

ДИНАМИЧЕСКАЯ ФАЗОВАЯ КОРРЕКЦИЯ ПУЧКА НЕПРЕРЫВНОГО ЛАЗЕРА В ЗАМКНУТОЙ БЕССЕНСОРНОЙ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЕ С ПОМОЩЬЮ СТОХАСТИЧЕСКОГО ГРАДИЕНТНОГО АЛГОРИТМА

С. В. Хохлов, М. О. Колтыгин, Ф. А. Стариков, Р. А. Шнягин

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

Введение

Современные адаптивные оптические системы нуждаются в повышении эффективности, что позволит существенно расширить круг решаемых проблем при транспортировке мощного лазерного излучения в задачах локации, связи, оптической обработки информации. Проблемы, которые необходимо решать, связаны, во-первых, с повышением точности фазовой коррекции с учетом специфики пространственных искажений волнового фронта излучения, например, в турбулентной атмосфере [1, 2]. Во-вторых, должна быть обеспечена фазовая коррекция лазерного пучка в динамике, т. е. адаптивная система должна успевать отслеживать изменения фазы излучения и вовремя корректировать их.

Построение адаптивной оптической системы требует решения трех проблем: а) определение общей идеологии работы адаптивной системы; б) выбор принципов управления элементами адаптивной системы; в) обеспечение соответствующей оптико-электронной базы (корректоры наклонов, гибкие адаптивные зеркала, датчики параметров излучения, блоки питания и управления, усилители, контроллеры, специальные компьютеры). Эти проблемы взаимосвязаны и зависят от типа решаемой задачи.

В работе демонстрируются результаты экспериментов, полученные в ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ на адаптивной системе с гибким биморфным зеркалом и нацеленные на повышение точности коррекции и быстродействия. В предлагаемом подходе не проводится измерение фазовой поверхности пучка датчиком волнового фронта, что является общепринятым. Коррекция фазового фронта проводится на иных принципах, вслепую, с использованием итерационного алгоритма типа «предиктор-корректор», связанного с поиском экстремума заданной целевой функции.

Адаптивная система и полученные результаты

Восстановление волнового фронта с помощью датчика волнового фронта является технически сложной задачей. Кроме того, в силу локальности измерений градиентов фазы их результат чрезвычайно чувствителен к наличию относительно мелкомасштабных

флуктуаций фазы. Дополнительные проблемы возникают при слабом сигнале, наличии фона и т. д.

Обычно целью работы адаптивных систем с датчиком волнового фронта является получение волнового фронта излучения, максимально близкого к плоскому. Поскольку при этом размер пятна в дальней зоне должен быть минимальным, а яркость излучения – максимальной, то можно решать непосредственно задачу поиска экстремума целевой функции, не измеряя волновой фронт. Схема адаптивной системы фазового сопряжения без ДВФ для непрерывного лазерного излучения показана на рис. 1.

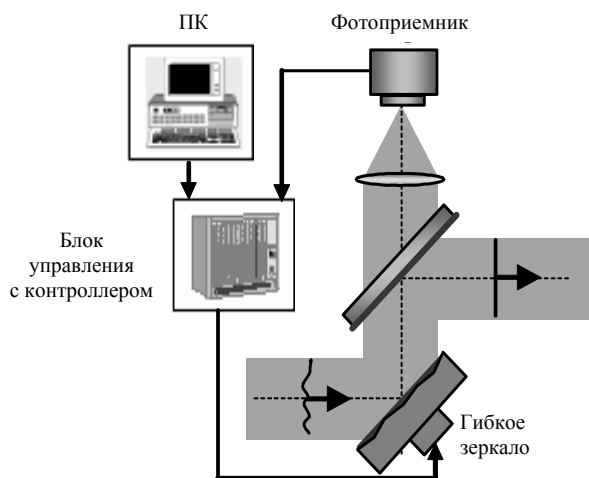
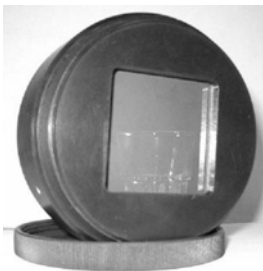


Рис. 1. Схема бессенсорной адаптивной оптической системы

В адаптивной системе, показанной на рис. 1, использовалось гибкое биморфное зеркало с числом электродов 5×5 в квадратной упаковке [3], показанное на рис. 2. Оно включает две пьезопластины толщиной 0,4 мм, приклеенные к подложке из стекла ЛК-105. Одна пластина сплошная, вторая разделена на 5×5 электродов размером 8,5 мм. Диапазон прикладываемых напряжений от -300 до $+300$ В.

Схема поиска экстремума должна быть итеративной, и это требует достаточной ширины полосы системы. Обычно быстродействие блока управления в схеме с датчиком волнового фронта ограничено возможностями операционной системы Windows, не способной работать в высокочастотном режиме. Для повышения производительности требуется применение быстродействующего микроконтроллера со встроенной

высокоскоростной флэш-памятью и статической памятью, большим набором периферийных узлов и модулей и полным набором системных функций, сокращающих число внешних компонентов. Поэтому в блоке управления была произведена замена его интерфейсной платы на плату микроконтроллера. В связи с этим персональный компьютер на рис. 1 не включен в схему обратной связи, а предназначен лишь для запуска системы и возможного изменения программы контроллера перед работой. Работа контроллера может осуществляться на частоте до 55 МГц. Это значительно ниже тактовой частоты процессоров современных персональных компьютеров, но обработка команд происходит в режиме реального времени при отсутствии задержек операционной системы Windows, что позволяет значительно повысить скорость работы системы управления. Контроллер также осуществляет управление питанием блока управления. Одноэлементный фотоприемник излучения (фотодиод или ФЭУ) более прост, дешев, а также позволяет работать с высокой частотой, в отличие от многоэлементной CCD камеры.



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

Рис. 2. Биморфное адаптивное зеркало и схема расположения управляющих элементов

Разработанный алгоритм управления, связанный с поиском экстремума заданной целевой функции (в частности, мощность излучения в заданном угле), имеет тип «предиктор-корректор». По использованию принципа параллельности подачи напряжения на электроды адаптивного зеркала и стохастичности первого этапа итерации использованный подход сходен с алгоритмом градиентного спуска. Схема стохастического параллельного градиентного алгоритма относительно проста и, соответственно, более надежна и реализуема. Работа бессенсорной адаптивной системы была продемонстрирована с использованием биморфного адаптивного зеркала размером 45 × 45 мм (рис. 4).

Достигнутая в экспериментах частота замкнутого цикла работы адаптивной системы 3–5 кГц при оптимальных параметрах алгоритма ограничивалась механической инертностью адаптивного зеркала. Динамическое изменение волнового фронта лазерного пучка обеспечивалось в лабораторных условиях возмущением трассы с помощью тепловентилятора. Целевой функцией была мощность излучения, прошедшего через диафрагму 1–2 дифракционных размеров, расположенную перед фотоприемником. Адаптивная сис-

тема могла находиться в трех состояниях: *off* – выключенное (нулевые напряжения на электродах); *on* – включенное (динамически меняющиеся напряжения по алгоритмическим командам контроллера); *stop* – приостановленное (напряжения, достигнутые в момент приостановки, фиксируются на некоторое время). Таким образом, в положении *off* в течение желаемого времени можно наблюдать искаженную абберациями картину излучения в дальней зоне, в положении *on* – в течение желаемого времени наблюдать корректируемую в динамике картину излучения, а в положении *stop* – видеть картину излучения при коррекции только статических аббераций и без коррекции динамических аббераций.

На рис. 3 показана типичная динамика мощности выходного излучения, заключенной в заданном угле, в течение 100 с. Исходный пучок испытывает динамические искажения, при которых спектр мощности сигнала имеет максимум на 7 Гц и существенен на интервале до 16 Гц. Видно, как при включении обратной связи (*on*) регистрируемая мощность возрастает в 20–30 раз, затем при приостановке (*stop*) она падает в 2–4 раза, когда идет коррекция только статических аббераций, далее включение обратной связи (*on*) опять увеличивает сигнал, и т. д., пока, наконец, выключение (*off*) не приводит к падению сигнала на исходный низкий уровень. На рис. 4 даны мгновенные картины излучения в дальней зоне в различных положениях системы.

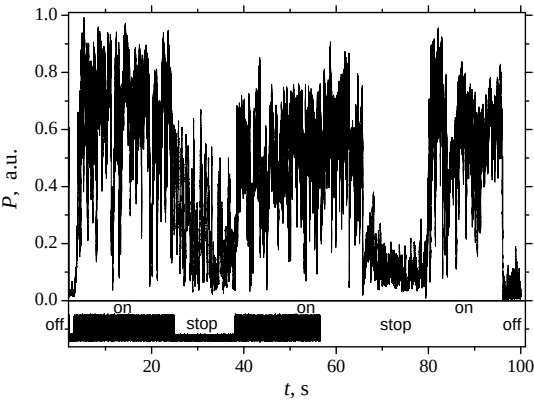


Рис. 3. Динамика мощности выходного излучения, заключенной в малом угле

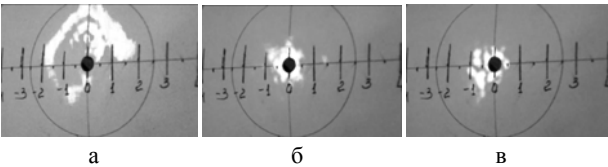


Рис. 4. Типичное мгновенное бинаризованное распределение интенсивности выходного излучения в дальней зоне в положении *off* (а), *on* (б), *stop* (в)

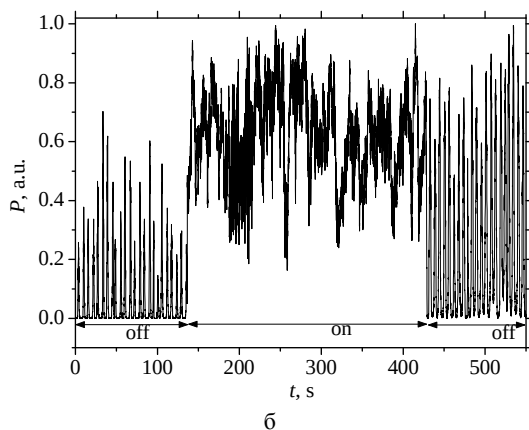
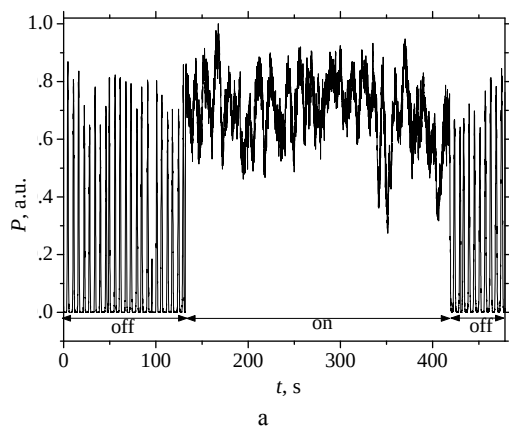


Рис. 6. Динамика мощности выходного излучения, заключенной в заданном угле, при частоте наклонов волнового фронта 5 (а) и 10 Гц (б). Шаг выдачи 21 мс

Разработанный подход был также реализован, когда в системе на рис. 1 вместо гибкого деформируемого зеркала ставился корректор наклонов волнового фронта – зеркало с двумя толкательными пьезоприводами, которые осуществляют наклон волнового фронта по двум направлениям (рис. 5). Диаметр корректора наклонов 100 мм. Для управления корректором в связи с большой электроемкостью толкателя (6 мкф) был разработан специальный блок управления повышенной мощности, что позволило устанавливать напряжение на толкателе за единицы микросекунд. Частота замкнутого цикла управляемой контроллером системы составляла 1 кГц, опять-таки ограничиваясь механической инертностью корректора. В качестве фотоприемника использовался ФЭУ, перед которым устанавливалась диафрагма с заданным угловым размером. В систему входил лазерный пучок с периодическим изменением наклонов волнового фронта во времени, что отвечало его дрожанию в плоскости диафрагмы. На рис. 6 дана типичная динамика мощности выходного излучения, заключенной в заданном угле, при частоте изменения наклонов волнового фронта входящего пучка 5 и 10 Гц. После включения обратной связи пучок излучения в плоскости диафрагмы стабилизируется и средний уровень сигнала резко возрастает.

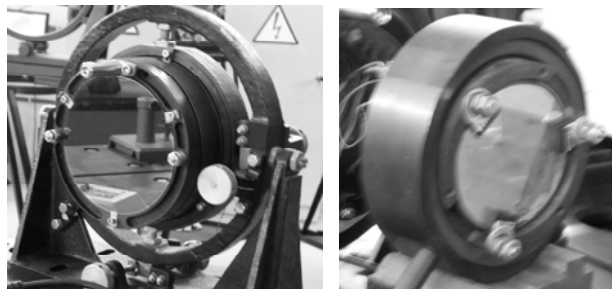


Рис. 5. Корректоры наклонов волнового фронта

Заключение

Продемонстрированы результаты работы замкнутой адаптивной оптической системы с гибким биморфным зеркалом апертурой 45 мм и корректором наклонов апертурой 100 мм, используемыми для фазовой коррекции пучка непрерывного лазера. Применяется управление адаптивным зеркалом и корректором наклонов, основанное на бессенсорном подходе с использованием стохастического градиентного алгоритма. Осуществлена фазовая коррекция в динамике, что позволила разработка специальных блоков управления с использованием микроконтроллеров. Временной спектр мощности корректируемого пучка имел максимум на частоте 7 Гц и существенен на интервале до 16 Гц. Ширина полосы работы системы с биморфным зеркалом достигала 5 кГц, с корректором наклонов – 1 кГц, ограничиваясь механической инертностью устройств. В результате коррекции доля мощности излучения в дифракционном угле увеличивается в 20–30 раз.

Литература

1. Fried D. L., Vaughn J. L. Branch cuts in the phase function // *Applied Optics*. 1992. Vol. 31. P. 2865–2882.
2. Starikov F. A., Kochemasov G. G., Kolygin M. O. et al. Correction of vortex laser beam in a closed-loop adaptive system with bimorph mirror // *Optics Lett.* 2009. Vol. 34. P. 2264–2266.
3. Starikov F. A., Aksenov V. P., Atuchin V. V. et al. Wave front sensing of an optical vortex and its correction in the close-loop adaptive system with bimorph mirror // *Proc. SPIE*. 2007. Vol. 6747. P. 6747OP 1–8.
4. Vorontsov M., Riker J., Carhart G. et al. Deep turbulence effects compensation experiments with a cascaded adaptive optics system using a 3,63 m telescope // *Applied Optics*. 2009. Vol. 48. P. A47–A57.