

УДК 621 372:551.521

Использование обратного атмосферного рассеяния для компенсации ухода пучка от заданного направления

В.В. Кусков[✉], В.А. Банах, Е.В. Гордеев, А.Н. Шестернин*

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

Поступила в редакцию 1.06.2022 г.;
после доработки 18.08.2022 г.;
принята к печати 20.08.2022 г.

В работе исследованы возможности компенсации ухода пучка от заданного направления по смещению энергетического центра тяжести оптического изображения, формируемого пучком рассеивающего объема. Атмосферные эксперименты проводились с коллимированным и сфокусированным пучками. Изображение лазерного пятна на рассеивающем атмосферном слое регистрировалось матричным приемником, установленным в плоскости резкого изображения телескопа. Управление направлением распространения лазерного пучка осуществлялось при помощи поворотного зеркала. Показано, что уход может быть скомпенсирован с точностью до нескольких микроградусов.

Ключевые слова: лазерный пучок, волновой фронт, обратное атмосферное рассеяние, рассогласование оптических осей, компенсация, центр тяжести изображения; laser beam, wavefront, atmospheric backscatter, misalignment of optical axes, compensation, image center of gravity.

Введение

При распространении в атмосфере пространственно-ограниченные лазерные пучки испытывают случайные искажения вследствие воздействия турбулентности [1–3]. В частности, турбулентность приводит к случайным отклонениям направления распространения лазерных пучков от исходного, что снижает эффективность работы оптических систем связи, локации и навигации. Для уменьшения этого эффекта разрабатываются методы и создаются устройства адаптивной компенсации случайных смещений лазерных пучков [4–11]. В частности, в [10] рассматривается возможность коррекции случайных смещений оптического пучка в турбулентной атмосфере путем отслеживания углового положения энергетического центра тяжести распределения интенсивности пучка на удаленном объекте. Показано, что таким образом можно в четыре раза уменьшить дисперсию случайных смещений лазерного пучка. В [11] предложен способ наведения пучка по самой яркой точке распределения интенсивности пучка на мишени.

Неконтролируемые отклонения направления распространения лазерных пучков от заданного могут происходить и за счет абберационных иска-

жений волнового фронта на оптических элементах системы формирования пространственно-ограниченных оптических пучков. В [12–14] представлены результаты атмосферных экспериментов по исследованию возможностей компенсации возникающих в системе аббераций начального волнового фронта пучка методом апертурного зондирования с замыканием обратной связи по излучению, рассеянному атмосферой в обратном направлении из области перетяжки зондирующего пучка. Показано, что эффективность метода зависит от угла поля зрения приемника и может существенно уменьшаться при уходе пучка из поля зрения. Возникает задача совмещения осей зондирующего (и основного) пучков с осью приемной системы.

Возможность использования обратного атмосферного рассеяния для определения отклонения оси лазерного пучка от заданного направления распространения детально исследована в [15]. Анализ проведен для коллимированного пучка лазерного излучения, распространяющегося с высоты 10 км в верхнюю полусферу. Расчетные данные позволяют оценить достижимую точность наведения лазерного пучка в зависимости от его характеристик и используемых приемников излучения. В [16] проведен модельный эксперимент по совмещению осей сфокусированного в аэрозольном объеме лазерного пучка с заданным направлением. Путем управления положением энергетического центра тяжести распределения интенсивности изображения, формируемого пучком рассеивающего объема в приемном телескопе, было достигнуто совмещение осей с по-

* Василий Вадимович Кусков (vvk@iao.ru); Виктор Арсентьевич Банах (banakh@iao.ru); Евгений Викторович Гордеев (gordeev@iao.ru); Андрей Николаевич Шестернин (san@iao.ru).

грешностью, не превышающей нескольких микроардиан. В настоящей работе представлены результаты аналогичных экспериментов в атмосфере. Величина обратного атмосферного рассеяния в приземном слое на два порядка выше, чем на высоте 10 км (см. рис. 1 [15]), благодаря чему применимость метода в реальной атмосфере не вызывает сомнений.

Эксперименты проводились на базе атмосферного стенда апертурного зондирования, описание которого дано в [12]. Целью экспериментов было определение погрешностей совмещения оптических осей лазерного пучка и приемной системы и изучение возможности компенсации уходов пучка из поля зрения приемника по сигналу обратного атмосферного рассеяния, что необходимо для замыкания контура обратной связи в системах апертурного зондирования на рассеянном в атмосфере излучении и компенсации случайных угловых смещений пучков за счет турбулентности. Эксперименты проводились на приземной трассе.

Экспериментальная установка

Принцип построения экспериментальной установки, работающей со сфокусированным пучком, представлен на рис. 1. Лазерное излучение попадает на управляемое поворотное зеркало (УПЗ), после чего расширяется системой «линза–телескоп». После телескопа излучение направляется в атмосферу, где фокусируется на определенном расстоянии. Рассеянное в обратном направлении излучение собирается приемным телескопом. В плоскости резкого изображения из области перетяжки располагается матричный приемник. В идеальном случае изображение пучка в атмосфере находится в центре приемника излучения. Однако возникающие внутри передающей оптической системы aberrации могут увести лазерный пучок с оси приемной системы. В таком случае изображение пучка на приемнике сместится. Замыкая обратную связь с использованием матричного детектора, при помощи наклона УПЗ можно компенсировать рассогласование. В результате оси лазерного пучка и приемной системы будут снова совмещены.

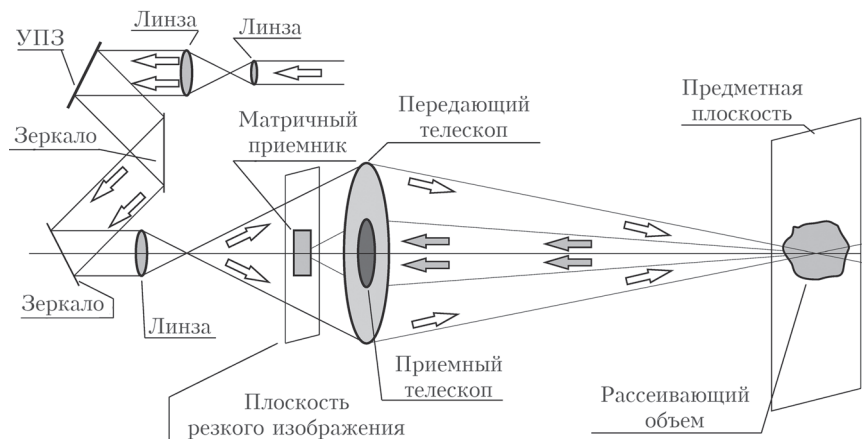


Рис. 1. Принцип построения экспериментальной установки. Сфокусированный пучок

Для коллимированного лазерного пучка схема аналогичная. Различия заключаются в более низкой плотности мощности в поперечном сечении в предметной плоскости, а следовательно, меньшем отношении сигнал/шум на детекторе и изображении пучка на матрице в виде кольца.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. В качестве источника излучения использовался непрерывный лазер с длиной волны излучения $\lambda = 0,532$ мкм. Лазерное излучение расширялось линзовым телескопом L_1-L_2 , после чего поступало на УПЗ. Далее при помощи зеркал Z_1 и Z_2 излучение направлялось на линзу согласования с передающим телескопом L_3 . После L_3 излучение направлялось в передающий телескоп системы Кассегрена Т50 диаметром 500 мм, в результате чего лазерный пучок расширялся примерно в 6 раз. Это позволяло добиться полного заполнения апертуры передающего телескопа. Управление положением фокуса передающей оптической системы осуществлялось путем перемещения линзы L_2 вдоль оптической оси. При помощи зеркала Z_3 , расположенного за контррефлектором телескопа Т50, рассеянное в атмосфере излучение принималось телескопом системы Ньютона Т15 диаметром 150 мм. В качестве приемника излучения использовалась КМОП-видеокамера со снятым объективом, матрица которой располагалась в плоскости резкого изображения с расстояния 500 м.

УПЗ было специально разработано для этого эксперимента (рис. 3). Оно представляет собой зеркало с двумя углами наклона – по вертикальной и горизонтальной осям. Наклон контролируется при помощи шаговых двигателей (модель 8MS00-25, Standa Ltd, Литва), которые управляются блоком, подключаемым к компьютеру через порт USB. Шаг двигателя кратен 1,25 мкм с возможностью дробления минимального шага на 2, 4, 8.

Управление поворотным зеркалом осуществлялось с использованием информации о координатах энергетического центра тяжести изображения, получаемого с видеокамеры. Технические характеристики видеокамеры и источника излучения представлены в таблице.

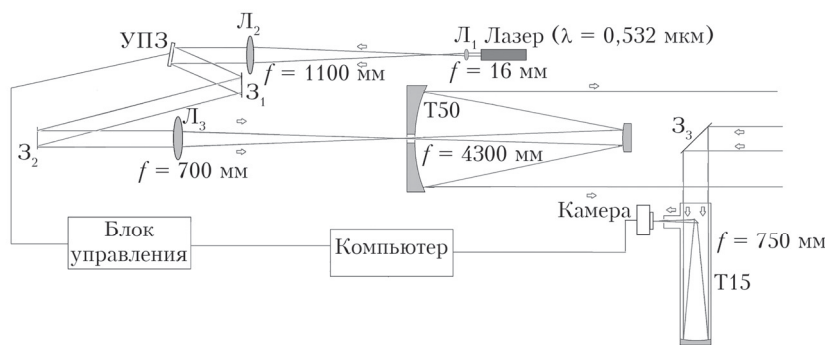


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: Л – линза; З – зеркало; T50 – передающий телескоп; T15 – приемный телескоп

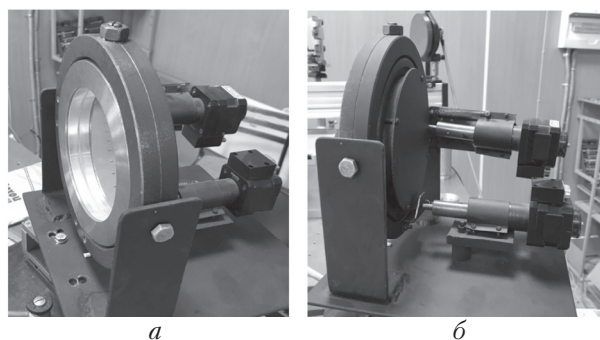


Рис. 3. Управляемое поворотное зеркало: вид спереди (а); вид сзади (б)

Технические характеристики видеокамеры и лазера

Характеристика	Значение
<i>Видеокамера</i>	
Производитель	4Lasers
Тип камеры	CMOS 1/3"
Модель	CONTOUR IR digital
Спектральная чувствительность	400–1700 нм
Размер пикселя	3,75 мкм × 3,75 мкм
Размеры камеры	55 мм × 55 мм × 75 мм
Разрешение	1280 × 1024
<i>Лазер</i>	
Производитель	ИРЭ-Полус
Модель	GLM-10
Тип	Непрерывный
Длина волны излучения	0,532 мкм
Минимальная мощность	0,5 Вт
Максимальная мощность	10,5 Вт
Диаметр пучка (гауссовый e^{-2})	1,5 мм

Методика измерений

Эксперименты проводились в июле 2020 г. на Базовом экспериментальном комплексе Института оптики атмосферы СО РАН (БЭК ИОА СО РАН). Длина атмосферной трассы составляла 500 м, высота оптической трассы над подстилающей поверхностью – в среднем 3 м. Рассматривалось две геометрии распространения лазерного пучка: коллимированный и сфокусированный на расстоянии 500 м.

Для минимизации фоновой засветки эксперименты проводились в ночное время. В случае сфокусированного пучка для регистрации матричным приемником было достаточно мощности источника 1,5 Вт. При коллимированном пучке плотность

мощности в предметной плоскости значительно снижалась. Поэтому мощность источника была повышена до 10,5 Вт. Однако даже в этом случае отношение сигнал/шум на приемнике оставалось невысоким, что приводило к большей погрешности определения центра тяжести видеоизображения в сравнении с экспериментами со сфокусированным пучком.

Эффективный радиус определялся по уровню e^{-1} от максимума интенсивности и в области перетяжки сфокусированного пучка составлял 12 мм. Его размер определялся как неустранимыми начальными искажениями волнового фронта, так и флуктуациями показателя преломления в турбулентной атмосфере. На коллимированный пучок искажения практически не влияли, и его эффективный радиус составлял 250 мм.

Изображение рассеивающего объема регистрировалось при помощи видеокамеры. Угол поля зрения видеокамеры составлял порядка 5 мрад, а на 1 пиксель КМОП-матрицы приходилось примерно 5 мрад, что соответствовало 2,4 мм на расстоянии 500 м.

Поскольку турбулентные флуктуации показателя преломления воздуха приводят к случайным смещениям лазерного пучка, было необходимо на первом этапе оценить величину этих смещений. Для этого рассчитывалась дисперсия смещений центра тяжести пучка по формуле [2]:

$$\sigma_c^2 = \frac{8}{9} \sigma_{c0}^2 \sigma_1^2(\Omega, \beta_0, \beta), \quad (1)$$

где $\sigma_{c0}^2 = 1,52 C_n^2 L^3 a^{-1/3}$; $\sigma_1^2(\Omega, \beta_0, \beta) = 3a^{1/3} \int_0^1 (1-\xi)^2 \times (a_3^{-1/3}(\xi L) - (a_3^2(\xi L) + a^2\beta)^{-1/6}) d\xi$, C_n^2 – структурная постоянная флуктуаций показателя преломления воздуха, L – длина трассы распространения, a – эффективный радиус пучка на выходной апертуре; a_3 – эффективный радиус пучка в турбулентной атмосфере; $\beta = 2/(a^2 \kappa_e^2)$, $\kappa_e = 2\pi/0,54L_0$, $L_0 = 0,4h$ – внешний масштаб турбулентности, h – высота распространения над подстилающей поверхностью; β_0 – параметр, характеризующий интенсивность оптической турбулентности на трассе распространения длиной L . Структурная постоянная флуктуаций показателя преломления рассчитывалась по данным акустического анемометра (АМК03, Сибаналитприбор, г. Томск). В результате проведенных измерений

было установлено, что C_n^2 не превышал $3 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$. При таких C_n^2 дисперсия случайных смещений $\sigma_c^2 \leq 0,81 \text{ мм}^2$ в случае сфокусированного пучка и $\leq 0,36 \text{ мм}^2$ в случае коллимированного. Поскольку на 1 пиксель видеокамеры приходилось $\sim 2,4 \text{ мм}$, а среднеквадратическое отклонение составляло до $0,9 \text{ мм}$ для сфокусированного пучка и $0,6 \text{ мм}$ для коллимированного, влиянием турбулентных флуктуаций показателя преломления на результаты эксперимента можно было пренебречь.

Видеоизображение, полученное с камеры, передавалось в компьютер, где обрабатывалось при помощи программы, написанной в среде Labview. В ней шумовая составляющая отсекалась путем введения порога дискриминации, определяемого эмпирическим путем, после чего вычислялись положение центра тяжести видеоизображения (ПЦТ), направление движения и шаг двигателей.

Порядок проведения эксперимента был следующим: установка юстировалась, совмещались оптические оси лазерного пучка и приемника, в результате чего ПЦТ оказывалось в центре видеоизображения. Оценивалось случайное смещение ПЦТ на видеоизображении. Далее при помощи УПЗ искусственно вносилось случайное смещение лазерного пучка, определялась разность координат между центром видеоизображения (x_0) и ПЦТ (x_i), включалось управление поворотным зеркалом и с частотой 1 Гц

происходило итерационное совмещение ПЦТ с центром видеоизображения.

Для управления поворотным зеркалом использовалось два варианта итерационного алгоритма. В первом варианте шаг был постоянным и составлял $31,25 \text{ мкм}$ при $|x_0 - x_i| \geq 15$ и $2,5 \text{ мкм}$ при $15 > |x_0 - x_i| \geq 2$ при сфокусированном пучке и $15 > |x_0 - x_i| \geq 3$ при коллимированном. При $|x_0 - x_i| < 2$ для сфокусированного пучка и $|x_0 - x_i| < 3$ для коллимированного движение останавливалось. Это обусловлено величиной собственных случайных смещений ПЦТ видеоизображения, определяемых шумами видеокамеры. По достижении 70 итераций процесс останавливался.

Во втором варианте размер шага (мкм) и направление движения вычислялись как $N_x = (x_0 - x_i)\delta$. Множитель δ подбирался эмпирически и в экспериментах $\delta = 1,4$ при $|x_0 - x_i| \geq 15$ и $\delta = 0,6$ при $15 > |x_0 - x_i|$. Как и в предыдущем варианте, движение останавливалось при $|x_0 - x_i| < 2$ в варианте со сфокусированным пучком и $|x_0 - x_i| < 3$ с коллимированным. Процесс останавливался после 30 итераций алгоритма.

Результаты эксперимента

На рис. 4 приведен пример реализации со сфокусированным пучком: нормированные на максимум полные и увеличенные исходные видеоизображения

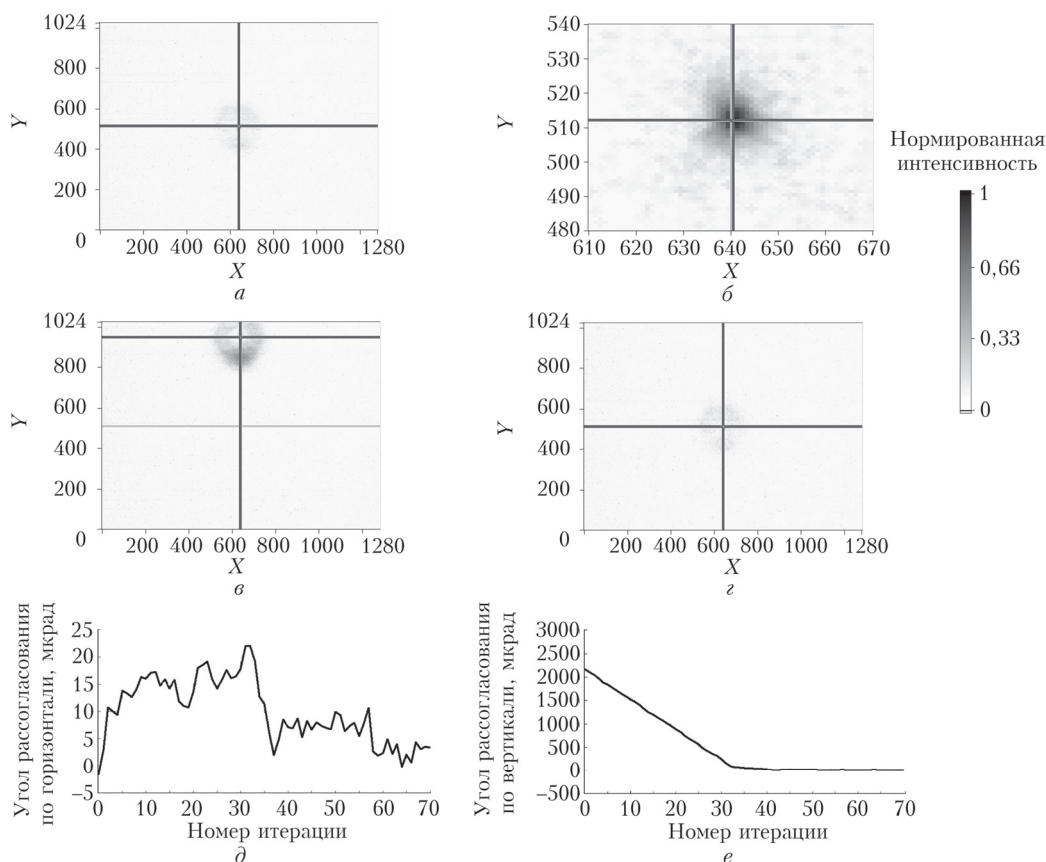


Рис. 4. Компенсация рассогласования оптических осей сфокусированного лазерного пучка и приемной системы: исходное (а) и увеличенное исходное (б) видеоизображения, после внесения рассогласования (в) и в конце работы (г); угол рассогласования по горизонтальной (д) и вертикальной осям (е) в зависимости от номера итерации

рассеянного в атмосфере излучения сфокусированного лазерного пучка на этапе юстировки с внесенным рассогласованием осей пучка и передатчика, а также после работы установки; угол рассогласования по горизонтальной и вертикальной осям в ходе работы системы. На изображении темно-серым перекрестьем показано положение центра видеоизображения, светло-серым – ПЦТ. Для управления поворотным зеркалом использовался первый вариант алгоритма. Как видно из рис. 4, угол рассогласования на начало работы составил 2,2 мрад по вертикальной оси без смещения по горизонтали. После включения управления для совмещения оптических осей потребовалось примерно 40 итераций. Хотя изначально по горизонтальной оси отклонения не было, в ходе работы оно появилось из-за особенностей исполнения УПЗ и механических вибраций при работе шаговых двигателей. После совмещения средний угол рассогласования составил 3,5 мрад по вертикальной и 5 мрад по горизонтальной осям со среднеквадратическим отклонением (СКО) 4 и 4,5 мрад соответственно.

Пример реализации со сфокусированным пучком представлен на рис. 5. В нем использовался второй вариант алгоритма управления поворотным зеркалом. Видно, что из-за изменившейся концентрации аэрозольных частиц уровень фоновой составляющей увеличился, однако работе системы это не помешало. Искусственно внесенный угол

рассогласования между осями лазерного пучка и приемной системы составил примерно 2,8 мрад по горизонтали и 1,9 мрад по вертикали. После включения управления потребовалось всего 4 итерации для того, чтобы угол рассогласования снизился в 10 раз, а для полной компенсации потребовалось 11 итераций. После совмещения среднее отклонение по горизонтальной оси составило 4,5 мрад с СКО = 5 мрад, а по вертикальной – 3,5 и 5 мрад соответственно.

На рис. 6 приведен пример реализации с коллимированным лазерным пучком при втором итерационном варианте алгоритма управления поворотным зеркалом. Небольшое смещение ПЦТ относительно центра кольца на исходном видеоизображении было вызвано неравномерным распределением интенсивности по поперечному сечению лазерного пучка.

В такой реализации потребовалось всего пять итераций для того, чтобы компенсировать рассогласование, составляющее 2,7 мрад по вертикали и 2,25 мрад по горизонтали. Такая быстрая компенсация в сравнении с представленной выше реализацией со сфокусированным пучком вызвана тем, что ПЦТ было смещено относительно оси пучка. Оно возникло из-за перераспределения энергии внутри лазерного пучка вследствие появившихся начальных искажений волнового фронта внутри передающей оптической системы, а также несоосности

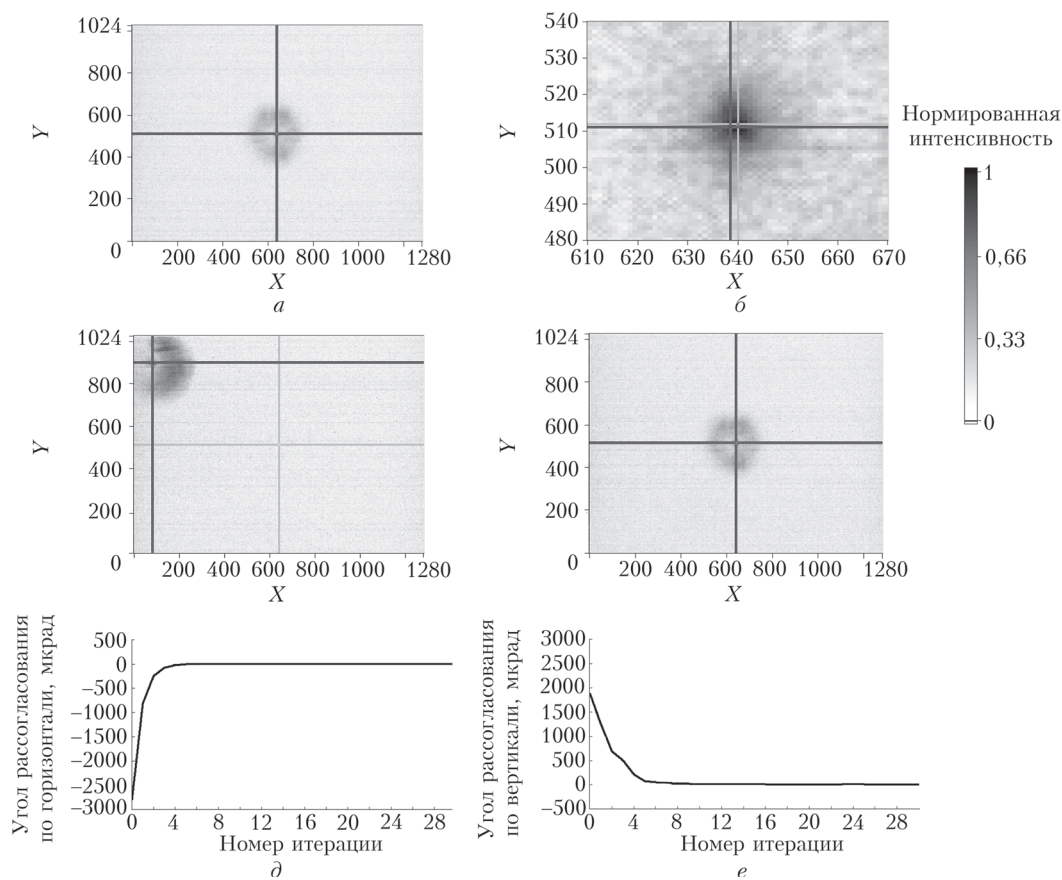


Рис. 5. Компенсация рассогласования оптических осей сфокусированного лазерного пучка и приемной системы. Описание фрагментов см. на рис. 4

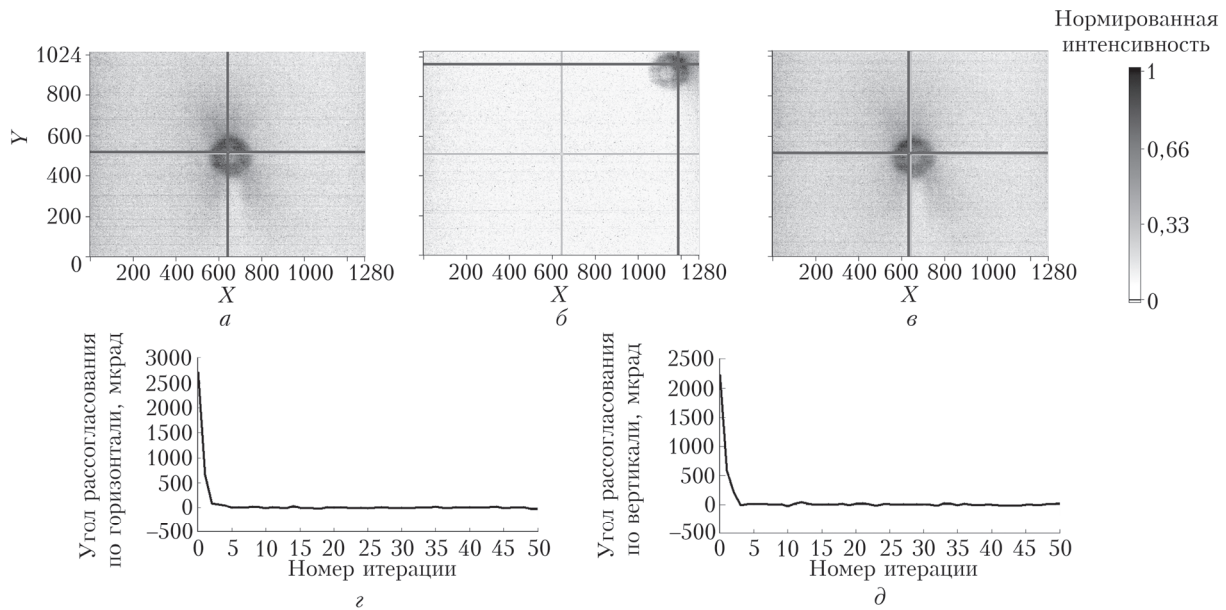


Рис. 6. Компенсация рассогласования оптических осей коллимированного лазерного пучка и приемной системы: видеоизображение исходное (а), после внесения рассогласования (б) и в конце работы (в); угол рассогласования по горизонтальной (z) и вертикальной осям (d) в зависимости от номера итерации

с телескопом Т50 и вызванного ей смещения тени от контррефлектора относительно оси лазерного пучка. После компенсации среднее значение угла рассогласования составило 1,5 мкрад по горизонтальной и 3,5 мкрад по вертикальной осям с СКО = 11,5 и 14,5 мкрад соответственно. Такое высокое значение СКО было вызвано низким уровнем отношения сигнал/шум. Это привело к повышенному смещению ПЦТ, в результате чего $|x_0 - x_i| > 3$. В итоге управление снова включалось для компенсации этого рассогласования. На рис. 7 показан шаг работы двигателей в зависимости от номера итерации по вертикальной и горизонтальной осям.

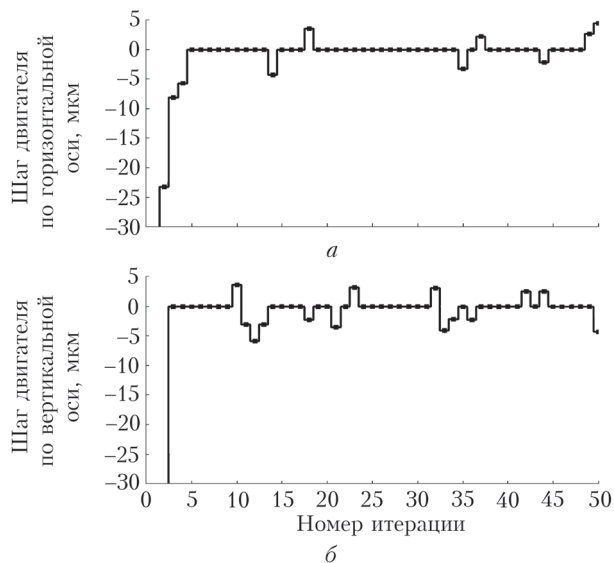


Рис. 7. Работа шаговых двигателей в зависимости от номера итерации в ходе работы первого алгоритма по горизонтальной (а) и вертикальной (б) осям. Коллимированный пучок

Всего было проведено несколько десятков экспериментов с различными углами рассогласования. Угол между оптическими осями после компенсации в экспериментах со сфокусированным пучком составлял до 7,5 мкрад, а среднее значение по всем реализациям – 4 мкрад. Для коллимированного пучка угол рассогласования после компенсации уходил принимал значение до 6,5 мкрад со средним 2,2 мкрад. Среднеквадратическое отклонение угла рассогласования для сфокусированного пучка составляло до 8 мкрад со средним 5 мкрад, а для коллимированного пучка – 24 и 10 мкрад соответственно. Такой точности совмещения достаточно для использования в системе адаптивной коррекции апертурного зондирования для компенсации возникающего за счет начальных искажений волнового фронта ухода лазерного пучка из поля зрения приемной системы.

Заключение

Представлены результаты экспериментальных исследований возможности компенсации случайных смещений лазерного пучка по смещению энергетического центра тяжести оптического изображения, формируемого пучком, рассеивающего объема. Экспериментальная установка была создана на базе адаптивного атмосферного стенда апертурного зондирования, использующего для замыкания обратной связи сигнал обратного атмосферного рассеяния [12]. Изображение лазерного пятна на рассеивающем атмосферном слое на расстоянии 500 м регистрировалось матричным приемником, установленным в плоскости резкого изображения телескопа. Угол поля зрения матричного приемника составлял 5 мрад. Для управления направлением распространения лазерного пучка по изображению

пятна подсвета использовалось специально разработанное двухкоординатное поворотное зеркало, позволяющее изменять направление распространения пучка независимо по вертикальной и горизонтальной осям. Эксперименты проводились с коллимированным и сфокусированным на расстояние 500 м пучками. При проведении экспериментов было установлено, что обратнорассеянное в атмосфере излучение позволяет замкнуть обратную связь через матричный фотоприемник и при помощи управляемого поворотного зеркала совмещать оси лазерного пучка и приемной системы. Точность совмещения оптических осей определялась шумами видеокamеры и разрешением приемной системы. Всего было проведено порядка четырех десятков экспериментов. Искусственно вводимые в ходе проведения экспериментов углы между осями лазерного пучка и приемной системы составляли до 2,8 мрад. В экспериментах со сфокусированным пучком угол расхождения после работы системы составлял до 7,5 мрад со средним по всем реализациям значением 4 мрад. Среднеквадратическое отклонение составляло до 8 мрад со средним значением 5 мрад. Для коллимированного пучка итоговый угол принимал значения до 6,4 мрад со средним 2,2 мрад, а СКО составляло до 24 мрад со средним значением 10 мрад. Такой точности совмещения оптических осей лазерного пучка и матричного приемника излучения достаточно для компенсации ухода за счет начальных aberrаций из поля зрения приемной системы в адаптивном стенде апертурного зондирования.

Список литературы

1. Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 277 с.
2. Зуев В.Е., Банах В.А., Покасов В.В. Оптика турбулентной атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 270 с.
3. Миронов В.Л. Распространение лазерного пучка в турбулентной атмосфере. Н.: Наука, 1981. 246 с.
4. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 336 с.
5. Лукьянов Д.П., Корниенко А.А., Рудницкий Б.Е. Оптические адаптивные системы. М.: Радио и связь, 1989. 240 с.
6. Тараненко В.Г., Шанин О.И. Адаптивная оптика. М.: Радио и связь, 1990. 112 с.
7. Tyson R.K. Principles of adaptive optics. Boston: Academic Press, 1998. 345 p.
8. Канев Ф.Ю. Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования / Ф.Ю. Канев, В.П. Лукин. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2005. 250 с.

9. Антипов О.Л., Канев Ф.Ю., Лукин В.П., Мakenova Н.А. Зависимость эффективности компенсации турбулентных искажений многоканального излучения от метода управления фазой. Повышение эффективности при управлении амплитудой // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 11. С. 911–917. DOI: 10.15372/AOO20161103; Antipov O.L., Kanev F.Yu., Lukin V.P., Makenova N.A. Dependence of the effectiveness of multichannel radiation turbulent distortion compensation on the method of phase control: Increase of efficiency with amplitude control // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 3. P. 284–290.
10. Лукин В.П. Коррекция случайных угловых смещений оптических пучков // Квант. электрон. 1980. Т. 7. С. 1270–1279.
11. Лукин В.П., Черноцкий М.И. Принцип взаимности и адаптивное управление параметрами оптического излучения // Квант. электрон. 1982. Т. 9. С. 952–958.
12. 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 атмосф. и океана. 2021. Т. 34, № 8. С. 599–605. DOI: 10.15372/AOO20210805; 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 6. P. 625–631.
13. 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 атмосф. и океана. 2021. Т. 34, № 8. С. 606–616. DOI: 10.15372/AOO20210806; 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 6. P. 632–642.
14. Кусков В.В., Банах В.А. Фокусировка частично когерентного пучка по сигналу обратного атмосферного рассеяния // Оптика атмосф. и океана. 2021. Т. 34, № 12. С. 976–981. DOI: 10.15372/AOO20211208.
15. Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатьев А.Б., Морозов В.В., Смалыхо И.Н. Наведение частично когерентного лазерного пучка по обратному атмосферному рассеянию // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 10. С. 885–893.
16. Цвык Р.Ш., Сазанович В.М., Шестернин А.Н. Управление положением лазерного пучка по обратному аэрозольному рассеянию. Модельный эксперимент // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 12. С. 1056–1060; Tsvyk R.Sh., Sazanovich V.M., Shesternin A.N. Laser beam pointing based on the backscattered aerosol beam. A model experiment // Atmos. Ocean. Opt. 2012. V. 25, N 3. P. 236–241.

V.V. Kuskov, V.A. Banakh, E.V. Gordeev, A.N. Shesternin. Compensation for beam deviation from a direction specified based on atmospheric backscattering.

The results of atmospheric studies of a possibility of compensating for the beam deviation from a direction specified by means of shifting the energy center of gravity of the optical image of the beam scattering volume are presented. The experiments were carried out with collimated and focused beams. The image of the laser spot on the scattering atmospheric layer was recorded by an array detector located in the sharp-image plane of a telescope. The laser beam propagation direction was controlled with a rotary mirror. It is shown that the beam deviation can be compensated for accurate to several microradians.