

УДК 621.378.5

ФАЗОВАЯ КОРРЕКЦИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ АДАПТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В РФЯЦ—ВНИИЭФ

С. Г. Гаранин, А. Н. Маначинский, Ф. А. Стариков, С. В. Хохлов

*Федеральное государственное унитарное предприятие
«Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»,
Институт лазерно-физических исследований,
607190, г. Саров Нижегородской обл., просп. Мира, 37
E-mail: fstar@mail.ru*

Описываются полученные в Институте лазерно-физических исследований (ИЛФИ) РФЯЦ—ВНИИЭФ результаты фазовой коррекции импульсного и непрерывного лазерных излучений замкнутыми адаптивными оптическими системами (АОС) с гибкими деформируемыми зеркалами. С помощью стандартной АОС с датчиком волнового фронта Шэка — Гартмана и адаптивным зеркалом (апертура 220×220 мм) на порядок величины уменьшены aberrации пучка мощной импульсной лазерной установки «Луч». Разработка специального программного обеспечения для реконструкции сингулярных волновых фронтов датчиком Шэка — Гартмана позволила осуществить в АОС с биморфным зеркалом коррекцию торообразного лагера-гауссова вихревого лазерного пучка и сфокусировать его в яркое осевое пятно, радикально увеличив число Штреля. Созданы АОС, в которых управление адаптивным зеркалом осуществляется не на основе измерения волнового фронта, а путём поиска экстремума выбранной целевой функции с помощью стохастического параллельного градиентного алгоритма. Использование микроконтроллеров в блоках управления даёт возможность достичь ширины полосы АОС 5 кГц и продемонстрировать динамическую фазовую коррекцию наклонов и высших aberrаций волнового фронта, вызванных турбулентностью из-за нагрева трассы в лабораторных условиях.

Ключевые слова: адаптивная оптическая система, датчик волнового фронта, aberrации волнового фронта, фазовая коррекция.

Введение. Использование адаптивной оптики для коррекции aberrаций волнового фронта лазерного излучения в статических условиях позволило повысить качество пучка мощных импульсных лазеров, применяемых для исследования взаимодействия лазерного излучения с веществом [1]. Повышение эффективности современных адаптивных оптических систем (АОС) существенно расширяет круг решаемых проблем при транспортировке мощного лазерного излучения в задачах локации, связи, оптической обработки информации. Среди требований, предъявляемых к современным АОС [2], важную роль играют два аспекта: во-первых, достижение высокой точности фазовой коррекции с учётом специфики пространственных искажений волнового фронта излучения (например, в турбулентной атмосфере); во-вторых, обеспечение фазовой коррекции лазерного пучка в динамике, т. е. АОС должна успевать отслеживать изменения фазы излучения и вовремя корректировать их.

Построение АОС требует решения трёх проблем: определения общей идеологии работы АОС, выбора принципов управления элементами АОС, обеспечения 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.

Целью описанных в предлагаемой работе экспериментов по адаптивной фазовой коррекции мощных и имеющих пространственные особенности лазерных пучков, проведён-

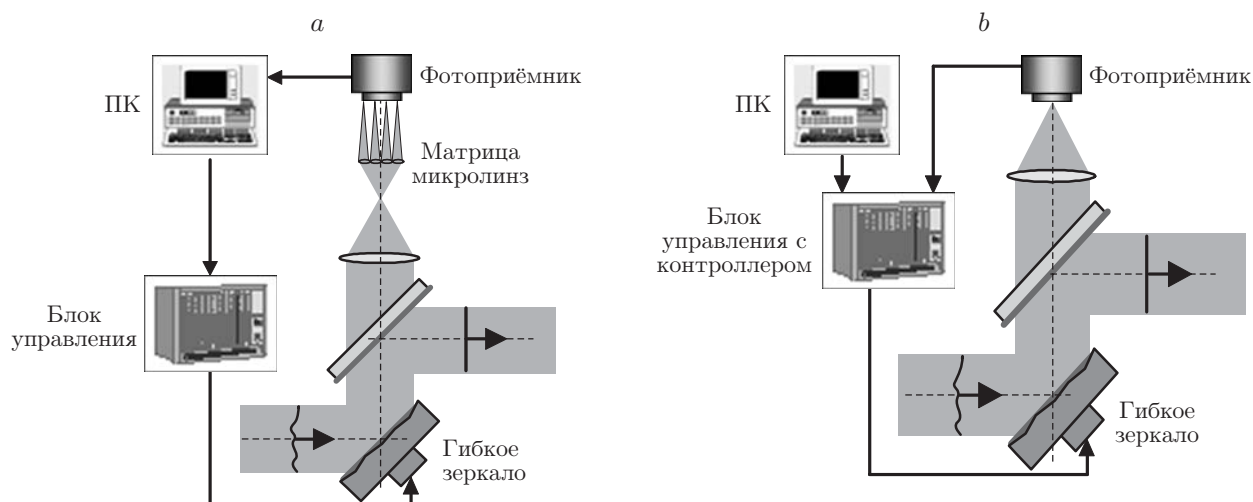


Рис. 1. Схемы АОС: с датчиком волнового фронта (a) и бессенсорного типа (b)

ных в ИЛФИ РФЯЦ—ВНИИЭФ, было повышение точности коррекции и быстродействия с использованием АОС двух типов. В первом подходе проводится измерение фазовой поверхности пучка датчиком волнового фронта (ДВФ) Шэка — Гартмана, а затем на его основе — соответствующая деформация поверхности зеркала. Данная система является общепринятой и обычно работает по принципу фазового сопряжения. Во втором подходе коррекция фазового фронта происходит по иным принципам, вслепую, с применением итерационного стохастического параллельного градиентного алгоритма типа «предиктор-корректор», связанного с поиском экстремума заданной целевой функции.

Адаптивные системы с датчиком волнового фронта. Схема замкнутой АОС с ДВФ Шэка — Гартмана показана на рис. 1, a. ДВФ включает матрицу (упорядоченный растр) микролинз и фотоприёмник — CCD-камеру, экран которой расположен в фокальной плоскости микролинзы. Работа АОС с прямым измерением фазовой поверхности ДВФ во многом зависит от точности измерения волнового фронта. В ДВФ применяются дифракционные многоуровневые матрицы микролинз, изготовленные по киноформной технологии (глубокая УФ-фотолитография и химическое травление в растворе) [3]. Точность изготовления микрорельефа определяет качество оптического элемента и точность измерения волнового фронта. Каждая микролинза показывает фокусирующие характеристики с высокой стабильностью параметров по всей площади матрицы, близкие к дифракционно-ограниченным. Среднеквадратичное отклонение формы поверхности ступеньки от плоской не превышает 5 нм (включая самый глубокий уровень).

На рис. 2 показаны типичная гартманограмма и фазовая поверхность одного и того же лазерного пучка, восстановленная ДВФ с 8-уровневой матрицей микролинз и 16-уровневой матрицей, которая содержит 100×100 субапертур [4]. Из рисунка видно, что двукратное уменьшение размера субапертуры позволяет достичь более высокого разрешения и регистрировать более мелкие детали фазового фронта.

Когда лазерный пучок проходит достаточно большое расстояние в турбулентной атмосфере, реализуется так называемый режим сильных сцинтилляций [5]. В этом режиме оптическое поле становится спеклованным, и в пространстве вдоль оси пучка возникают линии, где интенсивность обращается в нуль, а окрестные участки волнового фронта приобретают геликоидальную форму винтовых дислокаций. Вихревой характер пучка легко обнаружить в эксперименте, анализируя картину его интерференции с наклонной плоской волной: в интерферограмме в центрах винтовых дислокаций рождаются или исчезают

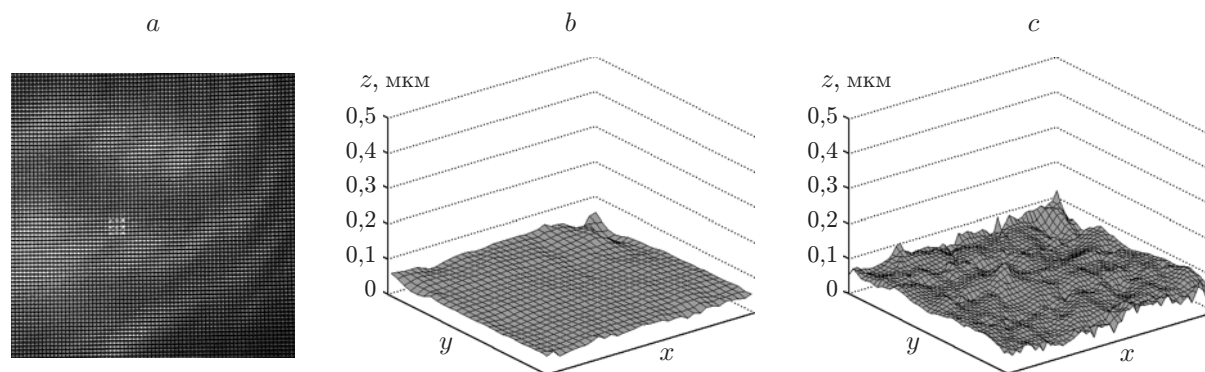


Рис. 2. Результаты восстановления фазы: типичная гартманограмма (а); восстановленная фазовая поверхность при $\lambda = 0,65$ мкм, матрице микролинз с субапертурой $d = 250$ мкм, фокусным расстоянием $f = 20$ мм (b) и $d = 120$ мкм, $f = 5$ мм (c)

полосы, т. е. образуются так называемые «вилки». Эффекты скинтилляций приводят к снижению эффективности переноса энергии и искажению информации, передаваемой световым пучком.

Традиционные методы измерений волнового фронта ДВФ Шэка — Гартмана при наличии вихрей были фактически непригодными. Для восстановления сингулярной фазовой поверхности по измеренным наклонам фазового фронта разработана новая техника реконструкции, на основе которой создано специальное программное обеспечение для ДВФ. В [6] осуществлена регистрация волнового фронта специально сформированного оптического вихря в форме моды Лагерра — Гаусса. Восстановление фазовой поверхности пучка было проведено с точностью $\lambda/20$ ($\lambda = 0,65$ мкм) при числе пятен в гартманограмме 8×8 .

В работе [7] продемонстрирована коррекция вихревого лазерного пучка в замкнутой АОС, включающей датчик Шэка — Гартмана и гибкое биморфное зеркало с числом электродов $(5 \times 5) + 1$ [8]. Оно состоит из двух пьезопластин толщиной 0,4 мм, приклеенных к подложке из стекла ЛК-105. Одна пластина сплошная (т. е. представляет собой один электрод) и предназначена для компенсации дефокусировки, вторая разделена на 5×5 электродов размером 8,5 мм в квадратной упаковке. Диапазон прилагаемых напряжений от -300 до $+300$ В. Эксперименты продемонстрировали возможность биморфного адаптивного зеркала скорректировать оптический вихрь в практическом смысле, т. е. сфокусировать торообразный вихревой пучок в яркое осевое пятно, что радикально увеличивает число Штреля и разрешение оптической системы.

Для мощных лазеров, используемых в исследованиях проблем лазерного термоядерного синтеза, важным параметром является качество пучка излучения. На рис. 3 показана схема АОС в составе канала 4-проходной лазерной установки «Луч» на фосфатном неодимовом стекле с апертурой пучка 200×200 мм и длительностью импульса 3 нс, разработанной в ИЛФИ РФЯЦ—ВНИИЭФ [9]. В ней применяется широкоапертурное деформируемое адаптивное зеркало размером 220×220 мм с 61 пьезоэлектрическим толкательным приводом, расположенным в квадратной геометрии (с поворотом на 45° относительно горизонтали) [10]. Диапазон прилагаемых напряжений от 0 до $+120$ В.

Рабочее поле ДВФ составляло 20×20 субапертур с размером каждой $d = 200$ мкм. Анализ фазового фронта выходного излучения до коррекции (с учётом статических и вызванных нагревом активных элементов динамических aberrаций) и после неё показал, что величина aberrаций уменьшилась с $PV = 9,6$ мкм (PV — максимальное отклонение), $RMS = 2,4$ мкм (RMS — среднеквадратичное отклонение) до $PV = 1,35$ мкм, $RMS = 0,24$ мкм (т. е. в 7 раз по PV и в 10 раз по RMS). При $RMS = 0,24$ мкм $= 0,23\lambda$

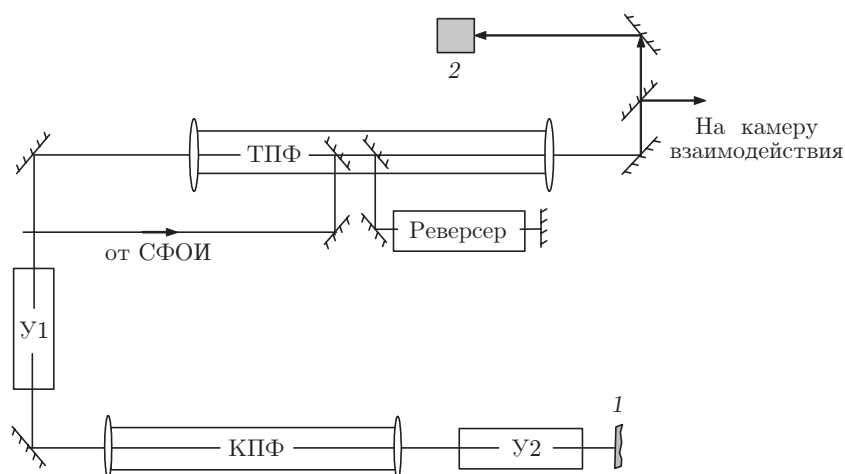


Рис. 3. Схема адаптивной системы на установке «Луч»: 1 — адаптивное зеркало; 2 — выходной ДВФ; ТПФ и КПФ — транспортный и кюветный пространственные фильтры; СФОИ — система формирования опорного импульса; У1 и У2 — усилительные каскады

и отношении размера апертуры к длине корреляции остаточных флуктуаций фазы 3–5 число Штреля по теоретической оценке должно составлять 0,2–0,3. Анализ распределений плотности энергии на рис. 4 показывает, что фазовая коррекция приводит к уменьшению расходимости (по уровню 80 % энергии) в 4 раза (с $4 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-4}$ рад) [11].

Отметим, что близкие значения $PV = 1,5$ мкм, $RMS = 0,18$ мкм были получены после коррекции на установке LMJ (Франция) [1] с адаптивным зеркалом аналогичной геометрии приводов, но при меньшем их количестве (39). При этом ДВФ имел 64×64 субапертуры. Распределение плотности энергии выходного излучения в дальней зоне в [1] не приведено.

Бессенсорные адаптивные системы. Восстановление волнового фронта с помощью ДВФ является технически сложной задачей. Кроме того, в силу локальности измерений градиентов фазы их результат чрезвычайно чувствителен к наличию мелкошабных флуктуаций фазы. Дополнительные проблемы возникают при слабом сигнале, наличии фона и т. д.

Как уже было отмечено, с помощью АОС с ДВФ получается волновой фронт излучения, максимально близкий к плоскому. Поскольку при этом размер пятна в дальней зоне должен быть минимальным, а яркость излучения — максимальной, можно решать непосредственно задачу поиска экстремума соответствующей целевой функции, не измеряя волнового фронта. Схема АОС фазового сопряжения без ДВФ для непрерывного лазерного излучения показана на рис. 1, б.

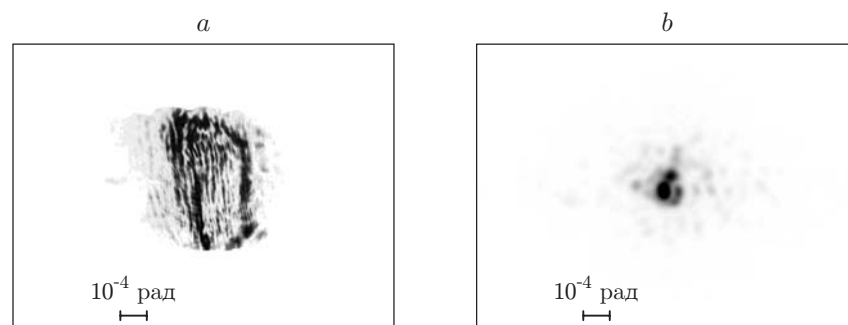


Рис. 4. Распределение плотности энергии выходного излучения в дальней зоне: до (а) и после (б) коррекции

Схема поиска экстремума должна быть итеративной, и это требует достаточной ширины полосы системы. Быстродействие блока управления в схеме на рис. 1, *a* ограничено возможностями операционной системы Windows, не способной работать в высокочастотном режиме. Для повышения производительности требуется применение быстродействующего микроконтроллера. Поэтому в блоке управления интерфейсная плата была заменена платой микроконтроллера. В связи с этим персональный компьютер на рис. 1, *b* не включён в схему обратной связи, а предназначен лишь для запуска системы и возможного изменения программы микроконтроллера перед работой. Отличительными особенностями 32-разрядного микроконтроллера являются наличие встроенной высокоскоростной флэш-памяти и статической памяти, большой набор периферийных узлов и модулей, полный набор системных функций, сокращающих число внешних компонентов. Для микроконтроллера существует возможность внутрисхемного перепрограммирования встроенной флэш-памяти через интерфейс JTAG-ICE или через параллельный интерфейс на внешнем программаторе. Встроенный в микроконтроллер USB-порт позволяет сделать на его основе приложения, требующие наличия связи с компьютером. При этом система команд ARM хорошо обрабатывается компиляторами языков высокого уровня. 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 значительно повышает скорость работы системы управления. Контроллер также регулирует питание блока управления. Одноэлементный фотоприёмник излучения (фотодиод или ФЭУ) позволяет работать с высокой частотой в отличие от многоэлементной ССD-камеры на рис. 1, *a*.

Предлагаемый алгоритм управления, связанный с поиском экстремума выбранной целевой функции (в частности, мощности излучения в заданном угле), имеет тип «предиктор-корректор». По принципу параллельности подачи напряжения на электроды адаптивного зеркала и стохастичности первого этапа итерации применённый подход сходен с алгоритмом стохастического параллельного градиентного спуска [12]. Схема алгоритма относительно проста и, следовательно, более надёжна и реализуема. Работа бессенсорной адаптивной системы с использованием вышеописанного биморфного адаптивного зеркала размером 45×45 мм продемонстрирована в [8].

Достигнутая в экспериментах частота замкнутого цикла работы АОС 3–5 кГц при оптимальных параметрах алгоритма ограничивалась механической инертностью конструкции адаптивного зеркала. Динамическое изменение волнового фронта лазерного пучка обеспечивалось в лабораторных условиях турбулентным возмущением трассы с помощью тепловентиляторов. Целевой функцией была мощность излучения, прошедшего через диафрагму размером порядка дифракционного, расположенную перед фотодиодом. АОС могла находиться в трёх состояниях: off — выключенное (нулевые напряжения на электродах); on — включённое (динамически меняющиеся напряжения по алгоритмическим командам контроллера в режиме обратной связи); stop — приостановленное (напряжения, достигнутые в момент приостановки, фиксируются на время приостановки). Таким образом, в положении off в течение желаемого времени можно наблюдать искажённую абберациями картину излучения в дальней зоне, в положении on — корректируемую в динамике картину излучения, а в положении stop — картину излучения при коррекции главным образом статических аббераций и без коррекции динамических аббераций.

На рис. 5 показана типичная динамика мощности выходного излучения, заключённой в заданном угле, т. е. целевой функции, в течение 100 с. Исходный пучок испытывает динамические искажения, при которых спектр мощности сигнала имеет максимум на частоте 7 Гц и существен на интервале частот до 16 Гц. При выключенной обратной связи (off) уровень сигнала низкий. Видно, как при включении обратной связи (on) регистри-

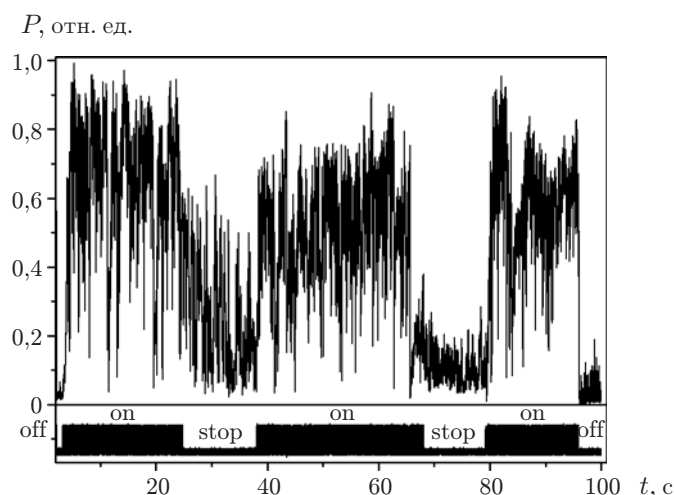


Рис. 5. Временная зависимость мощности выходного излучения, заключённой в малом угле

руемая мощность возрастает в 20–30 раз, затем при приостановке (stop) она падает в 2–4 раза, когда идёт коррекция только статических aberrаций, далее включение обратной связи (on) опять увеличивает сигнал и т. д., пока выключение обратной связи (off) не приводит к падению сигнала до исходного низкого уровня. Мгновенные картины излучения в дальней зоне в различных положениях АОС показаны на рис. 6.

Разработанный подход был также реализован, когда в АОС вместо гибкого деформируемого зеркала ставился корректор наклонов волнового фронта — зеркало диаметром 100 мм с двумя толкательными пьезоприводами, которые осуществляют наклон волнового фронта по двум направлениям (см. рис. 1, b). Для управления корректором в связи с большой ёмкостью толкателя (6 мкФ) разработан специальный блок управления повышенной мощности, что позволило устанавливать напряжение на толкателе за единицы микросекунд. Частота замкнутого цикла управляемой контроллером системы составляла 1 кГц. Она определялась механической инертностью конструкции корректора. В качестве фотоприёмника 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 дрожанию фокального пятна в плоскости диафрагмы. Типичная динамика мощности выходного излучения, заключённой в заданном угле, при различной частоте изменения наклонов волнового фронта входящего пучка представлена на рис. 7. После включения обратной связи пучок излучения в плоскости диафрагмы стабилизируется и средний уровень сигнала резко возрастает.

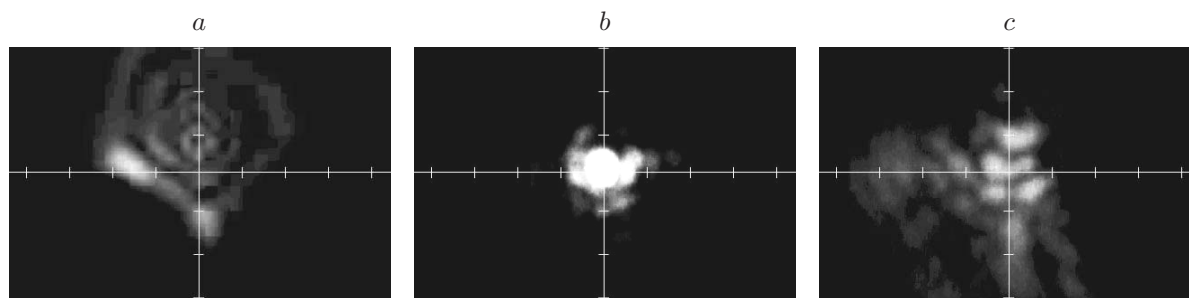


Рис. 6. Типичное мгновенное распределение интенсивности выходного излучения в дальней зоне в разных положениях системы: off (a), on (b), stop (c)

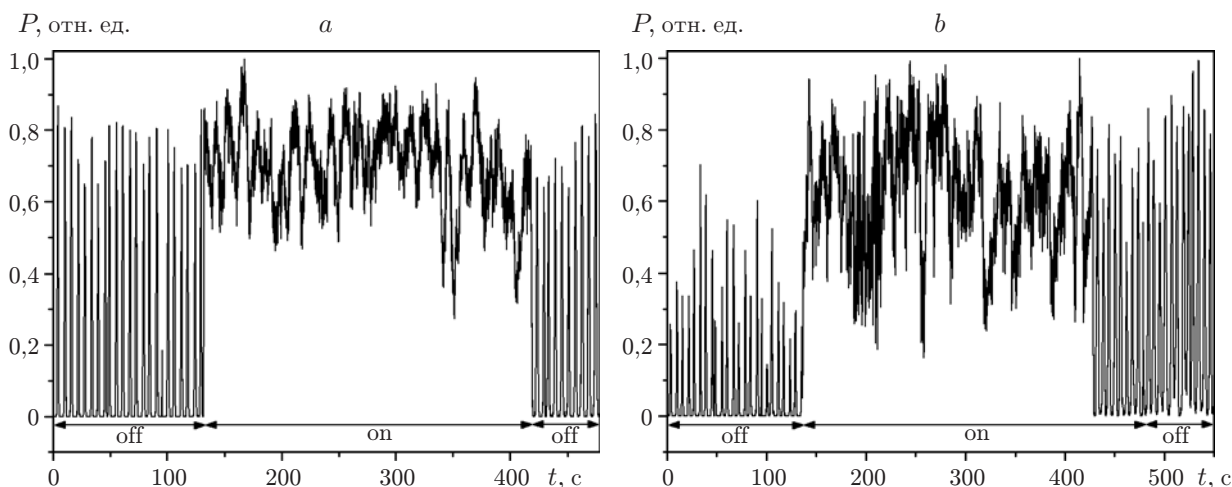


Рис. 7. Типичная зависимость мощности выходного излучения, заключённой в заданном угле, от времени: при частоте наклонов волнового фронта 5 Гц (а) и 10 Гц (б)

Заключение. В данной работе продемонстрированы результаты использования замкнутых АОС, созданных в ИЛФИ РФЯЦ—ВНИИЭФ, для фазовой коррекции лазерного излучения в целях повышения точности коррекции и быстродействия. Применяется управление адаптивными зеркалами, основанное как на измерении волнового фронта датчиком Шэка — Гартмана, так и на бессенсорном стохастическом градиентном алгоритме с поиском экстремума выбранной целевой функции. В первом подходе на порядок величины уменьшены aberrации пучка мощной импульсной твердотельной лазерной установки «Луч» и получена остаточная среднеквадратичная ошибка коррекции 0,24 мкм, а также осуществлена статическая коррекция сингулярного вихревого лазерного пучка с точностью $\lambda/20$ и его фокусировка в яркое осевое пятно, что радикально увеличивает число Штреля и разрешение оптической системы. Во втором подходе разработка специальных блоков управления с использованием микроконтроллеров позволила достичь ширины полосы АОС 5 кГц и осуществить в лабораторных условиях динамическую коррекцию aberrаций волнового фронта, вызванных турбулентностью из-за нагрева трассы, гибким биморфным зеркалом с апертурой 45 мм с 25 элементами управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grosset-Grange C., Barnier J.-N., Chappuis C., Cortey H. Design principle and first results obtained on the LMJ deformable mirror prototype // Proc. SPIE. 2007. **6584**. 658403.
2. Лукин В. П. Выбор базовых параметров адаптивных оптических систем // Автометрия. 2012. **48**, № 2. С 3–11.
3. Atuchin V. V., Soldatenkov V. V., Kirpichnikov A. V. et al. Multilevel kinoform microlens arrays in fused silica for high-power laser optics // Proc. SPIE. 2004. **5481**. P. 43–46.
4. Starikov F. A., Atuchin V. V., Koltugin M. O. et al. Multilevel lenslet arrays in precise Hartmann-Shack wavefront sensing of laser beam // EOS Annual Meeting. 2010. Paper TOM4-3188-22. P. 80.
5. Fried D. L., Vaughn J. L. Branch cuts in the phase function // Appl. Opt. 1992. **31**, N 15. P. 2865–2882.
6. Starikov F. A., Kochemasov G. G., Kulikov S. M. et al. Wave front reconstruction of an optical vortex by Hartmann-Shack sensor // Opt. Lett. 2007. **32**, N 16. P. 2291–2293.

7. **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 // *Opt. Lett.* 2009. **34**, N 15. P. 2264–2266.
8. **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. **6747**. 6747OP.
9. **Ворониц И. Н., Галахов И. В., Гаранин С. Г. и др.** Измерения коэффициента усиления в дисковом усилительном каскаде с активными элементами из неодимового фосфатного стекла // *Квантовая электроника.* 2003. **33**, № 6. С. 485–488.
10. **Гаранин С. Г., Григорович С. В., Куликов С. М. и др.** Деформируемое зеркало на основе пьезоэлектрических приводов для адаптивной системы установки «Искра-6» // *Квантовая электроника.* 2007. **37**, № 8. С. 691–696.
11. **Гаранин С. Г., Куликов С. М., Маначинский А. Н. и др.** Разработка адаптивной системы. Экспериментальные результаты, полученные на установке «Луч» // Тез. XXXVII Междунар. конф. по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. М.: ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН», 2010. С. 142.
12. **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 // *Appl. Opt.* 2009. **48**, N 1. P. A47–A57.

Поступила в редакцию 28 октября 2011 г.
