

УДК 621.375:551.521

## Подавление начальных искажений лазерного пучка при использовании рассеянного на экране излучения для управления гибким зеркалом

В.А. Банах<sup>1</sup>, В.В. Жмылевский<sup>2</sup>, А.Б. Игнатъев<sup>2</sup>, В.В. Морозов<sup>2</sup>,  
Р.Ш. Цвык<sup>1</sup>, А.Н. Шестернин<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>ОАО «Головное системное конструкторское бюро  
Концерна ПВО «Алмаз-Антей» им. Академика А.А. Расплетина»  
125190, г. Москва, Ленинградский пр., д. 80, корп. 16

Поступила в редакцию 17.04.2013 г.

Представлены результаты атмосферных экспериментов по адаптивной компенсации aberrаций начального волнового фронта лазерных пучков видимого и ИК-диапазона длин волн. Сигнал управления гибким зеркалом вырабатывался на основе измерений средней мощности излучения пучка, рассеянного диффузным экраном в обратном направлении. Показано, что с уменьшением диафрагмы приемника рассеянного излучения эффективность компенсации начальных aberrаций волнового фронта возрастает. Полученные экспериментальные данные согласуются с результатами качественного анализа эффективности компенсации, достижимой на использовавшейся в экспериментах установке.

*Ключевые слова:* лазерный пучок, адаптивное зеркало, обратное рассеяние, aberrации; laser beam, adaptive mirror, backscatter, aberrations.

### Введение

Лазерное излучение большой мощности, как правило, является частично когерентным. В тракте формирования пучков мощного лазерного излучения (МЛИ) возникают термические деформации оптических элементов, так что волновой фронт пучка МЛИ на выходной апертуре передающего телескопа имеет неконтролируемые случайные отклонения от заданного распределения. Это приводит к дополнительной (по сравнению с дифракционной) расходимости пучка и уменьшению мощности излучения в пределах приосевой области поперечного сечения пучка. Авторами [1–6] выполнены теоретические и численные исследования возможности компенсации aberrаций начального волнового фронта и наведения в заданном направлении частично когерентных пучков МЛИ по обратному атмосферному рассеянию. В [7] описаны лабораторные эксперименты по наведению лазерного пучка в заданном направлении по сигналу обратного рассеяния. В [8] представлены результаты лабораторных экспериментов по компенсации начальных aberrаций волнового фронта (ВФ) пучка с использованием стохастического алгоритма параллельного градиентного спуска (САПГС) [9].

В настоящей статье представлены результаты экспериментов по компенсации начальных aberrаций волнового фронта пучков видимого и ИК-диапазонов длин волн в атмосферных условиях на базовом экспериментальном комплексе ИОА СО РАН (БЭК). Сигнал управления гибким зеркалом вырабатывался на основе измерений средней мощности излучения пучка, рассеянного диффузным экраном в обратном направлении.

### 1. Экспериментальная установка и методика измерений

Для проведения экспериментов на БЭКе была собрана установка (рис. 1).

В качестве источников излучения использовались 2 типа лазеров непрерывного излучения.

а) Лазер LS-3N-532 (длина волны  $\lambda_1 = 0,532$  мкм, мощность до 2,5 Вт). Перед фотоприемником устанавливался интерференционный светофильтр на длину волны 0,532 мкм.

б) Волоконный лазер (длина волны  $\lambda_2 = 1,069$  мкм, мощность до 110 Вт) производства фирмы «ИРЭ Плюс» (ЛК-150 В). Перед фотоприемником устанавливался интерференционный светофильтр с полосой пропускания от 1 до 1,5 мкм. Применялась внешняя модуляция излучения лазера частотой 4 кГц от генератора звуковой частоты. Для усиления сигнала с фотоприемника применялся селективный усилитель (тип 233), что позволяло значительно улучшить

\* Виктор Арсентьевич Банах (banakh@iao.ru); Виктор Васильевич Жмылевский; Александр Борисович Игнатъев; Владимир Варнавьевич Морозов; Рувим Шахнович Цвык (tsvyk@iao.ru); Андрей Николаевич Шестернин (san@iao.ru).

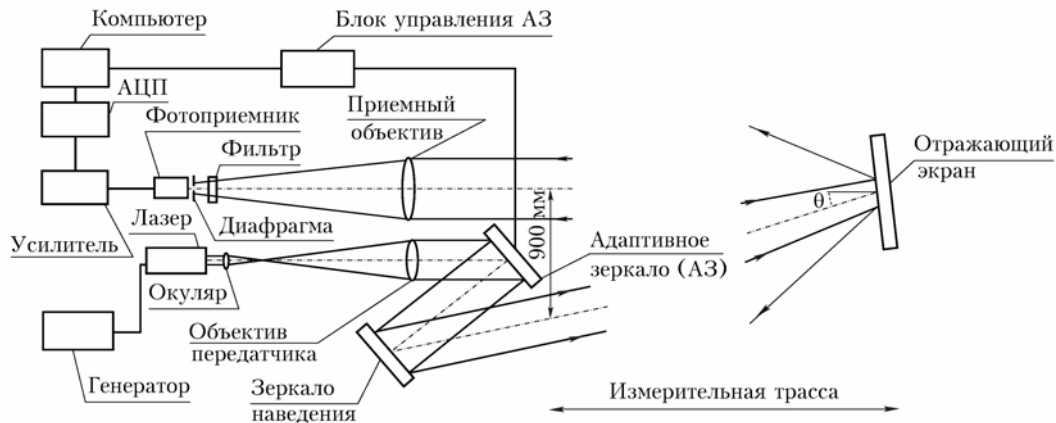


Рис. 1. Блок-схема установки активной адаптивной коррекции для проведения атмосферных исследований возможности фокусировки лазерного пучка по средней мощности излучения, отраженного от рассеивающего экрана

отношение сигнал-шум. При отсутствии модуляции применялся усилитель постоянного тока.

Лазерное излучение поступало в оптический передатчик, где с помощью окуляра и объектива (фокусное расстояние  $F = 1600$  мм, диаметр  $D = 150$  мм) формировался пучок заданной геометрии с распределением, близким к равномерному, что позволило использовать всю поверхность адаптивного зеркала. Далее, через адаптивное зеркало (деформируемое биморфное зеркало DMN-180/160-32В-316, рис. 2) и зеркало наведения лазерный пучок через атмосферу направлялся на отражающий экран (шероховатая металлическая пластина, окрашенная матовой белой краской).

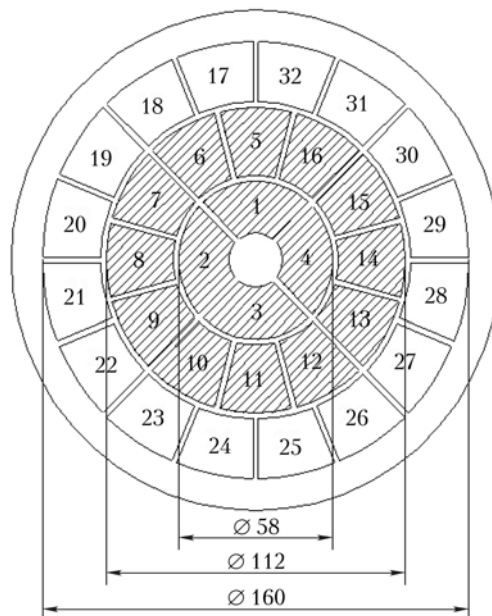
Расстояние до экрана при работе с лазером видимого диапазона длин волн составляло 210 м, пучок

фокусировался на расстояние 340 м, так что угол сходимости пучка  $\theta$  (см. рис. 1) равнялся 4 мрад. Измерения лазером ИК-диапазона длин волн проводились при фокусировке пучка на расстояние 1000 м, экран находился на удалении 495 м, угол сходимости  $\theta = 2,5$  мрад. На трассе длиной 210 м отражающий экран устанавливался на мощной треноге, а на трассе 495 м – в кабине, размещенной на бетонной площадке. Фокусировкой пучка на более далекие расстояния, чем расстояние до экрана, в начальный ВФ искусственно вводилась сферическая аберрация, которая должна быть скомпенсирована в результате работы адаптивного контура.

Рассеянное назад от экрана излучение собиралось с помощью линзовых объективов диаметром 150 и 300 мм и фокусными расстояниями 1600 и 940 мм



а



б

Рис. 2. Адаптивное зеркало: мембрана из монокристаллического кремния толщиной 3 мм; три кольца с числом актюаторов, равным 4, 12, 16 элементов типа ПЗТ; диаметр активной зоны 150 мм при 32 актюаторах и 112 мм при 16; локальные деформации (при подаче напряжения на актюаторы  $\pm 250$  В) не менее  $\pm 2,5$  мкм (а); схема расположения актюаторов зеркала (б)

соответственно и принималось фотоприемником, установленным в плоскости оптического изображения экрана. При работе с лазером на длине волны 0,532 мкм использовался ФЭУ-115. Прием излучения волоконного лазера на длине волны 1,069 мкм осуществлялся с помощью фотодиода G10899-01K-HAMAMATSU. Перед фотоприемником устанавливались сменные диафрагмы диаметром  $d_d$  от 10 до 150 мкм.

Управление адаптивным зеркалом осуществлялось с применением стохастического алгоритма параллельного градиентного спуска [9]. Для выработки напряжений на элементах зеркала на каждом итерационном шаге использовался сигнал, регистрируемый фотоприемником, пропорциональный средней мощности излучения, прошедшего через диафрагму. Значения регистрируемого на фотоприемнике сигнала с помощью АЦП (марки NI USB-6008) передавались в персональный компьютер, где с помощью программной реализации САПГС рассчитывались управляющие напряжения для каждого элемента гибкого зеркала на очередном шаге. Через интерфейс USB значения рассчитанных управляющих напряжений передавались в блок управления адаптивным зеркалом (32-канальный усилитель напряжения [10]), где преобразовывались в аналоговые сигналы, которые затем усиливались и подавались на элементы адаптивного зеркала.

Измерения проводились следующим образом. В начальный момент на гибкое зеркало управляющие напряжения не подавались, так что в начальном волновом фронте пучка в дополнение к сферической абберации возникали сильные абберации из-за нефазированности элементов зеркала и распределение интенсивности падающего на экран пучка было сильно искажено и уширено. Приемная система по рассеянному назад излучению формировала изображение распределения интенсивности пучка на экране, в центр которого помещалась приемная диафрагма. Амплитуда сигнала на приемнике отображалась на мониторе компьютера. Затем на гибкое зеркало подавались напряжения, включалась программа управления, по мере работы которой происходила постепенная перефокусировка пучка на более близкие к экрану расстояния, абберации волнового фронта подавлялись, размеры пучка на экране уменьшались, амплитуда сигнала обратного рассеяния возрастала.

## 2. Результаты измерений

В работе [1] теоретически показано, что средняя мощность рассеянного в обратном направлении излучения лазерного пучка, распространяющегося в атмосфере, зависит от угловой расходимости пучка, определяемой в том числе и неконтролируемыми искажениями начального волнового фронта. Чем меньше угол поля зрения приемника, тем выше его чувствительность к вариациям мощности сигнала обратного рассеяния за счет начальных аббераций ВФ. В экспериментах были проведены исследования эффективности компенсации начальных искажений ВФ по сигналу обратного рассеяния при изменении угла поля зрения приемника.

Эффективность компенсации начальных аббераций во время измерений определялась по параметру Штреля. Число Штреля рассчитывалось как отношение регистрируемой мощности излучения на каждом итерационном шаге к мощности рассеянного излучения пучка, сфокусированного на экран, волновой фронт которого не содержал абберации, вызываемые расфазированностью элементов адаптивного зеркала в отсутствие управляющих напряжений. Изменение угла поля зрения приемника достигалось изменением размеров диафрагмы  $d_d$ .

При больших размерах диафрагмы в результате работы контура адаптации устранялись абберации низкого порядка и максимальное значение мощности рассеянного сигнала на приемнике достигалось, когда вследствие перефокусировки за счет устранения сферической абберации размеры пучка на экране уменьшались и он полностью оказывался в поле зрения приемника. В этом случае абберации высших порядков не скомпенсированы и пучок остается деформированным.

При уменьшении размеров диафрагмы чувствительность приемника к абберациям высокого порядка повышается, и в результате их подавления эффективность работы адаптивной системы возрастает, число Штреля насыщается на более высокий уровень, чем при больших диафрагмах. Однако с уменьшением диафрагмы отношение сигнал-шум падает и алгоритм управления начинает работать неустойчиво. Рис. 3 иллюстрирует полученные в экспериментах результаты.

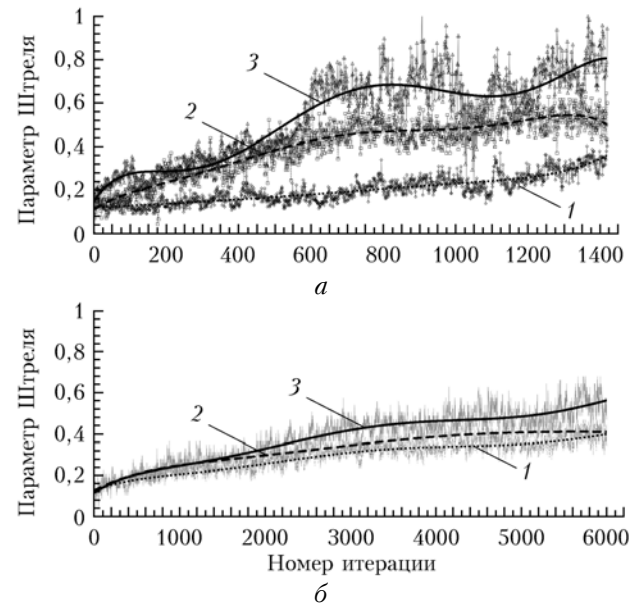


Рис. 3. Параметр Штреля как функция числа итераций:  $a - \lambda = 0,532$  мкм: 1 –  $d_d = 150$ , 2 – 100, 3 – 50 мкм;  $b - \lambda = 1,069$  мкм: 1 –  $d_d = 100$ , 2 – 70, 3 – 30 мкм

Видно, что с уменьшением диафрагмы эффективность компенсации начальных аббераций волнового фронта возрастает. Более четко это прослеживается на результатах, полученных с использованием лазера видимого диапазона длин волн ( $\lambda = 0,532$  мкм).

Чем меньше диафрагма, тем выше уровень насыщения числа Штреля и тем меньше итераций алгоритма управления гибким зеркалом требуется для достижения этого уровня. Однако уменьшать размер диафрагмы в экспериментах можно было лишь до некоторого предела. При  $d_d = 50$  мкм, как это видно из рис. 3, *а*, работа алгоритма управления начинала терять устойчивость. С меньшей эффективностью в экспериментах осуществлялась компенсация абер-

раций ВФ при использовании лазера ИК-диапазона длин волн. Зависимость числа Штреля от размера диафрагмы в этом случае менее выражена, и насыщение его на постоянный уровень происходит при значительно большем числе итераций алгоритма, чем для лазера с  $\lambda = 0,532$  мкм (рис. 3, *б*).

На рис. 4 представлены фотографии и трехмерная компьютерная реконструкция распределений интенсивности пучка на отражающем экране до и после

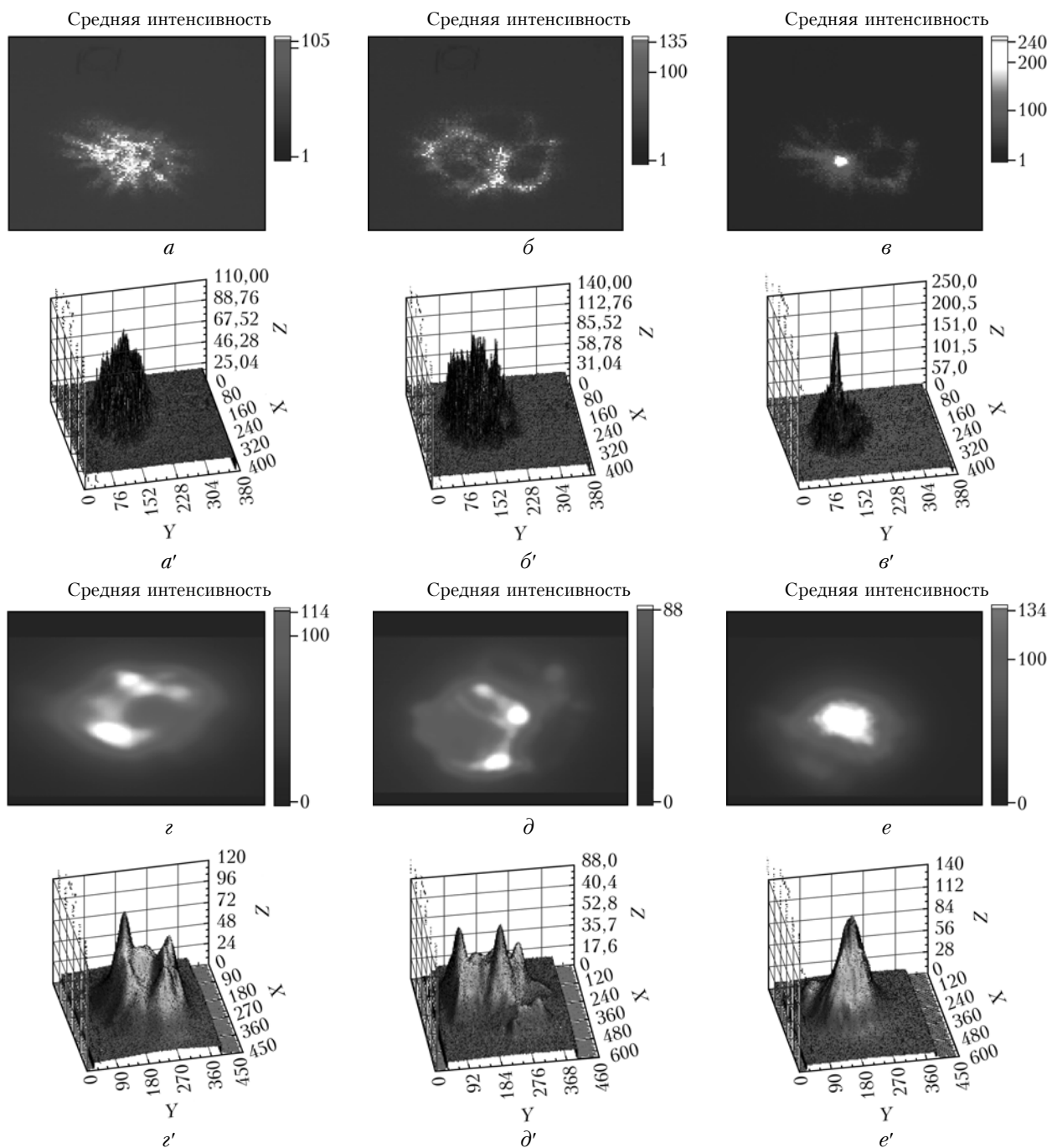


Рис. 4. Фотографии пучка на отражающем экране при отключенном напряжении на зеркале (*а*, *z*); подача стартовых напряжений на элементы зеркала (*б*, *д*); окончательная работа адаптивной системы (*в*, *е*);  $\lambda = 0,532$  мкм,  $L = 210$  м (*а–в*);  $\lambda = 1,069$  мкм,  $L = 495$  м (*z–е*). Трехмерная компьютерная реконструкция распределений интенсивности пучка на экране (*а'–е'*)

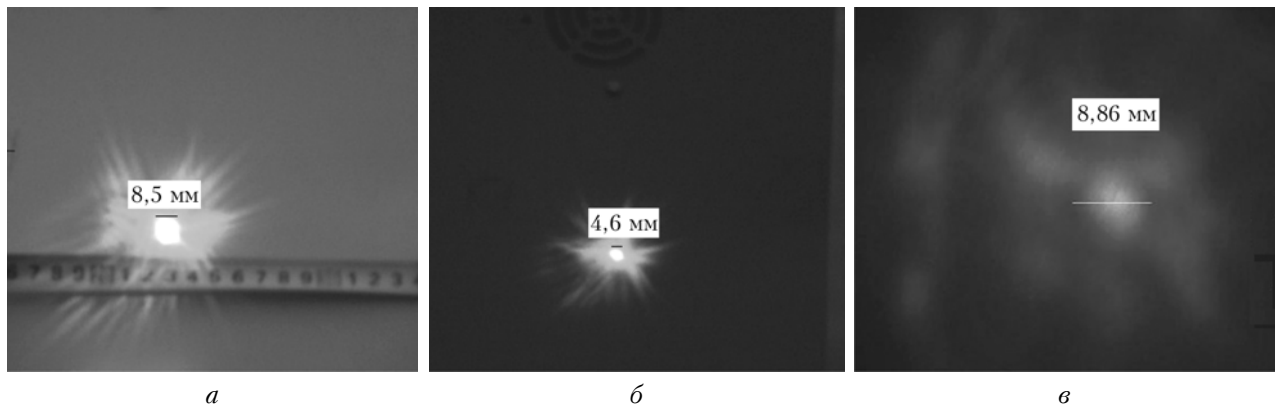


Рис. 5. Пример распределения интенсивности по окончании работы адаптивной системы на трассе 210 м,  $\lambda = 0,532$  мкм,  $d_d = 100$  мкм (а);  $d_d = 30$  мкм (б), трасса 495 м,  $\lambda = 1,069$ ,  $d_d = 15$  мкм (в), длина отрезков соответствует указанным размерам

окончания процесса компенсации. Справа у фотографий показаны уровни градации серого. Видно, что и в видимом, и в ИК-диапазоне длин волн полученные размеры пучка по окончании работы адаптивного контура становятся значительно меньше, чем исходные, а распределения интенсивности — более гладкими.

Будем считать, что эффективный диаметр гауссова пучка  $2a$  на выходном зеркале (зеркало наведения, см. рис. 1) в 2 раза меньше диаметра зеркала  $D = 150$  мм [11]. Тогда дифракционный радиус сфокусированного на экран гауссова пучка  $a_g = L/ka$ , где  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $L$  — расстояние до экрана;  $a$  — начальный радиус пучка, для  $\lambda = 0,532$  мкм равен 0,47 мм,  $\lambda = 1,069$  мкм — 2,24 мм. Отсюда следует, что диаметр дифракционного пятна на экране для лазера видимого диапазона длин волн равен примерно 1 мм, а для ИК-лазера — примерно 0,5 см.

В экспериментах уменьшить размеры пучка до дифракционных в результате адаптации не удавалось. На рис. 5 даны типичные изображения пучка на экране с указанием размеров центральной части светового пятна, полученных в конце процесса адаптации. Они существенно превышают дифракционные. То, что не удалось добиться более высокой эффективности работы адаптивной системы, объясняется недостаточностью пространственного разрешения приемной системы. Оно не позволяло по средней принимаемой мощности рассеянного излучения добиться компенсации aberrаций более высокого порядка (более мелких), чем минимальные размеры разрешаемых неоднородностей распределения интенсивности пучка на экране.

Действительно, в экспериментах использовались приемные объективы с фокусными расстояниями 160 и 94 см и диафрагмы, как уже отмечалось, диаметром от 10 до 150 мкм. Так что угол поля зрения приемной системы изменялся от  $6,25 \cdot 10^{-6}$  до  $1,6 \cdot 10^{-4}$  рад. На расстоянии до экрана 210 м это обеспечивало пространственное разрешение от 1,3 мм до 3,4 см, а на расстоянии 495 м — от 3 мм до 8 см. Чем меньше диафрагма, тем более высокого порядка aberrации могли быть «отслежены» приемником и скомпенсиро-

рованы и тем до меньших размеров пучок можно было сфокусировать на экране.

На рис. 5 показаны размеры пучка на экране при разных расстояниях до экрана и размерах диафрагмы. Видно, что на расстоянии 210 м при  $d_d = 100$  мкм, когда пространственное разрешение составляет 13 мм, светлое пятно имеет диаметр 8,5 мм, а при диафрагме с  $d_d = 30$  мкм, обеспечивающей пространственное разрешение примерно 4 мм, диаметр пятна равен 4,6 мм. На расстоянии 495 м и при диафрагме 15 мкм пространственное разрешение составляет 7,9 мм, и пучок удается сфокусировать до размеров 8,9 мм в диаметре. То есть экспериментальные данные согласуются с результатами качественного анализа эффективности компенсации, достигаемой на использовавшейся экспериментальной установке.

Во всех экспериментах по окончании работы адаптивной системы большая доля энергии оставалась за пределами центрального фокального пятна. Чтобы выяснить причину этого, мы оценили радиусы кривизны радиальных колец адаптивного зеркала (см. рис. 2, б), определяющих предельные возможности фокусировки излучения. Средний радиус внешнего (третьего) кольца актюаторов зеркала  $R_{зк, 3} = 68$  мм, максимальное отклонение актюаторов  $\Delta l = \pm 2,5$  мкм. Угол, определяющий направление радиуса кривизны зеркала,  $\varphi_3 = \Delta l/R_{зк, 3} = 3,68 \cdot 10^{-5}$  рад. Минимальный радиус кривизны адаптивного зеркала  $R_{ад, 3} = R_{зк, 3}/\varphi_3 = 1848$  м, а минимальный радиус фокусировки актюаторами третьего кольца  $F_3 = R_{ад, 3}/2 = 924$  м, т.е. актюаторы третьего кольца принципиально не могут собрать энергию в центральный максимум. Аналогичные оценки, выполненные для второго радиального кольца элементов (см. рис. 2, б), показали, что  $R_{ад, 2} = 628$  м,  $F_2 = R_{ад, 2}/2 = 324$  м.

Таким образом, основную фокусировку излучения в экспериментах на измерительных трассах 210 и 495 м обеспечивали первое и второе радиальные кольца актюаторов адаптивного зеркала. Актюаторы третьего кольца фокусировали излучение на более далекое расстояние, создавая фон за пределами центрального дифракционного пятна.

## Заклучение

Результаты экспериментов показали, что использование сигнала обратного рассеяния позволяет осуществлять управление адаптивным зеркалом и добиваться частичного подавления начальных аберраций волнового фронта лазерного пучка. Созданная экспериментальная установка имеет ряд ограничений и недостатков: в частности, не всегда обеспечивался достаточно высокий уровень сигнала обратного рассеяния, необходимый для устойчивого управления адаптивным контуром, пространственное разрешение приемной системы не обеспечивало компенсации аберраций волнового фронта, вызывавших более мелкие неоднородности в распределении интенсивности пучка на экране, чем минимальные из разрешаемых приемной системой.

Максимальное отклонение актюаторов адаптивного зеркала было недостаточным для обеспечения эффективной фокусировки излучения всей поверхностью зеркала на использовавшихся в экспериментах измерительных трассах. Все это не позволяло добиться дифракционного предела фокусировки излучения лазеров на экран. Тем не менее полученные экспериментальные результаты подтверждают возможность адаптивного подавления начальных аберраций волнового фронта пучка с использованием сигнала обратного рассеяния для управления гибким зеркалом.

Устранение выявленных недостатков адаптивной системы позволит в дальнейшем повысить ее эффективность. В частности, измерительный опыт показывает, что для повышения эффективности адаптации важно добиться совмещения энергетического центра тяжести изображения пучка в приемном телескопе с диафрагмой фотоприемника. Возможно, что для этого понадобится ввести дополнительное устройство для измерения и компенсации общих наклонов волнового фронта пучка.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, проекты № 12-05-00332, 13-02-98-068.

1. *Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатьев А.Б., Морозов В.В., Смалихо И.Н.* Коллимация начального волнового фронта частично когерентного светового пучка по сигналу обратного рассеяния // Оптика и спектроскопия. 2010. Т. 108, № 1. С. 113–122.
2. *Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатьев А.Б., Морозов В.В., Смалихо И.Н.* Компенсация аберрационных искажений волнового фронта импульсного лазерного пучка по сигналу обратного рассеяния // Оптика и спектроскопия. 2011. Т. 111, № 3. С. 488–496.
3. *Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатьев А.Б., Морозов В.В., Смалихо И.Н.* Компенсация искажений волнового фронта частично когерентного лазерного пучка по обратному атмосферному рассеянию // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 7. С. 549–554.
4. *Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатьев А.Б., Морозов В.В., Смалихо И.Н.* Наведение частично когерентного лазерного пучка по обратному атмосферному рассеянию // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 10. С. 885–893.
5. *Банах В.А., Смалихо И.Н.* Определение интенсивности оптической турбулентности по обратному атмосферному рассеянию лазерного излучения // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 4. С. 300–307.
6. *Смалихо И.Н.* Расчет коэффициента усиления обратного рассеяния лазерного излучения, распространяющегося в турбулентной атмосфере, с использованием численного моделирования // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 9. С. 796–800.
7. *Сазанович В.М., Цвык Р.Ш., Шестернин А.Н.* Управление положением лазерного пучка по обратному аэрозольному рассеянию. Модельный эксперимент // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 12. С. 1056–1060.
8. *Банах В.А., Ларичев А.В., Разенков И.А., Шестернин А.Н.* Апробация стохастического алгоритма параллельного градиентного спуска в лабораторных экспериментах // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1099–1104.
9. *Vorontsov M.A., Sivokon V.P.* Stochastic parallel-gradient-descent technique for high-resolution wave-front phase-distortion correction // J. Opt. Soc. Amer. 1998. V. 15, N 10. P. 2745–2758.
10. URL: <http://www.visionica.ru>
11. *Зув В.Е., Банах В.А., Покасов В.В.* Оптика турбулентной атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1988. 270 с.

*V.A. Banakh, V.V. Zhmylevskii, A.B. Ignatiev, V.V. Morozov, R.Sh. Tsvyk, A.N. Shesternin. Mitigation of laser beam initial distortions with the use of radiation scattered by a screen as a control signal for flexible mirror.*

Results of the atmospheric experiments on adaptive correction of the initial wave front aberrations of laser beams of visible and infrared wave range are present. The measured mean power of the laser beam radiation backscattered by a diffuse screen was used for adaptive control for the flexible mirror. It is shown that the efficiency of mitigation of the initial wave front aberrations increases with decreasing the receiver diaphragm diameter. Data of the experiments agree with the results of the qualitative analysis of efficiency of the used experimental set up for mitigation of the wave front aberrations.