

УДК 551.5

DOI: 10.17223/00213411/63/11/109

*П.Г. КОВАДЛО¹, А.Ю. ШИХОВЦЕВ¹, Е.А. КОПЫЛОВ^{2,3}, А.В. КИСЕЛЕВ¹, И.В. РУССКИХ¹***ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ АТМОСФЕРНЫХ ИСКАЖЕНИЙ
ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ ДАТЧИКА ВОЛНОВОГО ФРОНТА ***

Рассмотрена структура оптической турбулентности в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа Байкальской астрофизической обсерватории. Приведены некоторые результаты по изучению наблюдаемых деформаций волнового фронта в целях расширения архива данных. Обсуждаются возможности выявления атмосферных слоев с повышенной интенсивностью оптической турбулентности. Даны оценки высот атмосферных турбулентных слоев в пределах нижней атмосферы.

Ключевые слова: телескоп, волновой фронт, радиус Фрида, турбулентность.

Введение

Атмосферная турбулентность существенно понижает разрешающую способность телескопов наземного базирования и ограничивает изопланатический угол атмосферной толщи. Величина, локально характеризующая интенсивность турбулентности – это структурная характеристика флуктуаций показателя преломления воздуха, входящая в «закон 2/3» Колмогорова – Обухова. Обычно в качестве интегральной характеристики интенсивности оптической турбулентности по лучу зрения принято использовать радиус Фрида [1].

Действующие и планируемые к вводу в эксплуатацию астрономические телескопы наземного базирования [2] в целях достижения их максимальной разрешающей способности в заданном поле зрения оснащаются системами адаптивной оптики разных конструкций. Эффективность коррекции изображений в части повышения пространственного разрешения при помощи системы адаптивной оптики зависит от характеристик оптической турбулентности по лучу зрения и, в частности, от средних значений и вариаций радиуса Фрида. Оптимальный выбор технических параметров адаптивной оптической системы осуществляется с учетом оптической схемы телескопа и особенностей вертикальных профилей структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха, а также профилей скорости ветра. При этом вертикальные профили метеорологических характеристик существенно изменяются как на коротких, так и на длинных промежутках времени. С этой точки зрения оценка радиуса Фрида как характеристики изрезанности волнового фронта, а также вертикальных профилей представляет интерес для астроклиматических исследований места и для оптимизации облика и технических характеристик системы адаптивной оптики.

Оценка радиуса Фрида по данным измерений датчика волнового фронта.**Метод определения вертикальных профилей оптической турбулентности S-DIMM+**

Для расширения архива данных о структуре оптической турбулентности и характеристик искажений волнового фронта в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ) ведутся продолжительные оптические и микрометеорологические измерения. С помощью датчиков волнового фронта БСВТ регистрируются и архивируются гартманнограммы – наборы разнесенных субизображений одного и того же объекта солнечной поверхности (поры, пятна, участки края). Совершенствуются методы измерений и изучения оптических искажений, формируемых по лучу зрения, для адаптивных систем [3]. Практически непрерывно выполняются мачтовые измерения характеристик турбулентности приземного слоя на высоте ~ 30 м над подстилающей поверхностью, в том числе синхронно с оптическими измерениями. Результаты изучения структуры оптической и микрометеорологической турбулентности приведены в работах [4–10].

* Восстановление турбулентных характеристик методом S-DIMM+ выполнено при финансовой поддержке соглашения № 075-15-2019-628, анализ распределения турбулентности с высотой выполнен при поддержке гранта РФФИ № 19-79-00061. Данные измерений частично получены с использованием уникальной научной установки – Большой солнечный вакуумный телескоп – при поддержке ФНИ И.16.

В настоящей работе рассмотрен процесс формирования искажений волнового фронта на основе анализа данных измерений дифференциального дрожания изображений с помощью датчика волнового фронта Шэка – Гартмана БСВТ, полученных летом 2018 г. Оценки радиуса Фрида по данным этих измерений подробно описаны в работе [6]. Результаты расчета радиуса Фрида, оцененного по данным измерений дифференциального дрожания изображений за 28.06.2018, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета радиуса Фрида по измерениям 28.06.2018.

Время	14.39	14.41	14.42	14.44	14.46	14.50	14.51	14.52
r_0 , см	5.81	4.96	5.03	4.11	3.83	4.80	3.87	6.38

Полученные значения радиуса Фрида дают представления об изменениях суммарной энергии оптической турбулентности по лучу зрения БСВТ и служат основой для анализа физической картины формирования искажений волнового фронта.

В то же время, помимо анализа интегральных характеристик оптической турбулентности, изучение ее структуры в разных высотных слоях возможно путем применения триангуляционного анализа мелкомасштабных искажений волнового фронта. Среди методов и их модификаций широко используются Slodar и S-DIMM+, основанные на регистрации и ранжировании мелкомасштабных искажений волнового фронта [10–15].

Суть метода S-DIMM+, позволяющего определять вертикальные профили оптической турбулентности по данным измерений датчика Шэка – Гартмана, а также ограничения его использования подробно описаны в [10]. В основе метода лежит связь между кросскорреляционной функцией дифференциальных смещений центров тяжести субизображений и вертикальным распределением энергетической характеристики турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха. Смещения центров тяжести субизображений вдоль взаимноперпендикулярных осей координат пропорциональны суммарному вкладу разных атмосферных слоев:

$$C_{sx} = \langle \delta x_1(s, 0) \delta x_2(s, \alpha) \rangle = \sum_{n=1}^N c_n F_x(s, \alpha, h_n); \quad (1)$$

$$C_{sy} = \langle \delta y_1(s, 0) \delta y_2(s, \alpha) \rangle = \sum_{n=1}^N c_n F_y(s, \alpha, h_n), \quad (2)$$

где s – расстояние от опорной субапертуры; α – угол между «осевым» и «внеосевыми» объектами; h_n – высота турбулентного слоя n . Дифференциальные смещения «осевого» ($\alpha = 0$) и «внеосевого» ($\alpha \neq 0$) объектов определяются следующим образом:

$$\delta x_1(s, 0) = \sum_{n=1}^N x_n(s) - x_n(0); \quad (3)$$

$$\delta x_2(s, \alpha) = \sum_{n=1}^N x_n(s + \alpha h_n) - x_n(\alpha h_n). \quad (4)$$

Функции $F_x(s, \alpha, h_n)$ и $F_y(s, \alpha, h_n)$ представлены в работе [10].

Коэффициенты c_n пропорциональны интенсивности оптической турбулентности в атмосферном слое:

$$c_n = 5.98 D_{\text{eff}} (h_n)^{-1/3} C_n^2 dh / \cos z. \quad (5)$$

Поскольку для оси y выражения для дифференциальных смещений имеют аналогичную форму, то для выявления особенностей в вертикальной структуре оптической турбулентности мы будем использовать анализ смещений только вдоль одной из осей.

Метод S-DIMM+ отражает подход получения данных о структуре турбулентности по изображению картины преломления, описанный в монографии [16]. В частности, рассматривая подход в широком смысле, можно считать, что если турбулентность, распределенная в некоторой турбулентной зоне, однородна и если, помимо этого, масштаб турбулентности очень мал по сравнению с поперечным сечением этой зоны, то картина распределения оптических искажений в плоскости

апертуры должна быть эквивалентна картине распределения турбулентности в продольном сечении этой зоны. В рамках метода S-DIMM+ картина распределения турбулентности по лучу зрения оценивается по данным измерений дифференциального смещения разнесенных фрагментов субизображений, что минимизирует инструментальные искажения, вносимые вследствие ветрового обтекания телескопа.

Пространственные кросскорреляционные функции дрожания изображений на Большом солнечном вакуумном телескопе

Исследованиям волнового фронта в широком поле зрения уделяется существенное внимание при решении задач по коррекции солнечных изображений. Мы используем один из известных подходов по определению искажений волнового фронта на разных высотах, заключающийся в триангуляции локальных наклонов волнового фронта, измеренных датчиком Шэка – Гартмана. Несмотря на то, что вертикальные профили оптической турбулентности с применением анализа мелкомасштабных искажений волнового фронта восстанавливаются в среднем до высот 3–5 км [13, 17], на характеристики адаптивной оптики существенное влияние оказывает именно атмосферный пограничный слой.

Для определения искажений волнового фронта и вклада атмосферных турбулентных слоев на различных высотах в искажения были использованы данные измерений датчика Шэка – Гартмана, установленного в оптической схеме БСВТ. В качестве источника света было выбрано изображение края солнечного диска, анализ которого позволяет определить смещения отдельных фрагментов данного изображения, разнесенных друг от друга на разные углы. В измерениях волнового фронта поле зрения каждой субапертуры составляло 38 угл. с.

Субизображения края солнечного диска – это пространственные источники света, обеспечивающие возможность анализа отдельных фрагментов субизображений. Каждое такое субизображение в фокальной плоскости субапертуры было разбито на отдельные фрагменты, разнесенные друг от друга примерно на 1 угл. с в пределах поля зрения равного 38 угл. с. Для каждого фрагмента субизображения края солнечного диска был определен временной ряд изменений центра тяжести. Таким образом, в пределах каждой субапертуры было получено 38 временных рядов изменений центра тяжести разнесенных в пространстве фрагментов субизображений.

С помощью формулы (1) мы рассчитали пространственные кросскорреляционные функции дрожания изображений в разных субапертурах, разнесенных на расстояния 7.5 см (рис. 1), 15 см (рис. 2), 30 см (рис. 3) и 52.5 см (рис. 4). Линиями показаны пространственные кросскорреляционные функции для разных пар субапертур.

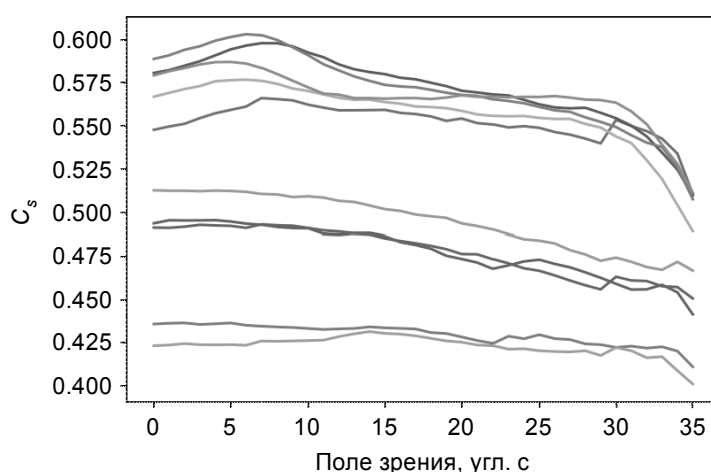


Рис. 1. Пространственные кросскорреляционные функции дрожания изображений, разнесенных на минимальное расстояние – 7.5 см. Измерения на Большом солнечном вакуумном телескопе 28.06.2018., время 14:41

С увеличением активной части диаметра телескопа максимум в пространственных кросскорреляционных функциях дрожания изображений должен смещаться в сторону больших углов между

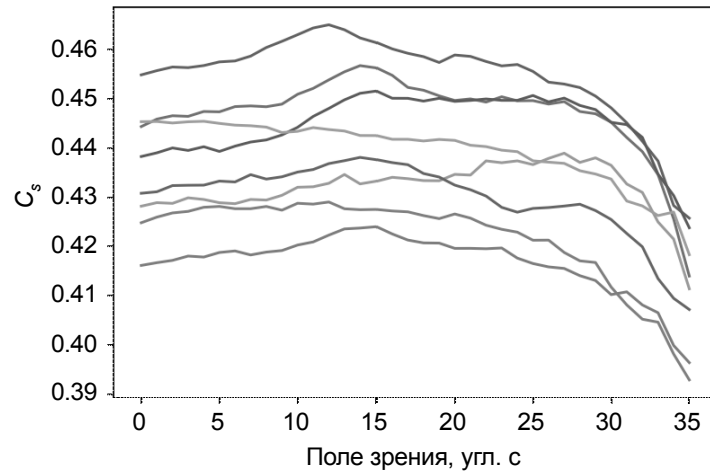


Рис. 2. Пространственные кросскорреляционные функции дрожания изображений, разнесенных на 15 см. Измерения на Большом солнечном вакуумном телескопе 28.06.2018., время 14:41

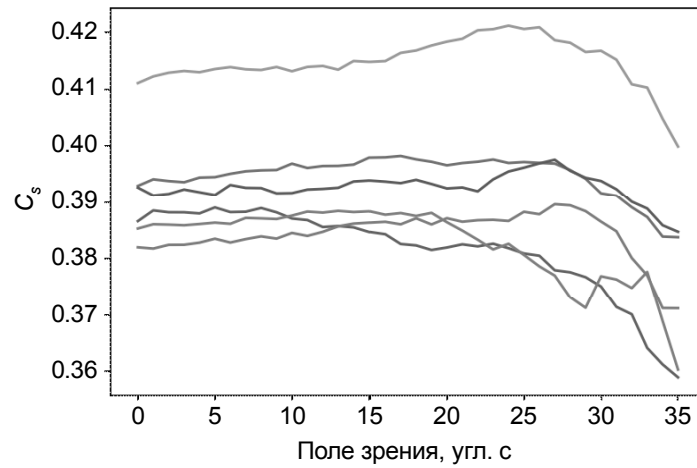


Рис. 3. Пространственные кросскорреляционные функции дрожания изображений, разнесенных на 30 см. Измерения на Большом солнечном вакуумном телескопе 28.06.2018., время 14:41

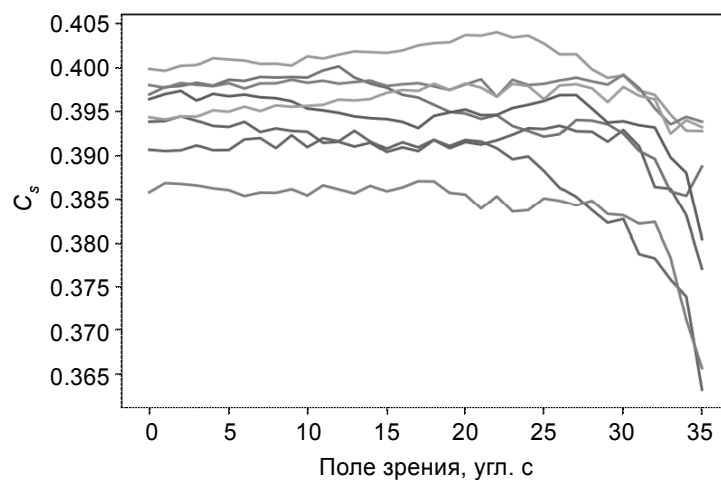


Рис. 4. Пространственные кросскорреляционные функции дрожания изображений, разнесенных на 52.5 см. Измерения на Большом солнечном вакуумном телескопе 28.06.2018., время 14:41

«источниками» света – выбранными фрагментами субизображений солнечного края. На рис. 1–4 можно видеть это смещение. В смежных субапертурах, когда $\delta i = 1$, максимум функции приходится на значения угла от 6.0 до 7.5 угл. с. С увеличением активной части диаметра телескопа он смещается на 12–15 угл. с для расстояния между центрами субапертур 15 см, при смещении ~ 24.0 –28.0 угл. с для 30 см и далее находится вне шкалы.

Для оценки профилей безразмерной характеристики турбулентности $C_{\text{норм}} = c_n / A$ полученные пространственные кросскорреляционные функции необходимо нормировать на корреляционную функцию A в пределах опорной субапертуры, используемую в работе [18]. На рис. 5 показаны изменения безразмерной характеристики турбулентности $C_{\text{норм}}$ по полю зрения. Для больших углов, соответствующих действию нижних турбулентных слоев, $C_{\text{норм}}$ превышает ее значения для малых углов.

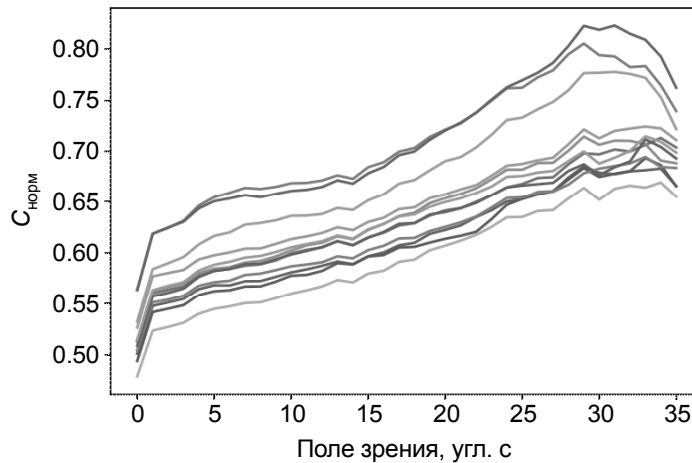


Рис. 5. Изменения безразмерной характеристики турбулентности $C_{\text{норм}}$ по полю зрения. Увеличение поля зрения соответствует уменьшению высоты турбулентного слоя. Измерения на Большом солнечном вакуумном телескопе 28.06.2018., время 14:41

Обсуждение результатов

По данным измерений дрожаний субизображений датчиком Шэка – Гартмана мы оценили смещения положений центров тяжести в пространственных кросскорреляционных функциях. Путем триангуляции искажений волнового фронта определили высоты атмосферных турбулентных слоев, которые пропорциональны угловому смещению между фрагментами субизображений солнечного края. Результаты обобщены в табл. 2. Первая колонка соответствует расстоянию между центрами двух выбранных субапертур, вторая колонка – углу между двумя фрагментами изображения края, разнесенными на некоторый угол в пределах субапертуры, третья колонка – высоте атмосферного турбулентного слоя, который вносит искажения в пространственные кросскорреляционные функции. В четвертой колонке приведен анализ характера пространственных кросскорреляционных функций. Получено, что в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа турбулентные слои наблюдаются на высотах 1150–1440 м и 570–640 м. Это находится в согласии с типичными высотами атмосферных слоев [19].

Таблица 2

Положения атмосферных турбулентных слоев, определенных по максимумам (пикам) в пространственных кросскорреляционных функциях дрожания фрагментов субизображений солнечного края, БСВТ

D/n , см	θ , угл. с	z , м	Характер изменений величины C_s
7.5 ($\delta i = 1, \delta j = 1$)	~ 6.0 –7.5	~ 1150 –1430	Неострый пик
15 ($\delta i = 2, \delta j = 2$)	~ 12.0 –15.0	~ 1150 –1440	Неострый пик
15 ($\delta i = 2, \delta j = 2$)	~ 27.0 –30.0	~ 570 –640	Неострый пик
30 ($\delta i = 4, \delta j = 4$)	~ 24.0 –28.0	~ 1230 –1430	Неострый пик
52.5 ($\delta i = 7, \delta j = 7$)	~ 22.0 –35.0	~ 1480 –2350	Слабый рост величины C_s

Полученные данные о пространственных кросскорреляционных функциях дрожания изображений разнесенных источников могут быть в дальнейшем использованы для расчета вертикальных профилей интенсивности оптической турбулентности, например величины структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха в режиме реального времени.

Методы восстановления профилей структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха по лучу зрения с применением дистанционных методов, основанных на данных измерений датчиков волновых фронтов, в перспективе могут быть использованы в адаптивной оптической системе расширенного поля зрения Крупного солнечного телескопа КСТ-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fried D.L. // J. Opt. Soc. Am. – 1965. – V. 55. – P. 1427–1435.
2. Григорьев В.М., Демидов М.Л., Колобов Д.Ю. и др. // Солнечно-земная физика. – 2020. – Т. 6. – № 2. – С. 19–36.
3. Lukin V.P., Antoshkin L.V., Bolbasova L.A., et al. // Atmospher. Ocean. Optics. – 2020. – V. 33. – No. 1. – P. 85–103.
4. Ковадло П.Г., Найденов П.А., Шиховцев А.Ю. // Известия Иркутского государственного университета. Сер. Науки о Земле. – 2009. – Т. 2. – № 2. – С. 105–116.
5. Ботыгина Н.Н., Ковадло П.Г., Копылов Е.А. и др. // Труды Междунар. Байкальской молодежной науч. школы по фундаментальной физике и конф. молодых ученых. – 2013. – С. 303–305.
6. Botygina N.N., Kopylov E.A., Lukin V.P., et al. // Atmospher. Ocean. Optics. – 2014. – V. 27. – No. 2. – P. 142–146.
7. Копылов Е.А., Селин А.А., Шиховцев А.Ю. // Изв. вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 10/3. – С. 104–106.
8. Konyaev P.A., Kopylov E.A., Lukin V.P., et al. // Proc. SPIE. – 2017. – V. 10466. – P. 104660N.
9. Bolbasova L.A., Shikhovtsev A.Yu., Lukin V.P., and Kovadlo P.G. // MNRAS. – 2019. – V. 482. – P. 2619–2626.
10. Tham M. Wide field wavefront sensing: Undergraduate thesis in Astronomy. Department of Astronomy Stockholm University. – Stockholm, 2011. – 60 p.
11. Scharmer G.B. and van Werkhoven T.I. // A&A. – 2010. – V. 513. – P. A.25.
12. Шиховцев А.Ю., Киселев А.В., Ковадло П.Г. и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2019. – Т. 32. – № 12. – С. 994–1000.
13. Шиховцев А.Ю., Ковадло П.Г., Большасова Л.А., Лукин В.П. // Оптика атмосферы и океана. – 2019. – Т. 32. – № 10. – С. 819–823.
14. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.А., Торгаев А.В. // Изв. вузов. Физика. – 2016. – Т. 59. – № 12/2. – С. 138–142.
15. Shikhovtsev A.Yu., Kiselev A.V., Kovadlo P.G., et al. // Atmospher. Ocean. Optics. – 2020. – V. 33. – No. 3. – P. 295–301.
16. Хинце И.О. Турбулентность. – М.: ГИФМЛ, 1963. – 680 с.
17. Shikhovtsev A., Kovadlo P., Lukin V., et al. // Atmosphere. – 2019. – V. 10. – Iss. 11. – P. 661.
18. Шиховцев А.Ю., Киселев А.В., Ковадло П.Г., Русских И.В. // Тез. докл. Междунар. конф. БШФФ-2019. – 2019. – С. 402–404.
19. Banakh V.A., Smalikhov I.N., and Falits A.V. // Remote Sensing. – 2020. – V. 12. – Iss. 6. – P. 955.

Поступила в редакцию 15.11.2019,
после доработки – 31.07.2020.

¹ Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

² Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал Федерального научно-исследовательского центра

«Кристаллография и фотоника» РАН, г. Шатура, Московская область, Россия

³ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

Ковадло Павел Гаврилович, д.ф.-м.н., ст. науч. сотр. ИСЗФ СО РАН, e-mail: kovadlo2006@rambler.ru;

Шиховцев Артем Юрьевич, к.ф.-м.н., науч. сотр. ИСЗФ СО РАН, e-mail: Ashikhovtsev@iszf.irk.ru;

Копылов Евгений Анатольевич, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр. ИПЛИТ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, науч. сотр. ИОА СО РАН, e-mail: kea@iao.ru;

Киселев Александр Викторович, мл. науч. сотр. ИСЗФ СО РАН, e-mail: kiselev@iszf.irk.ru;

Русских Иван Викторович, инженер-програмист ИСЗФ СО РАН, e-mail: vanekrus@iszf.irk.ru.