

Ослабление фазовых флуктуаций коротких электромагнитных волн в когерентной турбулентности

В.В. Носов¹, В. М. Григорьев², П.Г. Ковадло², В.П. Лукин¹, Е.В. Носов¹, А.В. Торгаев¹

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

nosov@iao.ru

На высокогорном солнечном телескопе выполнен оптический эксперимент по измерению дрожания изображения края солнечного диска (Саянская солнечная обсерватория Института солнечно-земной физики СО РАН). Результаты измерений показывают, что в присутствии в атмосфере вблизи телескопа крупных когерентных структур (когерентная турбулентность) наблюдается эффект существенного ослабления дрожания изображений. В случае, когда вблизи телескопа имеется некогерентная колмогоровская турбулентность (крупные когерентные структуры отсутствуют) данные наших измерений совпадают с традиционной некогерентной теорией.

On the high-mountain optical solar telescope the experiment to the measure of the image jitter of the solar disk edge was made (Sayan Solar Observatory of the Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS). The measurement results show that the effect of the considerable decrease of the image jitters is observed by the presence in the atmosphere near the telescope the large coherent structures (coherent turbulence). In the case when the incoherent Kolmogorov turbulence (the large-scale coherent structures are absent) is near the telescope, the data of our measurements agree with conventional incoherent theory.

При дистанционном зондировании атмосферы часто используется коротковолновое излучение: микроволновое (с длиной волны 30 см – 1 мм) и оптическое, включающее в себя инфракрасный (1 мм – 0.8 мкм), видимый (0.8 мкм - 0.4 мкм) и ультрафиолетовый (0.4 мкм - 0.1 мкм) диапазоны. На распространение коротковолнового излучения оказывает заметное влияние земная атмосфера.

В окнах прозрачности в условиях незамутненной атмосферы качество сигнала, принятого коротковолновым приемником, определяется, в основном, атмосферной турбулентностью [1], которая вносит случайные искажения в фазовый фронт волны, ухудшает качество изображений. В большей степени влияние турбулентности сказывается на длинных трассах, в том числе в спутниковой связи и при наблюдении внеатмосферных оптических и микроволновых объектов.

В работе осуществлена экспериментальная проверка эффекта ослабления фазовых флуктуаций оптического излучения в когерентной турбулентности. Теоретически этот эффект был впервые обнаружен в нашей работе [2].

В результате экспедиционных работ 2000-х гг., проведенных в горных и равнинных условиях, авторами настоящей работы накоплена обширная экспериментальная база данных приземных измерений основных параметров турбулентности в различных географических районах и метеоситуациях [3-5]. Из этих данных следует, что в открытой атмосфере часто наблюдаются протяженные области, в которых определяющее влияние имеет одна когерентная структура (области когерентной турбулентности). Более того, характерные признаки когерентных структур, в той или иной степени, присутствуют в большинстве накопленных данных. Некогерентная колмогоровская турбулентность обнаруживается, как правило, только над обширными участками с ровной и однородной подстилающей поверхностью.

В [3] установлено, что когерентными структурами можно считать, например, процесс возникновения и распада ячейки Бенара в воздухе, процессы возникновения и распада вихрей, возникающих в результате обтекания жидкостью различных препятствий [5]. Понятие когерентной структуры включает в свой состав не только (традиционно) крупные, но и мелкомасштабные компоненты. Гидродинамической когерентной структурой называется [5] компактное образование, включающее в себя долгоживущую пространственную структуру (возникающую в результате продолжительного действия термодинамических градиентов) и продукты ее дискретного когерентного каскадного распада. Как показано в [5], распад когерентной структуры непрерывно продолжается до самых мелкомасштабных вихрей, которые еще могут существовать в воздухе.

Измерения проводились в Саянской солнечной обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН (п. Монды, Бурятия, вблизи границы с Монголией) 19 июня 2010 г. на автоматизированном горизонтальном солнечном телескопе (АСТ), время наблюдений (летнее иркутское) 15 ч 50 мин – 18 ч 15 мин. Телескоп содержит целостатную установку, представляющую собой систему из двух плоских зеркал диаметром 800 мм, которая обеспечивает непрерывное слежение за Солнцем. Целостат направляет солнечный свет на главное сферическое зеркало диаметром 800 мм и фокусным расстоянием 20 м. Зеркало строит изображение Солнца на фотоприемнике. Измерялась дисперсия угловых дрожаний изображения края солнечного диска σ_α^2 в зависимости от размера D приемного зеркала. Источником в эксперименте служил край солнечного диска. В качестве фотоприемника использовался датчик Брандта, являющийся фотоэлектрический регистратором дрожания. Датчик Брандта прошел успешную апробацию в течение нескольких десятков лет и ранее применялся в аналогичных исследованиях рядом отечественных и зарубежных исследователей. Измерения были выполнены для пяти различных диаметров приемного зеркала (апертуры) телескопа: 5 см, 10 см, 30 см, 50 см, 80 см и для двух различных угловых размеров приемной щели регистратора датчика: 25" и 10". Осуществлялся контроль зенитного угла положения Солнца. Параллельно оптическим измерениям метеосистемой «Метео-3М» производился непрерывный контроль метеоситуации с определением типа турбулентности (когерентная или некогерентная колмогоровская турбулентность) вблизи приемного телескопа АСТ.

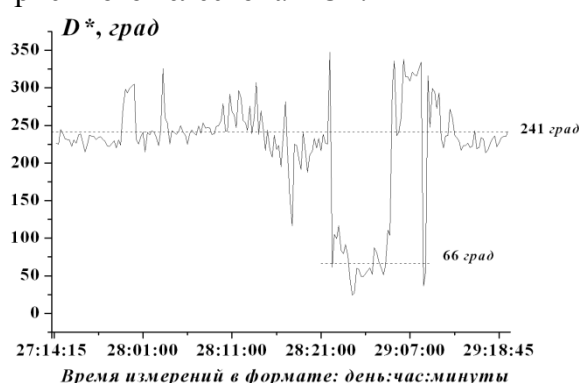


Рис. 1. Направление ветра D^* в течение периода оптических измерений вблизи АСТ (днем и ночью направления отличаются приблизительно на 180 °)

Полученные нами за многолетний период наблюдений экспериментальные данные показывают [2-5], что над территорией Саянской солнечной обсерватории часто наблюдаются крупные когерентные структуры. На рис. 1 приведен временной график изменений направления ветра вблизи АСТ, зарегистрированный нашей метеосистемой за время выполнения оптического эксперимента. Как видно из рис. 1, наблюдавшийся

во время измерений ветер имел два основных противоположных друг другу направления. Первое направление - с юго-запада, со стороны относительно плоских окрестностей оз. Хубсугул (Монголия). Второе, противоположное, - с северо-востока, со стороны Саянских гор, которые являются препятствием для северных воздушных потоков. Движущийся с севера воздух стекает со склонов Саянского горного массива и закручивается вверх склонами горы «Часовые Сопки», на которой расположена Саянская солнечная обсерватория. В результате над вершиной этой горы образуется долгоживущая крупная когерентная структура.

В когерентной турбулентности спектр атмосферной турбулентности $\Phi_\varepsilon(\varkappa)$ (спектр флуктуаций температуры) отличается от случая некогерентной колмогоровской турбулентности. Для построения теоретической модели $\Phi_\varepsilon(\varkappa)$ спектра когерентной турбулентности можно использовать кармановскую модель с соответствующим убыванием в инерционном интервале. Такая приближенная модель получена в [3 - 5]:

$$\Phi_T(\varkappa) = A_0 C_T^2 (6.6 \varkappa_{0e})^{2(v-1/3)} \varkappa^{-2(v+3/2)} \exp(-\varkappa^2/\varkappa_m^2) [1 - \exp(-\varkappa^2/\varkappa_{0e}^2)], \quad (1)$$

$$A_0 = 0.033, \quad \varkappa_{0e} = 2\pi/L_0; \quad v = 5/6, 1/3,$$

где C_T^2 – структурная характеристика флуктуаций температуры, L_0 и l_0 – (экспоненциальный) внешний и внутренний масштабы турбулентности. Для некогерентной колмогоровской турбулентности $v = 1/3$, тогда в инерционном интервале $\Phi_T(\varkappa) \sim \varkappa^{-11/3}$. В когерентной турбулентности $v = 5/6$, что в большей части инерционного интервала дает $\Phi_T(\varkappa) \sim \varkappa^{-14/3}$. Дальнейшее, более быстрое, убывание спектра в вязком интервале описывается экспоненциальным множителем в (1). Максимальная погрешность аппроксимации реальных спектров выражением (1) в вязком интервале приходится на область очень больших частот. Поэтому в задачах распространения коротких электромагнитных волн, в которых большую роль играет вязкий интервал, следует использовать модель, более подробную, чем (1). В задачах же, где основной вклад приходится на флуктуации фазы волны (рефракционные смещения оптических пучков, дрожание изображений и др. [1, 6]) вязкий интервал не вносит существенного вклада [6], поэтому аппроксимация (1) применима.

Спектр (1) получен нами в [2, 4, 5] с учетом приближенной связи между внешними масштабами для $v = 5/6$ и $v = 1/3$ (по данным [3, 4] в среднем они отличаются коэффициентом 2.3) и связи при $v = 1/3$ между кармановским внешним масштабом L_0^K и экспоненциальным L_0 (обычно $L_0 = 0,54 L_0^K$). Экспоненциальный спектр (1) отклоняется от кармановского [2, 3] только в энергетическом интервале, где $\varkappa^2/\varkappa_0^2 \ll 1$. Однако при $v = 1/3$ он дает практически такие же результаты, как и кармановский. В то же время он значительно упрощает расчеты.

Как известно [1, 6], в некогерентной колмогоровской турбулентности ($v = 1/3$) дисперсия дрожания σ_α^2 зависит от радиуса входной апертуры телескопа a_t :

$$\sigma_\alpha^2 = 4.51 a_t^{-1/3} \sec\theta \cdot I_{\text{HK}}, \quad I_{\text{HK}} = \int_0^\infty dh C_n^2(h), \quad (2)$$

где θ – зенитный угол наблюдаемого объекта (отсчитываемый в месте расположения приемника от направления в зенит), $C_n^2(h)$ – структурная характеристика флуктуаций показателя преломления воздуха, зависящая от высоты h над подстилающей поверхностью (высотный профиль C_n^2). Для каждого значения угла θ величина I_{HK} в (2) определяет интегральное значение структурной характеристики показателя преломления C_n^2 (интегральную интенсивность атмосферной колмогоровской турбулентности) на оптических трассах заданного наклона. Как следует из формулы (2), для колмогоровской турбулентности $\sigma_\alpha^2 \sim a_t^{-1/3}$.

В случае когерентной турбулентности ($\nu = 5/6$), после вычисления (по формулам [6]) соответствующих интегралов с использованием спектра (1), получаем следующее приближенное представление для дисперсии дрожания изображений σ_α^2 :

$$\sigma_\alpha^2 = 8.06 L_0^{-1/3} \sec\theta \cdot I_k, \quad I_k = \int_{h_0}^{\infty} dh C_n^2(h), \quad (3)$$

где $L_0 = L_0(h_0)$ – внешний (экспоненциальный) масштаб турбулентности на высоте центра приемного зеркала над подстилающей поверхностью h_0 , I_k в (3) является интегральной интенсивностью когерентной турбулентности на оптических трассах заданного наклона. Из формулы (3) видно, что, в отличие от колмогоровской некогерентной турбулентности (2), в когерентной турбулентности дисперсия дрожания σ_α^2 не зависит от радиуса приемника a_r . В когерентной турбулентности вместо радиуса приемника a_r (как видно из (2) и (3)) появляется внешний масштаб турбулентности L_0 .

Результаты астрономических и параллельных метеорологических измерений показали (рис.2), что когда в атмосфере регистрируется одна крупная когерентная структуры (спектр флуктуаций температуры $W_T \sim f^{-8/3}$, когерентная турбулентность), то наши данные совпадают с когерентной теорией ($\sigma_\alpha \sim const$). В случае отсутствия в атмосфере крупных структур (некогерентная турбулентность, $W_T \sim f^{-5/3}$) наши результаты совпадают с некогерентной теорией

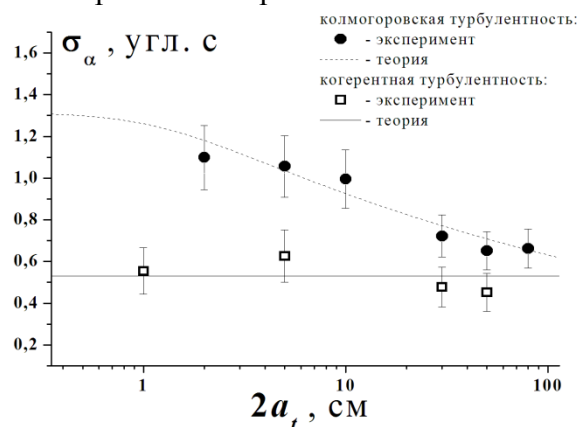


Рис. 2. Среднеквадратическое отклонение σ_α дрожания астрономического изображения края солнечного диска в зависимости от диаметра входной апертуры телескопа $2a_r$. Саянская солнечная обсерватория. Летние измерения 4 августа 2011 г. Для экспериментальных точек: в колмогоровской турбулентности – $W_T \sim f^{-5/3}$, для точек в когерентной турбулентности – $W_T \sim f^{-8/3}$

Отметим, что для колмогоровской турбулентности теоретическая кривая на рис. 2 построена с учетом регуляризации дрожаний изображения некогерентного протяженного источника (по данным наших работ). Это соответствует учету отклонения реального астрономического некогерентного объекта (край солнечного диска) от точечного. Как видно из рис. 2, наблюдается удовлетворительное совпадение регуляризованной теории с экспериментом. В соответствии с данными рис. 2, дисперсия дрожания изображения неточечного астрономического объекта (края солнечного диска) при уменьшении диаметра приемника $2a_r$ стремится к постоянной величине.

Как видно из рис. 2, стандартное отклонение дрожания изображения края солнечного диска в когерентной турбулентности, для одной и той же апертуры значительно меньше, чем в случае некогерентной колмогоровской турбулентности.

Таким образом, при наличии в атмосфере крупных когерентных структур (области когерентной турбулентности) флуктуации оптического излучения существенно

уменьшаются. Это уменьшает дрожание и повышает качество астрономических изображений. Следовательно, для установки наземных оптических и микроволновых приемников можно рекомендовать районы, над которыми во время измерений имеются крупные когерентные структуры. С другой стороны, сами крупные когерентные структуры (и соответствующие им области когерентной турбулентности) можно обнаружить с помощью измерений характеристик дрожания астрономических изображений.

Эксперимент 2011г. расширил наше понимание влияния когерентной турбулентности на распространение коротковолнового излучения в турбулентной среде. В отличие от результатов аналогичного эксперимента 2010г., в 2011г. нам удалось зарегистрировать больше данных для когерентной турбулентности (четыре точки для дисперсии дрожания изображений вместо одной в 2010г.). Анализ и сравнение результатов обоих экспериментов (в 2010г. и в 2011г.) позволил сделать следующие выводы:

1. Измерения показывают, что над территорией Саянской солнечной обсерватории когерентная турбулентность возникает, как правило, при северном ветре (с гор Саянского хребта). Летом такой ветер обычно наблюдается ночью. Поэтому ночные наблюдения здесь можно считать предпочтительными.

2. Среднее время жизни областей когерентной турбулентности над территорией Саянской солнечной обсерватории при южной ветре (со стороны Монголии, где наблюдается сравнительно ровная подстилающая поверхность) составляет 2-4 мин, а при северном ветре (с гор Саянского хребта) 20 -120 мин.

3. Для установки наземных коротковолновых приемников (включая, оптические) можно рекомендовать районы, над которыми во время измерений имеются крупные когерентные структуры.

4. Крупные когерентные структуры (и соответствующие им области когерентной турбулентности) можно обнаружить с помощью измерений характеристик дрожания астрономических изображений.

Литература

1. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. – М.: Наука. 1967. – 548 с.
2. Носов В.В., Григорьев В. М., Коваadlo П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Рекомендации по выбору мест размещения наземных астрономических телескопов // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23, № 12. С. 1099-1110.
3. Носов В.В., Григорьев В. М., Коваadlo П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Астроклимат специализированных помещений Большого солнечного вакуумного телескопа. Ч.1, Ч.2 // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20, № 11. С. 1013-1021; 2008. Т. 21, № 3. С. 207-217.
4. Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G. Coherent structures in the turbulent atmosphere // Mathematical models of nonlinear phenomena.– N.Y.: Nova Science Publishers. 2009. ch. 20; // Солнечно-земная физика. 2009. Вып.10. С. 134-143.
5. Носов В.В., Григорьев В. М., Коваadlo П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Когерентные структуры в турбулентной атмосфере. Эксперимент и теория // Солнечно-земная физика, 2009. Вып.10. С.134-143.
6. Миронов В.Л., Носов В.В., Чен Б.Н. Дрожание оптических изображений лазерных источников в турбулентной атмосфере // Изв. вузов. Радиофизика, 1980. Т. 23. № 4. С. 461-470.