

ИЗМЕРЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКА ШЭКА—ГАРТМАНА

А.Ю. Шиховцев, А.В. Киселев, Д.Ю. Колобов, И.В. Русских

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

MEASUREMENTS OF VERTICAL PROFILES OF ATMOSPHERIC TURBULENCE USING SHACK–HARTMANN SENSOR

A.Yu. Shikhovtsev, A.V. Kiselev, D.Yu. Kolobov, I.V. Russkikh

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

Аннотация. В работе приведены результаты восстановления вертикальных профилей характеристик микротурбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха в атмосферном пограничном слое, определенных по данным наблюдений субизображений солнечной фотосферы. Для восстановления вертикальных профилей микротурбулентных характеристик применяется триангуляция мелкомасштабных искажений волновых фронтов, регистрируемых на разнесенных в плоскости апертуры телескопа разных фрагментах изображений солнечной фотосферы. Показано, что составляющие мелкомасштабных искажений волновых фронтов, которые формируются под воздействием турбулентности в атмосферном слое на некоторой высоте, изменяются синхронно на участках апертуры телескопа, разнесенных на расстояние, пропорциональное высоте этого слоя. По данным наблюдений на Большом солнечном вакуумном телескопе получены вертикальные профили характеристик микротурбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха.

Ключевые слова: телескоп, волновой фронт, качество изображения.

Abstract. This paper presents the results of reconstructing the vertical profiles of characteristics of microturbulent fluctuations of the air refractive index in the atmospheric boundary layer, which were determined from observations of subimages of the solar photosphere. To reconstruct the vertical profiles of the microturbulent characteristics, we use triangulation of small-scale distortions of the wavefronts recorded by different fragments of images of the solar photosphere spaced in the plane of the telescope aperture. It is shown that the components of small-scale distortions of wavefronts, which are formed under the influence of turbulence in the atmospheric layer at a height, change synchronously in the areas of the telescope aperture, separated by the distance proportional to the height of this layer. Vertical profiles of characteristics of microturbulent fluctuations in the air refractive index are obtained from observations at the Large Solar Vacuum Telescope.

Keywords: telescope, wavefront, image quality.

ВВЕДЕНИЕ

В основе исследований воздействия Солнца на процессы в земной атмосфере лежит информация о природе явлений на Солнце в широком диапазоне пространственных масштабов, включая наименьшие из них. Изучение физических процессов и явлений на Солнце указывает на высокую значимость энергетического обмена на малых пространственных масштабах в фотосфере, хромосфере, а также в короне Солнца, недоступных для непосредственного наблюдения с существовавшими до недавнего времени телескопами, даже крупнейшими.

Для решения фундаментальных задач, связанных с наблюдениями наиболее мелкомасштабной структуры солнечной атмосферы, сегодня разрабатываются все более крупные, технически сложные солнечные телескопы наземного базирования. Наиболее известными среди них являются 4-метровые телескопы DKIST в США и EST в Европе. В России, начиная с 2013 г., ведется разработка одного из самых больших солнечных телескопов в мире — Крупного солнечного телескопа с диаметром питающего зеркала 3 м, который должен стать составной частью Национального гелиогеофизического комплекса РАН [Григорьев, 2020].

Астрономические телескопы РФ, включая Крупный солнечный телескоп, сегодня рассматриваются как инструменты, которые будут оснащены системами адаптивной оптики (АО), позволяющей улучшать ка-

чество астрономических изображений, а в ряде случаев, при отличных астроклиматических условиях (2–5 % наблюдательного времени), достичь высоких «осевых» значений параметра Штреля в пределах поля зрения 1–4 угл. сек. [Антошкин и др., 2002; Лукин и др., 2011].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Работа направлена на расширение представлений об особенностях формирования турбулентных искажений волновых фронтов в широком поле зрения в плоскости апертуры телескопа от разнесенных источников света при прохождении одной или более турбулентных областей, удаленных от апертуры на разные расстояния. При распространении излучения от Солнца в турбулентной земной атмосфере волновой фронт искажается за счет флуктуаций плотности воздуха по лучу зрения [Носов и др., 2012; Ботыгина и др., 2013]. Атмосферные турбулентные слои, располагающиеся на разных высотах, определенным образом влияют на формирование искажений волнового фронта, падающего на апертуру телескопа, от каждого источника зрения. Параметры регистрируемых волновых фронтов в плоскости апертуры, в том числе полученные с помощью триангуляции искажений в скрепленных оптических пучках, определяются: а) интегральной интенсивностью атмосферной турбулентности; б) пространственными масштабами турбулентности; в) интенсивностью

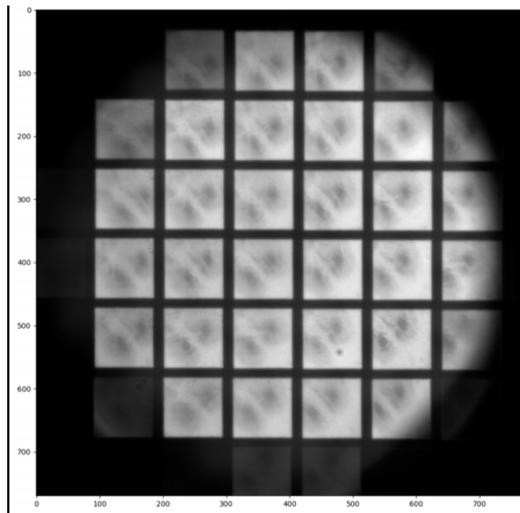


Рис. 1. Гартманограмма, полученная на основе наблюдений на Большом солнечном вакуумном телескопе

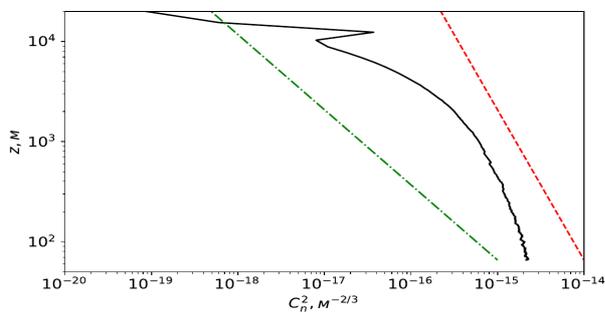


Рис. 2. Вертикальный профиль оптической турбулентности, полученный по наблюдениям на Большом солнечном вакуумном телескопе

турбулентности в исследуемом слое; г) соотношением между интенсивностью турбулентности «до» и «после» области перекрещивания световых пучков.

При восстановлении вертикальных профилей оптической турбулентности мы используем данные измерений, выполненных с помощью датчика волнового фронта (гартманограмма, полученная на основе наблюдений на Большом солнечном вакуумном телескопе, показана на рис. 1).

Для восстановления вертикальных профилей оптической турбулентности мы применяли метод, описанный в работе [Шиховцев и др., 2019]. Результат восстановления показан на рис. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе показано, что метод измерений когерентной части изменений искажений волнового фронта может быть успешно применен в восстановлении вертикальных профилей турбулентности.

Результаты получены с использованием Уникальной научной установки Большой солнечный вакуумный телескоп [<http://ckp-rf.ru/usu/200615>]. Измерения выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России. Анализ волнового фронта выполнен при поддержке гранта МК-444.2021.4, 075-15-2021-392.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Григорьев В.М., Демидов М.Л., Колобов Д.Ю. и др. Проект Крупного солнечного телескопа с диаметром зеркала 3 м. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 2. С. 19–36.
- Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н. и др. Адаптивная оптическая система с корреляционным датчиком смещения. *Оптика атмосферы и океана*. 2002. Т. 15, № 11. С. 1027–1030.
- Лукин В.П., Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н. и др. Развитие элементов адаптивной оптики для солнечного телескопа. *Оптика атмосферы и океана*. 2011. Т. 24, № 12. С. 1099–1104.
- 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.
- Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г. и др. Флуктуации астрономических изображений в когерентной турбулентности. *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2012. Т. 55, № 9-2, С. 223–224.
- Шиховцев А.Ю., Киселев А.В., Ковадло П.Г. и др. Метод определения высот турбулентных слоев в атмосфере. *Оптика атмосферы и океана*. 2019. Т.32, № 12. С. 994–1000.
URL: <http://ckp-rf.ru/usu/200615>.