологического заряда, используемого в вихревых оптических системах связи. Как показано в работе [7], можно устранить искажения интенсивности и фазы пучков с орбитальным угловым моментом, вызванные турбулентностью атмосферы, используя адаптивную систему компенсации фазы без датчика волнового фронта. Экспериментальные, теоретические и численные исследования, проведенные в [8], привели авторов к неоднозначному выводу, что использование базисного набора с полями, содержащими оптические вихри, не увеличивает телекоммуникационные возможности оптической системы связи. В статье [9] была предложена еще одна возможная стратегия обнаружения сигнала, основанная на свойстве ортогональности вихревых гауссовых пучков при кодировании по топологическому заряду лазерного пучка с многоканальным корреляционным детектором на приемнике.

Данная публикация посвящена теоретическому обоснованию использования подобной стратегии обнаружения для оптической системы связи на основе вихревых бессель-гауссовых пучков. В работе проведен анализ корреляционных метрик взаимной когерентности второго порядка на приемной апертуре полей бессель-гауссовых пучков с различными топологическими зарядами в зависимости от оптической толщи атмосферной турбулентности. Обсуждается возможность создания оптической системы связи на основе вихревых бессель-гауссовых лазерных пучков, использующих кодирование по топологическому заряду пучка при многоканальном корреляционном детекторе на приемнике, как в однородной среде, так и в турбулентной атмосфере.

Основные определения

Для вихревого бессель-гауссова лазерного пучка, распространяющегося в направлении оси координат x , начальное распределение поля ($x = 0$) записывается следующим образом [10, 11]:

$$U_0(\mathbf{p}) = U_0(\rho, \varphi) = E_0 \exp\left(-\frac{\rho^2}{2a_0^2} - i\frac{k}{2R_0}\rho^2\right) J_m(\beta\rho) \exp(im\varphi), \quad (1)$$

где E_0 — начальная амплитуда поля на оптической оси лазерного пучка; a_0 — начальный радиус гауссова фактора поля лазерного пучка; R_0 — радиус кривизны параболического волнового фронта в центре излучающей апертуры; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число оптического излучения; λ — длина волны оптического излучения в вакууме; $\beta = \sqrt{k^2 - k_x^2}$ — компонента волнового вектора, ортогональная оси x (параметр бесселева пучка, скалярная величина с размерностью м^{-1}); k_x — компонента волнового вектора по направлению оси x ; $\mathbf{p} = \{y, z\} = \{\rho, \varphi\}$ — поперечная к направлению распространения оптического излучения пространственная координата; $\rho = \sqrt{y^2 + z^2}$, $\varphi = \arctan(y/z)$ — модуль и аргумент этой координаты; m — топологический заряд вихревого лазерного пучка (m — целое число, безразмерная величина); $J_m(\cdot)$ — функция Бесселя первого рода m -ого порядка.

Основные соотношения

Аналитическое решение для функции взаимной когерентности второго порядка вихревых бессель-гауссовых пучков (1) с различными значениями топологических зарядов, распространяющимися в турбулентной атмосфере по одной и той же трассе, записано в параксиальном приближении с использованием расширенного принципа Гюйгенса–Френеля [12, 13]. При нахождении решения использовалась квадратичная аппроксимация функции, описывающей искажающее влияние случайных неоднородностей среды.

Данное выражение для функции взаимной когерентности второго порядка вихревых бессель-гауссовых лазерных пучков имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \Gamma_{2mn}(x, \mathbf{R}, 0) &= \langle E_m(x, \mathbf{R}) E_n^*(x, \mathbf{R}) \rangle = \langle E_m(x, R, \varphi_R) E_n^*(x, R, \varphi_R) \rangle = \\ &= \frac{E_0^2}{4\pi^2 g_r^2(x)} \exp\left[i(m-n)\frac{\pi}{2}\right] \exp[i(m-n)\varphi_R] \exp\left[-\left(1 + \frac{2}{3}\Omega_0 q\right)\frac{\Omega_0^{-1}}{g_r^2(x)}\tilde{\beta}^2 - \frac{\Omega_0^{-1}}{g_r^2(x)}\tilde{R}^2\right] \times \\ &\quad \times \int_0^{2\pi} d\varphi \exp\left[im\varphi - i\frac{g_f^*(x)}{g_r^2(x)}\tilde{\beta}\tilde{R}\cos(\varphi)\right] \times \\ &\quad \times \int_0^{2\pi} d\psi \exp\left[-im\psi + i\frac{g_f(x)}{g_r^2(x)}\tilde{\beta}\tilde{R}\cos(\psi) + \frac{2}{3}\frac{q\tilde{\beta}^2}{g_r^2(x)}\cos(\varphi - \psi)\right], \end{aligned} \quad (2)$$

где $\{x, \mathbf{R}\}$ — координаты точки наблюдения; x — расстояние от плоскости источников до плоскости приемника; $\mathbf{R} = \{R, \varphi_R\}$ — полярные координаты вектора точки наблюдения; $\tilde{R} = \sqrt{k/x}R$ — координата модуля вектора точки наблюдения, нормированная на диаметр первой зоны Френеля $\sqrt{x/k}$; $g_f(x) = (1 - \eta) + i\Omega_0^{-1}$ — геометрический фактор; $a(x) = a_0 g_r(x)$ — текущее значение радиуса гауссова лазерного пучка [13];

$g_r(x) = \sqrt{(1 - \eta)^2 + \Omega_0^{-2}\left(1 + \frac{4}{3}\Omega_0 q\right)}$ — геометрический фактор, описывающий изменения радиуса гауссова лазерного пучка в турбулентной атмосфере [13]; $\eta = x/R_0$ — параметр фокусировки лазерного пучка [13]; $\Omega_0 = ka_0^2/x$ — число Френеля передающей апертуры [13]; $\tilde{\beta} = \sqrt{x/k}\beta$ — нормированный параметр коэффициента бесселева фактора лазерного пучка; $q = x/(k\rho_0^2)$ — параметр, определяющий оптическую толщину турбулентной атмосферы [10, 11]; ρ_0 — радиус когерентности плоской оптической волны в турбулентной атмосфере [13].

Функции взаимной когерентности второго порядка вихревых бессель-гауссовых пучков с различными значениями топологических зарядов в турбулентной атмосфере

Модуль функции взаимной когерентности второго порядка полей вихревых бессель-гауссовых лазерных пучков с различными значениями топологических зарядов в турбулентной атмосфере определим следующим образом:

$$\mu_{mn}(x, R, \varphi_R) = \mu_{mn}(x, R) = \frac{\sqrt{\{\operatorname{Re}[\Gamma_{2mn}(x, \mathbf{R}, 0)]\}^2 + \{\operatorname{Im}[\Gamma_{2mn}(x, \mathbf{R}, 0)]\}^2}}{\operatorname{Max}[\Gamma_{2mn}(x, \mathbf{R}, 0)]_{q=0}}, \quad (3)$$

где $\operatorname{Max}[\Gamma_{2mn}(x, \mathbf{R}, 0)]_{q=0}$ — максимальное значение функции взаимной когерентности второго порядка вихревых бessel-гауссовых лазерных пучков с различными значениями топологических зарядов в однородной среде, т.е. при $q = 0$.

В наглядной форме процесс трансформации модулей функции взаимной когерентности второго порядка вихревых бessel-гауссовых лазерных пучков в турбулентной атмосфере $\mu_{mn}(x, R)$ при $\sqrt{x/k}\beta = 1,0$, $\eta = 0$ и $\Omega_0 \rightarrow \infty$ с разными топологическими зарядами представлен на рис. 1. Эти рисунки являются цветными (100 псевдоцветов) контурными графиками $\mu_{mn}(x, R)$ для вихревых ($m \geq 1$, $n \geq 1$) бessel-гауссовых лазерных пучков ($\mu_{mn}(x, R) \in [1; 0]$) как функции от нормированной радиальной координаты $\sqrt{k/x}R \in [0; 20]$ и нормированного параметра (оптической толщи турбулентной атмосферы) $q \in [0; 10]$, рассчитанные по формулам (2) и (3).

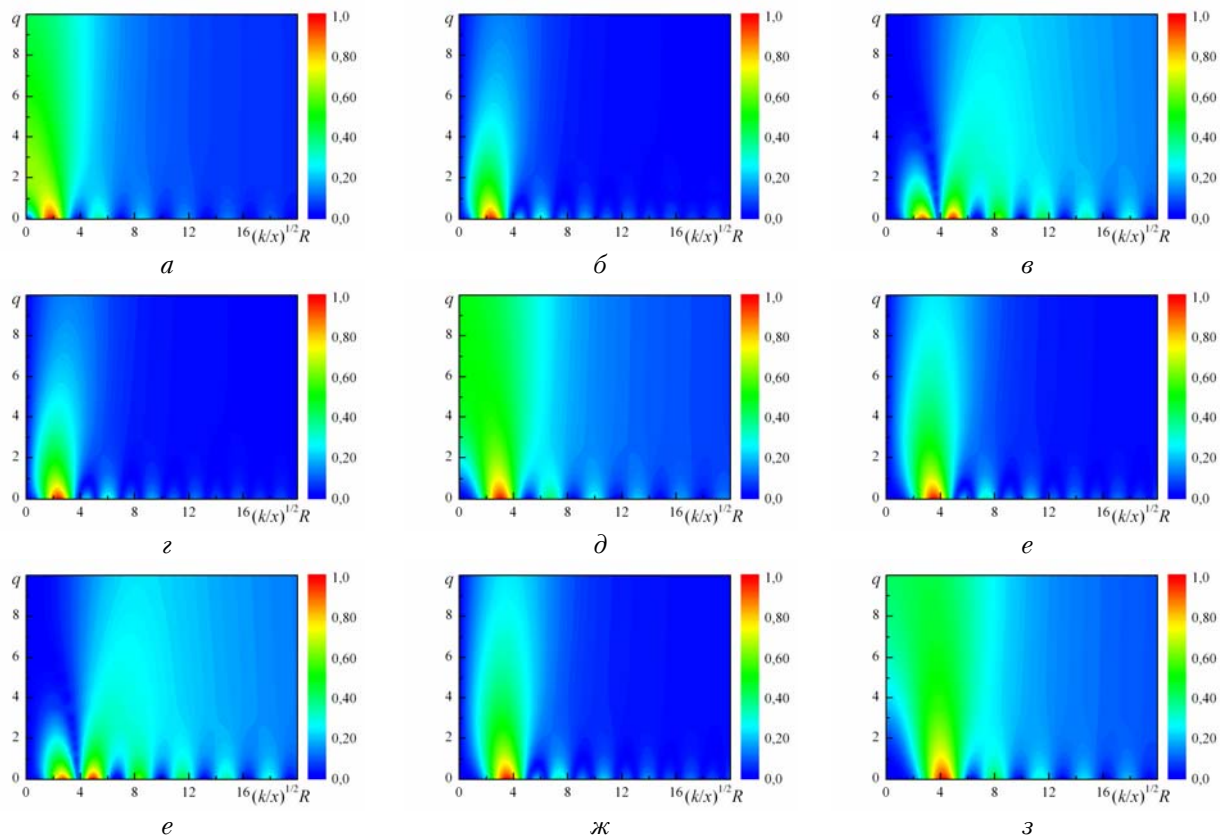


Рис. 1. Эволюция модуля корреляции вихревых бessel-гауссовых пучков с разными топологическими зарядами: $m = 1$, $n = 1$ (а); $m = 1$, $n = 2$ (б); $m = 1$, $n = 3$ (в); $m = 2$, $n = 1$ (г); $m = 2$, $n = 2$ (д); $m = 2$, $n = 3$ (е); $m = 3$, $n = 1$ (е); $m = 3$, $n = 2$ (ж) и $m = 3$, $n = 3$ (з)

Можно выделить три типа графиков. Первый тип графиков — по диагонали матрицы графиков: в этом случае топологические заряды обоих пучков совпадают, а на графиках представлена эволюция средней интенсивности вихревых бessel-гауссовых пучков. Второй тип — непосредственно рядом с диагональю матрицы графиков: топологические заряды пучков отличаются на единицу, на графиках наблюдается один «глобальный» минимум, устойчивый к влиянию атмосферной турбулентности. Третий тип — все остальные графики: когда топологические заряды пучков отличаются друг от друга на два и более, то количество «глобальных» минимумов, устойчивых к влиянию атмосферной турбулентности, равно двум.

Отметим также, что модули функции взаимной когерентности полей вихревых бessel-гауссовых лазерных пучков в турбулентной атмосфере одинаковы для симметричных пар значений топологических зарядов вихревых лазерных пучков (следует напрямую из того факта, что комплексное сопряжение выражения (2) не может изменить выражение (3)).

Корреляционные метрики взаимной когерентности на приемной апертуре

Корреляционные метрики взаимной когерентности второго порядка на приемной апертуре для вихревых бessel-гауссовых лазерных пучков с различными значениями топологических зарядов можно определить следующим образом [9]:

$$M_2(m, n) = \frac{\int_0^{2\pi} d\varphi_R \int_0^{a_r} dR \Gamma_{2mn}(x, R, \varphi_R)}{\sqrt{P_0(m)P_0(n)}}, \quad (4)$$

$$P_0(m) = \pi a_0^2 E_0^2 \exp\left(-\frac{1}{2}\Omega_0 \tilde{\beta}^2\right) I_m\left(\frac{1}{2}\Omega_0 \tilde{\beta}^2\right), \quad (5)$$

где $P_0(m)$ — поток оптического излучения вихревого бessel-гауссова лазерного пучка с топологическим зарядом m в плоскости приемника; a_r — радиус приемной апертуры; $I_m(\cdot)$ — модифицированная функция Бесселя m -го порядка. Корреляционные метрики взаимной когерентности второго порядка для вихревых бessel-гауссовых лазерных пучков (4), (5) при распространении в однородной среде или турбулентной атмосфере, вследствие ортогональности вихревых бessel-гауссовых пучков, принимают следующий вид:

$$M_2(m, n) = \begin{cases} M_2(m, m) \leq 1 & [m = n], \\ 0 & [m \neq n]. \end{cases} \quad (6)$$

Корреляционные метрики взаимной когерентности для $m = n$ (6) при $a_r \rightarrow \infty$ равны единице, а при конечном размере приемной апертуры a_r всегда меньше единицы. Корреляционные метрики взаимной когерентности второго порядка вихревых бessel-гауссовых пучков, рассчитанные по формулам (2), (4) и (5), изображены на рис. 2.

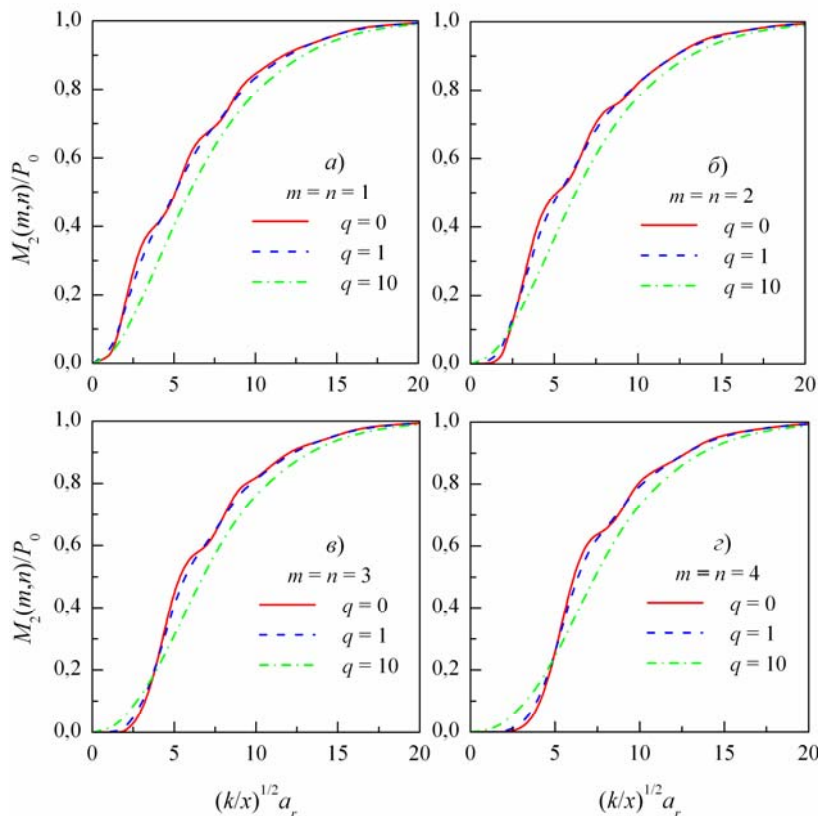


Рис. 2. Корреляционные метрики взаимной когерентности второго порядка на приемной апертуре для вихревых бessel-гауссовых лазерных пучков при $\sqrt{x/k\beta} = 1,0$, $\eta = 0$ и $\Omega_0 = 100$

Уровень корреляционных метрик взаимной когерентности второго порядка на приемной апертуре для вихревых бessel-гауссовых лазерных пучков достигает $\approx 0,80$ при размере приемной апертуры $\sqrt{k/x}a_r \approx 10 \dots 12$ (см. рис. 2).

Заключение

В работе проведен теоретический анализ поведения корреляционных метрик взаимной когерентности второго порядка на приемной апертуре полей вихревых бессель-гауссовых лазерных пучков с различными значениями топологических зарядов в зависимости от параметров лазерных пучков, размера приемной апертуры и оптической толщи атмосферной турбулентности. Показано, что возможность оптической системы связи, использующей вихревые бессель-гауссовые лазерные пучки, на основе кодирования по топологическому заряду вихревого лазерного пучка с многоканальным корреляционным детектором на приемнике не ограничена существенно искажающим влиянием атмосферной турбулентности.

Финансирование. Работа была выполнена в рамках госзадания ИОА СО РАН.

Список литературы

1. Trichili A., Park K.-H., Zghal M., Ooi B.S., Alouini M.-S. Communicating using spatial mode multiplexing: potentials, challenges and perspectives // IEEE Commun. Surveys & Tutorials. 2019. V. 21, N 4. P. 3175–3202. DOI: 10.1109/COMST.2019.2915981.
2. Kupferman J., Arnon Sh. Direct detection receiver for vortex beam // J. Opt. Soc. Am. A. 2018. V. 35, N 9. P. 1543–1547. DOI: 10.1364/JOSAA.35.001543.
3. Shao W., Huang S., Liu X., Chen M. Free-space optical communication with perfect optical vortex beams multiplexing // Opt. Commun. 2018. V. 427. P. 545–550. DOI: 10.1016/j.optcom.2018.06.079.
4. Guo Z., Wang Z., Dedo M.I., Guo K. The orbital angular momentum encoding system with radial indices of Laguerre-Gaussian beam // IEEE Photon. J. 2018. V. 10, N 5. 7906511. DOI: 10.1109/JPHOT.2018.2859807.
5. Wang Z., Zhang N., Yuan X.-C. High-volume optical vortex multiplexing and de-multiplexing for free-space optical communication // Opt. Express. 2011. V. 19, N 2. P. 482–492. DOI: 10.1364/OE.19.000482.
6. Gu Y. Statistics of optical vortex wander on propagation through atmospheric turbulence // J. Opt. Soc. Am. A. 2013. V. 30, N 4. P. 708–716. DOI: 10.1364/JOSAA.30.000708.
7. Yang J., Zhang H., Zhang X., Li H., Xi L. Transmission characteristics of adaptive compensation for joint atmospheric turbulence effects on the OAM-based wireless communication system // Appl. Sci. 2019. V. 9, N 5. 901. DOI: 10.3390/app9050901.
8. Chen M., Dholakia K., Mazilu M. Is there an optimal basis to maximize optical information transfer? // Sci. Rep. 2016. V. 6. 22821. DOI: 10.1038/srep22821.
9. Eyyuboglu H.T. Optical communication system using Gaussian vortex beams // J. Opt. Soc. Amer. A. 2020. V. 37, N 10. P. 1531–1538. DOI: 10.1364/JOSAA.400899.
10. Лукин И.П. Когерентность бессель-гауссовых пучков, распространяющихся в турбулентной атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 8. С. 672–681; Lukin I.P. Coherence of Bessel-Gaussian beams propagating in a turbulent atmosphere // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 1. P. 49–59. DOI: 10.1134/S1024856018010098.
11. Lukin I.P., Lukin V.P. Propagation of a partially coherent Bessel-Gaussian beam in a uniform medium and turbulent atmosphere // Photonics. 2024. V. 11, N 6. 562. DOI: 10.3390/photonics11060562.
12. Chen C., Yang H., Tong S., Lou Y. Changes in orbital-angular momentum modes of a propagated vortex Gaussian beam through weak-to-strong atmospheric turbulence // Opt. Express. 2016. V. 24, N 7. P. 6959–6975. DOI: 10.1364/OE.24.006959.
13. Andrews L.C., Phillips R.L. Laser beam propagation through random media. Second edition. Bellingham, Washington: SPIE Press, 2005. 783 p. DOI: 10.1117/3.626196.

I.P. Lukin. Optical communication system based on vortex Bessel-Gaussian beams.

Vortex Bessel-Gaussian laser beams are one of the promising types of vortex beams, since they have the property of invariance to a certain extent. This paper presents an optical communication system using vortex Bessel-Gaussian laser beams. The detection strategy of this optical communication system is based on the orthogonality of vortex Bessel-Gaussian laser beams. The transmitter encodes the message symbols into the values of the topological charges of vortex Bessel-Gaussian laser beams. At the receiver, a multichannel correlation detector determines the value of the topological charge, i.e. the message symbol, by the value of the correlation metrics of the mutual coherence of the fields of vortex Bessel-Gaussian beams. The results of a theoretical study of correlation metrics of mutual coherence at the receiving aperture of fields of vortex Bessel-Gaussian beams with various topological charges in a turbulent atmosphere are presented. The expression for the second-order mutual coherence function of vortex Bessel-Gaussian beams in a turbulent atmosphere with different topological charges is obtained in the paraxial approximation using the extended Huygens – Fresnel principle. When constructing the solution, a quadratic approximation of the function describing the distorting influence of random inhomogeneities of the medium was used. The correlation metrics of mutual coherence at the receiving aperture of fields of Bessel-Gaussian beams with different topological charges are analyzed depending on the optical thickness of atmospheric turbulence. It is shown that the possibility of an optical communication system using Bessel-Gaussian beams based on topological charge coding of a beam with a multichannel correlation detector at the receiver is not significantly limited by the distorting effect of atmospheric turbulence.