

ГРАДИЕНТНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ФОРМЫ АДАПТИВНОГО ЗЕРКАЛА И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ В СИСТЕМЕ КОРРЕКЦИИ ВОЛНОВОГО ФРОНТА МОЩНОЙ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ «ЛУЧ»

И. Н. Воронич, В. Ю. Гладкий, М. А. Глухов, В. Н. Деркач,
И. Н. Деркач, Р. С. Кузин, И. Е. Чернов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Нижегородская область, пр. Мира, 37, 607188, Россия

Система коррекции волнового фронта является одной из важных подсистем установки «Луч» [1], поскольку в оптическом тракте установки неизбежно возникают искажения волнового фронта, которые приводят в конечном итоге к увеличению расходимости излучения. Использование в системе коррекции элементов адаптивной оптики [2], позволяет уменьшить величину aberrаций, тем самым улучшая распределение интенсивности в пятне рассеивания и частично снижая расходимость. Изучение, оптимизация и выяснение пределов возможностей системы является актуальной задачей для возможных дальнейших использований адаптивной системы.

1. Система коррекции волнового фронта и её основные элементы.

Система коррекции волнового фронта представляет собой схему с обратной связью.

Её основными элементами являются адаптивное зеркало и датчик волнового фронта, согласно рис. 1.

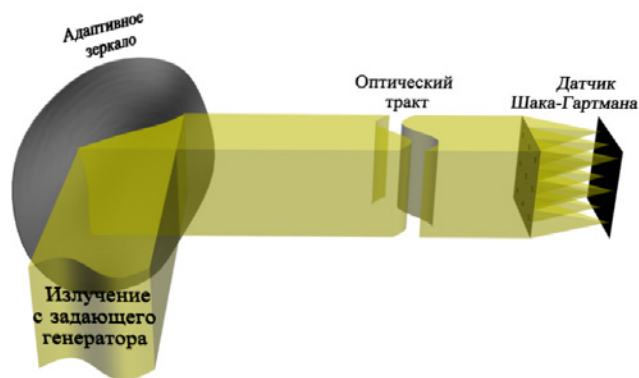


Рис. 1. Схема коррекции волнового фронта

Излучение с задающего генератора отражается от адаптивного зеркала, проходит через оптический тракт и попадает на датчик волнового фронта. При проходе излучения через оптический тракт качество волнового фронта ухудшается. Приобретенные aberrации зависят от качества изготовления элементов, правильности юстировки, движения воздуха в тракте. Основываясь на информации с датчика волнового фронта, рассчитывается фор-

ма зеркала, направленная на уменьшение величины aberrаций.

Адаптивное зеркало позволяет корректировать волновой фронт, благодаря изменению формы отражающей поверхности. Один из вариантов исполнения адаптивного зеркала представлен на рис. 2.

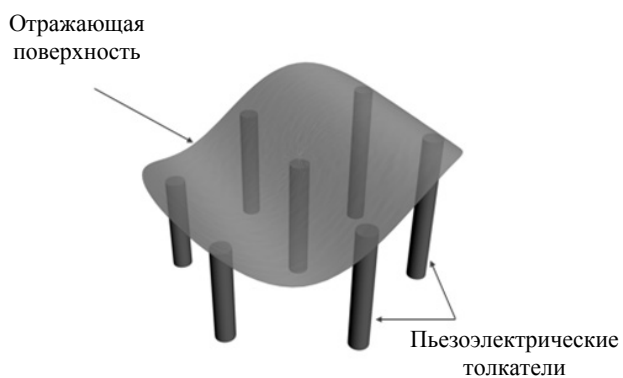


Рис. 2. Схематическое изображение адаптивного зеркала

При подаче напряжения на пьезоэлектрический толкатель, положение его крайней точки, жестко связанной с отражающей поверхностью, меняет свое положение, за счет чего изменяется форма отражающей поверхности. Подавая поочередно калибровочное напряжение на каждый толкатель и измеряя изменение волнового фронта, получают функции отклика толкателей. Существуют различные варианты геометрического расположения толкателей, различные покрытия отра-

жающей поверхности, а также другие принципы изменения формы отражающей поверхности.

Датчик Шака – Гартмана [3] согласно рис. 3 состоит из набора микролинз и приемника (как правило CCD камера), расположенного в фокусе микролинз. Излучение, вырезаемое каждой суб-апертурой, фокусируется на приемнике, полученное изображение называется гартманограммой [3]. При падении излучения с плоским волновым фронтом гартманограмма представляет собой правильную структуру фокальных пятен, расположение которых соответствует геометрии линзового растра. При падении излучения с произвольным волновым фронтом пятна отклоняются согласно средним локальным наклонам волнового фронта на субапертурах.

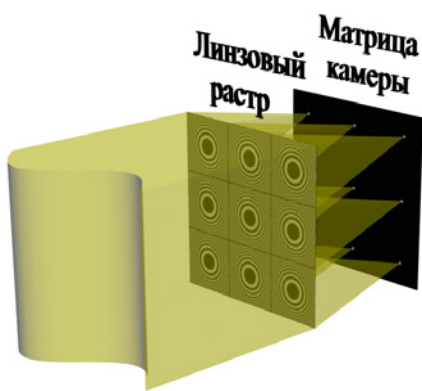


Рис. 3. Принципиальная схема датчика Шака – Гартмана

2. Информация с датчика Шака – Гартмана

На рис. 4 показано сечение датчика Шака – Гартмана плоскостью, проходящей через направление распространения излучения.

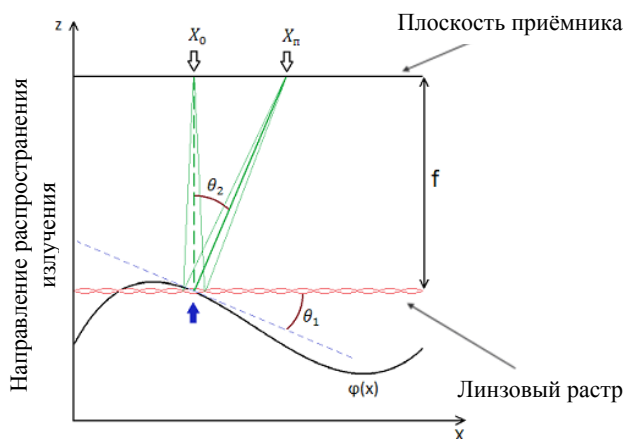


Рис. 4. Сечение датчика Шака – Гартмана плоскостью, проходящей через направление распространения излучения

На данном рисунке направление распространения излучения вдоль оси z , $\varphi(x)$ – волновой фронт излучения. Частая пунктирная линия – касательная к кривой $\varphi(x)$ в центре микролинзы, на которую указывает сплошная стрелка. X_0 – координата пятна в которое сфокусируется излучение с плоским волновым фронтом, X_n – координата пятна при изображенном волновом фронте. Из построения видно, что углы θ_1 и θ_2 авны, причем $\tan \theta_1$ равен производной функции $\varphi(x)$ со знаком минус, а $\tan \theta_2$ равен отношению смещения пятна к фокусу(2.1).

$$\frac{(X_n - X_0)}{f} = \tan \theta_2 = \tan \theta_1 = \frac{\partial \varphi(x)}{\partial x} \quad (2.1)$$

Ничем не отличаются рассуждения для второй координаты(2.2).

$$\frac{(Y_n - Y_0)}{f} = - \frac{\partial \varphi(y)}{\partial y} \quad (2.2)$$

Как видно из приведенных формул, вычислив смещения пятен, и зная фокусное расстояние, можно рассчитать частные производные фазы, а значит и градиент волнового фронта [4]. На рисунке изображен волновой фронт, который незначительно меняется на размере субапертуры, в тех случаях, когда это условие не выполняется, значения смещений пятен будут пропорциональны усредненным частным производным. Не во всех случаях есть возможность подать пучок с плоским волновым фронтом, т. е. иногда координаты X_0 и Y_0 неизвестны, известны только расстояния между ними, которые равны расстояниям между субапертурами. В этих случаях координаты X_0 и Y_0 рассчитываются из условия, что сумма всех отклонений по оси X , а также сумма всех отклонений по оси Y равнялись нулю, и, как следствие, x и y компоненты среднего значения градиента равны нулю. Таким образом, можно сказать, что обработка гартманограммы позволяет вычислить градиент волнового фронта, и если быть до конца точным, то датчик Шака – Гартмана стоит называть датчиком не волнового фронта, а градиента волнового фронта.

3. Фазовый метод расчёта управляющих напряжений деформируемого зеркала

Для того, чтобы скорректировать волновой фронт, необходимо рассчитать напряжения кото-

рые будут подаваться на толкатели адаптивного зеркала. Сделать это можно двумя способами. Первый способ заключается в том, что из градиента восстанавливается поверхность фазы (3.1), которая затем раскладывается по функциям отклика зеркала (3.2), которые также представляют собой восстановленные поверхности фазы.

$$\text{grad}(\varphi) \rightarrow \varphi(x, y) \quad (3.1)$$

$$\sqrt{\iint \left[\varphi(x, y) - \sum_{k=1}^{k=n} a_k * g_k(x, y) \right]^2 dx dy} \rightarrow \min \quad (3.2)$$

Результатом такой коррекции, является минимизация среднеквадратичного отклонения (далее СКО) волнового фронта. В том случае, если волновому фронту нужно придать некоторую известную форму $\varphi(x, y)$, к минимуму сводится СКО разности восстановленного волнового фронта и заданной поверхности (3.3).

$$\sqrt{\iint \left[\varphi(x, y) - \varphi_0(x, y) - \sum_{k=1}^{k=n} a_k * g_k(x, y) \right]^2 dx dy} \rightarrow \min \quad (3.3)$$

Конечной целью является минимизация расходимости а не минимизация СКО волнового фронта, т. е. в данном методе предполагается что уменьшение СКО ВФ приводит к снижению расходимости. Для проверки этого факта была построена зависимость (рис. 5) расходимости излучения полученной в эксперименте, и определенной по уровню содержания энергии 80 %, от СКО

волнового фронта восстановленного из гартманограммы.

Как видно из графика, зависимость имеет сложный характер.

4. Градиентный метод расчёта управляющих напряжений деформируемого зеркала.

Второй способ предполагает использование именно тех данных, которые получаются из гартманограммы. Как показывалось выше, при обработке гартманограммы, для каждой субапертуры вычисляются два значения – смещения пятен по осям X и Y. Расчёт коэффициентов при функциях отклика предлагается производить из условия минимизации среднеквадратичного смещения, функции отклика в данном случае также представляют собой смещения пятен.

$$\sqrt{\sum_{i=1}^{i=N_s} \left[\left(K_x^i - \sum_{k=1}^{k=n} a_k * G_{x_k}^i \right)^2 + \left(K_y^i - \sum_{k=1}^{k=n} a_k * G_{y_k}^i \right)^2 \right]} \rightarrow \min \quad (3.4)$$

Рассмотрим среднеквадратичное значение модуля разности градиентов ВФ в точке и среднего значения градиента ВФ (3.5), интегрирование производится по поперечному сечению пучка.

$$\sqrt{\iint \left| \text{grad}(U) - \overline{\text{grad}(U)} \right|^2 dx dy} \quad (3.5)$$

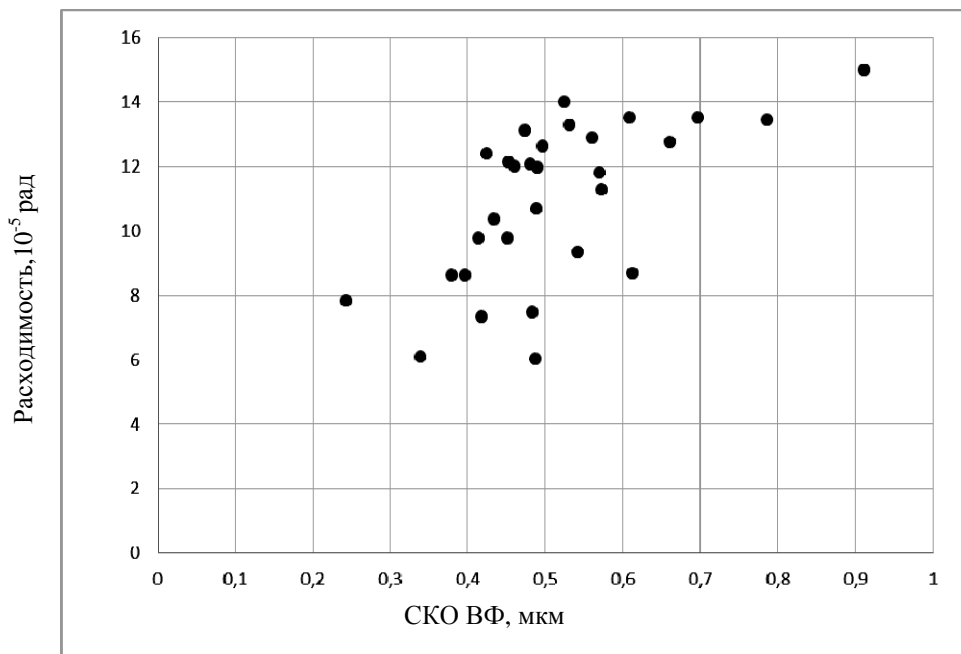


Рис. 5. Зависимость расходимости излучения от СКО волнового фронта

Так как гартманограмма дает усредненные по субапертурам значения градиентов ВФ, то необходимо перейти к сумме. Выше упоминалось, что смещения определяются из условия, что их сумма равна нулю, значит, средние значения x и y компоненты градиентов ВФ будут равны нулю, z компонента градиентов ВФ на всех субапертурах равна единице.

$$\sqrt{\sum_{i=1}^{i=N_s} \left[(K_x^i - \overline{K_x})^2 + (K_y^i - \overline{K_y})^2 \right]} = \quad (3.6)$$

$$= \sqrt{\sum_{i=1}^{i=N_s} \left[(K_x^i)^2 + (K_y^i)^2 \right]}$$

Как видно, с точностью до коэффициента, СКО градиента ВФ равно среднеквадратичному смещению пятен, следовательно, уменьшение среднеквадратичного смещения, приводит к уменьшению величины СКО градиента ВФ.

В данном случае предполагается, что уменьшение СКО градиентов ВФ приведет к снижению расходимости. Величина СКО градиента ВФ, в отличие от величины СКО ВФ, при собранном канале, меняется незначительно. График в таком диапазоне изменении аргумента не информативен. Однако возможность построения графика представилась во время проведения работ по замене активных элементов на установке «Луч». На рис. 6 представлена зависимость расходимости излучения, полученной в эксперименте, от СКО

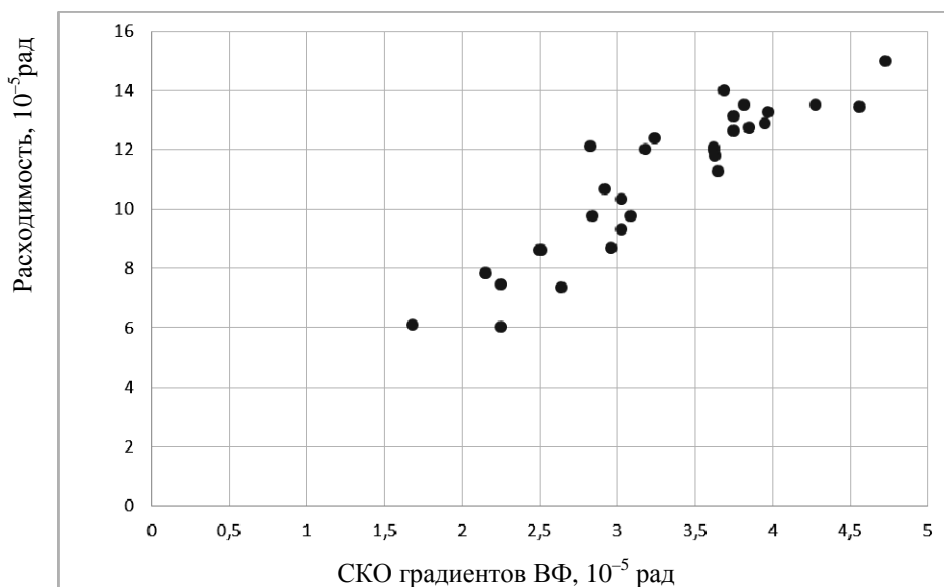


Рис. 6. Зависимость расходимости излучения от СКО градиентов ВФ. Как видно, зависимость имеет линейный характер

градиентов волнового фронта полученного из гартманограммы.

Результаты коррекции волнового фронта на выходе установки «Луч».

Ниже представлены результаты коррекции волнового фронта на выходе установки «Луч» с использованием вышеописанных методов расчёта напряжений толкателей – рисунки с 7 по 8.

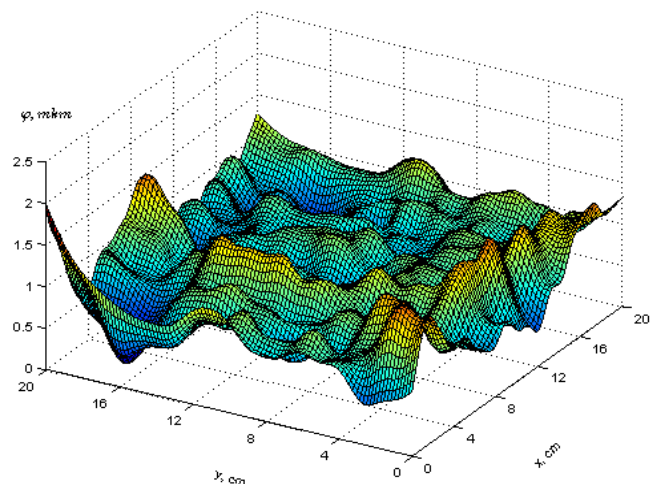


Рис. 7. Волновой фронт на выходе установки «Луч», скорректированный с использованием фазового метода расчёта напряжений

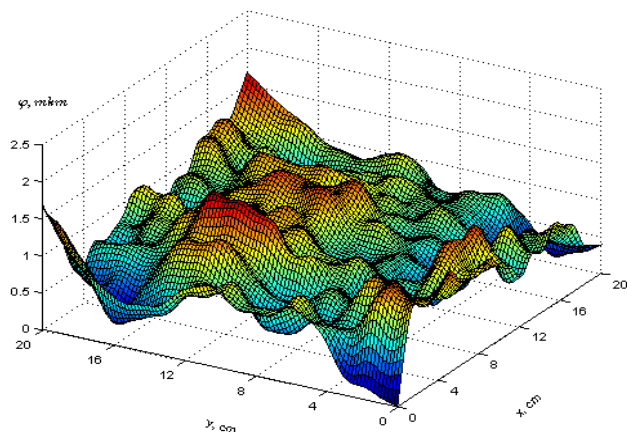


Рис. 8. Волновой фронт на выходе установки «Луч», скорректированный с использованием градиентного метода расчёта напряжений

Коэффициент корреляции восстановленных фронтов равен 0.95, откуда можно сделать вывод, что при данной конфигурации адаптивной системы, использование различных методов расчета управляющих напряжений приводит к схожим результатам.

Таблица 1 позволяет провести сравнение двух методов расчёта напряжений

Таблица 1
Сравнение двух методов расчёта напряжений

Метод расчёта напряжений	Фазовый	Градиентный
СКО Фазы, мкм	0.24	0.26
Размах Фазы, мкм	1.99	1.74
СКО градиента, 10^{-5} рад	2.66	2.63
Время выполнения, мс	8	1-2
Прямая связь с СКО градиента ВФ	нет	да
Простота	нет	да
Зависимость от геометрии расположения субапертур	да	нет
Ошибка вносимая при восстановлении фазы	да	нет

Основываясь на приведенных цифрах можно сказать, что градиентный метод по некоторым характеристикам превышает возможности существующего алгоритма и при этом лишен многих недостатков, например таких как ошибка, вносимая при восстановлении фазы, зависимость от геометрии расположения субапертур. Время обработки

гартманограммы и расчёта напряжений составляет 1–2 мс, что позволяет говорить о коррекции в режиме реального времени.

Выводы

В данном докладе предложен метод расчёта напряжений толкателей адаптивного зеркала, на основе минимизации среднеквадратичного смещения пятен гартманограммы, которое в свою очередь линейно связано с СКО градиентов ВФ. Результаты реализации данного метода в системе коррекции волнового фронта установки «Луч» показали, что по некоторым характеристикам новый метод превосходит предшественника и при этом лишен многих недостатков.

По результатам серии экспериментов получена зависимость расходимости по уровню содержания 80 % энергии, от СКО градиентов волнового фронта, вычисленного в результате обработки гартманограммы. Характер зависимости линейный, используя полученную зависимость можно рассчитывать значения расходимости, используя только датчик Шака – Гартмана, при этом средняя ошибка составляет 10 %.

Список литературы

1. Гаранин С. Г., Зарецкий А. И., Ильяев Р. И. и др. Канал мощной установки «Луч» для ЛТС с энергией импульса 3,3 кДж и длительностью 4нс. // Квантовая электроника, 2005, т. 35, с. 299 – 301.
2. Воронич И. Н., Гаранин С. Г., Зарецкий А. И. и др. Уменьшение aberrаций волнового фронта и расходимости лазерного излучения на установке «Луч» с помощью адаптивной системы. // Квантовая электроника, 2005, т.35, №2, с.140-142.
3. Kudryashov V., Zavalova Y. Shack-Hartmann wavefront sensor for laser beam analyses. // Proc. SPIE 4493, High-Resolution Wavefront Control: Methods, Devices, and Applications III, 277 (February 5, 2002); doi: 10.1117/12.454723
4. Lawson J. K., Auerbach J. M., English R. E., etc. NIF Optical Specifications - The Importance of the RMS Gradient. // Proc. SPIE 3492, Third International Conference on Solid State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion, 336 (July 23, 1999); doi: 10.1117/12.354145