

УДК 621 375:551.521

Управление начальным волновым фронтом пространственно частично когерентного пучка методом апертурного зондирования по сигналу обратного атмосферного рассеяния. II. Эксперимент

В.А. Банах, Е.В. Гордеев, В.В. Кусков,
А.П. Ростов, А.Н. Шестернин*

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

Поступила в редакцию 31.03.2021 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований возможности компенсации аберраций начального волнового фронта оптического пучка методом апертурного зондирования по сигналу обратного атмосферного рассеяния излучения дополнительного лазерного источника на другой длине волны. Показано, что при оптимальных углах поля зрения приемника рассеянного излучения метод позволяет уменьшить величину аберраций волнового фронта пучка в несколько раз, до 1-2 длин волн. В результате происходит уменьшение искажений распределения интенсивности в поперечном сечении пучка, снижается его расходимость и возрастает мощность в приосевой области.

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

Введение

В [1] представлена экспериментальная установка для атмосферных исследований возможности компенсации аберраций начального волнового фронта (ВФ) оптического пучка методом апертурного зондирования [2–6] по сигналу обратного атмосферного рассеяния излучения дополнительного лазерного источника [7]. В настоящей работе приведены результаты экспериментов по исследованию эффективности этого метода. В отличие от [8], где эксперименты проводились с основным и зондирующим лазерными пучками, имевшими одну и ту же геометрию распространения с фокусировкой излучения на определенное расстояние, здесь пучки формировались независимо, что позволило задавать для основного и зондирующего пучков разные геометрии распространения. Зондирующий пучок фокусировался на близкое расстояние для повышения мощности излучения, рассеянного из фокальной плоскости в обратном направлении, а основной задавался коллимированным.

Проведено два вида экспериментов. В одном случае основной и зондирующий пучки выводились в атмосферу через кольцевую апертуру большого

диаметра. Рассеянное излучение зондирующего пучка из области перетяжки принималось соосно на круглую апертуру меньшего диаметра. В другом случае, наоборот, основной и зондирующий пучки выводились в атмосферу через круглую апертуру небольших размеров, а прием рассеянного излучения осуществлялся кольцевой апертурой большого размера. Эксперименты проводились на Базовом экспериментальном комплексе Института оптики атмосферы СО РАН на окраине г. Томска (56°28'52" с.ш., 85°06'00" в.д.) с октября 2019 г. по июль 2020 г.

1. Эффективность коррекции в зависимости от дальности фокусировки зондирующего пучка и угла поля зрения приемника рассеянного излучения

На первом этапе были выполнены исследования эффективности адаптивной коррекции ВФ основного коллимированного пучка на длине волны $\lambda = 0,532$ мкм по обратнорассеянному из области перетяжки излучению сфокусированного зондирующего пучка на $\lambda = 1,067$ мкм в зависимости от угла поля зрения приемника и дальности фокусировки. Использовалась схема с передающей кольцевой апертурой внешним диаметром 0,5 м и круглой

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

приемной апертурой диаметром 0,15 м, показанная на рис. 2 [1]. Основной и зондирующий пучки распространялись соосно в горизонтальном направлении над ровной подстилающей поверхностью с перепадом высот вдоль трассы, не превышающим 10 м. Измерения проводились при фокусировке зондирующего пучка на дальностях 300, 500 и 700 м. Угол поля зрения приемника регулировался сменными диафрагмами диаметром 30, 50 и 100 мкм, установленными перед входным окном ФЭУ. Перед измерениями осуществлялась юстировка системы, в ходе которой гибкое зеркало (ГЗ) заменялось на плоское и с помощью датчика Шака–Гартмана регистрировался ВФ падающего на него основного пучка. Полученное распределение фазы принималось за неискаженное. Затем плоское зеркало заменялось на гибкое, на его элементы подавался набор управляющих напряжений $U = \{u_1, u_2, \dots, u_N\}$, где N – число элементов ГЗ, вызывающих изменения фазы ψ волнового поля падающего на зеркало пучка, соответствующие базовым aberrациям в разложении фазы по полиномам Цернике. Получаемые в результате этого распределения фазы основного пучка принимались за искаженные.

Адаптивная коррекция внесенных таким образом искажений ВФ основного пучка осуществлялась путем итерационного изменения напряжений на элементах ГЗ по сигналу обратного атмосферного рассеяния. В качестве управляющего сигнала для выработки напряжений на элементах ГЗ в наших экспериментах использовалась мощность P регистрируемого приемником излучения, рассеянного в обратном направлении из области перетяжки зондирующего пучка. Для подавления шумов мощность сигнала обратного рассеяния рассчитывалась как результат суммирования 100 эхосигналов. Так что с учетом частоты следования зондирующих импульсов 50 кГц время накопления сигнала составляло 2 мс. Мощность P является функцией управляющих напряжений $P(U)$ и должна максимизироваться в результате итерационного изменения напряжений на элементах ГЗ.

Максимизация мощности сигнала обратного рассеяния $P(U)$ на выходе блока обработки сигнала [1] осуществлялась стохастическим алгоритмом параллельного градиентного спуска (САПГС) [9, 10]. Блок управления ГЗ с использованием результатов работы САПГС формирует временной профиль управляющих напряжений с глубиной модуляции ± 300 В независимо в каждом из каналов и управляет ГЗ через интерфейс Ethernet.

В соответствии с САПГС управляющие напряжения на ГЗ u_i на k -й итерации ($k = 1, 2, 3, \dots$) рассчитываются по формуле [10]:

$$u_i^{(k)} = u_i^{(k-1)} + \gamma \delta u_i^{(k)} (P_+^{(k)} - P_-^{(k)}) / (P_+^{(k)} + P_-^{(k)}), \quad (1)$$

где γ – эмпирическая константа, определяющая итерационный шаг алгоритма; $P_+^{(k)} = P(u_i^{(k-1)} + \delta u_i^k)$,

$P_-^{(k)} = P(u_i^{(k-1)} - \delta u_i^k)$, $i = 1, \dots, N$; $u_i^{(k-1)}$ – напряжения, подававшиеся на элементы зеркала на предыдущей итерации; $\delta u_i^{(k)} = b_i^{(k)} \delta u_0$ – приращения напряжения на элементах зеркала на k -й итерации, $b_i^{(k)}$ – числа некоррелированного бинарного распределения Бернулли [9], δu_0 – начальный шаг приращения напряжения. В качестве параметра эффективности работы САПГС использовалось отношение регистрируемой мощности рассеянного излучения на каждой итерации САПГС к усредненной начальной мощности при выключенном ($\delta u_0 = 0$) управлении $P_0 = \langle P^{(k)} \rangle$, где $k = 1, 2, \dots, K$; угловые скобки означают усреднение по ансамблю. Начальный шаг приращения напряжения δu_0 , константа γ и число начальных итераций K для усреднения при оценке P_0 в экспериментах подбирались эмпирическим путем.

В экспериментах для задания искажений ВФ основного пучка на элементы ГЗ подавались различные наборы напряжений, соответствующие базовым aberrациям в разложении фазы по полиномам Цернике. Максимальное падение эхосигнала происходило при aberrациях типа «дефокусировка», когда на все элементы зеркала подавались напряжения -230 В. В датчике Шака–Гартмана реализована возможность визуализации работы поверхности зеркала и, следовательно, изменений кривизны ВФ падающего на зеркало пучка. Поэтому эффективность коррекции aberrаций оценивалась по изменению ВФ основного пучка, регистрируемого датчиком Шака–Гартмана, и по мощности регистрируемого приемником атмосферного сигнала обратного рассеяния из области перетяжки зондирующего пучка, изменения которых в процессе адаптации отображались на мониторе компьютера.

На рис. 1 и 2 в качестве примера представлены результаты экспериментов по подавлению aberrаций типа «дефокусировка», выполненных 20 октября 2019 г. на трассах различной длины при фиксированном угле поля зрения приемника 40 мкрад (размер диафрагмы 30 мкм). Начальный шаг САПГС $\delta u_0 = 40$ В, $\gamma = 40$, частота итераций – 15 Гц, P_0 оценивалась по 150 итерациям.

Из рис. 1 следует, что наиболее быстрое (за 120 итераций САПГС в течение 8 с) подавление aberrации типа «дефокусировка» до 1λ и, следовательно, увеличение мощности управляющего сигнала до максимальных значений происходят при фокусировке зондирующего пучка на расстояние 300 м. При дальности фокусировки 500 м для этого требуется примерно 300 итераций САПГС (20 с). Столько же итераций алгоритма и времени нужно для уменьшения aberrации «дефокусировка» с 15 до 1λ при дальности фокусировки зондирующего пучка 700 м. Как видно из рис. 1, a , при подаче напряжения 230 В на все элементы ГЗ возникает не только сферическая aberrация, но и незначительные, до 2λ , aberrации других типов. Появляющиеся из-за малости угла поля зрения приемника флуктуации мощности сигнала обратного

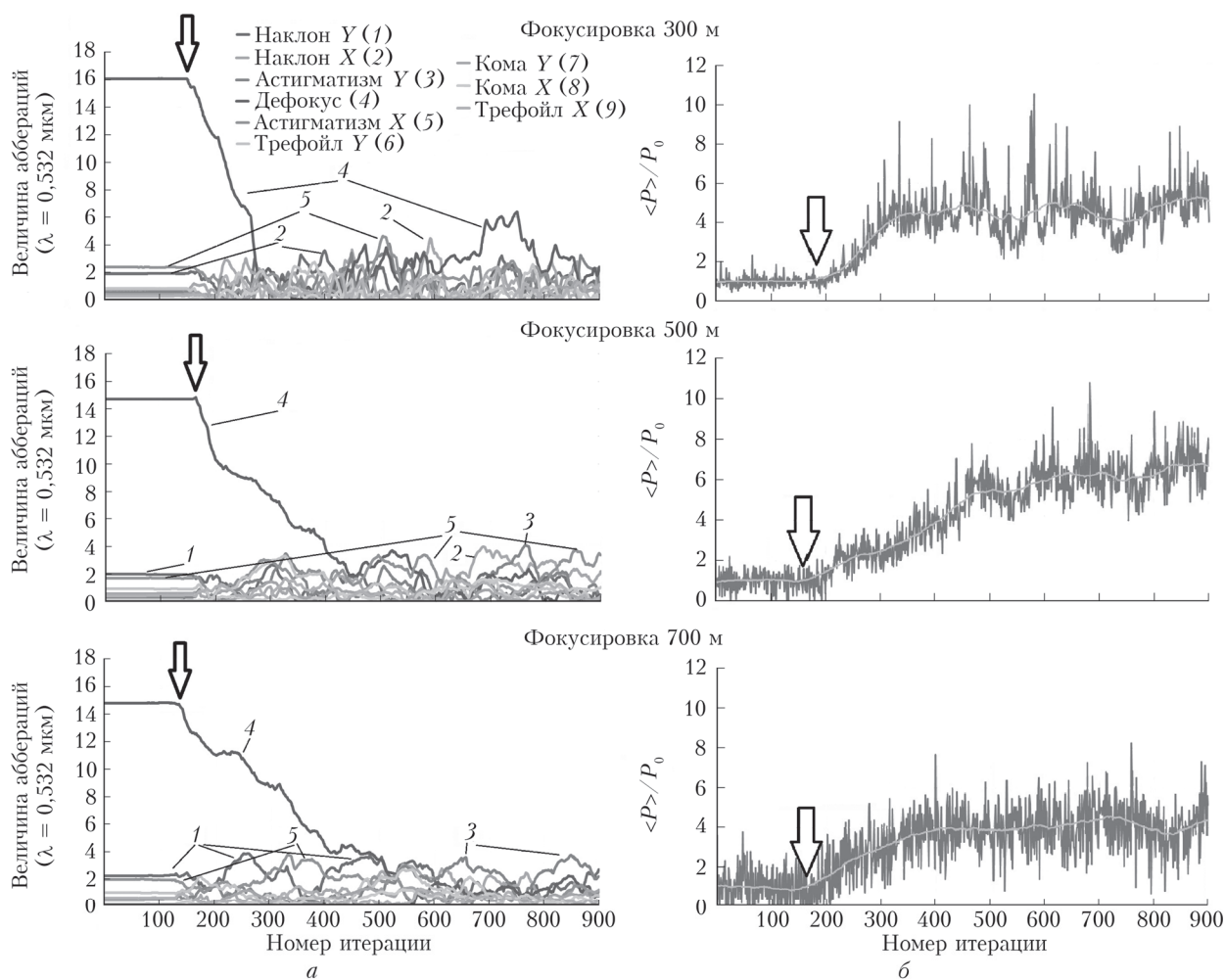


Рис. 1. Различные aberrации ВФ основного пучка в представлении полиномов Цернике при различных дальностях фокусировки зондирующего пучка (а); нормированная на начальный уровень мощности сигнала обратного рассеяния в ходе адаптации: темно-серая кривая – нормированная мощность на каждой итерации, светло-серая кривая – результат скользящего усреднения по 100 итерациям (б); стрелками отмечены моменты включения управления

рассеяния не только не позволяют подавить эти aberrации, но и могут приводить к их увеличению в процессе работы САПГС.

Аналогичные эксперименты в октябре-ноябре 2019 г. проводились при использовании во вход-

ном окне ФЭУ диафрагм диаметрами 50 и 100 мкм, что соответствует углам поля зрения приемника 67 и 133 мкрад. На рис. 3 показаны примеры изменения нормированной на начальный уровень мощности сигнала обратного рассеяния в процессе

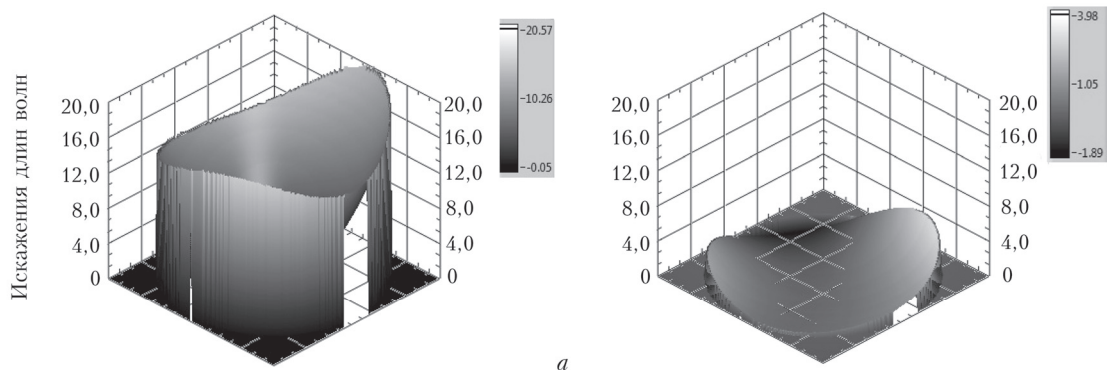
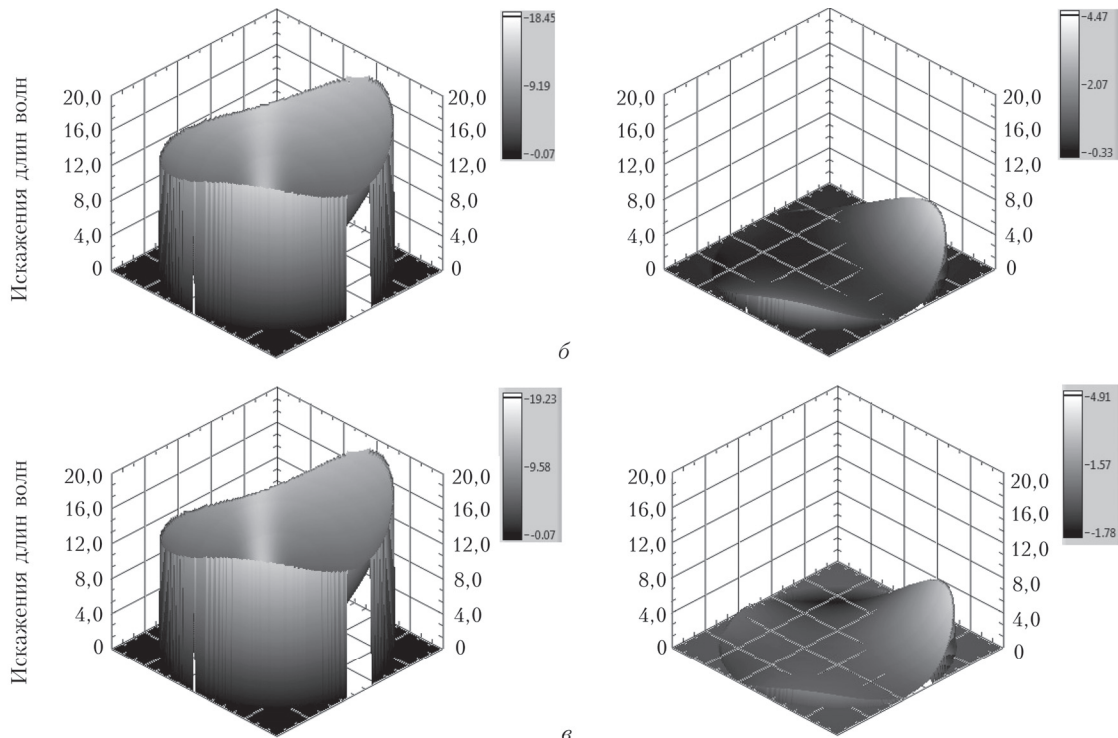


Рис. 2. ВФ основного пучка до (слева) и после (справа) компенсации aberrаций при дальности фокусировки зондирующего пучка 300 (а), 500 (б) и 700 м (в) (окончание см. на с. 609)



Окончание рис. 2 (начало см. на с. 608)

адаптации при различных углах поля зрения приемника и дальности фокусировки зондирующего пучка 300, 500 и 700 м. Каждая кривая построена в результате усреднения по пяти реализациям итерационного процесса, полученным при различных атмосферных условиях.

Из рис. 3 следует, что при всех задававшихся дальностях фокусировки зондирующего пучка наиболее быстрая максимизация мощности сигнала обратного рассеяния и, следовательно, подавление aberrации «дефокус» происходят при наименьшем из задававшихся в экспериментах угле поля зрения приемника – 40 мкрад. Это предельно минимальный угол поля зрения, при котором компенсация aberrаций ВФ пучка была еще возможна. При меньших углах поля зрения сигнал обратного рассеяния становился настолько слабым и так сильно флуктуировал, что использовать его для управления ГЗ было невозможно. Увеличение угла поля зрения приемника ведет к уменьшению флуктуаций мощности сигнала обратного рассеяния, но максимизация мощности происходит более медленно и на меньший уровень. Увеличение дальности фокусировки зондирующего пучка также ведет к замедлению выхода сигнала на максимальный уровень.

Максимальное увеличение сигнала обратного рассеяния в результате адаптивной коррекции происходит при фокусировке зондирующего пучка на расстоянии 500 м. Как видно из рис. 3, б, в этом случае мощность рассеянного излучения флуктуирует меньше, чем при фокусировке на другие расстояния, САПГС работает устойчиво, мощность регистрируемого сигнала в процессе коррекции значительно возрастает. При фокусировке на 300 м

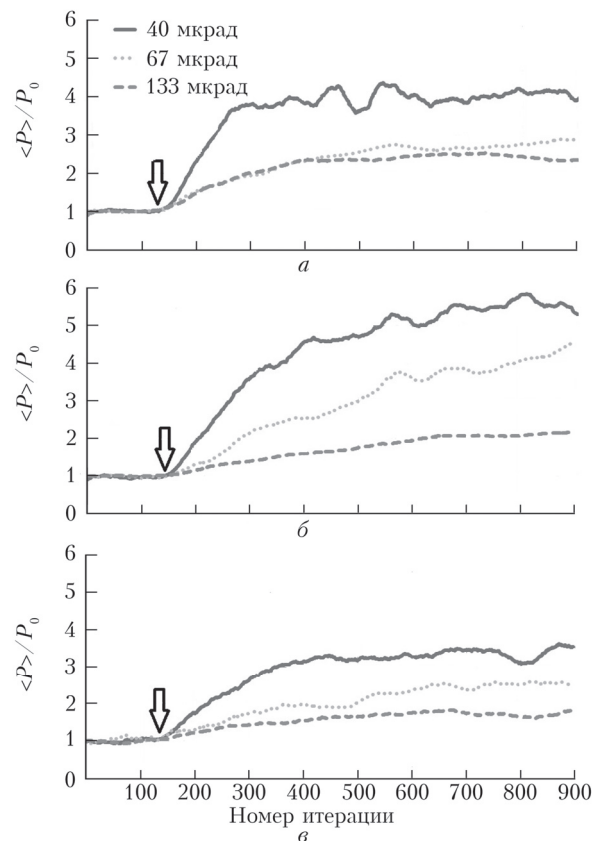


Рис. 3. Нормированная на начальное значение мощность сигнала обратного рассеяния при углах поля зрения приемника 40, 67 и 133 мкрад и дальности фокусировки зондирующего пучка 300 (а), 500 (б) и 700 м (в) в процессе адаптации; кривые получены в результате скользящего усреднения по 100 итерациям; стрелками отмечены моменты включения управления

линейные размеры области, ограничиваемой полем зрения приемника, меньше, чем на расстоянии 500 м. Вследствие этого сигнал обратного рассеяния на приемнике становится меньше, сильнее флуктуирует, а мощность сигнала возрастает до меньших значений, чем при фокусировке на 500 м. То же самое происходит при увеличении дальности фокусировки до 700 м. В этом случае продольные и поперечные размеры фокальной перетяжки увеличиваются по сравнению с фокусировкой на 500 м, что приводит к ослаблению рассеянного сигнала, возрастанию его флуктуаций и неустойчивости работы САПГС.

2. Коррекция искажений широких и узких лазерных пучков

На втором этапе были выполнены исследования эффективности адаптивной коррекции искажений, когда начальный ВФ пучка включал не только сферическую, но и другие типы aberrаций. Эксперименты проводились на трассе протяженностью 500 м. В конце трассы располагался экран для регистрации двумерных распределений интенсивности в поперечных сечениях основного и зондирующего лазерных пучков. Зондирующий пучок фокусировался на дистанции 300 м. Схема измерений показана на рис. 4.

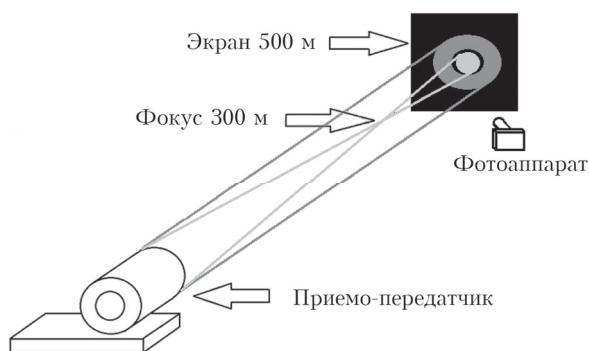


Рис. 4. Схема эксперимента

Эксперименты по исследованию эффективности адаптивной коррекции искажений широких лазерных пучков с использованием оптической схемы на рис. 2 в [1] проводились в феврале 2020 г. с той же последовательностью действий, что и в экспериментах по коррекции при разных углах поля зрения приемника и дальностях фокусировки. Сначала на место управляемого ГЗ устанавливалось плоское зеркало, производилась юстировка оптической схемы, проверялась соосность коллимированного основного и сфокусированного на расстоянии 300 м зондирующего лазерных пучков, датчиком Шака–Гартмана регистрировалось опорное изображение, а также двумерные распределения интенсивности пучков на экране, находящемся на расстоянии 500 м. После этого плоское зеркало заменялось на гибкое. Путем подачи случайных напряжений

на элементы ГЗ в ВФ падающих на зеркало пучков вносились деформации, имитирующие неконтролируемые термоабберации оптических элементов. Регистрировалась начальная мощность P_0 . Затем включался контур адаптивного управления ГЗ по обратнорассеянному излучению. Происходила компенсация aberrаций с параллельной регистрацией мощности сигнала обратного рассеяния на приемнике и величины aberrаций ВФ основного лазерного пучка. На каждом этапе регистрировались двумерные распределения интенсивности лазерных пучков на экране.

Как показано в разд. 1 (рис. 3), наилучшие результаты коррекции дефокусировки лазерного пучка по сигналу обратного рассеяния достигаются при углах поля зрения приемника 40 мкрад. Однако при фокусировке зондирующего пучка на 300 м сигнал обратного рассеяния регистрируемый приемником с таким полем зрения сильно флуктуирует в «чистой» атмосфере при низких концентрациях аэрозоля, и работа САПГС не всегда бывает устойчивой. Поэтому эксперименты с широкими пучками проводились при использовании в приемнике диафрагмы диаметром 50 мкм, обеспечивающей угол поля зрения 67 мкрад. Начальный шаг САПГС $\delta u_0 = 30$ В, $\gamma = 20$. Частота итераций — 15 Гц. P_0 оценивалось по 200 итерациям. На рис. 5 показан пример реализации итерационного процесса адаптивного подавления искусственно введенных aberrаций ВФ в широких пучках (данные от 6.02.2020 г.).

Из рис. 5, а видно, что искажения ВФ в такой реализации определяются aberrациями типа «наклон», «астигматизм» и «кома» в вертикальном направлении, по оси Y . Эти aberrации не приводят к сколько-нибудь существенному изменению размеров основного и зондирующего пучков, но вызывают заметные искажения формы пучков, это видно из рис. 5, в, г. Для количественной оценки искажений рассчитывались разности интенсивностей в поперечном сечении пучка $I_0(\mathbf{r}) - I_a(\mathbf{r})$, где $\mathbf{r}\{x, y\}$ — радиус-вектор в поперечной к направлению распространения пучка плоскости; I_0 — интенсивность в поперечном сечении неискаженного и I_a — искаженного пучков.

Для определения случайных вариаций интенсивности в поперечном сечении основного пучка, вызываемых турбулентными флуктуациями показателя преломления воздуха в атмосфере, во время экспериментов проводились измерения температуры и скорости ветра с частотой 80 Гц с помощью акустических метеостанций АМК-03 (Сибаналит-прибор, г. Томск). Регистрируемые с такой высокой частотой метеорологические данные позволяли рассчитывать спектры и оценивать структурную постоянную турбулентных флуктуаций показателя преломления C_n^2 . Так как эксперименты проводились зимой, в ночное время, значения C_n^2 не превышали $3,2 \cdot 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$. Число Френеля передающей апертуры основного пучка $\Omega = ka^2/L$, где $k = 2\pi/\lambda$; $L \cong 1500$ м — длина трассы, т.е. на трассе измерений выполнялся режим плоской волны.

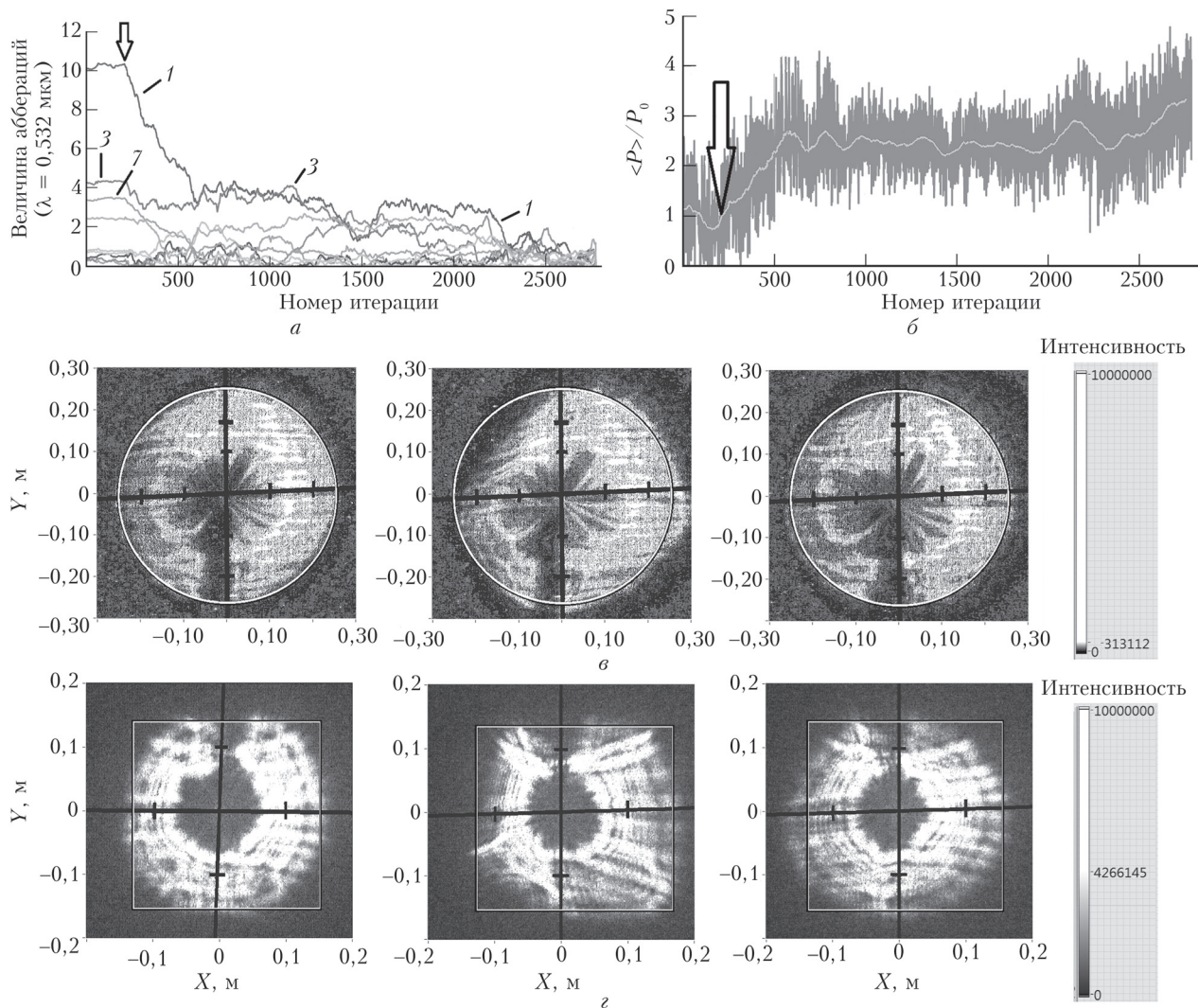


Рис. 5. Компенсация aberrаций ВФ в широких пучках: aberrации ВФ основного пучка (а), мощность сигнала обратного рассеяния (б), фотографии основного (в) и зондирующего (г) пучков на экране до (слева) и после (посередине) внесения искажений и после коррекции (справа); стрелками указаны моменты включения управления; обозначения кривых см. на рис. 1

Для плоской волны дисперсия турбулентных флуктуаций интенсивности оценивается по формуле $\beta_0^2 = 1,23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ в режиме слабых флуктуаций ($\beta_0^2 \ll 1$) [11]. Для наблюдавшихся в экспериментах значений C_n^2 параметр β_0^2 не превышал 0,0602, так что среднеквадратическое отклонение флуктуаций интенсивности основного пучка за счет турбулентности на трассе измерений составляло не более 0,25. Отсюда следует, что для минимизации влияния турбулентности на оценку величины искажений в распределении интенсивности в поперечном сечении пучка за счет начальных aberrаций ВФ (рис. 5, а) нужно учитывать только те разности $I_0(\mathbf{r}) - I_a(\mathbf{r})$, для которых справедливо соотношение

$$|I_0(\mathbf{r}) - I_a(\mathbf{r})| / (I_0(\mathbf{r}) + I_a(\mathbf{r})) > 0,25. \quad (2)$$

Для оценки эффективности компенсации искажений в распределении интенсивности основного

пучка также рассчитывались разности $I_0(\mathbf{r}) - I_c(\mathbf{r})$ между значениями интенсивности в неискаженном пучке и после компенсации искажений. Отношение суммарных разностей

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N |I_0(\mathbf{r}_i) - I_a(\mathbf{r}_i)|}{\sum_{i=1}^N |I_0(\mathbf{r}_i) - I_c(\mathbf{r}_i)|} \quad (3)$$

по всем точкам \mathbf{r}_i , для которых выполняется условие (2), мы использовали в качестве критерия улучшения формы распределения интенсивности в широких пучках.

В процессе адаптации произошло быстрое, в течение примерно 300 итераций за 20 с, подавление более чем в 2 раза aberrаций типа «наклон» и «кома». Мощность сигнала обратного рассеяния возросла более чем в 2,5 раза (рис. 5, б). Распределение

интенсивности в поперечном сечении основного пучка (рис. 5, *е*) стало более равномерным и больше соответствовало исходному. Суммарные отклонения интенсивности в искаженном пучке от значений интенсивности в исходном пучке до внесения aberrаций уменьшились в результате адаптивной коррекции, согласно критерию (3), в 1,37 раза ($R = 1,37$). Уменьшились искажения формы и зондирующего пучка (рис. 5, *з*).

Другой пример реализации итерационного процесса адаптивного подавления aberrаций ВФ в широких пучках показан на рис. 6 (данные от 6.02.2020 г.).

В этой реализации искажения ВФ вызваны aberrациями типа «дефокус», «наклон» и «астигматизм» в горизонтальном направлении, по оси X . В процессе адаптивной коррекции эти aberrации уменьшились более чем в 5 раз. Наиболее быстро, примерно за 500 итераций в течение 35 с, был подавлен астигматизм. Другие aberrации были минимизированы примерно за 1000 итераций в течение чуть более чем одной минуты. Мощность сигнала обратного рассеяния возросла примерно в 2 раза, а суммарные отклонения интенсивности в искаженном пучке от значений интенсивности в исходном пучке уменьшились в 1,5 раза ($R = 1,49$).

Всего в январе-феврале 2020 г. было проведено несколько десятков экспериментов по адаптивной компенсации искажений в широких пучках при случайном варьировании сочетаний различных типов начальных aberrаций ВФ пучка. Во всех случаях, когда атмосферные условия позволяли по-

лучать сигнал обратного рассеяния достаточной мощности, происходило подавление основных aberrаций ВФ и уменьшение искажений распределения интенсивности в поперечном сечении пучка. Параметр R в этих экспериментах изменялся от 1,16 до 1,53. Для подавления aberrаций в зависимости от их типа и атмосферных условий требовалось от 300 до 1500 итераций САПГС. При частоте итераций 15 Гц это занимало от 20 до 100 с. При использовании спецпроцессора для САПГС с частотой итераций 250 Гц [8] процесс адаптации в проведенных экспериментах занимал бы от 1 до 6 с. По техническим причинам спецпроцессор в обсуждаемых экспериментах не использовался.

Эксперименты с узкими коллимированными пучками по схеме на рис. 6 в [1] проводились при использовании в приемнике диафрагмы диаметром 150 мкм. Так как фокусное расстояние телескопа Т50, использовавшегося в этих экспериментах в качестве приемного, значительно превышает фокусное расстояние телескопа Т15, применявшегося в экспериментах с широкими пучками, угол поля зрения приемника с диафрагмой 150 мкм составлял всего 34 мкрад. С одной стороны, это обеспечивало высокую чувствительность приемника к вариациям мощности сигнала обратного рассеяния, вызываемым искажениями зондирующего пучка, но с другой — приводило к сильным флуктуациям эхосигнала при фоновых концентрациях аэрозоля в атмосфере. Коллимированный основной и сфокусированный на расстояние 300 м зондирующий пучки диаметром 100 мм после ГЗ выводились

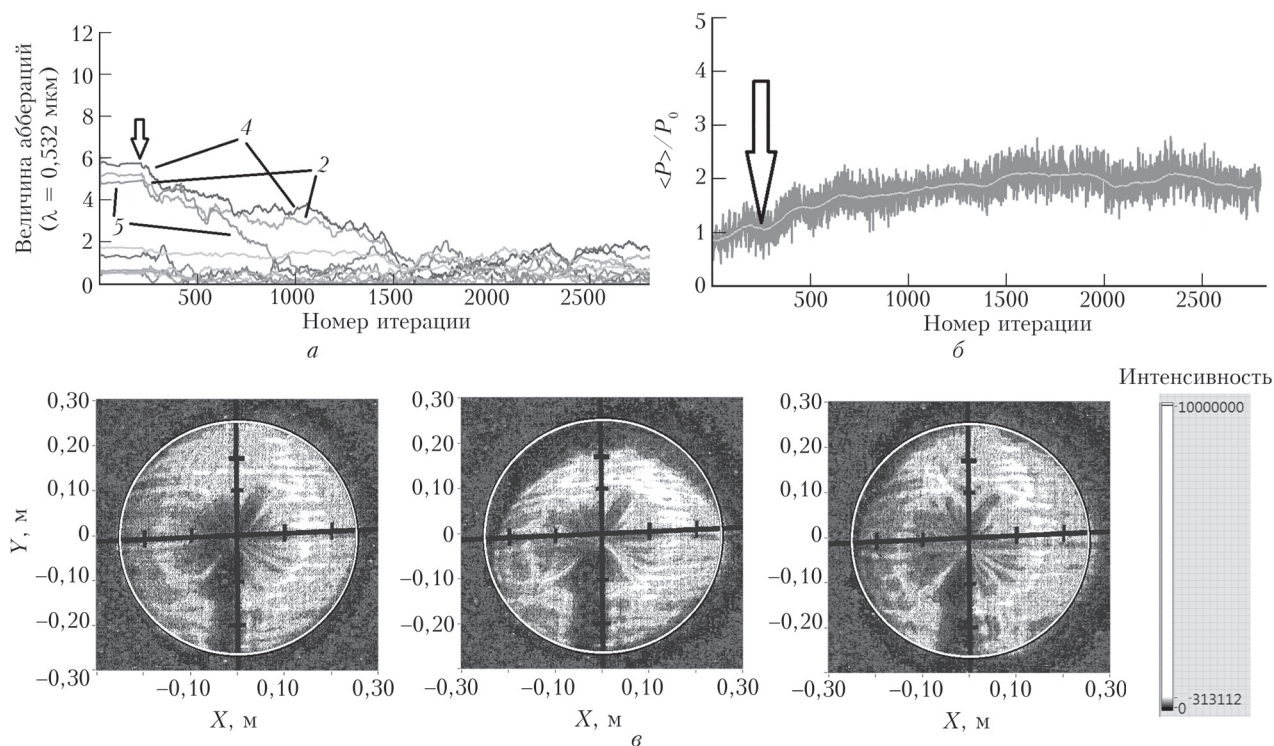


Рис. 6. Компенсация aberrаций ВФ в широких пучках: aberrации ВФ основного пучка (*а*); мощность сигнала обратного рассеяния (*б*); фотографии на экране основного пучка до (слева) и после (посередине) внесения искажений и после коррекции (справа) (*в*); стрелками отмечены моменты включения управления; обозначения кривых см. на рис. 1

в атмосферу с помощью двух отражающих зеркал (см. рис. 6 в [1]). Вследствие падения пучков на ГЗ под небольшим углом они приобретали искажения ВФ типа «астигматизм». Начальный шаг САПГС $\delta u_0 = 30$ В, $\gamma = 10$. Частота итераций – 15 Гц. P_0 оценивалось по 200 итерациям.

На рис. 7 (данные от 27.12.2019 г.) показан пример реализации итерационного процесса адаптивного подавления искусственно введенных aberrаций ВФ в узких пучках.

Из рис. 7, *а* видно, что искажения ВФ в такой реализации в основном определяются aberrациями типа «дефокус», «наклон» и «астигматизм» в горизонтальном (по оси *X*) и «астигматизм» в вертикальном (по оси *Y*) направлениях. Присутствуют также aberrации меньшей амплитуды: «трефойл» по обеим осям и «кома» по оси *X*. Они приводят к существенному увеличению размеров и искажению формы основного и зондирующего пучков, как

это видно из рис. 7, *в*, *г*. Эллиптическое вследствие астигматизма исходное распределение интенсивности основного пучка с размерами по осям 10 и 20 см значительно уширяется и приобретает причудливую форму. Аналогичные искажения приобретает и распределение интенсивности зондирующего пучка на экране.

В процессе адаптации примерно за 3500 итераций САПГС в 3 раза уменьшился астигматизм по обеим осям *X* и *Y* и на одну треть уменьшились aberrации типа «дефокус» и «наклон» по оси *X*. Мощность сигнала обратного рассеяния возросла примерно в 15 раз (рис. 7, *б*). Искажения распределений интенсивности в поперечных сечениях основного (рис. 7, *в*) и зондирующего (рис. 7, *г*) пучков в конце трассы существенно уменьшились. При дальнейшей работе САПГС происходит медленное подавление всех типов aberrаций и увеличение мощности сигнала обратного рассеяния. Однако

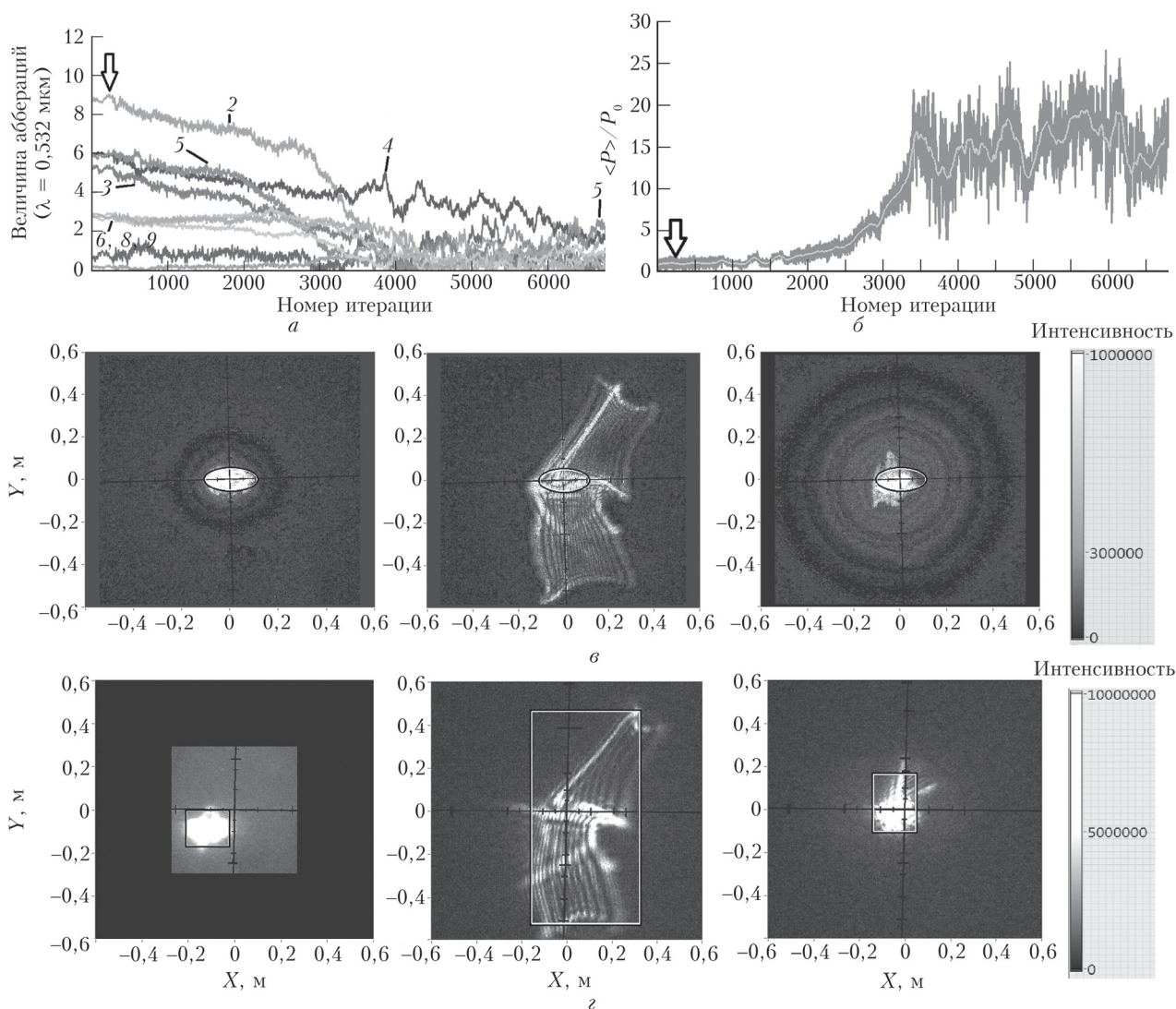


Рис. 7. Компенсация aberrаций ВФ в узких пучках: aberrации ВФ основного пучка (*а*); мощность сигнала обратного рассеяния (*б*); фотографии основного (*в*) и зондирующего (*г*) пучков на экране до (слева) и после (посередине) внесения искажений и после коррекции (справа); стрелками отмечены моменты включения управления; обозначения кривых см. на рис. 1

вследствие малости угла поля зрения приемника мощность регистрируемого рассеянного излучения сильно флуктуирует.

Аберрации ВФ приводят к существенному уширению узких пучков и, следовательно, к значительному уменьшению мощности в пределах эллиптической площадки S с размерами по осям 10 и 20 см, определяемыми распределением интенсивности в поперечном сечении основного пучка до внесения искажений (см. рис. 7, *в* слева). Поэтому в качестве метрики искажений распределения интенсивности в основном пучке естественно использовать мощность, приходящуюся на эту площадку. Отношение

$$T = \frac{P_{cS}}{P_{aS}}, \quad (4)$$

где P_{cS} — мощность, приходящаяся на площадку S в основном пучке после компенсации; P_{aS} — мощность, приходящаяся на ту же площадку в искаженном основном пучке, мы использовали в качестве критерия эффективности адаптивной компенсации искажений в узких пучках. Турбулентное уширение основного пучка мы не принимали во внимание, так как оно пренебрежимо мало на трассе измерений во всем диапазоне значений $4,3 \cdot 10^{-17} \text{ м}^{-2/3} < C_n^2 < 3,2 \cdot 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$, наблюдавшихся в экспериментах. В эксперименте, данные которого представлены на рис. 7, после 3500 ите-

раций мощность в пределах площадки S возросла в несколько раз ($T = 4,76$).

Еще один пример реализации итерационного процесса адаптивного подавления аберраций ВФ в узких пучках показан на рис. 8 (данные от 10.01.2020 г.).

В этой реализации искажения ВФ в основном вызваны аберрациями типа «дефокус», «наклон» и «астигматизм» по осям X и Y . В процессе адаптивной коррекции эти аберрации уменьшились примерно в 2 раза после 1500 итераций САПГС. Мощность сигнала обратного рассеяния после 1500 итераций возросла более чем в 4 раза. Максимальное подавление аберраций ВФ и соответствующее увеличение мощности рассеянного излучения из области перетяжки зондирующего пучка произошли примерно между 3200 и 3700 итерациями. Уменьшились искажения основного пучка, после 3700 итераций $T = 3,1$.

На рис. 9 (данные от 12.01.2020 г.) приведены результаты эксперимента, когда эффективность компенсации искажений в узких пучках была очень высокой. Как видно из рис. 9, *а*, в этом эксперименте искажения ВФ были вызваны аберрациями типа «дефокус» и «астигматизм» по осям X и Y и «треfoil» по оси Y . Пучок был очень сильно искажен (рис. 9, *в*). В процессе адаптивной коррекции эти аберрации, за исключением дефокусировки, уменьшились до 2λ примерно за 1800 итераций САПГС. Мощность сигнала обратного рассеяния

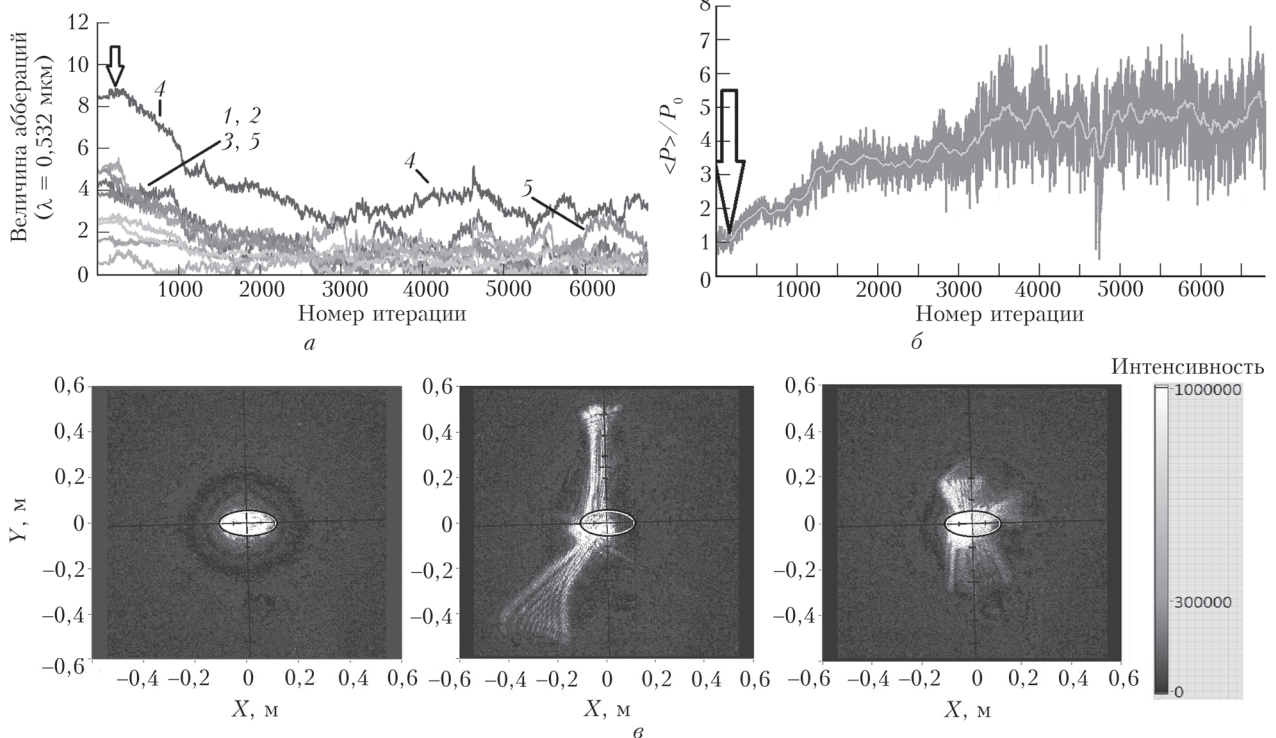


Рис. 8. Компенсация аберраций ВФ в узких пучках: аберрации ВФ основного пучка (*а*); мощность сигнала обратного рассеяния (*б*); фотографии на экране (*в*) основного пучка до (слева) и после (посередине) внесения искажений и после коррекции (справа); стрелками отмечены моменты включения управления; обозначения кривых см. на рис. 1

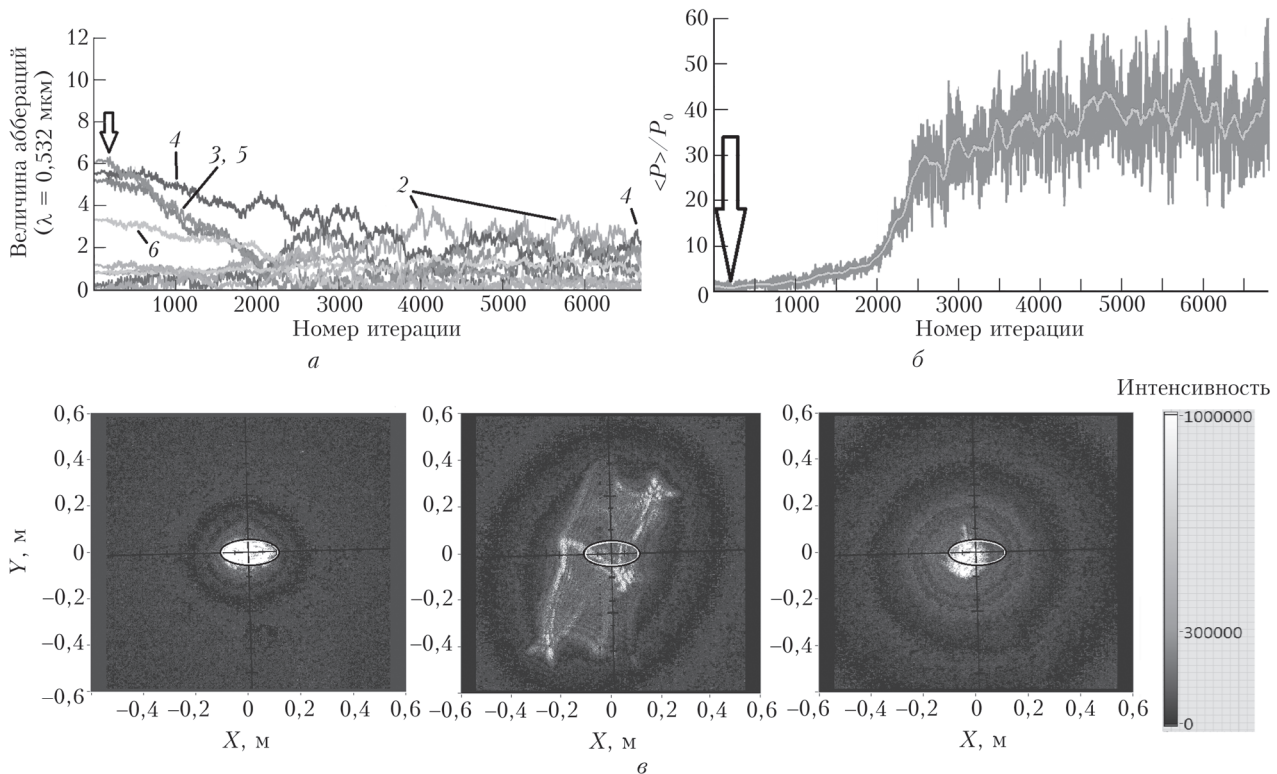


Рис. 9. Компенсация aberrаций ВФ в узких пучках: aberrации ВФ основного пучка (а); мощность сигнала обратного рассеяния (б); фотографии на экране (в) основного пучка до (слева) и после (посередине) внесения искажений и после коррекции (справа); стрелками отмечены моменты включения управления; обозначения кривых см. на рис. 1

после 1800 итераций возросла более чем в 6 раз. Максимальное подавление aberrаций ВФ и соответствующее увеличение мощности рассеянного из области перетяжки излучения зондирующего пучка произошли примерно между 3700 и 3800 итерациями, когда дефокусировка уменьшилась до 2λ , а астигматизм и трейфол — до 1λ . В результате мощность сигнала обратного атмосферного рассеяния увеличилась по сравнению с P_0 примерно в 35 раз, а $T = 11,2$.

Всего в декабре 2019 г. — январе 2020 г. было проведено более 40 экспериментов по адаптивной компенсации искажений в узких пучках при случайном варьировании сочетаний различных типов начальных aberrаций ВФ пучка. Из-за малого угла поля зрения приемника сигнал обратного рассеяния в этих экспериментах был зашумлен и мощность регистрируемого рассеянного излучения зондирующего пучка сильно флуктуировала. По этой причине для компенсации aberrаций ВФ требовалось значительно большее число итераций САПГС, чем в экспериментах с широкими пучками, выполнявшимися при угле поля зрения приемника 67 мкрад. Тем не менее во всех экспериментах происходило значительное уменьшение искажений распределения интенсивности в поперечном сечении основного пучка, и мощность пучка в пределах площадки, определяемой поперечным сечением неискаженного пучка, значительно возрастала. Параметр T в экспериментах изменялся от 2,7 до 13,8.

Заклучение

Представлены результаты атмосферных экспериментов по адаптивной компенсации aberrаций ВФ (основного) лазерного пучка методом апертурного зондирования по сигналу обратного атмосферного рассеяния (зондирующего) излучения дополнительного лазерного источника на другой длине волны. Максимизация мощности сигнала обратного рассеяния осуществлялась стохастическим алгоритмом параллельного градиентного спуска.

Эксперименты проводились с широкими и узкими пучками. В первом случае основной и зондирующий пучки выводились в атмосферу через кольцевую апертуру большого диаметра, а рассеянное излучение принималось соосно на круглую апертуру меньшего диаметра. Во втором, наоборот, пучки выводились в атмосферу через круглую апертуру небольших размеров, а прием рассеянного излучения осуществлялся кольцевой апертурой большого размера. Основной пучок был коллимированным, зондирующий — фокусировался. Для задания искажений ВФ основного и зондирующего пучков на элементы ГЗ подавались либо наборы напряжений, соответствующие базовым aberrациям в разложении фазы по полиномам Цернике, либо случайные наборы напряжений.

В результате установлено, что метод апертурного зондирования, замыкаемый по сигналу обратного атмосферного рассеяния зондирующего излучения, позволяет при оптимальных углах поля

зрения приемника подавлять сферические aberrации в 10–15 раз при всех задававшихся в экспериментах дальностях фокусировки зондирующего излучения, определяющих удаленность объема рассеяния от приемопередатчика. При углах поля зрения меньше оптимального коррекция неустойчива. При углах поля зрения, превышающих оптимальный, коррекция по сигналу обратного рассеяния возможна лишь в случаях фокусировки зондирующего излучения на небольшие расстояния. С увеличением дальности фокусировки зондирующего излучения эффективность адаптивной коррекции при больших углах поля зрения снижается из-за уменьшения амплитуды вызываемых aberrациями вариаций регистрируемой средней мощности принимаемого эхосигнала вследствие увеличения продольных размеров и уширения фокальной перетяжки зондирующего пучка.

Во всех случаях, когда атмосферные условия позволяли получать сигнал обратного рассеяния достаточной мощности, происходило подавление основных aberrаций ВФ и уменьшение искажений распределения интенсивности в поперечном сечении основного пучка. В экспериментах с широкими пучками для этого требовалось от 300 до 1500 итераций САПГС в зависимости от типа aberrаций и атмосферных условий. В результате aberrации ВФ в основном пучке уменьшались с 6–10 λ до 1–2 λ , а мощность сигнала обратного рассеяния возрастала в 2–3 раза. Параметр $R(3)$, характеризующий эффективность коррекции искажения формы распределения интенсивности в широких пучках, изменялся в этих экспериментах от 1,16 до 1,53.

Узкие пучки при внесении деформаций в начальный ВФ искажались и уширялись значительно сильнее, чем широкие. Из-за малого угла поля зрения приемника сигнал обратного рассеяния в экспериментах с узкими пучками сильно флуктуировал, и для подавления aberrаций ВФ требовалось значительно большее число (3500–3800) итераций САПГС, чем в экспериментах с широкими пучками. В результате величина aberrаций с 8–9 λ уменьшалась до 1–2 λ , а мощность сигнала обратного рассеяния увеличивалась в десятки раз. Значительно уменьшались расходимость основного пучка и искажения распределения интенсивности в его поперечном сечении. Возрастала мощность пучка

в пределах площадки, определяемой поперечным сечением неискаженного пучка. Параметр $T(4)$, характеризующий увеличение мощности в узких пучках в результате коррекции, изменялся в этих экспериментах от 2,7 до 13,8.

Посвящается светлой памяти Владимира Варнавьевича Морозова и Виктора Васильевича Жмылевского, идеи которых развивает эта работа.

1. *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. 1. Экспериментальная установка // Оптика атмосф. и океана, 2021. Т. 34, № 8. С. 599–605.
2. *Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И.* Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 336 с.
3. *Лукиянов Д.П., Корниенко А.А., Рудницкий Б.Е.* Оптические адаптивные системы. М.: Радио и связь, 1989. 240 с.
4. *Тараненко В.Г., Шанин О.И.* Адаптивная оптика. М.: Радио и связь, 1990. 112 с.
5. *Tyson R.K.* Principles of adaptive optics. Boston: Academic Press, 1998. 345 p.
6. *Канев Ф.Ю., Лукин В.П., Макенова Н.А.* Методы и технические средства адаптивной оптики. Томск: РИО ТГУ, 2004. 106 с.
7. *Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатьев А.Б., Морозов В.В., Смалыхо И.Н.* Коллимация начального волнового фронта частично когерентного светового пучка по сигналу обратного рассеяния // Опт. и спектроскоп. 2010. Т. 108, № 1. С. 113–122.
8. *Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатьев А.Б., Морозов В.В., Разенков И.А., Ростов А.П., Цвык Р.Ш.* Управление начальным волновым фронтом оптического пучка по сигналу обратного атмосферного рассеяния // Квант. электрон. 2015. Т. 45, № 2. С. 153–160.
9. *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.
10. *Банах В.А., Ларичев А.В., Разенков И.А., Шестернин А.Н.* Апробация стохастического алгоритма параллельного градиентного спуска в лабораторных экспериментах // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1099–1106.
11. *Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С.* Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 280 с.

V.A. Banakh, E.V. Gordeev, V.V. Kuskov, A.P. Rostov, A.N. Shestermin. Controlling the initial wavefront of a spatially partially coherent beam by the aperture sensing technique based on backscatter signals in the atmosphere. II. Experiment.

The results are presented of experimental studies of a possibility of compensating aberrations of the initial wavefront of an optical beam by the aperture based on the atmospheric backscatter signal of radiation from an additional laser source at a different wavelength. It is shown that the makes it possible to reduce the beam wavefront aberrations by several times, down to 1–2 wavelengths at optimal angles of view of the scattered radiation receiver. As a result, the distortions of the intensity distribution in a beam cross section and beam divergence decrease and the power in the beam paraxial region increases.