

КОРРЕКЦИЯ АБЕРРАЦИЙ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АДАПТИВНЫМ ЗЕРКАЛОМ ПОД УПРАВЛЕНИЕМ СТОХАСТИЧЕСКОГО ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ГРАДИЕНТНОГО АЛГОРИТМА

*Саламатин Дмитрий Александрович (oefimova@otd13.vniief.ru),
Стариков Федор Алексеевич, Шнягин Роман Анатольевич*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Работу, как непрерывных лазерных систем, так и мощных импульсных лазерных установок, трудно представить без входящей в их состав адаптивной оптики [1], обеспечивающей на выходе системы лазерное излучение с требуемыми оптическими параметрами. При этом в ряде задач лазерной техники [2], требуется использование пучков с малой угловой расходимостью и однородной пространственной структурой. Поэтому качественная задача компенсаций aberrаций лазерного излучения средствами линейной адаптивной оптики является актуальной.

Распространенным методом повышения оптического качества лазерного излучения является компенсация фазовых искажений адаптивным зеркалом [3]. Идея данного метода заключается в придании адаптивному зеркалу поверхности, максимально сопряженной поверхности волнового фронта корректируемого излучения. В случае идеальной коррекции поверхность зеркала представляет точное фазовое сопряжение поверхности волнового фронта корректируемого пучка и после отражения пучок приобретает плоский волновой фронт. При этом существует два принципиальных способа воспроизводства поверхности адаптивного зеркала. В первом способе [4] производится непосредственное измерение локальных градиентов волнового фронта корректируемого 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 [5] основан на максимизации определенного параметра, характеризующего оптическое качество корректируемого 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 [5], направленные на оптимизацию целевой функции. На вопрос, какой способ работы адаптивных зеркал лучше, однозначного ответа нет. В зависимости от условий, в которых работает адаптивная система, коррекция фазовых aberrаций адаптивным зеркалом может производиться как использованием ДВФ для измерения и последующего устранения фазовых градиентов, так и по методу пробных фазовых возмущений.

В настоящей работе проводится расчетно-теоретическое исследование эффективности работы 18 элементного адаптивного зеркала, размером $46 \times 56 \text{ мм}^2$ под управлением стохастического параллельного градиентного [6] (СПГ) алгоритма в рамках задачи коррекции фазовых aberrаций лазерного пучка апертурой $15 \times 22 \text{ мм}^2$ методом пробных фазовых возмущений.

Постановка задачи и начальные данные

Численное моделирование работы адаптивного зеркала проводилось при следующих начальных данных. В ближней зоне задавался прямоугольный пучок размером $D = 15 \times 22 \text{ мм}^2$ единичной амплитуды $A(x, y)$ и характерным волновым фронтом $\varphi(x, y)$, полученным в эксперименте. Ампли-

туда и волновой фронт исходного пучка представлены на рис. 1. Длина волны излучения $\lambda \sim 1$ мкм. Для характеристики aberrаций волнового фронта использовались параметры PV (peaktovalley, т. е. разность между максимальным и минимальным значением фазы φ) и RMS (rootmeansquare – среднеквадратичное отклонение от плоского волнового фронта).

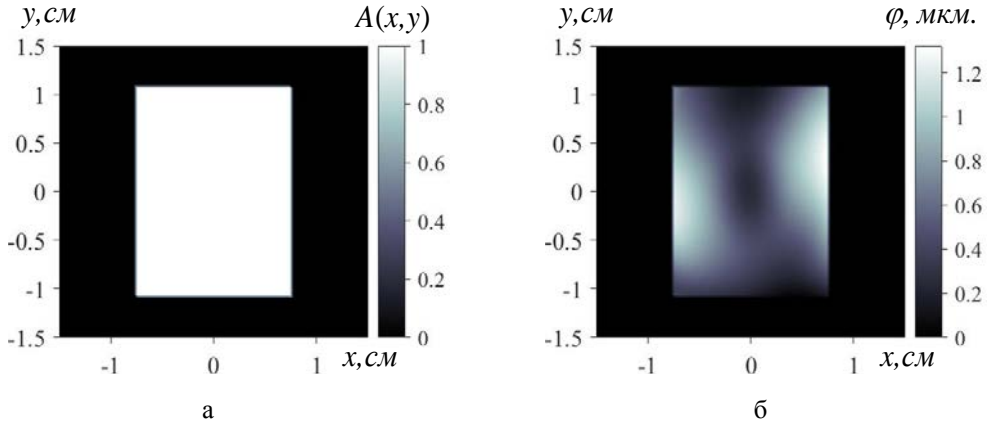


Рис. 1. Пучок в ближней зоне: а – амплитуда $A(x, y)$, б – волновой фронт $\varphi(x, y)$; параметры волнового фронта: $PV = 1,2786$ мкм, $RMS = 0,2846$ мкм

Далее пучок отражался от адаптивного зеркала и фокусировался линзой, в фокальной плоскости которой регистрировалось распределение интенсивности скорректированного излучения.

Отражающую поверхность зеркала $S(x, y)$ в численной модели можно представить в виде линейной комбинации функций отклика адаптивного зеркала $g_n(x, y)$:

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

где $\{a_n\}$ – коэффициенты управления актюаторами адаптивного зеркала.

При отражении от зеркала фазовый фронт получает дополнительные искажения, равные $2 \cdot k \cdot S(x, y)$. Здесь $k = 2\pi / \lambda$ – волновое число. Пусть на зеркало падает излучение:

$$E_0(x, y) = A(x, y) \cdot \exp(i\varphi(x, y)), \quad (2)$$

где $A(x, y)$ – амплитуда, $\varphi(x, y)$ – фаза волны. Тогда отраженное излучение можно записать в виде $E_0(x, y) \cdot \exp[i \cdot 2 \cdot k \cdot S(x, y)]$. Предполагалось, что расстояние от зеркала до линзы мало, и дополнительный набег фазы, связанный с этим, пренебрежимо мал. Тогда распределение интенсивности излучения в фокальной плоскости линзы согласно [7]:

$$I(u, v) \sim \left| \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} A(x, y) \cdot \exp[i\varphi(x, y)] \cdot \exp\left\{i \sum_{n=1}^N 2 \cdot k \cdot a_n \cdot g_n(x, y)\right\} \cdot \exp\left[-i \frac{k}{F}(xu + yv)\right] dx dy \right|^2, \quad (3)$$

здесь (u, v) – декартовы координаты в фокальной плоскости линзы, F – фокусное расстояние линзы.

Таким образом, задача коррекции волнового фронта в рамках данной модели заключается в нахождении такого набора коэффициентов $\{a_n\}$, при котором фаза отраженного пучка $2 \cdot k \cdot a_n \cdot g_n(x, y) + \varphi(x, y)$ в максимальной степени приближается к плоской поверхности. Тогда осевая интенсивность скорректированного пучка будет максимальной.

Анализ экспериментально измеренных функций отклика 18-элементного адаптивного зеркала показал, что они с высокой степенью точности описываются функцией Гаусса $g(r) \sim e^{-r^2/r_0^2}$ с параметром $r_0 = 1,73$ см. Поэтому при моделировании работы адаптивного зеркала в качестве его функций отклика использовался набор из 18 функций Гаусса.

Оценка эффективности коррекции по методу наименьших квадратов

Для определения предельных возможностей адаптивного зеркала по устранению конкретных фазовых aberrаций, коэффициенты управления $\{a_n\}$ необходимо подбирать таким образом, чтобы волновой фронт скорректированного излучения был максимально приближен к плоскому. Для соответствующей подгонки коэффициентов можно использовать метод наименьших квадратов (МНК) [8,9], суть которого заключается в минимизации квадратов отклонений подгоняемой поверхности адаптивного зеркала от исходного волнового фронта. Оценка эффективности коррекции aberrаций представленного волнового фронта 18 элементным адаптивным зеркалом, проведенная по МНК [9], показала, что возможно получить скорректированный пучок с числом Штреля $St = 0,81$, и расходимостью по уровню 81,5 % энергии равной 2,0 дифракционным углам. Доля энергии в дифракционном размере пучка при этом составляет $\delta P_{diff.} = 0,64$. Картины пространственного распределения интенсивности в дальней зоне для исходного, скорректированного по МНК и идеального пучков представлены на рис. 2. Распределение интенсивности скорректированного по МНК пучка характеризуется наличием ярко выраженного центрального пика, визуально слабо отличающегося от дифракционного пятна.

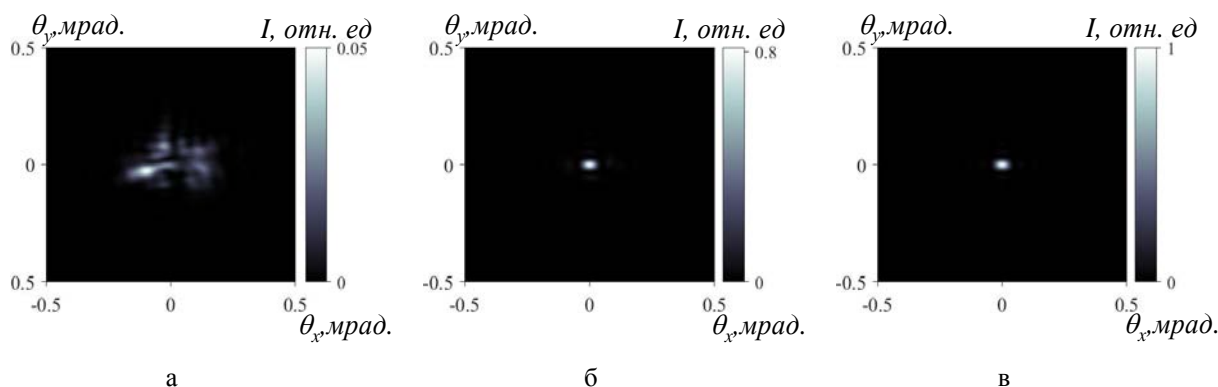


Рис. 2. Картины распределения интенсивности в дальней зоне: а – для исходного пучка ($St = 0,05$, $\delta P_{diff.} = 0,10$); б – для скорректированного по МНК пучка ($St = 0,81$, $\delta P_{diff.} = 0,64$); в – для идеального пучка ($St = 1,00$, $\delta P_{diff.} = 0,81$)

Согласно критерию Марешала [10], качество фазовой коррекции пучка находится на высоком уровне при $St > 0,80$. Таким образом, исследуемое 18 элементное адаптивное зеркало позволяет получить скорректированный пучок с высоким оптическим качеством. Расходимость излучения по уровню 81,5 % энергии уменьшается с 3,7 до 2,0 дифракционных углов.

СПГ алгоритм для управления адаптивным зеркалом

В данной работе для управления адаптивным зеркалом был выбран СПГ алгоритм, особенность которого заключается в одновременной оптимизации целевой функции по всем степеням свободы системы. СПГ алгоритм является модернизированным алгоритмом стохастического параллельного градиентного спуска [6].

Принципиальная схема управления адаптивным зеркалом посредством СПГ алгоритма представлена на рис. 3. На адаптивное зеркало 1 падает лазерный пучок с неоднородным волновым фронтом, и, отражаясь, поступает на делитель 2. Небольшая часть пучка фокусируется линзой 3 на датчик сигнала 4, где регистрируется целевая функция алгоритма J . Значение целевой функции фиксируется компьютером 5, который затем, с помощью блока управления 6 производит коррекционный шаг (итерацию) – небольшое изменение формы отражающей поверхности зеркала. После коррекционного шага регистрируется новое значение J и т. д., пока целевая функция не достигнет определенного значения согласно заданному критерию или не будет совершено определенное количество итераций алгоритма.

К достоинствам СПГ алгоритма в рамках данной задачи можно отнести использование в качестве датчика сигнала простейшего одноэлементного фотоприёмника, измерение интегральных характеристик излучения, и как следствие, меньшую чувствительность к шумам по сравнению с системами, где используется ДВФ, возможность работы со слабым сигналом и с сильно модулированным распределением интенсивности, а также нечувствительность алгоритма к нестабильности функций отклика адаптивного зеркала в ходе коррекции.

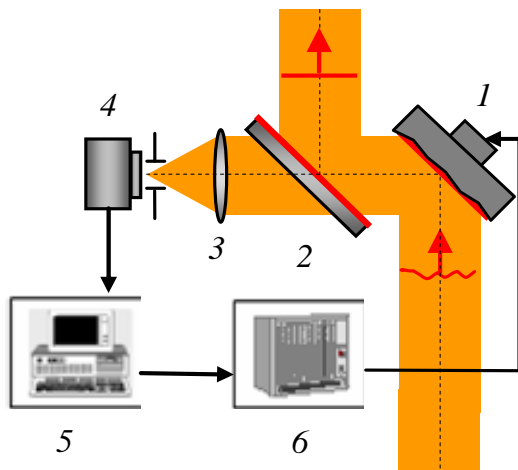


Рис. 3. Схема управления адаптивным зеркалом

Одна итерация СПГ алгоритма состоит из двух этапов: «предиктор» и «корректор». Пусть в результате выполнения n -й итерации к толкателям зеркала применен набор управляющих электрических напряжений $\{U_n\}$, и на датчике 4 фиксируется значение целевой функции J_n . Этап «предиктор» $(n + 1)$ -й итерации начинается с одновременной подачи набора малых напряжений $\{\Delta U_n\}$ на актюаторы зеркала. Результирующие напряжения на толкателях приобретают вид:

$$\{U'_{n+1}\} = \{U_n\} + \{\Delta U_n\}, \quad (4)$$

Целевая функция так же изменяется и становится равной J'_{n+1} . Набор малых напряжений $\{\Delta U_n\}$ разыгрывался среди значений $\pm\Delta U_n$ с одинаковыми вероятностями. Конечным шагом этапа «предиктор» является вычисление вызванного добавкой $\{\Delta U_n\}$ изменения целевой функции:

$$\Delta J_n = J'_{n+1} - J_n. \quad (5)$$

На этапе «корректор» $(n + 1)$ -й итерации к начальному набору $\{U_n\}$ прибавляется добавочный набор напряжений, пропорциональный $\Delta J_n/J_n^\sigma$:

$$\{U_{n+1}\} = \{U_n\} + (2\gamma\Delta J_n/J_n^\sigma)\{\Delta U_n\}, \quad (6)$$

где σ и γ – положительные константы

Таким образом, корректирующая добавка к набору напряжений $\{U_n\}$ пропорциональна величине $|\Delta J_n|$, а направление «движения» задается знаком ΔJ_n . Если $\Delta J_n > 0$, то добавка напряжений $\{\Delta U_n\}$ оказалась успешной и процесс поиска максимума целевой функции движется в нужном направлении. Параметр γ при этом контролирует темп сходимости. Если $\Delta J_n < 0$, то выбранная добавка, вообще говоря, оказалась неудачной, но т. к. величина $(2\gamma\Delta J_n/J_n^\sigma)\{\Delta U_n\}$ в формуле (6) имеет другой знак, то можно надеяться, что шаг в «противоположном» направлении окажется удачным. Наиболее быстрая сходимость целевой функции наблюдается, когда величина σ близка к единице.

В работе [6] показано, что для достижения наилучшей сходимости J необходимо пользоваться малыми значениями добавочных напряжений. Но нижний порог ΔU_0 ограничен как возможностью реализации малых напряжений на актюаторах зеркала в ходе эксперимента, так и способностью регистрирующей аппаратуры на фоне шумов фиксировать изменение целевой функции, вызванное малыми напряжениями $\{\Delta U_n\}$. Максимальное значение $\Delta U_0 = 0,2$ В определено из условия, что набег фазы, приобретаемый пучком после отражения от зеркала, на элемент которого подано такое напряжение, не должен превышать значение $\pi/10$ рад. Считается, что данное условие обеспе-

чивает стабильную работу адаптивного зеркала под управлением СПГ алгоритма. С учетом данных граничных условий, накладываемых на напряжения ΔU_0 , для исследования СПГ коррекции 18 элементным адаптивным зеркалом были выбраны значения $\Delta U_0 = 0,01$ В и $\Delta U_0 = 0,1$ В.

Параметр γ имеет подлежащий определению оптимум γ_{opt} по требуемому числу итераций или значению целевой функции при фиксированном уровне возмущений ΔU_0 .

Целевая функция СПГ алгоритма в виде осевой яркости пучка

Рассмотрим работу СПГ алгоритма с целевой функцией $J = St = Q/Q_0$, где Q – осевая яркость корректируемого пучка в фокальной плоскости линзы, Q_0 – осевая яркость пучка с плоским волновым фронтом в фокальной плоскости. На рис. 4 изображена динамика изменения числа Штреля St и доли энергии в дифракционном размере пучка δP_{difr} при фазовой СПГ коррекции с малыми напряжениями $\Delta U_0 = 0,01$ В. Усреднение производилось по 100 статистическим реализациям коррекции. Из рисунка видно, что число Штреля увеличивается с начального значения $St = 0,05$ до уровня $St = 0,30$ за $N = 2000$ итераций алгоритма. Доля энергии в дифракционном размере пучка при этом с начального значения $\delta P_{\text{difr}} = 0,10$ возрастает до уровня $\delta P_{\text{difr}} = 0,27$. При использовании напряжений $\Delta U_0 = 0,1$ В и в результате совершения такого же количества итераций алгоритма получается пучок с параметрами $St = 0,29$ и $\delta P_{\text{difr}} = 0,27$.

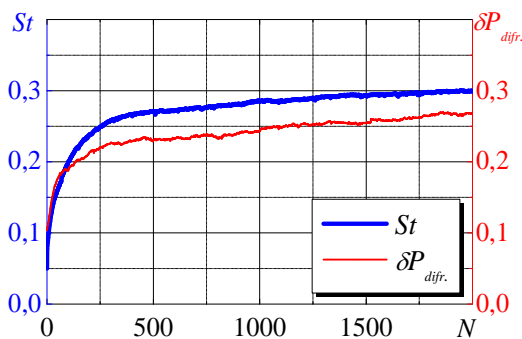


Рис. 4. Динамика изменения параметров St и δP_{difr} в ходе СПГ коррекции при целевой функции в виде осевой яркости пучка и $\Delta U_0 = 0,01$ В, $\gamma_{\text{opt}} = 1800$

На рис. 5,а представлено пространственное распределение интенсивности пучка в дальней зоне после СПГ коррекции. Визуально у скорректированного пучка отчетливо наблюдается спекл-структура. На рис. 5,б показано угловое распределение энергии δP в исходном пучке, а также в скорректированных по МНК и СПГ пучках. Расходимость СПГ пучка по уровню 81,5 % энергии составляет 3,4 дифракционных углов, что на 70 % хуже расходимости пучка, скорректированного по МНК.

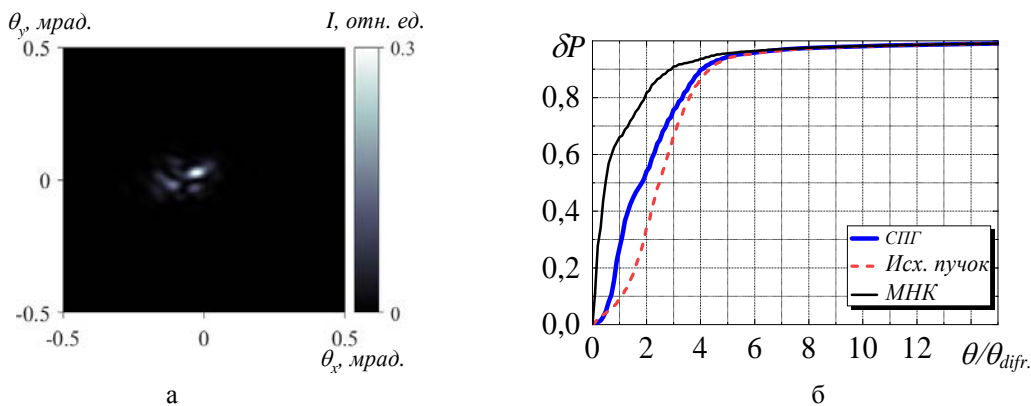


Рис. 5. Результат СПГ коррекции пучка при целевой функции в виде осевой яркости пучка и $\Delta U_0 = 0,01$ В, $\gamma_{\text{opt}} = 1800$; а – распределение интенсивности в дальней зоне ($St = 0,30$, $\delta P_{\text{difr}} = 0,27$), б – угловое распределение энергии пучка ($\theta = 3,4 \cdot \theta_{\text{difr}}$).

Таким образом, при коррекции 18 элементным адаптивным зеркалом под управлением СПГ алгоритма с целевой функцией в виде осевой яркости пучка получается излучение с довольно низким оптическим качеством. Параметры скорректированного таким образом пучка далеки от предельно достижимых параметров, определенных по МНК.

Целевая функция СПГ алгоритма в виде доли мощности в угле

Теперь рассмотрим в качестве целевой функции алгоритма параметр $J=P/P_0$, где P – мощность корректируемого пучка в пределах приосевой диафрагмы D_p , расположенной в фокальной плоскости линзы; P_0 – мощность пучка с плоским волновым фронтом в данной диафрагме. Результаты исследования эффективности СПГ коррекции в зависимости от конфигурации приосевой диафрагмы представлены в таблице. Применялись диафрагмы прямоугольной и круглой формы. Установлено, что наилучшее качество коррекции достигается при круглой диафрагме с диаметром $d_{cp.}$, равным среднему дифракционному размеру пучка в дальней зоне: $d_{cp.} = \frac{1}{2}(d_x + d_y)$.

Результаты СПГ коррекции при различных конфигурациях приосевой диафрагмы

Прямоугольная диафрагма D_p	St	$\delta P_{difr.}$	θ/θ_{difr} по уровню 81,5 % энергии	Круглая диафрагма диаметра D_p	St	$\delta P_{difr.}$	θ/θ_{difr} по уровню 81,5 % энергии
Дифракционный размер $D_p=d$	0,53	0,49	2,8	$D_p = d_{cp.}$	0,60	0,51	2,5
$D_p = 0,5d$	0,32	0,35	3,6	$D_p = d_x$	0,57	0,50	2,7
$D_p = 1,5d$	0,39	0,46	3,1	$D_p = d_y$	0,38	0,42	2,9

На рис. 6 представлена динамика изменения параметров пучка St и $\delta P_{difr.}$ в ходе совершения СПГ коррекции с круглой приосевой диафрагмой диаметра $D_p=d_{cp.}$ и малыми напряжениями $\Delta U_0 = 0,01$ В. В результате совершения $N = 2000$ итераций алгоритма число Штреля достигает значения $St=0,60$, а доля энергии пучка в дифракционном размере становится равной $\delta P_{difr.} = 0,51$. В случае СПГ коррекции при $\Delta U_0 = 0,1$ В и $\gamma_{opt} = 60$ параметры скорректированного пучка: $St = 0,59$ и $\delta P = 0,50$.

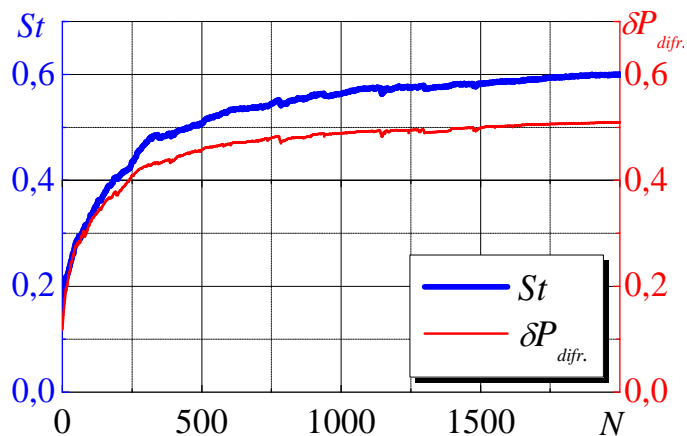


Рис. 6. Динамика изменения параметров St и $\delta P_{difr.}$ в ходе СПГ коррекции при целевой функции в виде доли мощности в угле и $\Delta U_0 = 0,01$ В, $\gamma_{opt} = 9600$

Результаты СПГ коррекции с круглой приосевой диафрагмой диаметра d_{cp} показаны на рис. 7. В дальней зоне скорректированного излучения наблюдается узкий пик высокой интенсивности. Расходимость пучка после коррекции по уровню 81,5 % энергии составляет 2,5 дифракционных углов, что на 25 % хуже предельно-достижимой расходимости, которую можно получить данным адаптивным зеркалом.

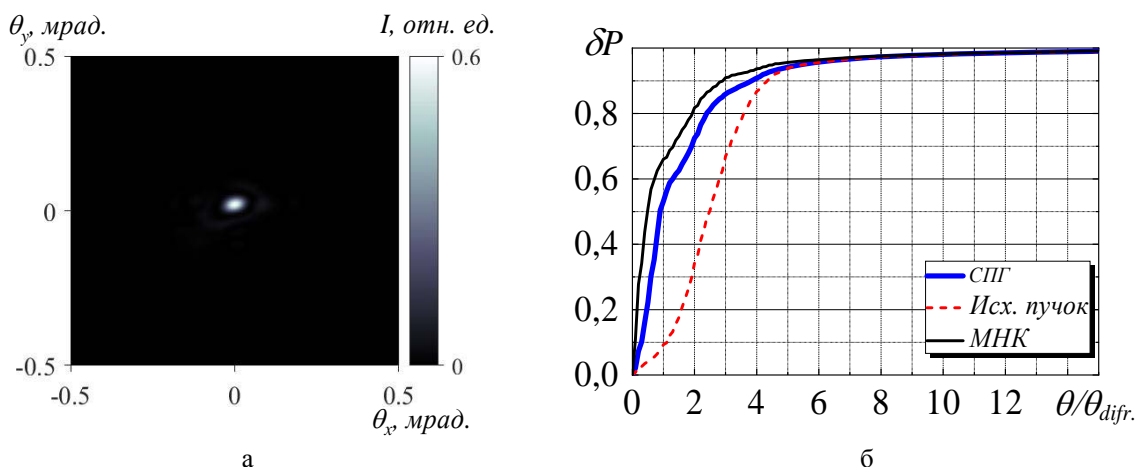


Рис. 7. Результат СПГ коррекции пучка при целевой функции в виде доли мощности в углеи $\Delta U_0 = 0,01$ В, $\gamma_{opt} = 9600$: а – распределение интенсивности в дальней зоне ($St=0,60$, $\delta P_{difr.} = 0,51$) б – угловое распределение энергии пучка ($\theta = 2,5 \cdot \theta_{difr.}$)

Полученные результаты свидетельствуют, что при правильном выборе приосевой диафрагмы можно добиться высокого оптического качества лазерного пучка, корректируемого 18 элементным адаптивным зеркалом под управлением СПГ алгоритма с целевой функцией в виде доли мощности в угле.

Заключение

Проведено численное исследование коррекции фазовых aberrаций лазерного пучка с апертурой 15×22 мм² с помощью 18 элементного адаптивного зеркала размером 46×56 мм² под управлением стохастического параллельного градиентного алгоритма. Экспериментально определены функции отклика исследуемого адаптивного зеркала, которые с высокой точностью аппроксимируются функциями Гаусса с параметром $r_0 = 1,73$ см. Методом наименьших квадратов определены предельные возможности адаптивного зеркала по фазовой коррекции используемого пучка. Цель данной работы заключалась в численной оценке параметров пучка, получаемого в результате СПГ коррекции 18 элементным адаптивным зеркалом.

Проведено исследование эффективности СПГ коррекции лазерного пучка с двумя целевыми функциями алгоритма: осевой яркостью и долей мощности пучка в различных диафрагмах. Установлено, что при выборе целевой функции СПГ алгоритма в виде доли мощности в пределах диафрагмы среднего дифракционного размера, можно получить увеличение числа Штреля с $St = 0,05$ до $St = 0,60$ за $N = 2000$ итераций алгоритма. Доля энергии в дифракционном размере пучка при этом увеличивается со значения $\delta P_{difr.} = 0,10$ до $\delta P_{difr.} = 0,51$. Расходимость пучка по уровню 81,5 % энергии снижается с 3,7 до 2,5 дифракционных углов.

Список литературы

1. Лукин В. П. Формирование оптических пучков и изображений на основе применения систем адаптивной оптики // УФН. 2014. Т. 184, № 6. С. 599–640.
2. Лукин В. П. Применения технологий адаптивной оптики для расширения возможностей оптико-электронных систем // Интрерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 8, С. 115–138.

3. Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И. Принципы адаптивной оптики. – М.: Наука, 1985.
4. Hardy J. H. Adaptive Optics for Astronomical Telescopes // N.Y.: Oxford University Press, 1998.
5. Vorontsov M. A., Carhart G. W. Adaptive optics based on analog parallel stochastic optimization: analysis and experimental demonstration // Optical society of America. 2000. Vol. 17, N 8. P. 1440–1453.
6. Vorontsov M. A., Sivokon V. P. Stochastic parallel-gradient-descent technique for high-resolution wave-front phase-distortion correction // Optical society of America. 1998. Vol. 15, N 10. P. 2745–2758.
7. Гудмен Дж. В. Введение в фурье-оптику: М.: Мир 1970. 362 с.
8. Гаранин С. Г., Голубев А. И., Повышев В. М., Стариков Ф. А., Шнягин Р. А. Исследование возможности повышения эффективности адаптивной системы лазерной установки «Луч» // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 5. С. 427–443.
9. Wolberg J. R., Data Analysis Using the Method of Least Squares. Berlin: Springer, 2006.
10. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1972. 720 с.