



Article

Моделирование фазовых экранов атмосферы с учётом случайной ветровой динамики

A.K. Касимов *¹

- ¹ Кафедра Фотоники Физического факультета Национального университета Узбекистана, Ташкент, 100174, Узбекистан
 kasimov_a_k@mail.ru (И.Ф.)
 * Correspondence: kasimov_a_k@mail.ru; Tel.: +998 97 7573342 (A.K.)

Аннотация:

Представлен лёгкий в реализации и быстрый по вычислительной нагрузке метод, генерации нелинейно меняющихся фазовых экранов атмосферной турбулентности. Метод основан на авторегрессивной модели первого порядка с учетом смещения экранов под влиянием бокового ветра. В отличие от классического алгоритма изложенного в [1], предлагаемый подход сохраняет корректный спектр фон Кармана и физически обоснованное время когерентности флуктуаций показателя преломления атмосферы. При этом как и в [1] учитывает случайные вариации горизонтальных и вертикальных компонентов ветра. Метод требует два FFT на шаг обновления и эффективен для длительных численных экспериментов по распространению лазерных импульсов в турбулентной атмосфере.

Ключевые слова: Атмосферная турбулентность, лазерное излучение, фазовый экран.

Modeling of atmospheric phase screens taking into account random wind dynamics

A.K. Kasimov *¹

- ¹ Department of Photonics, Faculty of Physics, National University of Uzbekistan, Tashkent 100174, Uzbekistan
 kasimov_a_k@mail.ru (A.K.,)

Abstract:

A method for generating nonlinearly changing phase screens of atmospheric turbulence is presented, which is easy to implement and fast in computational load. The method is based on an autoregressive first-order model taking into account the displacement of screens under the influence of a crosswind. In contrast to the classical algorithm described in [1], the proposed approach preserves the correct von Karman spectrum and the physically justified coherence time of fluctuations in the refractive index of the atmosphere. In contrast to the classical algorithm described in [1], the proposed approach preserves the correct von Karman spectrum and the physically justified coherence time of fluctuations in the refractive index of the atmosphere.

Keywords: Atmospheric turbulence, laser radiation, phase screen.

Введение

В целом ряде прикладных задач по лазерной локации, лазерному зондированию атмосферы и лазерной квантовой связи в атмосфере, турбулентность атмосферы является основным сдерживающим фактором широких внедрений научных исследований для практического использования.

В исследованиях связанных с распространением лазерного излучения в случайно неоднородных средах, каким является атмосфера, особое значение приобретает компьютерное

Цитирование: А.К. Касимов.

Моделирование фазовых экранов атмосферы с учётом случайной ветровой динамики. 2025, 2, 2, 6. <https://doi.org/>

Полученный: 10.03.2025

Исправленный: 18.03.2025

Принято: 25.04.2025

Опубликованный: 30.04.2025

Copyright: © 2025 by the authors.

Submitted to for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

моделирование эксперимента [2]. Состояние атмосферы, следовательно, и оптические характеристики атмосферы, зависят от целого ряда параметров, которые зачастую никак не связаны между собой. Например, показатель преломления атмосферы изменяется со временем, и эти изменения зависят температуры, давления, ветрового режима, облачности, характера подстилающей поверхности, времени года и суток и т.д.. Поэтому воспроизводимость эксперимента в исследованиях, связанных с распространением излучения в атмосфере, оставляет желать лучшего. При компьютерном моделировании флюктуации показателя преломления можно задать и в определенной степени, управлять ими, и исследовать зависимость интенсивности лазерного излучения от других параметров атмосферы, что делает практически обязательным проведение численных экспериментов, наряду с натурными исследованиями. В связи с этим особое значение приобретает описание флюктуаций показателя преломления атмосферы и её численное моделирование.

Материалы и методы

Одним из наиболее действенных инструментов для изучения влияния турбулентности атмосферы на распространение оптического излучения является численный эксперимент [3]. В большинстве численных экспериментов применяется так называемая модель «замороженной турбулентности атмосферы», т.е. состояние атмосферы во времени предполагаются изменяющимися скачками, от одного состояния к другому. Между этими состояниями считается нет никакой корреляции. Для наиболее адекватного учета влияния атмосферы на распространения излучения необходимо построение моделей, описывающих изменение состояния атмосферы в течении достаточно продолжительного времени. Это время может быть настолько велико что, необходимо учитывать перенос неоднородностей атмосферы ветром. Наиболее часто применяемый при этом метод – метод фазовых экранов на основе модели Кармана, в котором двухмерный спектр пространственных флюктуаций показателя преломления считался имеющим вид [3]:

$$F_n(k_x, k_y, k_z) = 0.33 C_n^2 (k^2 + k_0^2)^{-11/6} \left[\exp\left(-\frac{k^2}{k_m^2}\right) \right] \quad (1)$$

где, k_x, k_y, k_z — координаты в частотном пространстве, $k_0 = 2\pi/L_0$ и $k_m = 5.95/l_0$ — минимальная и максимальная частота флюктуаций, k — волновое число, равное $2\pi/\lambda$, L_0 и l_0 — внешний и внутренний масштабы турбулентности, и C_n^2 — структурная характеристика показателя преломления атмосферы.

Спектральная плотность флюктуаций фазы на δ -коррелированном экране имеет вид:

$$F_\varphi(k_x, k_y) = 2\pi k_0^2 \Delta z F_n(k_x, k_y, 0) \quad (2)$$

Для моделирования временной эволюции фазового экрана использовалась авторегрессионная модель первого порядка:

$$\varphi_n = \alpha \varphi_{n-1} + \sqrt{1 - \alpha^2} w_n \quad (3)$$

где, φ_n — фазовый экран на шаге n , w_n — случайная инновация (белый шум), α — коэффициент корреляции фазового экрана, определяемый как $\alpha = \exp(-\Delta t/\tau_0)$, где τ_0 — время когерентности волнового фронта в атмосфере, или в сокращенном варианте, время когерентности атмосферы.

Время когерентности атмосферы можно приблизенно определить по формуле

$$\tau_0 = \frac{r_0}{v} \quad (4)$$

где, r_0 — радиус Фрида, v — средняя проекция скорости ветра на плоскость волнового фронта. Радиус Фрида r_0 рассчитывается по выражению:

$$r_0 = \left[0.423 k^2 \int C_n^2(z) dz \right]^{-3/5} \quad (5)$$

где, интеграл берется по длине трассы. В случае стратифицированной атмосферы для горизонтальной трассы интегрирование по всей трассе можно заменить умножением среднего значения структурной постоянной показателя преломления на длину трассы.

Результаты

Используя приведенные выше выражения, была разработана программа для генерирования фазовых экранов, отображающих смещение атмосферной турбулентности под воздействием ветра при длительностях эксперимента, достаточных для смещения воздушных масс на расстояния сравнимые с размерами поперечного сечения пучка. На рис. 1 представлены распределения флуктуации показателя преломления $\Delta n(x, y)$, приобретаемые на последовательных фазовых экранах, в одной и той же плоскости ($z = \text{const}$), с разницей во времени равной $\Delta t = 0.001$ сек. Средняя скорость бокового ветра предполагается равной 5 м/с.

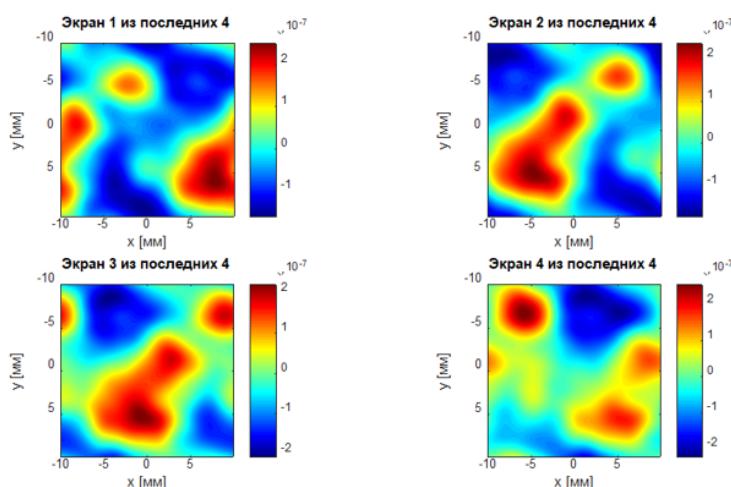


Рис. 1. Фазовые экраны с разницей в $t=0.001$ сек. Визуализация показывает пространственную структуру неоднородностей показателя преломления и ее динамику со временем. Воздушные массы смещаются слева на право.

Fig. 1. Phase screens with a time difference of $t = 0.001$ s. The visualization shows the spatial structure of refractive index inhomogeneities and their dynamics over time. Air masses move from left to right.

В ходе эксперимента за сравнительно короткий период времени ($t \approx 5$ сек.) на машине со средней производительностью были сгенерированы 200 коррелированных фазовых экранов, в которых учтены как изменения неоднородностей со временем, так и смещения неоднородностей атмосферы под воздействием ветра, что свидетельствует о высокой скорости генерации экранов так и о высокой степени соответствия модели реальной атмосфере. Величина структурной постоянной показателя преломления атмосферы, в этой реализации фазового экрана, предполагалась равной $C_n^2 = 1.0 \times 10^{-14} - 2/3$, это значение соответствует слабой оптической турбулентности атмосферы. Внешний масштаб турбулентности ограничен высотой трассы над землей и равен $L = 1$ м. Внутренний масштаб турбулентности считался равным $l = 0.001$ м.

Обсуждение:

Анализ результатов показал, что структурная функция флуктуации показателя преломления атмосферы на фазовых экранах, полученных с помощью разработанного нами программного продукта, хорошо описывается зависимостью $r^{2/3}$, при этом флуктуации показателя преломления атмосферы имеют порядок 10^{-7} , что демонстрирует физическую корректность модели.

Исходя из выше сказанного можно утверждать, что разработанная модель с достаточной точностью воспроизводит влияние атмосферной турбулентности и смещение воздушных масс под воздействием ветра на лазерное излучение в оптических трассах с небольшой длиной. Модель может быть использована как основа для моделирования распространения ультракоротких лазерных импульсов в атмосфере.

Источник финансирования.

Это исследование не получало внешнего финансирования.

Funding source.

This research received no external funding.

Литература

- [1] Dudorov V.V., Kolosov V.V., Filimonov G.A. An algorithm for generating infinite turbulent screens for modeling long-term laser experiments in the atmosphere. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2006, Vol. 309, No. 8, pp. 85–89. In Russian: Дудоров В.В., Колосов В.В., Филимонов Г.А. Алгоритм формирования бесконечных турбулентных экранов для моделирования долговременных лазерных экспериментов в атмосфере. Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309. № 8, стр. 85-89.
- [2] P. Panagiotopoulos, K. Schuh, M. Kolesik, and J. V. Moloney, Simulations of filaments in a realistically modeled atmosphere, *J. Opt. Soc. Am. B* 33, 2154-2161 (2016)
- [3] Kandidov V.P. The Monte Carlo method in nonlinear statistical optics. *Physics-Uspekhi*, Vol. 166, No. 12, pp. 1309–1338 (1996). In Russian: Кандидов В.П. Метод Монте-Карло в нелинейной статистической оптике. Успехи физических наук, том 166, №12, стр 1309-1338 (1996).

Отказ от ответственности/Примечание издателя: Заявления, мнения и данные, содержащиеся во всех публикациях, принадлежат исключительно отдельным лицам. Авторы и участники, а Журнал и редакторы. Журнал и редакторы не несут ответственности за любой ущерб, нанесенный людям или имущество, возникшее в результате любых идей, методов, инструкций или продуктов, упомянутых в контенте.

Disclaimer of liability/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications belong exclusively to individuals. The authors and participants, and the Journal and the editors. The journal and the editors are not responsible for any damage caused to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products mentioned in the content.