

УДК 681.7.062.47

# Расчетное моделирование адаптивной фазовой коррекции регулярных, вихревых и некогерентных многомодовых лазерных пучков без датчика волнового фронта

В.А. Богачев<sup>1</sup>, С.Г. Гаранин<sup>1,2</sup>, Ф.А. Стариков<sup>1,3</sup>, Р.А. Шнягин<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Российский федеральный ядерный центр —  
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики  
607190, г. Саров, пр. Мира, 37

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ  
115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31

<sup>3</sup>Саровский физико-технический институт  
Национального исследовательского ядерного университета МИФИ  
607186, г. Саров, ул. Духова, 6

Поступила в редакцию 16.06.2016 г.

Рассмотрен и численно исследован ряд аспектов при фазовой коррекции регулярных и вихревых (спеклованных) лазерных пучков гибким адаптивным зеркалом, управление поверхностью которого осуществляется с помощью стохастического параллельного градиентного (СПГ) алгоритма без использования датчика волнового фронта. Показано, что оптимальный выбор целевой функции и базисных функций позволяет повысить точность фазовой коррекции и скорость сходимости СПГ-алгоритма. Продемонстрирована возможность частичной фазовой коррекции некогерентного многомодового излучения, которую можно реализовать, например, в лазерном резонаторе с оптически неоднородной активной средой.

*Ключевые слова:* адаптивное зеркало, фазовая коррекция лазерного пучка, оптические aberrации, стохастический параллельный градиентный алгоритм; adaptive mirror, phase correction of laser beam, optical aberrations, stochastic parallel gradient algorithm.

## Введение

Настоящая статья посвящена коррекции искажений волнового фронта лазерного излучения средствами линейной адаптивной оптики. В общепринятом подходе в замкнутой адаптивной оптической системе (АОС) проводится измерение фазовой поверхности пучка датчиком волнового фронта (ДВФ) с последующей деформацией поверхности гибкого адаптивного зеркала [1]. ДВФ Шака—Гартмана (Shack—Hartmann) является наиболее распространенным. Восстановление фазовой поверхности из ее измеренных локальных градиентов и требуемая деформация поверхности адаптивного зеркала проводятся с помощью математических процедур, основанных на методе наименьших квадратов (МНК).

В ряде случаев восстановление фазы с помощью ДВФ сопряжено с серьезными трудностями, главные из которых — высокая чувствительность к локальным флуктуациям фазы, проблемы при слабом сигнале и низком отношении сигнал-шум, наличие спек-

лов в пучке. В данной работе ДВФ не используется, а для управления адаптивным зеркалом применяется итеративный стохастический параллельный градиентный (СПГ) алгоритм, направленный на оптимизацию определенной целевой функции [2]. Рассматривается ряд аспектов, связанных с повышением качества фазовой коррекции и скорости сходимости СПГ-алгоритма.

## 1. Выбор оптимальной целевой функции

Выбор целевой функции для СПГ-алгоритма должен обеспечивать оптимальное сочетание между достигаемым уровнем качества пучка и скоростью сходимости процедуры. Рассмотрим этот вопрос на примере спеклованного лазерного пучка, работа с которым представляет проблему для стандартной АОС с ДВФ из-за наличия темных пятен и оптических вихрей в пучке [1]. На рис. 1 представлены распределения интенсивности и фазы падающего на адаптивное зеркало сингулярного пучка излучения с длиной волны  $\lambda = 1$  мкм, диаметром  $D = 4$  см. Было показано [3], что восстановление сингулярного волнового фронта с помощью датчика Шака—

\* Владимир Александрович Богачев (bogachev.v@mail.ru); Сергей Григорьевич Гаранин (garanin@otd13.vniief.ru); Федор Алексеевич Стариков (fstar@mail.ru); Роман Анатольевич Шнягин (shnyagin@yandex.ru).

Гартмана стандартным МНК невозможно, и необходимо применять специальный метод восстановления [4]. На основе этого метода была продемонстрирована коррекция вихревой моды Гаусса–Лагерра в замкнутой АОС с биморфным зеркалом и ДВФ Шака–Гартмана с новой методикой восстановления [5]. Здесь рассмотрим компенсацию искажений волнового фронта с винтовыми дислокациями, показанного на рис. 1, с помощью АОС без ДВФ.

Для управления адаптивным зеркалом использовался СПГ-алгоритм [2] с различными целевыми функциями в дальней зоне: осевая интенсивность  $I_0$ ; мощность  $\delta P$  излучения, проходящего через диафрагму дифракционного размера  $\theta_d$ ; угловой радиус пучка  $\theta_0$ . В процессе коррекции прослеживались все указанные характеристики пучка при использовании одной из них в качестве целевой функции. Математические выражения перечисленных целевых функций соответственно имеют вид

$$I_0 = |E(\theta_x = 0, \theta_y = 0)|^2,$$

$$\delta P = \iint_{\theta_x^2 + \theta_y^2 \leq \theta_d^2} |E(\theta_x, \theta_y)|^2 d\theta_x d\theta_y,$$

$$\theta_0 = \sqrt{\frac{\iint (\theta_x^2 + \theta_y^2) |E(\theta_x, \theta_y)|^2 d\theta_x d\theta_y}{\iint |E(\theta_x, \theta_y)|^2 d\theta_x d\theta_y}},$$

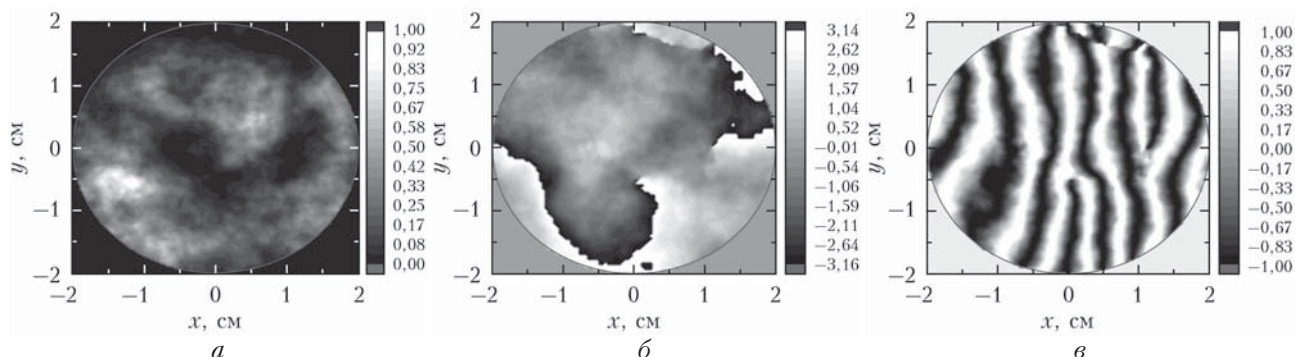


Рис. 1. Интенсивность (а), фаза (в радианах) (б) и интерференционная картина спекл-пучка с наклонно падающей плоской волной с характерными «вилками» (в) до коррекции

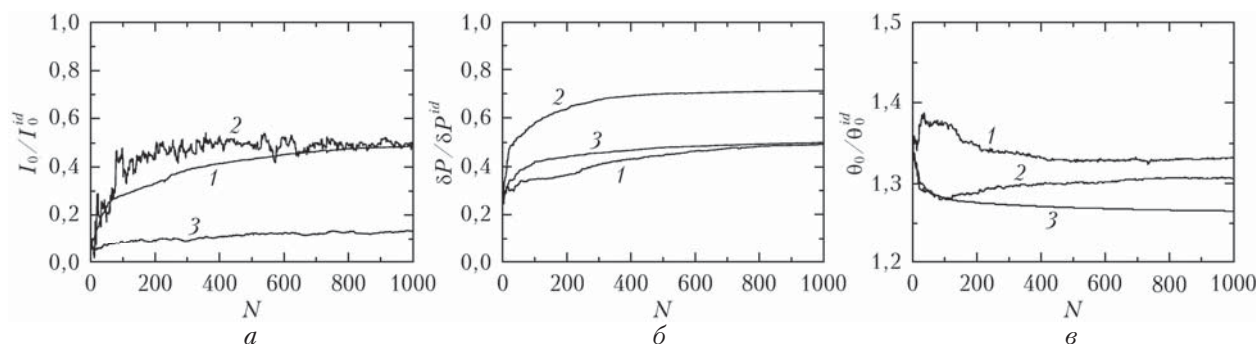


Рис. 2. Изменение осевой интенсивности (а), мощности в диафрагме дифракционного размера (б) и радиуса пучка (в) в дальней зоне в зависимости от числа итераций  $N$  для целевой функции «осевая интенсивность» (1), «мощность в диафрагме» (2), «радиус пучка» (3)

где  $E(\theta_x, \theta_y)$  – распределение амплитуды лазерного излучения в дальней зоне;  $\theta_d = 1,22\lambda/D$  – дифракционный угол. Кроме того, в случае каждой целевой функции параметры СПГ-алгоритма [2] обеспечивали наискорейшую его сходимость. При численном моделировании рассматривалось биморфное адаптивное зеркало апертурой 4,5 см с 25 управляемыми электродами в квадратной упаковке [5]. Цель расчетов – выяснить, при использовании какой целевой функции происходит наиболее эффективная компенсация фазовых искажений рассматриваемого пучка за минимальное число итераций.

На рис. 2 представлены результаты численного моделирования. Целевые функции нормированы на соответствующие их значения при идеальной компенсации, т.е. при плоском фазовом фронте падающего пучка. Достижимые в итеративном процессе стационарные значения целевых функций заметно меньше единицы, т.е. идеальной коррекции фазового фронта не происходит, так как гибким зеркалом невозможно воспроизвести разрывы фазы и количество электродов зеркала ограничено.

Как видно из рис. 2, наиболее эффективная коррекция фазовых искажений реализуется при использовании целевой функции «мощность в диафрагме». В этом случае число Штреля возрастает до 0,5, доля мощности в угле  $\theta_d$  – до 64% от идеального значения за  $\sim 200$  итераций. Радиус пучка меняется слабо при использовании любой из рассматриваемых целевых функций.

На рис. 3 показаны распределения нормированной на одну величину интенсивности спекл-пучка в дальней зоне до коррекции, в случае идеальной коррекции (для пучка со спеклованным распределением интенсивности и плоским фазовым фронтом), СПГ-коррекции с помощью трех целевых функций и МНК-коррекции (т.е. подход с ДВФ Шака–Гартмана). Лучшая компенсация фазовых искажений спекл-пучка, дающая наиболее компактное пятно в дальней зоне и наиболее высокую осевую интенсивность, достигается при использовании целевой функции «мощность в диафрагме».

Далее по эффективности следуют СПГ-коррекция с целевой функцией «осевая интенсивность», МНК-коррекция и СПГ-коррекция с целевой функцией «радиус пучка»; в последнем случае максимум силы излучения наблюдается вне оптической оси.

## 2. Изменение целевой функции в процессе коррекции

В данном разделе рассматривается компенсация искажений волнового фронта пучка с помощью адаптивного зеркала при изменении целевой функции СПГ-алгоритма в процессе коррекции. Корректируемый пучок лазера на парах цезия ( $\lambda = 0,895$  мкм) имел прямоугольную апертуру размером  $4,5 \times 9$  см и амплитуду aberrаций  $PV = 5,5$  мкм [6]. На рис. 4, *a* показано экспериментальное распределение фазы пучка [6]. При численном моделировании использовалось адаптивное зеркало с 31 толкателем и круглой апертурой диаметром 12 см (рис. 4, *б*).

В качестве целевой функции при СПГ-коррекции бралась мощность  $\delta P$  излучения, проходящего

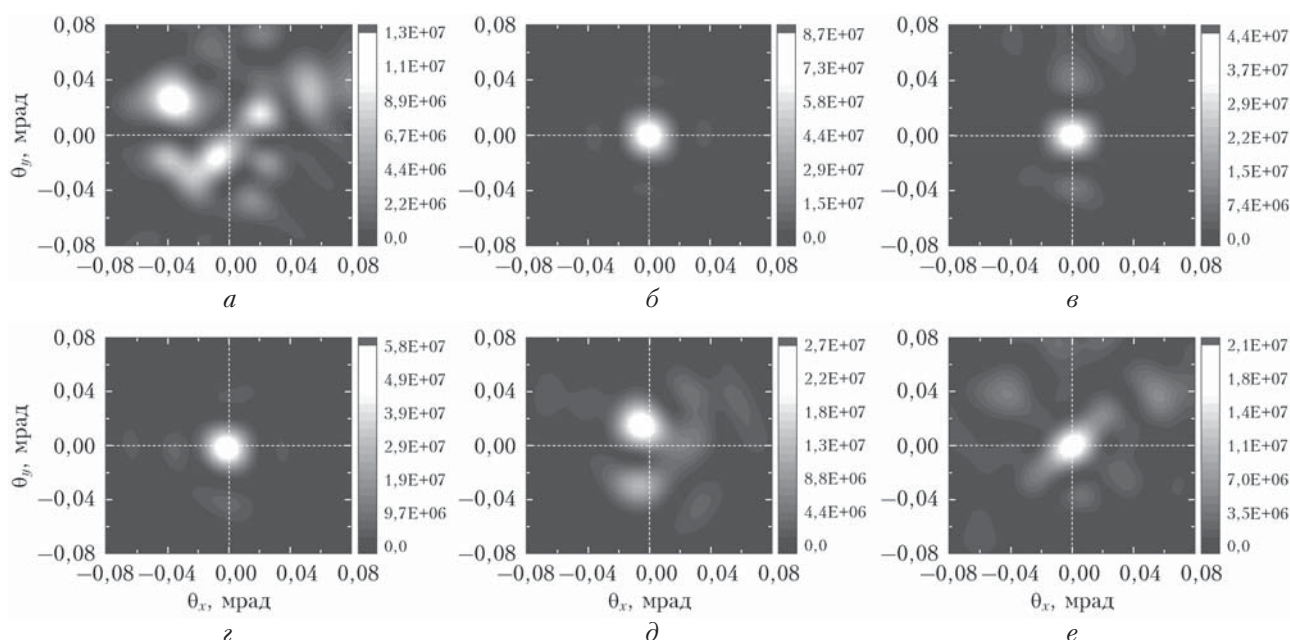


Рис. 3. Распределение интенсивности пучка в дальней зоне до коррекции (*a*), после идеальной коррекции (*б*), СПГ-коррекции по целевым функциям «осевая интенсивность» (*в*), «мощность в диафрагме» (*г*), «радиус пучка» (*д*) и коррекции по МНК (*е*)

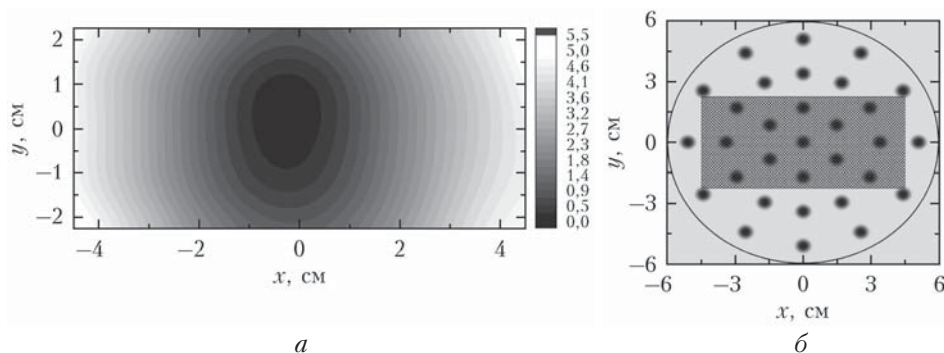


Рис. 4. Фазовый фронт пучка до коррекции (в мкм) (*a*) и расположение пучка на адаптивном зеркале (*б*)

через диафрагмы заданного размера в дальней зоне. Диафрагмы имели следующие угловые размеры: I – квадратная  $0,13 \times 0,13$  мрад; II – прямоугольная дифракционного размера  $0,02 \times 0,04$  мрад. На первом этапе коррекции в течение 100 итераций для целевой функции использовалась диафрагма I, при которой параметр  $\delta P_d/P$  увеличился с 0,01 до 0,22, где  $\delta P_d$  и  $P$  – мощность в дифракционной диафрагме (т.е. в диафрагме II) и полная мощность излучения соответственно. Далее следующие 300 итераций в качестве целевой функции использовалась диафрагма II, при этом происходит «тонкая» коррекция волнового фронта и параметр  $\delta P_d/P$  возрастает до 0,66. Нормированные на одну величину распределения интенсивности пучка в дальней зоне до коррекции, в процессе (на 100-й итерации) и в конце коррекции представлены на рис. 5. Там же обозначены диафрагмы, используемые в целевых функциях. До коррекции расходимость излучения составляет 0,3 мрад по оси  $x$  и 0,2 мрад по оси  $y$ , и в диафрагму I и II попадает соответственно 14 и 1% полной мощности. Этим и объясняется выбранный путь коррекции.

На рис. 6, *а* показана динамика доли мощности в диафрагме II  $\delta P_d/P$  в процессе коррекции (кривая 1). В итоге после коррекции угловой размер пучка в дальней зоне приближается к угловому размеру пучка с плоским волновым фронтом – полный угол расходимости по оси  $x$  составляет 0,02 мрад,

по оси  $y$  – 0,04 мрад. Стоит отметить, что в рассматриваемом случае при идеальной коррекции (плоском волновом фронте)  $\delta P_d/P = 0,82$ , т.е. число Штреля после СПГ-коррекции достигает высокой величины 0,8. Для сравнения на рис. 6, *а* представлена кривая 2, которая соответствует случаю, когда в процессе коррекции для целевой функции использовалась только диафрагма II. Тогда значение параметра  $\delta P_d/P$  после коррекции составляет 0,36, число Штреля всего 0,44. Таким образом, регулировка параметров целевой функции в процессе фазовой коррекции может существенно повысить ее качество.

На рис. 6, *б* показаны распределения мощности пучка по углу до и после коррекции, а также при МНК- и идеальной (при плоском волновом фронте) коррекции. Видно, что при СПГ-управлении потенциал адаптивного зеркала реализуется практически полностью.

### 3. Выбор базисных функций СПГ-алгоритма

Выше в качестве базисных функций СПГ-алгоритма использовались функции отклика адаптивного зеркала, однако неочевидно, что такой базис всегда является оптимальным. В данном разделе сравниваются результаты расчетов компенсации искажений волнового фронта лазерного спекл-пучка из раздела 1 с помощью биморфного адаптивного зеркала [5]

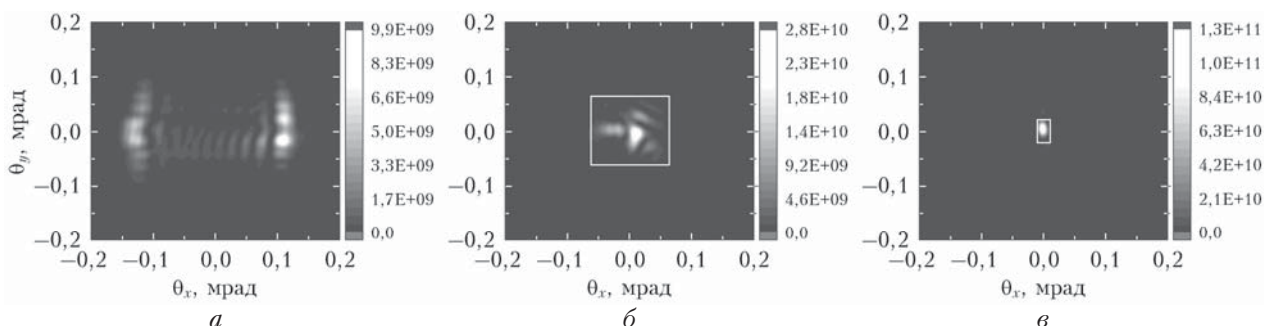


Рис. 5. Распределение интенсивности лазерного излучения в дальней зоне до (*а*), в процессе (*б*) и после (*в*) коррекции

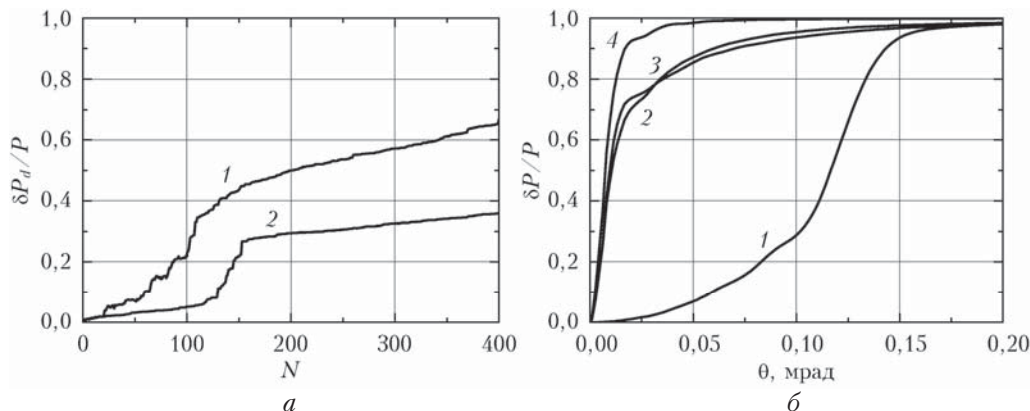


Рис. 6. Динамика доли мощности в диафрагме дифракционного размера при коррекции с изменением (1) и без изменения (2) целевой функции в процессе коррекции (*а*) и распределение мощности излучения в дальней зоне до коррекции (1) и после СПГ-коррекции (2), МНК-коррекции (3), идеальной коррекции (4) (*б*)

при использовании двух различных базисов. Базис I, как в разделе 1, состоит из 25 экспериментально измеренных функций отклика  $g_i$ , базис II – из полиномов Цернике, сформированных из функций отклика,

$$Z_j(x, y) = \sum_{i=1}^{N_g} b_{ij} \cdot g_i(x, y), \quad (1)$$

где  $N_g = 25$  – количество элементов зеркала, а коэффициенты разложения  $b_{ij}$  находятся заранее по МНК. В качестве целевой функции использовалась нормированная доля мощности излучения, проходящего через диафрагму дифракционного размера –  $\delta P / \delta P^{id}$ . Цель расчетов – выяснить, какой базис позволит обеспечить наиболее эффективную (как по качеству, так и по количеству итераций СПГ-алгоритма) коррекцию aberrаций пучка.

Поверхность зеркала  $S(x, y)$  для компенсации aberrаций в итоге является линейной комбинацией  $N_z$  полиномов Цернике  $Z_j(x, y)$ . Чтобы обеспечить более быструю сходимость СПГ-алгоритма по сравнению со случаем, когда базисными функциями являются функции отклика, необходимо выполнение условия  $N_z < N_g$ . В данной работе ограничили рассмотрение полиномов Цернике с  $j = 2-15$ , исключив сдвиг  $Z_1$ .

На адаптивное зеркало направлялся лазерный пучок с распределением интенсивности и фазы, представленным на рис. 1. Динамика целевой функции в процессе коррекции показана на рис. 7. Видно, что использование базиса II дает преимущество в скорости сходимости СПГ-алгоритма. Так, при использовании базиса II уже к 50-й итерации значение целевой функции составляет 0,62 против 0,52 при коррекции по базису I.

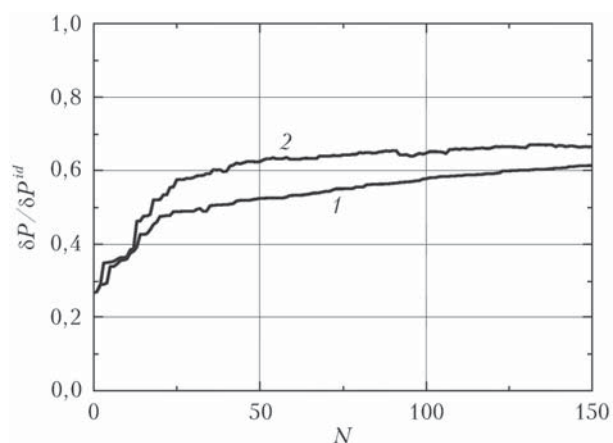


Рис. 7. Динамика целевой функции в процессе коррекции волнового фронта спекл-пучка при использовании базиса I (1) и базиса II (2)

Стоит отметить, что полученное преимущество может быть реализовано в случае, когда количество

функций базиса II является оптимальным для коррекции aberrаций рассматриваемого пучка.

#### 4. Фазовая коррекция некогерентного многомодового излучения

Для успешной работы стандартной АОС с ДВФ необходимо, чтобы за время замкнутого цикла АОС падающий на адаптивное зеркало пучок характеризовался устойчивым волновым фронтом, т.е. был рожден гомоцентрическим «точечным» источником – реальным или виртуальным. Однако нередко встречаются ситуации, когда пучок волнового фронта «не имеет». Это означает, что в падающем на ДВФ пучке присутствуют одновременно множество волновых фронтов, соответствующих разным «точечным» источникам. В этом случае ДВФ Шака–Гартмана будет измерять некий средний волновой фронт излучения, информация о котором может не иметь никакого практического значения (хотя бы потому, что он может оказаться плоским). Информация о расхождении излучения будет содержаться не в среднем волновом фронте, определяемом из гартманограммы, а в отличии размера пятен на субапертурах от дифракционного размера.

В качестве примера можно привести плоскопараллельный лазерный резонатор, внутри которого, особенно в условиях нестационарной оптически неоднородной активной среды, распространяется многомодовое излучение с динамически меняющейся структурой волновых фронтов. Если в качестве «глухого» зеркала резонатора использовать адаптивное зеркало, то в связи с вышеизложенным управление им с помощью ДВФ совершенно неэффективно (как, собственно, и аналогичная фазовая коррекция выходного пучка за пределами резонатора). В работах [7–9] экспериментально продемонстрирована возможность адаптивной внутрирезонаторной коррекции выходного лазерного излучения с использованием для управления адаптивным зеркалом ряда алгоритмов (последовательное «восхождение на холм», генетический алгоритм, модельная «закалка», случайный поиск, адаптивный случайный поиск). Все эти методы требуют достаточно большого времени коррекции и не подходят для работы в сколько-нибудь нестационарных условиях. В работе [10] внутрирезонаторное 19-элементное адаптивное зеркало Nd:YAG-лазера управлялось методом стохастического параллельного градиентного спуска [11]. Но в данном лазере с ламповой накачкой в выходном пучке преобладает вызванная нагревом активной среды одна стационарная мода типа  $TEM_{10}$ , которая и трансформировалась адаптивным зеркалом в моду, близкую к основной, в течение 10 с.

В связи с этим возникает закономерный интерес применить СПГ-управление [2] адаптивным зеркалом в резонаторе с более богатым модовым составом выходного излучения и оценить его возможности по регулированию модового состава лазера-генератора.

В данном разделе рассматриваются результаты модельных расчетов по коррекции «волнового фронта» некогерентного многомодового пучка с помощью адаптивного зеркала под управлением СПГ-алгоритма. На 31-канальное адаптивное зеркало (см. рис. 4, б) направлялось пять пучков в виде мод Цернике (дефокус  $Z_4$ , две комы  $Z_7$  и  $Z_8$ , два астигматизма пятого порядка  $Z_{12}$  и  $Z_{13}$ ) с апертурой 10 см и однородным распределением интенсивности. В качестве целевой функции при СПГ-коррекции бралась доля мощности излучения в дальней зоне  $\delta P$ , проходящего через диафрагму радиуса  $\theta_p$ . На рис. 8 дано исходное распределение интенсивности корректируемого лазерного излучения в дальней зоне, т.е. сумма интенсивностей различных мод в дальней зоне до коррекции.

На рис. 9, а, б представлено распределение интенсивности многомодового излучения в дальней зоне после коррекции при  $\theta_p = \theta_d$  и  $2\theta_d$  (светлой окружностью показана диафрагма, соответствующая целевой функции). Видно, что после СПГ-коррекции происходит перераспределение интенсивности в дальней зоне: формируется яркий приосевой керн и крыло, которое может даже выходить за пределы области локализации исходного пучка.

На рис. 10 показано поведение целевой функции в итеративном процессе, значение которой возросло с 0,05 до 0,19 при  $\theta_p = \theta_d$  и с 0,18 до 0,37 при  $\theta_p = 2\theta_d$ , т.е. в 2–4 раза.

Расчеты показывают, что дополнительная пространственная фильтрация крыла пучка в дальней зоне может улучшить результаты работы СПГ-алго-

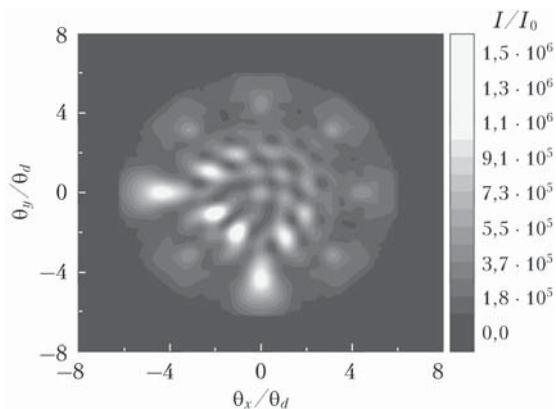


Рис. 8. Распределение интенсивности некогерентного излучения в дальней зоне до коррекции

ритма. На рис. 9, в, г показаны соответствующие результаты расчетов при дополнительном обрезании пучка при  $\theta > 6\theta_d$ , что приводит к дополнительному увеличению яркости излучения. Как видно из рис. 10, целевая функция увеличивается при этом еще примерно в 1,5 раза (все функции на рис. 10 нормированы на одно и то же значение исходной мощности пучка).

Очевидно, что в принципе скорректировать «волновой фронт» некогерентного многомодового пучка возможно лишь частично, до определенного предела. Главным ограничением является тот факт, что адаптивное зеркало не может «подстроиться» под коррекцию разных мод одновременно. Тем не менее возможность трансформировать модовый состав так,

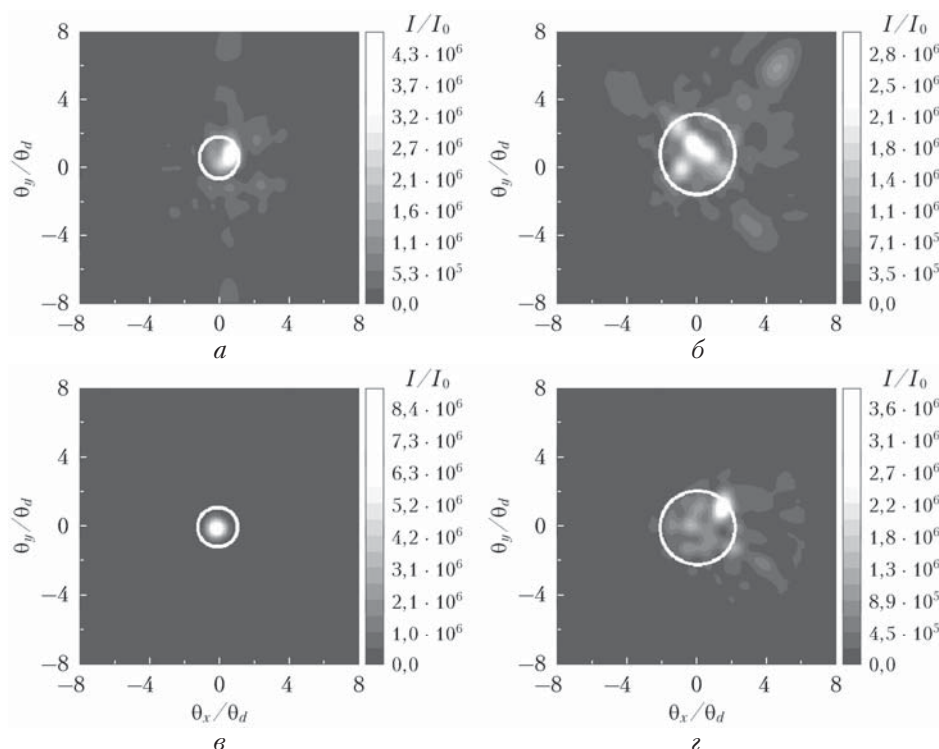


Рис. 9. Распределения интенсивности некогерентного излучения в дальней зоне после СПГ-коррекции при  $\theta_p = \theta_d$  (а, в) и  $2\theta_d$  (б, г), а также в отсутствие (а, б) и при наличии (в, г) дополнительной угловой селекции в угле  $6\theta_d$

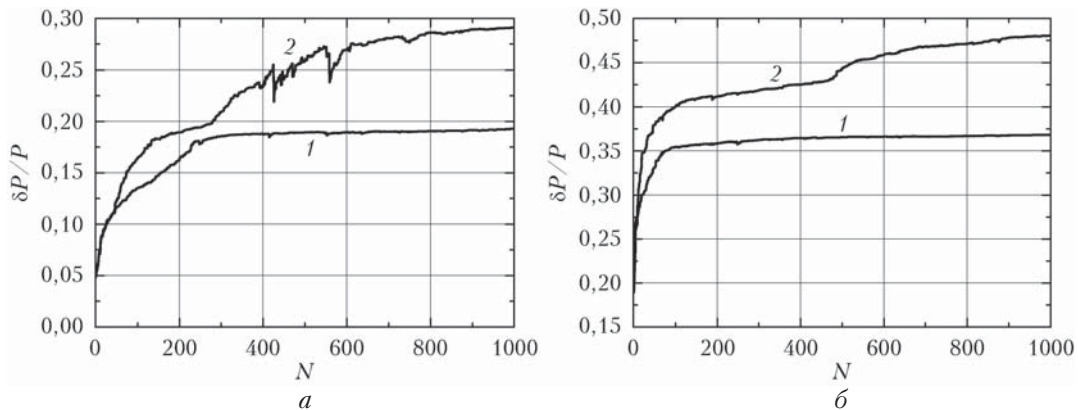


Рис. 10. Динамика целевой функции при коррекции многомодового излучения при  $\theta_p = \theta_d$  (а) и  $2\theta_d$  (б), а также в отсутствие (1) и при наличии (2) дополнительной угловой селекции в угле  $60^\circ$

чтобы увеличить мощность узконаправленной компоненты излучения лазера-генератора, имеет важное значение, в том числе при построении систем «задающий генератор + усилитель».

### Заключение

Проведено расчетное исследование фазовой коррекции регулярных и вихревых (спеклованных) лазерных пучков гибким адаптивным зеркалом, управление поверхностью которого осуществляется с помощью стохастического параллельного градиентного алгоритма без использования датчика волнового фронта. Показано, что оптимальной целевой функцией СПГ-алгоритма, обеспечивающей максимальную остроту фокусировки излучения, является доля мощности в угле, близком к дифракционному. В случае спекл-пучка результат СПГ-коррекции заметно лучше, чем при использовании ДВФ Шака–Гартмана. Изменение целевой функции в итеративном процессе коррекции, а также должный выбор базисных функций позволяют повысить точность коррекции и скорость сходимости СПГ-алгоритма.

Продемонстрирована возможность фазовой СПГ-коррекции некогерентного многомодового пучка излучения, которую можно реализовать, например, в лазерном резонаторе с нестационарной оптически неоднородной активной средой. Такая коррекция является в принципе частичной, однако позволяет путем трансформации модового состава существенно увеличить узконаправленную компоненту пучка.

1. Лукин В.П. Формирование оптических пучков и изображений на основе применения систем адаптивной оптики // Успехи физ. наук. 2014. Т. 184, № 6. С. 599–640.
2. Гаранин С.Г., Манахинский А.Н., Стариков Ф.А., Хохлов С.В. Фазовая коррекция лазерного излучения с помощью адаптивных оптических систем в РФЯЦ-ВНИИЭФ // Автометрия. 2012. Т. 48, № 2. С. 30–37; Garaniin S.G., Manachinsky A.N., Starikov F.A., Khokhlov S.V. Phase correction of laser radiation with the use of adaptive optical systems at the Russian Federal Nuclear Center – Institute of Experimental Physics //

Optoelectron. Instr. Data Proc. 2012. V. 48, N 2. P. 134–141.

3. Starikov F.A., Kochemasov G.G., Kulikov S.M., Manachinsky A.N., Maslov N.V., Ogorodnikov A.V., Sukharev S.A., Aksenov V.P., Izmailov I.V., Kanev F.Yu., Atuchin V.V., Soldatenkov I.S. Wave front reconstruction of an optical vortex by Hartmann–Shack sensor // Opt. Lett. 2007. V. 32, N 16. P. 2291–2293.
4. Аксенов В.П., Измайлов И.В., Канев Ф.Ю., Стариков Ф.А. Алгоритмы восстановления сингулярного волнового фронта лазерного излучения: анализ и повышение точности // Квант. электрон. 2008. Т. 38, № 7. С. 673–677.
5. Starikov F.A., Kochemasov G.G., Kolytgin M.O., Kulikov S.M., Manachinsky A.N., Maslov N.V., Sukharev S.A., Aksenov V.P., Izmailov I.V., Kanev F.Yu., Atuchin V.V., Soldatenkov I.S. Correction of vortex laser beam in a closed-loop adaptive system with bimorph mirror // Opt. Lett. 2009. V. 34, N 15. P. 2264–2266.
6. Babin A.A., Beloshitskaya O.I., Bogachev V.A., Garaniin S.G., Glukhov M.A., Kolytgin M.O., Kopalkin A.V., Kuzin R.S., Kulikov S.M., Manachinsky A.N., Nosov S.N., Starikov F.A., Suharev S.A., Feoktistov V.V. Measurement of optical distortions of a cesium vapor laser by means of Shack–Hartmann sensor // 16th Int. Conf. on Laser Optics “LO-2014”. St. Petersburg, June 30 – July 4, 2014. Technical Program. P. 33.
7. Воронцов М.А., Корябин А.В., Полежаев В.И., Шмальгаузен В.И. Адаптивное внутрирезонаторное управление модовым составом излучения твердотельного лазера // Квант. электрон. 1991. Т. 18, № 8. С. 904–905.
8. Аббас А., Канцов Л.Н., Кудряшов А.В., Черезова Т.Ю. Управление параметрами излучения твердотельного технологического ИАГ:Nd<sup>3+</sup>-лазера методами адаптивной оптики. III. Уменьшение расходимости и формирование модовых структур // Квант. электрон. 1992. Т. 19, № 6. С. 581–583.
9. Lubeigt W., Valentine G., Burns D. Enhancement of laser performance using an intracavity deformable membrane mirror // Opt. Express. 2008. V. 16, N 15. P. 10943–10955.
10. Yang P., Lei X., Yang R., Ao M., Dong L., Xu B. Fast and stable enhancement of the far-field peak power by use of an intracavity deformable mirror // Appl. Opt. B. 2010. V. 100, N 3. P. 591–595.
11. Vorontsov M., Carhart G., Ricklin J. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization // Opt. Lett. 1997. V. 22, iss. 12. P. 907–909.

*V.A. Bogachev, S.G. Garanin, F.A. Starikov, R.A. Shnyagin.* **Numerical simulation of sensorless adaptive phase correction of regular, vertical, and incoherent multimode laser beams.**

A number of aspects are considered at phase correction of regular and vortical (speckled) laser beams by flexible adaptive mirror, the surface control of which is performed with the help of stochastic parallel gradient (SPG) algorithm, without the use of the wavefront sensor. It is shown that optimal choice of the criterion functional (metric) and basis function set allows one to improve the phase correction accuracy and convergence speed of SPG algorithm. A possibility is demonstrated of partial phase correction of the incoherent multimode radiation that can be realized, for example, in a laser cavity with optically inhomogeneous gain medium.