

## АДАПТИВНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ФРАГМЕНТОВ СОЛНЕЧНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА БОЛЬШОМ СОЛНЕЧНОМ ВАКУУМНОМ ТЕЛЕСКОПЕ

<sup>1</sup>Е.Л. Соин, <sup>1,2</sup>Е.А. Копылов

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия  
egorsh@vtomske.ru

<sup>2</sup>Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,  
Шатура, Россия

## ADAPTIVE OPTICAL SYSTEM FOR STABILIZING FRAGMENTS OF SOLAR IMAGES FROM THE LARGE SOLAR VACUUM TELESCOPE

<sup>1</sup>E.L. Soin, <sup>1,2</sup>E.A. Kopylov

<sup>1</sup>V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia  
egorsh@vtomske.ru

<sup>2</sup>ILIT RAS, Branch of the FSRC «Crystallography and Photonics» RAS, Shatura, Russia

**Аннотация.** Представлены результаты испытания системы стабилизации положения фрагмента изображения на лабораторном макете и в адаптивной оптической системе Большого солнечного вакуумного телескопа. Исследование системы стабилизации изображения на лабораторном макете показало, что система эффективно стабилизирует положение фрагмента солнечного изображения до частоты входного сигнала, равного 28 Гц. На частотах выше 36 Гц система переходит в режим с положительной обратной связью. Полученные результаты испытания адаптивной системы стабилизации на Большом солнечном вакуумном телескопе показали, что при хороших атмосферных условиях ( $r_0=3.0$  см) амплитуда колебаний изображения уменьшается в 18 раз.

**Ключевые слова:** астрономический телескоп, изображение, турбулентность, адаптивная коррекция.

**Abstract.** The results of the test of the image fragment position stabilization system on the laboratory model and in the adaptive optical system of the Large solar vacuum telescope are presented. The study of the image stabilization system on the laboratory model showed that the system effectively stabilizes the position of the solar image fragment to an input signal frequency of 28 Hz. At frequencies above 36 Hz, the system switches to positive feedback mode. The results of the adaptive stabilization system on a Large solar vacuum telescope showed that under good atmospheric conditions ( $r_0=3.0$  cm) the amplitude of the image oscillations decreases by 18 times.

**Keywords:** astronomical telescope, image, turbulence, adaptive correction.

Работа посвящена экспериментальному испытанию системы стабилизации положения фрагмента изображения на лабораторном макете и в адаптивной оптической (АО) системе Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ) [Антошкин и др., 2016]. В мире довольно интенсивно разрабатываются системы АО для солнечных астрономических телескопов. Применение систем адаптивной оптики для солнечных астрономических телескопов, по сравнению со звездными, является более сложной задачей. Основные сложности обусловлены более «жесткой» дневной турбулентностью. Создание системы АО для БСВТ представляет собой сложную задачу в связи с тем, что уровень турбулентности в регионе оз. Байкал, где установлен БСВТ, существенно выше, чем в лучших мировых солнечных обсерваториях. Это налагает дополнительные требования на все элементы рабочей системы АО в оптическом тракте телескопа.

Целью работы является исследование характеристик системы стабилизации положения фрагмента солнечного изображения на лабораторном макете и оптической системе Большого солнечного вакуумного телескопа. В качестве элемента, корректирующего волновой фронт, в АО системе БСВТ использовалось управляемое плоское зеркало для стабилизации изображения по углам наклона. Зеркало разработано в лаборатории когерентной и адаптивной

оптики Института оптики атмосферы. От эффективности стабилизации зависит эффективность работы и коррекции более высоких аберраций. Так как вариации наклонов содержат примерно 80 % от общих аберраций волнового фронта. За счет стабилизации наклонов можно повысить разрешающую способность в несколько раз при небольших отношениях  $D/r_0$ .

Для отработки алгоритмов управления плоским зеркалом создан лабораторный макет системы стабилизации изображения адаптивной системы БСВТ (рис. 1).

В качестве источника излучения (1) используется He-NE лазер. Имитатор колебаний (2), создает смещения изображения лазерного пучка по двум координатам и отражаясь от второго управляемого зеркала (3) направляется в объектив (4) цифровой камеры (5). Сигнал с камеры поступает в компьютер (6) для вычисления смещения изображения и формирования сигналов управления, которые подаются на плоское управляемое зеркало (3), компенсируя лазерный пучок. Качество стабилизации изображения оценивалось отношением среднеквадратичных отклонений сигнала смещения изображения, при замкнутом и разомкнутом контуре управления. Границу полосы частот стабилизации определяем отношением выходного сигнала (СКО) к входному, характеризующего ошибку стабилизации изображения, не превышающим уровень 0.7. В соответствии с этим значением, полоса частот подав-

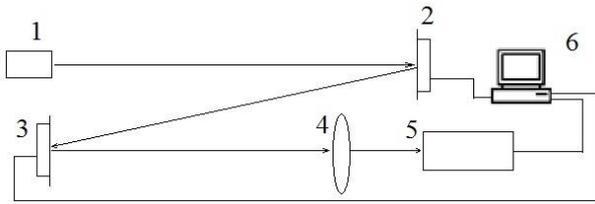


Рис. 1. Лабораторный макет системы стабилизации положения фрагмента изображения солнечного диска Большого солнечного вакуумного телескопа

ления дрожания составила 28 Гц. На частотах выше 36 Гц система переходит в режим с положительной обратной связью.

На (рис. 2, а) показан спектр амплитуд углового смещения изображения при работе имитатора колебаний на 8 Гц. Данное значение соответствует вибрациям сидеростатного зеркала БСВТ при ветровой нагрузке. Так же на (рис. 2, б) приведен спектр с частотой предела эффективности плоского управляемого зеркала 28 Гц. На графиках можно увидеть понижение амплитуды колебания при замкнутом контуре управления. Так же видно, что на низких частотах подавление амплитуды в замкнутом контуре уменьшается более чем на 2 порядка.

Система АО стабилизации положения фрагмента изображения солнечного диска БСВТ представляет собой следящую систему с замкнутым контуром управ-

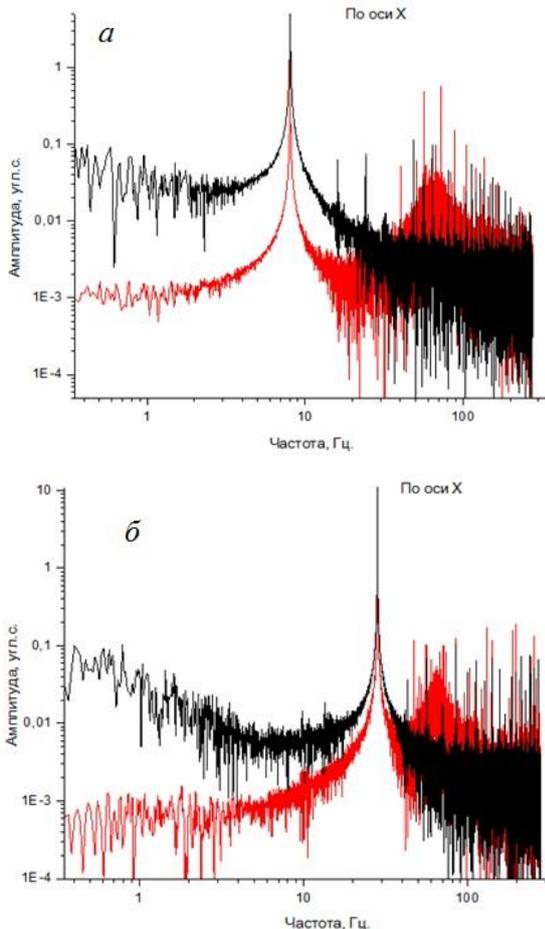


Рис. 2. Спектры амплитуд углового смещения изображения по оси ОХ при замкнутом контуре управления (красные линии) и при разомкнутом контуре управления (черные линии) на стенде

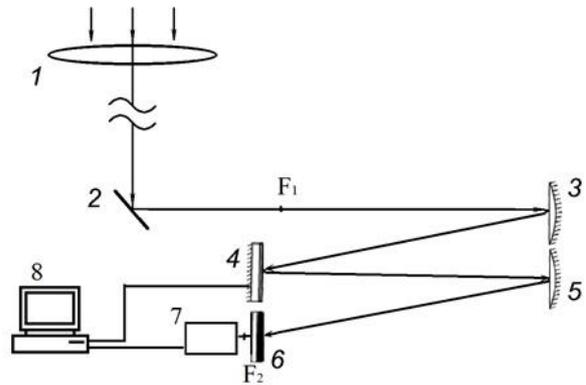


Рис. 3. Адаптивная оптическая система стабилизации положения фрагмента изображения солнечного диска Большого солнечного вакуумного телескопа

ления общими наклонами волнового фронта со скоростной видеокамерой и корректором волнового фронта (рис. 3). Входное излучение от Солнца, попадая на объектив телескопа (1) диаметром 760 мм и фокусом 40 м, формирует изображение Солнца в области первого фокуса  $F_1$ . С помощью диагонального зеркала (2) часть излучения, формирующего изображение Солнца, отводится в адаптивную систему. Коллимирующее зеркало (3) обеспечивает построение изображения выходного зрачка телескопа на плоском управляемом зеркале (4). Система имеет промежуточный второй фокус  $F_2$ , который совпадает с положением плоскости зеркала (6). Изображение из фокальной плоскости  $F_2$  с помощью дополнительной оптической системы переносится на датчик смещения изображения. С датчика поступает сигнал в компьютер (8) для вычисления смещения изображения и формирования сигналов управления, которые подаются на управляемое зеркало (4).

В ноябре 2017 г. проводились испытания системы стабилизации изображения в адаптивной оптической системе БСВТ в различных погодных условиях. Ввиду отсутствия в это время на Солнце пор и пятен адаптивная оптическая система работала по изображению края солнечного диска. На (рис. 4) приведены выборочные результаты испытания.

Из графиков видно, что на низких частотах подавление амплитуды в замкнутом контуре уменьшается на два порядка. При ветре более 5–7 м/с 10.11.2017 в амплитудном спектре смещения изображения (рис. 5, а) наблюдаются колебания на частотах близких к 8 Гц, вызванные вибрациями сидеростатного зеркала, которые при стабилизации изображения ослабляются в 12 раз. Из графика смещения изображения в режиме стабилизации изображения в области I видны сильные выбросы углового смещения изображения, превышающие угловой диапазон зеркала (рис. 5, б).

Полученные соотношения входного сигнала к выходному сигналу, характеризующее эффективность стабилизации изображения, при без ветреной погоде показали, что разработанное управляемое плоское зеркало в адаптивной оптической системе стабилизации изображения позволяет получить уменьшение амплитуды колебания изображения в 12 раз. При силь-

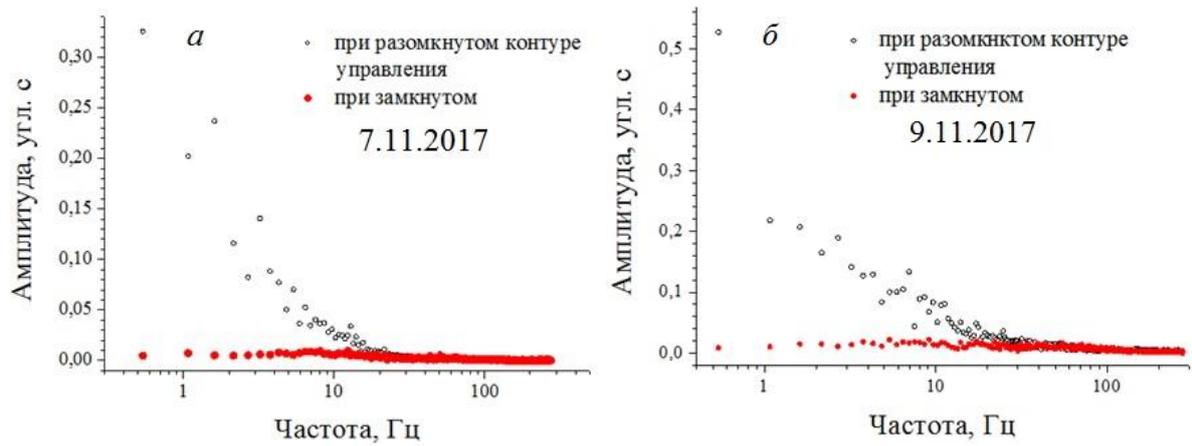


Рис. 4. Амплитудные спектры смещения изображения

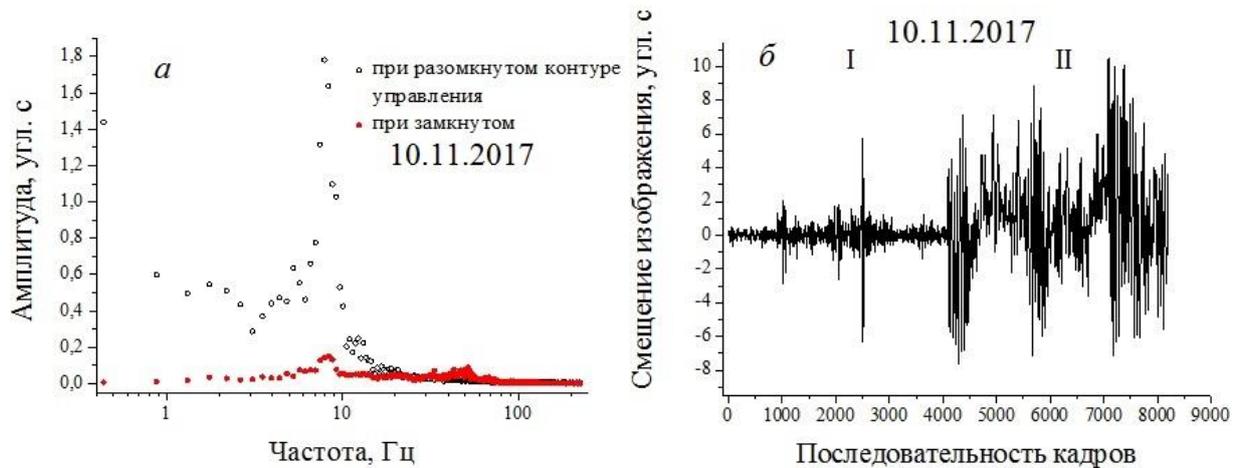


Рис. 5. Результат испытания системы стабилизации при сильном ветре

ном ветре качество стабилизации ухудшается, так как усиливаются вибрации сидеростатного зеркала. Замечено, что при порывах ветра угловые смещения изображения превышают угловой диапазон управляемого плоского зеркала. Следовательно, необходимо увеличение углового диапазона управляемого плоского зеркала для эффективной стабилизации изображения при атмосферных условиях, в которых может работать БСВТ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Больбасова Л.А. и др. Адаптивная оптическая система для солнечного телескопа, обеспечивающая его работоспособность в условиях сильной атмосферной турбулентности // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 11. С. 895–904.