

Управление начальным волновым фронтом оптического пучка по сигналу обратного атмосферного рассеяния

В.А.Банах, В.В.Жмылевский, А.Б.Игнатьев, В.В.Морозов, И.А.Разенков, А.П.Ростов, Р.Ш.Цвык

Представлены результаты экспериментальных исследований возможности компенсации aberrаций начального волнового фронта оптического пучка методом апертурного зондирования по сигналу обратного атмосферного рассеяния излучения дополнительного лазерного источника на другой длине волны. Показано, что реализующая этот принцип адаптивная система позволяет в атмосферных условиях на приземной трассе осуществлять компенсацию искажений начального волнового фронта пучка. Расходимость пучка уменьшается, а регистрируемая приемником средняя мощность обратнорассеянного излучения дополнительного лазерного источника возрастает.

Ключевые слова: волновой фронт, компенсация, обратное атмосферное рассеяние.

1. Введение

При формировании лазерных пучков большой мощности в оптическом тракте могут возникать термические деформации оптических элементов, так что волновой фронт (ВФ) пучка на выходной апертуре передающего телескопа приобретает неконтролируемые случайные отклонения от заданного распределения. Пучок становится частично пространственно когерентным, и его расходимость может значительно превысить дифракционную. Соответственно уменьшается плотность мощности излучения в приосевой области поперечного сечения пучка. В атмосфере искажающее влияние турбулентных флуктуаций показателя преломления уменьшается с возрастанием длины волны излучения, и для ИК диапазона длин волн увеличение поперечных размеров лазерных пучков за счет неполной пространственной когерентности начального поля может быть соизмеримо с турбулентным уширением пучка или превышать его. Еще более заметным влияние термоаббераций на качество пучка становится на наклонных и высотных трассах, т.к. с высотой интенсивность оптической турбулентности снижается. На таких трассах искажения ВФ пучка за счет термоаббераций начинают играть преобладающую роль в уменьшении мощности излучения на приемнике по сравнению с другими факторами. Возникает задача подавления этих начальных «собственных» aberrаций, т.е. задача исправления исходного ВФ частично когерентного пучка на выходной апертуре.

Использование датчика ВФ для выработки сигнала управления адаптивным зеркалом с целью компенсации искажений начального ВФ требует существенного услож-

нения системы формирования пучка, включения в оптическую схему дифракционных ответвителей излучения, решения задачи восстановления фазы по амплитудным данным и т.д., что не всегда можно реализовать. Как альтернативный вариант в [1] предложено в качестве «датчика» ВФ использовать атмосферу. Действительно, при распространении лазерного пучка в атмосфере происходит аэрозольное и молекулярное рассеяние излучения. Индикатриса рассеяния зависит от длины волны, но всегда какая-то часть излучения рассеивается в обратном направлении. Мощность рассеянного излучения зависит от мощности распространяющегося пучка. Расходимость пучка за счет термоаббераций приводит к уменьшению плотности мощности. Так что если использовать для регистрации рассеянного назад излучения приемник с узким полем зрения, то регистрируемая им мощность будет чувствительна к изменениям расходимости пучка и может служить сигналом управления адаптивным зеркалом.

Дальнейшее развитие этой идеи связано с использованием для управления зеркалом рассеянного излучения не самого пучка, а вспомогательного, или «зондирующего» пучка. Дело в том, что мощность рассеянного в обратном направлении излучения пучка мала, и зарегистрировать сигнал обратного рассеяния не всегда удается. Однако если в оптический тракт ввести зондирующий пучок, который приобретет те же искажения ВФ, что и основной пучок, и сфокусировать его на близкое расстояние в атмосфере, то мощность рассеянного назад из области перетяжки излучения будет достаточна для регистрации существующими приемниками.

В работах [2–4] задача о компенсации искажений начального ВФ частично когерентного светового пучка с использованием для управления адаптивным зеркалом сигнала обратного атмосферного рассеяния рассмотрена теоретически. На основе компьютерного моделирования в этих работах проведены детальные исследования возможности коррекции начального ВФ пучка и определены требования к параметрам приемопередатчика, обеспечивающие компенсацию искажений ВФ данным методом. В [5] представлены результаты атмосферных экспериментов по компенсации начальных искажений фазы пучка

В.А.Банах, И.А.Разенков, А.П.Ростов, Р.Ш.Цвык. Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева, Россия, 634055 Томск, пл. Акад. Зуева, 1; e-mail: banakh@iao.ru

В.В.Жмылевский, А.Б.Игнатьев, В.В.Морозов. ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей», Россия, 125190 Москва, Ленинградский просп., 80, корп. 16

Поступила в редакцию 8 июля 2014 г., после доработки – 30 сентября 2014 г.

методом апертурного зондирования с использованием для управления зеркалом стохастического алгоритма параллельного градиентного спуска (САПГС) [6, 7] по максимуму мощности принимаемого излучения, рассеянного на экране.

В настоящей работе представлены результаты натуральных экспериментов по компенсации aberrаций начального ВФ частично когерентного лазерного (основного) пучка методом апертурного зондирования [8, 9] по сигналу обратного атмосферного рассеяния другого – зондирующего – пучка с отличающейся длиной волны излучения, но прошедшего тот же оптический тракт и приобретшего такие же, как и основной пучок, искажения ВФ.

2. Оптическая схема экспериментальной установки

Исследования проводились с использованием специально созданной экспериментальной установки, реализующей метод апертурного зондирования. Основной и зондирующий лазерные пучки фокусируются на некотором удалении в атмосфере, рассеянное назад излучение зондирующего пучка регистрируется в плоскости резкого изображения фокальной плоскости. Средняя мощность принимаемого сигнала обратного рассеяния зондирующего излучения используется для управления начальными ВФ зондирующего и основного пучков с помощью деформируемого (гибкого) зеркала. Поле зрения приемника задавалось достаточно малым, чтобы обеспечить чувствительность приемника к изменениям средней принимаемой мощности обратно рассеянного излучения вследствие дефокусировки зондирующего пучка за счет aberrаций начального ВФ [1–4].

Принцип построения экспериментальной установки иллюстрирует рис.1. Схема воспроизводит идеальный вариант, когда плоскость резкого изображения в приемном телескопе настроена точно на плоскость фокусировки пучка, а оси передатчика и приемника совмещены. Излучение зондирующего и основного каналов выводится в атмосферу через круглую апертуру, а прием осуществляется через кольцевую апертуру больших размеров. По мере компенсации aberrаций ВФ с помощью гибкого зеркала (ГЗ) поперечные размеры зондирующего пучка в плоскости фокусировки изменяются. Поперечное сечение пучка в перетяжке на рис.1 показано в виде круга. Серым кружком внутри этого круга выделена область, попадающая в поле зрения приемника. Перетяжка пучка может

располагаться как ближе, так и дальше, чем фокальная плоскость, расстояние до которой определяет плоскость резкого изображения приемной системы, а также может находиться в стороне от оптической оси приемника. Для получения управляющего сигнала обратного рассеяния важно, чтобы хоть часть поперечного сечения пучка в фокальной плоскости находилась в поле зрения приемника.

На рис.2 показана оптическая схема установки, состоящей из трех основных частей – передающей, принимающей и управляющей. Передатчик включает в себя импульсный лазер для генерации зондирующего излучения, непрерывный лазер, создающий основной пучок, линзовый расширитель пучка (коллиматор), адаптивное зеркало для контроля ВФ пучка основного лазера и систему наведения. Система наведения предназначена для совмещения оптических осей передатчика и приемника и для выведения лазерных пучков в атмосферу.

В качестве зондирующего лазера применялся волоконный импульсный лазер с длиной волны $\lambda = 1.067$ мкм (лазер 1), а в качестве основного – непрерывный лазер на гранате с $\lambda = 0.532$ мкм (лазер 2). Излучение обоих лазеров сводилось вместе с помощью светоделительной дихроичной пластины ДП. Плоские зеркала ЗП1–ЗП4 используются как поворотные, чтобы компактно расположить оптические элементы на оптической скамье и иметь возможность проводить необходимые юстировки. Коллинеарные лазерные пучки направляются на 6-кратный линзовый коллиматор (линзы Л1 и Л2), расширяющий пучки.

После коллиматора пучки поступают на гибкое адаптивное зеркало ГЗ. Коллиматор, плоское зеркало ЗП2 и адаптивное зеркало ГЗ расположены таким образом, чтобы максимально приблизить угол падения приходящих на адаптивное зеркало пучков к нормали и тем самым повысить эффективность компенсации зеркалом искажений ВФ. Зеркала ЗП3 и ЗП4 образуют перископ, который помещает пучки на ось приемного телескопа и направляет их в атмосферу.

За перископом находится интерферометр сдвига ИС. Он представляет собой стеклянную пластину толщиной 20 мм с плоскими гранями, сходящимися в горизонтальном направлении под углом $10''$. Интерферометр создает на экране интерференционную картину ИК в виде чередующихся темных и светлых полос. Ширина полос определяется углом сходимости граней пластины, а наклон полос зависит от кривизны ВФ пучка. При изменении фокусного расстояния пучка в атмосфере наклон полос на интерферограмме меняется. В случае коллимированного

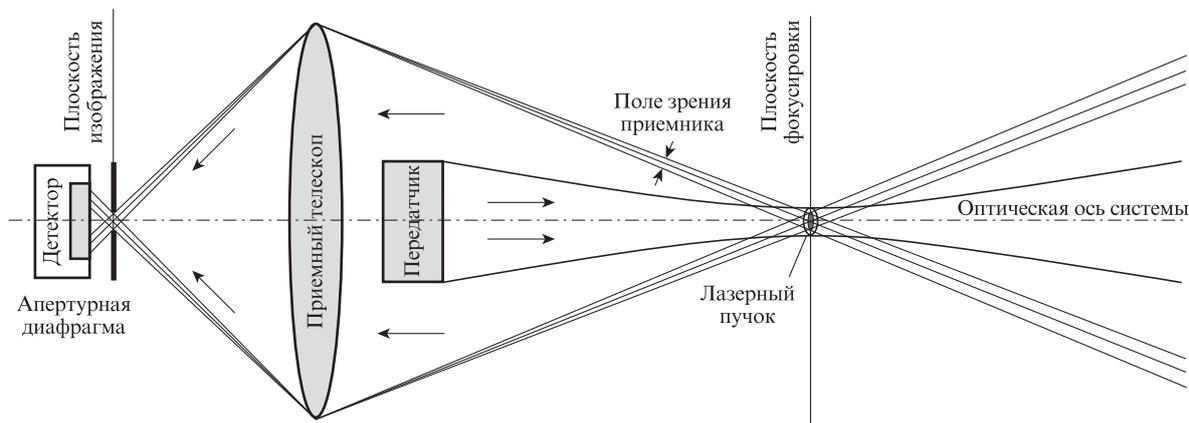


Рис.1. Принцип работы установки по методу апертурного зондирования.

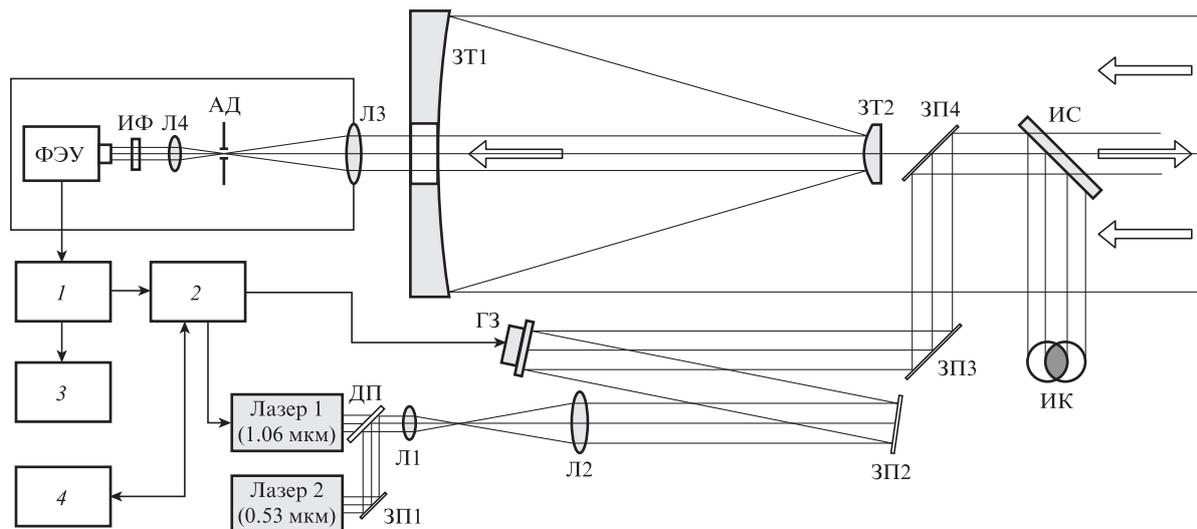


Рис.2. Оптическая схема и схема соединений установки:
 ГЗ – гибкое зеркало; Л1 – Л4 – линзы; Л1 и Л2 – коллиматор; ЗП1 – ЗП4 – плоские зеркала; ДП – дихроичная пластина; ЗТ1 и ЗТ2 – главное и вторичное зеркала приемного афокального телескопа Мерсена; ИС – интерферометр сдвига; ИК – интерференционная картина (интерферограмма) пучка лазера 2; АД – апертурная диафрагма; ИФ – интерференционный светофильтр; 1 – усилитель; 2 – контроллер; 3 – осциллограф; 4 – компьютер.

пучка с плоским ВФ полосы должны быть параллельны направлению распространения пучка.

При наличии aberrаций ВФ пучка полосы на интерферограмме деформируются. Степень искажения интерференционной картины напрямую зависит от того, насколько сильно искажен ВФ. В идеальном случае по окончании работы адаптивной системы интерферограмма должна представлять собой ровные параллельные полосы одинаковой ширины.

Приемная система содержит телескоп, формирователь поля зрения приемника, фильтр фоновой засветки неба и фотоприемник. Рассеянное в атмосфере излучение поступает на приемный афокальный 10-кратный телескоп Мерсена диаметром 40 см, образованный парой параболических зеркал – ЗТ1 и ЗТ2. Телескоп представляет собой зеркальный коллиматор, настроенный на определенную дальность. Из телескопа выходит коллимированный пучок диаметром 40 мм, который направляется в приемный ящик. После телескопа располагается формирователь поля зрения приемника, который состоит из фокусирующей линзы Л3 с фокусным расстоянием 28 см, диафрагмы АД диаметром 150 мкм и коллимирующей линзы Л4. С учетом увеличения телескопа ($10\times$) полный угол поля зрения был равен 54 мкрад.

Расчеты с помощью программы оптического дизайна Zemax показывают, что приемная часть установки обеспечивает дифракционное качество. Передающая же оптика за счет собственных aberrаций увеличивает расходимость пучка на 20 мкрад. Угловая дифракционная расходимость пучка диаметром $d = 56$ мм на длине волны $\lambda = 1.06$ мкм составляет примерно $2.44\lambda/d = 47$ мкрад. Таким образом, выбор угла поля зрения приемника адаптивной системы (54 мкрад) позволяет добиться уменьшения угловой расходимости пучка зондирующего излучения примерно до дифракционной.

За линзой Л4 находятся интерференционный фильтр ИФ и фотоэлектронный умножитель ФЭУ. В «чистой» атмосфере при слабых эхо-сигналах ФЭУ работает в режиме счета фотонов, электрические одноэлектронные им-

пульсы с ФЭУ поступают на усилитель 1. При больших значениях коэффициента обратного рассеяния (в условиях плотной атмосферной дымки, снегопада) частота появления одноэлектронных импульсов увеличивается, их амплитуда возрастает и в ФЭУ реализуется токовый режим регистрации.

Сигнал с ФЭУ поступает на усилитель, а затем на связанный с компьютером контроллер 2 адаптивного зеркала и на осциллограф 3. Контроллер подает импульс синхронизации на блок управления зондирующего лазера (на схеме не показан) и управляющие напряжения на элементы адаптивного зеркала, а также проводит интегрирование каждого эхо-сигнала по дальности и суммирование эхо-сигналов. Для управления контроллером и осциллографом, задания параметров САПГС [6, 7], реализованного в контроллере, инициации и графической визуализации процесса адаптации используется компьютер 4.

Ниже представлены основные параметры экспериментальной установки для управления начальным ВФ пучка по обратному атмосферному рассеянию.

Передачик (зондирующего излучения)

Средняя мощность (Вт)	50
Длина волны (мкм)	1.067
Частота следования импульсов (кГц)	50
Энергия импульса (мДж)	1
Длительность импульса (нс)	200
Диаметр пучка (мм)	56
Расходимость пучка (мкрад)67

Адаптивное зеркало

Тип зеркала	биморфное
Диаметр зеркала (мм)	56
Количество электродов	57
Диапазон напряжений (В)	0–600
Амплитуда смещения (мкм)	45
Рабочая частота (кГц)	< 1
Количество каналов	32

Контроллер

Алгоритм управления САПГС
 Частота управления (Гц) 1–500
 Время накопления сигнала (мс) 1.28

Приемник

Диаметр афокального телескопа (см) 40
 Эффективное фокусное расстояние (мм) 2800
 Поле зрения (мкрад) 54
 Детектор ФЭУ
 Квантовая эффективность детектора (%) 2

3. Результаты измерений

Эксперименты проводились при фокусировке основного и зондирующего пучков на дистанцию 300 м. Трасса проходила над пересеченной лесисто-урбанистической местностью на высоте от 12–15 м в начале трассы и до 50–100 м на удалении 300 м. Энергия импульса зондирующего лазера составляла 1 мДж, поэтому атмосферный эхо-сигнал был слабым. Оценки, выполненные для приведенных выше параметров установки показывают, что за счет молекулярного рассеяния в приземной атмосфере на дистанции 300 м можно рассчитывать на регистрацию только 10–15 фотонов за один импульс лазера. При этом мы полагаем, что на каждой оптической поверхности потери равны 4%, если оптика не просветлена на $\lambda = 1.06$ мкм.

В приземной атмосфере в ближнем ИК диапазоне длин волн коэффициент обратного аэрозольного рассеяния примерно на порядок превышает коэффициент обратного молекулярного рассеяния. Это обеспечивает около 100–150 зарегистрированных фотонов за импульс. Статистика регистрируемых фотонов подчиняется распределению Пуассона, при котором относительная погрешность регистрации сигнала равна обратному корню квадратному из числа зарегистрированных фотонов, и, следовательно, для 110–170 фотонов, получаемых суммарно за счет молекулярного и аэрозольного рассеяния, погрешность составит примерно 8%–10% для каждого отдельного импульса. Такая большая погрешность недопустима, поэтому проводилось усреднение эхо-сигналов от одиночных импульсов для повышения устойчивости сигнала управления.

На рис.3 приведены осциллограммы полученных в условиях дымки эхо-сигналов от одиночного импульса и при усреднении по числу лазерных импульсов $N = 64$ и 1000. Контроллер интегрировал эхо-сигнал на дистанции фокусировки в течение 1 мкс, поэтому продольный размер рассеивающего объема составлял 150 м. Первый пик – это паразитный сигнал рассеяния на оптических и механических элементах конструкции установки. Он повторяет форму лазерного импульса. Второй пик – это полезный сигнал с дистанции фокусировки (300 м). На осциллограмме для $N = 1$ сигнал сильно флуктуирует, видны одноэлектронные импульсы. При усреднении по $N = 64$ уже достигается приемлемое качество регистрируемого сигнала. Время накопления сигнала в этом случае равно 1.28 мс, а частота адаптивного управления ВФ пучка с помощью использовавшегося в макете ГЗ с рабочей частотой 1 кГц может составлять до 780 Гц.

В условиях чистой атмосферы, когда коэффициент аэрозольного рассеяния мал, мы имеем слабый эхо-сиг-

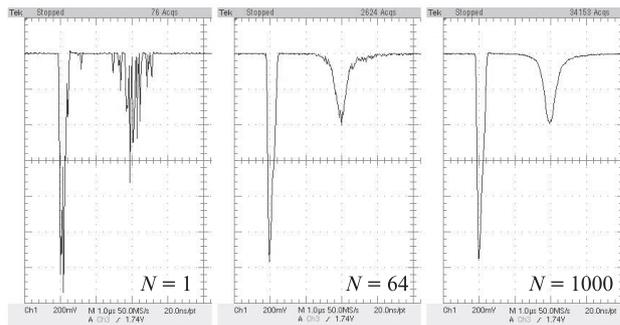


Рис.3. Осциллограммы эхо-сигнала зондирующего излучения от одиночного импульса и при усреднении по числу импульсов $N = 64$ и 1000.

нал. В светлое время суток на приемнике присутствует постоянная фоновая засветка. Эти факторы обуславливают уменьшение отношения сигнал/шум. Поэтому необходимо осуществлять накопление эхо-сигналов и вычитание фоновой «подставки», когда сигнал уже накоплен. На рис.4,а приводятся эхо-сигналы без усреднения ($N = 1$) и с усреднением ($N = 64$ и 1000). При $N = 1$ сигнал даже трудно заметить из-за наличия фоновой засветки. Мы видим лишь нерегулярный частокол из одноэлектронных импульсов с разной амплитудой, либо непрерывные блоки импульсов, возникающих в моменты реализации токового режима работы ФЭУ. Такой зашумленный сигнал абсолютно непригоден для управления адаптивным зеркалом. Необходимо усреднение по некоторому количеству N регистрируемых эхо-сигналов. Выбор N не является однозначным. При больших N происходит «хорошее» усреднение, но снижается скорость управления адаптивным зеркалом. При малых N управление становится невозможным из-за флуктуаций сигнала.

При усреднении по 64 и 1000 эхо-сигналам на осциллограмме, приведенной на рис.4,а, уже проявляется сигнал с дистанции фокусировки зондирующего пучка 300 м, на которую была настроена плоскость резкого изображения приемного телескопа. Также на осциллограмме всегда присутствует короткий паразитный импульс на нулевой

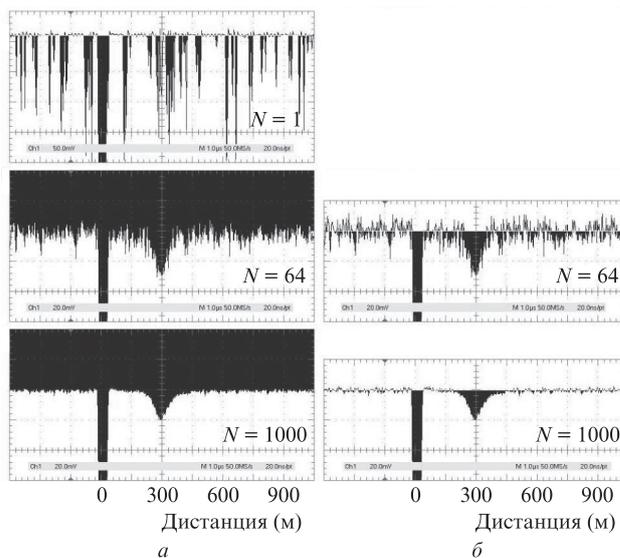


Рис.4. Эхо-сигналы, полученные в чистой атмосфере при различном усреднении ($N = 1, 64$ и 1000): исходные (а) и скорректированные (когда фоновая засветка удалена) (б) сигналы. Измерения проведены 28 февраля 2014 г.

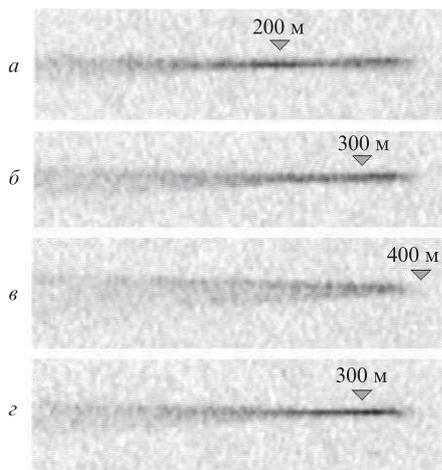


Рис.5. Фотографии пучка ИК лазера, полученные в условиях слабо замутненной атмосферы. Пучок был сфокусирован на дистанции 200 (а), 300 (б) и 400 м (в). При включении управления (г) пучок собирается на дистанции фокусировки телескопа (300 м).

дистанции. Видно, что фоновая засветка создает подставку, на которой выделяется эхо-сигнал. Удаление этой подставки проводится простым вычитанием константы из исходного сигнала. Уровень фона можно определить по сигналу с дальней дистанции, где полезный эхо-сигнал отсутствует.

На рис.5 приведены изображения лазерного ИК пучка ($\lambda = 1.067$ мкм) в атмосфере, полученные с помощью видеокамеры Sony, когда пучок был сфокусирован на дистанции 200, 300 и 400 м, при выключенном управлении адаптивным зеркалом. На рис.5,г показан пучок при включенном управлении. Приемная оптика при этом была настроена на 300 м, поэтому система перефокусировала пучок именно на эту дистанцию. Визуально качество пучка повысилось по сравнению с начальным, т. к. в процессе адаптации были устранены искажения ВФ пучка, возникающие за счет аберраций передающей оптики.

Для управления адаптивным зеркалом использовался разработанный спецпроцессор – оптимизирующий контроллер 2 на рис.2, реализующий САПГС. Пример управления ВФ пучка с помощью этого спецпроцессора иллюстрирует рис.6, где показан интерфейс программы визуализации работы САПГС. Здесь и далее на аналогичных

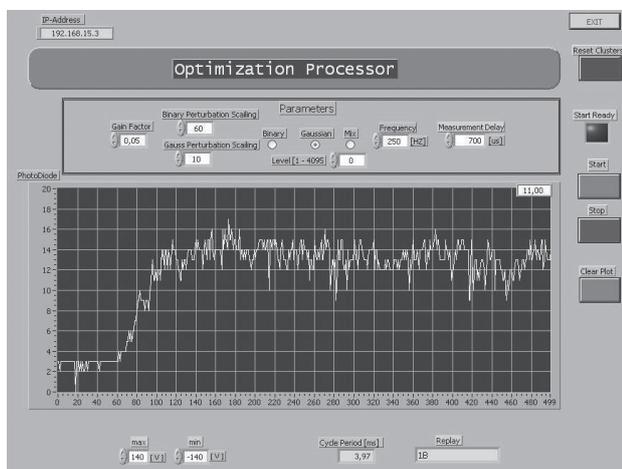


Рис.6. Интерфейс программы, использующейся при работе контроллера для визуализации процесса управления адаптивным зеркалом.

рисунках по оси ординат отложена амплитуда эхо-сигнала, которая увеличивается по мере компенсации аберраций ВФ, по оси абсцисс – номер итерации. Одна клетка по оси абсцисс соответствует 1 с. Видно, что выход сигнала на максимальное значение осуществляется за 2 с. Частота управления зеркалом в эксперименте составляла 250 Гц, так что для выхода сигнала на максимум потребовалось примерно 500 итераций алгоритма.

Данные рис.7 демонстрируют, насколько стабильно работает система управления адаптивным контуром. На рис.7,а показана реализация, при которой в течение 5 с управления не было, затем оно было включено. Сигнал за 2 с увеличился примерно в четыре раза и оставался на этом уровне в течение длительного времени. На рис.7,б представлена реализация, при которой примерно каждые 10 с напряжения на всех электродах принудительно обнулялись при включенном управлении ГЗ. В результате обнуления напряжений происходила расфазировка элементов адаптивного зеркала, тем самым в пучок вносились искусственные искажения ВФ. Каждый раз система возвращала сигнал на прежний уровень, демонстрируя стабильность работы оптимизирующего контроллера.

Изменчивость сигнала обратного рассеяния из-за флуктуаций коэффициента обратного рассеяния и оптической турбулентности демонстрирует рис.8, где представлена последовательность эхо-сигналов. Флуктуации эхо-сигнала могут оказывать влияние на управление ВФ. Когда флуктуации сигнала обратного рассеяния из-за атмосферных факторов становятся соизмеримыми со случайными изменениями амплитуды управляющего сигнала, вырабатываемыми в соответствии с САПГС, дальнейшее повышение качества ВФ пучка становится невозможным. Пример такой реализации сигнала управления иллюстрирует рис.9, где приведены также профили эхо-сигналов и интерферограммы основного пучка в начале и в конце реализации. Сначала управление было выключено (до 5×10^3 шагов), потом включено и сигнал сразу увеличился, а затем в середине реализации управление было отключено. В среднем сигнал увеличился примерно в 3.5 раза. Во время управления зеркалом сигнал сильно флуктуировал. После отключения управления флуктуации сигнала уменьшились, но оставались большими. При включенном управлении среднее квадратичное отклонение (СКО)

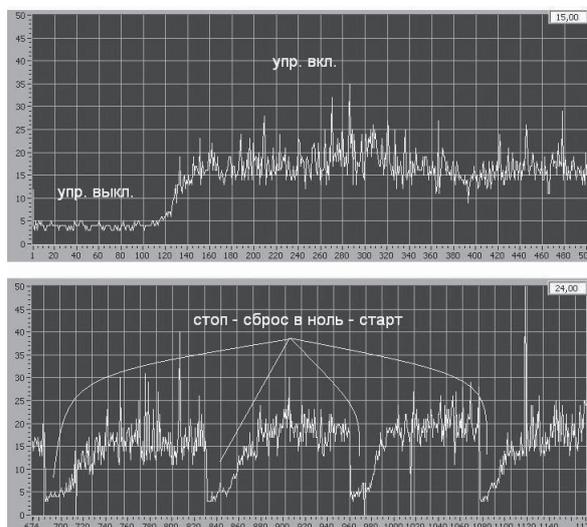


Рис.7. Реализации сигнала управления ГЗ в условиях чистой атмосферы. Данные от 14 февраля 2014 г.

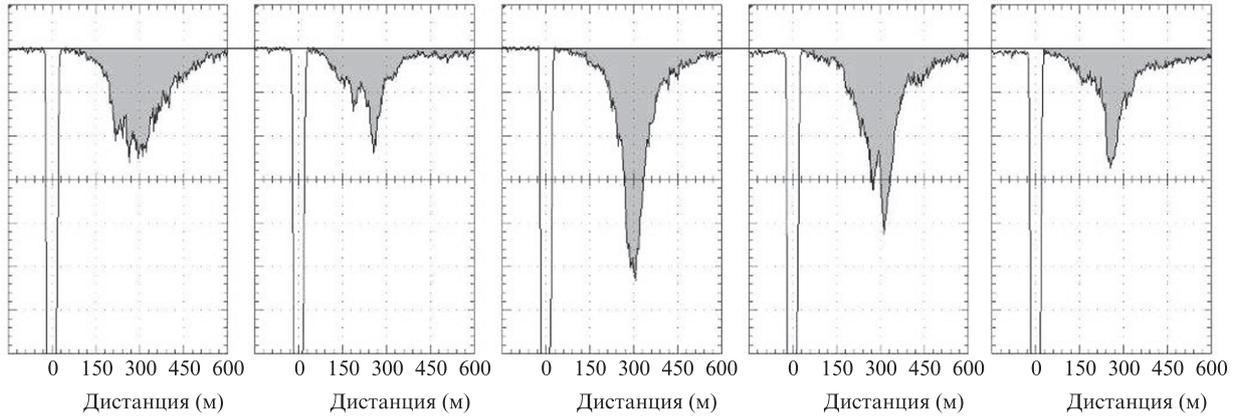


Рис.8. Осциллограммы эхо-сигналов в условиях плотной атмосферной дымки. Развертка по вертикали 50 мВ/кл., а по горизонтали – 1 мкс (150 м/кл.). Данные от 18 февраля 2014 г.

сигнала составляло 24%, при выключенном – 21%. Если предположить, что атмосфера была стабильной, то оказывается, что СКО сигнала за счет управления было меньше СКО сигнала за счет флуктуаций коэффициента обратного рассеяния и показателя преломления (21%) и составляло примерно 12%. Поэтому дальнейший рост сигнала не происходил.

Типичные данные пяти реализаций измерений управляющего сигнала, фотографии распространяющихся соосно зондирующего (лазер 1, $\lambda = 1.067$ мкм) и основного (лазер 2, $\lambda = 0.532$ мкм) пучков в атмосфере при слабом снегопаде и интерференционные картины, визуализирующие ВФ основного пучка, представлены на рис.10. Перед началом каждой реализации проводилось обнуление напряжений на электродах ГЗ. На каждом из рис.10, а–д слева направо располагаются реализации (длительностью

30 с) нормированного на начальное значение управляющего сигнала, фотографии пучков, сфокусированных на расстояние 300 м, равное фокусному расстоянию телескопа (1), и на расстояние, превышающее фокусное расстояние телескопа при выключенном (2) и включенном (3) управлении ГЗ, а также интерферограммы основного пучка для тех же условий.

Из результатов, представленных на рис.10, следует, что лазерные пучки, первоначально расфокусированные с помощью коллиматора и за счет aberrаций ВФ, возникающих при нулевых напряжениях на элементах ГЗ, в процессе адаптации фокусируются на заданную дистанцию. Наклон полос интерферограммы, визуализирующей ВФ основного пучка, увеличивается при смещении фокуса пучка на расстояния, превышающие 300 м (2), но затем, по мере компенсации aberrаций с помощью ГЗ, наклон

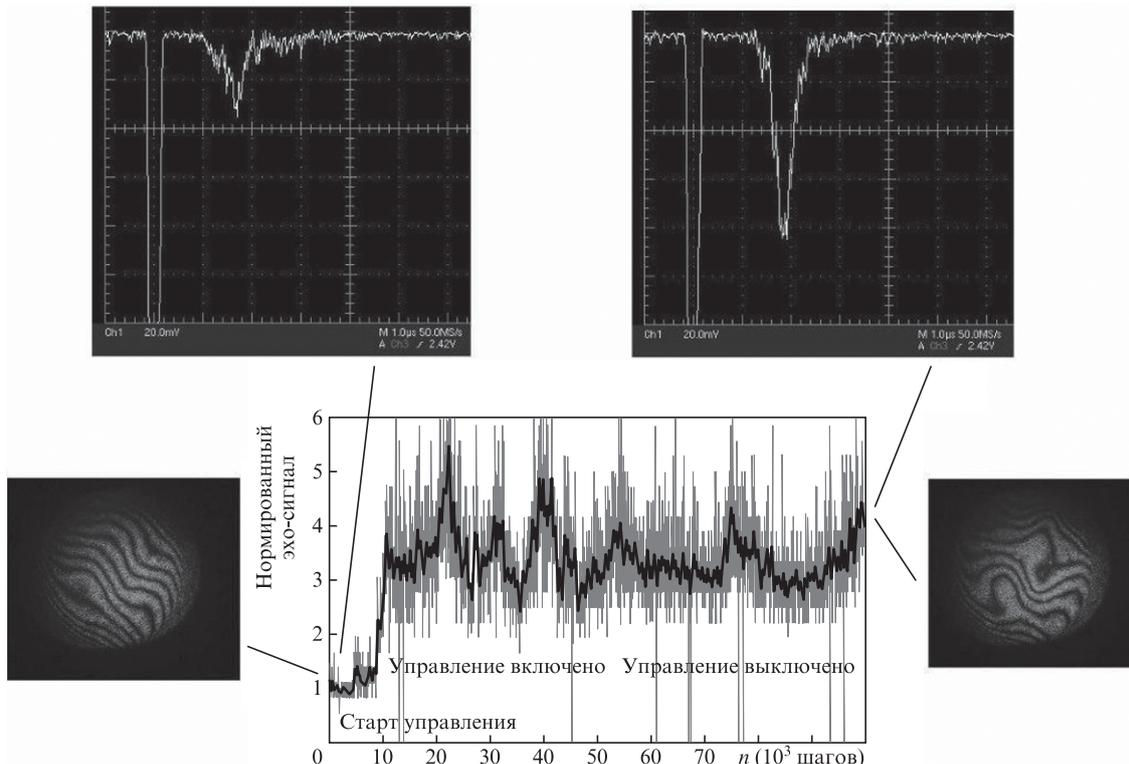


Рис.9. Результаты работы адаптивной системы в условиях сильных флуктуаций эхо-сигнала. Данные от 25 февраля 2014 г. Жирная кривая – усредненный сигнал.

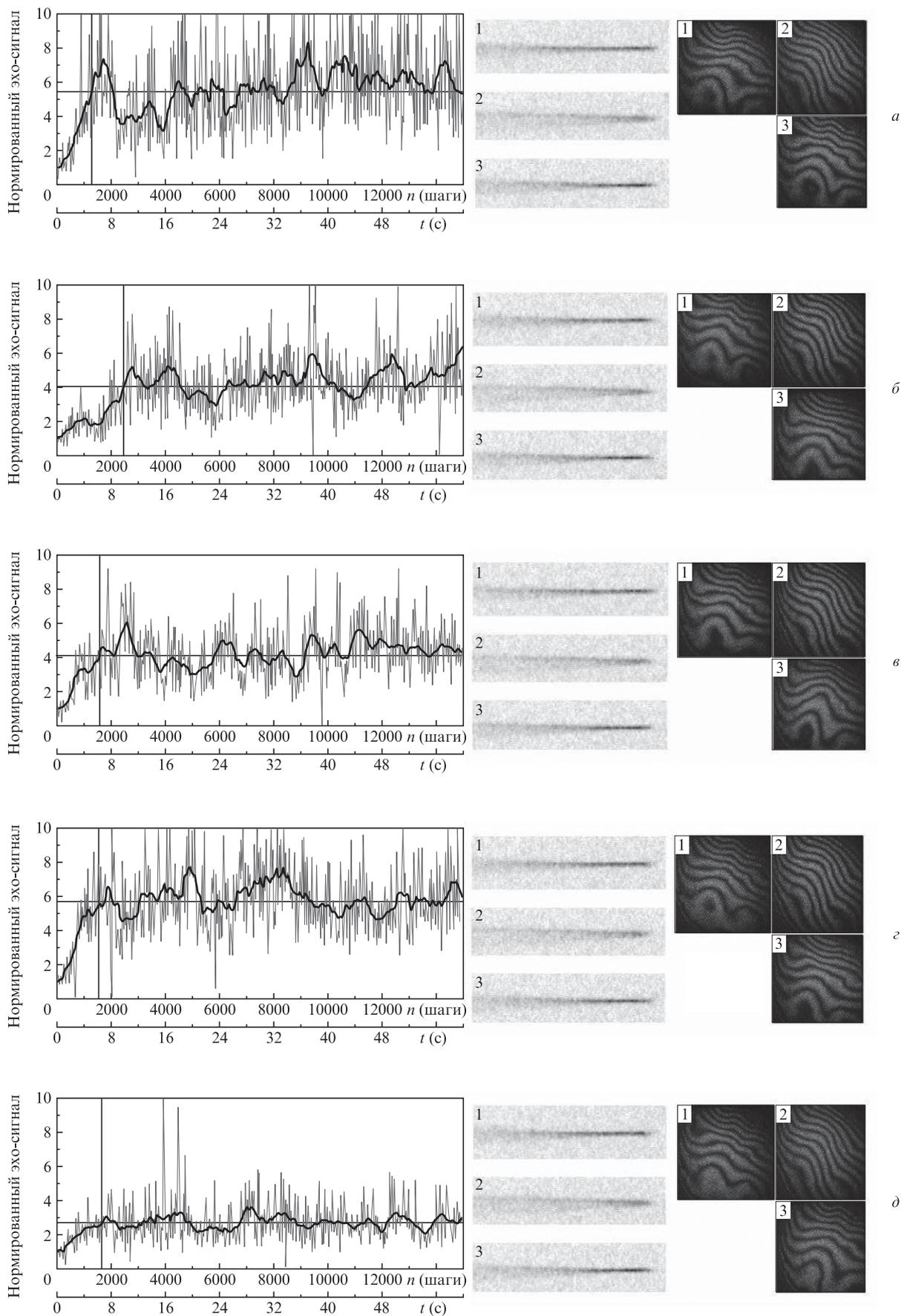


Рис.10. Результаты работы адаптивной системы. Жирные кривые – усредненные сигналы.

полос (3) становится близким к исходному (1), что свидетельствует об уменьшении расходимости пучка. Полосы интерферограммы остаются искаженными, т.к. угловое разрешение приемной системы установки (54 мкрад) было недостаточным для обеспечения чувствительности приемника к мелкомасштабным аберрациям. В результате работы адаптивной системы в атмосферных условиях на приземной трассе сигнал обратного рассеяния зондирующего излучения возрастает более чем в четыре раза. Время выхода мощности сигнала обратного рассеяния на максимальное значение составляет в среднем 3.4 с.

4. Заключение

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты исследования возможности адаптивного управления начальным ВФ лазерного пучка по сигналу обратного атмосферного рассеяния. Созданный лабораторный макет адаптивной системы позволяет осуществлять компенсацию аберраций начального ВФ оптического (основного) пучка методом апертурного зондирования по сигналу обратного атмосферного рассеяния излучения дополнительного зондирующего лазерного источника на другой длине волны. Наклон полос интерферограммы, визуализирующей ВФ основного пучка, изменяется в процессе адаптивного управления ВФ. При введении искусственных аберраций наклон увеличивается, но затем, по мере компенсации аберраций с помощью ГЗ, управляемого по сигналу обратного рассеяния, становится близким к исходному. Сигнал обратного рассеяния зондирующего излучения в процессе адаптивного управления ГЗ может возрастать более чем в четыре раза. Ма-

кет обеспечивает управление ВФ пучка в условиях чистой атмосферы, дымки, слабого и среднего снегопада.

Минимальное время выхода сигнала управления на максимальное значение (время достижения максимально возможной компенсации искажений ВФ основного пучка) равно 2 с для ГЗ с рабочей частотой 1 кГц. В среднем время выхода управляющего сигнала на максимум при использовании такого зеркала находится в пределах 3–3.5 с. Оперативность работы адаптивного контура может быть повышена путем подбора оптимальных параметров САПГС управления ГЗ, реализованного в оптимизирующем контроллере.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-02-98016-р_сибирь).

1. Zhmylevskii V.V., Ignatiev A.B., Konyaev Yu.A., Morozov V.V. *Abstr. XI Joint Int. Symp. «Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics»* (Tomsk, 2004, p. 92).
2. Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатьев А.Б., Морозов В.В., Рычков Д.С. *Квантовая электроника*, **38**, 764 (2008).
3. Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатьев А.Б., Морозов В.В., Смалихо И.Н. *Оптика и спектроскопия*, **108**, 113 (2010).
4. Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатьев А.Б., Морозов В.В., Смалихо И.Н. *Оптика и спектроскопия*, **111**, 488 (2011).
5. Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатьев А.Б., Морозов В.В., Цвык Р.Ш., Шестернин А.Н. *Оптика атмосферы и океана*, **26**, 1023 (2013).
6. Vorontsov M.A., Sivokon V.P. *J. Opt. Soc. Am.*, **15**, 2745 (1998).
7. Банах В.А., Ларичев А.В., Разенков И.А., Шестернин А.Н. *Оптика атмосферы и океана*, **25**, 1099 (2012).
8. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. *Принципы адаптивной оптики* (М.: Наука, 1985).
9. Tyson R.K. *Principles of Adaptive Optics* (Boston, MA: Academic Press, 1998).