

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ПОДХОДОВ К УПРАВЛЕНИЮ ШИРОКОАПЕРТУРНЫМ АДАПТИВНЫМ ЗЕРКАЛОМ УСТАНОВКИ «ЛУЧ» И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕГО ПРЕДЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

Р. А. Шнягин, С. Г. Гаранин

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

Введение

Конструктивные особенности современных мощных лазерных установок таких, как «Луч», NIF, LMJ [1–3], таковы, что без принятия специальных мер не удастся получить высокое качество выходного излучения. Это приводит к снижению интенсивности и однородности облучения лазерных мишеней. Поэтому задача качественной компенсации оптических aberrаций на мощных лазерных установках в настоящее время является актуальной. Основной источник искажений – статические и динамические («тепловые») aberrации. Статические aberrации пучка обусловлены несовершенством изготовления оптических элементов, неточностью юстировки оптической схемы, изменением со временем оптических свойств элементов. Динамические aberrации появляются из-за нагрева активных элементов во время их накачки и зависят от напряжения на конденсаторных батареях ламп накачки активных элементов.

Ключевым способом улучшения качества пучка является коррекция его волнового фронта методами линейной адаптивной оптики (см., например, [4]). Принцип работы адаптивной системы основан на воспроизведении поверхностью зеркала формы, сопряженной с формой корректируемого волнового фронта. С помощью датчика волнового фронта (ДВФ) измеряется матрица наклонов волнового фронта пучка, затем происходит математическое восстановление фазовой поверхности. Далее, используя заранее известный набор функций отклика толкателей зеркала, математически проводится синтез нужной (фазово-сопряженной) поверхности зеркала методом наименьших квадратов. Вычисленные напряжения подаются на толкатели, зеркало деформируется, затем измеряется скорректированный волновой фронт. Адаптивная система является замкнутой, т. е. все вышеописанные операции проводятся последовательно автоматически.

В настоящее время, на установке «Луч» с помощью широкоапертурного 61-элементного деформируемого зеркала размером 220×220 мм [5], удалось достигнуть расходимости излучения по содержанию 80 % энергии $1 \cdot 10^{-4}$ рад, но при этом она остается на порядок больше дифракционной. Цель данной работы – в расчетно-теоретических исследованиях с помощью метода наименьших квадратов (МНК) определить предельные возможности адаптивного зер-

кала по фазовой коррекции, а также исследовать возможность повышения качества лазерного излучения на выходе из усилительного тракта установки «Луч» за счет применения в адаптивной системе стохастического параллельного градиентного (СПГ) алгоритма для управления поверхностью адаптивного зеркала. К достоинствам использования СПГ алгоритма можно отнести простоту алгоритма, измерение интегральных характеристик пучка и потому меньшую чувствительность к шумам, использование простейшего одноэлементного фотоприемника.

Работа адаптивной системы в составе установки «Луч»

Результат коррекции суммарных (статических и динамических) aberrаций волнового фронта усилительного тракта в импульсном излучении силового лазера с помощью широкоапертурного деформируемого зеркала приведен на рис. 1 [6].

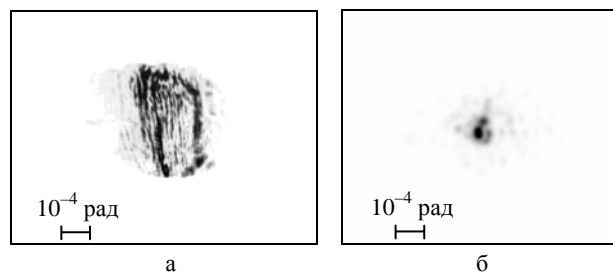


Рис. 1. Экспериментальное распределение плотности энергии выходного излучения в дальней зоне до (а) и после (б) коррекции

В результате проведения работ по улучшению качества коррекции интегральная расходимость излучения по уровню 80 % энергии уменьшилась в эксперименте в 4 раза с $4 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-4}$ рад, но при этом она остается на порядок больше дифракционной – θ_D . Скорректированный пучок в дальней зоне содержит, как правило, несколько спеклов с произвольным расположением. При этом в дифракционном угле экспериментального пятна содержится всего лишь 7 % энергии. Причины неидеальной работы адаптивной системы могут заключаться в неточности измерения волнового фронта, качестве изготовления

адаптивного зеркала, нестабильности пьезоэлектрических элементов, несовершенстве работы зеркала в замкнутом цикле, ограниченных возможностях зеркала по коррекции aberrаций волнового фронта. При этом максимально возможная амплитуда деформации поверхности зеркала превышает глубину aberrаций.

Предельные возможности зеркала можно оценить с помощью МНК. Его суть заключается в том, чтобы при конкретных aberrациях пучка подобрать такие напряжения на толкателях, чтобы фаза отраженного пучка в максимальной степени приближалась к плоской поверхности. В качестве базисных функций при этом используются экспериментально измеренные функции отклика адаптивного зеркала. Предполагается, что амплитуда деформации строго пропорциональна приложенному напряжению, и выполняется принцип аддитивности: полная деформация поверхности зеркала равна сумме функций отклика каждого управляющего элемента.

Исследования коррекции пучка, содержащего суммарные aberrации, проведенные по МНК с использованием метода Гаусса, показали, что посредством 61-элементного адаптивного зеркала в дальней зоне можно получить пучок, в дифракционном угле которого содержится 42 % энергии (в эксперименте 7 %), а число Штреля – $St = 0,5$. Полученное в численном моделировании распределение интенсивности в дальней зоне для скорректированного по МНК пучка представлено на рис. 2.

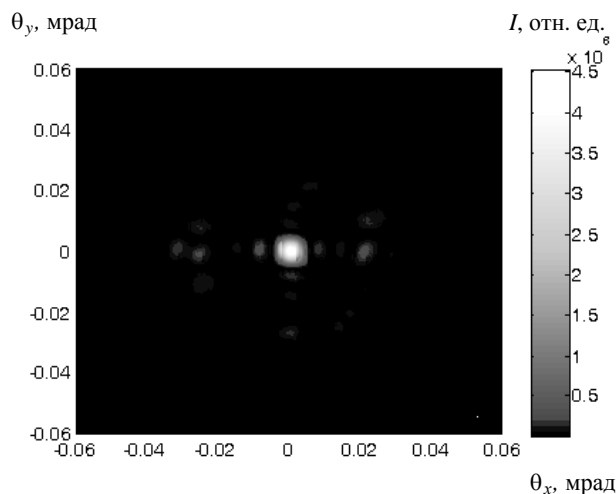


Рис. 2. Распределение интенсивности в дальней зоне при коррекции суммарных aberrаций с помощью МНК

Распределение энергии по углу – δP для скорректированного пучка сравнивается с дифракционным пределом на рис. 3. Расходимость по содержанию 80 % энергии превышает дифракционную в 6,5 раз. Ключевой является возможность получения яркого пятна дифракционного размера с фиксированным осевым положением, что важно для фокусировки излучения на микроишень. Результаты моделирования по МНК значительно превосходят результаты, полученные к настоящему моменту на установке «Луч», свидетельствуя о том, что геометрия и количество элек-

тродов зеркала вряд ли являются причиной его неидеальной работы. В табл. 1 сведены результаты коррекции статических, динамических и суммарных aberrаций с помощью МНК по числу Штреля.

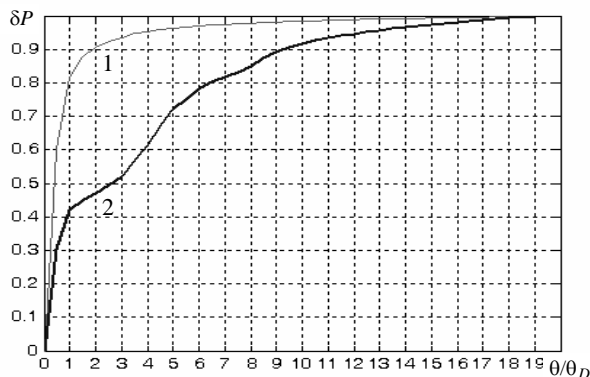


Рис. 3. Распределение энергии по углу θ при коррекции с помощью МНК: 1 – для идеального пучка; 2 – для скорректированного пучка

Таблица 1

Результаты коррекции пучка по МНК

Вид aberrаций	Число Штреля
Статические	0,86
Динамические	0,61
Суммарные	0,50

Факт, что с помощью 61-элементного адаптивного зеркала возможно получение пятна в дальней зоне, по качеству близкого к дифракционному, говорит о том, что управление адаптивным зеркалом в замкнутом цикле может быть некорректным в эксперименте. Это дает основания для применения альтернативных методов для расчета управляющих напряжений и управления адаптивным зеркалом, в частности, метода, основанного на стохастическом параллельном градиентном (СПГ) алгоритме.

Коррекция волнового фронта 61-элементным адаптивным зеркалом под управлением СПГ алгоритма

Типичная схема управления адаптивным зеркалом с помощью СПГ алгоритма показана на рис. 4. На делитель 2 поступает лазерный пучок с неоднородным фазовым фронтом. Блок управления 6 управляет деформируемым адаптивным зеркалом 1, на которое падает исходный пучок. Отведенная делителем 2 небольшая часть пучка фокусируется линзой 3 на фотоприемник 4, где измеряется целевая функция (осевая яркость или мощность излучения, прошедшего через малую приосевую диафрагму). Она фиксируется компьютером 5, который затем с помощью блока

управления 6 производит коррекционный шаг (итерацию) по небольшому изменению отражающей поверхности зеркала. После коррекционного шага регистрируется новое значение яркости, затем совершается очередная итерация и т. д., пока яркость излучения на фотоприемнике не достигнет предельного значения согласно заданному критерию.

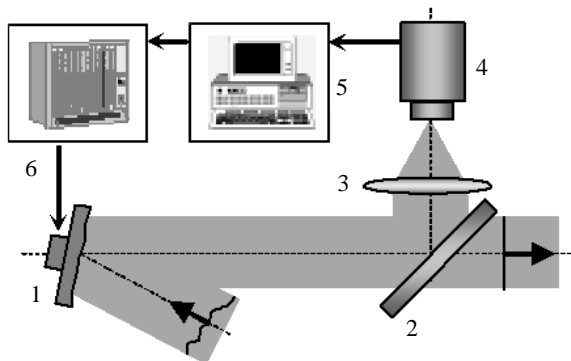


Рис. 4. Схема управления адаптивным зеркалом:
1 – адаптивное зеркало; 2 – делитель пучка;
3 – линза; 4 – фотоприемник; 5 – компьютер;
6 – блок управления зеркалом

Расчеты проводились при следующей постановке задачи. В ближней зоне задавался квадратный пучок размером $D = 18 \times 18$ см с единичной амплитудой и волновым фронтом, полученным в эксперименте. Длина волны – $\lambda = 1,053$ мкм – первая гармоника лазера на неодимовом стекле. Оптимизация работы СПГ алгоритма для управления 61-элементным адаптивным зеркалом показала, что необходимо использовать по возможности малые значения подаваемых на зеркало напряжений ΔU_0 . Для дальнейшего исследования было принято значение $\Delta U_0 = 0,015$ В.

Целевая функция в СПГ алгоритме может быть различной. Проведенное исследование показало, что в данной задаче эффективнее использовать в качестве целевой функции долю мощности, содержащейся в приосевой диафрагме в дальней зоне (как в типичной экспериментальной ситуации), нежели осевую яркость пучка в фокальной плоскости (т. е. фактически число Штреля). Также было установлено, что размер приосевой диафрагмы должен быть приблизительно равен дифракционному размеру скорректированного пучка.

Поведение числа Штреля и доли мощности в дифракционном угле в процессе итеративной коррекции волнового фронта со статическими aberrациями показаны на рис. 5. При $N = 881$ значение St достигает своего максимума $St = 0,71$. Следует отметить, что в начале процесса коррекции до $N \approx 400$ осевая яркость пучка в дальней зоне практически не меняется, в то время как доля мощности в дифракционном угле растет с самого начала и выходит на уровень $\delta P = 0,67$ при $N \approx 1000$. Для количественной оценки эффективности коррекции приведем зависимость доли мощности пучка в дальней

зоне от угла, нормированного на дифракционный угол θ_D – рис. 6. Распределения интенсивности в дальней зоне исходного пучка, скорректированного пучка после выполнения $N = 2000$ итераций и пучка с плоским волновым фронтом представлены на рис. 7. Визуально скорректированное распределение интенсивности незначительно отличается от идеального дифракционного распределения.

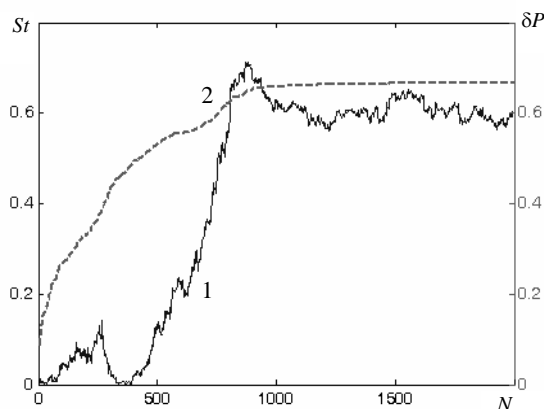


Рис. 5. Коррекция статических aberrаций:
1 – число Штреля St ; 2 – доля мощности δP

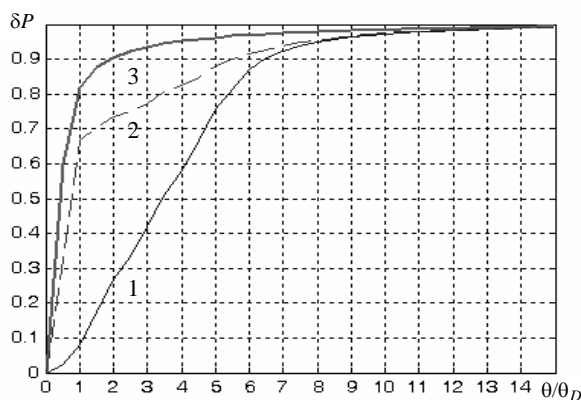
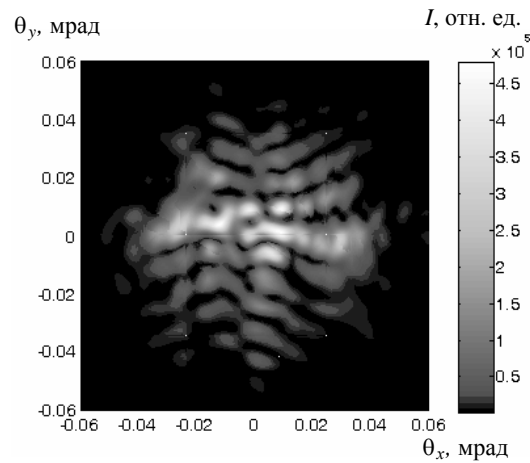
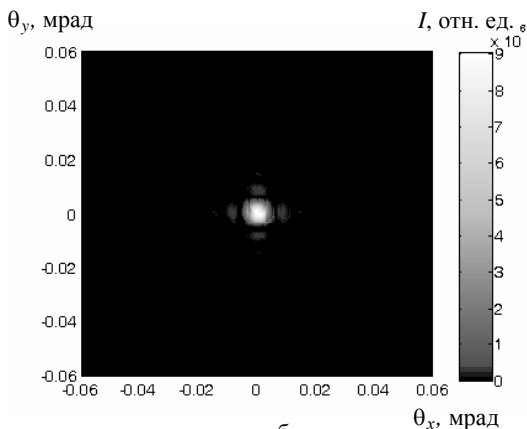


Рис. 6. Распределения доли мощности в дальней зоне по углу:
1 – для исходного пучка; 2 – для скорректированного пучка;
3 – для идеального пучка

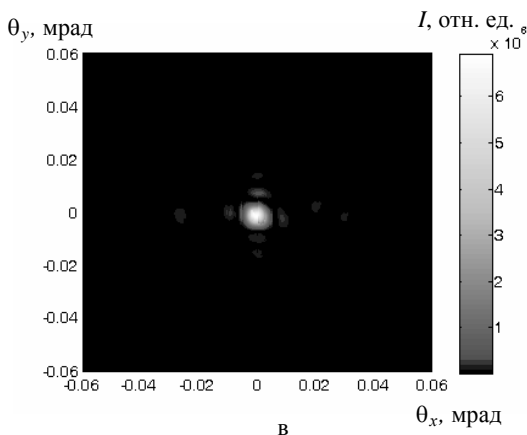
Полученные результаты свидетельствуют о существенном улучшении интегральной расходимости излучения – в скорректированном пучке 80 % энергии содержится в 3,5 дифракционных углах, кроме того, содержание энергии в малых углах в скорректированном пучке значительно превышает содержание энергии в исходном пучке, что свидетельствует о наличии ярко выраженного центрального пика. Так, в дифракционном угле у скорректированного пучка содержится 67 % энергии, а у исходного – всего лишь 9 %. При этом число Штреля со значения $St = 0,03$ возрастает до $St = 0,60$.



а



б



в

Рис. 7. Распределения интенсивностей в дальней зоне при коррекции статических aberrаций: а – без коррекции, $St = 0,03$; $\delta P(\theta_D) = 0,09$; б – с плоским волновым фронтом; в – после коррекции, $St = 0,60$; $\delta P(\theta_D) = 0,67$

Рассмотрим теперь эффективность коррекции 61-элементным адаптивным зеркалом под управлением СПГ алгоритма волнового фронта пучка, содержащего суммарные aberrации. Поведение числа Штреля и доли мощности в дифракционном угле в процессе итеративной коррекции волнового фронта с суммарными aberrациями показано на рис. 8.

Здесь, так же как и в случае со статическими aberrациями, в начале процесса коррекции до $N \approx 1300$ осе-

вая яркость пучка в дальней зоне практически не меняется, в то время как доля мощности в дифракционном угле растет с самого начала и достигает значения $\delta P = 0,36$ при $N = 5000$. Число Штреля при $N = 5000$ составляет $St = 0,28$. По сравнению со случаем со статическими aberrациями для коррекции суммарных aberrаций требуется большее количество итераций.

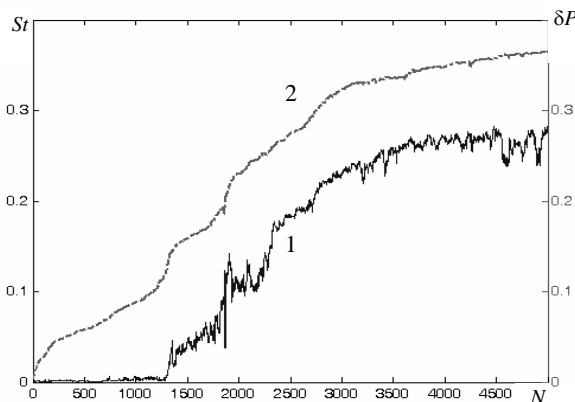


Рис. 8. Коррекция суммарных aberrаций: 1 – число Штреля St ; 2 – доля мощности δP

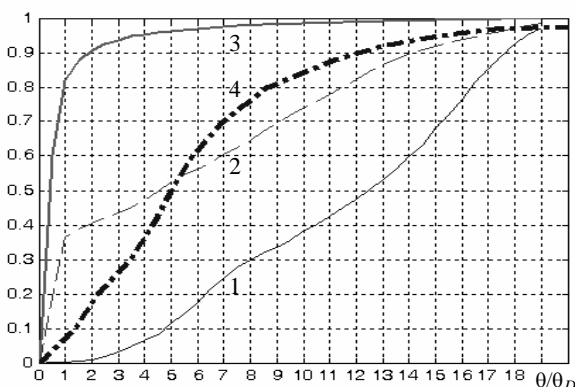


Рис. 9. Распределения доли мощности в дальней зоне по углу: 1 – для исходного пучка; 2 – для скорректированного СПГ алгоритмом пучка; 3 – для идеального пучка; 4 – для экспериментального пучка

Из рис. 9 следует, что расходимость скорректированного пучка, изначально содержащего суммарные aberrации, по 80 % содержания энергии в 11,5 раз превышает дифракционную. Этот результат нельзя считать удовлетворительным, поскольку в настоящее время на установке «Луч» адаптивная система, использующая 61-элементное зеркало, обеспечивает расходимость излучения на выходе усилительного тракта на уровне $\theta \approx 10^{-4}$ рад, что превышает дифракционную расходимость лишь в 8,5 раз. Но при этом в дифракционном угле в эксперименте содержится всего лишь 7 % энергии, а в расчетном – 36 %. Распределения интенсивности в дальней зоне исходного пучка, скорректированного пучка после выполнения $N = 5000$ итераций и пучка с плоским волновым фронтом представлены на рис. 10.

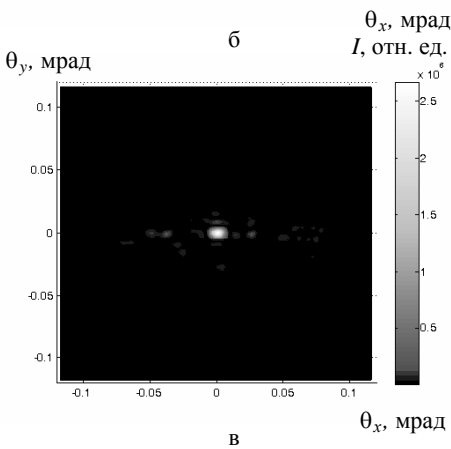
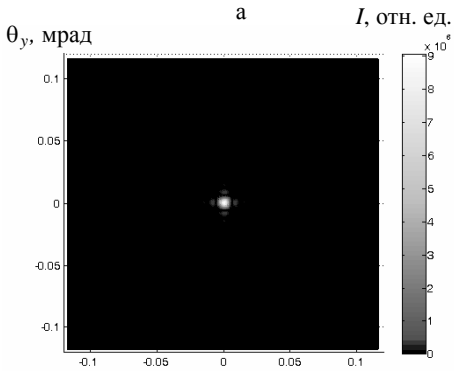
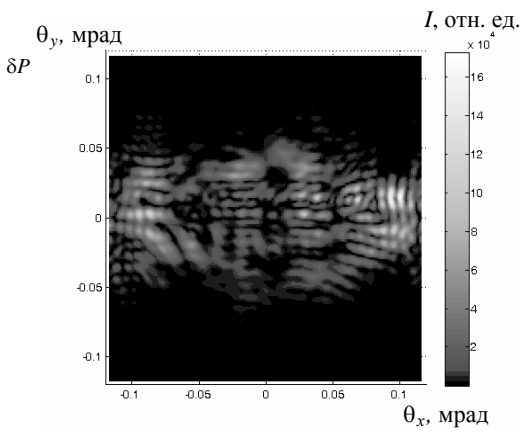


Рис. 10. Распределения интенсивностей в дальней зоне при коррекции суммарных aberrаций: а – без коррекции, $St = 3,23 \cdot 10^{-4}$; $\delta P(\theta_D) = 2,39 \cdot 10^{-3}$; б – с плоским волновым фронтом; в – после коррекции, $St = 0,28$; $\delta P(\theta_D) = 0,36$

Коррекция волнового фронта комбинированным методом

Как было показано выше, СПГ алгоритм отлично справляется с коррекцией статических aberrаций ($St \approx 0,6$, $\delta P \approx 0,7$) и несколько хуже с коррекцией суммарных aberrаций ($St \approx 0,3$, $\delta P \approx 0,4$), существенный вклад в которые вносят динамические (тепловые) aberrации. Поскольку экспериментальные данные по коррекции далеки от предельных возможностей зеркала, то в исследовательских целях можно

применить разные подходы, имея измеренные интегральный волновой фронт и функции отклика зеркала. Во-первых, в качестве математического аппарата, обрабатывающего экспериментальные данные ДВФ, можно применить версию МНК, не включенную в программное обеспечение замкнутой адаптивной системы, а использующуюся в настоящей работе. Во-вторых, можно чисто математически применить СПГ алгоритм, стартуя от измеренного суммарного волнового фронта. Результат коррекции предполагается худшим, чем при использовании МНК (см. табл. 2).

Таблица 2

Результаты коррекции пучка

Вид aberrаций	Число Штреля по МНК	Число Штреля по СПГ, целевая функция – яркость в центре пучка	Число Штреля по СПГ, целевая функция – доля мощности
Статические	0,86	0,53 ($N = 5000$)	0,60 ($N = 5000$)
Суммарные	0,50	0,12 ($N = 5\ 000$)	0,28 ($N = 5000$) 0,35 ($N = 7300$)

Наконец, в-третьих, можно предложить комбинированный метод компенсации суммарных aberrаций. Суть его заключается в следующем: перед силовым выстрелом с помощью СПГ алгоритма будем экспериментально исправлять статические aberrации в режиме реального времени с помощью юстировочного непрерывного лазера, т. е. добиваясь минимального размера фокального пятна юстировочного лазера в эксперименте, а затем вносить дополнительные предсказания поверхности адаптивного зеркала для компенсации хорошо известных тепловых aberrаций, рассчитанные по МНК. При неизменном напряжении на конденсаторных батареях тепловые aberrации остаются относительно стабильными от опыта к опыту, т. е. их форма заранее известна. При условии стабильности динамических aberrаций такая схема позволяет отказаться от систематического использования ДВФ. Будет достаточно измерить динамические aberrации один раз.

Действительно, расчеты, проведенные с применением комбинированного метода, показали целесообразность применения такого подхода. Распределения интенсивности в дальней зоне исходного пучка и скорректированного пучка представлены на рис. 11.

Из рис. 12 следует, что комбинированный метод показывает принципиальную возможность получения скорректированного пучка, который в дальней зоне образует центральный пик интенсивности дифракционного качества с содержанием в дифракционном угле 43 % энергии и числом Штреля $St = 0,40$.

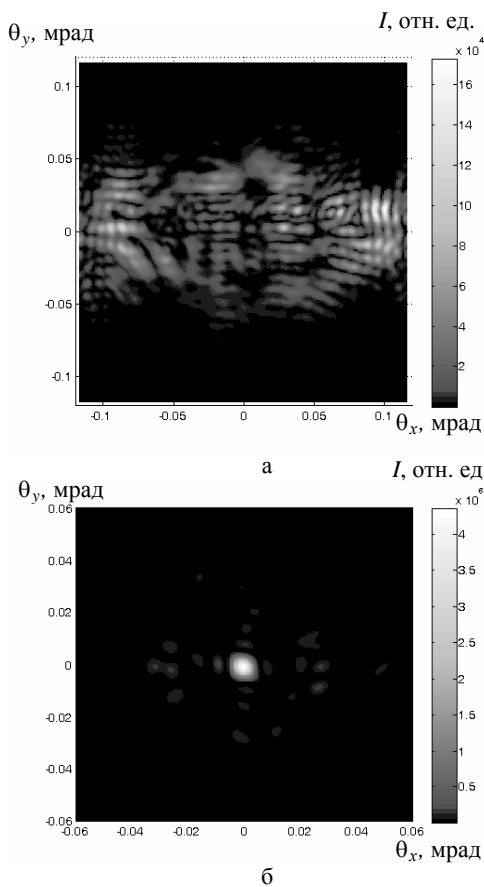


Рис. 11. Распределения интенсивностей в дальней зоне при коррекции суммарных aberrаций комбинированным методом: а – без коррекции, $St = 3,23 \cdot 10^{-4}$; $\delta P(\theta_D) = 2,39 \cdot 10^{-3}$; б – после коррекции, $St = 0,40$; $\delta P(\theta_D) = 0,43$

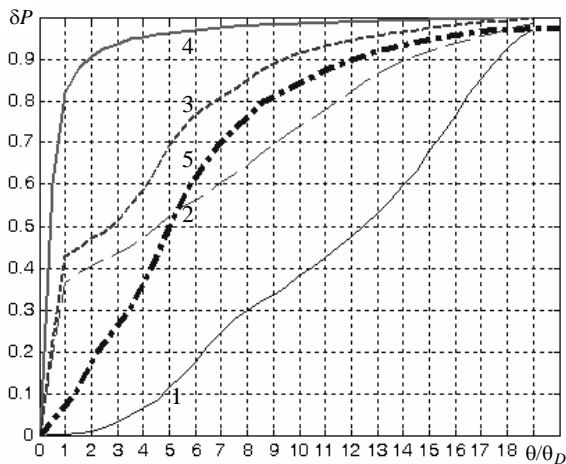


Рис. 12. Распределения доли мощности в дальней зоне по углу: 1 – для исходного пучка; 2 – для корректированного СПГ алгоритмом пучка; 4 – для идеального пучка; 5 – для экспериментального пучка

Заключение

Проведено исследование коррекции широкоапертурным 61-элементным адаптивным зеркалом под уп-

равлением СПГ алгоритма статических и суммарных aberrаций. Показано, что статические aberrации компенсируются эффективно: число Штреля возрастает со значения $St = 0,03$ до $St = 0,60$, при этом доля энергии в дифракционном угле скорректированного пучка в дальней зоне составляет $\delta P = 0,67$. Менее эффективно компенсируются суммарные aberrации ($St = 0,28$, $\delta P = 0,36$). Этот результат хуже результата, полученного по МНК ($St = 0,50$, $\delta P = 0,42$), характеризующего предельные возможности зеркала.

С целью улучшения качества фокального пятна и отказа от систематического использования датчика волнового фронта (ДВФ) предложен комбинированный метод управления адаптивным зеркалом: статические aberrации исправляются экспериментально СПГ алгоритмом, а динамические корректируются с использованием расчета по МНК. В итоге можно сказать, что текущие экспериментальные данные по адаптивной коррекции волнового фронта лазерного излучения на установке «Луч» дают около 7 % энергии в дифракционном угле, а проведенное численное моделирование адаптивной коррекции волнового фронта комбинированным методом показало, что геометрия и количество электродов широкоапертурного адаптивного зеркала потенциально дают возможность получить долю энергии в дифракционном угле до ~40 % и число Штреля на уровне 0,4–0,5, при этом расходимость пучка по 80 % содержания энергии в 7 раз превышает дифракционную.

Кроме того, принимая во внимание тот факт, что 61-элементное адаптивное зеркало под управлением СПГ алгоритма эффективно компенсирует статические aberrации, его можно использовать в процессе автоматической юстировки усилительного тракта на мощных лазерных установках для коррекции aberrаций реперных пучков, как, например, организовано на установке LMJ [3].

Литература

- Galakhov I. V., Garanin S. G., Eroshenko V. A. et al. // Fusion Engineering and Design. 1999. Vol. 44. P. 51.
- Zacharias R. A., Beer N. R., Bliss E. S. et al. // Optical Engineering. 2004. Vol. 43. P. 12.
- Grosset – Grange C., Barnier J., Chappuis C. et al. Proc. of SPIE. 2007. Vol. 6584. P. 658403-1.
- Hardy J. H. Adaptive Optics for Astronomical Telescopes. N.Y.: Oxford University Press, 1998.
- Гаранин С. Г., Григорович С. В., Куликов С. М. и др. // Квантовая электроника. 2007. 37, 601.
- Гаранин С. Г., Куликов С. М., Маначинский А. Н. и др. Разработка адаптивной системы. Экспериментальные результаты, полученные на установке «Луч» // Сб. тезисов XXXVII междунар. конфер. по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Звенигород, 2010. С. 142.