

Метод определения характеристик оптической турбулентности по лучу зрения астрономического телескопа

А.Ю. Шиховцев*

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

Поступила в редакцию 20.08.2021 г.

Предложен модифицированный метод определения вертикальных профилей характеристик оптической турбулентности. По данным наблюдений на Большом солнечном вакуумном телескопе получены вертикальные профили безразмерного параметра турбулентности и структурной постоянной флуктуаций показателя преломления воздуха. Выполнен анализ профилей оптической турбулентности. Установлено, что эффективная высота турбулентности в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа близка к 2000 м.

Ключевые слова: SLODAR, вертикальный профиль, оптическая турбулентность, эффективная высота турбулентности; SLODAR, altitude profile, optical turbulence, effective turbulence height.

Введение

Возможности регистрации солнечных и звездных изображений с высоким и средним качеством, приемлемым для коррекции фазовых искажений системами адаптивной оптики (АО), ограничены атмосферной турбулентностью. Формируемые на разных высотах в земной атмосфере турбулентные флуктуации показателя преломления воздуха приводят к оптическим искажениям: вызывают флуктуации амплитуды и фазы световой волны. Результат – в фокусе астрономического телескопа наблюдается дрожание и мерцание изображения, а также размытие его внутренней структуры. Изучению структуры атмосферной турбулентности и ее влияния на излучение посвящено множество исследований, например [1–4].

Для определения оптимального времени астрономических наблюдений и подстройки элементов АО необходим мониторинг вертикальных профилей оптической турбулентности. Знание энергетики и структуры оптической турбулентности в разных слоях атмосферы нужно не только для классических систем АО с одним деформируемым зеркалом, но и для систем АО широкого поля зрения [5, 6]. Такие системы определяют фазовые искажения специальными детекторами и корректируют их с помощью набора деформируемых зеркал. Также характеристики оптической турбулентности необходимо знать при планировании астрономических наблюдений без систем АО, только с использованием контура отбора изображений с заданными критериями качества.

Для определения вертикальных профилей турбулентных характеристик наиболее оптимально использование дистанционных методов, основанных на измерениях в оптическом тракте телескопа [7–14]. Один из наиболее известных таких методов – SLODAR-метод, который предусматривает анализ мелкошаговых искажений волнового фронта, зарегистрированных с помощью датчика Шэка–Гартмана [7]. Настоящее исследование базируется на развитии SLODAR-метода и подхода, описанного в [15].

Алгоритм работы SLODAR-метода включает в себя следующие шаги:

1. Регистрация гартманограмм, позволяющих анализировать временные ряды фазовых искажений, формируемых в фокальных плоскостях субапертур датчика Шэка–Гартмана.

2. Определение центров тяжести субизображений разнесенных источников света в пределах каждой субапертуры датчика.

3. Расчет пространственных кросс-корреляционных функций $C(i, j, z, \theta)$ от смещений центров тяжести субизображений нескольких источников света. Предварительно определяют смещения центров тяжести субизображений разнесенных источников света для каждой субапертуры. В случае двух субапертур датчика с одним источником света в атмосфере оптические пучки формируют одну область перекрещивания. С двумя источниками света на разных высотах формируется четыре области перекрещивания оптических пучков.

4. Определение высот атмосферных уровней z по положениям областей скрещенности оптических пучков. Высота атмосферного уровня увеличивается с уменьшением углового расстояния между источниками света и увеличением расстояния между субапертурами.

* Артем Юрьевич Шиховцев (artempochta2009@rambler.ru).

5. Расчет нормировочных (автокорреляционных) функций для получения вертикальных профилей турбулентности:

$$C_N^2(z) \sim c_n(z) = \tilde{F} \frac{F(C(i, j, z, \theta))}{F(A(i, j, z))}, \quad (1)$$

где C_N^2 – структурная постоянная флуктуаций показателя преломления воздуха; z – высота слоя; $c_n(z) = 0,32\lambda^2 r_0^{-5/3} D_{\text{effc}}^{-1/3}(z)$ – безразмерный параметр турбулентности, λ – длина волны света, D_{effc} – диаметр метазрачка телескопа на высоте z [11], r_0 – параметр Фрида [16]; F – Фурье-преобразование, \tilde{F} – обратное Фурье-преобразование; $A(i, j, z)$ – автокорреляционная функция смещений центров тяжести субизображения; i, j – индексы субапертур.

6. Оценка интегральной интенсивности оптической турбулентности, определяемой вертикальной структурной постоянной флуктуаций показателя преломления воздуха:

$$J = \int_0^H C_N^2(z) dz, \quad (2)$$

где H – высота оптически активной атмосферы. Профили $C_N^2(z)$ восстанавливаются с учетом интегральных энергетических характеристик оптической турбулентности.

В рамках разрабатываемого подхода характеристики турбулентных искажений определяются в скрещенных оптических пучках, положения которых изменяются вследствие суточного движения Солнца по небосводу. Учет смещений оптических пучков позволяет анализировать структуру оптической турбулентности в дополнительных узлах по вертикали [15].

Метод определения размерных характеристик турбулентности по низкочастотным изменениям искажений волнового фронта

Одна из существенных проблем – получение вертикальных профилей размерных энергетических характеристик турбулентности по данным наблюдений на мобильных и стационарных крупноапертурных астрономических телескопах наземного базирования. В частности, данные измерений должны позволять дистанционно оценивать вертикальные профили скорости ветра V , структурной постоянной флуктуаций скорости ветра C_V^2 , C_N^2 , зависящей от C_V^2 , а также интегральной величины – параметра Фрида.

Знание этих параметров турбулентности необходимо, с одной стороны, для диагностики и прогнозирования оптической турбулентности во время проведения астрофизических наблюдений, с другой – для оптимизации системы адаптивной оптики, а также методов детектирования и коррекции искажений.

Трудность перехода к размерным характеристикам турбулентности во многом связана с появлением отрицательных коэффициентов кросс-корреляции

мелкомасштабных искажений волновых фронтов в скрещенных оптических пучках на разных высотах в атмосфере. Поэтому при определении вертикальных профилей турбулентности в скрещенных оптических пучках приходится рассматривать только положительные коэффициенты кросс-корреляции.

Для определения вертикальных профилей размерных энергетических характеристик турбулентности, в частности вертикальных профилей C_N^2 , мы предлагаем метод, алгоритм которого включает следующие шаги:

1. Регистрация искажений волнового фронта с помощью датчика волнового фронта Шэка–Гартмана по данным наблюдений структур солнечной фотосферы или хромосферы.

2. Определение смещений центров тяжести каждого источника света в пределах каждой субапертуры датчика Шэка–Гартмана. В качестве объектов наблюдения обычно выступают солнечные поры, пятна и их детали, край Солнца, при хороших астроклиматических условиях – мелкомасштабная солнечная грануляция.

3. Определение угловых расстояний между источниками света в пределах каждой субапертуры и расчет высот турбулентных слоев, соответствующих этим расстояниям, согласно формуле

$$z = \frac{D}{n\theta(\delta t)} \cos\alpha, \quad (3)$$

где D – диаметр апертуры телескопа; n – количество субапертур датчика Шэка–Гартмана вдоль выбранного направления; θ – угол между опорным и смещенным источниками света, изменяющийся вследствие суточного движения Солнца; α – зенитный угол Солнца; δt – значение временного сдвига, пропорциональное угловому смещению объекта, за который оцениваются коэффициенты кросс-ковариации. Учет угла α позволяет определить вертикальные профили C_N^2 по профилям характеристик оптических искажений по лучу зрения астрономического телескопа.

4. Расчет пространственно-временных кросс-корреляционных функций смещений центров тяжести для разных высот турбулентных слоев атмосферы

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

где $s_{i, j}(t_0)$ – опорный фрагмент временного ряда смещений центров тяжести субизображений длиной w на опорной субапертуре; $s_{i+\delta i, j+\delta j}(t_0 + \delta t)$ – фрагменты временного ряда смещений центров тяжести субизображений длиной w на субапертуре, сдвинутой относительно опорной в последующие моменты времени; $O(\delta i, \delta j)$ – полное количество всех субапертур. Фактически для восстановления вертикальных профилей турбулентности мы анализируем в скрещенных

оптических пучках низкочастотные составляющие смещений центров тяжести изображений, наименее изменчивые во времени. Это новый шаг на пути развития дистанционных методов измерений.

5. Определение вертикальных профилей размерной характеристики оптической турбулентности C_N^2 ($\text{м}^{-2/3}$) выполняется с учетом выражений (3)–(7).

Выражение (5) устанавливает связь между вертикальным профилем $C_N^2(z)$ и отношением пространственно-временной кросс-корреляционной функции смещений центров тяжести к автокорреляционной функции:

$$C_N^2(z) \sim c_n(z) \sim \tilde{F} \frac{F(R_0(z)C(i, j, z, \theta, \delta t, w))}{F(A(i, j, z, \delta t))}, \quad (5)$$

где $A(i, j, z, \delta t)$ – автокорреляционная функция смещений центров тяжести субизображения во время проведения наблюдений, определяемая нами для опорной субапертуры датчика волнового фронта; $R_0(z)$ – эмпирическая функция для фильтрации низкочастотных изменений. Безразмерный параметр c_n (в относительных единицах) отражает интенсивность атмосферной турбулентности, наиболее развитой в пограничном слое. Существенный вклад в вертикальный профиль $c_n(z)$ вносит форма автокорреляционной функции, которая меняется от субапертуры к субапертуре. Опорная субапертура выбирается нами по наибольшему значению суммарного по всем высотам c_n .

Модифицированный метод определения усредненных размерных характеристик турбулентности

Для определения вертикальных профилей C_N^2 мы предлагаем разработать метод с учетом связи между усредненным по статистическому ансамблю состояний вертикальным профилем пространственно-временной кросс-корреляционной функции смещений центров тяжести и характерной степенной зависимостью $\langle C_N^2 \rangle$ от высоты z [17]:

$$\begin{aligned} K_p \frac{\langle c_n(z) \rangle}{F(z)} \rightarrow \langle C_N^2(z) \rangle = \\ = \langle C_N^2(z_0) \left(\frac{z}{z_0} \right)^{-2/3} \exp\left(\frac{-z}{z_e} \right) \rangle + q_l, \end{aligned} \quad (6)$$

где знак \rightarrow обозначает, что левая часть выражения должна стремиться к среднему профилю $\langle C_N^2(z) \rangle$;

$q_l = C_N^2 \exp\left(-\left(\frac{z - z_c}{H_c} \right)^2 \right)$, z_c , H_c – высота и вертикаль-

ная мощность турбулентного слоя соответственно; z_e – эффективная высота турбулентности; K_p – коэффициент пропорциональности; $\langle C_N^2(z_0) \rangle$ – усредненное приземное значение структурной постоянной флуктуаций показателя преломления воздуха; q_l определяет отклонения фонового профиля

$\langle C_N^2(z) \rangle$ от усредненной по времени степенной функции $\langle C_N^2(z_0) \left(\frac{z}{z_0} \right)^{-2/3} \exp\left(\frac{-z}{z_e} \right) \rangle$ и позволяет учесть характеристики высотного турбулентного слоя. На рис. 1 приведены фоновые вертикальные профили $\langle C_N^2(z) \rangle$.

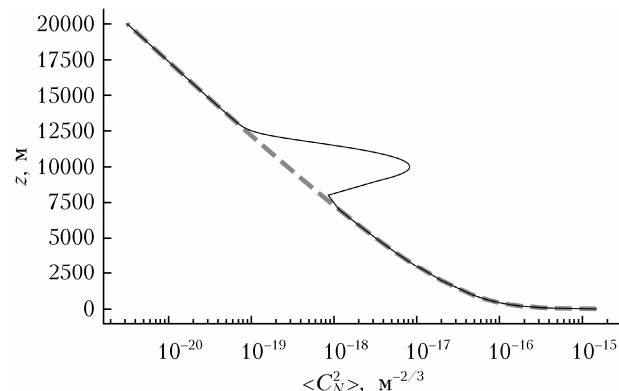


Рис. 1. Фоновые вертикальные профили $\langle C_N^2(z) \rangle$: профили, описываемые первым слагаемым (пунктирная кривая) и суммой двух слагаемых в (6) (чёрная кривая)

Функция $F(z)$ подбирается на основе минимизации разности между усредненным профилем $\langle C_N^2(z) \rangle$ и профилем величины, описываемой левой частью выражения (6).

В практике часто используют гипотезу эргодичности, когда усреднение по статистическому ансамблю состояний заменяется усреднением по времени. Используя эту гипотезу, возможно оценить средние профили структурной постоянной флуктуаций показателя преломления воздуха.

Значения C_N^2 зависят от времени. Учитывая это, для получения репрезентативных значений временной интервал осреднения выбирается исходя из следующих соображений. Во-первых, интервал осреднения не должен быть слишком коротким, для того чтобы полученное среднее значение было репрезентативным и не зависело от времени, а характерный период флуктуаций должен быть много меньше периода осреднения. Во-вторых, период осреднения не должен быть слишком большим, чтобы не сгладились важные изменения и полученное среднее значение оставалось практически постоянным. С физической точки зрения для получения репрезентативных значений структурной постоянной флуктуаций показателя преломления воздуха длительность наблюдений должна составлять не менее 20 мин. Временной интервал длительностью 20 мин практически полностью охватывает так называемый микрометеорологический пик в спектре атмосферной турбулентности. Со статистической точки зрения для достижения вероятности 92% и допустимой статистической ошибки 10% достаточное число наблюдений составляет 76. Это означает, что для репрезентативной оценки 1-минутного среднего значения структурной постоянной флуктуаций показателя преломления воздуха необходимы наблюдения длительностью 76 мин.

Необходимо отметить, что вертикальный профиль структурной постоянной флуктуаций показателя преломления воздуха часто аппроксимируют моделью Hufnagel–Valley [18]:

$$C_N^2(Z) = 8,148 \cdot 10^{-26} V^2 z^{10} \exp(-Z) + 2,7 \cdot 10^{-16} \exp(-Z/1,5) + C_N^2(z_0) \exp(-10Z), \quad (7)$$

где Z – высота (км); V – скорость ветра. В перспективе усредненный профиль $\langle C_N^2(z) \rangle$ по данным измерений датчика волнового фронта может быть получен путем адаптации рассчитываемых величин к модели Hufnagel–Valley с учетом средних вертикальных профилей скорости ветра. В настоящей работе приводится новый метод определения C_N^2 , основанный на усреднении измеряемых вертикальных профилей и адаптации их к известным моделям.

Мы также считаем, что в каждом дискретном слое атмосферы толщиной $\delta z = z_2 - z_1$ выполняется соотношение [11]:

$$\int C_N^2(z) dz = a_t \sum D_{\text{eff}}^{1/3}(z) c_n(z), \quad (8)$$

a_t – коэффициент пропорциональности.

Определенный по данным измерений датчиком Шэка–Гартмана вертикальный профиль $C_N^2(z_0)$ связан с параметром Фрида выражением

$$r_0^{-5/3} = 0,423 k^2 \sec \alpha \int_0^H C_N^2(z_0) dz \quad (9)$$

($k = 2\pi/\lambda$; λ – длина волны света).

В свою очередь, усредненный во времени параметр Фрида $\langle r_0 \rangle$, определяемый путем интегрирования по высоте, должен быть равным с точностью, определяемой верхним пределом интегрирования, параметру $\langle R_0 \rangle$, усредненному по дрожанию субизображений датчика Шэка–Гартмана [4, 19]:

$$\langle R_0 \rangle = (\sigma_{\alpha_1 - \alpha_2}^2)^{-3/5} \times 0,528 \lambda^{6/5} s^{-1/5} (1 - 0,562 (d_s/s)^{-1/3})^{3/5}. \quad (10)$$

Здесь $\sigma_{\alpha_1 - \alpha_2}^2$ – дисперсия разности углов прихода света; s – размер субапертуры датчика; d_s – расстояние между центрами субапертур.

Таким образом, ввиду сложности оценки вертикальных профилей $C_N^2(z)$ за определенные интервалы времени (например, 1–3 мин) по данным наблюдений искажений волнового фронта мы предлагаем физико-статистический подход, основанный на статистическом (многократном) усреднении получаемых вертикальных профилей пространственно-временных кросс-корреляционных функций смещений центров тяжести $C(z, \theta, \delta t, \varpi)$. Можно полагать, что при статистическом усреднении нормированных безразмерных характеристик турбулентности с учетом параметра Фрида статистически усредненный профиль для разных атмосферных условий $\langle C_N^2(z) \rangle$

должен стремиться к зависимости $\langle C_N^2(z) \rangle = \langle C_N^2(z_0) \left(\frac{z}{z_0} \right)^{-2/3} \exp\left(\frac{-z}{z_e} \right) \rangle + q_l$. В дальнейшем накопление данных об искажениях волнового фронта и вертикальных профилях оптической турбулентности для конкретного месторасположения позволит уточнить вид функций q_l и $F(z)$.

Характеристики оптических искажений на разных высотах в атмосфере: данные наблюдений Большого солнечного вакуумного телескопа

Исследования, направленные на разработку методов определения вертикальных профилей оптической турбулентности, проводятся на основе данных наблюдений Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ) Байкальской астрофизической обсерватории. В оптическую схему БСВТ включена система АО, разработаны методы и подходы к определению и коррекции искажений волнового фронта [20–25]. При анализе искажений волнового фронта в качестве источников света использовались данные наблюдений датчика Шэка–Гартмана, работающего по краю Солнца, полученные 28 июня 2018 г. По данным измерений на БСВТ получен вертикальный профиль турбулентной характеристики $c_n(z)$ (рис. 2).

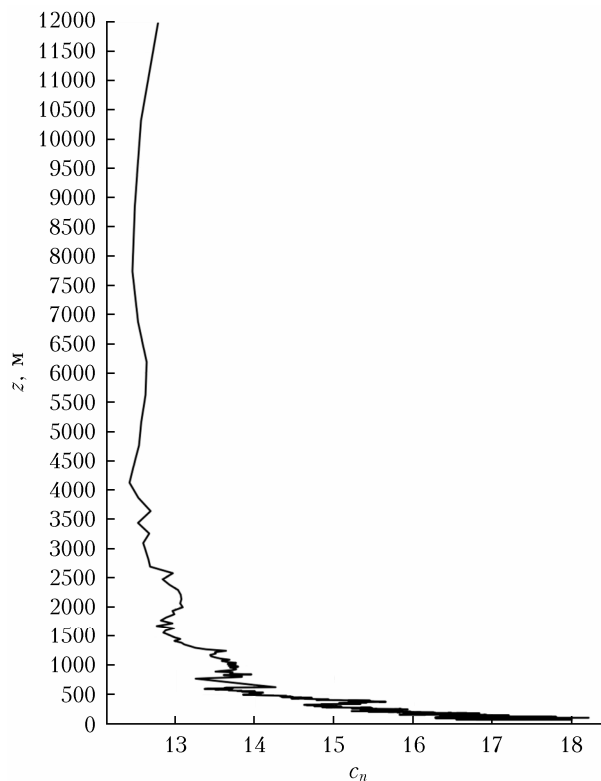


Рис. 2. Вертикальный профиль накопленной амплитуды $c_n(z)$, полученный по данным измерений датчика волнового фронта БСВТ 28 июня 2018 г.

Величина c_n с высотой изменяется в достаточно узком диапазоне значений; c_n преимущественно уменьшается с увеличением высоты над подстилающей поверхностью от 18,4 в приземном слое до 12,7 на высоте 12000 м; C_N^2 на высоте 12000 м уменьшается на 2–4 порядка относительно $C_N^2(z_0)$. Анализ профиля $c_n(z)$ показывает, что слои с повышенной интенсивностью оптической турбулентности наблюдаются в нижней атмосфере — до 3000 м. Амплитуда отклонений c_n в турбулентных слоях от фоновых значений c_n оценивается в несколько процентов.

Используя выражения (6)–(10), мы также оценили вертикальные профили C_N^2 для разных эффективных высот турбулентности (рис. 3).

Помимо оценки вертикальных профилей C_N^2 , предлагаемый метод дает возможность сопоставить эффективную высоту турбулентности и характер изменений структурной постоянной флуктуаций пока-

зателя преломления воздуха с высотой. Рассчитаны профили C_N^2 для эффективных высот турбулентности от 700 до 10000 м. Параметр Фрида определен по данным измерений датчика волнового фронта и составляет 4,96 см для всех приведенных случаев. Значение 10000 м выбрано для того, чтобы показать деформации профиля C_N^2 для некоторого предельного случая. Для $z_e = 10000$ м интенсивность турбулентности слабо меняется с высотой, значение C_N^2 на высоте 10000 м уменьшается чуть больше, чем на порядок. Высотный турбулентный слой слабо выражен. Использование $z_e = 10000$ м противоречит данным наблюдений. Лишь при $z_e = 3000$ м профиль C_N^2 близок к степенной зависимости « $-2/3$ ». При $700 \text{ м} < z_e < 1200 \text{ м}$ значения C_N^2 выше атмосферного пограничного слоя резко уменьшаются. Наилучшее согласие по характеру изменений структурной постоянной флуктуаций показателя

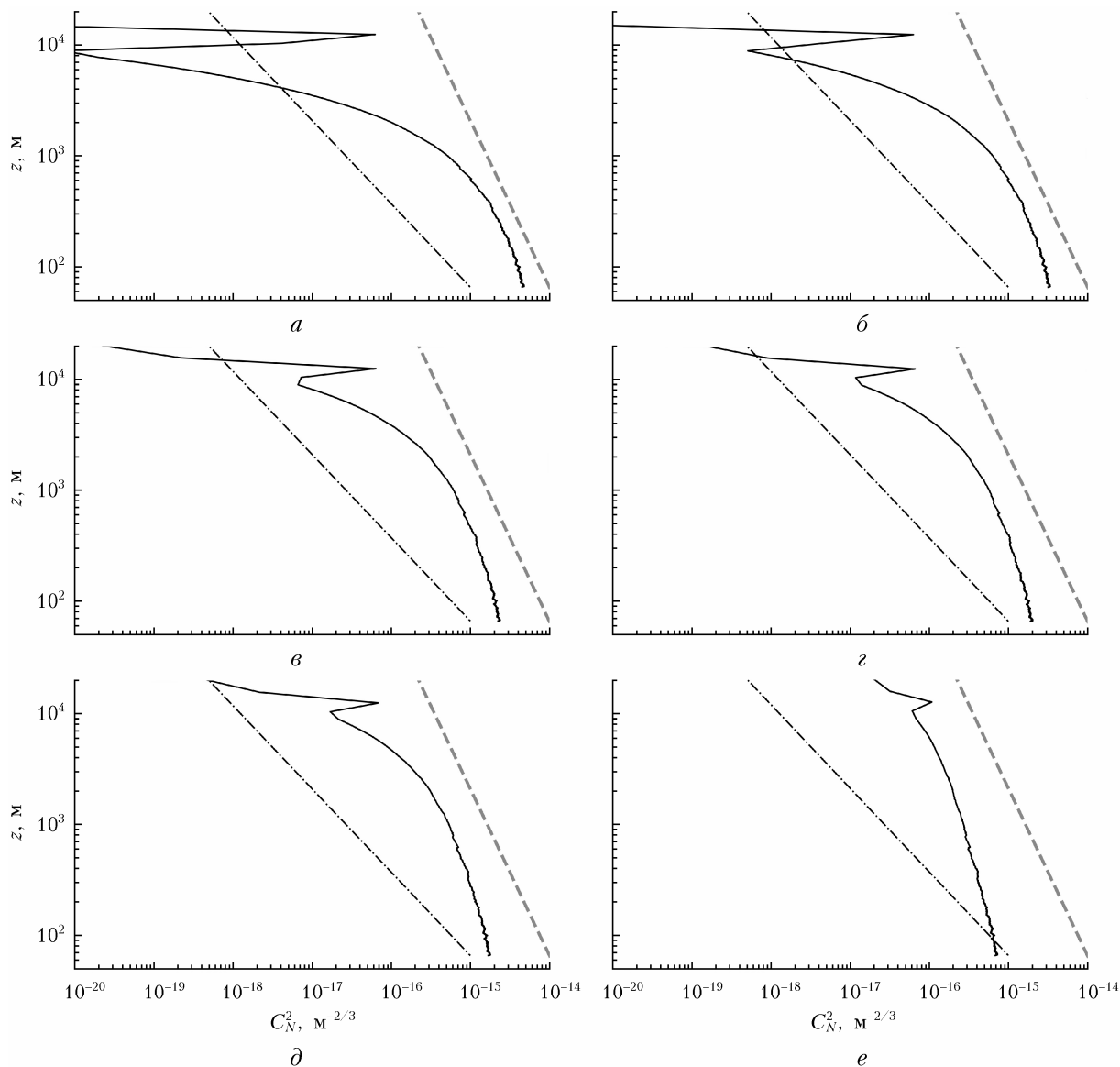


Рис. 3. Вертикальный профиль $C_N^2(z)$ (сплошная кривая) для $z_e = 700$ (а), 1200 (б), 2000 (в), 2520 (г), 3000 (д), 10000 (е); зависимости $C_N^2(z) \sim C_N^2(z_0)z^{-4/3}$ (штрихпунктирная линия) и $C_N^2(z) \sim C_N^2(z_0)z^{-2/3}$ (штриховая линия)

преломления воздуха с высотой наблюдается для высоты ~2000 м. Значение C_N^2 в приземном слое атмосферы близко к данным мачтовых измерений. Отношение энергии высотного атмосферного слоя к энергии приземного слоя является оптимальным. Полученный результат согласуется с оценкой z_e , полученной ранее в месте расположения БСВТ: летом эффективная высота турбулентности составила 2520 м.

Заметим, что оценка эффективной высоты турбулентности выполнялась нами по форме вертикальных профилей, а также с учетом сравнения с приземными значениями $C_N^2(z_0)$. Строго говоря, эффективная высота турбулентности в толще атмосферы определяется следующим образом [26]:

$$z_e = \left(\frac{\int C_N^2(z) z^{5/3} dz}{\int C_N^2(z) dz} \right)^{3/5}. \quad (11)$$

Полученные профили позволили рассчитать эффективную высоту турбулентности для места расположения Байкальской астрофизической обсерватории с учетом выражения (11); из (11) $z_e = 2753$ м. В сравнении с моделируемой эффективной высотой 2000 м оценка, полученная путем интегрирования, завышена. Отклонения оцениваемых высот турбулентности связаны с воздействием высотного турбулентного слоя, который учитывается в модели вертикальных изменений структурной постоянной флуктуаций показателя преломления воздуха аддитивно. Увеличение интенсивности оптической турбулентности в области высотного слоя приводит к значимому возрастанию эффективной высоты турбулентности.

Заключение

Модифицирован способ определения вертикальных профилей размерной характеристики C_N^2 по данным измерений одним датчиком волнового фронта Шэка–Гартмана одного или нескольких разнесенных солнечных источников света. Конечный вид функций, используемых для оценки профилей, определяется тем, что при статистическом усреднении нормированных безразмерных характеристик турбулентности с учетом параметра Фрида фоновый профиль $\langle C_N^2 \rangle$ для разных атмосферных условий стремится к зависимости $\langle C_N^2(z) \rangle = \langle C_N^2(z_0) \left(\frac{z}{z_0} \right)^{-2/3} \exp\left(\frac{-z}{z_e} \right) \rangle$. Это отличает предлагаемый нами способ от известных.

Получены вертикальные профили турбулентных параметров, отражающих изменения интенсивности турбулентности с высотой для места расположения БСВТ. Анализ исходных данных наблюдений показывает, что в пределах нижнего слоя атмосферы находятся слои турбулентности, выраженные в значениях кросс-корреляционных функций центров тяжести субизображений. Флуктуации

показателя преломления воздуха с высотой существенно сглаживаются за счет использования усредненной функции $\langle C_N^2(z) \rangle$.

Выполнено моделирование вертикальных профилей $\langle C_N^2 \rangle$ для разных эффективных высот турбулентности. Установлено, что значение эффективной высоты турбулентности во время проведения эксперимента близко к 2000 м. Результаты исследований, полученные в настоящей работе, а также в [4, 15, 27–29], могут найти применение для Крупного солнечного телескопа КСТ-3, создающегося в рамках мегапроекта «Национальный гелиогеофизический комплекс РАН» [30].

Результаты получены с использованием Уникальной научной установки Большой солнечный вакуумный телескоп (<http://ckp-rf.ru/usu/200615/>). Измерения и анализ формирования искажений волнового фронта выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ. Метод определения размерных характеристик оптической турбулентности разработан в рамках соглашения № 075-15-2021-392.

1. *Odintsov S.L., Gladkikh V.A., Kamardin A.P., Nevzороva I.V.* Determination of the structural characteristic of the refractive index of optical waves in the atmospheric boundary layer with remote acoustic sounding facilities // *Atmosphere*. 2019. V. 711, N 711. DOI: 10.3390/atmos10110711.
2. *Fahey T., Islam M., Gardi A., Sabatini R.* Beam atmospheric propagation modelling for aerospace LIDAR applications // *Atmosphere*. 2021. V. 918, N 12. DOI: 10.3390/atmos12070918.
3. *Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G.* Coherent structures in turbulent atmosphere // *Proc. SPIE*. N 729609. 2008. DOI: 10.1117/12.823804.
4. *Ботыгина Н.Н., Ковadlo П.Г., Копылов Е.А., Лукин В.П., Туев М.В., Шуховцев А.Ю.* Оценка качества астрономического видения в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа по данным оптических и метеорологических измерений // *Оптика атмосф. и океана*. 2013. Т. 26, № 11. С. 942–947; *Botygina N.N., Kopylov E.A., Lukin V.P., Tudev M.V., Kovadlo P.G., Shukhovtsev A.Y.* 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. DOI: 10.1134/S102485601402002X.
5. *Schmidt D., Gorceix N., Goode P.R., Marino J., Rimmele T., Wöger F., Zhang X., Rigaut F., von der Lühе O.* Clear widens the field for observations of the Sun with multi-conjugate adaptive optics // *Astron. Astrophys.* 2017. V. 597. P. L8.
6. *Zhong L., Zhang L., Shi Z., Tian Y., Guo Y., Kong L., Rao X., Bao H., Zhu L., Rao C.* Wide field-of-view, high-resolution Solar observation in combination with ground layer adaptive optics and speckle imaging // *Astron. Astrophys.* 2020. V. 637. P. A99.
7. *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.
8. *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.

9. Ren D., Zhao G., Wang X., Beck C., Broadfoot R. The first solar seeing profile measurement with two apertures and multiple guide regions // *Solar Phys.* 2018. V. 294, N 1. DOI: 10.1007/s11207-018-1389-z.
10. Wang Z., Zhang L., Rao C. Characterizing daytime wind profiles with the wide-field Shack-Hartmann wavefront sensor // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2019. V. 483, N 4. P. 4910–4921. DOI: 10.1093/mnras/sty3417.
11. Wang Z., Zhang L., Kong L., Bao H., Guo Y., Rao X., Zhong L., Zhu L., Rao C. A modified S-DIMM+: Applying additional height grids for characterizing daytime seeing profiles // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2018. V. 478, N 2. P. 1459–1467. DOI: 10.1093/mnras/sty1097.
12. Butterley T., Wilson R.W., Sarazin M. Determination of the profile of atmospheric optical turbulence strength from SLODAR data // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2006. V. 369, N 2. P. 835–845. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2006.10337.x.
13. Vedrenne N., Michau V., Robert C., Conan J.-M. Improvements in C_n^2 profile monitoring with a Shack Hartmann wavefront sensor // *Proc. SPIE.* N 63030C. 2006. DOI: 10.1117/12.680444.
14. Sharmar G.B., van Werkhoven T.I.M. S-DIMM+ height characterization of day-time seeing using solar granulation // *Astron. Astrophys.* 2010. V. 513. P. A25. DOI: 10.1051/0004-6361/200913791.
15. Шиховцев А.Ю., Киселев А.В., Ковадло П.Г., Колобов Д.Ю., Лукин В.П., Томин В.Е. Метод определения высот турбулентных слоев в атмосфере // *Оптика атмосф. и океана.* 2019. Т. 32, № 12. С. 994–1000; Shikhovtsev A.Y., Kiselev A.V., Kovadlo P.G., Kolobov D.Yu., Tomlin V.E., Lukin V.P. Method for estimating the altitudes of atmospheric layers with strong turbulence // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 3. P. 295–301. DOI: 10.1134/S1024856020030100.
16. Fried D.L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures // *J. Opt. Society of America.* 1966. V. 56, iss. 10. P. 1372–1379. DOI: /10.1364/JOSA.56.001372.
17. Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмельцов С.С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 277 с.
18. Ma H., Zhang P., Zhang J., Liu H., Fan C., Qiao C., Zhang W., Li X. A fast calculation method of far-field intensity distribution with point spread function convolution for high energy laser propagation // *Appl. Sci.* 2021. V. 11, N 10. P. 4450. DOI: 10.3390/app11104450.
19. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере / В.И. Татарский. М.: Наука, 1967. 396 с.
20. Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Копылов Е.А., Лукин В.П. Развитие элементной базы для создания системы адаптивной оптики на солнечном телескопе // *Оптика атмосф.и океана.* 2017. Т. 30, № 11. С. 990–997; Botygina N.N., Emaleev O.N., Kopyaev P.A., Kopylov E.A., Lukin V.P. Development of components for adaptive optics systems for solar telescopes // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 2. P. 216–223.
21. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Ковадло П.Г., Коняев П.А., Лукин В.П., Петров А.М., Янков А.П. Адаптивная оптическая система с корреляционным датчиком смещения // *Оптика атмосф. и океана.* 2002. Т. 15, № 11. С. 1027–1030.
22. Botygina N.N., Emaleev O.N., Kopyaev P.A., Kopylov E.A., Lukin V.P. Development of elements for an adaptive optics system for solar telescope // *J. Appl. Remote Sens.* 2018. V. 12, N 4. P. 042403. DOI: 10.1117/1.JRS.12.042403.
23. Лукин В.П., Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Григорьев В.М., Коняев П.А., Ковадло П.Г., Скоморовский В.И., Янков А.П. Адаптивная оптическая система для солнечного наземного телескопа // *Оптич. журн.* 2006. Т. 73, № 3. С. 55–60.
24. Больбасова Л.А., Грицута А.Н., Лукин В.П. Датчик волнового фронта Шэка–Гартмана для работы в широком диапазоне изменения характеристик атмосферной турбулентности // IX Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике: Сб. науч. тр. 2020. С. 215–216.
25. Кучеренко М.А., Лавринов В.В., Лавринова Л.Н. Реконструкция искаженной атмосферной турбулентностью волнового фронта с учетом оптической схемы телескопа // *Автометрия.* 2019. Т. 55, № 6. С. 117–125. DOI: 10.15372/AUT20190615.
26. Tyson R.K. Topics in adaptive optics. InTech, 2012. 254 p.
27. Больбасова Л.А., Лукин В.П. Исследования атмосферы для задач адаптивной оптики // *Оптика атмосф. и океана.* 2021. Т. 34, № 4. С. 254–271. DOI: 10.15372/AOO20210403.
28. Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Практические рекомендации по выбору мест размещения наземных астрономических телескопов // *Солнечно-земная физика.* 2011. В. 18. С. 86–97.
29. Ковадло П.Г., Шиховцев А.Ю., Копылов Е.А., Киселев А.В., Русских И.В. Исследование оптических атмосферных искажений по данным измерений датчика волнового фронта // *Изв. вузов. Физика.* 2020. Т. 63, № 11. С. 109–114. DOI: 10.17223/00213411/63/11/109.
30. Григорьев В.М., Демидов М.Л., Колобов Д.Ю., Пуляев В.А., Скоморовский В.И., Чупраков С.А. Проект Крупного солнечного телескопа с диаметром зеркала 3 м // *Солнечно-земная физика.* 2020. Т. 6, № 2. С. 19–36. DOI: 10.12737/szf-62202002.

A.Yu. Shikhovtsev. Method for estimation of optical turbulence parameters along line of sight of an astronomical telescope.

The modified method for retrieving the altitude profiles of the optical turbulence parameters is described. The altitude profiles of the dimensionless turbulent parameter and the structural constant of the air refractive index fluctuations are retrieved from the analysis of the Large Solar Vacuum Telescope data. The optical turbulence profiles are analyzed. It is found that the effective turbulence altitude is close to 2000 m at the site of the Large Solar Vacuum Telescope.