

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСКАЖЕНИЙ ВОЛНОВОГО ФРОНТА, ФОРМИРУЕМЫХ В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ

А.Ю. Шиховцев, А.В. Киселев, П.Г. Ковadlo, И.В. Русских

Институт солнечно земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
Ashikhovtsev@iszf.irk.ru

STUDYING WAVEFRONT DISTORTIONS FORMED IN TURBULENT ATMOSPHERE

A.Yu. Shikhovtsev, A.V. Kiselev, P.G. Kovadlo, I.V. Russkih

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia
Ashikhovtsev@iszf.irk.ru

Аннотация. В работе приведены результаты исследований искажений волнового фронта в поле зрения каждой из разнесенных субапертур. Рассмотрен сценарий формирования волнового фронта в широком поле зрения. Показано, что искажения волнового фронта в широком поле зрения изменяются согласованным друг с другом образом. Коррелированность смещений центров тяжести положений края солнечного изображения сохраняется в пределах всего рассмотренного поля зрения.

Ключевые слова: телескоп, волновой фронт, поле зрения.

Abstract. The paper presents the results of studies of wavefront distortions in the field of view of each of the spaced subapertures. The scenario of formation of wavefront in a wide field of view is considered. It is shown that the wavefront distortions in a wide field of view change consistent with each other. The correlation of the displacements of the centers of gravity of the positions of the edge of the solar image is preserved within the total field of view.

Keywords: telescope, wavefront, field of view.

ВВЕДЕНИЕ

В задачах атмосферной и адаптивной оптики важнейшим аспектом является исследование искажений волнового фронта в широком поле зрения. Результаты, полученные в ходе решений этой задачи, в том числе, важны в целях совершенствования методов коррекции изображений в адаптивных оптических системах с одним деформируемым (многоэлементным) зеркалом.

В настоящей работе поставлена задача выявить особенности в формировании искажений волнового фронта в поле зрения, превышающим характерные значения изопланатического угла атмосферной толщи. Стоит заметить, что для большинства астрономических обсерваторий средние значения изопланатического угла для длины волны излучения 0.5 мкм изменяется в пределах 1–4 угл. сек. [Shikhovtsev, 2018]. В этой связи необходимо анализировать искажения волнового фронта в поле зрения, превышающим приведенные значения изопланатического угла.

ДАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЙ И МЕТОДЫ

Для выявления особенностей в формировании искажений волнового фронта, вызванных атмосферной и павильонной турбулентностью, были использованы данные измерений датчика Шака-Гартмана, установленного в оптической схеме Большого солнечного вакуумного телескопа. В качестве объекта исследований было выбрано изображение края солнечного диска, анализ дрожания которого позволяет определить смещения отдельных фрагментов изображения края солнечного диска, разнесенных друг от друга на разные углы. В измерениях волнового фронта поле зрения каждой субапертуры составляло 38 угл. сек.

С целью нахождения закономерностей формирования искажений волнового фронта, формируемых на разном удалении от апертуры телескопа, был

проведен пространственный кросскорреляционный анализ локальных наклонов в субапертурах, разнесенных на заданное расстояние. На первом шаге по данным измерений датчика Шака-Гартмана падающий на апертуру телескопа волновой фронт позиционно анализировался на отдельных участках апертуры телескопа. Были определены локальные наклоны волнового фронта для каждой субапертуры и момента времени для всей временной реализации. Для определения локальных наклонов были использованы подходы, развитые в работах [Ботыгина, 2013].

Для определения согласованности изменений искажений волнового фронта были выполнены расчеты пространственных кросскорреляционных функций дрожания отдельных фрагментов изображения края солнечного диска. На рис. 1 показаны субапертуры датчика волнового фронта Шака-Гартмана, выбранные в линии для анализа оптических искажений на разном пространственном разnose.

В качестве примера приведены два изображения одного и того же участка солнечного края. Горизонтальными линиями условно показаны срезы, вдоль которых оценивалось смещение изображения края солнечного диска. Расчеты пространственных кросскорреляционных функций дрожания отдельных фрагментов изображения края солнечного диска $C(\delta,$

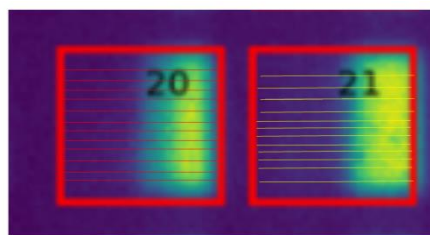


Рис. 1. Субапертуры датчика волнового фронта Шака-Гартмана, выбранные в линии для анализа оптических искажений на разном пространственном разnose

$\delta i, \delta j$) выполнялись дифференциальным способом по формуле:

$$C(\delta, \delta i, \delta j) = \left\langle \left(s_{p_0}(i, j) - s_{p_0}(i + \delta i, j + \delta j) \right) \times \left(s_{p_0 + \delta}(i, j) \right) \left(s_{p_0 + \delta}(i + \delta i, j + \delta j) \right) \right\rangle, \quad (1)$$

где δ — угловое расстояние между выбранной парой пикселей вдоль края изображения солнечного диска, индексами i и j обозначены субапертуры датчика, δi и δj — расстояния между выбранными субапертурами соответственно вдоль двух взаимноперпендикулярных осей расположения датчика, s — локальные наклоны волнового фронта, индексом p_0 обозначено положение опорного пикселя вдоль края солнечного диска, $\langle \rangle$ — временное усреднение по реализации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ИСКАЖЕНИЙ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

С использованием формулы (1) были получены пространственные кросскорреляционные функции дрожания отдельных фрагментов изображения края солнечного диска, разнесенных в пространстве на некоторый угол. Примеры пространственных кросскорреляционных функции, рассчитанных по данным измерений дрожания отдельных фрагментов изображения края солнечного диска (попиксельно) в адаптивной оптической системе Большого солнечного вакуумного телескопа показаны на рис. 2.

По оси абсцисс показаны угловые расстояния между выбранной парой пикселей вдоль края изображения солнечного диска δ , по оси ординат — рассчитанные пространственных кросскорреляционные функции. При расчета пространственных кросскорреляционных функций с целью минимизации влияния близких субапертур были использованы наиболее удаленные друг от друга. Анализ рис. 2 показывает, что во всем поле зрения коэффициентов пространственной кросскорреляции хоть и уменьшаются примерно на 0.3, но остаются на высоком уровне >0.7 . При этом наибольшее убывание характерно для области малых углов. Существенные отклонения пространственных кросскорреляционных функций наблюдаются при 1.5 угл. сек. и в области между 12–25 угл. сек.

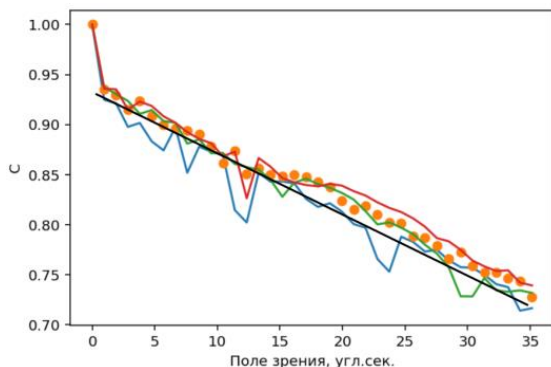


Рис. 2. Примеры пространственных кросскорреляционных функции, рассчитанных по данным измерений дрожания отдельных фрагментов изображения края солнечного диска. Разные кривые соответствуют разным субапертурам. Радиус Фрида 4.95 см

Для оценки амплитуд искажений волнового фронта необходима информация о зависимостях пространственных кросскорреляционных функций от изопланатического угла и радиуса Фрида. Для нахождения зависимостей пространственных кросскорреляционных функций от изопланатического угла и радиуса Фрида рассмотрены случаи с изменяющимися осредненными значениями радиуса Фрида. На рис. 3 показаны примеры изменений пространственных кросскорреляционных функции, рассчитанных по данным измерений дрожания отдельных фрагментов изображения края солнечного диска в адаптивной оптической системе Большого солнечного вакуумного телескопа для радиуса Фрида 3.8 см. В целом в поле зрения, ограниченным 38 угл.сек. значения коэффициентов кросскорреляции высоки.

При слабой турбулентности, характеризующейся большими значениями радиуса Фрида Пространственные кросскорреляционные функции, рассчитанные по данным измерений дрожания отдельных фрагментов изображения края солнечного диска показаны на рис. 4.

Анализ пространственных кросскорреляционных функции, рассчитанных по данным измерений дрожания отдельных фрагментов изображения края солнечного диска, показывает, что с увеличением поля зрения пространственные кросскорреляционные коэффициенты уменьшаются при больших значениях радиуса Фрида. Вероятно, это связано с тем, что при больших значениях радиуса Фрида, структура турбулентности становится перемежаемой. Такой характер изменений пространственных кросскорреляционных функций, усредненных во времени, связан с тем, что на формирование искажение волнового фронта в широком поле зрения влияют атмосферные турбулентные слои, располагающиеся на разных высотах, а форма волнового фронта в широком поле зрения зависит не только от радиуса Фрида, но и от изопланатического угла, который приводит к апланатизму оптической системы телескопа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, структура солнечного изображения и распределение искажений волнового фронта по субапертурам датчика Шака-Гартмана существенно

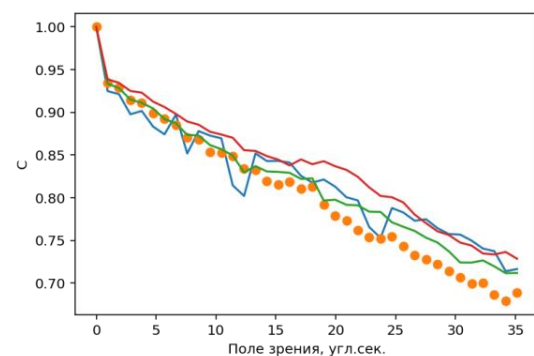


Рис. 3. Примеры пространственных кросскорреляционных функции, рассчитанных по данным измерений дрожания отдельных фрагментов изображения края солнечного диска. Разные кривые соответствуют разным субапертурам. Радиус Фрида 3.8 см

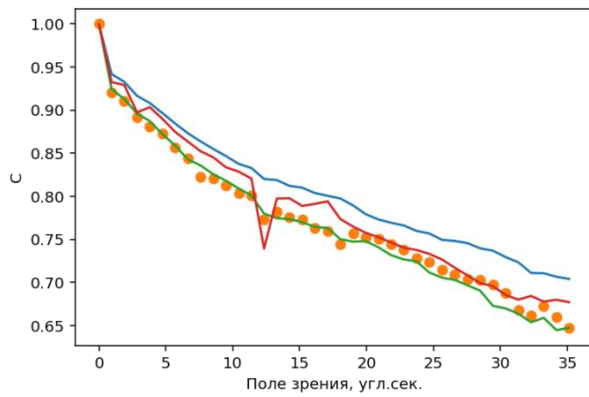


Рис. 4. Примеры пространственных кросскорреляционных функции, рассчитанных по данным измерений дрожания отдельных фрагментов изображения края солнечного диска. Радиус Фрида 5.8 см

искажаются во времени. Характер изменений пространственных кросскорреляционных функций локальных наклонов волновых фронтов от разнесенных фрагментов на разные углы, указывает на то, что оптические искажения формируются на апертуре телескопа не случайным образом. В отдельные интервалы времени наблюдается синхронный отклик в дрожании отдельных фрагментов изображения края.

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук МК-227.2019.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

Shikhovtsev A.Yu., Kovadlo P.G., Kiselev A.V., et al. Variations of the height optical turbulence profiles at the Baikal Astrophysical Observatory and the features of its deformations in latitudinal direction // Proc. SPIE. 2018. С. 6.