

АДАПТИВНАЯ И ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОПТИКА

УДК 520.16, 551.55

Пути развития систем адаптивной оптики для солнечных телескопов наземного базирования

А.Ю. Шиховцев¹, В.П. Лукин², П.Г. Ковадло^{1*}

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а

²Институт оптики атмосферы и океана им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 5.03.2021 г.

Выполнен анализ мультисопряженных адаптивных оптических систем и выявлены особенности сопряжения адаптивных зеркал с турбулентными слоями для солнечных телескопов наземного базирования. Рассчитан оптимальный размер поля зрения для солнечного телескопа, работающего при средних атмосферных условиях, который должен составлять ~10 угл. с. Даны рекомендации по разработке мультисопряженных систем адаптивной оптики для солнечных телескопов наземного базирования. Предложена концепция системы определения 3D-искажений волнового фронта для Крупного солнечного телескопа КСТ-3, а также для контура регистрации фазовых искажений в Большом солнечном вакуумном телескопе.

Ключевые слова: атмосферная турбулентность, волновой фронт, КСТ-3, солнечные изображения, МСАО; atmospheric turbulence, wavefront, LST-3, solar images, MCAO.

Введение

Для повышения качества изображений солнечные телескопы наземного базирования оснащаются системами адаптивной оптики (АО). В классических системах АО используются тип/тилт корректор и одно деформируемое зеркало, сопряженное с плоскостью апертуры телескопа, а также датчик волнового фронта (ДВФ) Шэка–Гартмана. Ограничением для классических систем АО является изопланатический угол атмосферной толщи, который изменяется от 1 до 15 угл. с в видимой части электромагнитного спектра. Эффекты анизопланатизма оказывают существенное влияние на эффективность работы системы АО и распределение параметра Штреля по полю зрения научной камеры [1–3].

Системы АО зарубежных солнечных телескопов наземного базирования часто работают при умеренной или даже слабой интенсивности оптической турбулентности, интегральной по лучу зрения телескопа, когда радиус Фрида превышает 7–8 см для длины волны 0,5 мкм. При слабой турбулентности изопланатический угол возрастает и составляет от 5 до 15 угл. с. В то же время способность коррекции систем АО существенно ограничена при сильной оптической турбулентности, когда характерные значения изопланатического угла уменьшаются до 1–3 угл. с. Такие значения изопланатического угла налагают ограничения на поле зрения ДВФ.

Работа направлена на обобщение результатов исследований искажений волнового фронта и их коррекцию в системах АО крупноапертурных солнечных телескопов. Выполнен анализ систем АО для солнечных телескопов последнего поколения, рассчитан оптимальный размер поля зрения ДВФ. При средних атмосферных условиях он должен составлять ~10 угл. с для мест расположения Байкальской астрофизической обсерватории и Саянской солнечной обсерватории. Для выявления особенностей сопряжения элементов АО с атмосферным турбулентным слоем мы оценили эффективные высоты сопряжения деформируемого зеркала.

Особенности оптического сопряжения адаптивных зеркал с турбулентными слоями в солнечных телескопах

С целью определения эффективности детекции и коррекции турбулентных искажений фазы, регистрируемых в солнечных телескопах, в настоящей работе мы провели анализ систем мультисопряженной адаптивной оптики (МСАО) [4–12]. Основные характеристики систем МСАО на солнечных телескопах описаны в таблице (D – диаметр зрачка).

Одним из первых солнечных телескопов, на котором были применены принципы мультисопряженной адаптивной коррекции, является VTT (Vacuum Tower Telescope) [4]. Система МСАО этого телескопа включает в себя два ДВФ, которые сопряжены с апертурой телескопа, и два деформируемых зеркала. С помощью первого датчика определяют абберации волнового фронта высоких порядков для

* Артем Юрьевич Шиховцев (artempochta2009@rambler.ru), Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru); Павел Гаврилович Ковадло (kovadlo2006@rambler.ru).

Мультисопряженные системы адаптивной оптики для солнечных телескопов

Телескоп	Координаты	D , см	Тип	Особенности мультисистемы
VTT	28°18' 08" с.ш.; 16° 30' 36" з.д.	70	MCAO	2 ДВФ, 2 деформируемых зеркала, сопряженных с апертурой телескопа и уровнем тропопаузы
DST	32°47'14" с.ш.; 105°49'14" з.д.	76	MCAO	3 ДВФ с размером изображений 18 × 18 угл. с в общем поле зрения 1,25 угл. мин, 2 деформируемых зеркала, сопряженных с апертурой телескопа и высотным турбулентным слоем. Оптическое сопряжение выполняется либо с турбулентным слоем на уровне 2,6 км, либо со слоем на уровне 2–10 км
			GLAO	Искажения волнового фронта регистрируются от разнесенных источников света и усредняются. Одно деформируемое зеркало, сопряженное с апертурой телескопа
NST	34°15'30" с.ш.; 116°55'16" з.д.	160	MCAO	2 осевых ДВФ и датчик широкого поля зрения, 19 «опорных звезд», 3 деформируемых зеркала, сопряженных с апертурой телескопа и с атмосферными слоями в диапазоне 2–8 км по лучу зрения
			GLAO	Одно деформируемое зеркало, сопряженное с апертурой телескопа
Gregor	28°18'06" с.ш.; 16°30'39" з.д.	150	MCAO	2 ДВФ 9,6 × 9,6 угл. с и датчик широкого поля зрения, 19 субполей зрения (общее поле зрения 68 × 68 угл. с), тип/тилт корректор и 3 деформируемых зеркала, сопряженных с апертурой телескопа и с атмосферными слоями на высотах 8 и 25 км
NVST	24°34'48" с.ш.; 102°57'01" в.д.	98	GLAO	Датчик широкого поля зрения MD-SHWS с полем зрения 60 × 52 угл. с
DKIST	20°42'17" с.ш.; 156°10'36" з.д.	400	MCAO	9 оптически идентичных ДВФ, каждый из которых работает в пределах своей «опорной звезды» в поле зрения 10 × 10 угл. с

центра поля зрения, с помощью второго — измеряют aberrации волнового фронта низких порядков. Деформируемые зеркала сопряжены с апертурой и атмосферным слоем на высотах от 11 до 14 км.

Экспериментальные работы с системами MCAO также проводились на DST (Dunn Solar Telescope) [5]. Система определения DST использует три датчика Шэка–Гартмана, охватывающих разнесенные «источники» света в широком поле зрения. Каждый датчик работает в пределах 18 угл. с в общем поле зрения 1,25 угл. мин. Деформируемые зеркала сопряжены с апертурой телескопа и высотным турбулентным слоем. На телескопе DST также выполнялись работы с более простой системой, так называемой системой адаптивной оптики приземного слоя (ground layer adaptive optics, GLAO), искажения волнового фронта в которой корректируются одним деформируемым зеркалом, сопряженным с апертурой телескопа. В этой системе искажения волновых фронтов от разнесенных источников света регистрируются с помощью нескольких датчиков Шэка–Гартмана, а затем усредняются. Технику оптического мультисопряжения элементов АО для коррекции солнечных изображений в пределах поля зрения 53 × 53 угл. с успешно применяют на NST (New Solar Telescope) [6]. Экспериментальные работы с адапта-

цией изображений на DST и VTT позволили создать систему определения искажений волнового фронта MCAO Clear на NST, которая включает в себя два «осевых» датчика Шэка–Гартмана, а также ДВФ широкого поля зрения. Применение MCAO Clear существенно увеличивает корректируемое поле зрения при коррекции солнечной грануляции и солнечных пятен для различных атмосферных ситуаций. На NST также проведены эксперименты с GLAO, результаты которых показали, что в сравнении с классической АО качество коррекции в системе GLAO несколько хуже в центре поля зрения, но более однородно по полю зрения. Как предполагают в [6], в большей степени результирующее распределение в широком поле зрения параметра Штреля зависело от деформаций вертикальных профилей оптической турбулентности. Результаты совместной коррекции солнечных изображений с помощью GLAO и спекл-интерферометрии также подробно описаны в [7]. С помощью потенциально перспективной системы GLAO развивают техники атмосферной томографии и корректируют солнечные изображения на NVST (New Vacuum Solar Telescope).

Одной из самых продвинутых систем MCAO является система телескопа Gregor [8]. Система коррекции включает в себя четыре адаптивных зеркала

ла. Для стабилизации изображений в ней присутствует тип/тилт корректор, для «осевой» коррекции аберраций высоких порядков — два деформируемых зеркала, сопряженных с турбулентными слоями на высотах 8 и 25 км. Уровень сопряжения 25 км также выбран и для телескопа EST (European Solar Telescope) с зеркалом диаметром 4 м [9]. В EST для коррекции изображений предполагается использовать до пяти деформируемых зеркал, сопряженных с апертурой и высотами 5, 9, 12, 25 км. А наиболее современной системой оптического мультисопряжения обладает DKIST [10]. Система включает в себя девять оптически идентичных ДВФ, каждый из которых работает в пределах своей «опорной звезды» в узком поле зрения (10×10 угл. с).

Основа алгоритмов определения турбулентных характеристик фазовых искажений в метаэлементах телескопа

Известен метод фазового сопряжения, предусматривающий измерение искажений фазы в плоскости апертуры телескопа или плоскости, сопряженной с турбулентным слоем атмосферы. В классической системе АО фазовые искажения измеряются и корректируются в плоскости апертуры телескопа. В мультисопряженных системах АО каждое деформируемое зеркало оптически сопрягается с разными высотами в атмосфере. С помощью деформируемого зеркала, сопряженного с определенной высотой, корректируют фазовые искажения, формируемые в конкретном турбулентном слое. Такой подход позволяет исправлять искажения волнового фронта последовательно по лучу зрения (в разных атмосферных слоях) и существенно расширять поле зрения с высоким качеством изображения.

В системе МСАО, работающей в широком поле зрения, для измерения характеристик искажений ВФ выше плоскости, сопряженной с апертурой телескопа (в метаэлементах), могут использоваться разные подходы. Среди них можно выделить подход модальной томографии, важнейшим этапом которого является определение специальной, так называемой томографической, матрицы турбулентных искажений волнового фронта \mathbf{T} , формируемых в разных атмосферных слоях. Обычно волновой фронт W в турбулентном слое восстанавливают через томографическую матрицу турбулентных искажений волнового фронта

$$\mathbf{L} = \mathbf{T}\mathbf{W},$$

$$\text{или} \quad \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \dots \\ L_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1M} \\ T_{21} & T_{22} & \dots & T_{2M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{N1} & T_{N2} & \dots & T_{NM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \dots \\ W_M \end{bmatrix},$$

где индексы от 1 до M соответствуют количеству атмосферных турбулентных слоев; индексы от 1

до N соответствуют количеству источников света, используемых для анализа искажений волнового фронта. Матрица \mathbf{W} определяет аберрации волнового фронта, возникающие в турбулентном слое, удаленном на некоторое расстояние от апертуры телескопа. Матрица \mathbf{W} связана с измеряемыми волновыми фронтами, определяемыми по разнесенным источникам света (с матрицей \mathbf{L}) через томографическую матрицу \mathbf{T} . Матрица \mathbf{T} зависит от геометрических параметров системы и ориентации источников, а ее элементы — от произведения полиномов Цернике.

Предложенный подход позволяет определять турбулентные фазовые искажения в метаэлементах телескопа и использовать эту информацию в мультисопряженной коррекции. Однако он также накладывает ограничения на частотные характеристики работы адаптивной системы. Необходимость использования тип/тилт корректора, деформируемого зеркала, сопряженного с апертурой, более двух деформируемых зеркал, сопряженных с турбулентными слоями атмосферы, а также датчиков ВФ широкого поля зрения приводит к возрастанию требований к частотным характеристикам элементов системы АО и программной реализации алгоритмов определения и коррекции фазовых искажений.

Выбор параметров деформируемых зеркал, сопряженных с турбулентным слоем

При построении системы АО, включающей в себя адаптивные зеркала, сопряженные с турбулентными атмосферными слоями, важно знать характеристики (высоты) этих слоев. Выбор параметров деформируемого зеркала, сопряженного с турбулентным слоем, должен определяться радиусом Фрида на высоте слоя. Минимальное количество актюаторов деформируемого зеркала N_0 находится как отношение диаметра апертуры (метаэлемента) D_0 к радиусу Фрида r_0 , соответствующему плоскости сопряжения:

$$N_0 = 0,24(D_0 / r_0)^2.$$

Для оценки радиуса Фрида на разных высотах мы использовали вертикальные профили структурной постоянной флуктуаций показателя преломления воздуха, рассчитанные по данным реанализа NCEP/NCAR [13]. Вертикальные профили радиуса Фрида для зимы и лета в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ) показаны на рис. 1. Значения структурной постоянной флуктуаций показателя преломления воздуха усреднены для слабой турбулентности по первой четверти временных рядов (ранжированных в порядке возрастания) на разных высотах в атмосфере.

Анализ изменений радиуса Фрида с высотой позволяет говорить о том, что суммарные искажения

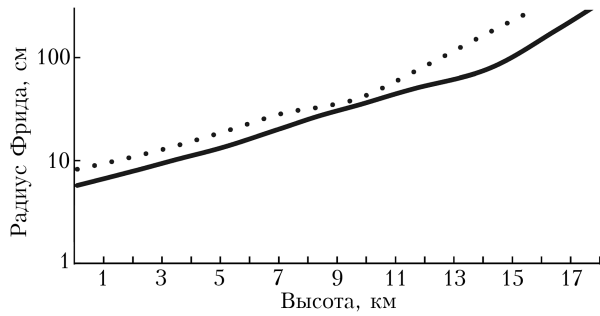


Рис. 1. Вертикальный профиль радиуса Фрида для зимы (сплошная кривая) и лета (точки) в месте расположения БСВТ

волнового фронта существенно возрастают по мере распространения излучения в турбулентной атмосфере. В летний период на высоте 3 км $r_0 = 12,8$ см, в зимний — 9,4 см. Для БСВТ диаметр метазрачка на высоте 3 км для поля зрения 60 угл. с составляет 1,47 м. Минимальное требуемое количество актюаторов для высоты 3 км будет изменяться от 31 ($r_0 = 12,8$ см) до 58 ($r_0 = 9,4$ см).

Стоит заметить, что с увеличением диаметра телескопа высота оптически активного слоя атмосферы возрастает: летом $r_0 = 3$ м на высоте 16 км, зимой — на высоте 18 км. Приведенные оценки высот являются минимальными для анализа структуры искажений волнового фронта для Крупного солнечного телескопа КСТ-3.

Максимальная дистанция турбулентного слоя L_{\max} , с которым может быть сопряжено деформируемое зеркало, должна удовлетворять условию [11]:

$$L_{\max} = 1,75 \frac{d_{\text{act}}}{\theta},$$

где d_{act} — расстояние между актюаторами деформируемого зеркала; θ — диаметр корректируемого поля зрения. Этот критерий определяется из условия равенства классической ошибки подгонки (деформируемое зеркало в слое) и ошибки подгонки (деформируемое зеркало вне слоя). Следовательно, эффективная высота сопряжения деформируемого зеркала $H_{e_{\max}}$ должна определяться удвоенной величиной L_{\max} [11, 12]:

$$H_{e_{\max}} = 2L_{\max}.$$

Для оценки $H_{e_{\max}}$ для БСВТ рассмотрим 50-миллиметровое 79-канальное деформируемое мембранное зеркало. Расстояние между центрами актюаторов — 1,8 мм, что в проекции на апертуру (60 см) составляет 2,16 см при полном заполнении зеркала. При заполнении зеркала, равном 30 мм, расстояние между центрами актюаторов в проекции на апертуру увеличивается до 3,6 см. На рис. 2 приведены высоты оптического сопряжения деформируемого зеркала с турбулентным слоем при разном корректируемом поле зрения; видно, что для коррекции искажений волнового фронта в пределах 30 угл. с максимальные высоты сопряжения

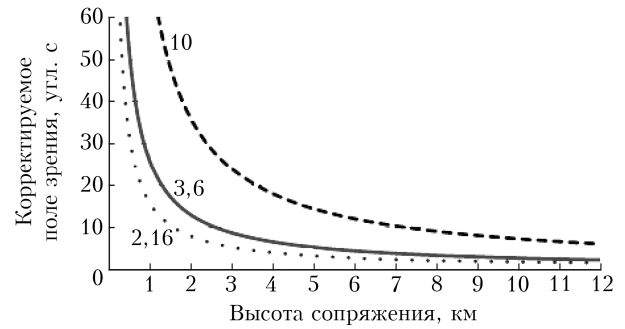


Рис. 2. Высоты оптического сопряжения деформируемого зеркала с турбулентным слоем при разном корректируемом поле зрения; цифры у кривых показывают расстояния между актюаторами

для БСВТ равны 0,5 и 0,9 км. С увеличением расстояния между актюаторами в проекции на апертуру телескопа до 10 см $H_{e_{\max}}$ возрастает до 2,4 км. Для оптического сопряжения с турбулентным слоем на высоте 3 км и коррекции фазовых искажений в пределах 30 угл. с расстояние между актюаторами должно составлять 12,6 см.

Расчет оптимального размера поля зрения для солнечного телескопа, работающего при средних атмосферных условиях

Интенсивность оптической турбулентности уменьшается с высотой. Значения структурной постоянной флуктуаций показателя преломления воздуха с высотой уменьшаются по степенному (или экспоненциальным) законам. Тем не менее на качество изображений влияют турбулентные слои на высотах 20 км и выше. Для определения оптимального поля зрения мы рассчитали временные изменения значений безразмерного среднеквадратического отклонения углов прихода, показанных на рис. 3. Мы моделировали влияние эффектов анизопланатизма на определение искажений волнового фронта при разном поле зрения датчика Шэка—Гартмана. Влияние анизопланатизма оценивалось по среднестатистическому отклонению углов прихода света

$$\sigma_a^2 = \left(\frac{\theta}{\theta_0 + \theta'} \right)^{5/3},$$

где характерное значение угла изопланатизма θ_0 при хороших астроклиматических условиях в месте расположения Саянской солнечной обсерватории принималось равным 3 угл. с; θ' — флуктуации угла в разные моменты времени (для разных кадров).

Мы задавали изменения углов прихода света для разного размера поля зрения датчика ВФ, которые описывались нормальным законом распределения. На рис. 3 приведены расчетные значения безразмерного среднестатистического отклонения углов прихода по кадрам.

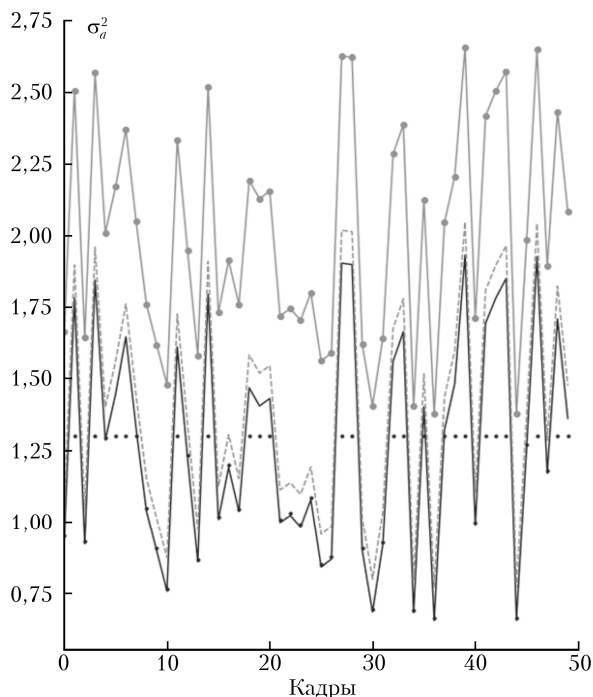


Рис. 3. Расчетные значения безразмерного среднеквадратического отклонения углов прихода по кадрам для поля зрения, равного 30 (серая кривая), 10 (пунктир), 2 угл. с (точки); черная кривая показывает исходный волновой фронт

Анализ рисунка показывает, что с увеличением поля зрения возрастает ошибка анизопланатизма. Получено, что оптимальный размер полного поля зрения составляет ~ 10 угл. с.

С другой стороны, известно, что диаметр метаэричка определяется по выражению [14]:

$$D_m = D + \phi z_L,$$

где ϕ — угловой размер поля зрения в радианах; z_L — высота уровня сопряжения. Диаметр метаэричка растет с высотой и с используемым полем зрения ДВФ, что приводит к увеличению геометрических размеров области перекрещивания оптических пучков и потере чувствительности датчика к верхним турбулентным слоям в методе Slodar. Этот метод использует триангуляцию измеренных мелкомасштабных наклонов волновых фронтов от разнесенных источников света при определении вертикальных профилей. Увеличение метаэричка и возрастание ошибки анизопланатизма приводят к необходимости совместного использования датчика ВФ широкого поля зрения и набора датчиков, работающих в узком поле зрения.

Рекомендации для построения системы определения искажений волнового фронта в солнечных телескопах

Очевидно, что наиболее перспективная система АО для обеспечения работы солнечного телескопа — это система, построенная на принципах оп-

тического мультисопряжения адаптивных зеркал с турбулентными атмосферными слоями, удаленными на различные расстояния от апертуры телескопа. Количество турбулентных слоев, с которыми должны быть сопряжены адаптивные зеркала, выбирается исходя из вертикальных профилей структурной постоянной флуктуаций показателя преломления воздуха, скорости ветра, а также интегрального значения радиуса Фрида. В мировой практике при работе с системами МСАО обычно используют от одного до трех адаптивных зеркал. При этом включение даже одного дополнительного адаптивного зеркала, сопряженного уже не с апертурой телескопа, а с турбулентным слоем, существенно усложняет конечную оптическую схему системы АО.

Результаты исследований нашего коллектива предполагаются в дальнейшем использоваться для КСТ-3, строительство которого запланировано в рамках мегапроекта «Национальный гелиогеофизический комплекс РАН» на территории Саянской солнечной обсерватории [15]. Астроклиматические характеристики места расположения КСТ-3 рассмотрены в [16]. Наиболее близким зарубежным аналогом КСТ-3 является солнечный телескоп DKIST, система АО которого непрерывно улучшается. Особенность системы АО DKIST в том, что вместо ДВФ широкого поля зрения в системе измерений фазовых искажений применяются девять датчиков, работающих в узком поле зрения (~ 10 угл. с). Использование отдельных датчиков позволяет улучшить частотные характеристики системы определения искажений волнового фронта в широком поле зрения и определять его искажения с достаточно высокой точностью.

По данным моделирования, выполненного для DKIST в [10], получены усредненные распределения числа Штреля в случае мультисопряженной коррекции в пределах поля зрения 35×35 угл. с и 60×60 угл. с в системе определения искажений волнового фронта. Показано, что в системе с пятью ДВФ в пределах поля зрения 35×35 угл. с значения числа Штреля высоки — не менее 0,45. С увеличением поля зрения до 60×60 угл. с уже необходимо использовать систему как минимум с девятью датчиками, числа Штреля оказываются не ниже 0,3. Стоит заметить, что расчет функций размытия точки выполнен для слабой оптической турбулентности ($r_0 = 15$ см). При этом можно ожидать, что с уменьшением радиуса Фрида зона высоких значений чисел Штреля будет сужаться, а максимумы в распределении параметра Штреля располагаться ближе друг к другу.

В этой связи для БСВТ предполагается вести дальнейшие исследования, направленные на совершенствование системы АО [17], а также разработать контур определения искажений волнового фронта в приземном слое в GLAO. Система GLAO подобна классической системе АО и включает в себя только тип/тилт корректор и одно адаптивное зеркало, сопряженное с апертурой телескопа. Но в сравнении с классической системой АО применение системы GLAO позволяет

расширить корректируемое поле зрения до приемлемых величин (30–60 угл. с) за счет применения нескольких датчиков Шэка–Гартмана. С помощью нескольких датчиков возможно определять абберации нескольких волновых фронтов от разнесенных источников света (например, разные участки солнечного пятна).

Заключение

Таким образом, проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы.

1. Среди различных типов систем АО для крупноапертурных солнечных телескопов наземного базирования наиболее перспективными являются системы МСАО. Они включают в себя несколько датчиков для определения искажений волнового фронта, а также несколько адаптивных «многоэлементных» зеркал, которые сопряжены с апертурой и с турбулентными слоями на разных высотах в земной атмосфере. Стоит заметить, что несколько адаптивных зеркал в системе МСАО могут быть сопряжены с одним и тем же турбулентным слоем. С точки зрения построения мультисистемы АО с минимальными (инструментальными) абберациями, а также для избежания чрезмерной сложности алгоритмов определения и коррекции турбулентных фазовых искажений количество оптических элементов должно быть минимальным. Результаты расчетов контура мультисопряжения для БСВТ указывают на существенную сложность внедрения в оптическую схему двух деформируемых зеркал, сопряженных с турбулентными слоями [18]. В этой связи, учитывая большой вклад оптической турбулентности атмосферного пограничного слоя в суммарную амплитуду искажений на апертуре телескопа, на первом этапе работ наиболее перспективным подходом для БСВТ является создание системы GLAO. Предполагается, что система будет включать тип/тилт корректор и деформируемое зеркало, сопряженной с апертурой телескопа, а также несколько ДВФ. В дальнейшем система будет усовершенствована путем использования нескольких каскадов коррекции искажений.

2. Для определения возможностей коррекции солнечных изображений с помощью системы GLAO, являющейся модой МСАО, необходимы предварительные исследования (и последующий мониторинг) вертикальной структуры характеристик оптической турбулентности для конкретного телескопа, включая высотный профиль структурной постоянной флуктуаций показателя преломления воздуха. Эффективная коррекция солнечных изображений в системе GLAO, по-видимому, достигается при «сосредоточении» турбулентности в атмосферном пограничном слое. Тем не менее конкретное значение соотношения интенсивностей оптической турбулентности в свободной атмосфере и в атмосферном пограничном слое, при котором эффективна GLAO система, для разных обсерваторий не установлено.

3. По данным анализа вертикальных профилей структурной постоянной флуктуаций показателя

преломления воздуха, усредненных по 25%-й повторяемости низких значений, показано, что на высоте 3 км радиус Фрида в летний период составляет 12,8 см, в зимний – 9,4 см. В поле зрения 30 угл. с минимальное требуемое количество актюаторов деформируемого зеркала, сопряженного со слоем на высоте 3 км, будет изменяться от 31 ($r_0 = 12,8$ см) до 58 ($r_0 = 9,4$ см). Для сопряжения зеркала со слоем 3 км и коррекции в пределах 30 угл. с расстояние между актюаторами в проекции на апертуру телескопа должно составлять 12,6 см.

4. При коррекции искажений волнового фронта для достижения высоких осевых значений числа Штреля важно измерять структуру оптической турбулентности в пределах атмосферного пограничного слоя, где часто наблюдаются достаточно тонкие слои больших вертикальных градиентов скорости ветра или слои с интенсивной оптической турбулентностью. В этой связи необходимо, чтобы в месте расположения солнечного телескопа в процессе астрономических наблюдений выполнялся мониторинг профилей оптической турбулентности, по крайней мере, в пограничном слое атмосферы. Определение профилей может выполняться методами Slodar или S-DIMM+, заключающимися в пространственно-временном анализе разнесенных в плоскости апертуры и/или во времени искажений волнового фронта от одного светового источника или их набора [19–26]. Для измерения характеристик турбулентности в верхних слоях тропосферы должна применяться своя система определения искажений.

5. Анализ систем определения искажений волнового фронта позволяет говорить о нескольких используемых концепциях.

Первая концепция состоит в том, что используют «звездно-ориентированный» подход – набор ДВФ (например, девять датчиков в DKIST), работающих в узком поле зрения. Количество датчиков определяет количество опорных источников света, используемых для определения искажений волнового фронта, который в этом случае восстанавливается точно в пределах узкого поля зрения каждого датчика.

Вторая концепция состоит в том, что используют один ДВФ с узким полем зрения и датчик широкого поля зрения. Абберации волнового фронта высоких порядков восстанавливаются точно «по оси» только для одного источника света (чаще всего источник, например солнечное пятно или пара, размещается в центре поля зрения). С помощью ДВФ в широком поле зрения восстанавливают абберации низких порядков, возможен анализ волнового фронта по многим деталям изображения. При этом возникает сложность оценки турбулентных характеристик с помощью датчика широкого поля зрения в нижнем атмосферном слое.

Система определения искажений волнового фронта должна включать в себя несколько датчиков, определяющих волновой фронт в пределах достаточно узких полей зрения. Размер поля зрения, с одной стороны, не должен существенно

превышать значения изопланатического угла и его характерный разброс для достижения низких значений ошибки анизопланатизма. С другой стороны, он не должен быть слишком мал, чтобы при работе ДВФ амплитуда дрожания субизображений не превышала величину, определяемую полем зрения субапертуры. Наиболее оптимальный размер поля зрения ДВФ Шэка—Гартмана должен составлять около 10 угл. с. Показано (см. рис. 3), что при длинной экспозиции эффекты анизопланатизма системы «атмосфера—телескоп—ДВФ» становятся существенны при определении фазовых искажений в поле зрения, превышающем 10 угл. с.

Таким образом, наша концепция состоит в том, что система АО КСТ-3 должна включать в себя:

— несколько датчиков, работающих в узких полях зрения (около 10 угл. с), разнесенных на достаточное расстояние, для достижения высоких «осевых» значений параметра Штреля для выбранных участков изображения. При этом характеристики искажений волнового фронта на промежуточных, дополнительных высотах (в сравнении с классическим методом Slodar) могут быть восстановлены разработанным нами методом, в котором оптические пучки перекрещиваются несколько ниже на каждом последующем временном шаге за счет суточного смещения Солнца;

— датчик широкого поля зрения для анализа искажений в скрещенных оптических пучках по доступным контрастным объектам на солнечном изображении (чаще всего в качестве источников света для ДВФ в широком поле зрения могут выступать разнесенные солнечные поры или детали солнечного пятна).

Результаты получены с использованием уникальной научной установки «Большой солнечный вакуумный телескоп» (<http://скр-рф.ру/усу/200615>). Измерения волнового фронта и работа по настройке АО выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки (Шиховцев А.Ю., Ковадло П.Г.). Анализ формирования фазовых искажений выполнен в рамках соглашения 075-15-2021-392. Работа В.П. Лукина по развитию каскадного подхода построения систем АО частично выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

1. *Fried D.L.* Anisoplanatism in adaptive optics // *J. Opt. Soc. Am.* 1980. V. 71, N 1. P. 52–61.
2. *Li R., Luo L., Li J., Gao X.* Simulation of anisoplanatic imaging containing optical system parameters through atmospheric turbulence // *Optik*. 2020. V. 204. P. 164–177.
3. *Большасова Л.А., Лукин В.П.* Модовый изопланатизм фазовых флуктуаций // *Оптика атмосфер. и океана*. 2008. Т. 21, № 12. С. 1070–1075.
4. *Berkefeld T., Soltau D., von der Luhe O.* Multiconjugate adaptive optics at the Vacuum Tower Telescope, Tenerife // *Proc. SPIE. Adapt. Opt. Syst. Technol. II*. 2002. V. 4538. DOI: 10.1117/12.459799.
5. *Langlois M., Moretto G., Richards K., Hegwer S., Rimmele T.* Solar multi-conjugate adaptive optics at the Dunn Solar Telescope: Preliminary results // *Proc. SPIE. Advanc. Adapt. Opt.* 2004. V. 5490. DOI: 10.1117/12.548929.

6. *Schmidt D., Gorceix N., Goode P.R., Marino J., Rimmele T., Wöger F., Zhang X., Rigaut F., von der Luhe O.* Clear widens the field for observations of the Sun with multi-conjugate adaptive optics // *Astron. Astrophys.* 2017. V. 597. P. L8.
7. *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.
8. *Schmidt D., Berkefeld T., Heidecke F., von der Luhe O., Soltau D.* Testbed for the multi-conjugate adaptive optics system of the Solar Telescope GREGOR // *Proc. SPIE. Astronom. Space Opt. Syst.* 2009. V. 74390X. DOI: 10.1117/12.829886.
9. *Soltau D., Berkefeld T., Capuchino J.S., Vera M.C., Moro D.D., Lufdahl M., Scharner G.* Adaptive optics and MCAO for the 4-m European Solar Telescope EST // *Proc. SPIE. Adapt. Opt. Syst. II*. 2010. V. 77360U. DOI: 10.1117/12.856851.
10. *Schmidt D., Beard A., Ferayorni A., Gregory S., Johnson L., Marino J., Rimmele L., Rimmele T.* Adding multi-conjugate adaptive optics to the Daniel K. Inouye Solar Telescope // *Proc. SPIE. Adapt. Opt. Systems VII*. 2020. V. 11448. DOI:10.1117/12.2559606.
11. *Schmidt D., Gorceix N., Marino J., Zhang X., Rimmele T., Berkefeld T., Goode P.* Multi-conjugate adaptive optics at Big Bear Solar Observatory // *Adapt. Opt. for Extremely Large Telescopes 4*. 2015. V. 1, N 1. DOI: 10.20353/K3T4CP1131570.
12. *Rigaut J.R., Ellerbroek B.L., Flicker R.* Principles, limitations, and performance of multiconjugate adaptive optics // *Proc. SPIE. Adapt. Opt. Syst. Technol.* 2000. V. 4007. DOI: 10.1117/12.390311.
13. *Ковадло П.Г., Лукин В.П., Шиховцев А.Ю.* Развитие модели турбулентной атмосферы на астроплощадке Большого солнечного вакуумного телескопа в приложении к адаптации изображений // *Оптика атмосфер. и океана*. 2018. Т. 31, № 11. С. 906–910; *Kovadlo P.G., Lukin V.P., Shikhovtsev A.Yu.* Development of the model of turbulent atmosphere at the Large solar vacuum telescope site as applied to image adaptation // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 2. P. 202–206.
14. *Townson M.J., Saunter S.D.* Reducing the field of view in correlating wavefront sensors for solar adaptive optics // *Adapt. Opt. for Extremely Large Telescopes 5*. 2017. DOI: 10.26698/AO4ELT5.0156.
15. *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.
16. *Shikhovtsev A.Yu., Kovadlo P.G., Kiselev A.V.* Astroclimatic statistics at the Sayan Solar Observatory // *Sol.-Terr. Phys.* 2020. V. 6, N 1. P. 102–107.
17. *Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Большасова Л.А., Малеев О.Н., Коняев П.А., Копылов Е.А., Ковадло П.Г., Колобов Д.Ю., Кудряшов А.В., Лавринов В.В., Лавринова Л.Н., Лукин В.П., Чупраков С.А., Селин А.А., Шиховцев А.Ю.* Адаптивная оптическая система для солнечного телескопа, обеспечивающая его работоспособность в условиях сильной атмосферной турбулентности // *Оптика атмосфер. и океана*. 2016. Т. 29, № 11. С. 895–904; *Antoshkin L.V., Botygina N.N., Bolbasova L.A., Emaleev O.N., Konyayev P.A., Kopylov E.A., Kovadlo P.G., Kolobov D.Yu., Kudryashov A.V., Lavrinov V.V., Lavrinova L.N., Lukin V.P., Chuprakov S.A., Selin A.A., Shikhovtsev A.Yu.* Adaptive optics system for solar telescope operating under strong atmospheric turbulence // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 3. P. 291–299.

18. *Shikhovtsev A.Yu., Chuprakov S.A., Kovadlo P.G.* Sensor to register the optical distortions in the wide field of view // *Proc. SPIE*. 2019. V. 11322. P. 113220B.
19. *Butterley T., Wilson R., 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.
20. *Goodwin M., Jenkins C., Lambert A.* Improved detection of atmospheric turbulence with SLODAR // *Opt. Express*. 2007. V. 15, N 22. P. 14844–14860.
21. *Wilson R.W.* SLODAR: Measuring optical turbulence altitude with a Shack–Hartmann wavefront sensor // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2002. V. 337, N 1. P. 103–108.
22. *Shikhovtsev A., Kovadlo P., Lukin V., Nosov V., Kiselev A., Kolobov D., Kopylov E., Shikhovtsev M., Avdeev F.* Statistics of the optical turbulence from the micrometeorological measurements at the Baykal astrophysical observatory site // *Atmos.* 2019. V. 10, N 11. P. 661.
23. *Song T., Cai Z., Liu Y., Zhao M., Fang Y., Zhang X., Wang J., Li X., Song Q., Du Z.* Daytime optical turbulence profiling with a profiler of the differential solar limb // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2020. V. 499, N 2. P. 1909–1917.
24. *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.
25. *Kovadlo P.G., Shikhovtsev A.Yu., Kopylov E.A., Kiselev A.V., Russkikh I.V.* Study of the optical atmospheric distortions using wavefront sensor data // *Russ. Phys. J.* 2021. DOI: 10.1007/s11182-021-02256-y.
26. *Шиховцев А.Ю., Киселев А.В., Ковadlo 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.Yu., Kiselev A.V., Kovadlo P.G., Kolobov D.Yu., Lukin V.P., Tomin V.E.* Method for estimating the altitudes of atmospheric layers with strong turbulence // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 3. P. 295–301.

A.Yu. Shikhovtsev, V.P. Lukin, P.G. Kovadlo. **The development of the adaptive optics systems for ground-based solar telescopes.**

The paper describes the multi-conjugate adaptive optics systems and identifies the features of optical conjugations of adaptive mirrors with turbulent layers for ground-based solar telescopes. The optimal size of the field of view for a solar telescope operating under average atmospheric conditions has been calculated. The size of the optimal field of view is equal 10 arc. sec. Recommendations are given for the development of MCAO systems for ground-based solar telescopes. The concept of a system for determination of 3D wavefront distortions for the Large Solar Telescope LST-3, as well as for the wavefront registration in the Large Solar Vacuum Telescope, is proposed.