

Фокусировка частично когерентного пучка по сигналу обратного атмосферного рассеяния

В.В. Кусков, В.А. Банах*

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 3.09.2021 г.

Приведены результаты атмосферных экспериментов по компенсации искусственно введенных начальных aberrаций волнового фронта сфокусированного лазерного пучка с использованием метода апертурного зондирования по сигналу обратного атмосферного рассеяния дополнительного источника на другой длине волны. Показано, что адаптивная компенсация позволяет снизить величину искажений волнового фронта, повысить сигнал обратного рассеяния, восстановить фокусировку основного лазерного пучка.

Ключевые слова: лазерный пучок, волновой фронт, компенсация, обратное атмосферное рассеяние; laser beam, wavefront, compensation, atmospheric backscatter.

Введение

Особенности распространения частично когерентных лазерных пучков [1] в атмосфере — предмет научных исследований на протяжении уже многих десятилетий (см., например, [2–4] и библиографию в них).

Ухудшение начальной пространственной когерентности лазерного излучения может, в частности, приводить к уменьшению турбулентных флуктуаций интенсивности в распространяющихся в атмосфере лазерных пучках [5–8] и, следовательно, к снижению вероятности появления ошибок при передаче информации в оптических линиях связи [9]. Однако с ухудшением пространственной когерентности происходит и дополнительное к дифракционному уширение лазерных пучков, зачастую превосходящее турбулентное, что препятствует передаче лазерной энергии и информации в открытых линиях связи на большие расстояния. В [10] представлены экспериментальные данные, показывающие, что эффективность транспортировки лазерной энергии и качество пучков в атмосфере можно повысить путем адаптивного управления начальным волновым фронтом пространственно частично когерентных лазерных пучков методом апертурного зондирования с использованием для замыкания обратной связи рассеянного назад лазерного излучения. Результаты [10] получены для коллимированных пучков.

В настоящей работе представлены результаты исследования возможности фокусировки пространственно частично когерентных лазерных пучков вышеупомянутым методом. Эксперименты проводились

в феврале — июне 2020 г. с использованием атмосферного стенда, описание которого дано в [11], по схеме, показанной на рис. 4 в [10]. Отличие лишь в том, что основной пучок был не коллимированным, а фокусировался на расстояние 500 м, где располагался экран.

Описание эксперимента

На первом этапе измерений были проанализированы размеры основного пучка на экране до искусственного внесения случайных искажений в его волновой фронт при фокусировке большой кольцевой и малой круглой апертурами в соответствии со схемами стенда на рис. 2 и 6 в [11].

Эффективный радиус лазерного пучка по уровню e^{-1} от максимума интенсивности рассчитывается по формуле [8]:

$$a_e = \sqrt{a^2 \left[\left(1 - \frac{L}{F}\right)^2 + \Omega^{-2} \left(1 + \frac{a^2}{a_k^2} + \frac{4}{3} \frac{a^2}{\left(\left(\frac{3}{8}\right)^{5/3} \rho_s\right)^2} \right) \right]}, \quad (1)$$

где a — эффективный радиус на выходной апертуре; L — длина трассы распространения; F — дальность фокусировки; $\Omega = ka^2/L$ — число Френеля передающей апертуры; $k = 2\pi/\lambda$; a_k — радиус пространственной когерентности поля на выходной апертуре; $\rho_s = (0,55C_n^2 k^2 L)^{-3/5}$ — радиус пространственной когерентности сферической волны в турбулентной атмосфере; C_n^2 — структурная постоянная турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха. Эффективный радиус полностью коге-

* Василий Вадимович Кусков (vvk@iao.ru); Виктор Арсентьевич Банах (banakh@iao.ru).

рентного лазерного пучка, определяемый только дифракцией ($C_n^2 = 0$), для $\lambda = 0,532$ мкм и $F = L = 500$ м составляет 0,0002 м для большой кольцевой (диаметр внешней окружности кольца 0,5 м) и 0,0008 м для малой круглой (диаметр 0,1 м) апертур.

Атмосферная турбулентность вызывает дополнительное к дифракционному уширение лазерного пучка. Для его оценки акустическим анемометром измерялась температура воздуха и скорость ветра, по которым затем рассчитывалась C_n^2 . Эксперименты проводились в ночное время, и высота распространения лазерного пучка над подстилающей поверхностью доходила до 10 м, так что измеренные значения C_n^2 не превышали $3 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$. Для таких значений структурной постоянной эффективный радиус сфокусированного когерентного лазерного пучка a_e определяется в основном турбулентным уширением и в соответствии с (1) составляет ≈ 6 мм как для большой, так и для малой апертур. Экспериментально полученные значения эффективного радиуса основного сфокусированного лазерного пучка превышают эту величину и составляют в среднем $a_e = 8$ для большой кольцевой и 20 мм для малой круглой апертуры. Превышение измеренных значений эффективного радиуса пучка a_e рассчитанных для максимального зарегистрированного в экспериментах значения C_n^2 объясняется наличием неустра-

нимых aberrаций передающей оптической системы. Это обстоятельство позволило при анализе результатов измерений не учитывать влияние оптической турбулентности.

Порядок проведения эксперимента по адаптивной фокусировке частично когерентного пучка был таким же, как и в экспериментах с коллимированными пучками [10]. Для задания искажений волнового фронта основного пучка, имитирующих его пространственную частичную когерентность, на элементы гибкого зеркала подавались случайные наборы напряжений. Коррекция этих искажений методом апертурного зондирования осуществлялась путем подачи на элементы того же адаптивного зеркала управляющих напряжений, вырабатываемых по сигналу обратного атмосферного рассеяния с использованием стохастического алгоритма параллельного градиентного спуска (САПГС) [12]. Параметры САПГС в ходе проведения экспериментов подбирались эмпирически.

Фокусировка большой кольцевой передающей апертурой

На рис. 1, 2 представлены результаты, полученные для пучка, фокусируемого большой кольцевой апертурой. Угол поля зрения приемной системы

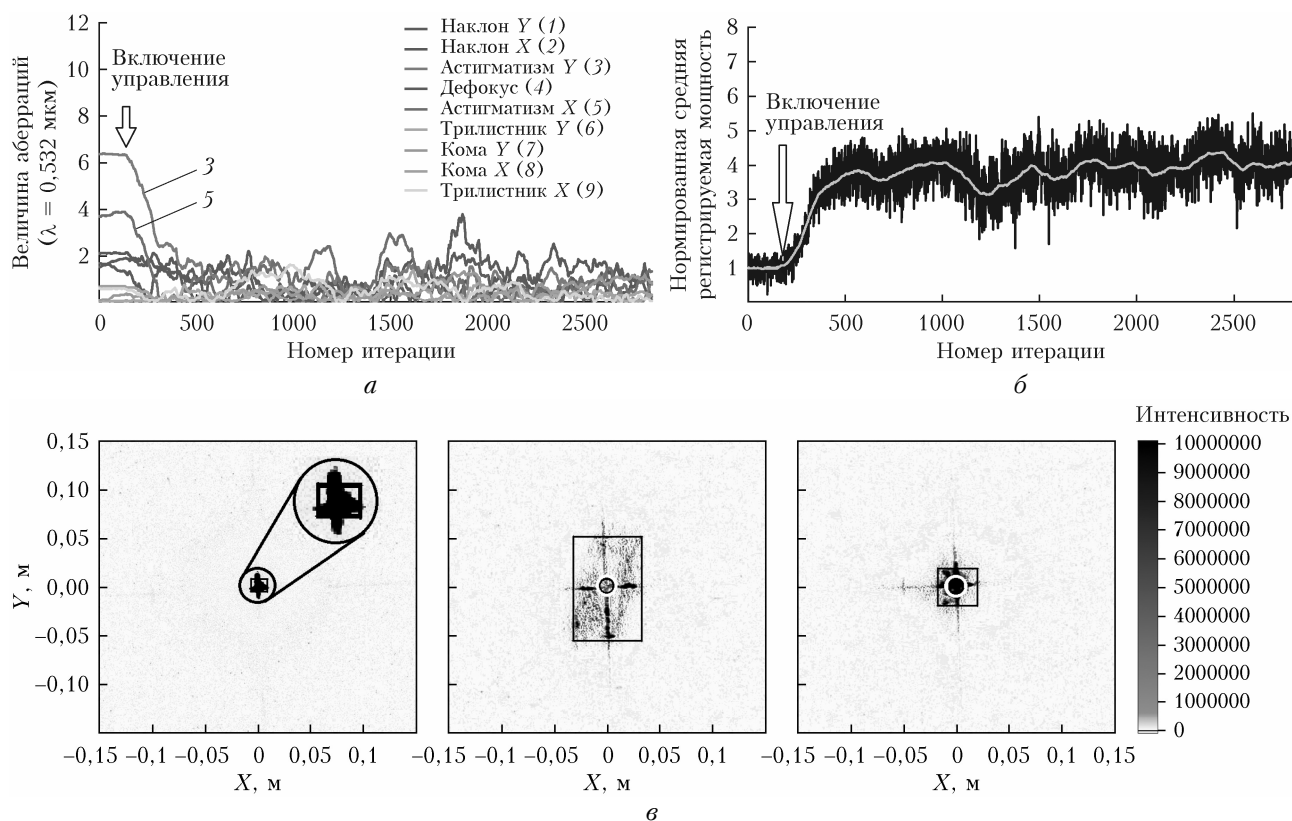


Рис. 1. Адаптивная фокусировка пространственно частично когерентного лазерного пучка большой кольцевой апертурой: aberrации волнового фронта пучка в представлении полиномов Церники (а); средняя мощность обратнорассеянного излучения: черная кривая – мгновенное значение, серая кривая – результат скользящего усреднения по 100 итерациям (б) в процессе коррекции; двумерные распределения интенсивности пучка на экране до (слева) и после (посередине) внесения искажений, а также после коррекции (справа) (в); прямоугольниками отмечены поперечные размеры пучка, белыми кружками на среднем и правом распределениях показаны размеры площадки S . Данные от 14.02.2020 г.

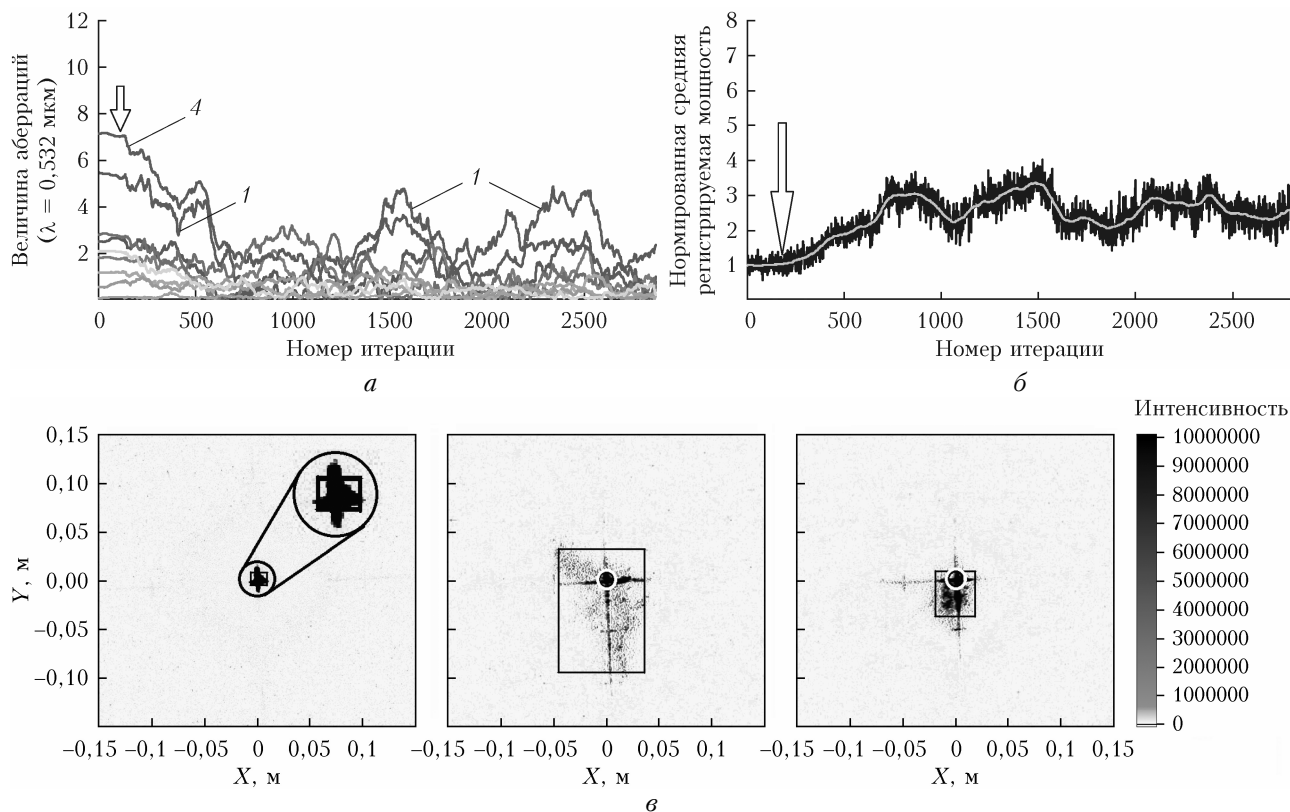


Рис. 2. То же, что и на рис. 1. Данные от 17.02.2020 г.

в этом случае составлял 67 мкрад, начальный шаг САПГС $\delta u_0 = 50$ В, эмпирическая константа, определяющая итерационный шаг алгоритма $\gamma = 50$, частота итераций – 15 Гц. Показан временной ход aberrаций волнового фронта основного пучка в представлении полиномов Цернике в процессе коррекции; мгновенная и усредненная по 100 итерациям средняя регистрируемая мощность рассеянного излучения от дополнительного источника; двумерные распределения интенсивности основного пучка на экране до и после внесения aberrаций и по окончании коррекции. На графиках средняя мощность сигнала обратного рассеяния нормируется на мощность рассеянного излучения при отсутствии адаптивного управления ($\delta u_0 = 0$ В, $\gamma = 0$), усредненную за время выполнения 200 итераций. Для визуальной оценки размеров пучка во время эксперимента на экран была нанесена размерная сетка, которая вырезалась при обработке изображений. На двумерных распределениях интенсивности пучка она показана пересекающимися прямыми линиями.

Из рис. 1, а видно, что aberrации волнового фронта представлены в основном астигматизмом по вертикальной и горизонтальной осям. В ходе адаптации примерно за 300 итераций САПГС aberrации волнового фронта уменьшаются до $1-2\lambda$, а средняя мощность сигнала обратного рассеяния возрастает в 3,5–4 раза (см. рис. 1, б). После выхода на максимум средняя мощность принятого рассеянного излучения остается примерно на одном уровне. При этом aberrации волнового фронта колеблются в пределах $1-2\lambda$ с выбросами до $3-4\lambda$.

Распределение интенсивности в исходном пучке на экране показано на рис. 1, в слева. Для большей наглядности оно продублировано в увеличенном масштабе. Внесение случайных искажений в волновой фронт пучка делает его частично когерентным в пространстве и приводит к существенной дефокусировке и изменению формы пучка (рис. 1, в посередине). Если до внесения искажений (рис. 1, в слева) размеры пучка по горизонтали и вертикали по уровню e^{-1} от максимума интенсивности составляют $\sim 0,016$ и $\sim 0,012$ м соответственно, то после внесения искажений они становятся равными $\sim 0,07$ м по горизонтальной оси и $\sim 0,12$ м по вертикальной. Следовательно, средняя мощность в пределах исходного фокального пятна площадью $S = \pi a_e^2$ ($a_e \approx 8$ мм) после искусственного внесения искажений становится значительно меньше.

По окончании коррекции форма пучка становится ближе к исходной, а его размеры уменьшаются до 0,03 м по горизонтали и до 0,04 м по вертикали (рис. 1, в справа). Это существенно меньше размеров искаженного пучка, но в 2,5 раза больше исходных размеров пучка. Чтобы оценить эффективность адаптивной фокусировки частично когерентного пучка, рассчитывался параметр

$$T = P_{cS}/P_{aS}, \quad (2)$$

где P_{cS} – мощность, приходящаяся на площадь S после компенсации; P_{aS} – мощность, приходящаяся на эту же площадь в искаженном пучке. В эксперименте, результаты которого представлены на рис. 1, $T = 27,4$.

Фокусировка малой круглой апертурой

Другой пример адаптивной фокусировки кольцевого пространственно частично когерентного пучка приведен на рис. 2. В этом случае, как видно из рис. 2, *а*, aberrации задаются в основном наклоном по вертикальной оси ($5,5\lambda$) и дефокусировкой (7λ). В процессе адаптивной коррекции примерно за 600 итераций САПГС aberrации волнового фронта уменьшаются до 2λ . Средняя мощность сигнала обратного рассеяния возрастает в 3 раза (см. рис. 2, *б*). Однако после достижения этого уровня вследствие низкой концентрации аэрозоля в атмосфере во время эксперимента средняя мощность регистрируемого рассеянного излучения испытывает более сильные флуктуации, чем в предыдущем примере. Как следствие, подавление aberrаций по сигналу обратного рассеяния при продолжении итерационного процесса неустойчивое, возникают спонтанные колебания aberrаций.

После внесения искажений пучок, как и в первом случае, деформировался и дефокусировался. Из распределения интенсивности на рис. 2 (центральный фрагмент) следует, что размеры искаженного пучка на экране составляют 0,08 м по горизонтальной оси и 0,13 м по вертикальной. После адаптивной фокусировки размеры пучка уменьшились до 0,04 м по горизонтали и до 0,05 м по вертикали, но сам пучок сместился относительно исходного направления. Параметр $T = 2,8$ для области, ограниченной окружностью белого цвета площадью S на рис. 2, *в* справа, и 23,9 для области, ограниченной такой же окружностью, но с центром, совмещенным с центром тяжести скорректированного пучка.

Рис. 3 и 4 иллюстрируют результаты, полученные для пучка, фокусируемого круглой апертурой диаметром 10 см. В этих экспериментах угол поля зрения приемника рассеянного излучения составлял 34 мкрад, $\delta u_0 = 30$ В, $\gamma = 10$, площадка S определялась эффективным радиусом когерентного пучка, равным в этом случае 20 мм.

В эксперименте, результаты которого представлены на рис. 3, aberrации волнового фронта представлены в виде астигматизма по горизонтальной ($8,5\lambda$) и вертикальной (4λ) осям, дефокусировки ($3,5\lambda$) и трилистника ($3,5\lambda$). После включения адаптивного управления величина aberrаций плавно уменьшается и достигает минимума в 2λ примерно через 5500 итераций, а затем немного возрастает. Регистрируемая мощность сигнала обратного рассеяния возрастает в 20–25 раз, но сильно флуктуирует, как и в экспериментах по коллимации пучков с использованием малой передающей апертуры [10], из-за слишком узкого поля зрения приемника при такой схеме измерений [11]. Вследствие этого для подавления aberrаций требуется значительно большее число итераций САПГС, чем в экспериментах с кольцевой апертурой (см. рис. 1, 2). Внесение искажений в волновой фронт приводит к увеличению размеров пучка с 0,025 до 0,36 м по горизонтальной оси и с 0,04 до 0,35 м по вертикальной. В результате адаптивной фокусировки по сигналу

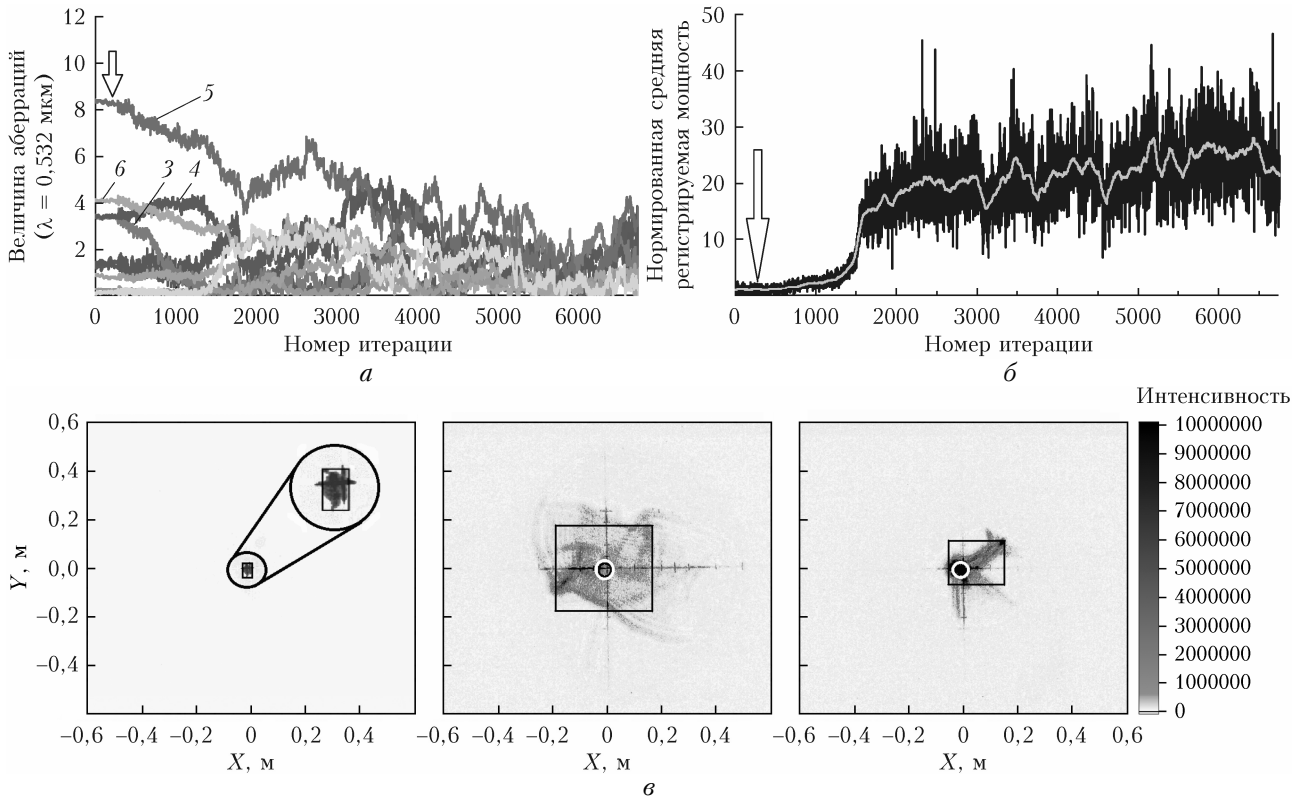


Рис. Адаптивная фокусировка пространственно частично когерентного лазерного пучка малой круглой апертурой. Обозначения см. на рис. 1. Данные от 6.06.2020 г.

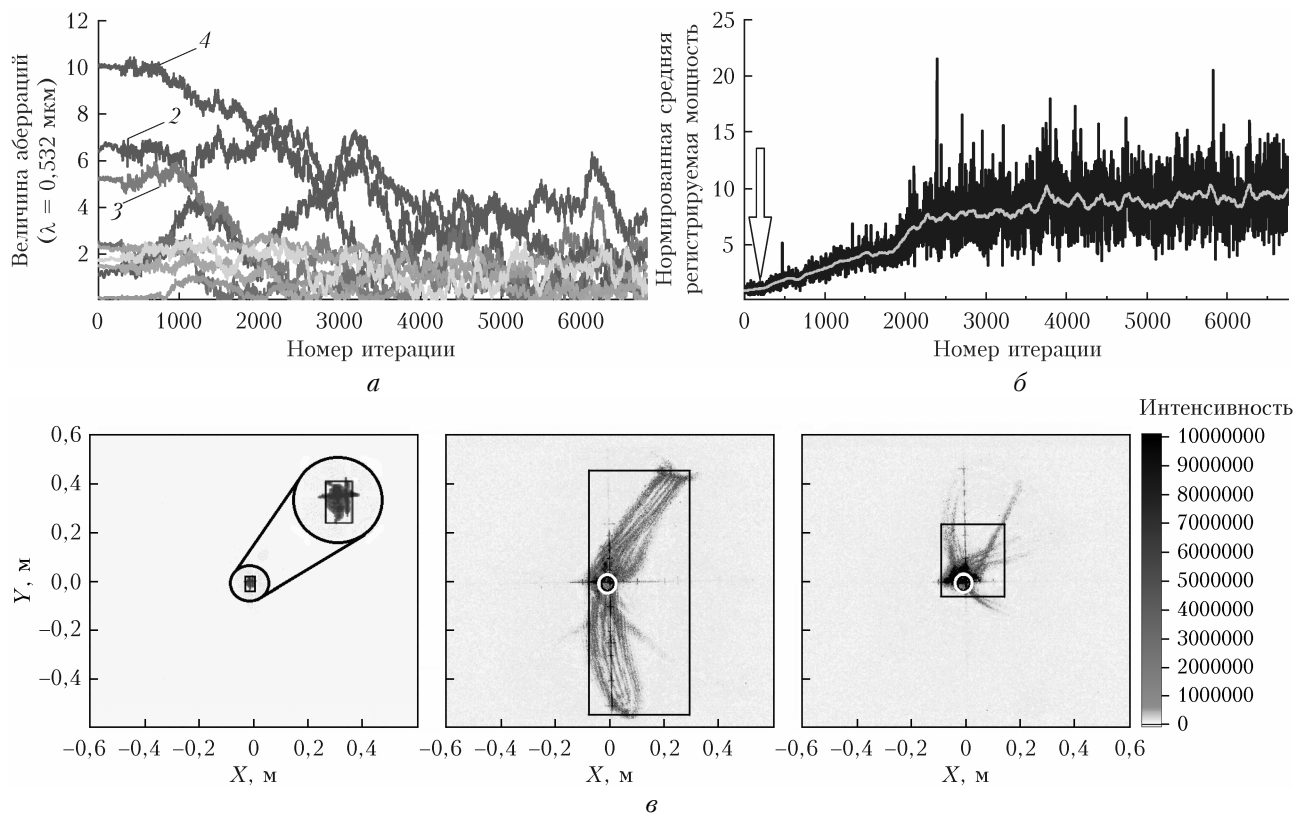


Рис. 4. То же, что и на рис. 3. Данные от 8.06.2020 г.

обратного рассеяния поперечные размеры пучка уменьшились до 0,2 м по горизонтали и до 0,18 м по вертикали. Однако концентрация мощности в результате коррекции значительно возросла ($T = 37,5$).

В эксперименте, результаты которого представлены на рис. 4, после подачи случайного набора напряжений на элементы адаптивного зеркала в волновом фронте пучка появились aberrации в виде дефокусировки, наклона по горизонтальной оси и астигматизма по вертикальной.

В ходе адаптивной коррекции астигматизм уменьшился с 5 до 2λ за 1400 итераций САПГС. Для подавления дефокусировки и наклона до 3λ потребовалось 4500 итераций. Однако эффективность коррекции и фокусировки в этом эксперименте невысока из-за зашумленности сигнала обратного рассеяния вследствие низкой концентрации аэрозоля в атмосфере. Мощность сигнала обратного рассеяния возросла всего в 10 раз, что почти в 3 раза меньше, чем в предыдущем примере. Размеры искаженного пучка существенно уменьшились при коррекции: с 0,37 до 0,23 м по горизонтали и с 1,01 до 0,3 м по вертикали; $T = 3,94$.

Заключение

Всего было проведено несколько десятков экспериментов по фокусировке пространственно частично когерентных лазерных пучков при использовании большой кольцевой и малой круглой передающих апертур. В экспериментах с большой кольцевой апертурой в результате внесения искажений в волновой

фронт первоначально сфокусированного основного пучка происходила его сильная дефокусировка и деформация распределения интенсивности в поперечном сечении. Размеры пучка на экране на расстоянии 500 м увеличивались в ~ 4 –11 раз. В результате адаптивной фокусировки за 300–500 итераций САПГС поперечные размеры пучка на экране уменьшались в 2–3 раза. Во многих случаях существенно возросла эффективность фокусировки; параметр T принимал значения от 2,8 до 27,4, а распределение интенсивности в поперечном сечении пучка становилось близким к исходному.

В экспериментах с круглой апертурой малого, по сравнению с кольцевой, диаметра сфокусированный лазерный пучок после внесения в волновой фронт случайных искажений увеличивал свои поперечные размеры на экране в 9–25 раз и сильно деформировался. В отличие от экспериментов с кольцевой апертурой для подавления aberrаций волнового фронта в узких пучках требовалось значительно большее число итераций САПГС, до 3,5–5,5 тыс. Но это связано в большей мере не с разницей в первоначальных размерах пучков, а с более узким полем зрения приемника рассеянного излучения в схеме измерений, использовавшейся в экспериментах по фокусировке таких пучков. В результате адаптивной коррекции волнового фронта по сигналу обратного рассеяния поперечные размеры пучка, фокусирующегося с помощью круглой апертуры, на экране уменьшались в 1,6–3 раза, а параметр T , характеризующий эффективность фокусировки, изменялся в пределах от 3,9 до 37,5, что несколько больше,

чем в экспериментах по адаптивной фокусировке широкого частично когерентного кольцевого пучка.

Таким образом, метод апертурного зондирования, замыкаемый по сигналу обратного атмосферного рассеяния, позволяет уменьшить расходимость пространственно частично когерентных лазерных пучков при различных оптических схемах, используемых для их формирования. Небольшая разница в эффективности фокусировки широких и узких частично когерентных пучков объясняется тем, что широкие пучки дефокусируются меньше, чем узкие, при внесении одинаковых искажений в волновой фронт.

1. *Кон А.И., Татарский В.И.* К теории распространения частично-когерентных световых пучков в турбулентной атмосфере // Изв. вузов. Радиофиз. 1972. Т. 15, № 10. С. 1547–1574.
2. *Andrews L.C., Phillips R.L., Hopen C.Y.* Laser Beam Scintillation with Applications. Bellingham, Washington: SPIE Press, 2001. 379 p.
3. *Majumdar A.K.* Free-space laser communication performance in the atmospheric channel // J. Opt. Fiber. Commun. Rep. 2005. V. 2, N 4. P. 345–396.
4. *Zhao L., Xu Y., Yang S.* Statistical properties of partially coherent vector beams propagating through anisotropic atmospheric turbulence // Optik. 2021. V. 227. P. 166115.
5. *Банах В.А., Булдаков В.М., Миронов В.Л.* Флуктуации интенсивности частично когерентного светового пучка в турбулентной атмосфере // Опт. и спектроскоп. 1983. Т. 54, № 6. С. 1054–1059.
6. *Банах В.А., Булдаков В.М.* Влияние начальной степени пространственной когерентности светового пучка на флуктуации интенсивности в турбулентной атмосфере // Опт. и спектроскоп. 1983. Т. 55, № 4. С. 707–712.
7. *Заворотный В.У.* Частотная корреляция сильных флуктуаций интенсивности в турбулентной атмосфере // Изв. вузов. Радиофиз. 1984. Т. 24, № 5. С. 601–608.
8. *Зуев В.Е., Банах В.А., Покасов В.В.* Оптика турбулентной атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 267 с.
9. *Воронцов М.А., Дудоров В.В., Зырянова М.О., Колосов В.В., Филимонов Г.А.* Частота появления ошибочных битов в системах беспроводной оптической связи с частично когерентным передающим пучком // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 11. С. 936–940; *Vorontsov M.A., Dudorov V.V., Zyryanova M.O., Kolosov V.V., Filimonov G.A.* Bit error rate in free-space optical communication systems with a partially coherent transmitting beam // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 3. P. 185–189.
10. *Банах В.А., Гордеев Е.В., Кусков В.В., Ростов А.П., Шестернин А.Н.* Управление начальным волновым фронтом пространственно частично когерентного пучка методом апертурного зондирования по сигналу обратного атмосферного рассеяния. II. Эксперимент // Оптика атмосфер. и океана. 2021. Т. 34, № 8. С. 606–616; *Banakh V.A., Gordeev E.V., Kuskov V.V., Rostov A.P., Shesternin A.N.* Controlling the initial wavefront of a spatially partially coherent beam by the aperture sensing technique based on backscatter signals in the atmosphere. II. Experiment // Atmos. Ocean. Opt. 2021. V. 34, N 8 (в печати).
11. *Банах В.А., Гордеев Е.В., Кусков В.В., Ростов А.П., Шестернин А.Н.* Управление начальным волновым фронтом пространственно частично когерентного пучка методом апертурного зондирования по сигналу обратного атмосферного рассеяния. I. Экспериментальная установка // Оптика атмосфер. и океана. 2021. Т. 34, № 8. С. 599–605; *Banakh V.A., Gordeev E.V., Kuskov V.V., Rostov A.P., Shesternin A.N.* Controlling the initial wavefront of a spatially partially coherent beam by the aperture sensing technique based on backscatter signals in the atmosphere. I. Experimental setup // Atmos. Ocean. Opt. 2021. V. 34, N 8 (в печати).
12. *Vorontsov M.A., Sivokon V.P.* Stochastic parallel-gradient-descent technique for high-resolution wave-front phase-distortion correction // J. Opt. Soc. Am. A. 1998. V. 15. P. 2745–2758.

V.V. Kuskov, V.A. Banakh. Focusing a partially coherent beam based on the atmospheric backscatter signal.

The results are presented of atmospheric experiments on compensation for the artificially introduced initial aberrations of the wavefront of a focused laser beam using the aperture sounding method based on an atmospheric backscatter signal from an additional source at a different wavelength. It is shown that adaptive compensation can reduce wavefront distortions, increase the backscatter signal, and restore the focusing of the main laser beam.