

УДК 535.3

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ СТАТИЧЕСКОЙ ОШИБКИ АДАПТИВНОГО ЗЕРКАЛА

А. В. Черных, О. И. Шанин, В. И. Щипалкин

*Федеральное государственное унитарное предприятие
«Научно-исследовательский институт Научно-производственное объединение "ЛУЧ"»,
142100, г. Подольск Московской обл., ул. Железнодорожная, 24
E-mail: oshanin@luch.podolsk.ru*

Разработана и обоснована методика экспериментального исследования компенсационных возможностей адаптивных зеркал (АЗ). Проведён анализ структуры статической остаточной ошибки коррекции на основе полученных экспериментальных данных для конкретного АЗ. Экспериментальными результатами подтверждена теория оптимального размещения приводов на апертуре АЗ.

Ключевые слова: адаптивная оптическая система, датчик волнового фронта, адаптивное зеркало.

Введение. Статическая ошибка в адаптивной системе является мерой точности пространственной компенсации аберраций [1]. Если пренебречь динамикой системы, то именно величина статической остаточной ошибки определит качество коррекции фазовых искажений, которое задаётся параметрами волнового фронта (ВФ): максимальным (PV — Peak to Valley) и среднеквадратичным (RMS — Root Mean Square) отклонениями. Остаточная ошибка коррекции (ООК) определяется в основном статической ошибкой адаптивного зеркала (АЗ) $\sigma_{ст}$, которую в англоязычной литературе называют ошибкой конечных размеров или инструментальной. Её можно вычислить, измерив функции отклика всех приводов АЗ, и, осуществляя их суперпозицию, расчётным методом найти чувствительность этой ошибки к различным аберрациям ВФ. В современных адаптивных оптических системах фазового сопряжения опция измерения функций отклика в том или ином виде, как правило, содержится в системе управления.

Описание методики и установки для изучения статической ошибки коррекции адаптивных зеркал. Среднеквадратичная фазовая ошибка волнового фронта в адаптивной оптической системе фазового сопряжения внутренней коррекции излучения лазерной установки может быть вычислена как сумма вариаций индивидуальных ошибок в виде

$$\sigma_S^2 = \sigma_{ДВФ}^2 + \sigma_d^2 + \sigma_{ст}^2 + \sigma_{КН}^2,$$

где $\sigma_{ДВФ}$ — ошибка измерения датчиком волнового фронта (ДВФ); σ_d — частотная (динамическая) ошибка, возникающая за время между измерением и коррекцией ВФ; $\sigma_{КН}$ — фазовая ошибка, оставшаяся после коррекции наклона (КН) (обычно в адаптивных системах используется два управляемых зеркала — корректор наклонов и адаптивное зеркало).

Из приведённого выражения видно, что если выделить наклонную компоненту, а волновой фронт измерить с высокой пространственной точностью и частотой, то остаточная ошибка коррекции системы будет практически определяться статической ошибкой АЗ, т. е. $\sigma_S \approx \sigma_{ст}$.

Аберрации ВФ лазерного излучения имеют в ряде случаев невысокий модовый состав и небольшую пространственную частоту, так как обусловлены ошибками изготовления и юстировки оптики и термодиформациями оптических элементов. Аналогично и

в системе оптического тракта фазовые искажения имеют невысокий модовый состав. В соответствии с представлениями полиномов Цернике к первой моде относятся наклоны, ко второй — астигматизм и дефокусировка, к третьей — трилистник и кома, к четвёртой — сферическая абберация и т. д. [2]. Динамика фазовых искажений лазера и элементов системы оптического тракта определяется установлением температурного режима, характерное время которого составляет десятые доли секунды и более (до нескольких секунд). Таким образом, применяемая для коррекции искажений лазера и системы оптического тракта адаптивная система работает в квазистатических условиях и используемое АЗ не должно обладать высоким пространственным разрешением.

Задачи предлагаемой работы — создание методики экспрессного измерения статической ошибки АЗ, экспериментальное изучение структуры ООК при отработке адаптивным зеркалом случайных статических искажений ВФ лазерного излучения, а также проверка корректности теории оптимального управления формой оптической поверхности АЗ [3].

Оптическая и структурная схема адаптивной системы приведена на рис. 1. Излучение лазера ($\lambda = 0,63$ мкм) расширялось микрообъективом и коллиматором от оптической скамьи ОСК-2. Коллимированное излучение диаметром 100 мм от поворотного зеркала (ПЗ) и полупрозрачной пластины (ПП) падало на АЗ и, отражаясь от него, попадало во входной зрачок ДВФ. Результаты измерений поступали в управляющий ПК, сигналы которого далее через блок усилительный (БУ) (ширина полосы для полного сигнала по уровню 3 дБ равна 200 Гц) передавались на адаптивное зеркало. Контроль волнового фронта производился датчиком Шэка — Гартмана приблизительно по 400 точкам, размещённым на апертуре 100 мм по гексагональной решётке. Оптическое оборудование устанавливалось на виброизолированном столе [4]. Частота считывания составляла ~ 400 кадр./с. Управляющие сигналы передавались на АЗ с такой же частотой. Время запаздывания в системе $\sim 2,5$ мс. Таким образом, пространственное и временное разрешения ДВФ и быстродействие аппаратуры системы управления обеспечивали пренебрежимо малые статическую и динамическую ошибки измерения ВФ и системы управления, а ООК определялась в основном статической ошибкой АЗ. Адаптивное зеркало имело 31 привод, размещённый на апертуре по решётке, оптимизированной [3] для отработки форм поверхности до четвёртого порядка с минимальной статической ошибкой. Расстояние между приводами 17 мм. Первое кольцо (6 приводов) размещено вокруг центрального привода на апертуре 34 мм, второе (12 приводов) — 68 мм, третье (12 приводов) — 102 мм. Амплитуда перемещения поверхности при действии привода на максимальном сигнале 120 В составляла в среднем $\sim 7,5$ мкм. Исходная форма поверхности АЗ отличалась от плоскости на $PV = 0,365$ мкм и $RMS = 0,107$ мкм.

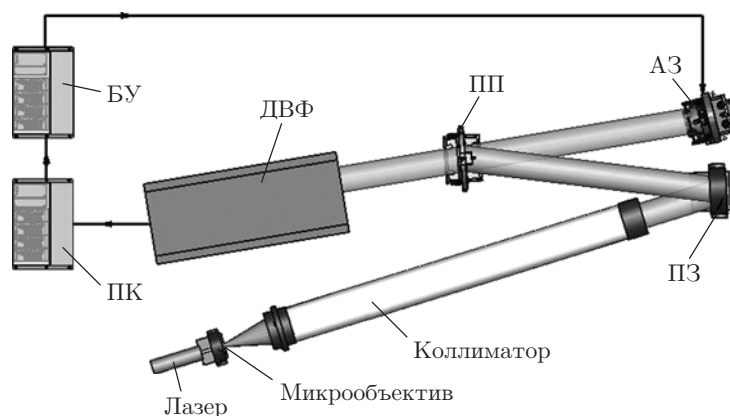


Рис. 1. Схема адаптивной системы

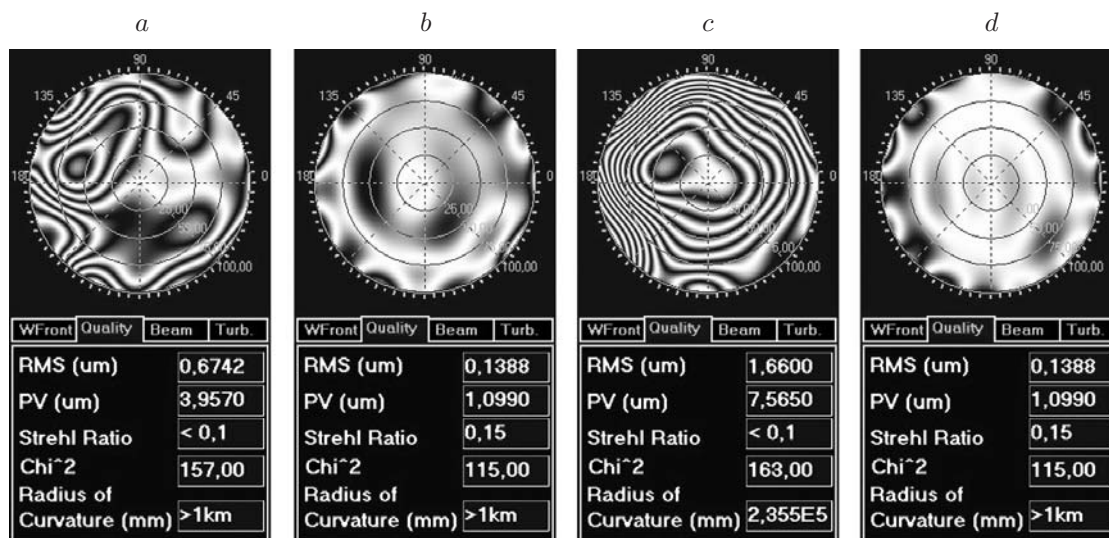


Рис. 2. Интерферограммы волнового фронта: до (a, c) и после (b, d) коррекции

В соответствии с теорией [3] количество лучей N_l (их в нашем зеркале 12), на которых располагаются приводы, связано с максимальными значениями корректируемого многочлена n_1 и аппроксимирующего полинома n_2 соотношением $N_l = n_2 + n_1 + 1$, причём $n_1 < n_2$. Перечисленным условиям удовлетворяет пара чисел $n_1 = 5$ и $n_2 = 6$. Это означает, что по углу АЗ должно корректировать полиномы пятого порядка.

Для оценки сверху минимального числа точек на луче N_t (пространственного разрешения по радиусу, в нашем случае $N_t = 4$) в [3] была получена формула $N_t = [(m_1 + m_2 + 2)/2]$, где m_2 и m_1 — максимальные значения m для аппроксимирующего и корректируемого полиномов соответственно, $[*]$ — целая часть. Перечисленным условиям удовлетворяет пара чисел $m_1 = 3$ и $m_2 = 4$. Это означает, что по радиусу наше зеркало должно корректировать полиномы третьего порядка.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Случайные реализации ВФ в схеме имели различные значения PV и RMS на апертуре 100 мм. Интерферограммы ВФ до и после коррекции для двух различных случаев приведены на рис. 2 (одна полоса соответствует длине волны 0,63 мкм).

Далее был проведён анализ модового состава ООК. На рис. 3 даны гистограммы модового состава aberrаций исходного ВФ (исходные формы волнового фронта удовлетворительно аппроксимируются многочленами пятого порядка) и ООК, из которых следует, что в структуре исходного волнового фронта aberrации низших порядков, в частности дефокусировка (за исключением наклонов, которые минимизировались при проведении экспериментов), являются основными, а в структуре ООК большую долю составляют aberrации высших порядков. Без учёта наклонов ООК ВФ составила $\sim 0,12$ мкм и, соответственно, статическая ошибка формы поверхности АЗ $\sim 0,06$ мкм.

Приведённые гистограммы наглядно иллюстрируют, что система эффективно компенсирует aberrации низших порядков (уменьшение RMS дефокусировки ~ 25 –50 раз), а в структуре ООК преобладающей является aberrационная ошибка высших порядков. Это объясняется тем, что зеркало проектировалось именно для компенсации aberrаций четвёртого порядка.

Следует также обратить внимание на вид интерферограмм ВФ после коррекции (см. рис. 2, b, d). В периферийной части чётко видна структура расположения приводов. Ясно также, что именно эта часть вносит основную долю в остаточную ошибку коррекции.

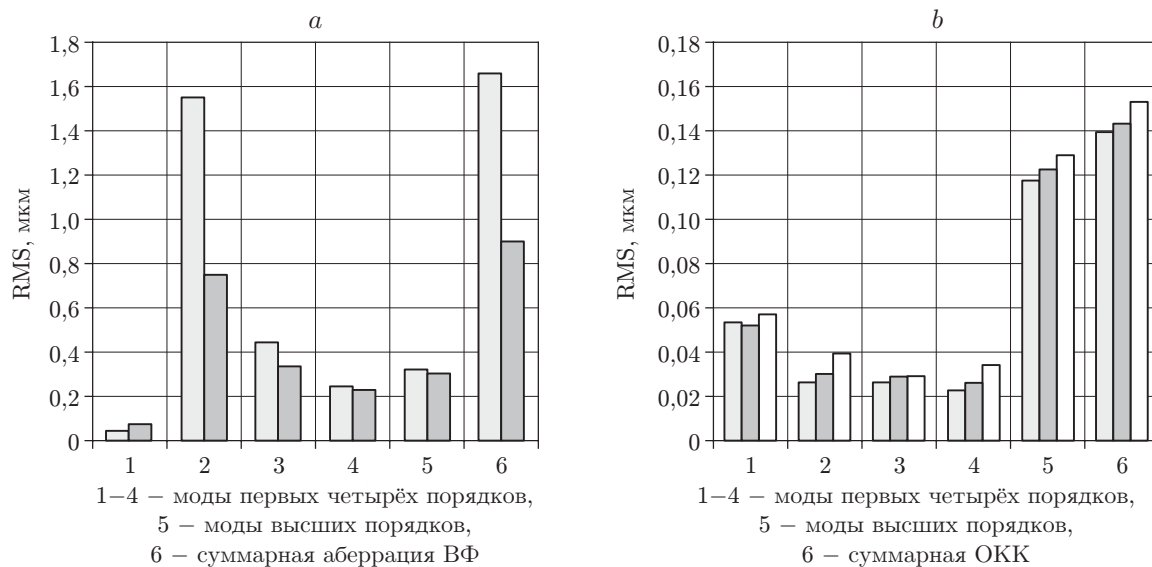


Рис. 3. Гистограммы модового состава aberrаций: *a* — исходного ВФ, *b* — ООК (серый цвет — максимальная дефокусировка, чёрный — средняя, белый — минимальная)

Для выяснения зависимости ООК от диаметра управляющей апертуры были проделаны специальные эксперименты, в которых последовательно уменьшали диаметр анализируемой апертуры и фиксировали для каждой апертуры максимальное и среднеквадратичное отклонения до (ВФ PV и ВФ RMS) и после (ООК PV и ООК RMS) коррекции. На рис. 4 приведены изменения параметров PV и RMS ООК для двух случаев исходного волнового фронта на диаметре 100 мм. Характерный вид интерферограмм приведён на рис. 2. Исходные aberrации обусловлены несовершенством оптических элементов и схемы. Увеличение амплитуды отклонений ВФ достигалось за счёт дефокусировки.

При сравнении рис. 4, *a* и *b* обращают на себя внимание практически одинаковые характеристики ООК при существенно различных параметрах исходных ВФ. Данное обстоятельство свидетельствует о реализации всех возможностей адаптивной системы (в постановке нашего эксперимента — о реализации возможностей АЗ) и её линейности в исследованном диапазоне параметров фазовых искажений.

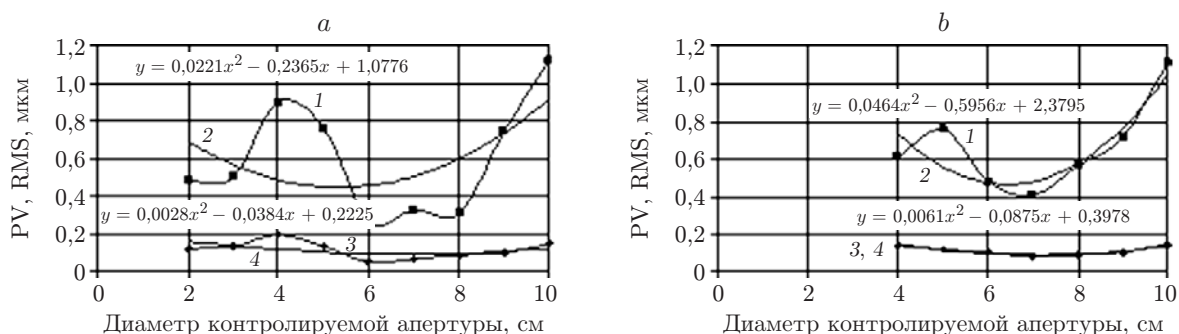


Рис. 4. Зависимости параметров ООК от диаметра контролируемой апертуры: *a* — PV = 3,5 мкм, RMS = 0,61 мкм; *b* — PV = 8,39 мкм, RMS = 1,63 мкм. Кривые 1 и 3 — ООК PV и ООК RMS (эксперимент), 2 и 4 — аппроксимация ООК PV и ООК RMS полиномом второй степени

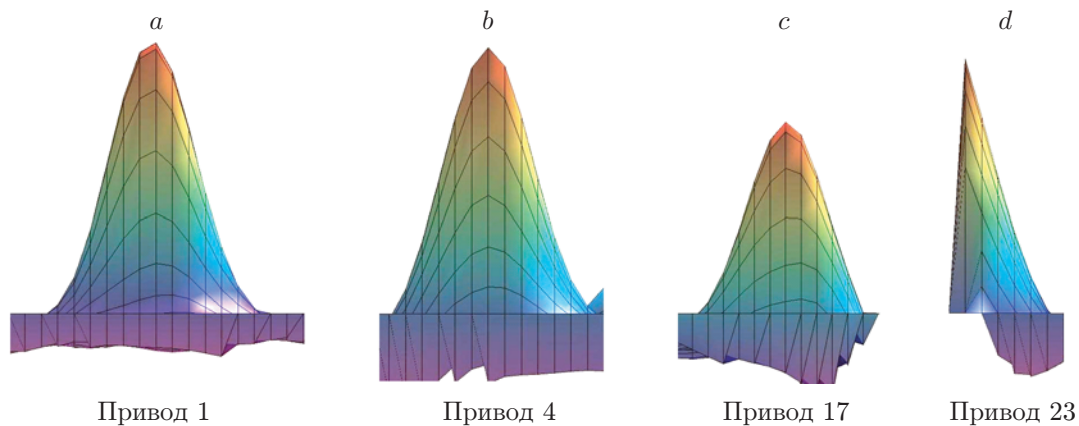


Рис. 5. Типичные функции отклика приводов: *a* — центрального, *b* — первого кольца, *c, d* — второго и третьего (периферийных) колец

На рис. 4 показаны также результаты аппроксимаций кривых полиномами второй степени. Видно, что в круге диаметром $\sim 0,75D$ остаточная ошибка коррекции (без наклонов) минимизируется на уровне 0,06 мкм ($\sim 0,03$ мкм для формы поверхности АЗ). На диаметре первого кольца приводов ООК не минимальна в силу того, что семи приводов не хватает на обработку aberrаций третьего и четвертого порядков. Наиболее эффективная коррекция происходит при диаметре контролируемого светового пятна, примерно равном диаметру второго кольца приводов (хотя 19 приводов недостаточно для эффективной обработки aberrаций четвертого порядка). При увеличении диаметра ООК возрастает, несмотря на то что порядок обработки модового состава фазовых искажений повышается. Такое поведение ООК объясняется тем, что, хотя анализируемое световое пятно ограничено вторым кольцом приводов, в управлении поверхностью задействованы все приводы. Увеличение ООК при дальнейшем возрастании диаметра является следствием краевых эффектов не закреплённой по периферии лицевой пластины АЗ. Типичные функции отклика приводов показаны на рис. 5.

В работе [5] при обсуждении АЗ фирмы "Xinetics" (США) указывается на необходимость наличия периферийного по отношению к активной области ряда приводов (241 привод находится в световой апертуре, 52 привода — внешнее кольцо — за её пределами). В этом случае функции отклика во внутренней области будут одинаковыми и статическая ошибка при коррекции ВФ таким зеркалом уменьшится. Полученные результаты явно указывают на то, что для минимизации ООК внешний по отношению к световой апертуре ряд приводов должен быть управляемым, а не пассивным. По-видимому, 241 привода зеркала фирмы "Xinetics" достаточно для достижения необходимого уровня ООК, а увеличение каналов управления не даёт адекватного уменьшения ООК. В нашем же случае «помощь» каждого кольца при управлении уменьшает ООК, так как увеличивается порядок компенсируемых aberrаций.

Заключение. В данной работе созданы методика и установка для изучения статической ошибки коррекции адаптивных зеркал. Анализ структуры статической остаточной ошибки коррекции aberrаций ВФ адаптивным зеркалом показал эффективную коррекцию фазовых aberrаций второго, третьего, четвертого порядков. Для полной световой апертуры на исследованном АЗ экспериментально получена ООК $\sim 0,12$ мкм, статическая ошибка формы поверхности АЗ составляет $\sim 0,06$ мкм. Кроме того, при уменьшении диаметра управляемой апертуры приблизительно до $0,75D$ ООК уменьшится вдвое ($\sim 0,06$ мкм), а точность обработки поверхностью АЗ достигнет $\sim 0,03$ мкм. Периферийное по отношению к световому пучку кольцо приводов при этом должно оставаться управляемым.

Полученные результаты подтверждают разработанную ранее теорию оптимального управления формой поверхности АЗ [3]. Следует заметить, что эта теория не учитывает краевых эффектов при деформации подложки АЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тараненко В. Г., Шанин О. И.** Адаптивная оптика в приборах и устройствах. М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2005. 416 с.
2. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики. М.: Наука, 1973. 856 с.
3. **Ляхов Д. М., Шанин О. И.** Оптимальное управление формой оптической поверхности гибкого зеркала // Изв. РАН. Сер. Физическая. 1995. **39**, № 6. С. 55–61.
4. **Пикулев С. В., Семенов В. В., Черных А. В. и др.** Испытания адаптивной оптической системы на модельной атмосферной турбулентной трассе // Автометрия. 2012. **48**, № 2. С. 67–75.
5. **Aldrich R. E.** Deformable mirror wavefront correctors // Adaptive Optics Engineering Handbook. N. Y.: Marsel Dekker, 2000. P. 151–197.

Поступила в редакцию 11 ноября 2011 г.
