

**ВЛИЯНИЕ ВИНЬЕТИРОВАНИЯ ВХОДНОЙ АПЕРТУРЫ ТЕЛЕСКОПА
НА ОШИБКУ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВОЛНОВОГО ФРОНТА
В АДАПТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ БСВТ**

Е.Л. Соин, Е.А. Копылов

ФГУП Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия
egorsh@vtomske.ru

**INFLUENCE OF VIGNETTING THE ENTRANCE APERTURE
OF THE TELESCOPE ON THE ERROR OF WAVE FRONT RECONSTRUCTION
IN THE LSVT ADAPTIVE OPTICAL SYSTEM**

E.L. Soin, E.A. Kopylov

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

Аннотация. На ранее полученных экспериментальных данных фрагментов солнечных изображений, в виде последовательности кадров с камеры датчика волнового фронта Шэка-Гартмана адаптивной оптической системы БСВТ, проведено исследование искусственного виньетирования матрицы субапертур датчика волнового фронта Шэка-Гартмана, размерностью 8×8 и 12×12 , на точность восстановленного волнового фронта во время работы датчика. Показано, что при виньетировании зрачка телескопа до 30 % ошибка восстановления волнового фронта не превышает величину $\lambda/4$ ($\lambda=535$ нм.). Однако замечено, что величина ошибки сильно влияет от конфигурации области перекрытия. В работе приведены примеры временной развертки первых семи полиномов Цернике (после наклонов) при различных условиях численного эксперимента, а так же представлены результаты СКО волнового фронта в различных условиях численного эксперимента.

Ключевые слова: датчик волнового фронта, виньетирование, восстановление волнового фронта.

Abstract. On previously obtained experimental data of fragments of the solar images in the form of a sequence of frames from the camera of the wavefront sensor a Shack-Hartmann adaptive optics system for LSVT, the study of artificial vignetting matrix subaperture wavefront sensor the shack-Hartmann dimension 8×8 and 12×12 , the accuracy of the recovered wave front during operation of the sensor. It is shown that veniaminovne of the pupil of the telescope to 30 % error recovery, wave front does not exceed the value $\lambda/4$ ($\lambda=535$ nm.). However, it is noticed that the magnitude of the error strongly affects the configuration of the overlap area. The paper presents examples of time-base the first seven Zernike polynomials (after bending) under various conditions of the numerical experiment and presents the results of RMS of the wave front in different conditions of the numerical experiment.

Keywords: wavefront sensor, vignetting, wavefront reconstruction.

Данная работа посвящена анализу функционирования датчика волнового фронта (ДВФ) адаптивной оптической системой (АОС) Большого вакуумного солнечного телескопа (БСВТ) [Антошкин и др., 2016]. При проведении астрономических наблюдений на БСВТ существует необходимость работы на полной апертуре телескопа. Однако в следствии сезонной изменчивости зенитного угла наклона сидеростатного зеркала, размер полного заполнения зрачка имеющего форму эллипса меняется по наименьшей длине от 600мм. до 720 мм. При этом адаптивная система разработана на работу с круговой апертурой 600мм., что позволяет работать в АОС в любое время года. Так как восстановление и последующая коррекция волнового фронта происходит на круге единичного радиуса, то необходимо обеспечивать полное заполнения световой апертуры. В процессе модернизации АОС БСВТ, возникла необходимость работать не только на ограничивающей круговой апертуре телескопа 600 мм., но и без неё на апертуре 720 мм. с эллипсоидной формой пучка на входе. В следствии чего возникла необходимость в проведении исследования влияния искус-

ственного виньетирования входной апертуры на ошибку восстановления волнового фронта, при различных условиях перекрытия апертуры телескопа.

Целью работы является определение влияния виньетирования входной апертуры зрачка в АОС на ошибку восстановления волнового фронта. На ранее полученных экспериментальных данных, в виде последовательности кадров с камеры датчика волнового фронта Шэка-Гартмана, проведено исследование искусственного виньетирования матрицы субапертур датчика волнового фронта Шэка-Гартмана, размерностью 8×8 и 12×12 , на точность восстановленного волнового фронта во время работы датчика. Восстановление волнового фронта производилось в виде ряда коэффициентов при полиномах Цернике. В анализ не включались первые два коэффициента (общие наклоны волнового фронта). Для каждой конфигурации области перекрытия, производилась разложение временного ряда каждого из коэффициентов при полиноме и оценка среднеквадратичного отклонение (СКО) сравнивалась с исходными данными, которые были обработаны без какого либо перекрытия субапертур. Последовательность кадров в виде фильма с ДВФ записывались с частой 300 кадров в секунду.

Длительность реализации составляла 3000 кадров для раstra 8×8 и 6000 кадров для раstra 12×12. На (рис. 1.) представлена качественная картинка работы датчика в различных режимах, а именно — временная развертка 4-го коэффициента полинома Цернике (дефокусировка) при различном виньетировании зрачка телескопа. Для наглядности показаны первые 300 кадров фильма. Для случая с растром размерностью 8×8, кривые практически идентичны с кривой исходных данных. При конфигурации области перекрытия 10 субапертур с краю, кривая существенно выделяется в сравнении с остальными. У раstra размерностью 12×12 получились иные результаты. Практически все кривые конфигураций областей перекрытия повторяют общий тренд исходных данных. Отличились две кривые с конфигурациями перекрытия центральной части ДВФ Шэка-Гартмана в виде одного кольца (это 40 субапертур) и двух колец (68 субапертур). А так же при конфигурациях областей перекрытия 3–5, 8, 9, кривые сместились. Причина данного смещения на данный момент обсуждается.

Количественную оценку можно наблюдать, если посмотреть разность анализируемых полиномов исходных данных и при различных условиях эксперимента. На (рис. 2.) представлена разность данных с перекрытием отдельно 1ой субапертуры с конфигурацией без перекрытия, а также 16 субапертур в центре с конфигурацией без перекрытия, для раstra размерностью 12×12.

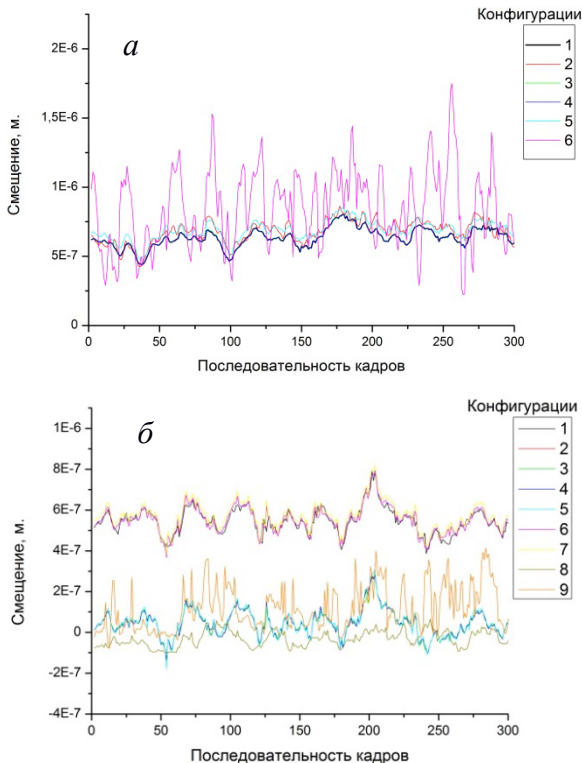


Рис. 1. Временная развертка $C_4 Z_4$ (дефокусировка): (а) — для раstra 8×8. 1 — без перекрытия; 2–4 с краю (8 %); 3–4 в центре (8 %); 4–1 в центре (2 %); 5–16 в центре (30 %); 6–10 с краю (19 %); (б) — для раstra 12×12. 1 — без перекрытия; 2–1 в центре (1 %); 3–4 в центре (3 %); 4–4 с помехами (3 %); 5–4 в центре и 6 с краю (8 %); 6–16 в центре (13 %); 7–24 в центре (20 %); 8–40 кольцом (27 %); 9–68 кольцом (50 %)

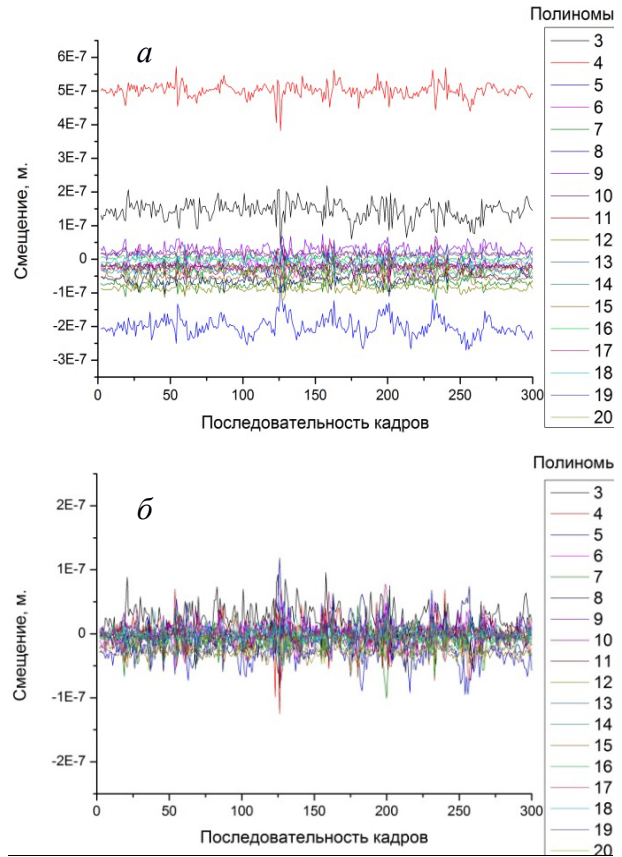


Рис. 2. (а) — разность данных с перекрытием 1-ой субапертуры в центре, с конфигурацией без перекрытия для раstra размерностью 12×12; (б) — разность данных с перекрытием 16-ти субапертур в центре, с конфигурацией без перекрытия для раstra размерностью 12×12

Идеальным случаем в данной ситуации разность должна была давать нулевой результат, но реальная ситуация несколько отличается. Но если при этом задаться допустимым уровнем ошибки при восстановлении ВФ, $\lambda/14$ ($\lambda=535$ нм.), то видно что ситуация тем не менее достаточно неплохая. За допустимый уровень ошибки, как видно из графиков, ни одни из полученных данных не достигают заданного уровня. При этом, наиболее качественные результаты получились при конфигурациях перекрытия, при условии эксперимента соответствующие перекрытию 16-ти и 24-х субапертур в центральной части датчика волнового фронта Шэка-Гартмана.

Было посчитано СКО отклонение волнового фронта (рис. 3) при различных условиях численного эксперимента, первых семи полиномов Цернике (исключая наклоны).

При виньетировании зрачка телескопа до 30 % ошибка восстановления волнового фронта не превышает величину $\lambda/14$ ($\lambda=535$ нм.). Однако замечено, что величина ошибки сильно влияет от конфигурации области перекрытия.

Полученные значения СКО показали, что ошибка восстановления волнового фронта не превышает величину $\lambda/14$ ($\lambda=535$ нм.), во всех рассматриваемых случаях. Замечено, что величина ошибки сильно влияет от конфигурации области перекрытия. Наилучшие результаты восстановления ВФ, соответствовали области перекрытия до 30 % зрачка

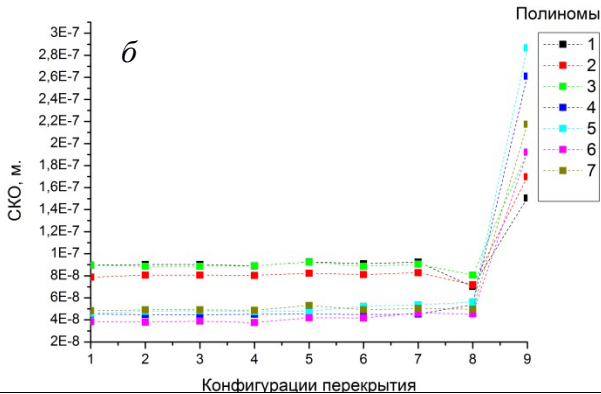
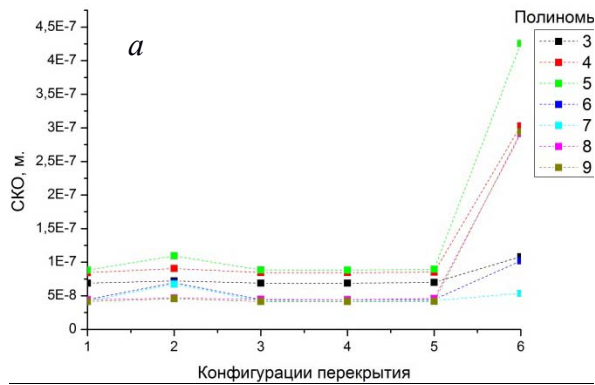


Рис. 3. СКО волнового фронта: (а) — для раstra 8×8. 1 — без перекрытия; 2–4 с краю (8 %); 3–4 в центре (8 %); 4–1 в центре (2 %); 5–16 в центре (30 %); 6–10 с краю (19 %); (б) — для раstra 12×12. 1 – без перекрытия; 2–1 в центре (1 %); 3–4 в центре (3 %); 4–4 с помехами (3 %); 5 – 4 в центре и 6 с краю (8 %); 6–16 в центре (13 %); 7–24 в центре (20 %); 8–40 кольцом (27 %); 9–68 кольцом (50 %)

телескопа для раstra 8×8 и до 27 % для раstra 12×12. При этом область интерпретирования, создающая более качественные результаты, соответствовала центральной области зрачка. Таким образом показано, что возникающее в течении наблюдательного времени области перекрытия входного зрачка не значительно влияют на точность восстановления ВФ в адаптивной оптической системе БСВТ. К таким областям относятся технологические области перекрытия создаваемые размещением термодатчика на объективе телескопа, перекрытие защитной шторкой сидеростатного зеркала.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда грант № 15-19-20013.

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.