

Численное моделирование фазовой коррекции аберраций лазерного излучения системой из двух адаптивных зеркал под управлением СПГ алгоритма

Д.А. Саламатин*

*Филиал Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в г. Сарове
Россия, 607750, г. Саров, ул. Парковая, д. 8*

(Поступила в редакцию 25.04.2023; подписана в печать 07.07.2023)

Проведено расчётно-теоретическое исследование работы адаптивной оптической системы с двумя последовательно расположенными 18-канальными адаптивными зеркалами размером $46 \times 56 \text{ мм}^2$ в рамках задачи коррекции фазовых аберраций лазерного пучка размером $15 \times 22 \text{ мм}^2$. Управление адаптивными зеркалами осуществлялось стохастическим параллельным градиентным алгоритмом. Для моделирования функций отклика адаптивных зеркал использовался набор из 36 функций Гаусса с шириной $d = 1.73 \text{ см}$. В качестве целевой функции алгоритма использовалась доля мощности в дифракционном угле. Рассмотрены два варианта работы системы, в первом из которых зеркала имеют общие блок управления и датчик целевой функции, а во втором каждое зеркало находится в своем независимом контуре. Подобные адаптивные оптические системы могут применяться для коррекции фазовых искажений излучения, обусловленных сильной турбулентностью атмосферы. Установлено, что эффективность коррекции фазовых аберраций такой адаптивной системой высока в случае независимых контуров при подаче на первое адаптивное зеркало относительно малых пробных случайных напряжений. Исследовано взаимное влияние адаптивных зеркал на работу друг друга в ходе коррекции.

PACS: 42.68.Bz

УДК: 535.8

Ключевые слова: адаптивная оптическая система, адаптивное зеркало, стохастический параллельный градиентный алгоритм, аберрации фазы, функции отклика.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность современных мощных лазерных установок определяется с одной стороны энергетическими характеристиками генерируемого излучения, с другой стороны оптическим качеством получаемого лазерного пучка, т.е. его угловой расходимостью и пространственной структурой. Основными источниками ухудшения оптического качества пучка являются статические и динамические аберрации. Первые возникают в результате неточностей изготовления оптических элементов, изменением со временем их оптических свойств, неточной юстировки оптических схем, неоднородности показателя преломления в «холодных» активных средах усилителей. Динамические аберрации имеют тепловую и газодинамическую природу и возникают при неоднородном нагреве активных элементов в результате их накачки и генерации излучения, а также при вибрациях конструктивных частей установки. Так же источником динамических аберраций является среда атмосферы, при прохождении через которую лазерный пучок приобретает динамические амплитудные и фазовые искажения. Без принятия специальных мер по улучшению качества излучения в подобных установках невозможно получить пучки, близкие к дифракционному пределу.

Основным источником улучшения оптического качества пучка является коррекция его волнового фронта средствами линейной адаптивной оптики [1]. Адаптив-

ные оптические системы являются неотъемлемой частью всех современных лазерных установок. Формируя в пучке излучения волновой фронт, сопряженный приобретённым фазовым искажениям, можно добиться максимального качества пучка, компенсируя оптические неоднородности трассы. В этом состоит подход коррекции волнового фронта адаптивным зеркалом [2]. Существует два принципиальных способа производства поверхности адаптивного зеркала. В первом способе [3] производится непосредственное измерение локальных градиентов волнового фронта излучения с последующим восстановлением поверхности волнового фронта адаптивным зеркалом и ее фазовым сопряжением. В состав адаптивных систем, работающих по такому принципу, входит датчик волнового фронта (ДВФ) Шака–Гартмана, регистрирующий фазовые градиенты корректируемого излучения. Второй способ [4] основан на максимизации определенного параметра, характеризующего оптическое качество излучения — целевой функции. Коррекция осуществляется посредством пробных изменений формы поверхности адаптивного зеркала и измерения отклика целевой функции, вызванного данными изменениями. При таком подходе не используется ДВФ, а для регистрации целевой функции применяются простейшие одноэлементные фотоприемники. Для управления адаптивным зеркалом, работающим по данному принципу пробных фазовых возмущений, могут использоваться различные алгоритмы, направленные на оптимизацию целевой функции. На вопрос, какой из методов компенсации аберраций адаптивными зеркалами лучше, однозначного ответа нет. В зависимости от условий, в которых работает адаптивная система, коррекция фазовых

* SarovSaint@yandex.ru

аббераций адаптивным зеркалом может производиться как с использованием ДВФ для измерения и последующего устранения фазовых градиентов, так и по методу пробных фазовых возмущений.

Цель данной работы заключается в расчётно-теоретическом исследовании коррекции фазовых aberrаций адаптивной оптической системой, состоящей из двух последовательно расположенных 18 канальных адаптивных зеркал ($46 \times 56 \text{ мм}^2$) под управлением стохастического параллельного градиентного (СПГ) алгоритма. Данная адаптивная система может использоваться для коррекции фазовых искажений излучения, обусловленных сильной турбулентностью атмосферы. При этом необходимо ответить на следующие принципиальные вопросы:

- коррекция быстрее и эффективнее с двумя зеркалами или с одним;
- зеркала должны работать независимо или иметь общий блок управления;
- насколько сильно влияет работа первого зеркала на работу второго зеркала.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И НАЧАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

1.1 Схема оптического тракта

Схема оптического тракта представлена на рис. 1. Излучение от задающего генератора (ЗГ) проходит через активную среду усилителя 1, в результате чего приобретает aberrации волнового фронта, которые затем компенсируются адаптивным зеркалом (АЗ) 2. Далее отраженное от АЗ излучение проходит через усилитель 3 и приобретенные aberrации компенсируются адаптивным зеркалом 4.

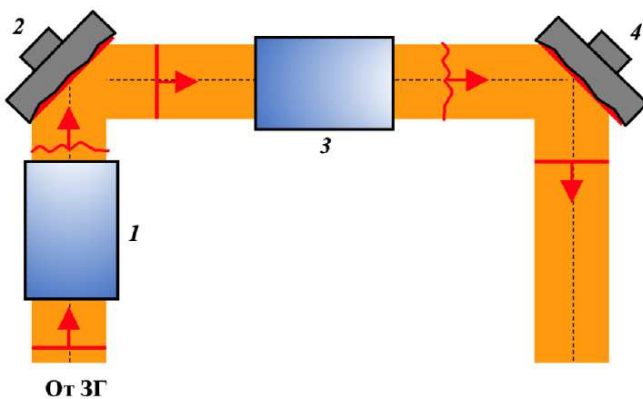


Рис. 1. Схема оптического тракта. 1 — первый усилитель, 2 — первое адаптивное зеркало, 3 — второй усилитель, 4 — второе адаптивное зеркало

1.2 Моделирование коррекции адаптивными зеркалами

Исследование работы адаптивной оптической системы, состоящей из двух последовательно расположенных адаптивных зеркал, проводилось в рамках следующей модели. В ближней зоне задавался прямоугольный пучок размером $D = 15 \times 22 \text{ мм}^2$ с единичной амплитудой и $A(x, y)$ и плоским волновым фронтом. Длина волны излучения $\lambda \sim 1 \text{ мкм}$. Далее пучок проходил через первый фазовый экран $\varphi_1(x, y)$ и отражался от первого адаптивного зеркала (АЗ1), затем проходил через второй фазовый экран $\varphi_2(x, y)$, отражался от второго адаптивного зеркала (АЗ2) и фокусировался линзой, в фокальной плоскости которой регистрировалось распределение интенсивности излучения. Фазовый экран φ , представленный на рис. 2, соответствует экспериментальным aberrациям, которые приобретает пучок, проходя через разогретый усилитель. При моделировании работы адаптивной системы фазовые экраны брались одинаковыми ($\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$).

Абберации волнового фронта принято характеризовать двумя параметрами: *peak to valley (PV)*, т.е. разность между максимальным и минимальным значением фазы φ и *root mean square (RMS)* — среднеквадратичное отклонение от плоского волнового фронта:

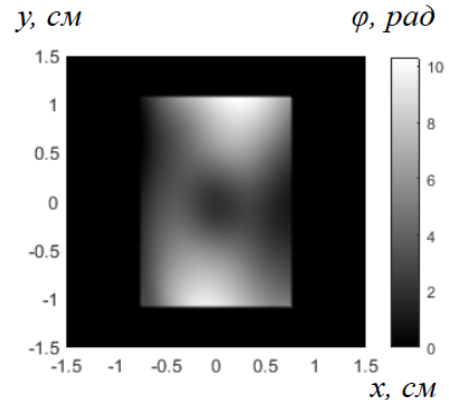


Рис. 2. Фазовый экран. $PV = 10.17 \text{ рад}$, $RMS = 2.23 \text{ рад}$

$$PV = \max(\varphi) - \min(\varphi), \quad (1)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n^2 - 1} \sum_{i,j} (\phi_{i,j} - \bar{\phi})^2}, \quad (2)$$

где $\bar{\phi} = \frac{1}{n^2} \sum_{i,j} \phi_{i,j}$ — среднее значение фазы, n — количество точек расчетной сетки.

При моделировании работы адаптивных зеркал считалось, что выполняется принцип пропорциональности и аддитивности: амплитуда деформации поверхности зеркала в области управляющего элемента (актюатора) строго пропорциональна приложенному на него напряжению и полная деформация поверхности зеркала

равна сумме амплитуд деформаций каждого актюатора. Тогда отражающую поверхность при заданном наборе коэффициентов управления адаптивным зеркалом $\{a_n\}$ можно представить в виде следующей линейной комбинации:

$$S(x, y) = \sum_{n=1}^N a_n g_n(x, y), \quad (3)$$

где $g_n(x, y)$ — функции отклика, описывающие отклонение отражающей поверхности от плоской формы, $N=18$ — количество актюаторов одного зеркала.

При отражении от зеркала фазовый фронт получает дополнительные искажения, равные $2kS(x, y)$. Здесь $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число.

В начале оптического тракта излучение с плоским фазовым фронтом имеет вид:

$$E_0 = A(x, y) \exp(i \cdot 0). \quad (4)$$

Тогда в результате прохождения через фазовые экраны и отражения от адаптивных зеркал излучение на выходе тракта можно представить как $E = E_0 \exp[i(\varphi_1 + \varphi_2) - 2ki(S_1 + S_2)]$, где S_1 и S_2 — отражающие поверхности АЗ1 и АЗ2 соответственно. Предполагаем, что расстояние от зеркала до линзы мало, и дополнительный набег фазы, связанный с этим, пренебрежимо мал. Тогда распределение поля в фокальной плоскости линзы согласно [5] с точностью до фазового множителя совпадает с распределением в дальней зоне и определяется через двумерное преобразование Фурье:

$$E(u, v) \sim \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_0(x, y) \times \exp[i(\varphi_1 + \varphi_2) - 2ki(S_1 + S_2)] \times \exp\left[-i\frac{k}{F}(xu + yv)\right], \quad (5)$$

здесь (u, v) — декартовы координаты в фокальной плоскости линзы, F — фокусное расстояние линзы. Интенсивность в фокальной плоскости пропорциональна квадрату амплитуды поля:

$$I(u, v) \sim |E(u, v)|^2. \quad (6)$$

Запишем с учетом (3)–(6) конечное выражение для интенсивности:

$$I(u, v) \sim \left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(x, y) \exp[i(\varphi_1 + \varphi_2)] \times \left\{ 2ki \left[\sum_{n=1}^N (a_n^{(1)} \cdot g_n^{(1)} + a_n^{(2)} \cdot g_n^{(2)}) \right] \right\} \times \exp\left[-i\frac{k}{F}(xu + yv)\right] dx dy \right|^2. \quad (7)$$

Таким образом, задача коррекции волнового фронта рассматриваемой адаптивной системой состоит в нахождении таких наборов управляющих коэффициентов

$\{a_n^{(1)}\}$ и $\{a_n^{(2)}\}$, при которых фаза пучка после прохождения оптического тракта $(\varphi_1 + \varphi_2) - 2k(S_1 + S_2)$ в максимальной степени приближается к плоской поверхности. Тогда осевая интенсивность скорректированного излучения становится максимальной.

1.3 Функции отклика 18 канальных адаптивных зеркал

Исследуемая адаптивная система состоит из двух последовательно расположенных одинаковых 18-канальных адаптивных зеркал, размером 46×56 мм². Схема расположения управляющих элементов адаптивного зеркала и положение пучка на зеркале (область с пунктирным контуром) представлены на рис. 3. Геометрия упаковки актюаторов гексагональная, расстояние между соседними актюаторами по горизонтали и вертикали — 1.2 см.

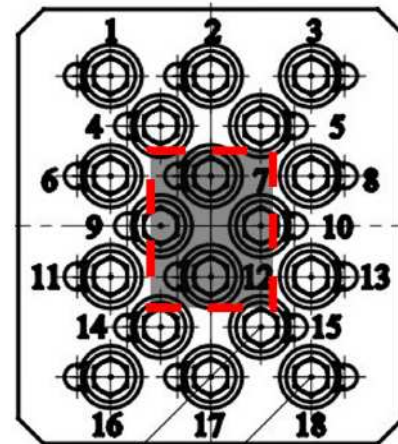


Рис. 3. Схема расположения управляющих элементов зеркала и положение пучка

Конкретный набор функций отклика актюаторов, полученный в ходе испытания зеркал на лабораторном стенде при напряжении 30 В, описывает отклонение поверхности зеркала в мкм. Максимально допустимое напряжение для рассматриваемых 18-канальных зеркал 120 В.

Пропись функции отклика 7-го актюатора АЗ1 по осям Ox и Oy , а также ее аппроксимация функцией Гаусса $h \sim \exp[-r^2/d^2]$ с параметром $d = 1.73$ см представлены на рис. 4.

В результате испытаний зеркал на лабораторном стенде установлено, что функции отклика остальных толкателей аналогичны функции отклика 7-го актюатора АЗ1. Поэтому в качестве базиса функций отклика был взят набор из 18 функций Гаусса с параметром $d = 1.73$ см для каждого из адаптивных зеркал. В дальнейшем данный набор использовался при моделировании фазового сопряжения, т.е. форма отражаю-

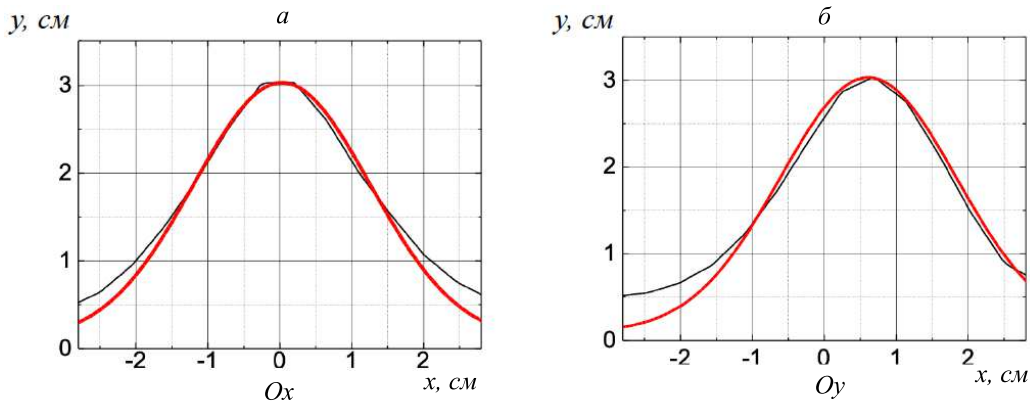


Рис. 4. Пропись и аппроксимация функции отклика 7-го толкателя по осям Ox (а) и Oy (б). Тонкие кривые — экспериментальная функция отклика, жирные кривые — функция Гаусса с параметром $d=1.73$ см

щих поверхностей адаптивных зеркал задавалась как линейная комбинация гауссовых функций отклика актюаторов.

2. СПГ АЛГОРИТМ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ИЗ ДВУХ АДАПТИВНЫХ ЗЕРКАЛ.

СПГ алгоритм является модернизированным алгоритмом стохастического параллельного градиентного спуска [6]. Модернизация заключается в уменьшении количества этапов алгоритма с трёх до двух и направлена на увеличение скорости сходимости алгоритма. Проведенная оптимизация подхода по уменьшению числа итераций и времени на выполнение одной итерации привела к простой схеме типа «предиктор-корректор». Эффективность СПГ алгоритма была рассчитано и экспериментально продемонстрирована в работах по динамической фазировке многоканального непрерывного лазерного излучения [7–9]. Моделирование работы АОС под управлением СПГ алгоритма в работе [10] показало существенное повышение эффективности коррекции волнового фронта излучения одной из действующих лазерных установок, по сравнению с использованием классического подхода управления адаптивной системой с помощью ДВФ.

2.1 Одноконтурная адаптивная система

Общая схема адаптивной системы, состоящей из последовательно расположенных 18-канальных адаптивных зеркал с общим блоком управления и одним датчиком интенсивности представлена на рис. 5. Лазерный пучок с плоским волновым фронтом проходит через фазовый экран 1, отражается от адаптивного зеркала 2, далее проходит через фазовый экран 3 и отражается от адаптивного зеркала 4. Затем пучок поступает на делитель 5 и небольшая часть излучения фокусируется линзой 6 на датчик интенсивности 7, где ре-

гистрируется целевая функция δP — мощность излучения, прошедшего через приосевую диафрагму по отношению к полной мощности пучка. Измеренное значение фиксируется компьютером 8, который затем с помощью блока управления 9 производит коррекционный шаг (итерацию) — небольшое изменение формы отражающих поверхностей зеркал. После коррекционного шага регистрируется новое значение δP и т.д., пока целевая функция не достигнет определенного значения согласно заданному критерию или не будет совершенно определенное количество итераций алгоритма.

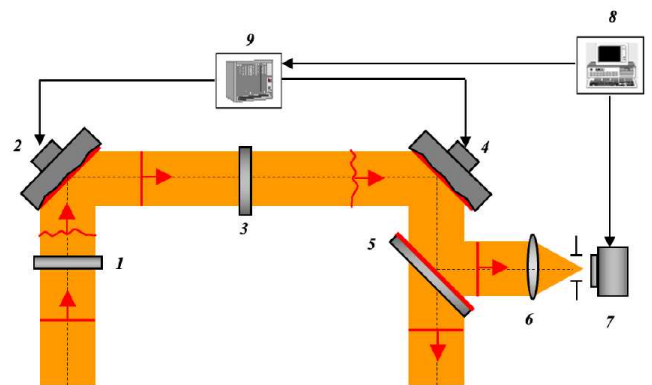


Рис. 5. Схема одноконтурной адаптивной системы: 1-первый фазовый экран, 2 — АЗ1, 3 — второй фазовый экран, 4 — АЗ2, 5 — делитель пучка, 6 — линза, 7 — датчик интенсивности, 8 — компьютер, 9 — блок управления зеркалами

2.2 Двухконтурная адаптивная система

Рассмотрим двухконтурную конфигурацию адаптивной системы, в которой у каждого зеркала имеются собственные блок управления и датчик интенсивности. Общая схема подобной системы представлена на рис. 6. Излучение проходит через фазовый экран 1 и отражается от адаптивного зеркала 2. Делитель

пучка 3 и линза 4 отводит часть излучения от АЗ1 на систему обратной связи с АЗ1, состоящую из датчика интенсивности 5, компьютера 6 и блока управления первым адаптивным зеркалом 7. Совокупность элементов 2–7 образуют первый адаптивный контур. Остальная часть пучка проходит через фазовый экран 8 и попадает во второй адаптивный контур, состоящий из адаптивного зеркала 9, делителя пучка 10, линзы 11, датчика интенсивности 12, компьютера 13 и блока управления вторым адаптивным зеркалом 14. Контуров работают независимо друг от друга.

На этапе «предиктор» первого контура к исходному набору напряжений на актюаторах АЗ1 добавляются малые величины ΔU_n в результате которых волновой фронт от первого фазового экрана после отражения от АЗ1 приобретает случайные искажения и поступает во второй контур. На этапе «корректор» первого контура поверхность АЗ1 приобретает «правильную» форму и волновой фронт поступает во второй контур уже с частично скомпенсированными аберрациями. Очевидно, что для эффективной работы адаптивной системы частота работы АЗ2 должна по крайней мере быть не меньше частоты работы АЗ1, иначе предискажения от АЗ1 не будут правиться во втором контуре.

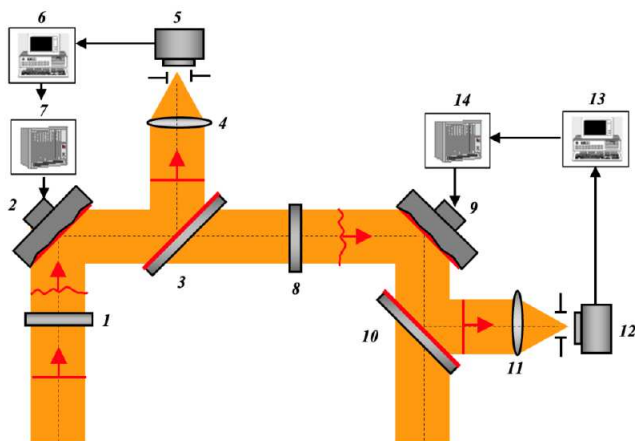


Рис. 6. Схема двухконтурной адаптивной системы: 1 — первый фазовый экран, 2 — АЗ1, 3 — первый делитель пучка, 4 — первая линза, 5 — первый датчик интенсивности, 6 — первый компьютер, 7 — блок управления АЗ1, 8 — второй фазовый экран, 9 — АЗ2, 10 — второй делитель пучка, 11 — вторая линза, 12 — второй датчик интенсивности, 13 — второй компьютер, 14 — блок управления АЗ2

В численном моделировании рассмотрены два режима работы двухконтурной адаптивной системы. В первом случае полагалось, что частоты работ АЗ1 и АЗ2 равны и второй адаптивный контур учитывает корректирующие поправки, вносимые первым контуром, т.е. АЗ2 учитывало корректирующие искажения от АЗ1. Тогда одну итерацию СПГ алгоритма можно представить в виде последовательности 4 этапов: «предиктор» и «корректор» для первого контура, «предиктор»

и «корректор» для второго контура.

Во втором случае частота работ АЗ1 и АЗ2 так же считались равными, но корректирующие искажения, вносимые первым зеркалом, не учитывались при работе второго, а добавлялись к волновому фронту на выходе адаптивной системы. В таком случае одна итерация представима в виде последовательности этапов: «предиктор» первого контура, «предиктор» второго контура, «корректор» второго контура, «корректор» первого контура. Данный режим работы рассматривался для исследования влияния работы АЗ1 на работу АЗ2.

Результат работы двухконтурной адаптивной системы по СПГ коррекции аберраций от двух фазовых экранов с учетом корректирующих искажений АЗ1, а так же сравнение с одноконтурной реализацией представлены на рис. 7. Видно, что эффективность коррекции высока для двухконтурной адаптивной системы и целевая функция в данном случае достигает значения $\delta P = 0.37$ за 2000 итераций. Распределения интенсивностей пучка до и после коррекции с учетом корректирующих искажений АЗ1 представлены на рис. 8. Также рассмотрен случай, когда используется только одно адаптивное зеркало АЗ2 для компенсации фазовых аберраций от двух экранов, а АЗ1 считается плоским (пунктирная кривая на рис. 7). В целом результаты СПГ коррекции одним зеркалом ниже, чем двумя зеркалами в любой из рассмотренных конфигураций.

2.3 Влияние АЗ1 на работу АЗ2

Рассмотрим вопрос влияния первого адаптивного зеркала на работу второго адаптивного зеркала в рамках двухконтурной системы. Будем считать, что оба адаптивных зеркала работают с одинаковой частотой, и на каждой итерации второго контура в него приходят, например, пробные искажения от АЗ1 из первого контура. При этом во втором контуре целевая функция вычисляется с учетом случайных искажений АЗ1, а поправки вычисляются СПГ алгоритмом с учетом только собственных случайных искажений второго контура. На рис. 9 показано изменение целевой функции δP в процессе выполнения итераций СПГ алгоритма при значениях амплитуды случайных напряжений, подаваемых на актюаторы АЗ1 $\Delta U_0 = 0.5$ В и $\Delta U_0 = 2$ В. Напряжение $\Delta U_0 = 2$ В, подаваемое на один толкатель соответствует возмущению поверхности адаптивного зеркала с $PV = 0.2$ мкм.

Пунктирной кривой на рис. 9 показана работа адаптивной системы в приближении, что случайные искажения АЗ1 не попадают во второй контур. Из графиков видно, что подача на толкатели АЗ1 случайных напряжений с амплитудой $\Delta U_0 \geq 0.5$ В приводит к заметному снижению эффективности работы адаптивной системы с двумя независимыми адаптивными зеркалами. При $\Delta U_0 = 2$ В целевая функция снижается с максимального значения $\delta P = 0.37$ до уровня $\delta P = 0.20$,

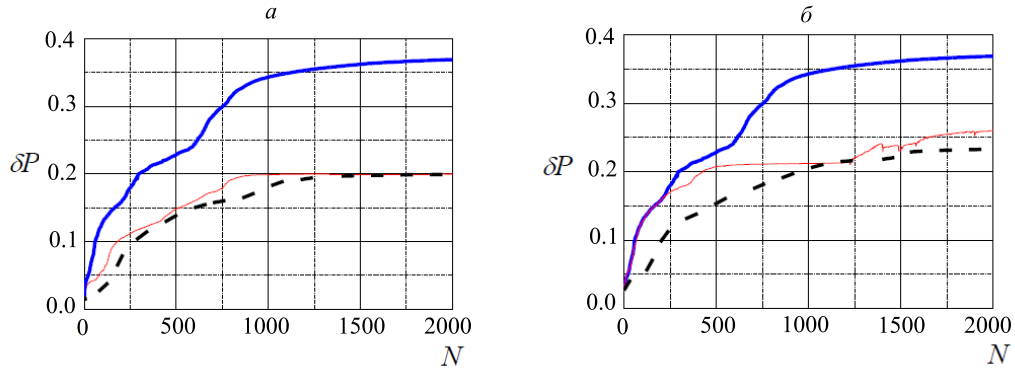


Рис. 7. Динамика СПГ коррекции пучка при прохождении двух фазовых экранов в двухконтурной адаптивной системе с учетом корректирующих искажений А31: *а* — $\Delta U_0 = 0.01$ В, *б* — $\Delta U_0 = 0.1$ В. Тонкие кривые — одноконтурная система, толстые кривые — двухконтурная система с учетом искажений А31, пунктирные кривые — коррекция только А32

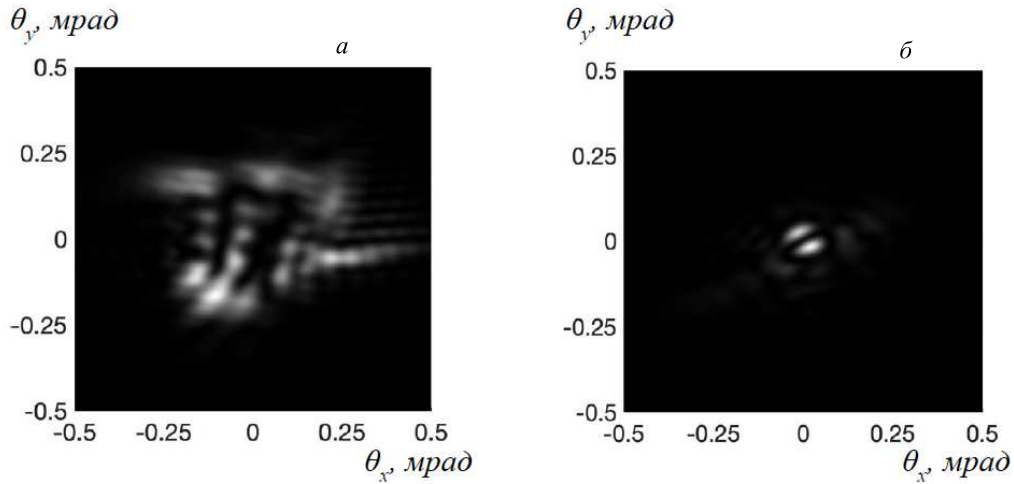


Рис. 8. Распределение интенсивности в дальней зоне до (*а*) и после (*б*) СПГ коррекции в двухконтурной адаптивной системе с учетом предискажений от А31: *а* — $\delta P = 0.02$, $St = 0.03$; *б* — $\delta P = 0.37$, $St = 0.16$

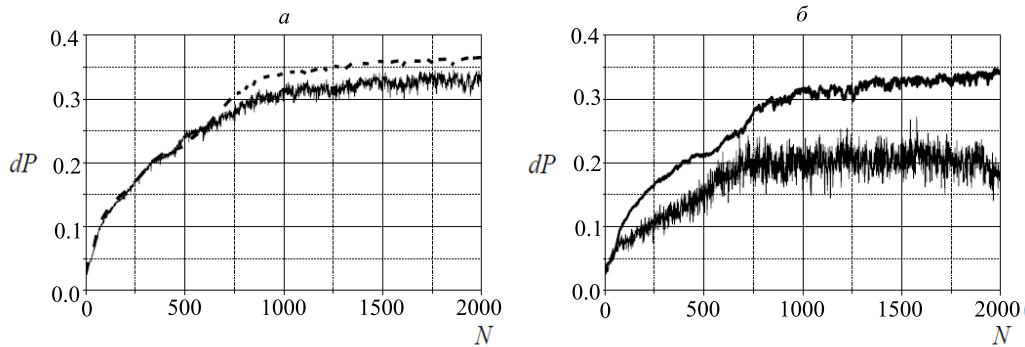


Рис. 9. Влияние пробных искажений А31 на работу А32 в двухконтурной адаптивной системе: *а* — $\Delta U_0 = 0.5$ В, *б* — $\Delta U_0 = 2$ В; Сплошные кривые — с учетом искажений от А31, пунктирные кривые — без учета искажений от А31

при этом также ухудшается работа адаптивной системы в приближении, что случайные искажения А31 не попадают во второй контур. Следует отметить, что при

$\Delta U_0 \leq 0.1$ В искажения А31 практически не влияют на работу второго контура (тонкая кривая на рис. 9, а).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование эффективности коррекции фазовых аберраций лазерного излучения адаптивной оптической системой с двумя последовательно расположенными адаптивными зеркалами под управлением СПГ алгоритма. Целевой функцией СПГ алгоритма являлась доля мощности пучка δP в дифракционном угле. Получены следующие результаты:

1. Эффективность коррекции фазовых аберраций такой адаптивной системы высока при использовании независимых адаптивных зеркал и подаче на первое адаптивное зеркало случайных напряжений $\Delta U_0 \leq 0.1$ В. При $\Delta U_0 \leq 0.1$ В первое адаптивное зеркало практически не влияет на работу второго.
2. Использовать конфигурацию адаптивной опти-

ческой системы с общим блоком управления адаптивными зеркалами нецелесообразно — в этом случае эффективность коррекции аберраций практически такая же, как и при использовании системы с единственным адаптивным зеркалом.

3. В рассмотренной задаче с помощью независимого управления двумя адаптивными зеркалами с помощью СПГ алгоритма возможно увеличение доли мощности пучка в дифракционном угле со значения $\delta P = 0.02$ до $\delta P = 0.35$ за 1000 итераций СПГ алгоритма.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект «Физика высоких плотностей энергии. Этап 2023–2025»).

-
- [1] Лукин В.П. // УФН. **184**, № 6. 599. (2014).
 - [2] Лукин В.П. Применения технологий адаптивной оптики для расширения возможностей оптико-электронных систем. Интрерэкспо ГЕО–Сибирь, Т. 8, С. 115-138. 2019.
 - [3] Hardy J.H. Adaptive Optics for Astronomical Telescopes. N.Y.: Oxford University Press, 1998.
 - [4] Tyson R.K. Principle of Adaptive Optics. Academic Press, 1991.
 - [5] Гудмен Дж.В. Введение в фурье-оптику. М.: Мир, 1970.
 - [6] Roddier F. Adaptive Optics in Astronomy. Cambridge University, 1999.
 - [7] Garanin S.G., Manachinsky A.N., Starikov F.A., Khokhlov S.V. // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. **48**. N 2. 134. (2012).
 - [8] Vorontsov M.A., Carhart G.W. // Opt. Lett. **22**, N 12. 907. (1997).
 - [9] Vorontsov M.A., Sivokon V.P. // J. Opt. Soc. Amer. **15**, N 10. 2745. (1998).
 - [10] Гаранин С.Г., Голубев А.И., Повышев В.М., Стариков Ф.А., Шнягин Р.А. // Оптика атмосферы и океана. **26**, № 5. 427. (2013).

Numerical simulation of correction of phase aberrations of laser radiation by means of two adaptive mirrors under the SPG algorithm control

D.A. Salamatin

Sarov branch of Lomonosov Moscow State University, Nizhny Novgorod region, Sarov, 607750, Russia
E-mail: SarovSaint@yandex.ru

The numerical simulation of adaptive system operation with two sequentially located 18-channel adaptive mirrors with size of 46x56 mm² in the problem of the phase correction of the laser beam in size of 15x22 mm² has been carried out. The control of the adaptive mirrors has been realized by the stochastic parallel gradient algorithm. A set of 36 Gaussian functions with a width $d=1.73$ cm was used to model the response functions of adaptive mirrors. The radiation power within the diffraction angle is the criterion functional of the algorithm. Two variants of system operation have been considered: in the first variant the mirrors have the joint control unit and the criterion functional sensor, and in the second variant each mirror is situated in the independent contour. The similar adaptive systems can be applied to the correction of phase distortions of the radiation caused by strong turbulence of the atmosphere. It is shown, that the efficiency of correction of phase aberrations by such adaptive system is high in the case of the independent contours at supplying on the first adaptive mirror relatively small stochastic voltages. The mutual influence of adaptive mirrors on each other's work during correction is investigated.

PACS: 42.68.Bz.

Keywords: adaptive optical system, adaptive mirror, stochastic parallel gradient descent algorithm, phase aberrations, response function.

Received 25 April 2023.

Сведения об авторе

Саламатин Дмитрий Александрович — студент 1-ого курса магистратуры; e-mail: SarovSaint@yandex.ru.