

## АДАПТИВНАЯ И ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОПТИКА

УДК 681.7.062.47

# Исследование возможности повышения эффективности адаптивной системы лазерной установки «Луч»

С.Г. Гаранин, А.И. Голубев, В.М. Повышев, Ф.А. Стариков, Р.А. Шнягин\*

*Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики  
607188, г. Саров, пр. Мира, 37*

Поступила в редакцию 14.02.2013 г.

Численно исследованы методы управления поверхностью широкоапертурного 61-элементного адаптивного зеркала, применяемого в оптической схеме лазерной установки «Луч», основанные на использовании для расчета управляющих напряжений стохастического параллельного градиентного (СПГ) алгоритма и метода наименьших квадратов (МНК). Найдены предельные возможности адаптивного зеркала по компенсации aberrаций лазерного пучка. Установлено, что СПГ-алгоритм способен практически полностью реализовать потенциал адаптивного зеркала по концентрации энергии в пятне фокусировки. Применяя СПГ-алгоритм, можно получить более эффективную коррекцию aberrаций лазерного пучка по сравнению с реализованной в эксперименте при стандартном управлении адаптивным зеркалом на основе измерения фазы датчиком волнового фронта. Предложен комбинированный метод управления адаптивным зеркалом на основе СПГ-алгоритма и МНК, который дает возможность получения доли лазерной энергии в дифракционном угле  $\sim 40\%$  и числа Штреля на уровне 0,4.

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

### Введение

Конструктивные особенности современных мощных широкоапертурных наносекундных лазерных установок для исследований плотной горячей плазмы «Луч» [1, 2] (прототипа создаваемой в РФЯЦ-ВНИИЭФ установки мегаджоульного класса УФЛ-2М), NIF (США) [3], LMJ (Франция) [4] таковы, что без принятия специальных мер не удастся получить высокое качество пучка выходного излучения. Это приводит к снижению интенсивности и однородности облучения лазерных мишеней. Поэтому задача коррекции оптических aberrаций на мощных лазерных установках является актуальной.

Основной источник фазовых искажений пучка – статические и динамические («тепловые») aberrации. Статические aberrации обусловлены несовершенством оптических элементов, неточностью юстировки оптической схемы. Динамические aberrации появляются в процессе генерации из-за неоднородности нагрева активных элементов излучением ламповой накачки.

Ключевым способом улучшения качества широкоапертурного пучка является коррекция его волно-

вого фронта методами линейной адаптивной оптики, широко применяемой и в астрономии (см., например, [5]). На установке «Луч» с помощью адаптивной системы, включающей корректор волнового фронта (КВФ) в виде широкоапертурного деформируемого зеркала [6] и датчик волнового фронта (ДВФ) гартмановского типа, расходимость излучения снижена до уровня  $1 \cdot 10^{-4}$  рад [7]. Тем не менее это значение на порядок величины превышает дифракционный предел. Цель данной работы – в расчетно-теоретических исследованиях с помощью метода наименьших квадратов (МНК) определить предельные возможности КВФ установки «Луч» по фазовой коррекции, а также исследовать возможность повышения качества лазерного пучка за счет применения стохастического параллельного градиентного (СПГ) алгоритма [8, 9] для управления поверхностью КВФ без использования ДВФ, избегая измерения волнового фронта, что обычно представляет достаточно сложную техническую проблему [10].

### 1. Работа адаптивной системы на установке «Луч»

Установка «Луч» – это лазер на фосфатном неодимовом стекле ( $\lambda = 1,053$  мкм), включающий систему формирования опорного излучения (СФОИ) дифракционного качества и четыре силовых канала

\* Сергей Григорьевич Гаранин; Александр Иванович Голубев; Валерий Михайлович Повышев; Федор Алексеевич Стариков; Роман Анатольевич Шнягин.

с ламповой накачкой. Энергия излучения на выходе канала 3 кДж, длительность импульса  $\tau = 2 \div 3$  нс, апертура пучка  $200 \times 200$  мм. Каждый силовой канал включает в себя транспортный пространственный фильтр (ТПФ), кюветный пространственный фильтр (КПФ), усилители У1 и У2 и реверсер (рис. 1).

Вакуумированные ТПФ и КПФ содержат две софокусные линзы, в общей фокальной плоскости которых располагается экран с четырьмя отверстиями, предназначенными для пространственной фильтрации пучка на каждом проходе с целью предотвращения развития мелкомасштабных нелинейных явлений.

Адаптивная система канала включает ДВФ Шэка–Гартмана и КВФ – деформируемое зеркало апертурой  $220 \times 220$  мм с 61 пьезотолкателем, расположенными в повернутой на  $45^\circ$  квадратной геометрии. Оптическая схема силового канала – четырехпроходная. На первом проходе (рис. 1) излучение от задающего генератора заводится в ТПФ, после ТПФ усиливается в дисковом усилителе, попадает в КПФ, после КПФ снова усиливается во втором усилителе, затем отражается от адаптивного зеркала, начиная второй проход. На втором проходе пучок распространяется в обратном направлении и из ТПФ отводится в реверсер, который выполняет функцию оптического затвора. На третьем проходе из реверсера пучок распространяется, как на первом проходе, затем снова отражается от адаптивного зеркала и начинает четвертый проход. После четвертого прохода усиленное излучение выводится из канала, преобразуется во вторую гармонику и транспортируется в мишенную камеру. Лазерный пучок на выходе канала при выключенной адаптивной системе с учетом статических и динамических aberrаций имеет расходимость, превышающую дифракционную в несколько десятков раз, что приводит к неудовлетворительному пятну фокусировки на мишени.

Схема расположения элементов адаптивной системы [7] на установке «Луч» приведена на рис. 1. КВФ расположен за вторым усилителем, и излучение в процессе усиления, как было указано, отража-

ется от него дважды. ДВФ Шэка–Гартмана расположен на выходе из усилительного тракта и предназначен для регистрации волнового фронта излучения и функций отклика КВФ. Функция отклика описывает деформацию поверхности КВФ под действием отдельного управляющего элемента (толкателя). Очевидно, что функции отклика представляют собой определенный базисный набор функций, причем он не является ортогональным и полным. Поэтому в общем случае произвольная фазовая поверхность не может быть в точности воспроизведена этим набором (исключением является тот случай, когда фазовая поверхность выбирается как сумма данных функций отклика, т.е. априори разлагается по ним).

Корректор волнового фронта перед установкой в оптическую схему испытывался на лабораторном стенде, где были измерены функции отклика непосредственно в его плоскости, а также измерена и скорректирована исходная форма поверхности. Аберрации исходной формы поверхности зеркала были уменьшены до  $PV = 1,08$  мкм,  $RMS = 0,13$  мкм. Здесь  $PV$  – разность между максимальным и минимальным значением фазы  $\phi$ , а  $RMS$  – среднеквадратическое отклонение фазы от среднего уровня.

Во время подготовки к лазерному выстрелу ДВФ анализирует волновой фронт СФОИ (или особого юстировочного лазера) на выходе канала и фиксирует искажения в «холодных» усилителях – статические aberrации. Во время выстрела ДВФ регистрирует суммарные (статические и динамические) aberrации. Вычитанием статических aberrаций из суммарных определяются интегральные по времени динамические aberrации, после чего вычисляются напряжения, которые нужно подать на электроды КВФ для компенсации динамических aberrаций. Непосредственно перед следующим выстрелом включается обратная связь и проводится коррекция статических aberrаций по пучку СФОИ (или юстировочного лазера), затем обратная связь разрывается и в поверхность КВФ дополнительно вносятся ранее вычисленные предискажения для коррекции динамических

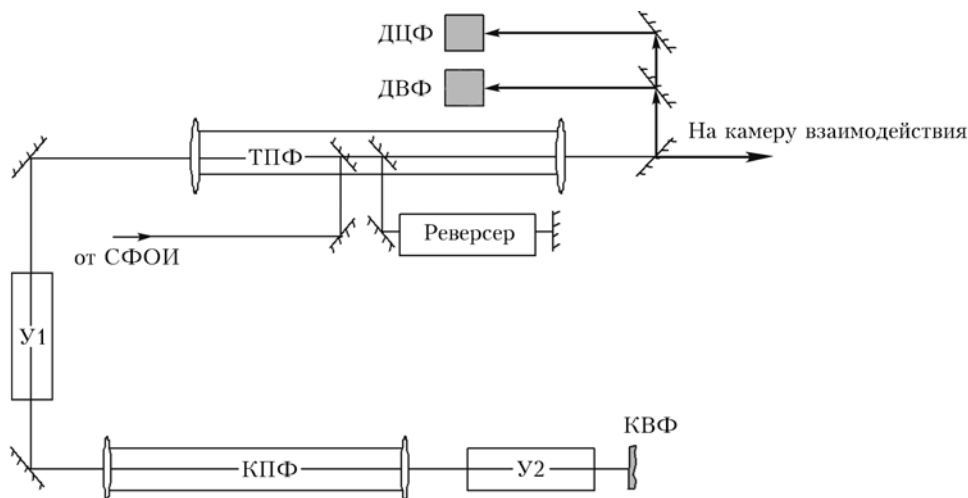


Рис. 1. Схема силового канала установки «Луч» с адаптивной оптикой

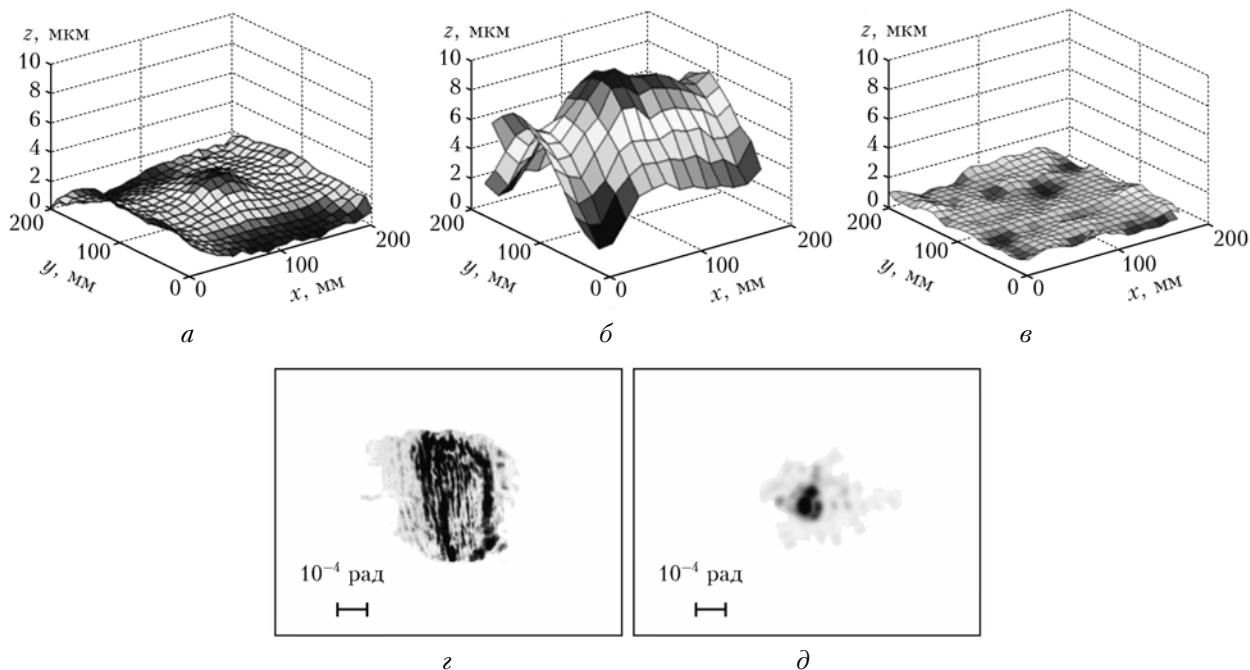


Рис. 2. Коррекция aberrаций волнового фронта в эксперименте на установке «Луч»: фазовая поверхность выходного лазерного излучения до коррекции при статических (*а*) и суммарных (*б*) aberrациях; после коррекции суммарных aberrаций (*в*); распределение плотности энергии выходного излучения в дальней зоне при суммарных aberrациях до коррекции (*г*) и после (*д*) коррекции

aberrаций. Производится выстрел, и ДВФ измеряет скорректированный интегральный за импульс волновой фронт рабочего излучения. Хорошая воспроизводимость динамических aberrаций от выстрела к выстрелу позволяет сделать работу адаптивной системы достаточно эффективной.

На рис. 2, *а*, *б* показаны экспериментальные волновые фронты лазерного пучка на установке «Луч» со статическими и суммарными aberrациями, характеризующиеся значениями  $PV = 2,8$  мкм,  $RMS = 0,55$  мкм и  $PV = 9,6$  мкм,  $RMS = 2,4$  мкм соответственно [7]. Уровень динамических aberrаций в данном примере выше по сравнению со статическими aberrациями (в экспериментах возможна и обратная ситуация при худшем качестве оптических элементов канала). Коррекция как статических, так и суммарных aberrаций приводит в эксперименте примерно к одному и тому же уровню остаточной ошибки:  $PV = 1,4 \div 1,5$  мкм,  $RMS = 0,23 \div 0,24$  мкм [7]. Скорректированный волновой фронт показан на рис. 2, *в*. После коррекции aberrаций распределение плотности энергии выходного излучения в дальней зоне (пятно фокусировки) заметно сужается, но расходимость излучения по уровню 80% энергии на порядок величины превышает дифракционный предел, а в дифракционном угле  $\theta_D$  содержится около 9% (после коррекции статических aberrаций) и 7% (после коррекции суммарных aberrаций) энергии пучка. Пятна фокусировки до и после коррекции суммарных aberrаций показаны на рис. 2, *г*, *д*. После коррекции выходного излучения пятно в дальней зоне содержит, как правило, несколько произвольно расположенных спеклов.

## 2. Определение предельных возможностей 61-элементного адаптивного зеркала

Важно отметить, что максимально возможная амплитуда деформации поверхности КВФ превышает амплитуду суммарных aberrаций, и с этой точки зрения КВФ обладает определенным потенциалом. Более точно предельные возможности КВФ можно определить с помощью МНК (в эксперименте с адаптивной системой и работа ДВФ, и управление КВФ стандартно построены на МНК). Его суть заключается в том, чтобы при конкретных aberrациях пучка определить напряжения на толкателях такие, чтобы фаза отраженного пучка в максимальной степени приближалась к плоской поверхности. В качестве базисных функций при этом используются экспериментально измеренные функции отклика КВФ. Стандартно предполагается, что амплитуда деформации поверхности КВФ пропорциональна приложенному напряжению и выполняется принцип аддитивности.

Расчеты проводились в следующей постановке. На КВФ падает и отражается от него квадратный пучок размером  $D = 18 \times 18$  см с однородной амплитудой и волновым фронтом, зарегистрированным в эксперименте. Далее излучение транслируется в дальнюю зону и вычисляются распределение энергии пучка по углу и число Штреля. Расчеты показали, что коррекция 61-элементным КВФ пучка со статическими aberrациями, проведенная по МНК с использованием метода Гаусса, позволяет получить

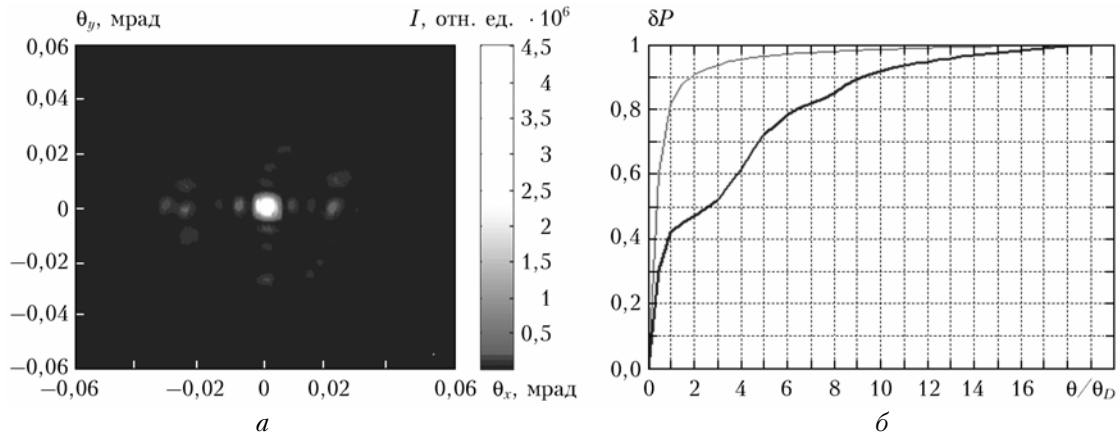


Рис. 3. Коррекция суммарных aberrаций по МНК: *a* – распределение интенсивности в дальней зоне; *b* – распределение энергии по углу (тонкая кривая – идеальный пучок, жирная кривая – скорректированный пучок)

долю энергии в дифракционном угле  $\delta P = 70\%$ , число Штреля  $St = 0,86$  и значения параметров волнового фронта  $PV = 0,42$  мкм,  $RMS = 0,06$  мкм. В случае суммарных aberrаций скорректированный пучок хотя и характеризуется более умеренными параметрами  $\delta P = 42\%$ ,  $St = 0,5$ ,  $PV = 0,97$  мкм,  $RMS = 0,14$  мкм (рис. 3), но все равно они существенно лучше достигнутых экспериментально. В отличие от рис. 2, *d*, где в пятне имеется несколько хаотически расположенных спеклов, на рис. 3, *a* в фокальной плоскости имеется яркое пятно дифракционного размера с фиксированным осевым положением и значительной долей энергии в дифракционном угле (42 вместо 7%), что важно для задачи фокусировки излучения на мишень.

Результаты моделирования МНК свидетельствуют о том, что геометрия и количество толкателей КВФ потенциально позволяют достичь лучших результатов коррекции. Причины неидеальной работы адаптивной системы в эксперименте могут заключаться в неточности измерения функций отклика КВФ и волнового фронта, качестве изготовления КВФ, нестабильности пьезотолкателей, несовершенстве работы КВФ в замкнутом цикле. Это дает основания для применения альтернативных методов при расчете управляющих напряжений КВФ, в частности метода, основанного на СПГ-алгоритме.

### 3. Коррекция волнового фронта с помощью СПГ-алгоритма

Типичная схема управления КВФ с помощью СПГ-алгоритма, который не требует измерения волнового фронта, реализуется следующим образом [8, 9]. Небольшая часть выходного излучения отводится на датчик целевой функции (ДЦФ) (см. рис. 1) и фокусируется линзой на фотоприемник, где измеряется целевая функция (осевая яркость или мощность излучения, прошедшего через малую приосевую диафрагму). Блок управления управляет КВФ итеративным образом, по схеме «предиктор–корректор». При фиксированной целевой функции на первом эта-

пе очередной итерации («предиктор») блок управления производит пробные случайные малые сдвиги напряжения на электродах КВФ, что ведет к небольшой деформации поверхности КВФ и изменению целевой функции. После этого осуществляется второй этап итерации («корректор»), на котором подаются поправочные сдвиги напряжений, величина их зависит от текущего значения целевой функции и ее изменения после первого этапа. В результате второго этапа целевая функция возрастает. Итерации повторяются  $N$  раз, пока целевая функция не достигнет заданного значения или по иному критерию. Таким образом, при применении СПГ-алгоритма, во-первых, требуемая задача максимизации яркости выходного излучения (или минимизации пятна фокусировки) в эксперименте может решаться непосредственно, исключая математические манипуляции с измерением волнового фронта, что может быть источником ошибок. Во-вторых, при этом нет необходимости в точном знании функций отклика КВФ.

Оптимизация работы СПГ-алгоритма для управления 61-элементным КВФ показала, что необходимо использовать по возможности малые значения подаваемых на КВФ напряжений  $\Delta U$ . Для дальнейшего исследования было принято значение  $\Delta U = 0,015$  В (при диапазоне напряжений на КВФ 0–120 В). Проведенное исследование показало, что в данной задаче эффективнее использовать в качестве целевой функции долю энергии, содержащейся в приосевой диафрагме в дальней зоне, нежели осевую яркость пучка (или число Штреля). Также было установлено, что размер приосевой диафрагмы должен быть приблизительно равен дифракционному размеру корректируемого пучка.

Поведение числа Штреля и доли энергии в дифракционном угле в процессе итеративной коррекции волнового фронта со статическими aberrациями показано на рис. 4, *a*.

Доля энергии в дифракционном угле растет монотонно и выходит на уровень  $\delta P = 67\%$  при  $N \approx 1000$ , что существенно превышает полученное в эксперименте значение  $\delta P = 9\%$ . Число Штреля  $St$  как величина локальная растет менее монотонно

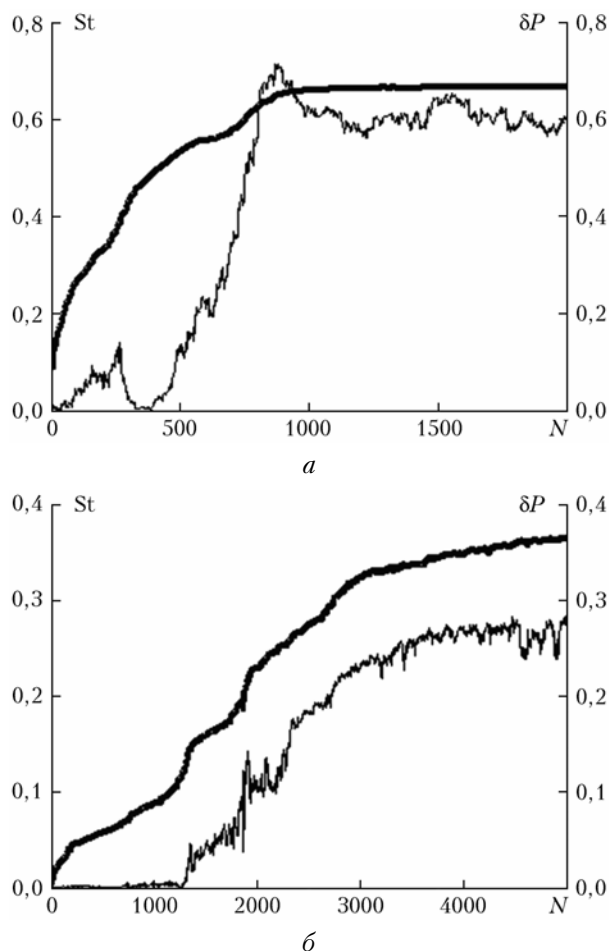


Рис. 4. Коррекция статических (а) и суммарных (б) aberrаций с помощью СПГ-алгоритма. Тонкая кривая – число Штреля  $St$ , жирная кривая – доля энергии  $\delta P$  в дифракционном угле

и достигает уровня, превышающего 0,6. Напомним, что в идеале КВФ может обеспечить  $\delta P = 70\%$ ,  $St = 0,86$  для статических aberrаций, т.е. по доле энергии в дифракционном угле СПГ-алгоритм полностью реализует потенциал КВФ. Получено существенное улучшение расходимости излучения – в скорректированном пучке 80% энергии содержится в угле  $3,5\theta_D$ , в пятне фокусировки имеется яркий центральный пик. При этом скорректированный волновой фронт имеет параметры  $PV = 1,5638$  мкм,  $RMS = 0,2124$ . Таким образом, в ходе численного моделирования установлено, что применение СПГ-алгоритма может обеспечить более яркое и стабильное пятно фокусировки на установке «Луч» по сравнению с традиционным подходом, использующим ДВФ.

Рассмотрим теперь эффективность коррекции 61-элементным КВФ волнового фронта пучка, содержащего суммарные (статические и динамические) aberrации, под управлением СПГ-алгоритма. Стоит отметить, что динамические aberrации невозможно компенсировать в эксперименте с помощью СПГ-алгоритма в режиме реального времени, но применять СПГ-алгоритм к управлению КВФ можно, имея результаты интегрального по времени измерения ди-

намических aberrаций с помощью ДВФ (собственно говоря, реализованный в эксперименте традиционный подход с ДВФ работает на таких же основаниях) и задавая модельное однородное или экспериментальное распределение интенсивности излучения в ближней зоне. Поведение числа Штреля и доли энергии в дифракционном угле в процессе итеративной коррекции волнового фронта с суммарными aberrациями показано на рис. 4, б. Доля энергии в дифракционном угле монотонно растет и достигает значения  $\delta P = 36\%$  при  $N = 5000$ , число Штреля составляет  $St = 0,28$ . Опять же напомним, что в идеале КВФ может обеспечить  $\delta P = 42\%$ ,  $St = 0,5$  для суммарных aberrаций, т.е. по доле энергии в дифракционном угле СПГ-алгоритм здесь также практически полностью реализует потенциал КВФ. По сравнению со случаем статических aberrаций для коррекции суммарных aberrаций требуется большее количество итераций. Расходимость скорректированного пучка, содержащего суммарные aberrации, по 80% содержания энергии примерно на порядок превышает дифракционную, как и в эксперименте с ДВФ. Но при этом в эксперименте в дифракционном угле содержится около 7% энергии, а в расчете существенно больше – 36%.

#### 4. Коррекция волнового фронта комбинированным методом

Поскольку экспериментальные данные по коррекции в традиционном подходе с ДВФ далеки от предельно возможных, то можно применить другие подходы. В любом случае коррекция статических aberrаций (без использования информации о них и функций отклика КВФ) должна проводиться в эксперименте с применением СПГ-алгоритма в режиме реального времени с включенной экспериментально обратной связью по командам ДЦФ, направленным на непосредственное получение предельно яркого пятна фокусировки излучения СФОИ (или юстировочного лазера). Коррекцию динамических aberrаций можно провести несколькими способами, но в любом случае она не может быть проведена в режиме реального времени, обратная связь в эксперименте должна быть разомкнута, и для коррекции необходима информация об измеренных динамических aberrациях и точных функциях отклика КВФ.

Для коррекции динамических aberrаций можно применить СПГ-алгоритм, как это сделано в разд. 3, применив компьютерную СПГ-процедуру. Но, по-видимому, более целесообразно комбинировать СПГ-коррекцию статических aberrаций перед силовым выстрелом с традиционной МНК-коррекцией известных динамических aberrаций. После СПГ-коррекции статических aberrаций компьютер рассчитывает по МНК, а блок управления вносит дополнительные предискажения поверхности КВФ для компенсации динамических aberrаций, как это делается в текущем эксперименте. Такая схема позволяет отказаться от систематического использования ДВФ, будет достаточно вычислить динамические aberrации

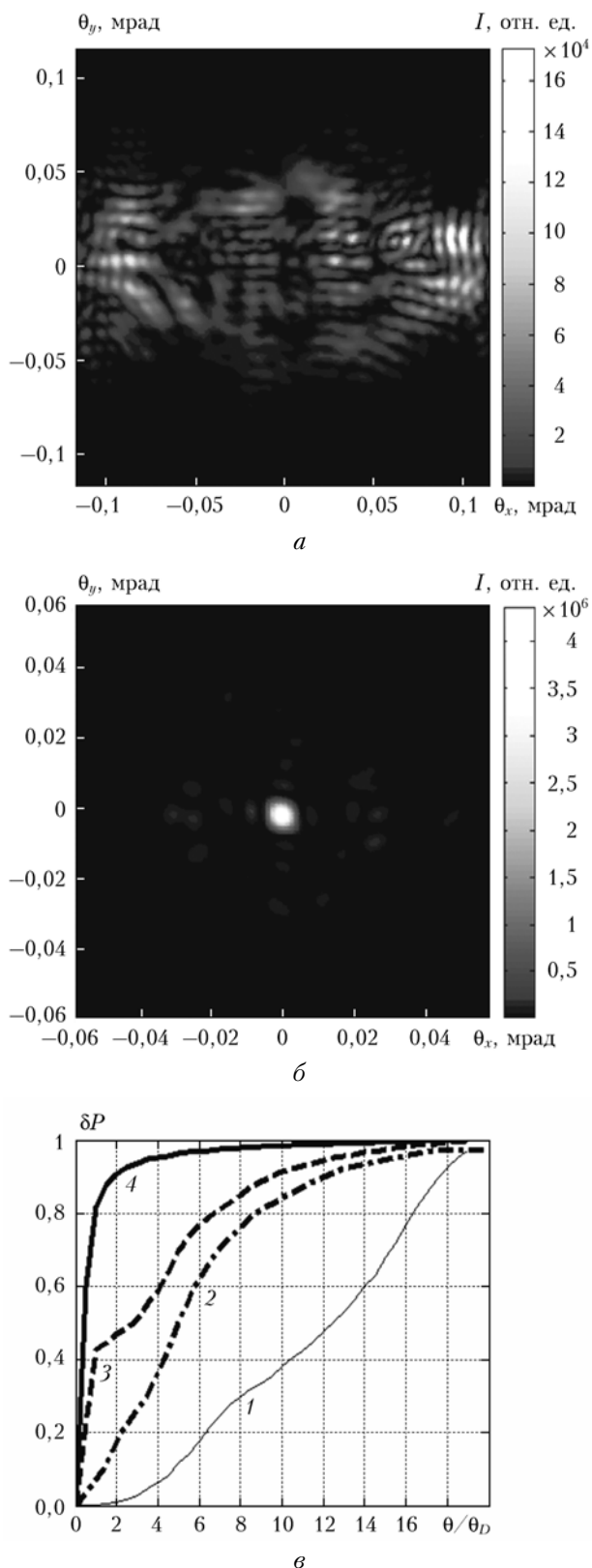


Рис. 5. Коррекция суммарных aberrаций комбинированным методом: расчетное пятно фокусировки *a* – без коррекции; *б* – после коррекции; *в* – распределение доли энергии в дальней зоне по углу: пучок до коррекции (1), пучок после коррекции в текущем эксперименте (2), в расчете комбинированным методом (3) и идеальный пучок (4)

один раз, поскольку от опыта к опыту они остаются достаточно стабильными. Расчеты, проведенные с применением комбинированного метода, показали целесообразность такого подхода. Распределения интенсивности излучения в дальней зоне до и после коррекции, а также распределение доли энергии в дальней зоне по углу представлены на рис. 5.

Комбинированный метод показывает принципиальную возможность фазовой коррекции пучка с увеличением доли энергии в дифракционном угле  $\delta P$  с 0,2 до 43% и числа Штреля *St* с 0,0003 до 0,40.

## Заклучение

Проведено расчетное исследование коррекции статических и динамических aberrаций волнового фронта на мощной импульсной лазерной установке «Луч» широкоапертурным 61-элементным КВФ с помощью МНК и СПГ-алгоритма. С помощью МНК найдены предельные возможности КВФ по компенсации aberrаций лазерного пучка. Установлено, что СПГ-алгоритм способен практически полностью реализовать потенциал КВФ с точки зрения концентрации энергии в пятне фокусировки. Управляя КВФ посредством СПГ-алгоритма, можно получить более эффективную коррекцию aberrаций лазерного пучка по сравнению с реализованной в эксперименте при стандартном управлении КВФ на основе измерения фазы. После коррекции статических aberrаций число Штреля *St* возрастает с 0,03 до 0,6, при этом доля энергии пучка в дифракционном угле  $\delta P$  в дальней зоне достигает 67% (в эксперименте коррекция статических aberrаций с ДВФ дает 9%).

Для улучшения качества работы адаптивной системы предложен комбинированный метод управления КВФ: статические aberrации исправляются с помощью СПГ-алгоритма, а динамические корректируются с использованием МНК. Комбинированный метод уменьшает остаточную ошибку коррекции, связанную с систематическим использованием ДВФ. Расчеты показали, что комбинированный метод позволяет получить  $St = 0,4$  и  $\delta P = 40\%$  (в текущем эксперименте коррекция суммарных aberrаций с ДВФ дает 7%).

Кроме того, принимая во внимание тот факт, что 61-элементный КВФ под управлением СПГ-алгоритма эффективно компенсирует статические aberrации, его можно использовать в процессе автоматической юстировки усилительного тракта на мощных лазерных установках для коррекции aberrаций излучения маркеров [11].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-02-00397-а).

1. Воронич И.Н., Галахов И.В., Гаранин С.Г., Ерошенко В.А., Зарецкий А.И., Зималин Б.Г., Игнатьев И.В., Курдяшкин М.Ю., Кириллов Г.А., Осин В.А., Рукавишников Н.Н., Сухарев С.А., Шаров О.А., Чарухчев А.В. Измерения коэффициента усиления в дисковом усилительном каскаде с активными элементами из неорганического фосфатного стекла // Квант. электрон. 2003. Т. 33, № 6. С. 485–488.

2. *Sukharev S.A.* The high-power phosphate-glass laser system «Luch» – a prototype of the «Iskra-6» facility module // Proc. SPIE. 1999. V. 3492. P. 12–24.
3. *Zacharias R.A., Beer N.R., Bliss E.S., Burkhardt S.C., Cohen S.J., Sutton S.B., Van Atta R.L., Winters S.E., Salmon J.T., Stolz C.J., Pigg D.C., Arnold T.J.* National Ignition Facility alignment and wavefront control // Proc. SPIE. 2004. V. 5341. P. 168–179.
4. *Grosset-Grange C., Barnier J., Chappuis C., Cortey H.* Design principle and first results obtained on the LMJ deformable mirror prototype // Proc. SPIE. 2007. V. 6584. P. 1–14.
5. *Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Ковadlo П.Г., Коняев П.А., Копылов Е.А., Лукин В.П., Трифонов В.Д.* Эффективность использования управляемого зеркала DM2-100-31 в адаптивной системе Большого солнечного вакуумного телескопа // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1096–1098.
6. *Бокало С.Ю., Гаранин С.Г., Григорович С.В., Журанов В.Г., Колтыгин М.О., Куликов С.М., Ляхов Д.М., Маначинский А.Н., Мизин П.П., Огородников А.В., Смекалин В.П., Смышляев С.П., Сухарев С.А., Шанин О.И., Щипалкин В.И.* Деформируемое зеркало на основе пьезоэлектрических приводов для адаптивной системы установки «Искра-6» // Квант. электрон. 2007. Т. 37, № 8. С. 691–696.
7. *Гаранин С.Г., Колтыгин М.О., Куликов С.М., Маначинский А.Н., Смышляев С.П., Сухарев С.А.* Разработка адаптивной системы. Экспериментальные результаты, полученные на установке «Луч»: Тезисы докл. // XXXVII Междунар. конф. по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Звенигород, 2010. С. 142.
8. *Гаранин С.Г., Маначинский 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.
9. *Garanin S.G., Khokhlov S.V., Manachinsky A.N., Starikov F.A.* Adaptive optical systems in Russian Federal Nuclear Center – VNIIEF with different control principles // Adv. in Science and Technol. 2013. V. 82. P. 75–84 (Trans Tech Publications, Switzerland).
10. *Антошкин Л.В., Лавринов В.В., Лавринова Л.Н., Лукин В.П.* Методы опережающего формирования фазовой поверхности на основе измерений датчика Шэка–Гартмана // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 11. С. 979–984.
11. *Гаранин С.Г., Стариков Ф.А., Шнягин Р.А.* Использование стохастического параллельного градиентного алгоритма в задаче автоюстировки усилительного канала установки УФЛ-2М // Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 114, № 6. С. 50–58.

***S.G. Garanin, A.I. Golubev, V.M. Pozyshev, F.A. Starikov, R.A. Shnyagin. Investigation of possibility to improve the efficiency of adaptive system of “Luch” facility.***

The methods of the control of a wide-aperture 61-element adaptive mirror implemented at the “Luch” facility are numerically investigated. These methods are based on the stochastic parallel gradient (SPG) algorithm and the least-squares approach (LSA) for control voltage calculation. The capability of the adaptive mirror is determined regarding to correction of phase aberrations. It is found that SPG algorithm is capable to practically completely realize the potential of the adaptive mirror on the energy focusing. By means of SPG algorithm it is possible to obtain more efficient correction of the laser beam aberrations in comparison with that realized in the experiments under conventional adaptive mirror operation mode based on the phase measurement by a wavefront sensor. A combined method (based on SPG algorithm and LSA) of adaptive mirror control is proposed. By means of this method it is possible to obtain the laser energy in diffraction angle at a level of 40% and the Strehl number at a rate of 0.4.