

ВЛИЯНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ АТМОСФЕРЫ НА КАЧЕСТВО ПРОХОДЯЩИХ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ

© 2016 г. Б.А. КУЗЯКОВ, А.И. ПАК, В.А. СЕНИН, С.И. ШЕЛОФАСТОВА

Московский технологический университет (МИРЭА)
e-mail: b.a.kuzyakov@yandex.ru

В настоящее время интенсивно разрабатываются и широко применяются разветвленные сети телекоммуникации, включая атмосферные беспроводные оптические линии [1-2]. В них передача информации осуществляется в открытом пространстве остроуправленным лазерным лучом [3-9] в условиях прямой видимости. В ряде недавних работ рассматривается влияние турбулентности атмосферы на качество разнообразных проходящих лазерных пучков. Основное внимание уделено лазерным пучкам, описываемых моделями Гаусса (ПГ), моделями плоской вершины (ППВ), Гаусса - Шелла (ПГШ), Лагерра-Гаусса-Шелла (ПЛГШ), Бесселя - Гаусса (ПБГ) и Бесселя - Гаусса вихревого (ПБГВ). Базовыми параметрами служат: величины M^2 и отношение Штреля (ШР). В данной работе анализируется воздействие атмосферы с параметрами, находящимися вне зоны Колмогоровской турбулентности (НКТ). Зависимость M^2 от условий внешней среды, можно представить в виде следующего выражения:

$$M^2(z) = k \left\{ \left[\frac{w_0^2}{2} + \left(\frac{1}{w_0^2} + \frac{1}{\sigma_0^2} \right) \frac{2z^2}{k^2} + \frac{4z^2}{k^2} T \right] \right. \\ \left. \left[\left(\frac{1}{w_0^2} + \frac{1}{\sigma_0^2} \right) \frac{2}{k^2} + \frac{12}{k^2} T \right] - \left[\left(\frac{1}{w_0^2} + \frac{1}{\sigma_0^2} \right) \frac{2z}{k^2} + \frac{6z}{k^2} T \right]^2 \right\}^{1/2}$$

здесь, $k = 2\pi/\lambda$, $\sigma_0 = 1$ см, λ – длина волны излучения.

В процессе работы по формуле (1) были проведены численные расчеты. При определенном выборе параметров: $w_0 = 1$ см, $\lambda = 1064$ нм, $C_n^2 = 10^{-14} \text{ м}^{3-\alpha}$, $L_0 = 10$ м, $l_0 = 1$ см, $\alpha = 3.11$, на расстоянии $z = 3$ км от источника излучения, величины M^2 для Гауссова пучка в модели Шелла (ПГШ) при наличии вихря и при его отсутствии в условиях не Колмогоровской турбулентности (НКТ), составляют ≈ 6 единиц, а их разница – не превышает 2 единиц, т.е. отличие величин M^2 для Гауссовых пучков в модели Шелла (ПГШ) этих двух типов – относительно небольшое. В то же время на значительном расстоянии $z = 5$ км от источника излучения, величины M^2 для Гауссова пучка в модели Шелла (ПГШ) при наличии вихря в условиях не Колмогоровской турбулентности (НКТ), составляют $\approx 3,5$ единиц, а их разница – не превышает 0,7 единиц, при изменении внутреннего масштаба турбулентности – от 0,5 см до 2 см.

Зависимости M^2 для ПГШ пучков от расстояния распространения z для нескольких выбранных масштабов внешней турбулентности L_0 , приведены на рис. 1.

Приведенные оценки и зависимости находят подтверждение в недавней работе [3].

Наряду с этим, в данной работе, основанной на не-Колмогоровом спектре, с помощью расширенного принципа Гюйгенса-Френеля представлены аналитические выражения для функции взаимной спектральной плотности частично когерентных ПГШ вихревых лучей, распространяющихся через свободное пространство и не-

Колмогорову атмосферную турбулентность, которые используются для классификации условий создания когерентных завихрений и влияния не-Колмогоровых атмосферных параметров турбулентности (α , l_0 и L_0) и параметров лучей (σ_0 , w_0 и Ω_0) на расстояния сохранения топологического заряда. В зависимости от условий возникновения, когерентные вихри могут быть сгруппированы в три класса: первому присуще когерентное закручивание вихревых лучей, второй возникает при распространении вихревых лучей через свободное пространство, а третий проявляется из-за не-Колмогоровой турбулентности атмосферы, вызывая вихревые лучи. При уменьшении обобщенной структурной константы и ширины узкой части, и увеличении обобщенного показателя α , внутренний масштаб турбулентности и пространственная корреляционная длина σ_0 , расстояние сохранения топологического заряда увеличится на число частично когерентных ПГШ вихревых лучей в не-Колмогоровой атмосферной турбулентности. Кроме того, внешний масштаб турбулентности и параметры ШР-части не имеют влияния на расстояние сохранения топологического заряда. Эти особенности находят применения в оптических вихревых системах связи.

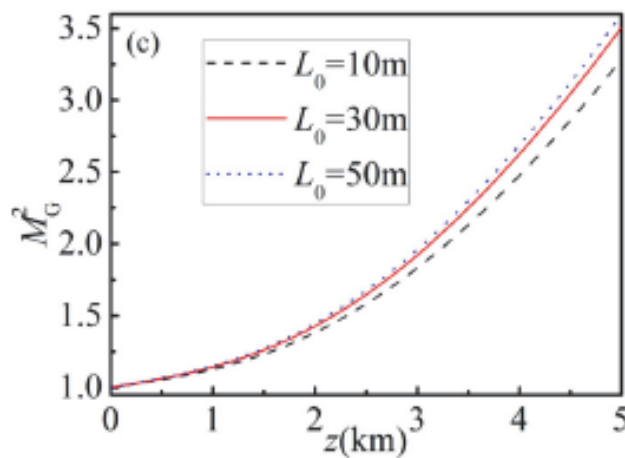


Рис. 1. Зависимости M^2 для ПГШ пучков от расстояния распространения z для разных масштабов внешней турбулентности L_0 .

Как известно, отношение ШР, имеет вид:

$$S_R = \frac{I_{\max}}{I_{0\max}}, \quad (2)$$

А величины интенсивности, можно представить в следующем виде:

$$I(\rho, z) = \frac{k^2 w_0^4}{32z^2 A + 4k^2 w_0^2} [2 - Bw_0^2(1 - B\rho^2) - C(1 - B\rho^2)] \exp[-B\rho^2], \quad (3)$$

где:

$$B = \frac{2k^2}{8z^2 A + k^2 w_0^2},$$

$$A = \frac{1}{2w_0^2} + \frac{1}{2\sigma_0^2} + T, \quad C = \frac{4z^2}{8z^2 w_0^2 A + k^2 w_0^4}.$$

При этом, величины отношений ШР для Гауссовых пучков в модели Шелла (ПГШ) при наличии вихря и при его отсутствии в условиях не - Колмогоровской турбулентности (НКТ), можно представить в виде:

$$S_R = \frac{(8z^2 A_0 + k^2 w^2)[2 - Bw_0^2(1 - B\rho^2) - C(1 - B\rho^2)] \exp[-B\rho^2]}{(8z^2 A + k^2 w^2)[2 - B_0 w_0^2(1 - B_0 \rho^2) - C_0(1 - B_0 \rho^2)] \exp[-B_0 \rho^2]} \quad (4)$$

$$S_R = \frac{(8z^2 A_0 + k^2 w_0^2) \exp[-B\rho^2]}{(8z^2 A + k^2 w_0^2) \exp[-B_0 \rho^2]} \quad (5)$$

Анализ выражений (4-5) показывает, что величины ШР растут с ростом α в диапазоне изменения $3,11 \leq \alpha \leq 4$.

Кроме этого, в работе [10] экспериментально показано, что топологический заряд пучков ПГШ сохраняется на значительных расстояниях в условиях не-Колмогоровской турбулентности (рис. 2).

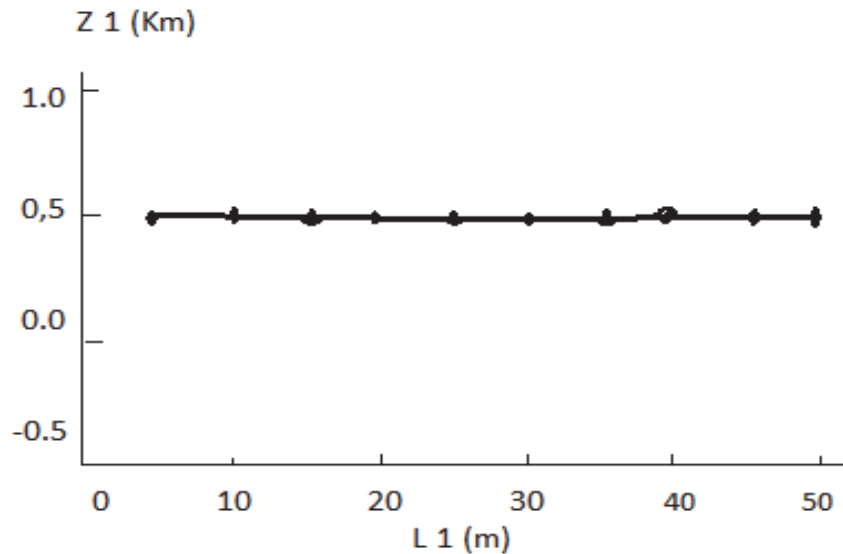


Рис. 2. Экспериментальные данные по измерению топологического заряда пучков ПГШ в условиях не-Колмогоровской турбулентности при разных параметрах L_1 (м) ($L_0 \equiv L_1$ (м)).

Следует отметить, что для реализации методики с использованием мод ОАМ могут применяться несколько вариантов схем. Например, в работе [6] в схеме формирования лазерного пучка используются отражательные голограммы на входе и выходе оптической системы.

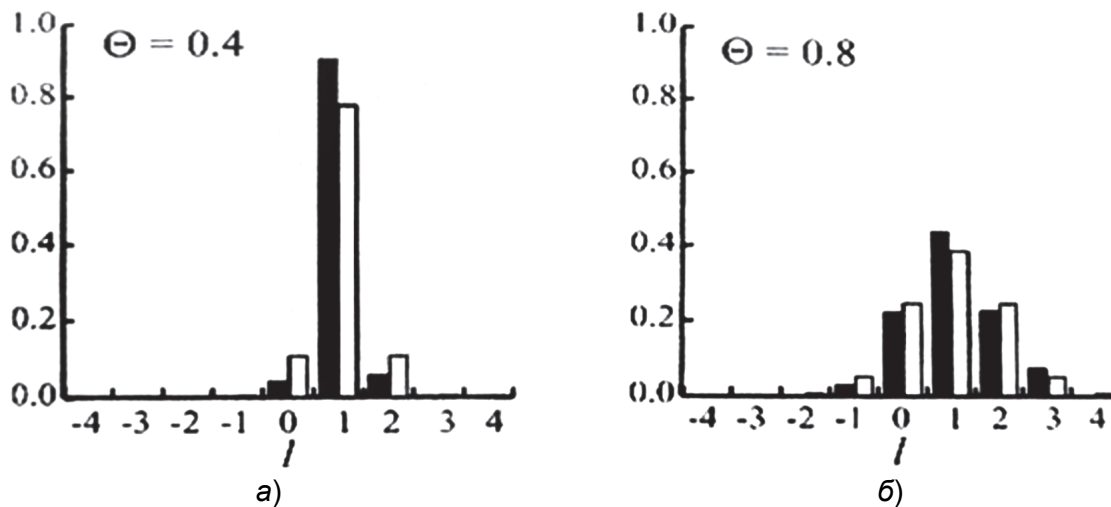


Рис. 3. Примеры распределения потоков фотонов с модами ОАМ.

На рис. 3 наглядно представлены варианты распределения мод ОАМ, например, видно, что при $\theta = 0,4$, контраст между первыми ближайшими модами ОАМ превышает 0,9. При $\theta \geq 0,8$, величина контраста между первыми 3-мя ближайшими модами ОАМ оказывается порядка 0,2.

Таким образом, в работе представлены особенности влияния не - Колмогоровской турбулентности на распространение лазерных пучков, включая сохранение топологического заряда вихревых пучков. Показано, что отличие в отношении ШР для пучков ПБГ и ПБГВ не превышает 15% в условиях слабой турбулентности атмосферы во всем диапазоне исследуемых параметров $\{C_n^2 = (3 - 8) \cdot 10^{-15} \text{ м}^{3-\alpha}\}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhu K., Zhou G., Li X., Zheng X., Tang H. Propagation of Bessel-Gaussian beams with optical vortices in turbulent atmosphere // Opt. Express. – 2008. – v. 16. – N. 26. – p. 21315-21320.
2. Милютин Е.Р. Атмосферные оптические линии связи в России // Вестник связи. – 2008. – № 2. – С. 89-90.
3. Li J., Wang W., Duan M., Wei J. Influence of non-Kolmogorov atmospheric turbulence on the Beam quality of vortex beams // Optics Express. – 2016. – v. 24. – Is. 18. – p. 20413-20423.
4. Кузяков Б.А., Кириллова Ю.А. Оценки дисперсии флуктуации интенсивности лазерных пучков в турбулентной атмосфере // II Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике. Сборник научных трудов. МИФИ. – М., 2013. – С. 211-212.
5. Кузяков Б.А., Карпов М.А., Егорова Е.В., Тихонов Р.В., Муад Х.М. и др. Повышение доступности оптической телекоммуникационной системы с атмосферными сегментами. // Электромагнитные волны и Электронные системы. – 2013. – т. 18. – № 12. – с. 38-43.
6. Gibson G., Courtial J., Padgett M. et al. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum // Optics Express. – 2004. – v. 12. – Is. 22. – p. 5448-5456.
7. Кузяков Б.А., Мораренко В.В., Шмелев В.А. Современные методы реализации и селекции орбитальных угловых моментов фотонов в оптических комбинированных линиях связи // III Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. – М.: НИЯУ МИФИ. – 2015. – С. 189-190.
8. Кузяков Б.А., Субботин Р.В., Харчевский А.А. Особенности оценки дисперсии флуктуации интенсивности на оси лазерного пучка в турбулентной атмосфере. – М., 2012. – 61 н.т.к. МИРЭА. – Ч. 2. – С. 49-54.
9. Кузяков Б.А., Тихонов Р.В. К проблеме повышения доступности оптической телекоммуникационной системы с атмосферными сегментами // Труды III-й Всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике. – М.: НИЯУ МИФИ. – 2014. – С. 23-24.
10. Li J., Zeng J., Duan M. Classification of coherent vortices creation and distance of topological charge conservation in non-Kolmogorov atmospheric turbulence // Optics Express. – 2015. – v. 23. – Is. 9. – p. 11556-11565.