

Адаптивные системы на основе датчика Шака – Гартмана и датчика ИНТЕНСИВНОСТИ

С целью фазовой коррекции лазерного пучка проведена проверка эффективности двух алгоритмов оптимизации градиентного типа: стохастического параллельного градиентного алгоритма и модифицированного метода наименьших квадратов.

М. А. Глухов, А. И. Голубев,
М. О. Колтыгин, Р. С. Кузин,
А. Н. Маначинский, Ф. А. Стариков

Введение

При формировании и распространении лазерного излучения происходят искажения волнового фронта [1]. Источниками искажений волнового фронта являются собственно лазер, различные эффекты при распространении излучения в системе оптического тракта (ошибки изготовления и юстировки оптических элементов, термодформации оптики, самовоздействие излучения, турбулентность), а также трассовые эффекты, в первую очередь, турбулентность. Для коррекции искажений волнового фронта применяют адаптивную систему, состоящую из адаптивного зеркала, датчика волнового фронта или датчика интенсивности и ССD-камеры.

Адаптивная система на основе датчика Шака – Гартмана

Стандартная адаптивная оптическая система коррекции фазового фронта лазерного пучка включает в себя датчик волнового фронта Шака – Гартманна, который измеряет исходную фазовую поверхность излучения, и корректор волнового фронта (адаптивное зеркало), который на основе информации от датчика трансформирует фазовую поверхность зеркала к заданной форме [2]. Однако в этом случае для регистрации пятен необходим пучок с достаточной энергией излучения. Схема датчика волнового фронта изображена на рис. 1.

Киноформный растр 4 (см. рис. 1) предназначен для образования картины фокальных пятен на ССD-камере 5, предназначенной для регистрации картины фокальных пятен и расположенной в фокальной плоскости киноформного растра. ССD-камера и киноформный растр жестко закреплены между собой с помощью переходного кольца. Киноформный растр представляет собой систему плотно упакованных дифракционных линз, каждая из которых является зонной пластинкой Френеля. На рис. 2 показаны картины фокальных пятен киноформного растра.

* Доклад на VII школе по лазерной физике. Москва, 18–20 июня 2013 г.

Метод восстановления волнового фронта на основе датчика волнового фронта хорошо известен. Суть метода заключается в том, что, зная смещение фокальных пятен пучка относительно опорной картинки, можно найти необходимые корректирующие напряжения, которые необходимо подать на деформируемое зеркало, чтобы изменить его поверхность.

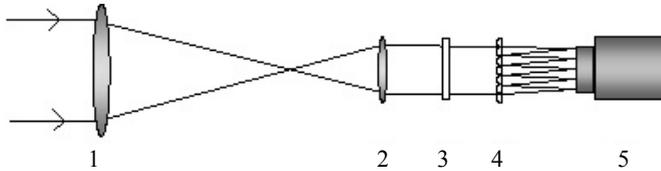


Рис. 1. Схема датчика волнового фронта: 1, 2 – линзы согласующего телескопа; 3 – варьируемый ослабитель; 4 – киноформный растр; 5 – CCD-камера

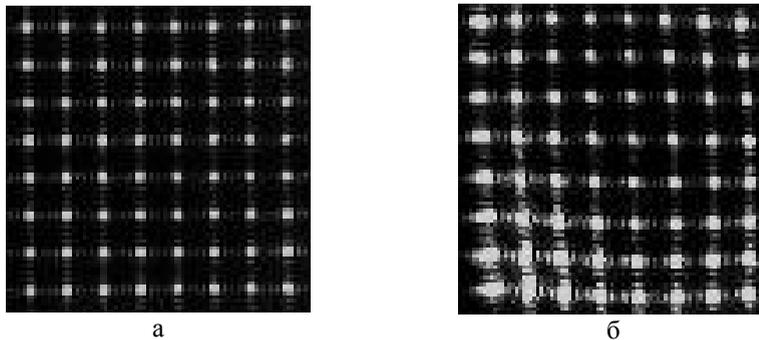


Рис. 2. Картины фокальных пятен киноформного раstra опорного (а) и искаженного (б) излучений

Адаптивная система на основе датчика интенсивности

Помимо стандартной схемы, использующей датчик волнового фронта Шака – Гартмана, существуют схемы, в которых используется датчик интенсивности. В этом случае датчик Шака – Гартмана используется только один раз – для измерения функции отклика деформируемого зеркала в рамках реализации алгоритма на основе модифицированного метода наименьших квадратов (ММНК). При отсутствии данных по измерениям волнового фронта излучения [3] задача максимизации осевой яркости лазерного излучения с помощью управления формой поверхности адаптивного зеркала решается двумя методами:

ММНК – метод максимизации осевой яркости излучения, в котором исходные уравнения для определения параметров управления адаптивным зеркалом написаны с применением модифицированного метода наименьших квадратов, а затем предложен способ оценки правых частей полученной системы линейных алгебраических уравнений, не использующий знание волнового фронта излучения [4];

СПГ – стохастический параллельный градиентный алгоритм – реализует стохастический метод поиска минимума в неограниченной области. Направления поиска выбираются случайным образом. Шаг поиска адаптируется к поведению функции вблизи текущей точки. Особенностью метода является то, что в случае первой неудачной попытки продвинуться в выбранном направлении делается попытка продвинуться в обратном направлении (если вперед «плохо», то назад должно быть «лучше»).

Биморфное адаптивное зеркало

Для управления волновым фронтом лазерного излучения в составе адаптивной системы применяется адаптивное зеркало. Зеркало изменяет форму отражающей поверхности при подаче управляющих электрических напряжений на его внутреннюю пьезоэлектрическую структуру [5–7].

В данной работе в качестве корректора волнового фронта выбрано гибкое биморфное адаптивное зеркало с модальными (нелокальными) функциями отклика, что соответствует потенциально более сложному случаю корректировки. Адаптивное зеркало на пьезокерамической основе с квадратной упаковкой управляющих электродов и схема расположения управляющих элементов показаны на рис. 3. Световая апертура корректора 45 мм, толщина 4,5 мм; количество пьезокерамических пластин – 2, размер пластины 45×45 мм, толщина 0,4 мм; материал подложки – стекло ЛК-105; количество управляющих электродов – 26 (1 сплошной электрод на первой пьезоэлектрической пластине и 25 электродов на второй пьезоэлектрической пластине). Примеры экспериментальных функций отклика для электродов № 2 и № 8 показаны на рис. 4. Предполагается, что амплитуда деформации строго пропорциональна приложенному напряжению и выполняется принцип аддитивности: полная деформация поверхности зеркала равна сумме функций отклика каждого электрода.

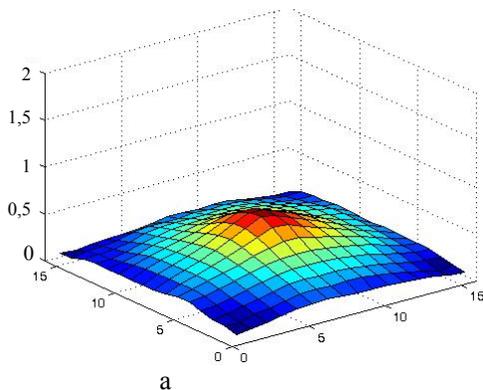


а

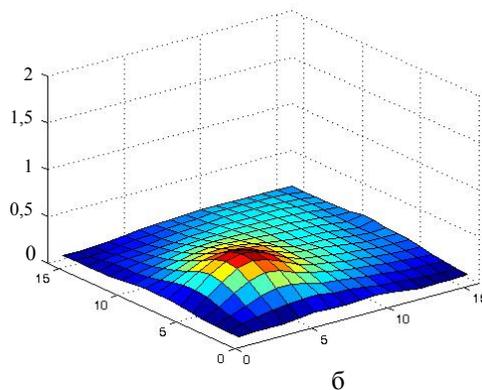
25	26	11	12	13
24	10	3	4	14
23	9	2	5	15
22	8	7	6	16
21	20	19	18	17

б

Рис. 3. Общий вид деформируемого адаптивного зеркала КВФ-45К-26 (а) и схема расположения управляющих элементов (б)



а



б

Рис. 4. Форма функций отклика управляющих электродов биморфного адаптивного зеркала для электродов № 2 (а) и № 8 (б)

Определение управляющих напряжений по результатам измерений относительной яркости

ММНК. Метод основан на информации о значении яркости излучения на оптической оси и использует функции отклика адаптивного зеркала, зарегистрированные с помощью датчика волнового фронта гартмановского типа.

Пусть после проведения j ($j = 1, 2, \dots, N$) итераций к электродам зеркала приложен набор управляющих электрических напряжений $\{U_j\}$, при этом в фокальной плоскости регистрируется яркость I_j .

На первом этапе производится M промежуточных итераций (в данном случае 25), последовательно подавая «пробные» добавки ΔU на каждый из M толкателей, при этом регистрируя интенсивности I_i ($i = 1, 2, \dots, M$).

На втором этапе к исходному набору управляющих напряжений $\{U_j\}$ добавляется набор напряжений, полученный на основании измеренных интенсивностей I_i и заранее снятых функций отклика g_i при напряжениях U_g :

$$\{U_{j+1}\} = \{U_j\} + \left(\int_D g_i g_j dx dy \right)^{-1} d^2 \frac{I_j - I_i}{2k^2 \varepsilon_i \sqrt{I_j}}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_i = \frac{\Delta U}{U_g}$, $k = 2\pi/\lambda$, d – рабочая апертура пучка, λ – длина волны лазерного излучения.

Итерации повторяются, пока не будет достигнута сходимость целевой функции I_j при выбранном критерии.

СПГ. Метод основан только на информации о значении яркости излучения на оптической оси.

Пусть после проведения j ($j = 1, 2, \dots, N$) итераций к электродам зеркала приложен случайный набор управляющих электрических напряжений $\{U_j\}$, при этом в фокальной плоскости регистрируется яркость I_j .

На первом этапе очередной ($j + 1$)-й итерации подается «пробная» добавка напряжений $\{\Delta U_j\}$. Напряжения на деформируемом зеркале становятся равными

$$\{U'_{j+1}\} = \{U_j\} + \{\Delta U_j\}, \quad (2)$$

а интенсивность излучения в фокальной плоскости становится равной I'_{j+1} . Далее определяется вызванное этой добавкой изменение интенсивности $\Delta I = I'_{j+1} - I_j$.

На втором этапе к исходному набору управляющих напряжений $\{U_j\}$ добавляется набор напряжений, пропорциональный $\Delta I/I_j$:

$$\{U_{j+1}\} = \{U'_{j+1}\} + 2\gamma \left(\frac{\Delta I}{I_j} - 1 \right) \{\Delta U_j\} = \{U_j\} + 2\gamma \frac{\Delta I}{I_j} \{\Delta U_j\}. \quad (3)$$

Методологически наиболее эффективно на втором этапе стартовать именно от $\{U'_{j+1}\}$, не возвращаясь к $\{U_j\}$: это позволяет уменьшить роль гистерезиса при деформации адаптивного зеркала.

Если $\Delta I/I_j > 0$, то добавку можно считать успешной и процесс поиска максимума осевой яркости движется в нужном направлении, при этом параметр γ контролирует темп сходимости. Если $\Delta I/I_j < 0$, то выбранная добавка $\{\Delta U_j\}$ оказалась неудачной. Но так как добавка $2\gamma \frac{\Delta I}{I_j} \{\Delta U_j\}$ имеет другой знак, то можно надеяться, что корректирующий второй шаг в «противоположном» направлении окажется удачным.

Набор напряжений $\{\Delta U_j\}$ представляет собой набор случайных сдвигов напряжений, параллельно подаваемых на электроды адаптивного зеркала. Он может быть либо случайно распределен в интервале $[-\Delta U_0; +\Delta U_0]$ и принимать произвольные значения из этого интервала, либо принимать два фиксированных значения $-\Delta U_0$ или ΔU_0 , а случайным образом определяется знак значений.

Итерации повторяются, пока не будет достигнута сходимость целевой функции I_j при выбранном критерии.

Схема фазовой коррекции лазерного пучка

Схемы коррекции искажений фазового фронта лазерного пучка с помощью алгоритмов СПГ и ММНК не имеют принципиальных отличий. Их задача заключается в том, чтобы итеративно деформировать форму отражающей поверхности адаптивного зеркала под действием управляющих напряжений таким образом, чтобы получить максимальную яркость излучения на оптической оси в фокальной плоскости. Разница заключается лишь в том, что для ММНК требуется снятие функций отклика адаптивного зеркала с помощью датчика волнового фронта гартмановского типа. Стоит отметить, что функции отклика для конкретного адаптивного зеркала снимаются единожды и в дальнейших экспериментах датчик волнового фронта не требуется.

Схема фазовой коррекции лазерного пучка показана на рис. 5.

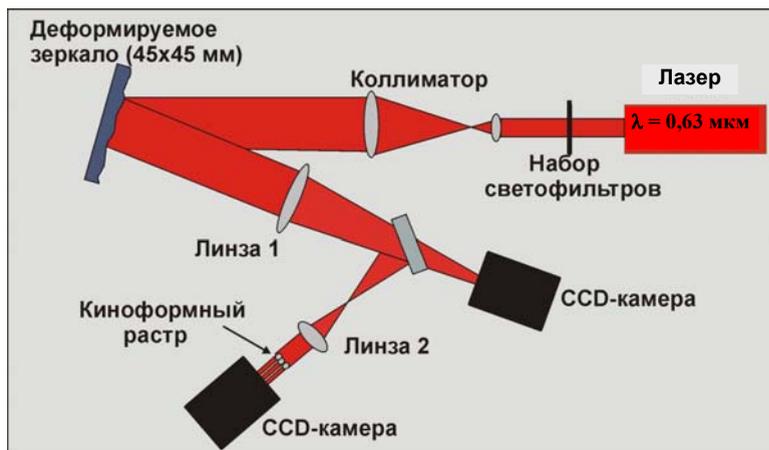


Рис. 5. Схема эксперимента по фазовой коррекции лазерного пучка

Излучение лазера с длиной волны $\lambda = 0,63$ мкм проходит через коллиматор, который формирует плоский параллельный пучок. На выходе из коллиматора ставится диафрагма, формирующая пучок размером 36×36 мм, который падет на деформируемое зеркало. Отражаясь от зер-

кала, пучок через собирающую линзу попадает на CCD-камеру, регистрирующую осевую яркость излучения. На основании значения яркости излучения производится расчет управляющих напряжений с помощью одного из алгоритмов, после чего рассчитанные напряжения подаются на адаптивное зеркало, изменяя его поверхность. Затем регистрируется новое значение яркости, совершается очередной расчет напряжений и подача на зеркало, пока яркость излучения на CCD-камере не достигнет предельного значения согласно заданному критерию.

Часть излучения отводится делителем на датчик волнового фронта, которым регистрируются функции отклика адаптивного зеркала алгоритма ММНК.

Частота работы адаптивной системы в замкнутом цикле определялась частотой работы CCD-камеры и составляла 2 Гц. Таким образом, проводились эксперименты по компенсации только квазистатических aberrаций.

Сравнение результатов численного моделирования и экспериментов

В экспериментах максимизации осевой яркости для метода наименьших квадратов использовались функции отклика, зарегистрированные при последовательной подаче управляющих напряжений 150 В. В экспериментах с использованием алгоритма СПГ применялись следующие параметры: $\Delta U_0 = 6$ В, $\gamma = 2$.

На рис. 6 показаны графики изменения осевой яркости в зависимости от итерации, полученные в результате численного моделирования и экспериментов. Из графиков видно, что тенденция роста числа Штреля для разных алгоритмов, полученная в численных расчетах, сохраняется и в экспериментах. Рост числа Штреля при использовании ММНК, более резкий на первых итерациях, спадает на последующих. Алгоритм СПГ показывает монотонный, но более быстрый рост, чем при моделировании.

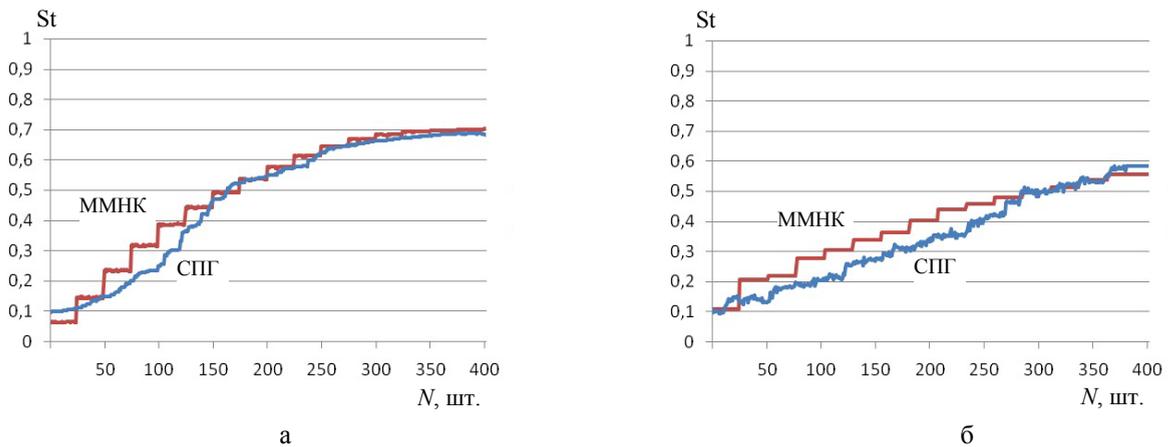


Рис. 6. Зависимости числа Штреля от числа итераций для алгоритмов управления ММНК и СПГ при численном моделировании (а) и в эксперименте (б)

На рис. 7 показаны распределения интенсивности излучения до и после коррекции с использованием ММНК и после коррекции с использованием алгоритма СПГ.

Дифракционная расходимость излучения длиной волны $\lambda = 0,63$ мкм при апертуре пучка $3,6 \times 3,6$ см составляет $3,5 \cdot 10^{-5}$ рад. Видно, что результаты коррекции разными методами принципиально мало отличаются, пучок группируется в пятно, близкое к дифракционному.

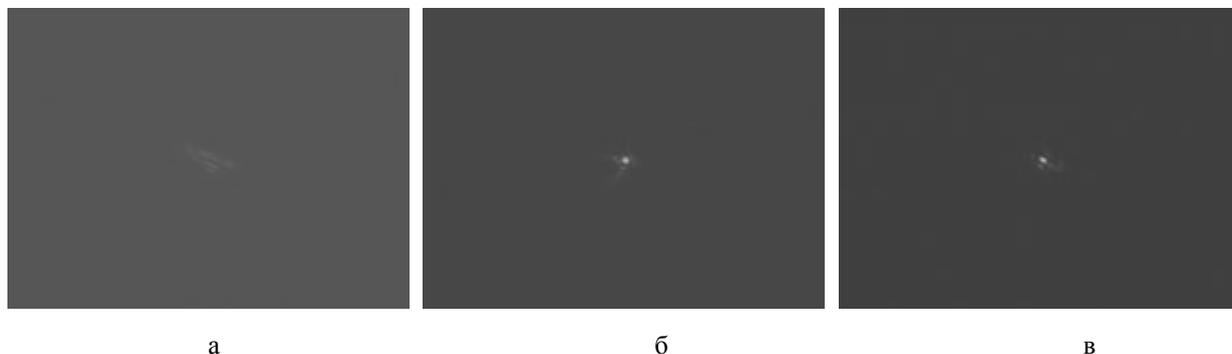


Рис. 7. Распределение интенсивности лазерного излучения в дальней зоне до коррекции (а), с коррекцией по ММНК (б) и с коррекцией по СПГ (в)

Учитывая достижение примерно одинаковых значений яркости обоими методами, но с разной динамикой, целесообразно комбинирование методов на разных этапах повышения осевой яркости. Так, например, на начальном этапе можно использовать ММНК, дающий максимальный прирост на первых итерациях, а затем добиваться максимальной осевой яркости с помощью алгоритма СПГ.

Заключение

Продемонстрирована коррекция искаженного лазерного пучка на основе стохастического параллельного градиентного (СПГ) алгоритма и модифицированного метода наименьших квадратов (ММНК) с получением расходимости излучения, близкой к дифракционному пределу, в соответствии с предсказаниями расчетов. Экспериментальные данные находятся в хорошем соответствии с результатами расчетов.

Сравниваются результаты коррекции с помощью метода ММНК с результатами, полученными при использовании алгоритма СПГ. Число Штреля после коррекции в эксперименте выросло в 6 раз. При этом рост числа Штреля при использовании ММНК, более резкий на первых итерациях, спадает на последующих итерациях. Алгоритм СПГ показывает при этом постоянный, но более медленный рост.

Показана целесообразность комбинирования методов на разных этапах коррекции. Так, на начальном этапе следует использовать алгоритм на основе ММНК, показывающий более резкий рост, а затем, когда эффективность ММНК падает, можно использовать алгоритм СПГ, демонстрирующий более медленный, но стабильный рост.

Список литературы

1. Воронцов М. А., Корябин А. В., Шмальгаузен В. И. Управляемые оптические системы. – М.: Наука, 1988.
2. Тараненко В. Г., Шанин О. И. Адаптивная оптика в приборах и устройствах. – М., 2005.
3. Фрид Д. Построение оценки искажений волнового фронта методом наименьших квадратов по множеству измерений разности фаз // Адаптивная оптика. – М.: Мир, 1980. С. 332–348.

4. Box M. J. New method of constrained optimization and comparison with other methods // Computer Journal. 1965. Vol. 8, N 1. P. 42–52
5. Kokorowsky S. Analysis of adaptive optical elements made from piezoelectric bimorphs // J. Opt. Soc. Am. 1979. Vol. 69. P. 181–187.
6. Steinhaus E., Lipson I. Bimorph piezoelectric flexible mirror // Ibid. P. 478–481.
7. Тараненко В. Г., Горохов Ю. Г., Романюк Н. С. Зеркала для адаптивных оптических систем // Зарубежная радиоэлектроника. 1982. № 8. С. 19–43.

Adaptive System Based on Shack-Hartmann Sensor and Intensity Sensor

M. A. Gluhov, A. I. Golubev, M. O. Kolygin, R. S. Kuzin, A. N. Manachinskiy,
F. A. Starikov

In the scheme of adaptive system based on intensity sensor is the experiments and comparative analysis of both approaches controlling the deformable-mirror – both with application of stochastic parallel gradient algorithm and with application algorithm based on least-squares method were carried out. Criterion of control in both approaches is maximization of radiation intensity in the lens focus. The results of experiments, where the lens focus radiation intensity is 6 times higher than the initial one, are presented.