ВЛИЯНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ АТМОСФЕРЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛАЗЕРНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Кузяков Борис Алексеевич

доцент, канд. физ. –мат. наук, МИРЭА – Российский Технологический Университет, ЛАС - Лазерная Ассоциация РФ, РФ, г. Москва

INFLUENCE OF ATMOSPHERIC TURBULENCE ON THE EFFICIENCY OF LASER TELECOMMUNICATIONS

Boris Kuzyakov

Candidate of Physico - Mathematical Sciences, Associate Professor, MIREA–Russian Technological University, LAS–Laser Association, Russia, Moscow

Аннотация. В статье рассматривается влияние турбулентности атмосферы на эффективность лазерных телекоммуникаций. Показано, что одним из основных параметров, характеризующих возмущения и неоднородности атмосферы, является структурная постоянная её показателя преломления. Приведены зависимости структурной постоянной от конкретного местоположения приёмо-передающей аппаратуры, от розы ветров и времени суток.

Ключевые слова: турбулентность атмосферы, базовые параметры, лазерные телекоммуникации, структурная постоянная показателя преломления, роза ветров, суточные флуктуации и изменения.

Турбулентный характер движений воздушных масс в атмосфере во многом определяет скорости образования плотности различных облаков, их высотное распределение, перенос разнообразных загрязнений, параметры процессов теплообмена и т. п.

При этом, структурная постоянная показателя преломления атмосферы C_n служит одним из основных параметров, характеризующих её возмущения и неоднородности. Знание изменений величины C_n , крайне необходимо для систем адаптивной оптики наземных телескопов и лазерных комплексов телекоммуникаций в местах их конкретного расположения. Значительные усилия многих научно-исследовательских фирм во всём мире, направлены на разработку модели C_n.

В разработке модели выделяются несколько основных этапов [1 -3]: выбор общего вида аналитической формулы; определение её основных параметров; оценка адекватности описания. В одном из вариантов, модель C_n представляют в виде суммы экспоненциальных членов [3, 4]:

$$C_n^2(\xi) = A \exp\{-\xi/H_A\} + B \exp\{-\xi/H_B\} + C\xi^{10} \exp\{-\xi/H_C\} + D \exp\{-(h - H_D)^2/2d^2\},$$

(1)

где, A – коэффициент для приземной турбулентности; H_A - приземная высота; B, H_B - то же для тропосферы; C, H_C – определяют тропопаузу; D - отвечает за дополнительный слой толщиной d, который часто наблюдается в эксперименте.

Для Российской Федерации, весьма интересна структурная постоянная показателя преломления атмосферы, например, в Байкальском регионе. Её модель HV 10 (Хафнагеля – Волли) или HAP (Hufnagel–Andrews–Phillips) [5, 6] была разработана в связи с установкой Большого солнечного вакуумного телескопа БАО ИСЗ СО РАН, вблизи озера Байкал, на высоте 280 м. Главная особенность модели HV 10, состоит в том, что это полуэмпирическая модель, основанная на физических предпосылках и экспериментальных данных. Обобщение модели HAP привело к следующему выражению:

$$C_n^2(\xi) = M\,[0{,}0059\,(v/27)^2\,(10^{-5}\cdot(\xi + h_s)^{10}\exp\{-(\xi + h_s)/1000\} + 2{,}7\cdot 10^{-16}\exp\{-(\xi + h_s)/1500\}] + C_n^2(\xi_0)\,(\xi_0/\xi)^p, \quad (2)$$

где, h_s - высота над уровнем моря, $C_n^2(\xi_0)$ - усреднённое значение структурной характеристики показателя преломления на высоте ξ_0 , параметр M отвечает за среднюю фоновую приземную турбулентность на высоте ~ 1 км, параметр p определяет зависимость от времени суток. Более подробная информация по этим параметрам M и p, содержатся в работах [3, 4].

Для сопоставления разработанных моделей разными фирмами, часто используют два параметра: радиус когерентности плоской волны r_0 и угол изопланатизма атмосферы θ. Радиус когерентности плоской волны r_0, который так же называют параметром Фрида, определяется по формуле:

$$r_0 = (0{,}423\,k^2 \sec\alpha \int_0^\infty d\xi\, C_n^2(\xi))^{-3/5}, \quad (3)$$

где $k = 2\pi/\lambda$.

Угол изопланатизма θ задаётся следующим выражением:

$$\theta = (2{,}91\,k^2 \int_0^\infty d\xi\, \xi^{5/3}\, C_n^2(\xi))^{-3/5}, \quad (4)$$

Для разработанной модели БАО в летний период, авторы работы [5, 6] получили радиус когерентности r_0 = 4,6 см. Эта величина хорошо согласуется с данными из других источников [7, 8].

Далее, для сравнения, приведены базовые параметры для ряда моделей, на длине волны 0,5 мкм, разработанных разными научными организациями (таблица 1).

Таблица 1.

Базовые параметры атмосферы для ряда рассмотренных моделей

Модель высотной зависимости $C_n^2(\xi)$	**r_0, см**	**θ, мкрад**
Модель Гринвуда	13	13,7
Модель HV 5/7	5	7
Модель HV 10	4,6	7,9

Модель обсерватории Мауна Кеа	13,5	11,5
Модель обсерватории AMOS	18	17,5
Модель Паранальской обсерватории	16	8

Приведённые в таблице 1 научные организации [9 - 13], работают в разных регионах. Обсерватория Мауна Кеа расположена на вершине одноименного вулкана на острове Гавайи. Её телескопы установлены на высотах от 3790 до 4190 м. над уровнем моря в США. Обсерватория AMOS расположена на острове Мауи. Паранальская обсерватория работает на вершине горы Серро-Параналь, на высоте 2 635 м. над уровнем моря, в пустыне Атакама, Чили.

Приведенные данные в таблице 1, показывают весьма значительный разброс величин:для θ - он превышает 200 %, а диапазон вариации величины r_0 - более 300 %.

Поэтому, следует заметить, что для построения наиболее адекватной модели атмосферы, включающей величины r_0 и θ, необходимо знание реальных профилей ветра и структурной характеристики показателя преломления в месте расположения измерительной системы. Конкретные количественные данные можно использовать из доступной климатической базы данных, хранящихся в архиве NCEP / NCAR. Реанализ NCEP/NCAR — это атмосферный реанализ, созданный Национальным центром прогнозирования окружающей среды (NCEP) и Национальным центром атмосферных исследований (NCAR). Это постоянно обновляемый набор данных в виде глобальной сетки, который представляет состояние атмосферы Земли, включая наблюдения и результаты численного прогнозирования погоды (NWP) с 1948 года по настоящее время.

Кроме конкретного местоположения приёмо-передающей аппаратуры на величину C_n, весьма существенно, влияет роза ветров. Этими вопросами так же занимаются во многих странах [14]. Пример зависимости C_n от скорости ветра v приведён на рис. 1.

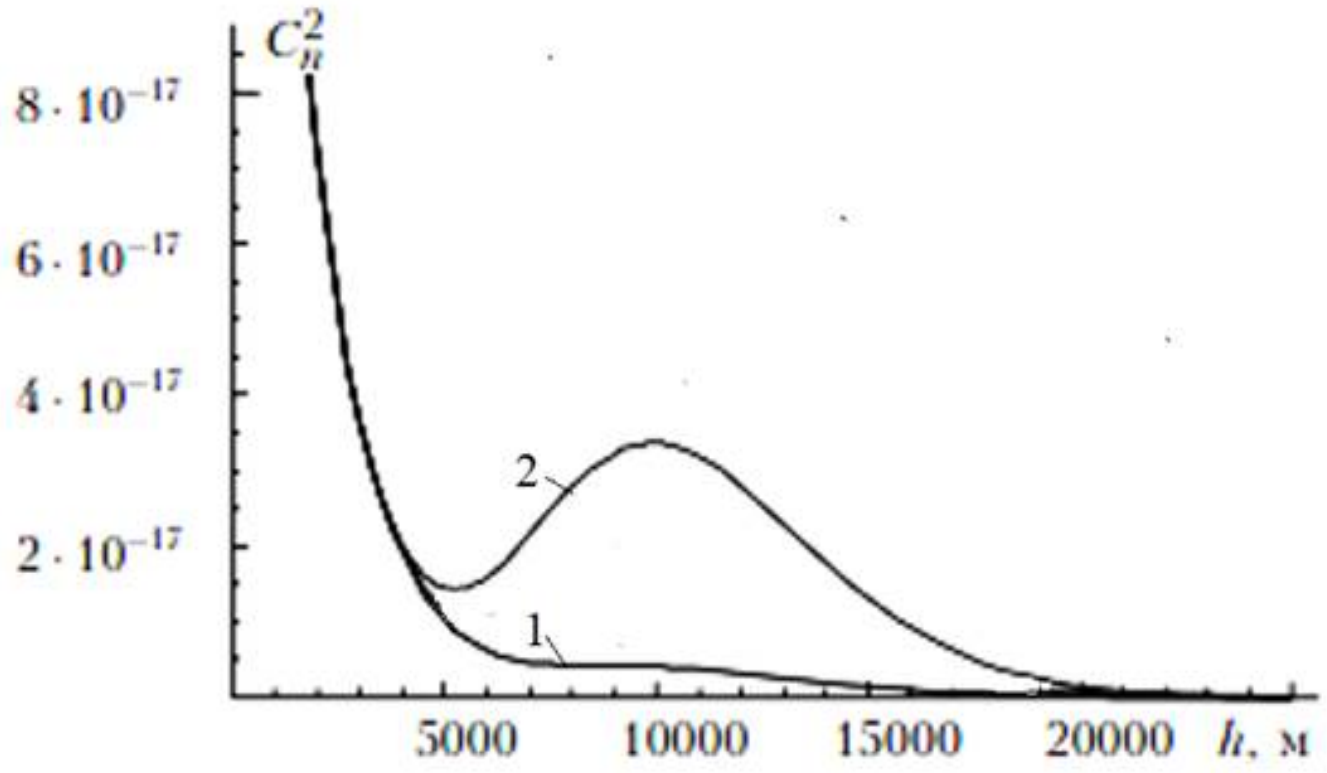

Рисунок 1. Влияние параметрav на зависимость структурной характеристики C_n: 1– v = 30 м/с ; 2 - v = 10 м/с

Наряду с этими факторами, величина C_n претерпевает изменения в течении суток [15, 16]. Суточные вариации величины C_n в летний период, в пункте наблюдения «Томск», измеренные в недавние времена, показаны на рисунке 2.

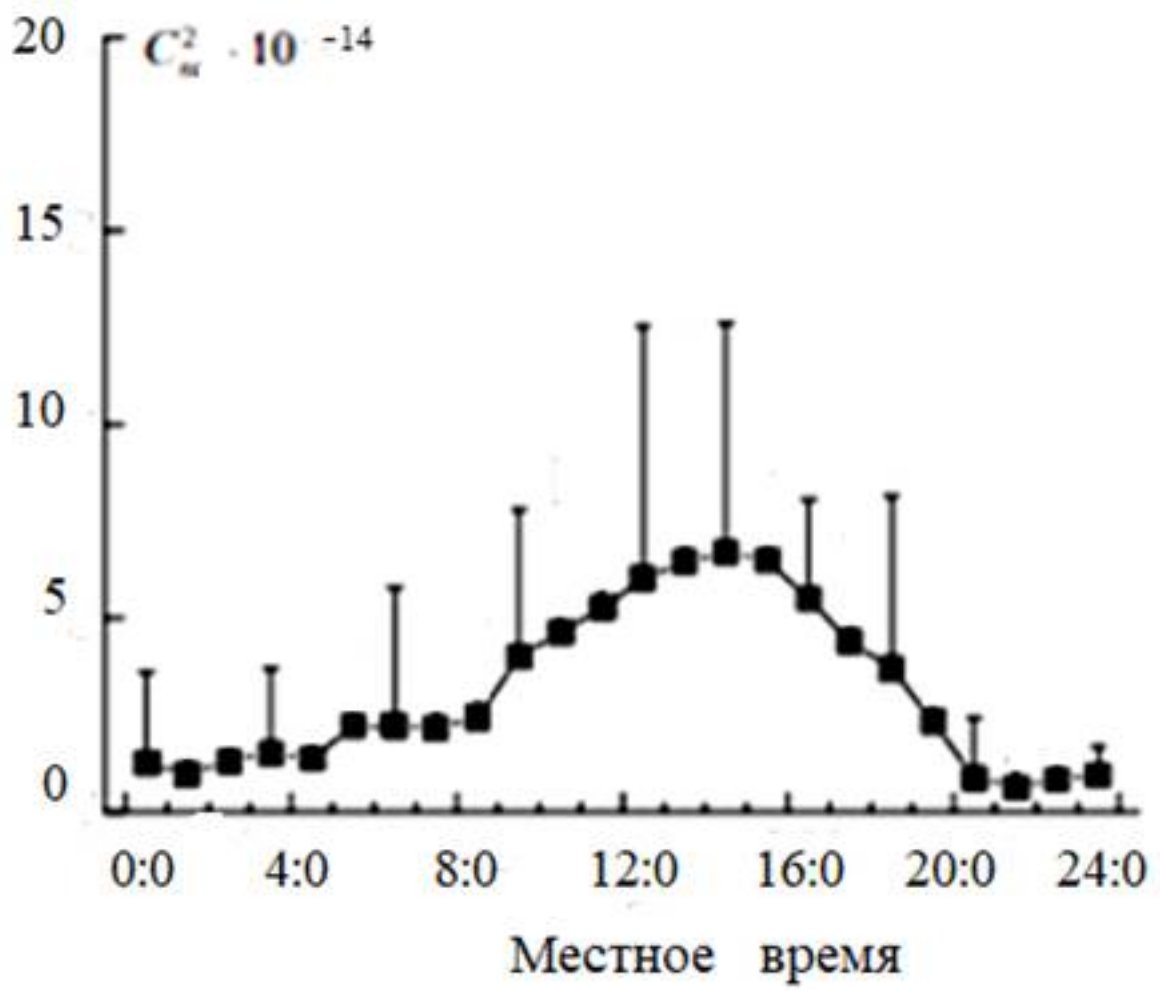

Рисунок 2. Изменение величины C_n в течение суток; тонкие вертикальные линии показывают СКО в выборочных точках измерений

Данные рисунка 2 показывают значимые изменения величины C_n в течении суточных измерений.

Таким образом, приведенные в представленной статье данные, доказывают. что при необходимости применения в анализе работы и в самой работе оптической линии связи, адекватной модели атмосферы, необходимо учитывать точное географическое местоположение модулей системы связи, с их высотой над уровнем моря, реальную розу ветров и время суток сеанса связи.

Список литературы:

1. Ботыгина Н.Н., Ковадло П.Г., Копылов Е.А. и др. Оценка качества астрономического видения в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа по данным оптических и метеорологических измерений. Оптика атмосферы и океана. – 2013. – т. 26. - № 11. – с. 942 – 947.

2. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н. и др. Дифференциальный оптический измеритель параметров атмосферной турбулентности. Оптика атмосферы и океана. – 1998. – т. 11. - № 11. – с. 1219 -1223.

3. Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.И., Хмелевцов С.С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. Наука. – 1976. – 277 с.

4. Бальбасова Л.А., Лукин В.П. Аналитические модели высотной зависимости постоянной показателя преломления турбулентной атмосферы для задач адаптивной оптики. Оптика атмосферы и океана. – 2016. – т. 29. - N 11. - с. 918 - 925.

5. Махмуд М.Х.А., Румянцев К.Е., ШакирА-Б А.Х. Анализ восходящего лазерного канала спутниковой коммуникации в условиях атмосферной турбулентности. Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. - N. 4. – с. 174 – 191.

6. Копылов Е.А., Лукин В.П., Ковадло П.Г., Шиховцев А.Ю. Исследование изменчивости атмосферной турбулентности в районе озера Байкал. БШФФ -2015. – Серия D. Физика атмосферы. – 2015. - с. 319 – 321.

7. Чжоу Л., Мао Ц. Лидар для обнаружения атмосферной турбулентности на основе модифицированного спектра мощности турбулентности фон Кармана. Front. Phys. – 2024. - 19 апрель. - Раздел "Оптика и фотоника". - т. 12; https://doi.org/10.3389/fphy.2024.1373608.

8. Chen Z, Cui S, Zhang L, Sun C, Xiong M, Pu J. Experimental measurement of scintillation index of vortex beams propagating in turbulent atmosphere. Optoelectronics Lett. - 2015. - 11(2): 141–4; doi: 10.1007/s11801-015-4187-y.

9. Cui G, Ren Z, Chen C. The experiment of a system for measurements of the refractive index structure constant along a 1 km free-space laser propagation path. In: 2012 International Conference on Optoelectronics and Microelectronics. IEEE (2012). - p. 313–8.

10. Jia R, Wei H, Zhang H, Cheng L, Cai D. Scintillation index of echo wave in slant atmospheric turbulence. Optik Int. J. Light Electron Opt. - 2015. - 126(24): 5122–6; doi:10.1016/j.ijleo.2015.09.166.

11. Aly AM, Fayed HA, Ismail NE, Aly MH. Plane wave scintillation index in slant path atmospheric turbulence: closed form expressions for uplink and downlink. Opt. Quant. Electron. - 2020. - 52: 350–14; doi:10. 1007/s11082-020-02463-w.

12. Mert B. Properties of hyperbolic sinusoidal Gaussian beam propagating through strong atmospheric turbulence. Microwave Opt. Technol. Lett. - 2021. - 63(5): 1595–600; doi:10.1002/mop.32799.

13. Wu J, Ke X, Yang S, Ding D. Effect of multi-beam propagation on free-space coherent optical communications in a slant atmospheric turbulence. J. Opt. - 2022. - 24(7): 075601; doi:10.1088/2040-8986/ac6cf6.

14. Roberts L.C., Bradford Jr. L. Improved models of upper-level wind for several astronomical observatories. Opt. Express. – v. 19. - N 2. - p. 820 – 837.

15. Гладких В.А., Мамышев В.П., Одинцов С.Л. Экспериментальные оценки структурной характеристики показателя преломления оптических волн в приземной атмосфере. – 2015. – т. 28. - № 4. - с. 28 – 37.

16. Fu S, Gao C. Influences of atmospheric turbulence effects on the orbital angular momentum

spectra of vortex beams. Photon Res. - 2016. - 4(5): B1; doi:10.1364/prj.4.0000b1.