

Лукин В.П., Фортес Б.В.

ЧАСТИЧНАЯ КОРРЕКЦИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ИСКАЖЕНИЙ В ТЕЛЕСКОПЕ АСТ-10

Полная компенсация турбулентных искажений в видимом диапазоне длин при размерах апертуры, характерных для современных телескопов (6–10 м), требует разработки адаптивных систем с сотнями каналов управления. Более простые адаптивные системы, обеспечивающие полную коррекцию в инфракрасном диапазоне, могут дать существенный выигрыш по угловому разрешению и в видимом диапазоне. При этом яркость изображения, характеризуемая параметром Штреля, остаётся много меньше дифракционно-ограниченного значения, т.е. система работает в режиме частичной коррекции. В статье приводятся результаты численных расчётов частично скорректированной функции рассеяния точки (ФРТ) для российского проекта 10-метрового телескопа АСТ-10, обсуждаются возможные подходы к выбору конфигурации адаптивной системы.

Введение

Пространственный спектр турбулентных искажений достаточно широк, и хотя наибольший вклад в дисперсию флуктуаций фазы вносят наиболее низкочастотные составляющие искажений волнового фронта (наклоны и квадратичные аберрации), при больших размерах апертуры телескопа коррекция низших мод не даёт существенного улучшения качества изображения. Поэтому для достижения достаточно высокого уровня коррекции необходимо применять корректоры волнового фронта с большим числом степеней свободы.

Сложность и стоимость таких устройств быстро возрастают при увеличении требований к их пространственному разрешению. Поэтому нужно выбирать такую конфигурацию корректора, которая, с одной стороны, не приводила бы к чрезмерному усложнению и удорожанию системы АО (адаптивной оптики) и, с другой стороны, была бы тем не менее способна обеспечить достаточный выигрыш по качеству изображения. Кроме того, поскольку эффективность коррекции определяется и другими элементами АО, нужно, чтобы характеристики корректирующего устройства (конфигурация, пространственное разрешение, частотный диапазон) были согласованы и сбалансированы с параметрами других компонентов системы адаптивной оптики, например опорного источника и датчика волнового фронта.

1. Корректоры волнового фронта и частичная коррекция ФРТ

В настоящее время известны три основных типа корректоров волнового фронта, развиваемых для адаптивных телескопов, – модальный, зональный и сегментированный. Рассмотрим требования к пространственному разрешению этих устройств на основе простых аналитических оценок и более детального численного моделирования применительно к проекту АСТ-10. Для наших расчётов важна только функция зрачка телескопа, которая в данном случае определяется конфигурацией главного зеркала АСТ-10, представляющего собой сотую упаковку 83 шестиугольных сегментов.

1.1. Модальный корректор

Модальный корректор является таким гипотетическим устройством, функции отклика которого представляют собой некоторый аналитический базис (в качестве его обычно выбирают полиномы Цернике). Поскольку первые элементы ряда Цернике совпадают с аналитическим представлением классических аберраций волнового фронта (дисторсия, дефокусировка, астигматизм и т.д.), теория модального корректора позволяет получать оценки эффективности низкопорядковой адаптивной коррекции. Кроме того, такой класс корректоров, как биморфные зеркала (см., например, [1]), с приемлемой точностью позволяет воспроизводить до 20–30 аберраций Цернике.

Теории модального корректора применительно к компенсации турбулентных искажений посвящен ряд теоретических работ [2–5]. Приближенные оценки эффективности модального корректора можно сделать на основе результатов работы [3], где была рассчитана дисперсия остаточных искажений фазы скорректированной волны как функция нормированного диаметра апертуры телескопа D/r_0 и числа полиномов Цернике, компенсируемых модальным корректором. Соответствующая формула имеет вид

$$\sigma_N^2 = C_N (D/r_0)^{5/3},$$

где N – число скорректированных aberrаций. Значения коэффициентов C_N приведены в табл. 1, где $N = 1$ соответствует компенсации постоянной компоненты, $N = 3$ – компенсации постоянной компоненты и наклонов (линейные aberrации), $N = 6$ – компенсации вплоть до квадратичных aberrаций включительно и т.д. Для больших значений N существует приближённая формула

$$C_N \approx 0,2944 N^{-\sqrt{3/2}}.$$

Эти теоретические результаты позволяют оценить величину остаточных искажений для заданного параметра модального корректора N и, наоборот, по заданному уровню остаточных искажений определить число полиномов, которые следует скомпенсировать. Например, для достижения уровня остаточных искажений, соответствующих критерию $\lambda/6$ ($\sigma_N^2 \approx 1$), получаем оценку:

$$N = 0,244 (D/r_0)^{1,92}.$$

Таблица 1

N	1	3	6	10	15	21
C_N	1,03	0,134	0,0648	0,0401	0,0279	0,0208

Табл. 2 иллюстрирует зависимость N от нормированного диаметра апертуры. При таком числе степеней свободы модального корректора параметр Штреля будет примерно равен

$$S = \exp(-\sigma_N^2) = 1/e \approx 0,37.$$

Таблица 2

D/r_0	10	20	30	40	50
N	20	78	170	295	454

Очевидно, что существующие биморфные зеркала неспособны обеспечить такой уровень коррекции в видимом диапазоне (когда наиболее вероятное значение $D/r_0 = 40 \div 50$), однако их применение для коррекции в ИК-диапазоне (при $D/r_0 = 10 \div 15$) представляется вполне оправданным. Кроме того, как будет показано ниже, и при более высоких значениях дисперсии остаточной ошибки можно получить близкое к дифракционному угловое разрешение (определяемое как ширина ФРТ по уровню $1/2$ от максимума).

Оказывается, что частично-скорректированное изображение (ЧСИ) точечного источника состоит как бы из двух компонентов, один из которых имеет ширину, примерно равную ширине турбулентной ФРТ, а другой имеет дифракционно-ограниченный размер. Обсуждавшаяся выше теория, ограничивающаяся рассмотрением дисперсии остаточных искажений волнового фронта, не описывает этот эффект.

В ряде работ были выполнены расчёты оптической передаточной функции (ОПФ) для модальной коррекции (например, [4]), однако и ОПФ не даёт в полной мере представления об угловом разрешении. Рассмотрим результаты численного эксперимента, проведённого на основе разработанного нами программного обеспечения. Детальное описание методики моделирования формирования изображения в системе атмосфера – телескоп изложены в наших публикациях [6, 10].

Полученные путём численного моделирования ФРТ модальной адаптивной оптической системы (АОС) приведены на рис. 1. Искажения волнового фронта считались заранее известными (использовалась модель «идеального» датчика). Управление корректором определялось на основе минимизации интегральной квадратичной ошибки коррекции. Расчёты выполнены для нескольких значений нормированного диаметра апертуры $D/r_0 = 10, 20, 30$. Проводилось исследование модальной коррекции при значениях $N = 3, 10, 15, 21, 28$, что соответствует коррекции aberrаций волнового фронта с номерами 1, 2, 3, 4-й и 5-й радиальной степени включи-

тельно. На рис. 2 приведены радиальные сечения нормированной ФРТ в зависимости от нормированного диаметра телескопа и параметра коррекции N . На рис. 3 показаны зависимости параметра Штреля от дисперсии остаточных искажений фазы.

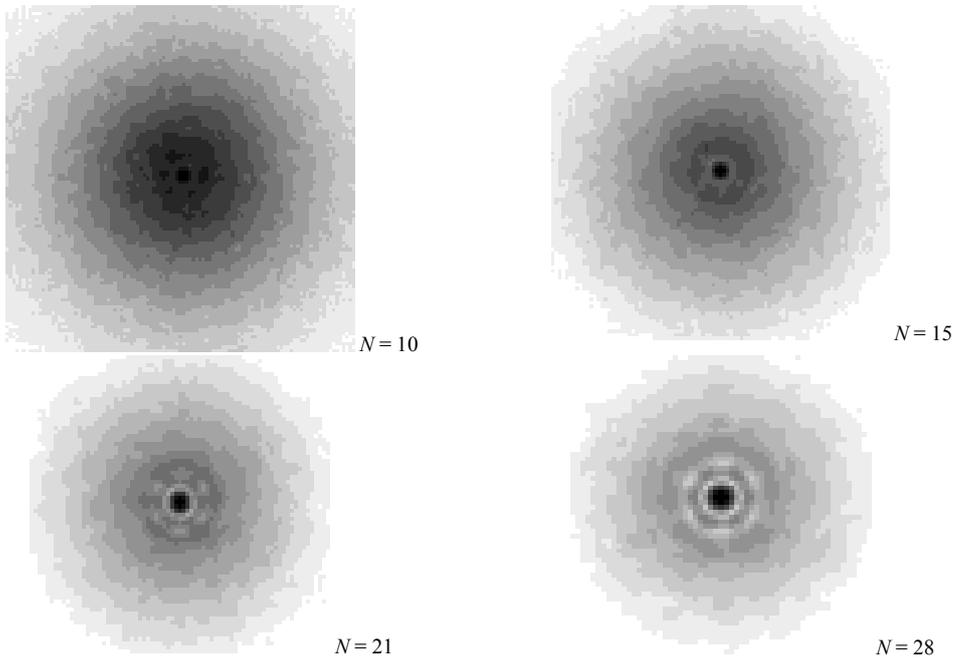


Рис. 1. Двумерное распределение интенсивности ФРТ АСТ-10 при модальной коррекции. Значение нормированного диаметра апертуры $D/r_0 = 20$

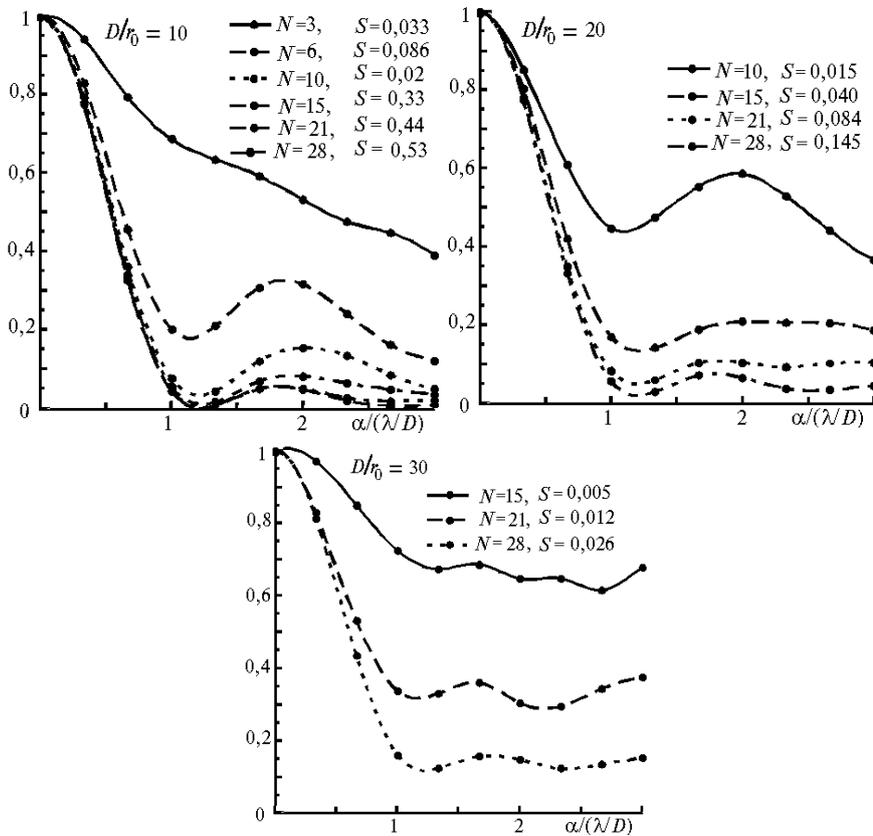


Рис. 2. ФРТ АСТ-10 при использовании модального корректора. Параметр N соответствует числу полиномов Цернике. ФРТ нормирована на осевое значение. S – параметр Штреля

Видно, что достаточно контрастное дифракционное ядро ЧСИ может сохраняться вплоть до значений параметра Штреля порядка 0,01. Этот факт не является очевидным и мог быть установлен только путём прямого расчёта ФРТ. Действительно, можно было бы ожидать, что уменьшение осевой интенсивности изображения в 10 раз приводит к примерно трёхкратному его уширению, поскольку интенсивность обратно пропорциональна квадрату эффективного размера при неизменной «форме» распределения интенсивности в плоскости изображения.

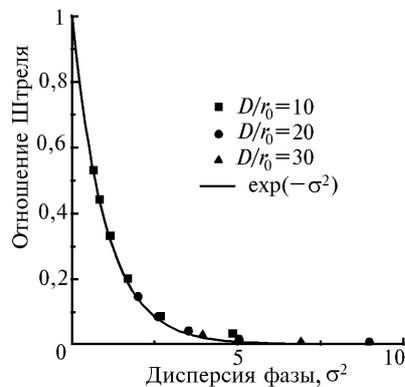


Рис. 3. Зависимость параметра Штреля от дисперсии остаточных искажений фазы

Однако при компенсации низших aberrаций существенно изменяется пространственный спектр искажений волнового фронта. Нескорректированные мелкомасштабные aberrации приводят к перераспределению энергии скорректированной ФРТ в дальние «крылья» (по сравнению с турбулентной ФРТ при той же дисперсии фазовых искажений). При этом эффективный размер ЧСИ оказывается больше, чем можно было бы ожидать, но ширина ФРТ по уровню 1/2, оказывается, лишь немного отличается от дифракционной. Это даёт возможность выполнять астрономические наблюдения, связанные с измерением угловых положений объектов с точностью, приближающейся к дифракционной даже при сравнительно «плохой» (по параметру Штреля) коррекции.

Применительно к АСТ-10 можно сделать следующие практические выводы. Использование биморфных зеркал (наиболее близких по своим характеристикам к модальному корректору) может быть рекомендовано на первых этапах развития адаптивной оптики для АСТ-10 как наиболее доступных в настоящее время в России. Биморфные зеркала будут способны обеспечить высокий уровень коррекции в дальнем и среднем ИК-диапазонах и будут работать в режиме «частичной» коррекции в ближнем ИК-диапазоне. В видимом диапазоне вряд ли стоит рассчитывать на корректоры биморфной идеологии, если только не удастся изготовить достаточно удачное зеркало с числом каналов управления порядка 100–200.

После более конкретного решения относительно места расположения обсерватории АСТ-10 и получения данных об астроклимате, необходимо будет провести дополнительные расчёты, с тем чтобы определить минимальные требуемые параметры биморфных корректоров, при которых возможна частичная коррекция с достаточным уровнем контраста дифракционного ядра в окнах прозрачности ближнего ИК-диапазона.

1.2. Зональный и составной корректоры

Разрешение, близкое к дифракционному при малых значениях параметра Штреля, возможно и при использовании других классов корректоров волнового фронта. Рассмотрим с этой точки зрения деформируемые зеркала зонального типа и составные корректоры.

В отличие от модального, корректоры зонального типа характеризуются тем, что приложение сигнала к одной из точек управления влияет в основном на состояние поверхности деформируемого зеркала лишь в ограниченной его части, т.е. «зоне влияния» данного канала управления. К зональному классу относятся наиболее распространённые в настоящее время деформируемые зеркала, управляемые пьезоэлектрическими элементами, приклеиваемыми с тыльной стороны поверхности зеркала. Размер «зоны влияния» такого управляющего элемента определяется расстоянием до ближайшего соседнего привода. За пределами этой зоны «отклик» пластины зеркала быстро уменьшается.

Составные адаптивные зеркала тоже можно отнести к классу зональных в том смысле, что управление одним элементом зеркала не влияет на состояние остальных его сегментов (если только связь между ними не организована специально). Отличительной особенностью составных зеркал является наличие разрывов поверхности, обусловленных нестыковкой краёв соседних сегментов.

Как для корректоров зонального типа, так и для составных зеркал выражение для дисперсии остаточной ошибки фазовой коррекции описывается формулой

$$\sigma^2 = C (d/r_0)^{5/3},$$

где d – характерный масштаб корректора, т.е. расстояние между точками управления зональным корректором, либо размер элемента составного зеркала, а коэффициент C зависит от особенностей реализации корректора.

Это выражение получено в рамках колмогоровской теории турбулентности и может применяться в случае, если внешний масштаб турбулентности больше, чем масштаб корректора d . В противном случае эта формула даёт несколько завышенную оценку остаточных искажений.

Значение коэффициента C для составного корректора можно приближённо оценить на основе теории модальной коррекции, рассмотренной в предыдущем разделе, пренебрегая тем, что форма управляемого элемента отлична от круга. Поскольку для изотропных турбулентных искажений дисперсия остаточной ошибки коррекции совпадает с дисперсией ошибки на отдельном сегменте, то $C = 1,03$ при управлении по положению сегментов и $C = 0,134$ при управлении положением и наклонами сегментов. Для гибкого зеркала с гауссовой функцией отклика можно воспользоваться оценкой $C = 0,2$ [7].

Число элементов управления, необходимых для получения заданного уровня остаточных искажений, можно оценить по формуле

$$N = \left(\frac{D}{d}\right)^2 = (D/r_0)^2 (C/\sigma^2)^{6/5}.$$

В табл. 3 приведены оценки числа элементов N для обоих типов корректоров, рассчитанных для уровня остаточных искажений, соответствующих $\sigma^2 = 1$. В верхней строке указаны значения нормированного диаметра апертуры (10...50), следующие две строки соответствуют составному корректору, а последняя строка – гибкому зеркалу.

Таблица 3

D/r_0	10	20	30	40	50
$C=1,03$	104	414	932	1657	2590
$C=0,134$	9	36	81	143	224
$C=0,2$	14	58	130	232	362

Заметим, что при $D/r_0 = 30$ требуемое число элементов сегментированного корректора с тремя степенями свободы ($N = 81$) примерно равно числу сегментов АСТ-10. Поэтому интересно рассмотреть ситуацию, когда конфигурация адаптивного зеркала в точности совпадает с конфигурацией главного зеркала. В этом случае можно использовать адаптивное зеркало как для компенсации турбулентных искажений, так и для точной компенсации ошибок фазировки главного зеркала.

На рис. 4 показаны ФРТ АСТ-10 в такой конфигурации для различного уровня турбулентных искажений. ФРТ, нормированная на осевое значение, практически не отличается от дифракционной. Из графика, на котором изображена ФРТ, нормированная на дифракционный максимум, видно, что в зависимости от значения отношения D/r_0 параметр Штреля варьируется в диапазоне 0,1–0,85. Аналогичные расчёты были проведены для гибкого зеркала с гауссовой функцией отклика. Результаты расчётов отражает рис. 5.

Подводя итог рассматриваемому аспекту частичной коррекции, отметим, что эффект возникновения чёткого дифракционного ядра на фоне турбулентного изображения проявляется раньше (для больших остаточных искажений) при более высоком уровне исходных турбулентных аберраций. Это объясняется тем, что при более низком уровне интенсивности турбулентной компоненты частично-скорректированной ФРТ её дифракционно-ограниченная часть характеризуется большим контрастом при том же значении параметра Штреля S .

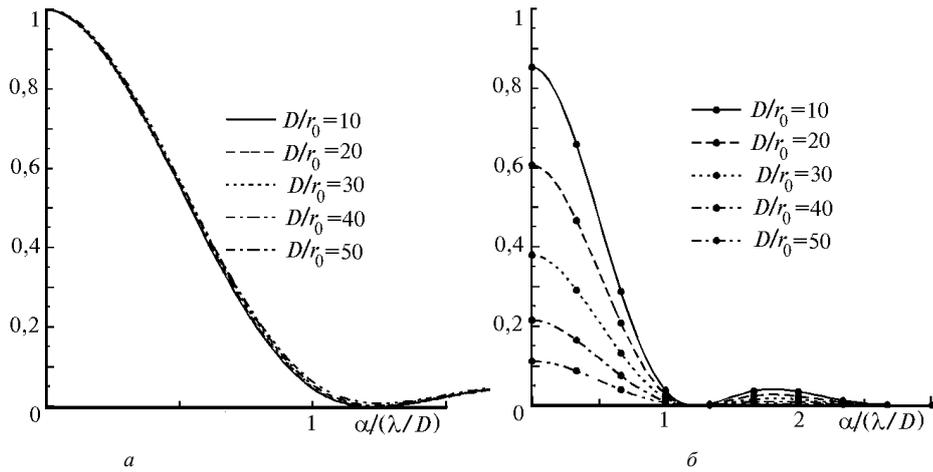


Рис. 4. ФРТ АСТ-10 при использовании сегментированного адаптивного зеркала с 84 элементами шестиугольной формы. Каждый сегмент управляется по положению и наклону. *a* – ФРТ, нормированная на осевое значение; *b* – ФРТ, нормированная на дифракционный максимум

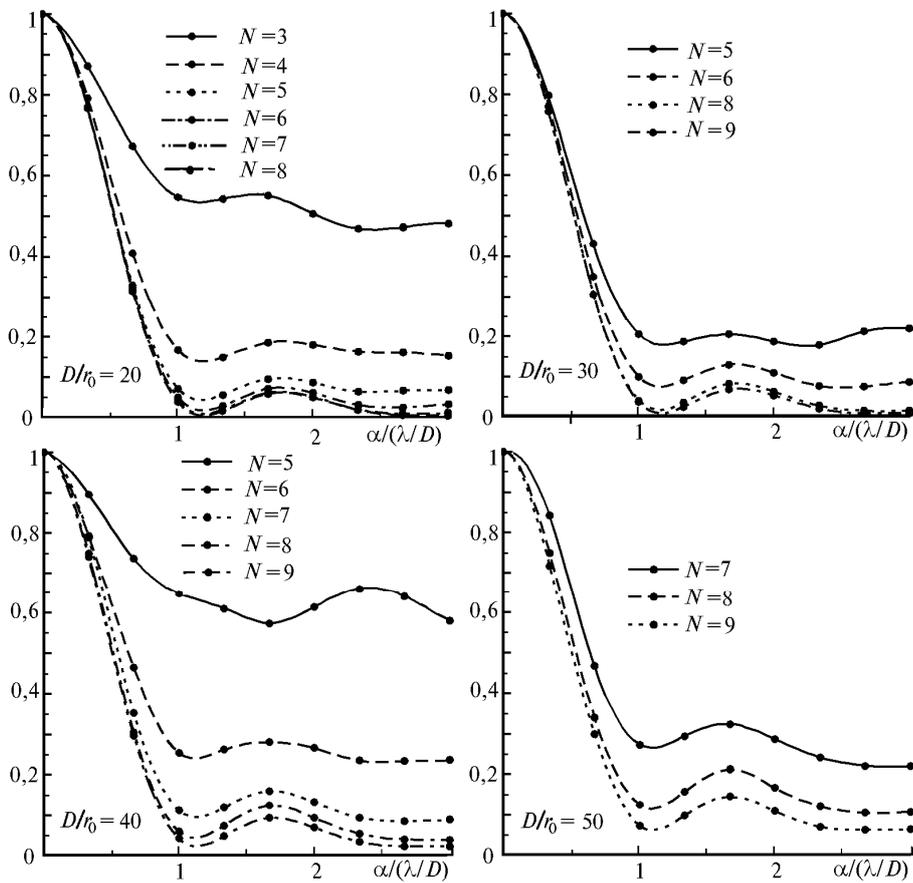


Рис. 5. ФРТ АСТ-10 при использовании гибкого адаптивного зеркала с гауссовой функцией отклика. Параметр N соответствует числу точек управления на диаметре апертуры. ФРТ нормирована на осевое значение

Например, если для нескорректированного изображения $S = 0,001$, то частичная коррекция, увеличивающая осевую интенсивность изображения до уровня $S = 0,01$, приводит к возникновению дифракционной компоненты ФРТ с параметром контраста (отношение осевой интенсивности к интенсивности на уровне первого дифракционного кольца) порядка 10. Для получения такого же контраста при исходном уровне искажений, соответствующем $S = 0,01$,

нужно скорректировать турбулентные искажения до уровня, соответствующего $S = 0,1$, что достигается при существенно меньшем значении дисперсии остаточных искажений фазы.

Этот эффект в полной мере проявится для АСТ-10. Можно ожидать, что уже на первых этапах развития АО для этого телескопа станет возможным достижение близкого к дифракционному углового разрешения даже при низких значениях параметра Штреля. Хотя доля энергии, сконцентрированная в дифракционном кружке, будет при этом много меньше, чем её дифракционно-ограниченное значение, выигрыш по сравнению с нескорректированным изображением может оказаться достаточно существенным. Прежде всего это даст возможность проведения высокоточных угловых измерений в видимом диапазоне.

2. Гартмановский датчик и частичная коррекция

Даже при наличии корректора волнового фронта с достаточно высоким пространственным разрешением реализация адаптивной коррекции невозможна без устройства, измеряющего аберрации корректируемой оптической волны. Поскольку качество коррекции будет определяться наиболее слабым звеном в цепочке «измерение–компенсация», при разработке адаптивной системы следует сбалансированным образом выбирать характеристики как корректора, так и датчика волнового фронта.

Измерение атмосферных аберраций оптического излучения астрономических объектов в реальном времени имеет ряд специфических особенностей. Прежде всего это быстрая временная изменчивость аберраций и низкий уровень светового потока. Другой особенностью является широкий пространственный спектр искажений, проявляющийся в наличии как мелко-масштабных, так и крупномасштабных искажений, что предъявляет повышенные требования к динамическому диапазону датчика искажений волнового фронта (ДВФ).

Развитие аппаратуры для регистрации турбулентных фазовых искажений привело к возникновению нескольких новых типов ДВФ, существенно отличающихся от устройств, используемых в задачах контроля оптики, хотя и унаследовавших основные принципы фазовых измерений.

Наиболее широко распространённым в настоящее время является датчик Шэка–Гартмана [8], прототипом которого является известный классический метод Гартмана, применяющийся в задачах аттестации астрономической оптики. Датчик Шэка–Гартмана состоит из диафрагмы, помещаемой в плоскости, сопряжённой с плоскостью входной апертуры телескопа, набора фотоприёмников и решающего устройства.

Диафрагма датчика Шэка–Гартмана в отличие от диафрагмы Гартмана является не амплитудным, а фазовым транспарантом и представляет собой, как правило, матрицу микролинз. Известны также реализации, использующие матрицу микропризм. Современные оптические технологии позволяют изготавливать такие матрицы со сравнительно невысокими затратами. Наиболее перспективным типом фотоприёмника для астрономического ДВФ является интенсифицированная матрица ПЗС, способная работать в режиме счёта фотонов.

Принцип реконструкции карты аберраций волнового фронта, используемый в датчике Шэка–Гартмана, основан на решении задачи построения оценки неизвестной функции по её локальным наклонам (градиентам). Локальные наклоны волнового фронта оцениваются в данном случае по смещению фокальных пятен в плоскости фотоприёмников. Эти смещения могут определяться либо по положению центра тяжести соответствующего мгновенного распределения интенсивности, либо (при низком пространственном разрешении фотоприёмного устройства) по перераспределению энергии между квадрантами. Известен также вариант датчика, в котором реализованы устройства микроперемещений, обеспечивающие равенство световых потоков на площадках квадрантного фотоприёмника [9]. В этом случае локальный наклон определяется по величине смещения фотоприёмника. Такой датчик используется в адаптивной системе солнечного телескопа и в меньшей степени пригоден для телескопа общего назначения, работающего в условиях низких световых потоков.

В состав прикладного программного обеспечения, разработанного нами для исследования проблем адаптивного формирования пучков и изображений в атмосфере, входит численная модель датчика Шэка–Гартмана с модальным алгоритмом восстановления по полиномам Цернике [10]. Эта модель позволяет исследовать точность измерения аберраций волнового фронта в зависимости от числа субапертур, уровня квантового шума, соотношения между размером субапертуры и радиусом когерентности и алгоритма оценивания.

Рассмотрим результаты расчёта ФРТ адаптивного телескопа, иллюстрирующие зависимость качества коррекции от числа фотонов, приходящих на субапертуру за время экспозиции датчика.

На рис. 6 показаны ФРТ, полученные при моделировании датчика, имеющего размерность диафрагмы Гартмана 10×10 . Расчёты выполнены для круглой апертуры, нормированный диаметр которой равен $D/r_0 = 10$. Таким образом, размер субапертуры был равен атмосферному радиусу когерентности. Построение карты aberrаций волнового фронта по оценкам локальных наклонов выполнялось в соответствии с модальным алгоритмом по 28 полиномам Цернике.

Эти результаты показывают, что влияние квантового шума начинает проявляться при уровне интенсивности опорной волны, соответствующем менее чем 100 фотонам на субапертуру за время экспозиции датчика ($N = 100$). Отношение сигнал-шум при таком уровне интенсивности равно 10 в соответствии с пуассоновской статистикой фотоэлектронов. Параметр Штреля уменьшается вдвое по отношению к его значению в отсутствие квантового шума при интенсивности опорной волны, соответствующей $N = 5$.

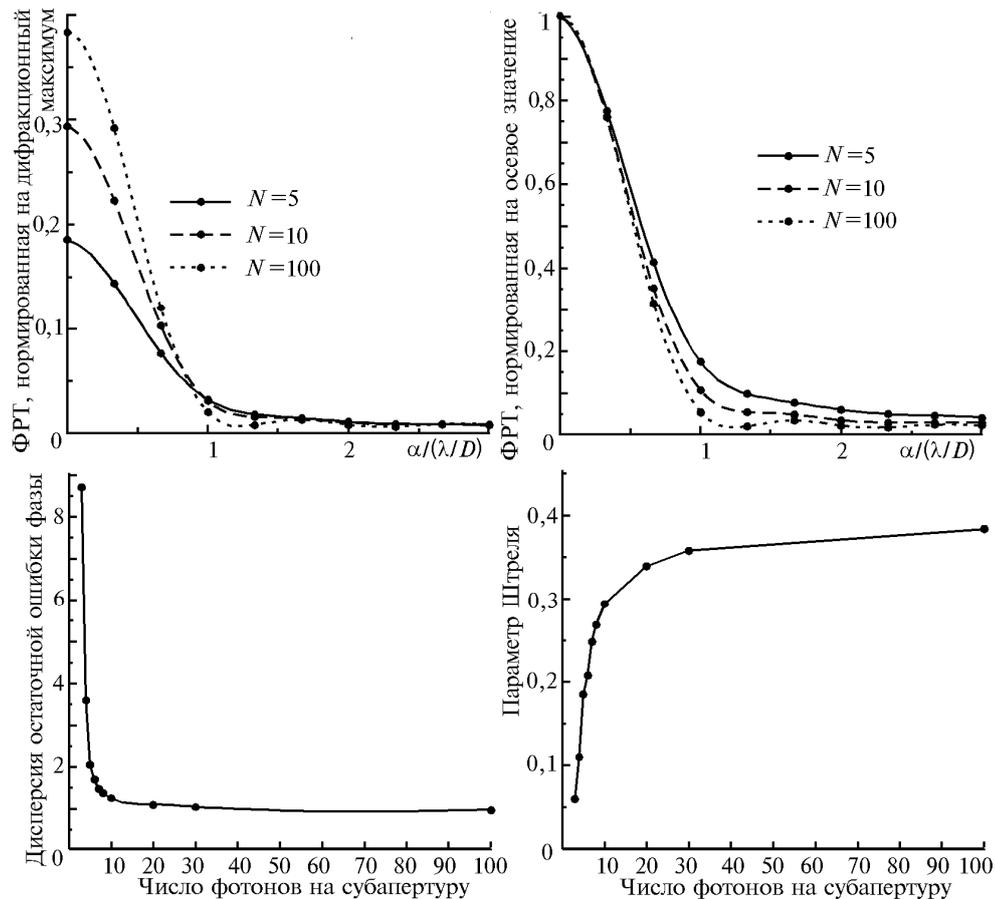


Рис. 6. Результаты моделирования адаптивного телескопа с датчиком Шэка-Гартмана. Нормированный диаметр апертуры телескопа $D/r_0 = 10$. Размерность линзовой диафрагмы датчика 10×10 . Оценивание aberrаций волнового фронта выполнялось по модальному алгоритму (28 полиномов Цернике). Параметр N – среднестатистическое число фотонов на субапертуру за время одной экспозиции

Эти требования к уровню интенсивности определяют минимальную яркость опорного источника, а в сочетании со значением угла изопланатизма и распределением звёзд такой яркости по небесной сфере определяют долю её площади, в пределах которой возможна эффективная компенсация турбулентных искажений. Различные оценки показывают, что эта доля не превышает нескольких процентов и зависит от рабочей длины волны и высотного профиля турбулентности. Для обеспечения качественной коррекции на всей площади небесной сферы необходимо создание искусственного опорного источника.

2.1. Неизопланатизм конуса и частичная коррекция

В используемых в настоящее время схемах коррекции изображения различают два основных типа неизопланатизма: угловой неизопланатизм и неизопланатизм конуса. Первый возник

кает при коррекции изображения объекта по опорной волне от звезды, расположенной на некотором угловом расстоянии от него. При коррекции изображения протяженного объекта угловой неизопланатизм проявляется в том, что хорошо скорректированной (резкой) получается только часть объекта, лежащая в пределах зоны изопланатизма.

Неизопланатизм конуса имеет место при использовании в качестве опорного источника лазерной опорной звезды (ЛОЗ). В этом случае угловое положение источника, как правило, совпадает с угловым положением наблюдаемого объекта, однако последний расположен «в бесконечности», а высота ЛОЗ ограничена пределами эффективно рассеивающей атмосферы. В отличие от «классического» углового неизопланатизма угол между траекториями лучей опорной и корректируемой волн меняется в зависимости от расстояния между рассматриваемой точкой и центром приёмной апертуры. В центре апертуры этот угол равен нулю и увеличивается при удалении от него. Остаточные искажения ВФ увеличиваются при удалении от центра апертуры, а также при уменьшении расстояния между апертурой и ЛОЗ, т.е. при уменьшении её высоты.

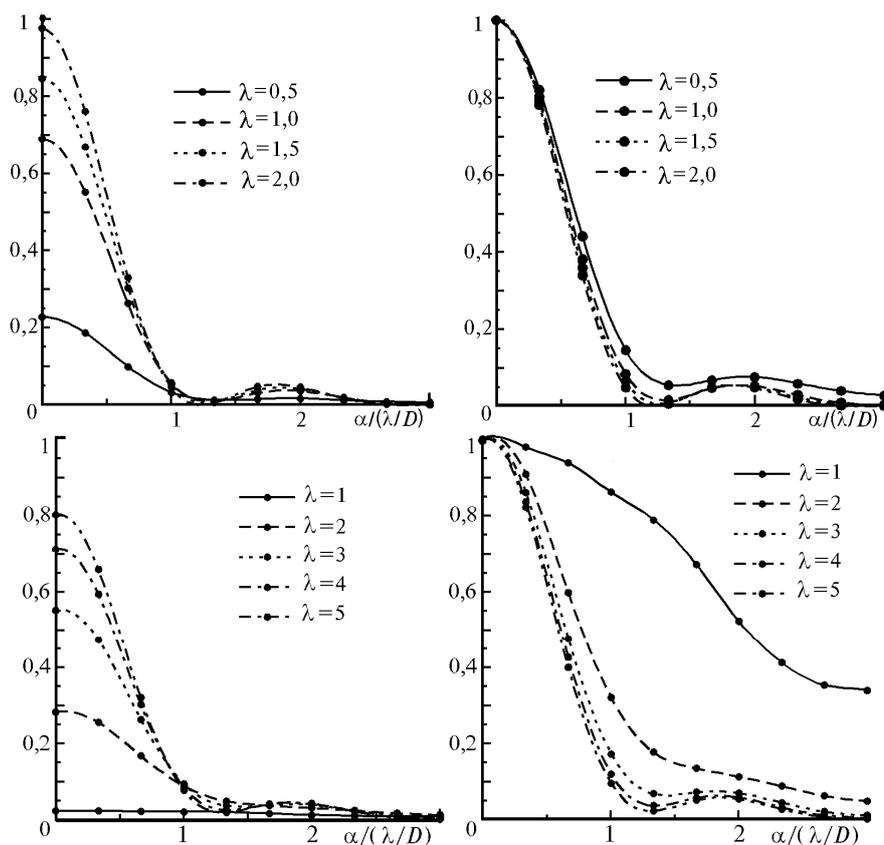


Рис. 7. ФРТ АСТ-10 для различных длин волн при адаптации по лазерной опорной звезде. Верхние графики – для натриевой ЛОЗ ($H = 100$ км), нижние графики – для рэлеевской ЛОЗ ($H = 10$ км). На левых графиках ФРТ нормирована на дифракционный максимум, на правых - на осевое значение. Длина волны λ дана в микрометрах

Для обоих типов неизопланатизма остаточная ошибка тем больше, чем большая часть турбулентных искажений сосредоточена в верхней части атмосферы, поскольку расстояние между траекториями лучей опорной и корректируемой волн увеличивается с удалением от апертуры телескопа. При равных интегральных значениях C_n^2 эффективность коррекции будет выше в случае, когда значение C_n^2 быстрее убывает с увеличением высоты.

Другой проблемой, возникающей в связи с использованием ЛОЗ, является компенсация общего наклона (т.е. дрожания изображения). Одним из путей решения этой проблемы является коррекция наклона по естественной звезде. При полной компенсации флуктуаций угла прихода эффективность адаптации в системе с ЛОЗ будет определяться эффектом неизопланатизма конуса. Остаточные искажения при этом будут уменьшаться с увеличением длины волны и увеличением высоты ЛОЗ.

Имеющаяся в составе нашего пакета прикладного программного обеспечения реализация численной модели ЛОЗ позволяет исследовать этот эффект. Рассмотрим результаты расчёта ФРТ АСТ-10 при использовании двух типов ЛОЗ: рэлеевской и натриевой.

В первом случае опорное излучение формируется за счёт рэлеевского рассеяния в атмосфере. Интенсивность рассеянного излучения в плоскости апертуры телескопа обратно пропорциональна квадрату расстояния до рассеивающего объёма. Кроме того, коэффициент рэлеевского рассеяния экспоненциально уменьшается с высотой над уровнем моря, что обусловлено уменьшением плотности воздуха. Это ограничивает высоту рэлеевской ЛОЗ величиной порядка 10 км при разумных мощностях лазерного источника. Сигнал с больших высот можно получить за счёт резонансного рассеяния лазерного излучения в слое с повышенным содержанием атомов натрия, находящимся на высоте порядка 100 км.

На рис. 7 показаны ФРТ АСТ-10 для этих вариантов ЛОЗ. Видно, что использование рэлеевского опорного источника эффективно лишь в ИК-области (небольшие значения D/r_0). Использование натриевой ЛОЗ позволяет получить хорошее качество коррекции в ИК-диапазоне и даёт возможность достижения почти дифракционного углового разрешения в режиме частичной коррекции для видимой области спектра. Эти результаты получены в предположении, что датчик и корректор волнового фронта имеют бесконечное пространственное разрешение, и в пренебрежении флуктуациями положения ЛОЗ, т.е. при полной коррекции общего наклона.

Следует отметить, что конфигурация АСТ-10 не очень удачна с точки зрения применения ЛОЗ, поскольку большая часть центральной области апертуры (где ошибка коррекции, обусловленная эффектом неизопланатизма конуса, минимальна) затенена вторичным зеркалом. Трёхметровая «мертвая зона» главного зеркала как раз соответствует размеру апертуры, для которой возможно достижение близкого к дифракционному качества изображения в видимом диапазоне при использовании натриевой ЛОЗ.

В качестве частичного выхода из такой ситуации можно предложить применение внеосевой ЛОЗ. В этом случае зона малых ошибок переместится в рабочую часть апертуры. При этом на противоположном крае главного зеркала ошибка неизопланатизма конуса возрастет.

В плане перспективного развития адаптивной оптики для АСТ-10 следует предусмотреть возможность формирования 4–6 внеосевых ЛОЗ, каждая из которых будет обеспечивать измерение турбулентных aberrаций в пределах 2–4-метровой зоны вблизи проекции положения ЛОЗ на плоскость апертуры АСТ-10.

1. Кудряшов А.В., Тихонов В.А., Шмальгаузен В.И. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. N 3. С. 61–65.
2. Fried D.L. // J. Opt. Soc. Am. 1965. V. 55. N 11. P. 1426–1435.
3. Noll R.J. // J. Opt. Soc. Am. 1976. V. 66. N 3. P. 207–211.
4. Wang J.Y., Markey J.K. // J. Opt. Soc. Am. 1978. V. 68. N 1. P. 78–88.
5. Winocur J. // Appl. Opt. 1982. V. 21. N 3. P. 433–438.
6. Fortes B.V., Lukin V.P. // Proc. SPIE. 1992. V. 1668. P. 477–488.
7. Tyson R.K. // Opt. Eng. 1990. V. 29. N 10. P. 1165–1173.
8. Shack R.B., Platt B.C. // J. Opt. Soc. Am. 1971. V. 61. P. 1586.
9. Acton D.S., Smithson R.C. // Appl. Opt. 1992. V. 31. N 16. P. 3161–3169.
10. Лукин В.П., Майер Н.Н., Фортес Б.В. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 12. С. 1241–1251.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
15 июля 1996 г.

V.P.Lukin, B.V. Fortes. **Partial Correction of Turbulent Distortion in the AST-10 Telescope.**

A perfect compensation of turbulent distortions within visual range of wavelengths at the typical sizes of the up-to-date telescopes aperture (from 6 to 10 m) requires a development of the adaptive systems with hundreds of controlling channels. The simpler adaptive systems, providing the perfect correction within IR range, may as well give a considerable gain in the angular resolution within the visibles. The image brightness therewith, characterized by the Shtrell parameter, remains much lesser than the diffraction-limited value, i.e. the system operates in the regime of partial correction. The results of numerical computation of the partially corrected point spread function (PSF) are presented in the paper for the Russian project of 10 m AST-10 Telescope. Also the possible approaches to the choice of an adaptive system configuration are discussed.