

АДАПТИВНАЯ И ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОПТИКА

УДК 520.16, 551.55

Метод определения высот турбулентных слоев в атмосфере

А.Ю. Шиховцев¹, А.В. Киселев¹, П.Г. Ковадло¹, Д.Ю. Колобов¹,
В.П. Лукин², В.Е. Томин^{1*}

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 16.04.2019 г.

Предложен метод определения высот турбулентных слоев в атмосфере, в основе которого лежит анализ синхронного отклика в локальных наклонах волнового фронта, регистрируемых на разных участках суб-апертуры. Аналогичные методы построены на анализе двух разнесенных объектов, выбранных на Солнце, часто разной геометрии с помощью двух датчиков волнового фронта. Обсуждаются определения характеристик атмосферной турбулентности одним датчиком на разных высотах и по одному смещающемуся во времени солнечному объекту вследствие суточного движения Солнца по небосводу. Выполнены оценки характеристик турбулентности в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа.

Ключевые слова: атмосферная турбулентность, волновой фронт, телескоп, солнечные изображения, вертикальные профили турбулентности; atmospheric turbulence, wavefront, telescope, solar images, profiles of the turbulence.

Введение

Работа классических адаптивных оптических систем, в которых деформируемое зеркало сопряжено с плоскостью апертуры телескопа, основана на определении и коррекции волнового фронта. Для измерения волнового фронта наиболее часто используется датчик Шака–Гартмана. Поле зрения, в котором происходит точное определение волнового фронта, невелико и ограничено так называемым изопланатическим углом толщи атмосферы. Искажения волнового фронта, как и флуктуации амплитуды световой волны, распространяющейся в земной атмосфере, возникают вследствие атмосферной турбулентности. При этом интенсивная турбулентность может формироваться на различных расстояниях от апертуры телескопа в атмосферном слое толщиной от 0 до ~20000 м.

При наблюдении протяженных источников света, которыми являются солнечные образования, распределение оптических искажений может существенно изменяться по полю зрения телескопа в зависимости от характера вертикального профиля атмосферной турбулентности. Основная причина «неопределения/некомпенсации» искажений в широком поле зрения, размер которого много больше 5 усл. с на длине волны излучения 0,5 мкм, – турбулентность в верхних

слоях атмосферы, приводящая к анизопланатизму. При регистрации изображений Солнца волновые фронты от каждого из светящихся источников на диске, разнесенных на некоторый угол, сдвинуты на расстояния, пропорциональные высотам атмосферных слоев с высокой интенсивностью турбулентных флуктуаций плотности воздуха.

Опыт применения дистанционных методов [1–12], основанных на анализе распределения интенсивности и фазы на апертуре телескопа в областях, которые разнесены на разные расстояния, указывает на возможность восстановления вертикальных профилей атмосферной турбулентности. Для определения вертикальных профилей характеристик оптической турбулентности, в частности флуктуаций показателя преломления воздуха, с помощью телескопов по данным наблюдений нескольких объектов используются разные методы обработки данных измерений датчиков Шака–Гартмана, среди которых можно выделить Slodar, Scidar, G-Scidar, Co-Slidar, S-Dimm+. В основу методов восстановления вертикальных профилей оптической турбулентности атмосферы положен кросскорреляционный анализ распределения интенсивности света и/или искажений волновых фронтов на приемной апертуре инструмента от светящихся объектов, разнесенных на некоторый угол. При этом важной задачей для развития указанных методов является понимание физических механизмов формирования оптических искажений волнового фронта и закономерностей их пространственного распределения по апертуре телескопа. На актуальность этой задачи указывают новые результаты исследований волнового фронта в широком поле

* Артем Юрьевич Шиховцев (artempochta2009@rambler.ru); Александр Викторович Киселев (kiselev@isf.irk.ru); Павел Гаврилович Ковадло (kovadlo2006@rambler.ru); Дмитрий Юрьевич Колобов (kolobov@iszf.irk.ru); Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru); Виталий Евгеньевич Томин (tomin@iszf.irk.ru).

зрения и появление новых методов определения вертикальных профилей турбулентности [10, 11].

Развитие способов коррекции волнового фронта в широком поле зрения и разработка мультисистем адаптивной оптики нового поколения требуют знания вертикальных профилей атмосферной турбулентности. В зависимости от вертикальных профилей структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха и флуктуаций скорости ветра происходит:

– выбор числа контуров определения и коррекции волнового фронта, в каждом из которых деформируемое зеркало сопряжено с определенным слоем в атмосфере;

– выбор количества изопланатических зон, для каждой из которых определяется волновой фронт.

Метод определения высот атмосферных турбулентных слоев, построенный по аналогии с методом Slodar

Настоящая работа является продолжением исследований структуры атмосферной турбулентности и деформаций волнового фронта в месте расположения Байкальской астрофизической обсерватории и Саянской солнечной обсерватории, отдельные результаты которых приведены в [13–18].

Метод определения высоты положения атмосферных слоев с интенсивной турбулентностью разрабатывался по аналогии с чаще всего используемым методом Slodar [3, 4, 7–9, 11, 12, 18]. В рамках Slodar измеряются локальные наклоны волновых фронтов от двух светящихся объектов, разнесенных на известный угол θ , с помощью двух датчиков волнового фронта. При солнечных наблюдениях в качестве объектов могут выступать солнечные пятна, поры, гранулы или край солнечного изображения. Стоит заметить, что анализу волновых фронтов от солнечных объектов методом Slodar посвящено большое количество исследований, а экспериментальных работ в этом направлении немного.

Вертикальные профили характеристик показателя преломления воздуха восстанавливаются по осредненным во времени пространственным кросс-корреляционным функциям локальных наклонов волновых фронтов от каждого из светящихся объектов в соответствии с выражением

$$C(\delta i, \delta j, \delta t) = \frac{\left(\sum_{i,j}^{i=n, j=m} s_{i,j}^{(1)} s_{i+\delta i, j+\delta j}^{(2)} \right)}{O(\delta i, \delta j)}, \quad (1)$$

где i, j – индексы субапертур; $s_{i,j}^{(1)}$ – локальные наклоны волнового фронта на субапертуре i, j датчика 1; $s_{i+\delta i, j+\delta j}^{(2)}$ – локальные наклоны волнового фронта на сдвинутой субапертуре $i + \delta i, j + \delta j$ относительно опорной i, j датчика 2; $O(\delta i, \delta j)$ – число пересекающихся субапертур. Коэффициенты $C(\delta i, \delta j)$, рассчитанные по локальным наклонам волновых

фронтов для каждой пары субапертур, характеризуют интенсивность турбулентности на определенном уровне в атмосфере. Схема определения высот атмосферных уровней методом Slodar приведена на рис. 1. Серыми кружками показаны два светящихся объекта, удаленных от апертуры астрономического телескопа диаметром D . Участкам на апертуре телескопа размером D/n позиционно соответствуют субапертуры датчиков волнового фронта Шака–Гартмана. Положения точек пересечений волновых фронтов от разнесенных на угол θ светящихся объектов на рис. 1 соответствуют высотам атмосферных уровней, которые определяются по выражению

$$z = \frac{D}{n\theta} \cos \alpha, \quad (2)$$

где n – количество субапертур; θ – угол между наблюдаемыми объектами; α – зенитный угол. При этом величины коэффициентов кросскорреляций для этой высоты прямо пропорциональны интенсивности турбулентности.

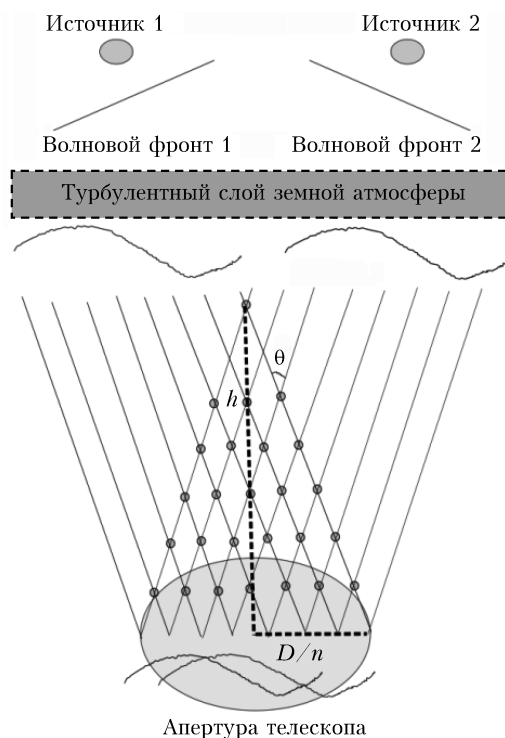


Рис. 1. Схема определения высот атмосферных уровней методом Slodar

В методе Slodar восстановление вертикального профиля атмосферной турбулентности выполняется по данным измерений локальных наклонов волновых фронтов от двух (и более) светящихся объектов, регистрируемых с помощью двух датчиков Шака–Гартмана. Во-первых, это налагает ряд ограничений на процедуру точного определения локальных наклонов волнового фронта: необходимо наличие контрастных солнечных объектов, разнесенных на заданный угол, в ограниченном по размеру поле зрения датчиков. Во-вторых, реализация эксперимента

с двумя датчиками Шака–Гартмана требует перестройки оптической схемы системы адаптивной оптики – внедрения двух оптических плечей с двумя одинаковыми датчиками, синхронно регистрирующими волновые фронты от объектов.

С этой точки зрения, в работе была поставлена цель разработать метод определения высоты атмосферных слоев с интенсивной турбулентностью по аналогии с методом Slodar с использованием одного датчика волнового фронта Шака–Гартмана.

Концептуальной основой предлагаемого метода является схема определения высоты атмосферных слоев в скрещенных оптических пучках: опорном пучке в начальный момент времени t_0 и оптическом пучке в момент времени $t_0 + \delta t$ (рис. 2). Положение оптических пучков изменяется вследствие суточного движения Солнца (солнечного объекта). На рисунке участкам на апертуре телескопа размером D/n позиционно соответствует массив субапертур датчика волнового фронта Шака–Гартмана. Квадратами выделены две субапертуры, правую условно будем считать опорной. Точки пересечения опорного пучка и пучков, показанных пунктирными линиями, образуются в моменты времени $t_0 + \delta t$. Зная вариации зенитного и азимутального углов Солнца, при измерении волнового фронта возможно определить изменение угла между исходным и искомым положением пучка от кадра к кадру.

Для разработки метода расчета была рассмотрена схема, показанная на рис. 1. Локальные наклоны волнового фронта 2, определенные по измерениям дрожания солнечного объекта в начальный момент

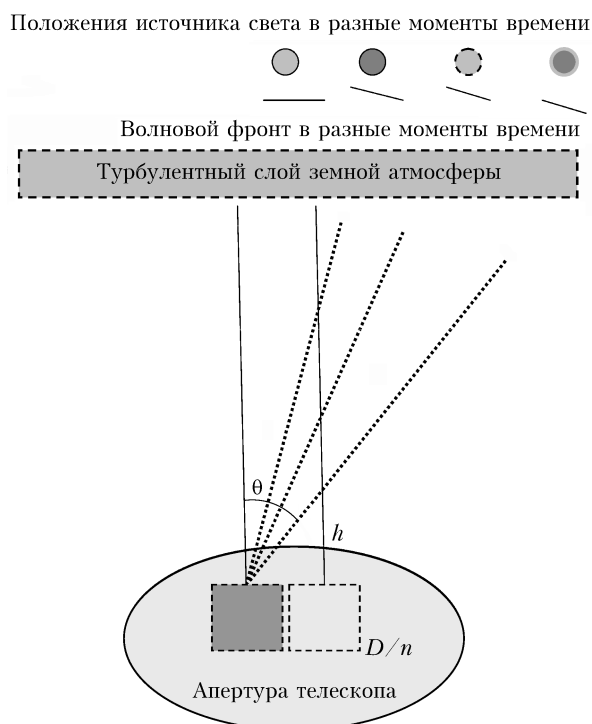


Рис. 2. Схема определения высоты атмосферных слоев в скрещенных опорном пучке в начальный момент времени t_0 и оптическом пучке в момент времени $t_0 + \delta t$, положение которого смещается вследствие суточного движения Солнца

времени, должны быть пропорциональны локальным наклонам волнового фронта от опорного объекта, смещенного по углу в некоторый последующий момент времени. Это означает, что, с учетом суточного движения Солнца и известного углового смещения солнечного объекта, $s_{i+\delta i, j+\delta j}^{(2)}$ в выражении (1) должно быть пропорционально амплитудам локальных наклонов волнового фронта в момент времени $t_0 + \delta t$:

$$s_{i+\delta i, j+\delta j}^{(2)}(t_0) \sim s_{i+\delta i, j+\delta j}(t_0 + \delta t). \quad (3)$$

Это выражение дает возможность восстанавливать вертикальные профили характеристик показателя преломления воздуха по осредненным во времени пространственным кросскорреляционным функциям локальных наклонов волновых фронтов от опорного объекта и сдвинутого с течением времени (по углу) объекта по формуле

$$C(\delta i, \delta j, \delta t) = \frac{\left(\sum_{i,j}^{i=n, j=m} s_{i,j}(t_0) s_{i+\delta i, j+\delta j}(t_0 + \delta t) \right)}{O(\delta i, \delta j)}, \quad (4)$$

где $s_{i,j}(t_0)$ – амплитуды локальных наклонов волнового фронта на опорной субапертуре в начальный момент времени; $s_{i+\delta i, j+\delta j}(t_0 + \delta t)$ – амплитуды локальных наклонов волнового фронта на субапертуре, сдвинутой относительно опорной в последующий момент времени; δt – значение временного сдвига, пропорциональное угловому смещению объекта, за который оцениваются коэффициенты кроссковариации. Осреднение пространственных кросскорреляционных функций производится по всей длине временной реализации. При этом, в сравнении с выражением (2), количество точек пересечений волновых фронтов от разнесенных на угол θ светящихся объектов возрастает, а их положения соответствуют высотам атмосферных уровней и определяются аналогично (3) в виде

$$z = \frac{D}{n\theta(\delta t)} \cos \alpha. \quad (5)$$

Угловое смещение солнечного объекта, равное ~ 15 угл.с/с, определяет диапазон высот, для которых рассчитываются коэффициенты пространственно-временной кросскорреляции.

Таким образом, предложенный метод, основанный на расчете величины $C(\delta i, \delta j, \delta t)$, согласно выражениям (4) и (5), позволяет определять высоты формирования атмосферных слоев с интенсивной турбулентностью.

Пространственное ограничение при определении искажений волнового фронта

При измерениях локальных наклонов волнового фронта в различные моменты времени возникает ряд ограничений. На результаты измерений влияют характеристики атмосферы и элементов оптической схемы телескопа. Оптимальная постановка измерений локальных наклонов волнового фронта требует выбора скорости работы датчика волнового фронта,

числа субапертур, их размера в пересчете на апертуру телескопа в зависимости от суммарной интенсивности атмосферной турбулентности по лучу зрения. Это ограничивает пространственное разрешение метода (шаг между характерными высотами по вертикали).

С учетом того, что скорость регистрации искажений датчиком волнового фронта имеет порядок 10^{-2} , потенциально метод обладает возможностью определения положения слоя с интенсивной турбулентностью до верхней границы оптически активной атмосферы, находящейся на высоте ~ 20000 м. Восстановление единичного профиля турбулентности в нижних слоях земной атмосферы в диапазоне высот от 50 до 1500 м над подстилающей поверхностью осуществляется в пределах 10 с. Разрешение метода по высоте неравномерное, зависит от зенитного угла наблюдений. Наибольшее число высотных уровней, для которых определяются турбулентные характеристики, соответствует нижнему слою атмосферы. Расстояние между высотными уровнями, для которых определяются коэффициенты пространственно-временной кросскорреляции, на удалении от апертуры 300 м составляет ~ 20 м. В свободной атмосфере разрешение метода по высоте снижается, шаг между уровнями > 100 м. Более детально изменения пространственного разрешения представлены в таблице.

Изменения пространственного разрешения метода

Угловой сдвиг A_s , угл. с	D/n , м	z , м
15	0,075	1030
	0,15	2050
	0,225	3080
	0,3	4100
	0,45	6160
	0,525	7180
15,25	0,075	1010
	0,15	2020
	0,225	3030
	0,3	4040
	0,45	6060
	0,525	7060

В первом столбце в качестве примера показаны последовательные значения углового сдвига A_s . Шаг между двумя ближайшими значениями кросскорреляционной функции определяется характерной скоростью углового смещения солнечного объекта 15 угл. с/с и частотой работы датчика $f = 1/60$ Гц и составляет $15/60 = 0,25$ угл. с/кадр. Во втором столбце таблицы показаны расстояния между центрами субапертур, в третьем – оценки характерных высот атмосферных слоев, полученные с учетом масштаба 0,25 угл. с/кадр. Для оценки разрешения метода по вертикали приведено значение $A_s = 15,25$ – на следующем шаге по времени с учетом частоты работы датчика.

Допущение о пропорциональности пространственной и пространственно-временной кросскорреля-

ционной функций, рассчитываемой по угловому смещению объекта, основано на согласованности данных анализа синхронности изменений амплитуд мелко-масштабных искажений волнового фронта по апертуре телескопа. Атмосферный слой с интенсивной турбулентностью в скрещенных оптических пучках формирует на апертуре телескопа определенное распределение оптических искажений с большими амплитудами. Чувствительность к искажениям волнового фронта, формируемым в верхних атмосферных слоях, зависит от интенсивности турбулентности во всем «оптически активном» слое атмосферы вертикальной мощностью ~ 20000 м. В условиях развитой турбулентности в приземном слое атмосферы эффект от турбулентности верхних слоев маскируется, а максимальная высота определения вертикальных профилей турбулентности понижается в связи с тем, что максимальные амплитуды наклонов волнового фронта, формируемого в верхних (отдельных) атмосферных слоях (на высотах ~ 10000 м), составляют менее 10% от средних интегральных амплитуд, регистрируемых в плоскости апертуры телескопа. Изменения максимальной высоты определения вертикальных профилей при разной степени развитости турбулентности также влияют на ошибку анизопланатизма, пропорциональную отношению высоты турбулентности к радиусу Фрида в степени $5/3$ с точностью до постоянного множителя. На рис. 3 показаны изменения оценки ошибки анизопланатизма для $\theta = 10$ угл. с. Рассчитанные значения радиуса Фрида, соответствующие ошибкам анизопланатизма, приведены на рис. 4, при этом эффективная высота турбулентного слоя принята равной 2540 м [19]. Анализ рис. 3 и 4 показывает, что ошибки анизопланатизма возрастают примерно в 1,2–1,4 раза с усилением оптической турбулентности.

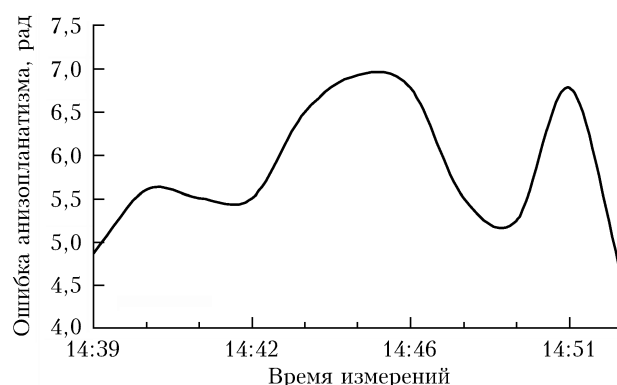


Рис. 3. Изменения ошибки анизопланатизма

Помимо этого, расчет кросскорреляционных функций по смещающемуся объекту осложнен общим дрожанием зеркала телескопа. Даже при слабом ветре погрешности восстановления амплитуд кросскорреляционных функций недифференциальным методом могут достигать 30% и более. Точные оценки погрешностей метода, ограничений по высоте, а также уменьшения значений кросскорреляционных максимумов при большом количестве турбулентных

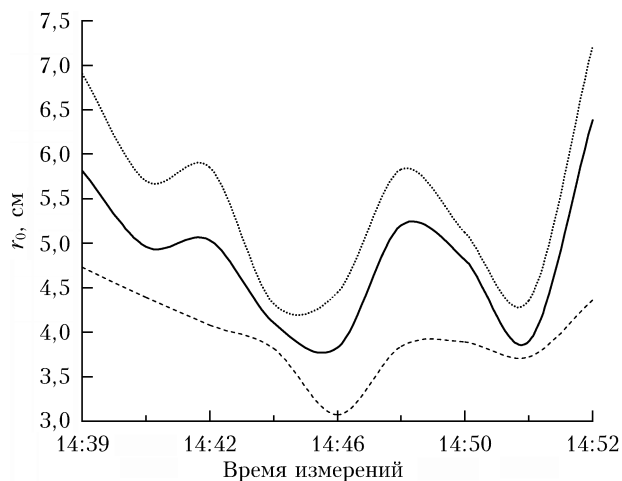


Рис. 4. Изменения значений радиуса Фрида, определенные по данным измерений датчика Шака–Гартмана, осредненные за 1 мин по всем субапертурам (сплошная линия). Пунктирной и точечной линиями показаны временные изменения наименьших и наибольших значений радиуса Фрида в поле зрения датчика соответственно

слоев по лучу зрения требуют дальнейших исследований структуры турбулентности и формирования волнового фронта в широком поле зрения.

Определение высот атмосферных слоев с высокой интенсивностью турбулентности в месте расположения БСВТ

Метод определения высоты атмосферных слоев с интенсивной турбулентностью, построенный на аналогии с методом Slodag, был использован при обработке данных измерений волнового фронта в системе адаптивной оптики [14] Большого солнечного вакуумного телескопа Байкальской астрофизической обсерватории Института солнечно-земной физики (БСВТ БАО ИСЗФ). Байкальская астрофизическая обсерватория ($51^{\circ}50'47''$ с.ш., $104^{\circ}53'30''$ в.д.) располагается на пересеченной местности на высоте ~ 180 м над водной поверхностью в специфических условиях, формируемых близостью крупного водоема — оз. Байкал.

По наблюдениям субизображений края солнечного диска были оценены амплитуды локальных наклонов волнового фронта и рассчитано высотное распределение $C(\delta i, \delta j, \delta t)$ для места расположения БСВТ. В качестве измерительного устройства использовался датчик Шака–Гартмана с лэнзлетом 8×8 . На рис. 5 показаны примеры вертикальных профилей величины $C(\delta i, \delta j, \delta t)$, рассчитанные по данным измерений локальных наклонов волнового фронта 28 июня 2018 г.

Синхронно с измерениями волнового фронта датчиком Шака–Гартмана проводились измерения скорости ветра и температуры воздуха с помощью метеосистемы АМК-03, установленной на мачте вблизи зеркала сидеростата БСВТ. Система АМК-03 дала

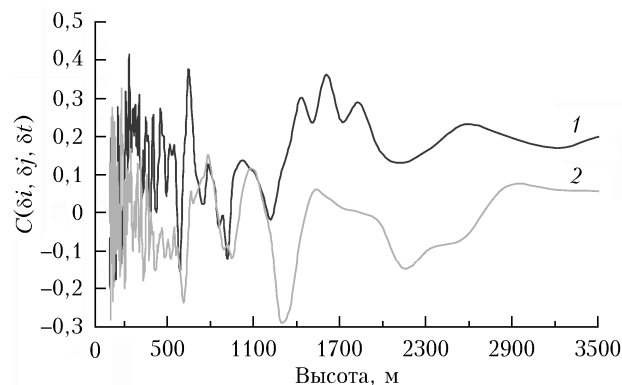


Рис. 5. Примеры вертикальных профилей величины $C(\delta i, \delta j, \delta t)$ (кривые 1, 2), рассчитанные по данным измерений локальных наклонов волнового фронта для разных реализаций 28 июня 2018 г. Кривая 1 по сравнению с кривой 2 соответствует более интенсивной турбулентности на разных высотах

возможность определить как средние величины, так и величины турбулентных флуктуаций метеорологических параметров, включая структурную характеристику показателя преломления воздуха, с частотой 80 Гц. Средняя скорость ветра составила $4,1$ м/с.

Примечательно, что луч зрения телескопа проходил над водной поверхностью оз. Байкал. Поэтому полученные вертикальные профили $C(\delta i, \delta j, \delta t)$ должны характеризовать структуру турбулентности над Байкалом и склоном. Местоположение обсерватории на вершине одного из холмов в прибрежной зоне озера дает основание предполагать, что структура турбулентности может быть сформирована под воздействием локальных факторов при обтекании холма воздушным потоком. Достаточно большие средние величины и флуктуации скорости воздушного потока, обтекающего холм, способствуют формированию интенсивной турбулентности в приземном слое атмосферы.

Анализ рис. 5 показывает, что величина $C(\delta i, \delta j, \delta t)$, характеризующая интенсивность турбулентности, распределена неравномерно с высотой. Подтверждается, что наибольшая изменчивость $C(\delta i, \delta j, \delta t)$ отмечается в нижнем, приземном слое атмосферы, толщина которого ограничивается 70 м. Максимумы ковариаций наблюдаются на высотах 230, 650 и 1050 м. Таким образом, рассчитанные за разные временные интервалы вертикальные профили $C(\delta i, \delta j, \delta t)$ указывают на высокую повторяемость пространственных положений атмосферного слоя, определяемых по максимумам кросс-корреляционных коэффициентов между временными изменениями амплитуд локальных наклонов волнового фронта на разных субапертурах, в пределах диапазона высот 600–900 м, а также на развитую турбулентность в нижнем слое атмосферы толщиной до 70–100 м.

Экспериментальные исследования в месте расположения БСВТ, выполненные с помощью лидара Stream Line, подтвердили сложный характер изменений скорости и направления ветра с высотой [20, 21]. Как правило, над астропунктом БСВТ наблюдаются струйные течения нижних уровней на высотах

150–250 и 500–800 м. Полученные из измерений волнового фронта оценки высот с повышенной турбулентностью (230 и 650 м) оказались в диапазоне характерных высот с высокой скоростью ветра, определенных из данных лидара Stream Line.

Для верификации предлагаемого метода также был выполнен анализ изменений значений радиуса Фрида, оцененных по данным измерений дрожания солнечных субизображений, вызываемого неоднородностями показателя преломления воздуха в слое от 0 до ~20000 м, и безразмерной величины k , характеризующей интегральную турбулентность в слое до 1500 м:

$$k = \frac{\int_{z_1}^{z_2} C(\delta i, \delta j, \delta t) dz}{\left(\int_{z_1}^{z_2} C(\delta i, \delta j, \delta t) dz \right)_{\max}}, \quad (6)$$

где $\left(\int_{z_1}^{z_2} C(\delta i, \delta j, \delta t) dz \right)_{\max}$ – максимальное значение интегральной характеристики k во временном ряду; $z_1 = 0$ м; $z_2 = 1500$ м.

На рис. 4 показаны изменения значений радиуса Фрида, определенные по данным измерений датчика Шака–Гартмана, а также наименьших и наибольших значений радиуса Фрида в поле зрения датчика. Значения радиуса Фрида из измерений локальных наклонов волнового фронта с использованием датчика оценивались с помощью выражения, приведенного в [16]. Величины радиуса Фрида, оцениваемые по формуле, приведенной в [15], практически совпадают со значениями, рассчитанными по методу [22].

Для сравнения изменений радиуса Фрида во времени на рис. 6 приведены синхронные вариации величины k , характеризующие интегральную интенсивность турбулентности в слое от 0 до 1500 м. Величина k оценивалась отдельно для каждой временной реализации локальных наклонов волнового фронта.

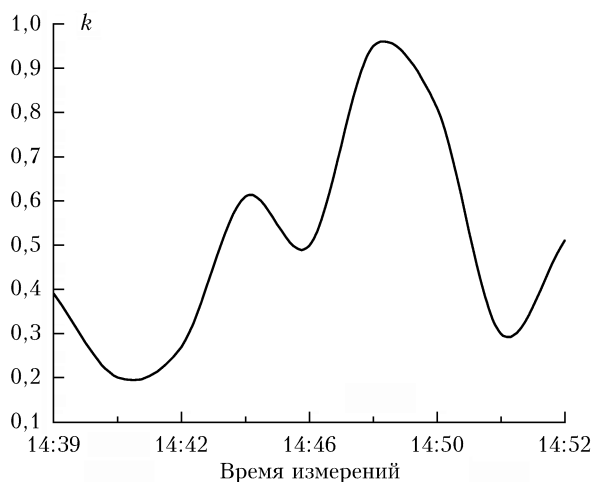


Рис. 6. Изменение безразмерной величины k во времени

Анализ рис. 5 и 6 показывает, что значения радиуса Фрида, определенные в слое от 0 до 20000 м, имеют тенденцию к уменьшению при возрастании интенсивности турбулентности в пограничном слое, характеризующейся вариациями значений k , и наоборот. Такой характер изменений k и радиуса Фрида позволяет заключить, что предлагаемая схема метода дает объективные результаты в области изменений интенсивности атмосферной турбулентности на разных высотных уровнях.

Заключение

В работе предложен метод определения высоты атмосферных слоев с интенсивной турбулентностью, построенный по аналогии с методом Slodar, в основе которого лежит обработка данных измерений дрожания набора субизображений в фокальной плоскости одного датчика волнового фронта Шака–Гартмана. Восстановление вертикального распределения характеристик показателя преломления воздуха возможно не только путем анализа большого количества субизображений, регистрируемых датчиком Шака–Гартмана, но и путем сравнительного анализа временных вариаций локальных наклонов волнового фронта между двумя субапертурами с учетом углового смещения наблюдаемых солнечных объектов вследствие суточного движения Солнца. Приведены результаты измерений характеристики турбулентности – радиуса Фрида, значения которого возрастают с уменьшением энергии атмосферной турбулентности. Примечательно, что при достаточно высокой скорости ветра на мачте (~4 м/с) высотой 30 м средние значения радиуса Фрида за период наблюдений изменялись от 3,8 до 6,3 см. Показано, что максимумы ковариаций, пропорциональные интенсивности турбулентности, наблюдались на высотах 230, 650 и 1050 м. Сильные вариации интенсивности этих слоев могут указывать на то, что они не являются постоянными, а формируются в отдельные периоды времени. В ходе наблюдений за характеристиками турбулентности в приземном слое атмосферы стало ясно, что слои могут быть сформированы под воздействием локальных факторов вследствие обтекания холма воздушным потоком и развитой вынужденной конвекцией в приземном слое атмосферы с вертикальной скоростью воздушного потока, изменяющейся от 0,1 до 3,5 м/с.

Результаты получены с использованием уникальной научной установки Большой солнечный вакуумный телескоп (<http://ckp-rf.ru/usu/200615/>). Разработка метода определения высоты атмосферных слоев с интенсивной турбулентностью, основанного на суточном смещении Солнца, выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00033. Измерения волнового фронта поддержаны в рамках базового финансирования программы ФНИ И.16. Анализ ошибок анизоплантизма волнового фронта поддержан в рамках соглашения № 075-15-2019-628.

1. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Фазовый оптический метод измерения высотного профиля

- атмосферной турбулентности // Изв. вузов. Физика. 2016. Т. 59, № 12-2. С. 138–142.
2. *Blary F., Ziad A., Borgnino J., Fante-Caujolle Y., Aristidi E., Lanteri H.* Monitoring atmospheric turbulence profiles with high vertical resolution using PML/PBL instrument // Proc. SPIE. 2014. V. 9145.
 3. *Butterley T., Wilson R., Sarazin M.* Determination of the profile of atmospheric optical turbulence strength from SLODAR data // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2006. V. 369. P. 835–845.
 4. *Goodwin M., Jenkins C., Lambert A.* Improved detection of atmospheric turbulence with SLODAR // Opt. Express. 2007. V. 15, N 22. P. 14844–14860.
 5. *Kellerer A., Gorceix N., Marino J., Cao W., Goode P.R.* Profiles of the daytime atmospheric turbulence above Big Bear solar observatory // Astron. Astrophys. 2012. V. 542, N 2. P. 10.
 6. *Kornilov V., Tokovinin A., Vozyakova O., Zaitsev A., Ahatsky N., Potanin S., Sarazin M.* MASS: A monitor of the vertical turbulence distribution // Proc. SPIE. 2003. V. 4839.
 7. *Love G.D., Dunlop C.N., Patrick S., Saunter C.D., Wilson R.W., Wright C.* SLODAR as turbulence monitor for free space optical communications // Proc. SPIE. 2006. V. 6018.
 8. *Butterley T., Osborn J., Sarazin M., Wilson R.* Nowcasting of the surface layer of turbulence at Paranal Observatory // AO4ELT5 Proc.: Tenerife, Canary Islands, Spain, 2017.
 9. *Sarazin M., Butterley T., Tokovinin A., Travouillon T., Wilson R.* The Tololo SLODAR Campaign // ESO/CTIO/Durham internal report. 2005.
 10. *Townson M.J., Kellerer A., Saunter C.D.* Improved shift estimates on extended Shack–Hartmann wavefront sensor images // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2015. V. 452, iss. 4. P. 4022–4028.
 11. *Townson M.J., Saunter C.D.* Reducing the Field of View in Correlating Wavefront Sensors for Solar Adaptive Optics // AO4ELT5 Proc.: Tenerife, Canary Islands, Spain, 2017.
 12. *Wilson R.W.* SLODAR: Measuring optical turbulence altitude with a Shack–Hartmann wavefront sensor // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2002. V. 337. P. 103–108.
 13. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Когерентная турбулентность на территории Байкальской астрофизической обсерватории // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 9-2. С. 204–205.
 14. *Antoshkin L.V., Botygina N.N., Bolbasova L.A., Emaleev O.N., Konyayev P.A., Kopylov E.A., Kovadlo P.G., Kolobov D.Yu., Kudryashov A.V., Lavrinov V.V., Lavrinova L.N., Lukin V.P., Chuprakov S.A., Selin A.A., Shikhovtsev A.Yu.* Adaptive optics system for solar telescope operating under strong atmospheric turbulence // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 3. P. 291–299.
 15. *Bolbasova L.A., Shikhovtsev A.Yu., Kopylov E.A., Selin A.A., Lukin V.P., Kovadlo P.G.* Daytime optical turbulence and wind speed distributions at the Baykal Astrophysical Observatory // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2019. V. 482. P. 2619–2626.
 16. *Botygina N.N., Kovadlo P.G., Kopylov E.A., Lukin V.P., Tuv M.V., Shikhovtsev A.Yu.* Estimation of the astronomical seeing at the large solar vacuum telescope site from optical and meteorological measurements // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 2. P. 142–146.
 17. *Konyayev P.A., Kopylov E.A., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Selin A.A., Shikhovtsev A.Yu.* Works on the set of data measuring turbulence in different seasons of the year // Proc. SPIE. 2017. V. 10466.
 18. *Shikhovtsev A.Yu., Kovadlo P.G.* Calculation of the profile of turbulent inhomogeneities of the air refraction index // Proc. SPIE. 2014. V. 9292.
 19. *Ковадло П.Г., Лукин В.П., Шиховцев А.Ю.* Развитие модели турбулентной атмосферы на астроплощадке Большого солнечного вакуумного телескопа в приложении к адаптации изображений // Оптика атмосф. и океана. 2018). Т. 31, № 11. С. 906–910.
 20. *Banakh V.A., Smalikho I.N.* Lidar observations of atmospheric internal waves in the boundary layer of the atmosphere on the coast of Lake Baikal // J. Atmos. Meas. Tech. 2016. V. 9. P. 5239–5248.
 21. *Banakh V.A., Smalikho I.N.* Lidar study of wind turbulence, low level jet streams, and atmospheric internal waves in the boundary layer of atmosphere // The Europ. Phys. J. Conf. 2018. V. 176(1). P. 1–4.
 22. *Sarazin M., Roddier F.* The ESO differential image motion monitor // Astron. Astrophys. 1990. V. 227. P. 294.

A.Yu. Shikhovtsev, A.V. Kiselev, P.G. Kovadlo, D.Yu. Kolobov, V.P. Lukin, V.E. Tomin. **The method for determining the altitudes of atmospheric layers with strong turbulence.**

The modern tasks concerning the methods for recovering the altitude profiles of the atmospheric turbulence are discussed. An alternative method to the Slodar-technique is suggested for determining the altitudes of atmospheric layers characterized by strong turbulence. The method is based on estimation of the space-time crosscovariances between local wavefront slopes on subapertures spaced in the telescope field of view with a known angular displacement of an object observed due to the Sun motion. The turbulence characteristics are estimated for the Large Solar Vacuum Telescope site.