

Системы оптической связи на винтовых пучках

П. В. Короленко^{1,2,*}, А. В. Аверченко¹, А. М. Зотов^{1,†}, Н. Н. Павлов^{1,2}, Ю. В. Рыжикова^{1,‡}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра оптики, спектроскопии и физики наносистем
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН
Россия, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, д. 53

(Статья поступила 20.05.2019; Подписана в печать 27.06.2019)

Проанализированы особенности распространения световых пучков с винтовой структурой волнового фронта в информационных лазерных системах. Расчеты выполнены с использованием технологии параллельных вычислений на платформе CUDA, значительно ускоряющей вычислительный процесс. Сформулированы требования к юстировке оптической системы с мультиплексированием пучков в открытых каналах распространения. Показано, что при распространении излучения в среде со случайными неоднородностями стандартные отклонения гауссового пучка в полтора раза превосходят отклонения пучка с винтовой формой волнового фронта. Это указывает на высокую степень устойчивости винтовых пучков на атмосферных турбулентных трассах. Предложен новый способ генерации мощных винтовых пучков с использованием излучения многоходовых мод лазерных резонаторов.

PACS: 42.68.Bz; 42.30.Kq; 02.60.Gf; 07.05.Tr

УДК: 535.015

Ключевые слова: сингулярная оптика, лазерные системы связи, турбулентные среды, винтовые пучки, мультиплексирование пучков, фрактальная параметризация, многопучковое излучение.

ВВЕДЕНИЕ

Характеристики лазерных пучков с винтовой структурой волнового фронта принято рассматривать в рамках бурно развивающего раздела физики — сингулярной оптики. Развернутое представление о состоянии сингулярной оптики на данном этапе развития науки может дать обзор [1]. Повышенное внимание в последнее время уделяется вопросам использования трубчатых винтовых пучков в системах оптической связи. Выяснилось, что винтовые пучки могут обеспечить специфический тип модуляции излучения, основанный на оценке их орбитального углового момента [1, 2]. Несмотря на большое количество работ, посвященных реализации такой модуляции пучков, распространяющихся в том числе и на атмосферных трассах [3], не изученным остался эффект влияния возмущений структуры винтовых мод на эффективность мультиплексирования. Мультиплексирование позволяет существенно повысить объем передаваемой информации, однако, предъявляет высокие требования к юстировке пучков в канале распространения. Данные о высокой степени устойчивости винтовых пучков в турбулентной среде, возрастающей с увеличением размера приосевой зоны с низкой интенсивностью [4], указывают на целесообразность рассмотрения альтернативных схем получения и использования трубчатых пучков с оптимальным распределением поля в поперечном сечении. Такими свойствами может обладать излучение на так назы-

ваемых М-модах. К М-модам относятся многоходовые (многопучковые) моды, образованные в лазерных резонаторах неаксиальными световыми пучками [5]. В отличие от винтовых световых пучков, получающихся с помощью оптических элементов и устройств, которые не могут выдерживать большие радиационные нагрузки, М-моды, сформированные непосредственно в лазерных резонаторах, обеспечивают более мощное выходное излучение. При этом появляется возможность значительно упростить и сделать более надежной передающую систему. Несмотря на эти кажущиеся очевидными соображения, использование для целей связи М-мод не в достаточной степени освещено в литературе. Практически не изученным остается вопрос о поиске оптимальной для целей связи конфигурации поля на выходе лазера. Решение сформулированных выше проблем определило цель данной работы.

1. МЕТОД РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ВИНТОВЫХ ПУЧКОВ

Винтовые пучки в начальной плоскости $z = 0$ могут быть описаны с использованием выражений для мод Лагерра — Гаусса [6]:

$$E_{p,l}(r, \varphi) = \sqrt{\frac{2p!}{\pi(p+l)!}} \frac{1}{w_0} \left[\frac{r\sqrt{2}}{w_0} \right]^{|l|} \times \exp\left(\frac{-r^2}{w_0^2}\right) L_p^{|l|}\left(\frac{2r^2}{w_0^2}\right) \exp(il\varphi), \quad (1)$$

где r, φ — полярные координаты, $L_p^{|l|}\left(\frac{2r^2}{w_0^2}\right)$ — обобщенный полином Лагерра с азимутальным индексом

*E-mail: pvkorolenko@rambler.ru

†E-mail: a.zotov@physics.msu.ru

‡E-mail: ryzhikovaju@physics.msu.ru

l и радиальным индексом p , w_0 — параметр ширины моды.

В системах связи чаще используются поля со значением $p = 0$. Формула (1) описывает винтовые пучки с однолистным волновым фронтом, принципиально отличающиеся от обычных волн с многолистными фазовыми поверхностями. На рис. 1 графически противопоставлены указанные типы волн.

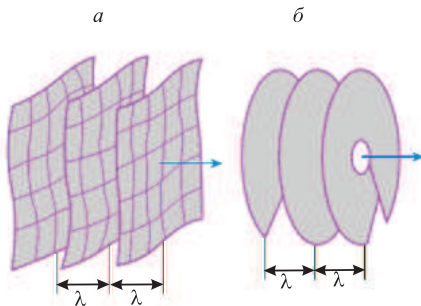


Рис. 1: Структура a — многолистного и b — однолистного волновых фронтов, λ — длина волны

На первом этапе работы были проработаны методические вопросы и создано необходимое программное обеспечение для определения характеристик винтовых пучков при их распространении. Необходимость в создании специализированного программного обеспечения обусловлена большим объемом вычислений, требуемых для оценки изменения параметров лазерного излучения со сложной пространственной структурой под действием случайных факторов. Для моделирования влияния случайных неоднородностей на оптической трассе использовался метод фазового экрана. Извлечение статистики флуктуаций световых волн на основе усреднения по многим реализациям экрана требует большого количества времени, что удлиняет процесс получения и анализа данных. В связи с этим для ускорения расчетов помимо параллельных вычислений на многоядерном центральном процессоре компьютера (CPU) была применена технология параллельных вычислений CUDA, использующая возможности графических процессоров (GPU). Платформа CUDA служила надстройкой для вычислительного пакета MathCad.

При вычислении преобразования пучка фазовым экраном использовались два метода: метод разложения на Лагерра — Гауссовы моды и метод разложения на плоские волны. Для слежения за энергией определенной винтовой моды с индексами p и l , прошедшей фазовый экран, удобно пользоваться методом разложения ее поля на Лагерра — Гауссовы моды. В тех же случаях, когда необходимо оценивать преобразование пучка как целого, с одновременным определением его параметров в различных точках оптического тракта, более целесообразно проводить расчеты методом плоских волн. Пространственное распределение поля в некоторой плоскости $z = 0$ с фиксированной длиной волны λ в этом случае представляется в виде суперпо-

зиции плоских волн. Плоские волны распространяются без изменения модуля амплитуды, однако, волны, распространяющиеся под углом θ к оси z приобретают большой фазовый набег. Если разложить поле на плоские волны, учесть набег фазы для каждой волны, а потом сложить их в заданной плоскости $z = L$, можно рассчитать дифракционное распространение поля.

Реализация метода разложения по плоским волнам с использованием технологии CUDA включала в себя осуществление следующих последовательных операций: вычисление матрицы сигнала, вычисление матрицы пространственного спектра с помощью двумерного комплексного преобразования Фурье, умножение спектра сигнала на фильтр, определяющий дополнительные фазовые набег парциальных плоских волн, получение матрицы сигнала на основе обратного преобразования Фурье. Кроме распределения поля в разных точках оптической трассы, определялась дисперсия колебаний «центра тяжести» пучка и величина теряемой мощности. Так как основные расчеты проводились в среде MathCad, для оценки указанных параметров была написана отдельная пользовательская функция в виде подключаемой динамической библиотеки. При проведении конкретных вычислений в качестве начальных параметров задавались длина волны λ , расстояние по оптической трассе L , и шаг дискретизации рассматриваемых распределений st . На рис. 2 показана схема логической архитектуры организации параллельных вычислений на платформе CUDA.

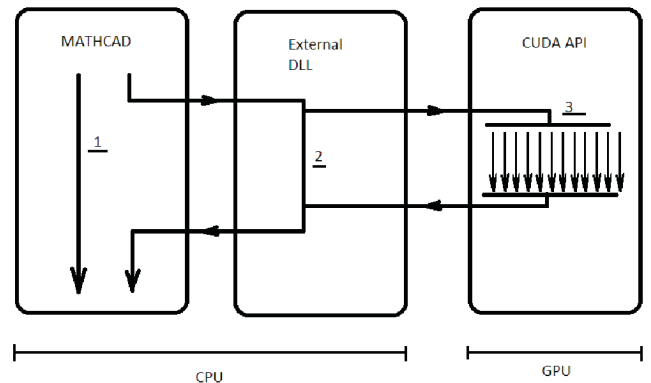


Рис. 2: Логическая архитектура организации параллельных вычислений на платформе CUDA. 1, 2, 3 — основные расчетные блоки

2. ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМАМ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ

В ходе исследований было уделено внимание использованию систем связи с мультиплексированием винтовых пучков, предполагающим распространение пучков

с различным топологическим зарядом по единой оптической трассе.

Возможность создания схем мультиплексирования обусловлена как разработкой эффективных способов получения оптических вихрей на основе различных элементов (голографические решетки, специальные пластины, неоднородные оптические резонаторы), так и оптических устройств, позволяющих как объединять винтовые моды в единую световую волну, так и разводить их в приемной системе по различным приемникам излучения (решетки Даммона) [1].

Была выполнена оценка влияния разъюстировки пучков на процесс их мультиплексирования. Определение потерь мощности пучка при параллельном смещении его оси относительно оси системы показало, что при смещении пучка на величину равную половине радиуса основной моды его мощность в канале мультиплексирования уменьшается примерно на 20%. Увеличение топологического заряда приводит к некоторому увеличению (на 5–10%) теряемой мощности. Значительный рост потерь имеет место и при увеличении угла прихода пучков на приемную апертуру. Причем рост топологического заряда существенным образом увеличивает потери. Так, если угол прихода составляет одну десятую от расходимости основной моды, то потери при изменении l от 0 до 5 увеличиваются от 5 до 30%. Эти данные указывают на необходимость тщательной юстировки винтовых пучков в системах мультиплексирования.

3. ВЛИЯНИЕ СЛУЧАЙНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

Влияние случайных неоднородностей в канале распространения на характеристики винтовых пучков с различными топологическими зарядами осуществлялось с использованием метода одномерного случайного фазового экрана. Поскольку в данной работе основное внимание уделялось сопоставлению свойств винтовых пучков с пучками, обладающих обычной топологией волнового фронта, использовалась простейшая модель прохождения световой волны через фрактальный фазовый экран [7]. Фрактальность экрана отражает факт неоднородности турбулентных образований в атмосфере, структура которых обладает статистическим самоподобием.

В используемой модели вносимые экраном в пучок фазовые возмущения s_k , по поперечному индексу k , описывались с помощью мультифрактальной функции Вейерштрасса [8, 9]:

$$s_k = \sqrt{2}\sigma \times \frac{(1 - b^{2D_k - 4})^{0.5} \sum_{n=0}^N b^{(D_k - 2)n} \sin(2\pi s b^n k + \psi_n)}{(1 - b^{(2D_k - 4)(N+1)})^{0.5}}, \quad (2)$$

σ — среднеквадратичное отклонение фазы, b , s — масштабные параметры, N — количество гармоник, ψ_n — случайная фаза. В формуле (2) фрактальная размерность D_k изменяется в поперечном направлении согласно выражению $D_k = D_0 + \delta \sin(2\pi r s k)$, где D_0 — среднее значение фрактальной размерности экрана, δ , r — параметры девиации величины фрактальной размерности. После прохождения экрана пучок с изначально плоским или винтовым фронтом приобретал дополнительные фазовые возмущения. Чтобы оценить, как случайные фазовые возмущения пучка будут влиять на смещение его центра тяжести после прохождения экрана, с помощью программных средств определялось распределение интенсивности в дальней зоне и по нему оценивалось положение центра тяжести. Движение экрана в поперечном направлении (такое движение моделирует смещение неоднородностей в атмосфере под действием ветра) меняет профиль интенсивности и положение центра тяжести. Характерный график смещений центра гауссового пучка, рассчитанный для одной реализации, показан на рис. 3.

График на рис. 3 соответствует следующим параметрам: $\sigma = 1.3$, $b = 2.5$, $s = 0.005$, $r = 2$, $N = 5$, $D_0 = 1.5$, $\delta = 0.25$.

Расчет смещений был выполнен и для винтовых пучков. Их профиль интенсивности существенно отличался от гауссового. На рис. 4 приведены профили пучков с $l = 0$ и $l = 3$, а также фрагменты фазового экрана. Пучки характеризуются одинаковой эффективной шириной, однако, в отличие от гауссового пучка ($l = 0$) винтовой пучок ($l = 3$) характеризуется обширной приосевой зоной с малым значением интенсивности. Последнее обстоятельство снижает влияние возмущений волнового фронта на характер распространения пучка и колебания его центра тяжести. В частности, как показывает расчет, стандартные случайные отклонения пучка с $l = 0$ в полтора раза превосходят отклонения пучка с $l = 3$.

Графики отклонения центра тяжести пучка (рис. 3) представляют собой случайные фракталы. Оценка их фрактальной размерности дает значение равное $D = 1, 2 \pm 0, 1$. Фрактальная размерность определялась путем регистрации поведения структурной функции исследуемой зависимости [9].

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОПУЧКОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Трубчатый характер винтовых пучков указывает на возможность использования в качестве их альтернативы пространственные конфигурации М-мод. Такие моды формируются световыми пучками, которые, отражаясь от зеркал устойчивого резонатора вне его оптической оси, замыкают траекторию только после многократных отражений. Тем самым, образующие пучки М-мод имеют ломаную траекторию. Однако если в многопроходном резонаторе траектория пучков жест-

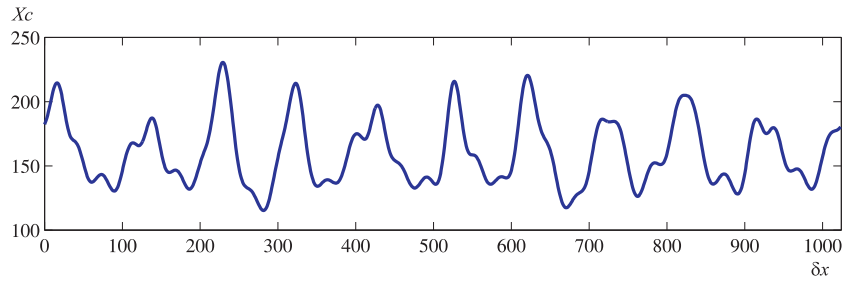


Рис. 3: Смещение центра тяжести гауссового пучка. X_c — положение центра тяжести в условных единицах, δx — величина смещения экрана

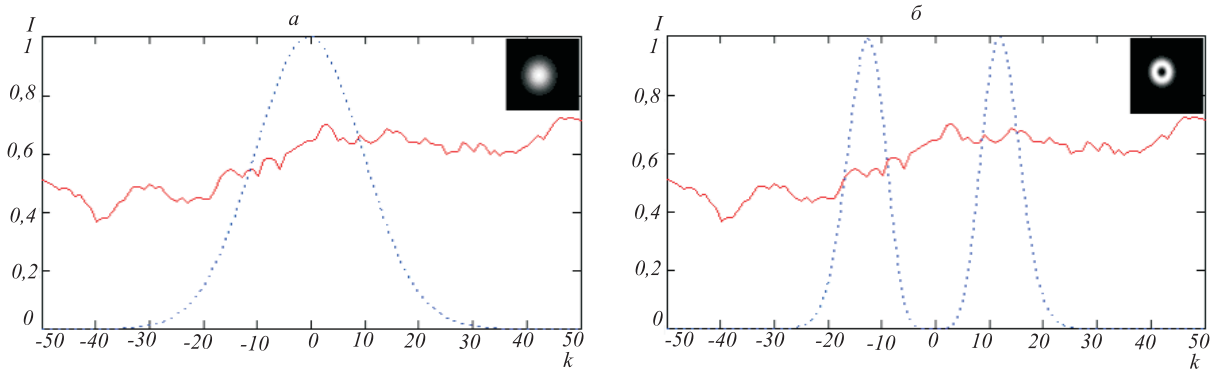


Рис. 4: Фазовый профиль экрана (непрерывная кривая) и распределение интенсивности основной (а) и винтовой (б) моды (пунктир). В правом верхнем углу двумерная картина распределения интенсивности моды

ко задается положением зеркал, то геометрия пучков в М-моде характеризуется высокой степенью свободы.

Дополнительный ресурс использования М-мод для оптической связи при существенно меньшей расходимости излучения можно найти, используя конфигурацию плоскостных М-мод. Суперпозиция таких мод при условии азимутального изменения их плоскости и размещения в центре плоского зеркала непрозрачной зоны с высоким коэффициентом отражения будет формировать на выходном зеркале систему световых пятен, расположенных по окружности. Подбирая конфигурацию непрозрачной зоны, можно добиться синхронизации мод и обеспечить либо синфазность, либо противофазность световых колебаний в диаметрально противоположно размещенных пятнах [10]. Так как из резонатора выводятся только параллельные пучки, то выходное излучение будет иметь нулевую геометрическую расходимость. Прикрепляя к центральной непрозрачной зоне пьезо-электрическую головку, обеспечивающую ее быстрые с малой амплитудой продольные колебания, можно получить частотную модуляцию излучения за счет изменения длины траектории М-мод. Поскольку смещения центральной зоны не будут превосходить длину волны, то эти изменения длины не скажутся заметным образом на общей конфигурации внутрирезонаторного поля.

Формирующаяся путем вывода параллельных пучков

из противофазных пятен на выходном зеркале лазера световая волна будет иметь трубчатую форму с зоной, имеющей нулевое значение интенсивности на оси. Сначала (в ближней зоне) трубчатый характер излучения будет обусловлен пространственным разведением парциальных пучков, а затем (в дальней зоне) их интерференцией. На рис. 5 приведена структура многопучкового излучения в дальней зоне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проанализированные данные литературных источников указывают на особенности и преимущества передачи информации с помощью трубчатых винтовых пучков. Разработанное программное обеспечение расчетов характеристик винтовых пучков, базирующееся на параллельных вычислениях с использованием технологии CUDA, позволило значительно (более чем на порядок) ускорить вычисление ряда важных параметров излучения в различных точках оптического тракта.

Расчеты показали, что величина топологического заряда винтового поля существенно сказывается на оценке влияния разъюстировки пучков на эффективность работы системы, использующей принцип мультиплексирования. Так, при параллельном смещении винтово-

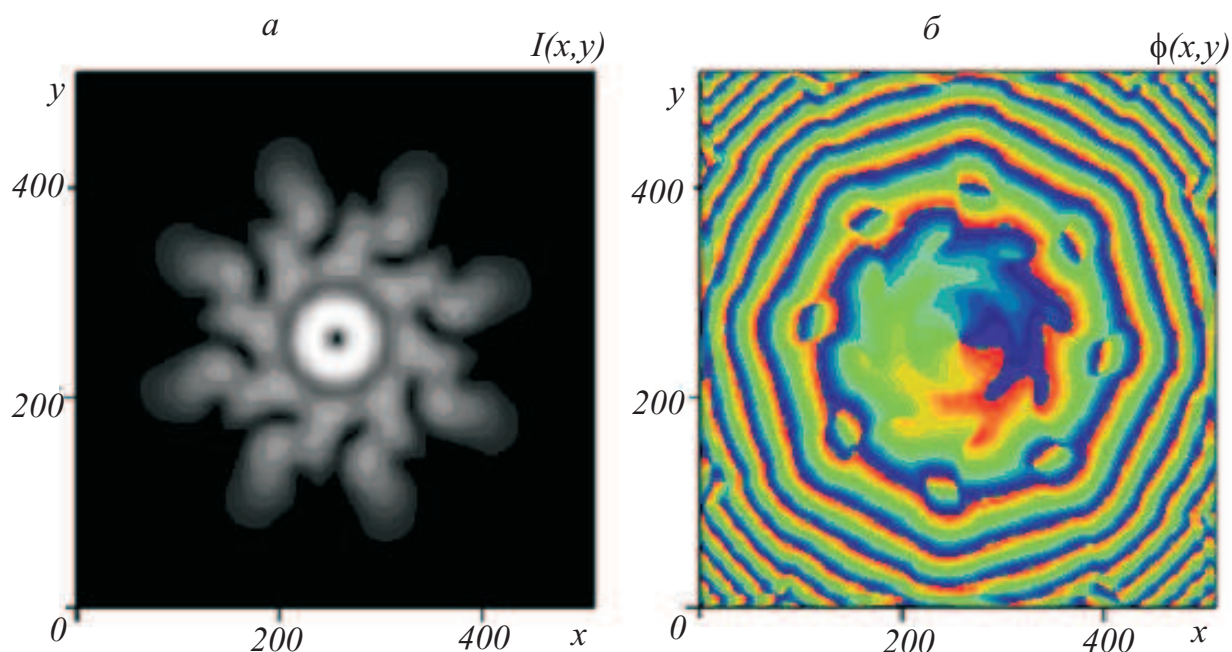


Рис. 5: Распределение интенсивности I (а) и фазы ϕ (б) в дальней зоне. x, y — поперечные координаты

го пучка коэффициент его связи с реперной осевой волной, может в несколько раз уступать коэффициенту связи основной моды.

На основе численного моделирования с использованием метода фазового экрана было установлено, что дисперсия случайных смещений центра тяжести винтовых пучков уменьшается с увеличением топологического заряда, заметно уступая при этом дисперсии смещений гауссовой моды. Предпринятая в данной статье

попытка найти новые способы получения трубчатых винтовых пучков указывает на перспективность способа получения мощного излучения с трубчатой структурой путем использования многоходовых мод оптических резонаторов.

При выполнении данной работы вопросы, относящиеся к математическому моделированию, решались при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-01-00723 а.

- [1] Wang X., Nie Zh., Liang Ya., Wang J., Tao L., Baohua J. // *Nanophotonics*. 2018. **7**, N 9. P. 1533.
- [2] Короленко П.В., Аверченко А.В., Зотов А.М., Павлов Н.Н., Рыжикова Ю.В. Сборник тезисов докладов научной конференции «Ломоносовские чтения». Секция физики. С. 9. М.: Физический факультет МГУ, 2019.
- [3] Зотов А.М., Короленко П.В., Рыжикова Ю.В. // *Ученые записки физ. ф-та* Моск. ун-та. 2016. № 3. С. 163402.
- [4] Aksenov V.P., Pogutsa Ch.E. // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2013. **26**, N 1. P. 13.
- [5] Ramsay A., Degnan J.J. // *Applied Optics*. 1970. **9**, N 2. P. 385.
- [6] Короленко П.В. Оптика когерентного излучения. М.: МГУ, 1998.

- [7] Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. М.: Логос, 2002.
- [8] Короленко П.В., Маганова М.С., Меснянкин А.В. Новационные методы анализа стохастических процессов и структур в оптике. Фрактальные и мультифрактальные методы, вейвлет-преобразования. Учебное пособие. М.: МГУ им. М.В.Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В.Скобельцына, 2004.
- [9] Вохник О.М., Зотов А.М., Короленко П.В., Рыжикова Ю.В. Моделирование и обработка стохастических сигналов и структур. Учебное пособие. М.: МГУ, 2013.
- [10] Васильев А.Б., Корниенко Л.С., Короленко П.В. // *Оптика и спектроскопия*. 1987. **63**, № 1. С. 214.

Optical communication systems on helical beams

P. V. Korolenko^{1,2,a}, A. V. Averchenko¹, A. M. Zotov^{1,b}, N. N. Pavlov^{1,2}, Yu. V. Ryzhikova^{1,c}

¹*Department of optics, spectroscopy and nanosystems physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

²*P. N. Lebedev Physics Institute, Russian Academy of Sciences. Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^apkorolenko@rambler.ru, ^ba.zotov@physics.msu.ru, ^cryzhikovaju@physics.msu.ru

The features of light beams propagation with a helical wavefront structure in information laser systems are analyzed. Calculations using parallel computing technology on the CUDA platform that significantly speeds up the calculation process is performed. The requirements for the alignment of the optical system with the multiplexing of beams in open propagation channels are formulated. It is shown that when radiation propagates in a medium with random inhomogeneities, the standard deviations of a Gaussian beam are one and a half times larger than the deviations of a beam with a helical wave-front shape. This indicates a high degree of stability of helical beams at atmospheric turbulent lines. A new method of generating high-power helical beams using the radiation of multi-pass modes of laser resonators is proposed.

PACS: 42.68.Bz; 42.30.Kq; 02.60.Gf; 07.05.Tp

Keywords: singular optics, laser communication systems, turbulent media, helical beams, beam multiplexing, fractal parametrization, multibeam radiation.

Received 20 May 2019.

Сведения об авторах

1. Короленко Павел Васильевич — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-57-40, e-mail: pvmkorolenko@rambler.ru.
2. Аверченко Александр Владимирович — аспирант; тел.: (495) 939-57-40, e-mail: areknight@gmail.com.
3. Зотов Алексей Михайлович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-17-17, a.zotov@physics.msu.ru.
4. Павлов Николай Николаевич — аспирант; тел.: (495) 939-57-40, e-mail: np5012@yandex.ru.
5. Рыжикова Юлия Владимировна — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-57-40, e-mail: ryzhikovaju@physics.msu.ru.