

Министерство образования и науки Российской Федерации

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Радиофизический факультет

Кафедра оптико-электронных систем и дистанционного зондирования (ОЭСиДЗ)

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК

Руководитель ООП

д-р физ.-мат. наук, профессор

И.В. Самохвалов

« 07 » 06 2017 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА КОМПЕНСАЦИИ ВОЛНОВЫХ АБЕРРАЦИЙ В АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАТЧИКА ШАКА-ГАРТМАНА

на соискание степени магистра радиофизики

по направлению подготовки

12.04.02 - Опотехника

Кусков Василий Вадимович

Руководитель ВКР

д-р физ.-мат. наук,

зав. ЛРВ ИОА СО РАН

В.А. Банах

подпись

« 06 » 06 2017 г.

Автор работы

студент группы № 714

Кусков В.В. Кусков

подпись

Томск 2017

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена экспериментальному исследованию возможности адаптивной компенсации волновых aberrаций лазерного пучка по сигналу обратного атмосферного рассеяния излучения дополнительного лазерного источника.

Для проведения исследований была выполнена модернизация адаптивного атмосферного стенда, созданного в лаборатории распространения волн Института оптики атмосферы. В состав стенда введён канал контроля качества волнового фронта лазерного пучка, на основе датчика Шака-Гартмана. Изменена оптическая схема стенда таким образом, чтобы стало возможным независимое формирование пучков излучения основного и дополнительного лазерных источников.

Проведены атмосферные эксперименты по адаптивной коррекции искусственно введённых начальных aberrаций волнового фронта основного лазерного пучка по сигналу обратного атмосферного рассеяния от дополнительного лазерного источника на другой длине волны с использованием метода апертурного зондирования. Тип и амплитуда введённых aberrаций и степень их подавления в результате адаптивной коррекции по сигналу обратного атмосферного рассеяния определялись с помощью датчика Шака-Гартмана. Показано, что в ходе адаптивного управления происходит значительное уменьшение aberrаций волнового фронта.

Работа состоит из введения, 3 глав, заключения и приложения; выполнена на 44 страницах, содержит 20 рисунков и список использованных источников из 10 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	7
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АТМОСФЕРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ НАЧАЛЬНЫХ АБЕРРАЦИЙ ВОЛНОВОГО ФРОНТА	15
2.1 Структура стенда	16
2.2 Оптическая схема стенда	17
2.3 Датчик волнового фронта Шака-Гартмана	22
2.4 Схема атмосферных измерений	24
2.5 Методика измерений	26
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ	28
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	34
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ	35
ПРИЛОЖЕНИЕ А	37

ВВЕДЕНИЕ

В ряде практических приложений возникает задача передачи лазерной энергии на значительные расстояния. Для повышения плотности энергии в конце трассы требуется повышение мощности лазерного пучка. Однако в системе формирования лазерного пучка мощное излучение неравномерно нагревает её оптические элементы, что приводит к возникновению термоаббераций и отклонению волнового фронта пучка от заданного распределения. Термоискажения волнового фронта значительно увеличивают расходимость лазерного пучка, по сравнению с дифракционной. В результате происходит уменьшение плотности мощности излучения в приосевой области поперечного сечения пучка и эффективность передачи лазерной энергии снижается. Возникает задача компенсации аббераций передающей системы и коррекции волнового фронта лазерного пучка.

Существует две классические схемы адаптивного управления волновым фронтом (ВФ): фазового сопряжения и апертурного зондирования. Система фазового сопряжения предполагает использование опорного источника и датчика волнового фронта анализирующего абберации фазы опорного источника. Однако использование таких схем на практике не всегда представляется возможным. В [1] предложена альтернатива в качестве «опорного источника» использовать атмосферу. При распространении лазерного пучка в атмосфере всегда какая-то его часть «отражается» в обратном направлении- происходит аэрозольное и молекулярное рассеяние. Мощность рассеянного назад излучения зависит от мощности распространяющегося пучка. Плотность мощности зависит от расходимости пучка, которая в свою очередь зависит от наличия термоаббераций. В таком случае, если использовать для регистрации рассеянного назад излучения приёмник с малым полем зрения, то принимаемая им мощность будет чувствительна к изменению расходимости пучка и может служить сигналом для управления адаптивным зеркалом. Такая схема не требует датчика волнового фронта для выработки сигнала управления. Этим реализуется схема апертурного зондирования.

Однако всё же мощность рассеянного в обратном направлении излучения мала и зарегистрировать сигнал приёмником с малым полем зрения не всегда удаётся. Выйти из этого положения может помочь использование обратно рассеянного излучения вспомогательного пучка, сфокусированного на относительно близкое расстояние. Мощности рассеянного назад излучения с области перетяжки будет достаточно для регистрации приёмником с малым углом поля зрения. Тогда, если основной и

вспомогательный пучки приобретают одинаковые искажения, то подавляя искажения вспомогательного пучка, автоматически будет исправляться ВФ и основного пучка.

Целью работы является экспериментальное исследование точности компенсации искажений волнового фронта лазерного пучка с помощью адаптивного управления по сигналу обратного атмосферного рассеяния излучения на другой длине волны. Достижение поставленной цели требует решения следующих задач:

- 1) Изучение метода апертурного зондирования адаптивной коррекции ВФЛП по сигналу обратного атмосферного рассеяния излучения дополнительного лазерного источника (ДЛИ) на другой длине волны;
- 2) Изучение принципов работы датчика волнового фронта. Овладение навыками работы с датчиком волнового фронта. Проведение экспериментов по регистрации ВФЛП, отражённого от адаптивного зеркала, при различных абберациях ВФЛП, задаваемых гибким зеркалом и контролируемых датчиком волнового фронта;
- 3) Модернизация атмосферного стенда по исследованию адаптивного управления ВФЛП по сигналу обратного рассеяния дополнительного лазерного источника;
- 4) Проведение экспериментов по адаптивному управлению ВФЛП по сигналу обратного атмосферного рассеяния ДЛИ;
- 5) Анализ эффективности адаптивного управления ВФЛП по сигналу обратного рассеяния ДЛИ на основе анализа датчиком волнового фронта начальных искусственно введённых аббераций ВФЛП и остаточных аббераций ВФЛП после адаптивной коррекции.

На защиту выносятся следующие положение: метод апертурного зондирования по сигналу обратного атмосферного рассеяния излучения дополнительного (зондирующего) лазерного источника позволяет компенсировать абберации волнового фронта лазерного пучка типа «дефокусировка» до величины 1λ , при начальных искажениях 7λ .

Апробация работы: результаты и выводы полученные в ходе выполнения данной работы докладывались на:

- 1) международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики 2013» (г. Томск 2013) [11];
- 2) XX рабочей группе «Аэрозоли Сибири» (г. Томск 2013) [12];
- 3) Первой всероссийской конференции студенческого научно-исследовательского инкубатора (СНИИ) (г. Томск 2014) [13];
- 4) Международная молодежная научная школа «Актуальные проблемы радиофизики» (г. Томск 2014) [14];
- 5) XXI группе «Аэрозоли Сибири» (г. Томск 2014)[15,16];

- 6) XXI международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»(г. Томск 2015) [17,18]4
- 7) XXII рабочей группе «Аэрозоли Сибири» (г. Томск 2015) [19,20];
- 8) XXIII рабочей группе «Аэрозоли Сибири» (г. Томск 2016) [21].

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

На высотных трассах в атмосфере турбулентные искажения невелики, и для лазерного излучения (ЛИ) основным фактором уширения являются aberrации самой передающей оптической системы оптической системы. Aberrации ЛИ на выходе формирующей системы определяются начальными искажениями волнового фронта на выходе источника излучения и искажениями, вносимыми оптической системой. Эти искажения приводят к снижению эффективности передачи лазерного излучения мощности.

В [2-4] теоретически рассмотрена задача о компенсации начальных искажений ВФ частично когерентного лазерного пучка с использованием сигнала обратного атмосферного рассеяния для управления адаптивным зеркалом. На основе численного моделирования определены параметры приёмо-передатчика для возможности адаптивной коррекции начального ВФ данным методом. При компьютерном моделировании был использован алгоритм управления гибким зеркалом, использующий в качестве управляющего сигнала среднюю мощность рассеянного назад зондирующего излучения. Предполагалось, что искажения волнового фронта основного и зондирующего пучков, возникающие в оптическом тракте передающего телескопа, определяются низшими aberrациями и вносимый гибким зеркалом фазовый набег $\psi(\rho)$ можно представить в виде разложения по полиномам Цернике $Z_i(r, \theta)$:

$$\psi(z, y) = \sum_{i=0}^9 C_i Z_i(r, \theta),$$

где r, θ - полярные координаты заданной точки волнового фронта пучка в плоскости экрана. Управление гибким зеркалом при моделировании осуществлялось через коэффициенты C_i .

Так же, из теоретических построений [3] следует, что чувствительность средней принимаемой мощности рассеянного излучения к aberrациям волнового фронта тем выше, чем меньше угол поля зрения приемника.

Однако на практике, чтобы избежать процедуры измерения функций влияния управляемых элементов гибкого зеркала, необходимых для определения коэффициентов Цернике C_i , работу гибкого зеркала можно организовывать на основе непосредственного управления напряжениями на элементах зеркала без применения разложения по полиномам Цернике. Авторами [5-8] в качестве алгоритма управления гибким зеркалом, был выбран стохастический алгоритм параллельного градиентного спуска (САПГС)[9]. Он не требует измерения дополнительных параметров, является достаточно простым в реализации, стабильным, а также быстросходящимся.

В качестве управляющего сигнала для выработки напряжений на элементах гибкого зеркала в САПГС используется средняя мощность излучения принятого приёмником с ограниченным углом поля зрения. Эта средняя мощность излучения может рассматриваться как функция управляющих напряжений и должна максимизироваться в результате итерационного изменения напряжений на элементах гибкого зеркала.

Суть алгоритма заключается в следующем: с помощью управляющих напряжений $U = \{u_1, u_2, \dots, u_N\}$, где N- номер элемента ГЗ, изменяется вносимый фазовый набег зеркала. Управление напряжением (U), осуществляется по регистрируемой средней мощности рассеянного назад излучения $\bar{P}(U)$. На k-ой итерации, измеряются два сигнала:

$$P_+^{(k)} = P(u_1^{(k-1)} + \delta u_1, u_2^{(k-1)} + \delta u_2, \dots, u_N^{(k-1)} + \delta u_N),$$

$$P_-^{(k)} = P(u_1^{(k-1)} - \delta u_1, u_2^{(k-1)} - \delta u_2, \dots, u_N^{(k-1)} - \delta u_N).$$

Затем рассчитываются новые напряжения:

$$u_n^{(k)} = u_n^{(k-1)} + 2 \frac{P_+^{(k)} - P_-^{(k)}}{P_+^{(k)} + P_-^{(k)}} \delta u_n^{(k)},$$

где $\delta u_n^{(k)} = b_n^{(k)} \delta u_0$, δu_0 -начальный шаг, $b_n^{(k)}$ - псевдослучайное число, которое подчиняется распределению Бернулли.

В [5] представлены результаты лабораторных экспериментов по апробации работы САПГС. Схема экспериментальной установки показана на рисунке 1.

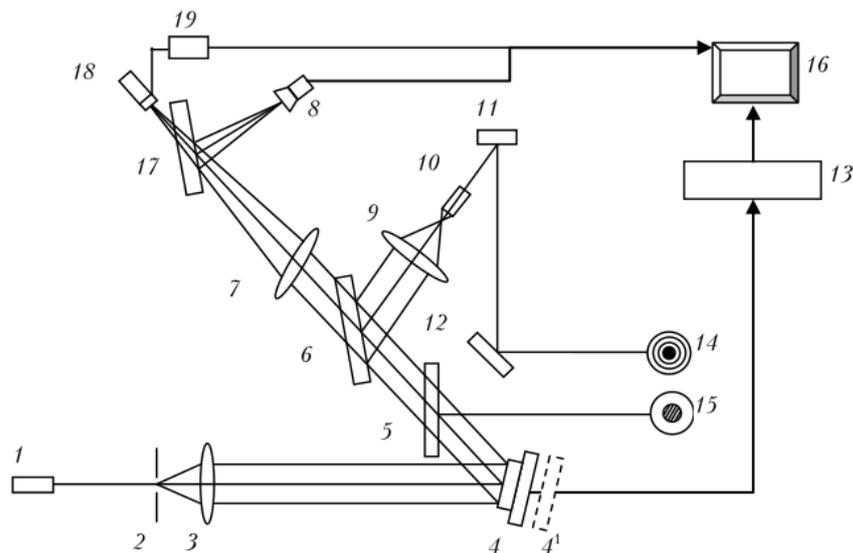


Рисунок 1- Схема экспериментальной установки [5]. 1-лазерный источник;2- диафрагма; 3,7,9- объектив; 4- гибкое зеркало; 5-интерферометр; 6,17-делитель излучения; 8 –USBвидеокамера; 10-окуляр; 11,12- плоские зеркала; 13- блок управления гибким зеркалом;14 -функция размытия точки; 15-интерферограмма; 16- ПК; 18 приёмник излучения с диафрагмой; 19-АЦП

Коллимированный лазерный пучок подавался на управляемое гибкое зеркало. После зеркала строилась функция размытия точки и интерферограмма дающие информацию о волновом фронте и распределении интенсивности в пучке. Так же лазерный пучок фокусировался на приёмную матрицу видеокамеры и приёмник излучения с ограниченным углом поля зрения. В качестве управляющего сигнала для выработки напряжений на каждом итерационном шаге использовалась мощность излучения в пучке, которая либо регистрировалась фотоприёмником, либо рассчитывалась по распределению интенсивности на площадке определённого размера в видеоизображении пучка, если использовалась видеокамера.

Показано, параметр Штреля, рассчитываемый в отношении к достижимому в эксперименте дифракционному пределу, после работы установки мог достигать значений 0,95 (пример работы показан на рисунке 2).

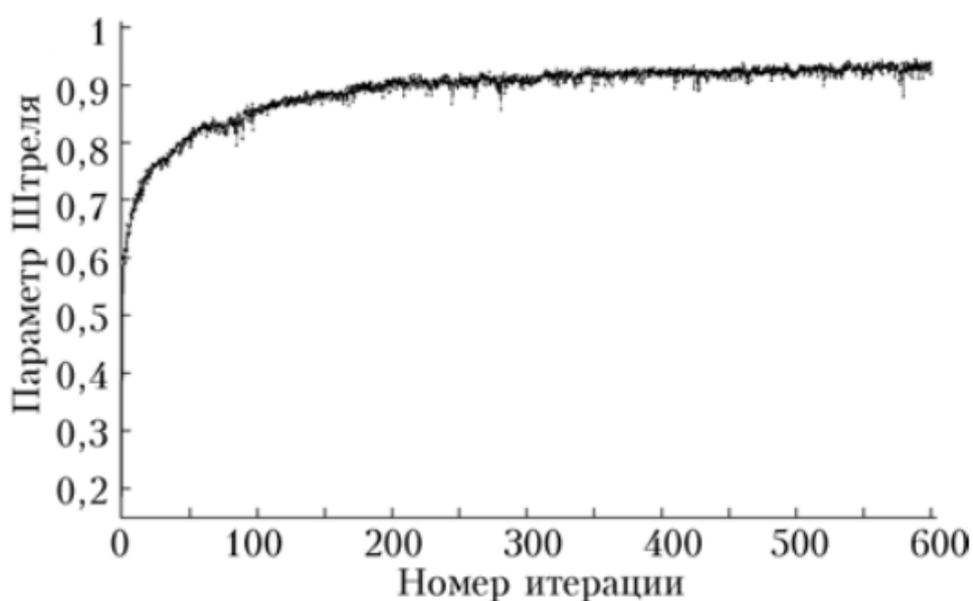
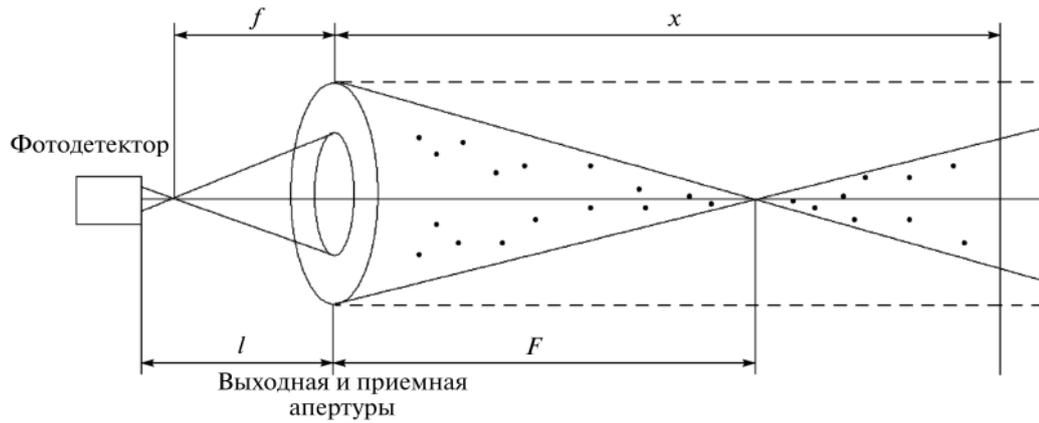


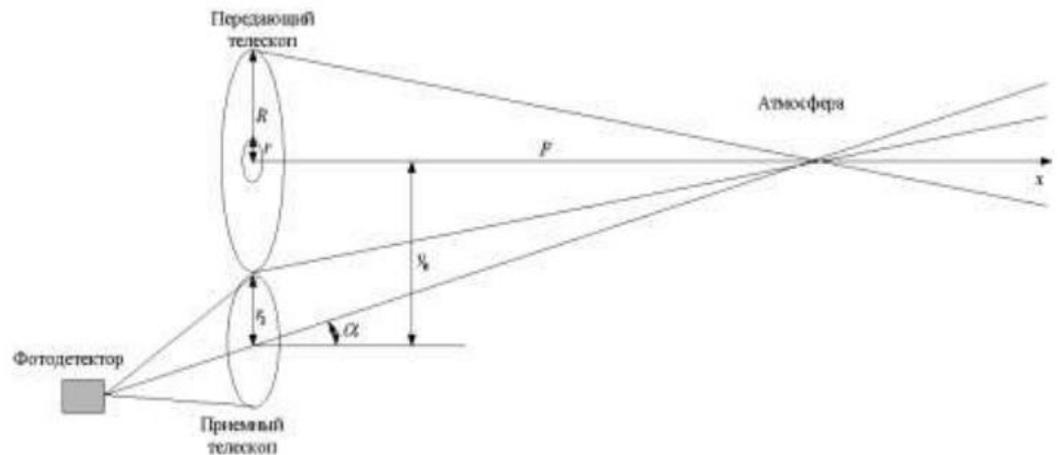
Рисунок 2- Результат работы установки с использованием САПГС [5]

Недостатком использования соосной схемы представленной в [2-4] (рисунок 3 (а)) является ограниченная внутренним диаметром кольцевой передающей системы апертура приёмного телескопа. Этот недостаток может существенно снизить соотношение сигнал/шум, вплоть до невозможности вычленения полезного сигнала для управления корректором волнового фронта. Альтернативой является использование несоосной схемы приёма излучения (рисунок 3 (б)). В таком случае размер приёмной апертуры не зависит от передающей, что позволяет существенно увеличить мощность детектируемого обратно-рассеянного лазерного излучения, а соответственно, соотношение сигнал/шум. Авторами проведено численное моделирование возможности компенсации с использованием

несоосной схемы приёма, которое показало возможность полной компенсации aberrаций, как и в случае соосной схемы приёма[10].



а)



б)

Рисунок 3- Соосная (а)[3] и несоосная (б) [10] схемы «приёмно-передатчика»

В [6] представлены результаты атмосферных экспериментов по адаптивной компенсации искажений ВФ лазерного пучка по сигналу рассеянного на экране излучения. Работы велись с использованием несоосной схемы приёма. Схема эксперимента показана на рисунке 4.

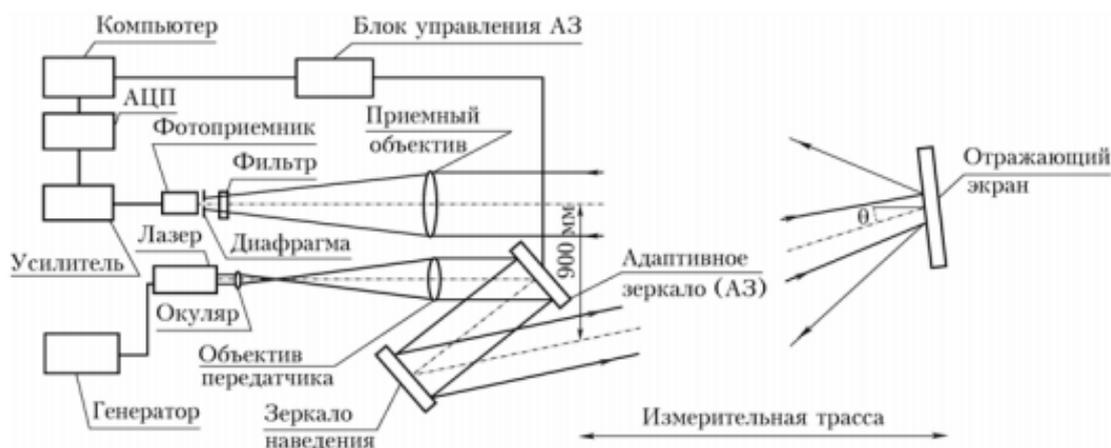


Рисунок 4 - Компенсация начальных aberrаций в несоосной схеме [6]

При помощи линзового телескопа лазерное излучение расширялось, после чего шло на адаптивное зеркало и зеркало наведения. Зеркало наведение направляло через атмосферу лазерный пучок на удалённый отражающий экран (белая шероховатая металлическая пластина). Приёмный объектив, располагающийся рядом с передающей частью установки, строил изображение экрана на диафрагме ограничивающей угол поля зрения приёмника. Сигнал, получаемый при помощи фотоприёмного устройства, в дальнейшем использовался для управления адаптивным зеркалом.

Результаты работы представлены на рисунке 5,

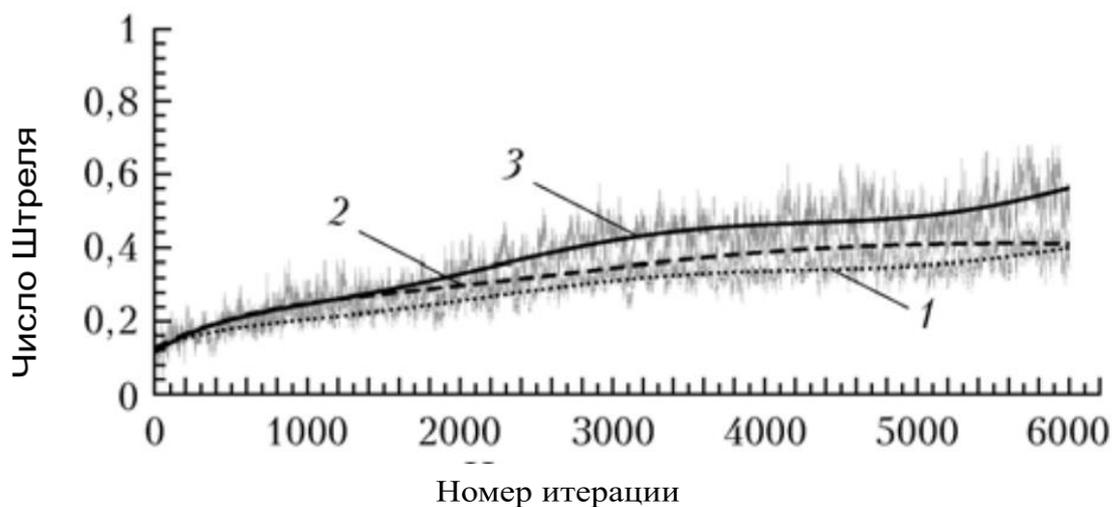


Рисунок 5–Результаты работы установки[6] по компенсации начальных aberrаций в несоосной схеме. Зависимость числа Штреля от номера итерации. 1- $d_d=100$; 2- $d_d=70$; 3- $d_d=30$, где d_d – диаметр диафрагмы установленной перед приёмником излучения.

По зависимостям можно увидеть, что компенсация зависит от размера установленной перед приёмником диафрагмы: чем меньше размер диафрагмы, тем качественнее происходит компенсация и необходимо меньшее количество итераций

алгоритма управления гибким зеркалом для достижения этого уровня. Уменьшение диафрагмы возможно лишь до некоторого предела - слишком маленький размер ведет к неустойчивой работе алгоритма управления адаптивным зеркалом, так как при малом отношении сигнал шум ухудшается выделение полезного сигнала. Установка диафрагмы слишком большого размера ведет к тому, что собранный пучок весь проходит через диафрагму и алгоритм управления адаптивным зеркалом не может выделить направления для движения, компенсация aberrаций прекращается. Неполная компенсация aberrаций вызвана еще и тем, что стрелки прогиба гибкого зеркала имеет ограниченный диапазон хода, что приводит к недостаточной фокусировке пучка на экране.

В[7] управление волновым фронтом велось по атмосферному рассеянию излучения дополнительного «зондирующего» лазерного источника на другой длине волны. При этом так же использовалась несоосная схема приёмо-передатчика (рисунок 5).

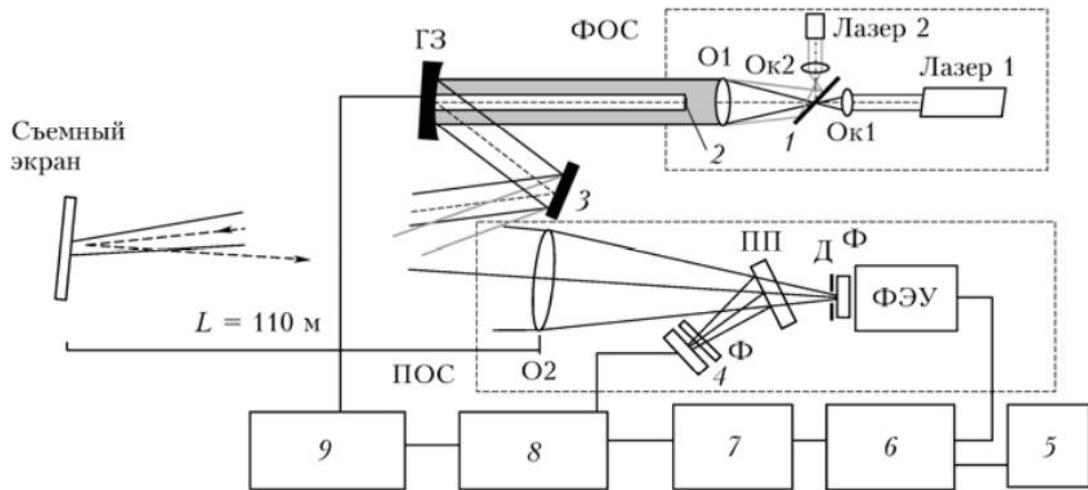


Рисунок 5– Экспериментальная установка [7]. Ок1,2- окуляр; О1,2- объектив; ГЗ- гибкое зеркало; Д- диафрагма; Ф- интерференционный фильтр; ПП- полупрозрачная пластина; 1- делительная пластина; 2- затеняющий экран; 3- зеркало наведения; 4- USBкамера; 5- осциллограф; 6- селективный нановольтметр; 7-АЦП; 8- ПК; 9- блок управления ГЗ.

В зондирующем канале излучение лазера фокусировалось на заданную дальность, в то время как в основном канале было коллимированным. Центральная часть при этом вырезалась экраном для имитации передающей системы Кассегрена. Увеличение сигнала в ходе работы установки было в 3 раза (отношение $St_m/St(0)$) и число Штреля при этом достигало значений 0,76-0,83 в области насыщения $-St_m$ (рисунок 6). При этом основной лазерный пучок после работы установки вновь становился коллимированным, как и до

искусственного внесения aberrаций. Таким образом, введённые искажения успешно компенсировались как в зондирующем, так и в основном пучках.

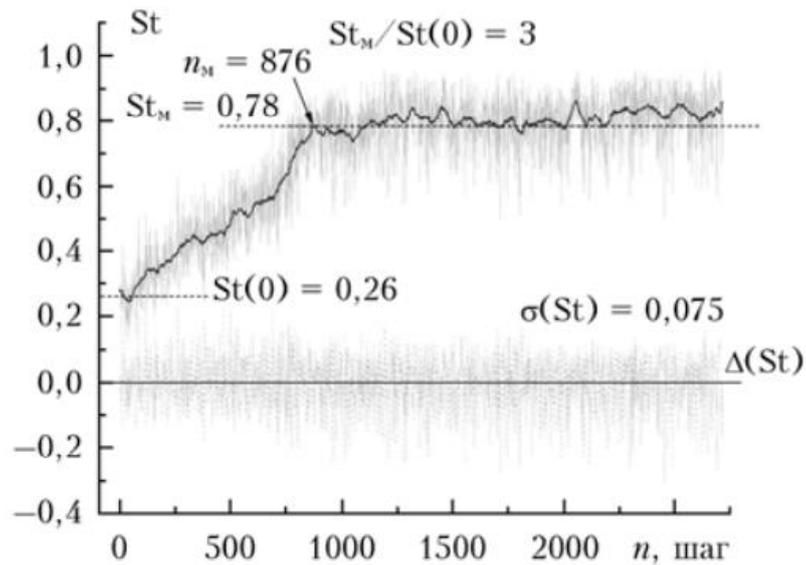


Рисунок 6- Величина сигнала на приёмнике в ходе работы установки нормированная к начальной амплитуде сигнала [7].

Однако недостатком несоосной схемы является невозможность изменения дальности фокусировки дополнительного лазерного пучка без дополнительной юстировки системы. При использовании соосной схемы дополнительная настройка оптической системы не требуется.

В [8] использовалась соосная схема приёма для компенсации aberrаций передающей оптической системы по сигналу обратного атмосферного рассеяния. Приёмная апертура представляла собой телескоп Мерсена, в затенённой области которой располагалась круглая передающая. Излучение обоих лазерных источников фокусировалось на расстоянии составляющее 300 метров.

Лабораторный макет позволял осуществлять компенсацию aberrаций начального ВФ основного лазерного пучка методом апертурного зондирования по сигналу обратного атмосферного рассеяния зондирующего лазерного источника на другой длине волны, о чем говорит восстановление интерферограммык исходному виду (до искусственного внесения aberrаций) (рисунок 7).

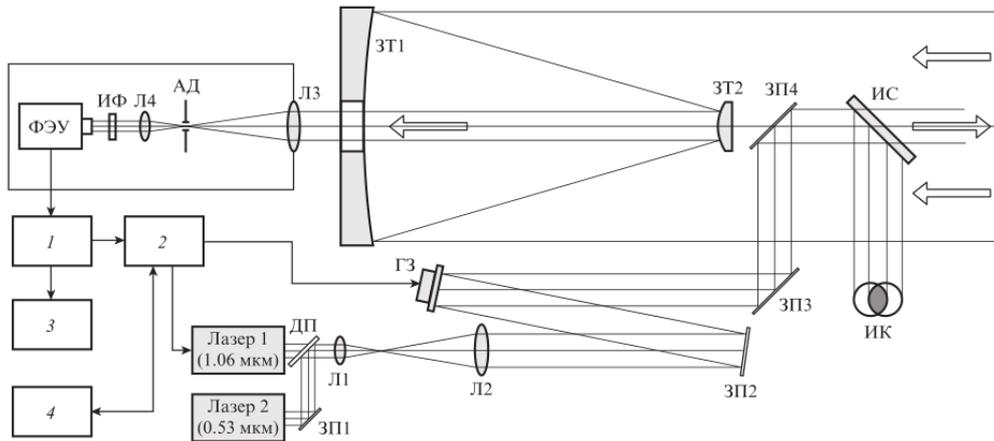


Рисунок 7– Экспериментальная установка [8]. ГЗ- гибкое зеркало; Л1-Л4- линзы; ЗП1-ЗП4- плоские зеркала; ДП- дихроичная пластина; ЗТ1, ЗТ2- главное и вторичное зеркала телескопа Мерсена; ИС- интерферометр сдвига; ИК- интерферограмма; АД- апертурная диафрагма; ИФ- интерференционный светофильтр; 1- усилитель; 2- контроллер; 3- осциллограф; 4- компьютер;

Увеличение эхо-сигнала в среднем было в 3,5 раза (пример показан на рисунке 8).

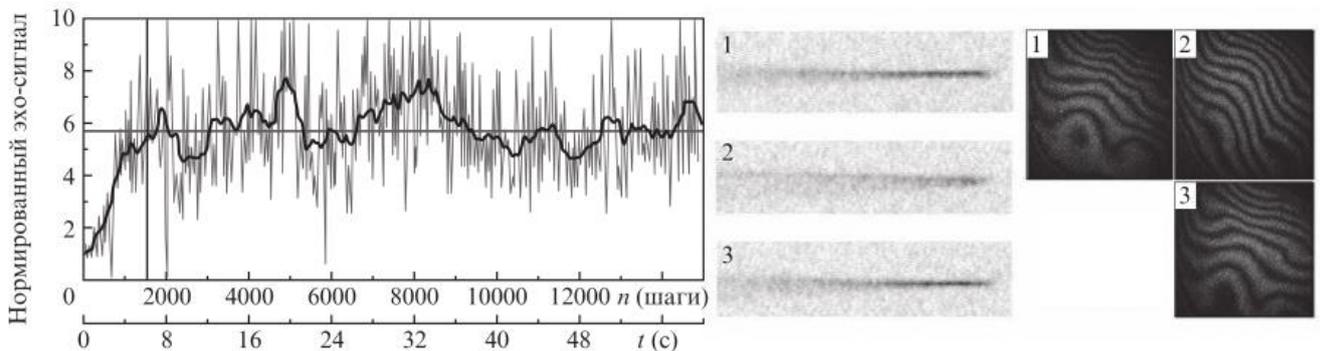


Рисунок 8- Пример работы установки [8]. Эхо-сигнал на приёмнике излучения дополнительного источника во время работы установки (а), фотографии (б) и интерферограммы основного лазерного пучка до внесения aberrаций (1), после внесения (2) и после адаптации(3). Атмосферные условия- слабый снегопад.

Недостатками установки, представленной в [8], были:

- 1) невозможность независимого изменения кривизны волновых фронтов основного и дополнительного лазерных пучков;
- 2) отсутствие контроля качества восстановления волнового фронта основного лазерного пучка.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АТМОСФЕРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ НАЧАЛЬНЫХ АБЕРРАЦИЙ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

Для изучения качества подавления начальных aberrаций волнового фронта лазерного пучка по сигналу обратного аэрозольного рассеяния от дополнительного лазерного источника была произведена модернизация стенда описанного в [8].

В приёмно-передатчике стенда реализована коаксиальная схема, когда зондирующий пучок имеет кольцевую форму и его внешний диаметр больше принимающей оптики. Внутренний диаметр пучка при этом примерно равен размеру приёмной апертуры системы. На стенде зондирующий (пилотный) лазерный пучок фокусируется передатчиком на некотором расстоянии, а приёмник, настроенный на дистанцию фокусировки и имеющий маленькое поле зрения, регистрирует рассеянное излучение (рисунок 9). Наличие aberrаций в лазерном пучке вызывает его уширение в фокусе и частичный или полный уход из поля зрения приёмника. При этом проходящий из атмосферы эхо-сигнал понижается. Наличие в передающем канале адаптивного зеркала позволяет исправлять аппаратные aberrации и улучшать волновой фронт пучка. Соответственно, когда повышается качество фокусировки, то и проходящий сигнал также возрастает. Достижение максимума эхо-сигнала означает максимально возможную для данных атмосферных условий и параметров адаптивного контура управления гибким зеркалом компенсацию начальных искажений волнового фронта.

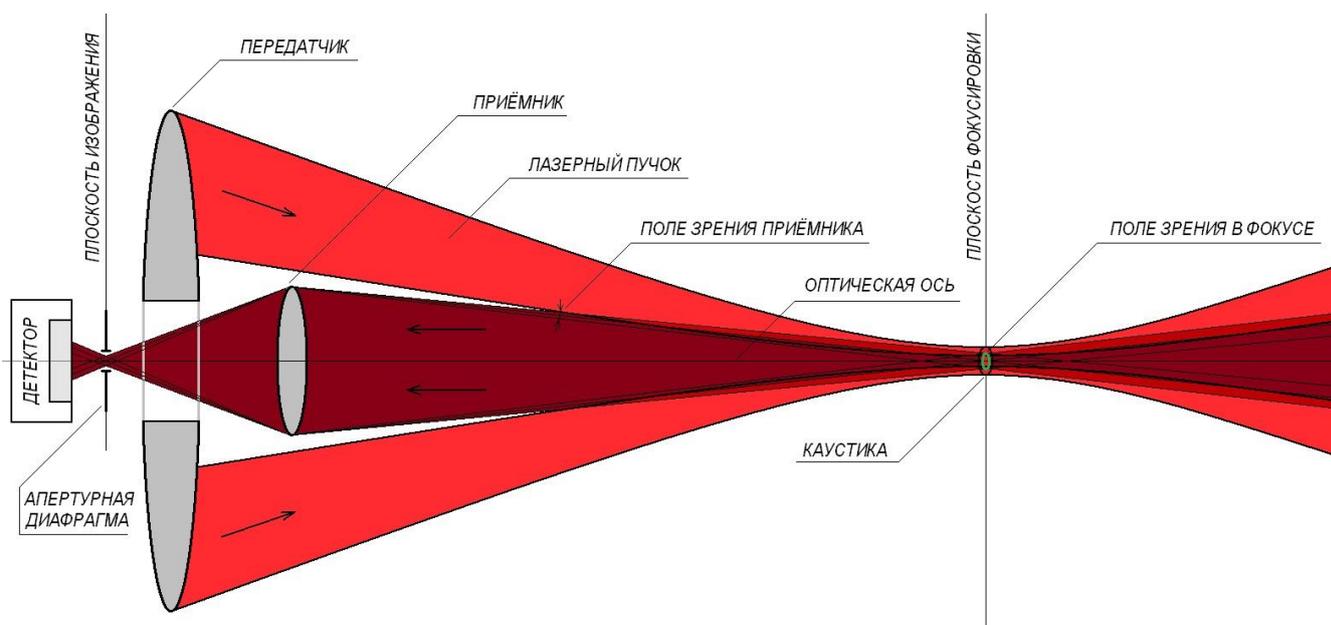


Рисунок 9- Схема апертурного зондирования

Атмосферный стенд имеет два лазерных источника. Импульсный ИК-лазер (1067 нм) используется для создания зондирующего (пилотного) пучка и для получения рассеянного сигнала. Непрерывный лазер видимого диапазона ($\lambda=532$ нм) играет роль основного пучка, aberrации волнового фронта которого компенсируются. Лазерные пучки точно совмещаются.

Выполненная при выполнении работы модернизация стенда [8] включает три основных элемента:

1) оптическая схема стенда изменена таким образом, что совмещение пучков основного и дополнительного излучения осуществляется не на выходе лазерных источников, а после их расширения линзовыми телескопами на дихроичной пластине больших размеров, что позволяет повысить точность совмещения оптических осей этих пучков и изменять кривизну их ВФ независимо друг от друга;

2) перед выходным телескопом в оптическую схему стенда введён дополнительный канал содержащий датчик волнового фронта, в результате чего появилась возможность идентификации типов существующих и искусственно вносимых в волновой фронт основного пучка aberrаций;

3) передатчик представляет собой телескоп Кассегрена, в центральной затенённой области которого располагается приёмный телескоп.

2.1 Структура стенда

Блок-схема стенда представлена на рисунке 10. В качестве основного (лазер №1) использован непрерывный волоконный лазер GLM-10 с длиной волны 532 нм. В качестве пилотного (лазер №2) использован импульсный волоконный лазер ИЛИ-1-50 с длиной волны 1067 нм. Пучки расширяются, сводятся вместе и поступают на гибкое зеркало (адаптивная оптика), контролируемое блоком управления. После гибкого зеркала через передающий телескоп они направляются в атмосферу. Часть излучения отводится на датчик волнового фронта, к которому подключен персональный компьютер (ноутбук). Таким образом, при помощи датчика происходит обработка и численное восстановление профиля волнового фронта основного пучка.

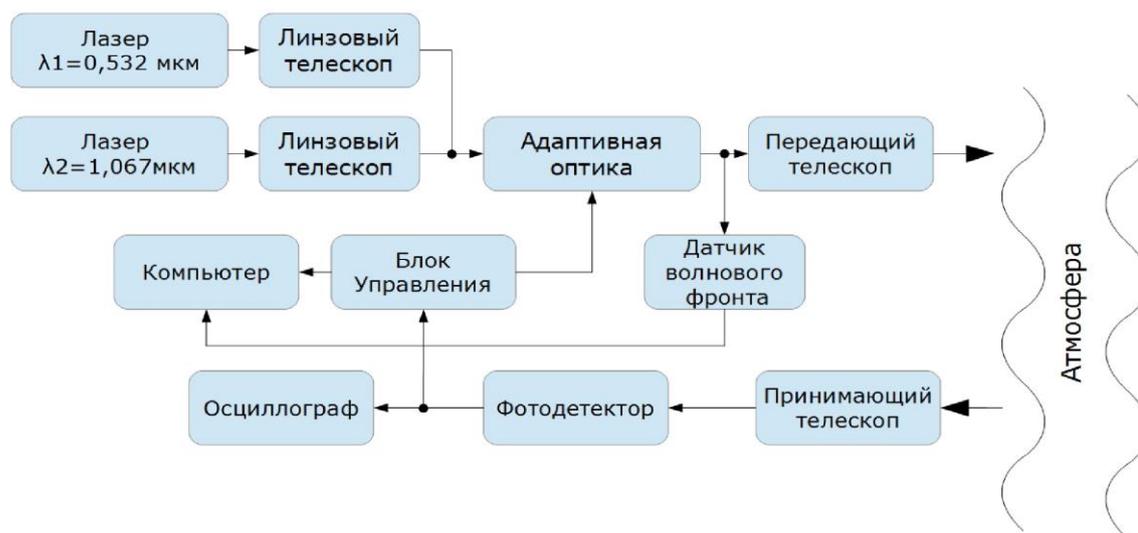


Рисунок 10 – Блок-схема атмосферного стенда.

Рассеянное назад излучение поступает на приёмный телескоп. При этом эхо-сигнал ИКизлучения пилотного лазера в режиме счета фотонов регистрируется фотоприемником (фотодетектор). Сигнал с фотоприемника идет на осциллограф и в блок управления. Блок управления накапливает принимаемый эхо-сигнал, который впоследствии используется для выработки управляющих напряжений для элементов гибкого зеркала. Осциллограф так же накапливает эхо-сигнал и на ряду с компьютером (информация на который поступает с блока управления) используется для визуализации величины принятого эхо-сигнала.

2.2 Оптическая схема стенда

Оптическая схема стенда и блоки управления элементами стенда представлены на рисунке 11. Пучки основного и пилотного лазеров расширяются линзовыми телескопами Л1-Л2 и Л3-Л4. Затем поворотное зеркало З1 направляет основной пучок на дихроичную пластину (светоделитель) ДП (отражение 0,532 мкм-97%, пропускание 1,064 мкм – 97%). После совмещения оптических осей пучки через систему зеркал З2, З3 попадают на гибкое (адаптивное) зеркало с блоком управления. Гибкое зеркало (ГЗ) направляет пучки на передающий телескоп Т50. Часть излучения при помощи светоделителя Св. и зеркала З4 отводится на датчик волнового фронта Шака-Гартмана, который позволяет отслеживать и идентифицировать aberrации волнового фронта в передающей системе.

Передающий телескоп Т50 схемы Кассегрена состоит из пары зеркал (парабола и гипербола) и имеет диаметр выходной апертуры 500 мм с фокусным расстоянием 4300 мм. Линза Л5 ($f=700$ мм) используется для согласования с телескопом Т50, т.е. фокус Л5 совпадает с фокусом передающего телескопа. Согласованные друг с другом линза Л5 и телескоп Т50 расширяют пучки примерно в 6 раз, чем достигается полное заполнение

передающей апертуры в телескопе Т50. В итоге на выходе получаются пучки кольцевой формы диаметром 500 мм.

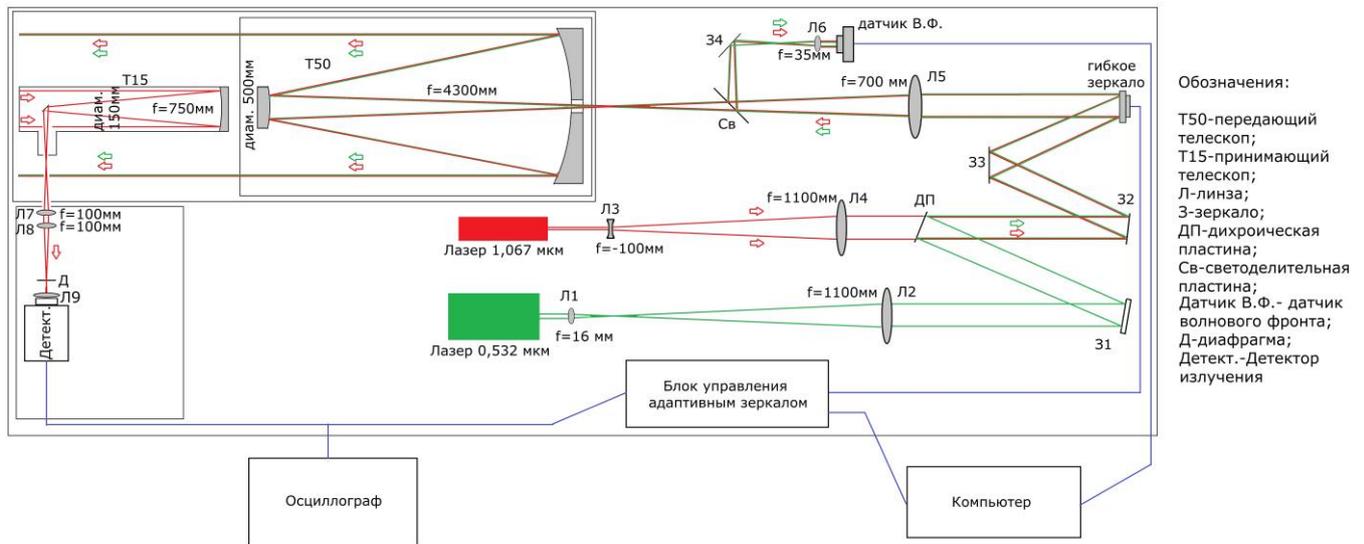


Рисунок 11 – Оптическая схема стенда

Принимающий телескоп на схеме на рисунке представлен 150 мм параболой (телескоп Ньютона) с фокусным расстоянием 750 мм. Все проходящее излучение отводится в сторону плоским поворотным зеркалом эллиптической формы, закреплённым на растяжках внутри телескопа. Затем осуществляется перенос фокуса телескопа с помощью конденсора, состоящего из линз Л7 ($f=100$ мм) и Л8 ($f=100$ мм). В фокусе проходящего пучка излучения пилотного лазера располагается апертурная диафрагма Д, размер которой определяет поле зрения ИК приемника. За диафрагмой Д стоит фокусирующая линза Л9, встроенная в фотоприемный модуль. Сигнал с детектора поступает на осциллограф и в блок управления адаптивным зеркалом.

Технические характеристики приёмо-передатчика приведены в таблице 1. Зондирующий лазер имеет минимальную частоту повторения импульсов 50 КГц, при этом максимальная выходная мощность составляет 50 Вт. Мощность основного непрерывного лазера можно регулировать от 0,5 Вт до 10 Вт. ИК детектор фирмы Hamamatsu имеет квантовую эффективность 2% и в чистой атмосфере в нашей установке работает в режиме счёта фотонов. Поэтому для управления адаптивным зеркалом необходимо использовать режим накопления эхо-сигналов.

Таблица 1 - технические характеристики приёмо-передатчика

Лазер1067 нм (пилотный)	
Модель	ИЛИ-1-50
Тип	импульсный
Мощность максимальная	50 Вт
Частота повторения импульсов	50 КГц
Длительность импульса	200 нс
Диаметр пучка (гауссовый 1/e ²)	9 мм
Лазер532 нм (основной)	
Модель	GLM-10
Тип	непрерывный
Мощность минимальная	0,5 Вт
Мощность максимальная	10 Вт
Диаметр пучка (гауссовый 1/e ²)	1,5 мм
Передающий телескоп	
Тип	Кассегрен
Диаметр	500 мм
Фокусное расстояние	4300 мм
Принимающий телескоп	
Тип	Ньютон
Диаметр	150 мм
Фокусное расстояние	750 мм
Поле зрения	40 мкрад
Фотоприемник (ФЭУ)	
Модель	H10330-75
Режим работы	счетный
Квантовая эффективность (1067 нм)	2%
Входная апертура	18 мм

Технические характеристики адаптивного зеркала приведены в таблице 2.

Использовалась продукция фирмы «Визионика» - биморфное 32-х сегментное зеркало диаметром 100 мм.

Технические характеристики гибкого зеркала

Таблица 2.

Модель	U-Flex-100
Тип	биморфное
Число сегментов	32
Величина деформации	25 мкм
Диаметр	100 мм
Максимальная частота	1 КГц
Диапазон напряжений	+/- 300 В

Технические характеристики датчика волнового фронта Шака-Гартмана приведены в таблице 3. Здесь так же использовалась продукция фирмы «Визионика».

Таблица 3 - технические характеристики датчика волнового фронта .

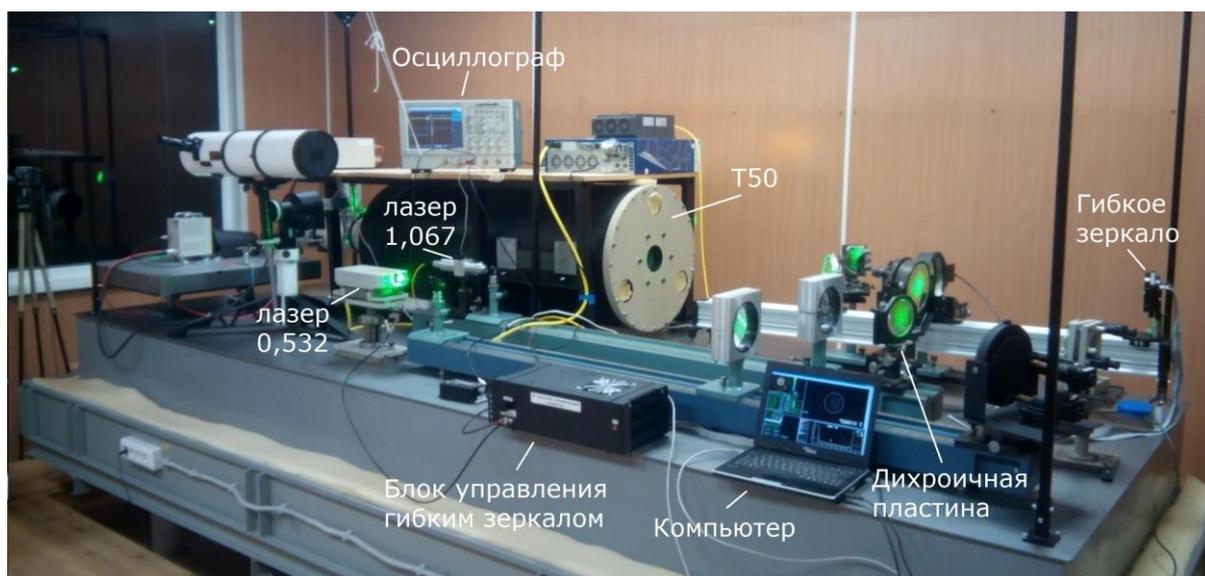
Модель	ShaH-0620(a)
Диаметр входной апертуры	6 мм
Пространственное разрешение	150 мкм
Количество пятен гартманаграммы	1500
Максимальный наклон волнового фронта	+/- 25 мрад
Минимальный радиус кривизны	+/- 0,12 м
Повторяемость результатов (RMS)	0,4 нм
Абсолютная точность (RMS)	$\lambda/100$
Относительная точность (RMS)	$\lambda/1800$
Максимальный радиус кривизны волнового фронта	5,8км
Частота измерений	До 60 Гц
Рабочая длина волны	350-1100 нм

Технические характеристики 32-х канального оптимизирующего контроллера для управления адаптивным зеркалом, осциллографа Tektronix и двух видеокамер (ПЗС матрицы) приведены в табл. 4.

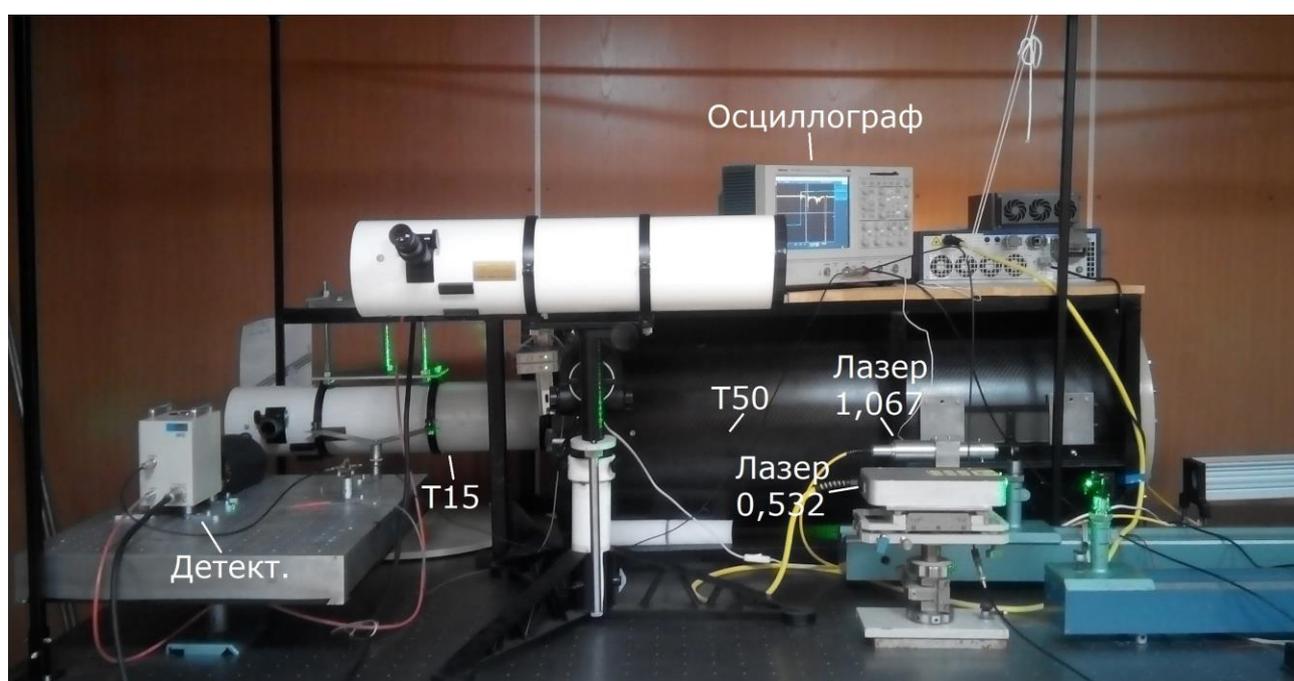
Таблица 4 - технические характеристики вспомогательной аппаратуры

Оптимизирующий контроллер	
Число каналов	32
Диапазон напряжений	+/- 100 В
Частота управления	500 Гц
Алгоритм работы	САПГС (стохастический алгоритм параллельного градиентного спуска)
Интервал накопления	400 нс
Положение строба	кратное 400 нс
Время накопления	от 40 мксек
Осциллограф	
Модель	Tektronix, TDS-5034
Частота	500 МГц
Режим работы	накопление импульсов

Внешний вид стенда показан на фотографиях на рисунке 12. Используются обозначения некоторых элементов, которые полностью совпадают с обозначениями на рисунке 2. Все элементы установки смонтированы на стальном столе размером 4000 мм на 1500 мм. Стол лежит на песчаном грунте в металлической емкости для уменьшения влияния вибраций. Верх рамы телескопа Т50 использован для размещения таких приборов как осциллограф, блок управления фотодетектора и т.л.



(a)



(б)

Рисунок 12 – внешний вид стенда: задняя часть установки (а); передняя левая часть установки (б).

Телескоп, располагающийся между детектором излучения и лазерами, используется для удалённого визуального наблюдения за пучками. Внешний с приёмником излучения показан на рисунке 13.

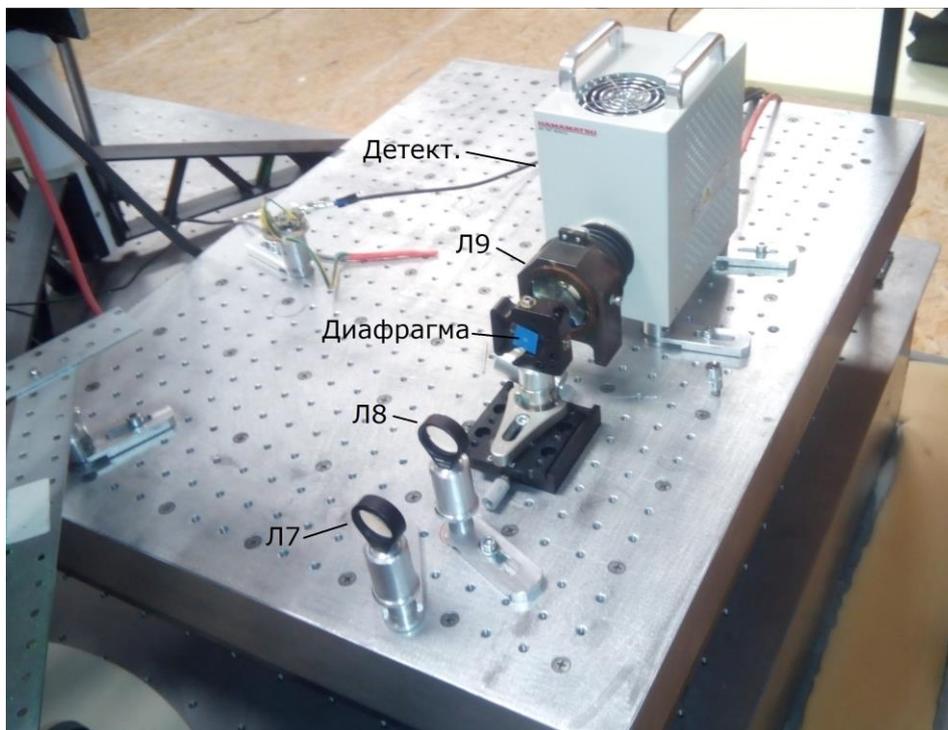


Рисунок 13 – Внешний вид стенда (столлик с приёмником излучения).

Диафрагма, установленная перед ФЭУ, ограничивала угол поля зрения приемника [5]. Ограничение угла поля зрения приёмника связано со следующим: при большом угле поля зрения, когда всё излучение в плоскости фокусировки попадает на приёмник, алгоритм управления гибким зеркалом не может выделить дальнейшего направления для движения, т.к. полная мощность прошедшего излучения остаётся прежней. Таким образом, в идеальном случае, требуется установка диафрагмы с углом поля зрения сравнимым, или даже меньшим, чем размер дифракционного пятна в плоскости, от которой приёмная система строит изображение. Однако с уменьшением размера диафрагмы излучения, попадающего на приёмник, недостаточно для вычленения сигнала. Таким образом, необходимо опытным путем выбирать диафрагму. В нашем случае это была диафрагма диаметром 30 мкм.

2.3 Датчик волнового фронта Шака-Гартмана

Контроль aberrаций производился при помощи датчика Шака-Гартмана ShaH-0620(A) производства ООО «Визионика». Наиболее удобно для описания присутствующих в системе aberrаций является полиномиальное разложение, а именно, использование полиномов Цернике.

Для разложения полиномов Цернике использовалось следующее выражение в полярных координатах для порядков выше седьмого:

$Z_n^m(\rho, \theta) = R_n^m \exp(im\theta)$, $0 \leq \rho \leq 1$; $\rho = r/r_0$; $0 \leq \theta \leq 2\pi$; $r(x, y) = (x^2 + y^2)^{1/2}$,
 $\theta = \arctan(y/x)$,

где r_0 – радиус единичного круга, и $R_n^m(\rho) = \sum_{i=0}^{n-m} \frac{(-1)^i (n-i)!}{i! \left[\frac{1}{2}(n+m-i) \right]! \left[\frac{1}{2}(n-m-i) \right]!} \rho^{n-2i}$.

Для порядков более низких порядков в данном случае используется следующее :

Таблица 5 – разложение aberrаций в представлении Цернике

N	M	I	Формульное выражение	Название
0	0	0	1	Поршень
1	-1	1	$2r \sin(\theta)$	Y-наклон
1	1	2	$2r \cos(\theta)$	X-наклон
2	-2	3	$\sqrt{6} r^2 \sin(2\theta)$	Астигматизм
2	0	4	$\sqrt{3}(2r^2 - 1)$	Дефокусировка
2	2	5	$\sqrt{6} r^2 \cos(2\theta)$	Астигматизм
3	-3	6	$2\sqrt{2} \sin(3\theta)$	Трифойл
3	-1	7	$2\sqrt{2}(3r^3 - 2r) \sin(\theta)$	Кома
3	1	8	$2\sqrt{2}(3r^3 - 2r) \cos(\theta)$	Кома
3	3	9	$2\sqrt{2} \cos(3\theta)$	Трифойл
4	-4	10	$\sqrt{10} r^4 \sin(4\theta)$	
4	-2	11	$\sqrt{10}(4r^4 - 3r^3) \sin(2\theta)$	
4	0	12	$\sqrt{5}(6r^4 - 6r^2 + 1)$	Сферическая aberrация
3	2	13	$\sqrt{10}(4r^4 - 3r^3) \cos(2\theta)$	
3	4	14	$2\sqrt{10} r^4 \cos(4\theta)$	
5	-5	15	$2\sqrt{3} r^5 \sin(5\theta)$	
5	-3	16	$2\sqrt{3}(5r^5 - 4r^3) \sin(3\theta)$	
5	-1	17	$2\sqrt{3}(10r^5 - 12r^3 + 3r) \sin(\theta)$	
5	1	18	$2\sqrt{3}(10r^5 - 12r^3 + 3r) \cos(\theta)$	
5	3	19	$2\sqrt{3}(5r^5 - 4r^3) \cos(3\theta)$	
5	5	20	$2\sqrt{3} r^5 \sin(5\theta)$	
6	-6	21	$\sqrt{14} r^6 \sin(6\theta)$	

Таблица 5 - продолжение

6	-4	22	$\sqrt{14}(6r^6-5r^4)\sin(4\theta)$	
6	-2	23	$\sqrt{14}(15r^6-20r^4+6r^2)\sin(2\theta)$	
6	0	24	$\sqrt{7}(20r^6-30r^4+12r^2-1)$	
6	2	25	$\sqrt{14}(15r^6-20r^4+6r^2)\cos(2\theta)$	
6	4	26	$\sqrt{14}(6r^6-5r^4)\cos(4\theta)$	
6	6	27	$\sqrt{14}r^6\cos(6\theta)$	
7	-7	28	$4r^7\sin(7\theta)$	
7	-5	29	$4(7r^7-6r^5)\sin(5\theta)$	
7	-3	30	$4(21r^7-30r^5+10r^3)\sin(3\theta)$	
7	-1	31	$4(35r^7-60r^5+30r^3-4r)\sin(\theta)$	
7	1	32	$4(35r^7-60r^5+30r^3-4r)\cos(\theta)$	
7	3	33	$4(7r^7+6r^5)\sin(5\theta)$	
7	5	34	$4(7r^7-6r^5)\cos(5\theta)$	
7	7	35	$4r^7\cos(7\theta)$	

где N- порядок полинома, M- угловое число, I- порядковый номер.

Таким образом, можно представить aberrации волнового фронта в виде набора полиномов ортогональных на единичном круге.

Программное обеспечение использовавшегося датчика позволяет сделать разложение по полиномам Цернике автоматически.

2.4 Схема атмосферных измерений

Эксперимент проводился на окраине г. Томска на полигоне Института оптики атмосферы (Базовый экспериментальный комплекс). В длину территория полигона немногим более полукилометра. Трасса была горизонтальная. Схема эксперимента показана на рисунке 14.

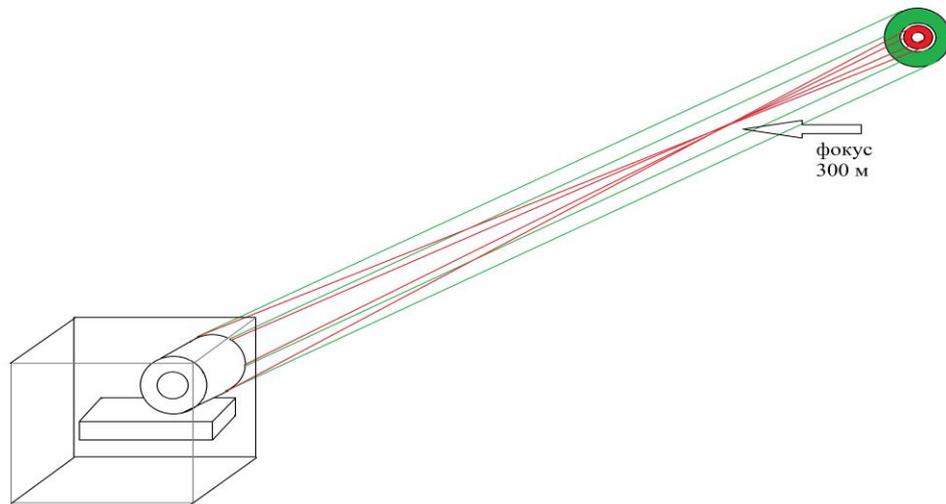


Рисунок 14– Схема эксперимента

После передающего телескопа оба лазерных пучка шли в атмосферу, где пилотный лазерный пучок фокусировался на расстоянии 300 метров, в то время как основной лазерный пучок был коллимированным. Прошедшее через диафрагму рассеянное излучение пилотного пучка попадало на ФЭУ. Аберрации вносились искусственно при помощи ГЗ. Поскольку зеркало располагается после совмещения лазерных пучков, они приобретали одинаковые аберрации волнового фронта.

Для контроля фокусировки зондирующего и коллимации силового пучков, а так же точности совмещения их осей на расстоянии 300 метров был установлен экран. Проверка соосности распространения лазерных пучков проводилась следующим образом: при помощи линзового телескопа силовой пучок фокусировался на экран и совмещался с пилотным. После коллимации силового пучка, пилотный оставался в его центре. Так же на экране замерялись размеры пучков при отсутствии, внесении и компенсации искажений волнового фронта. С помощью светоделительной пластины и зеркала часть основного пучка отводилась на датчик волнового фронта Шака-Гартмана. Проводилась дополнительная юстировка системы для минимизации всех присутствующих в системе собственных аберраций. Полученные в процессе юстировки данные на датчике Шака-Гартмана использовались в качестве базового уровня, т.е. предполагалось, что система не имеет искажений.

В комплекте с гибким зеркалом изготовителем был предоставлен набор управляющих напряжений, которые нужно подавать на электроды ГЗ для воспроизведения в волновом фронте пучка падающего на ГЗ излучения тех или иных типовых аберраций. Использование предоставленных напряжений позволяет задавать в системе определённый тип аберраций и в процессе адаптивного управления волновым фронтом по сигналу

обратного атмосферного рассеяния контролировать скорость и качество их компенсации. Сравнение интерферограмм выданных производителем и полученных на стенде показаны на рисунке 15.

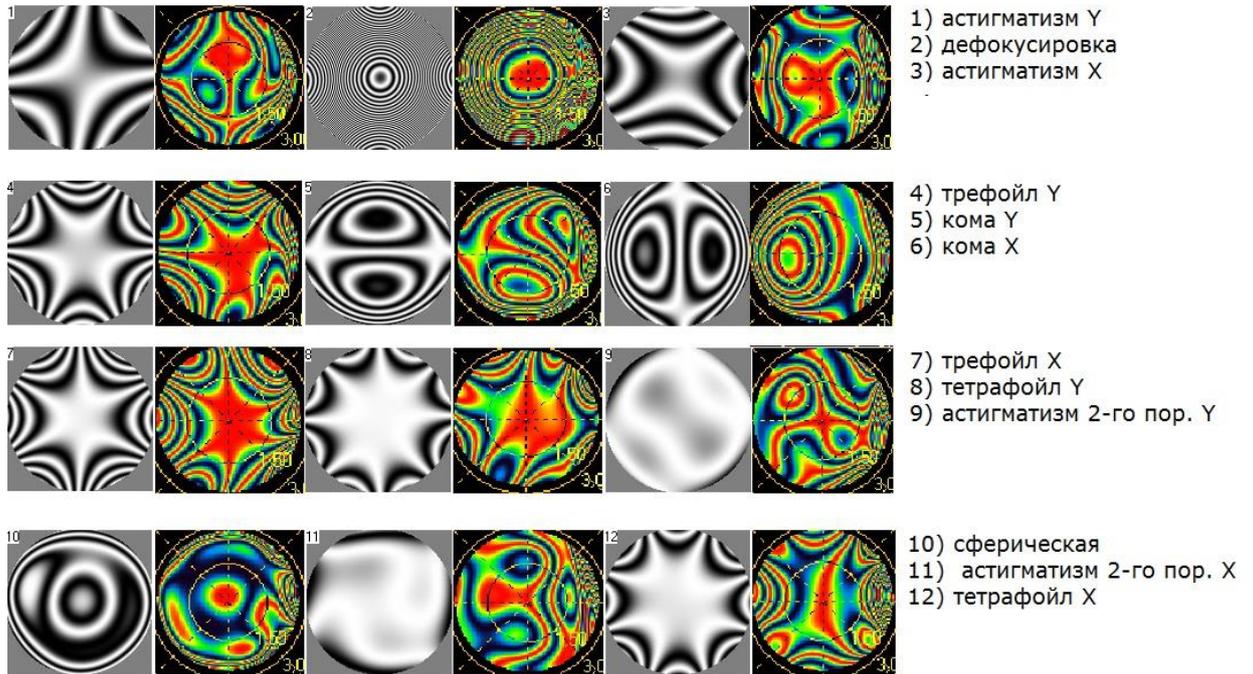


Рисунок 15 - Сравнение «паспортных» (чёрно-белых) и полученных на установке (цветных) интерферограмм aberrаций ВФ в представлении Цернике

Отличия вызваны различными факторами, такими как, геометрия эксперимента, блоком управления отличающимся от поставляемыми производителями ГЗ и т.д.

2.5 Методика измерений

Измерения проводились следующим образом: перед установкой гибкого зеркала устанавливалось плоское. Датчик волнового фронта запоминал полученные данные о волновом фронте прошедшего излучения основного лазерного источника и в дальнейшем использовал его в качестве опорного для оценки величины aberrаций создаваемых гибким зеркалом.

Далее на место плоского зеркала устанавливалось гибкое. В начальный момент работы с ГЗ происходило искусственное внесение aberrаций волнового фронта путём подачи на его элементы напряжений различных конфигураций. Это приводило к тому, что распределение излучения на аэрозоле на расстоянии 300 метров было «размыто». Рассеяное назад от аэрозоля излучение собиралось приёмной оптической системой, которая строила изображение пучка на аэрозоле с расстоянием 300 метров на диафрагме. Диафрагма использовалась для ограничения угла поля зрения ФЭУ. Амплитуда сигнала на приемнике выводилась на монитор компьютера и экран осциллографа. Затем включался блок

управления гибким зеркалом и происходила перефокусировка пучка на 300 метров. В результате работы блока управления aberrации волнового фронта компенсировались, уменьшался размер пучка в области фокуса приёмной системы и, соответственно, в плоскости изображения, что приводило к увеличению мощности излучения в поле зрения диафрагмы. Таким образом, размер пучка на экране уменьшался и сигнал, принятый с ФЭУ, возрастал. Одновременно с этим, aberrации вычисляемые при помощи датчика Шака-Гартмана меняли своё значение.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Возможность подавления искусственно введенных aberrаций волнового фронта основного лазерного источника на длине волны $\lambda_1 = 0,532$ мкм в результате его адаптивной компенсации методом апертурного зондирования с использованием для управления гибким зеркалом сигнала обратного атмосферного рассеяния зондирующего излучения на длине волны $\lambda_2 = 1,067$ мкм из области фокусировки на расстоянии 300 м проверялась по изменению волнового фронта регистрируемом датчиком волнового фронта Шака-Гартмана.

Блок управления ГЗ имеет диапазон напряжений ± 100 В, в то время как зеркало рассчитано на максимальные напряжения ± 300 В. Таким образом не использовался весь диапазон напряжений ГЗ. В итоге, падение эхосигнала происходило только при aberrации типа «дефокусировка», дающая максимальные искажения ВФ основного пучка.

На рисунках 16-20 представлены типичные данные пяти реализаций: величина эхосигнала от зондирующего пучка на приёмнике излучения в ходе работы стенда; восстановленный профиль волнового фронта основного лазерного пучка до и после адаптации. Нормировка эхо-сигнала происходила по 40 итерациям до включения адаптации. Среднеквадратичное отклонение до адаптации было $15 \pm 3\%$, в ходе работы стенда порядка $25 \pm 3\%$.

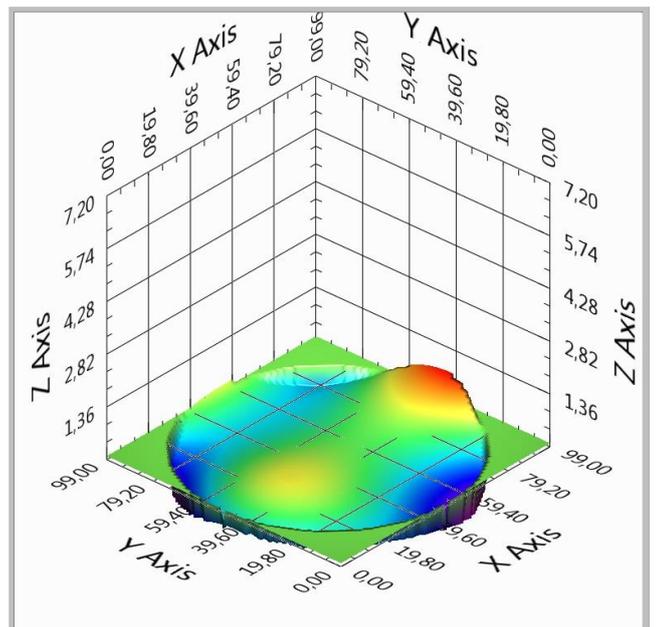
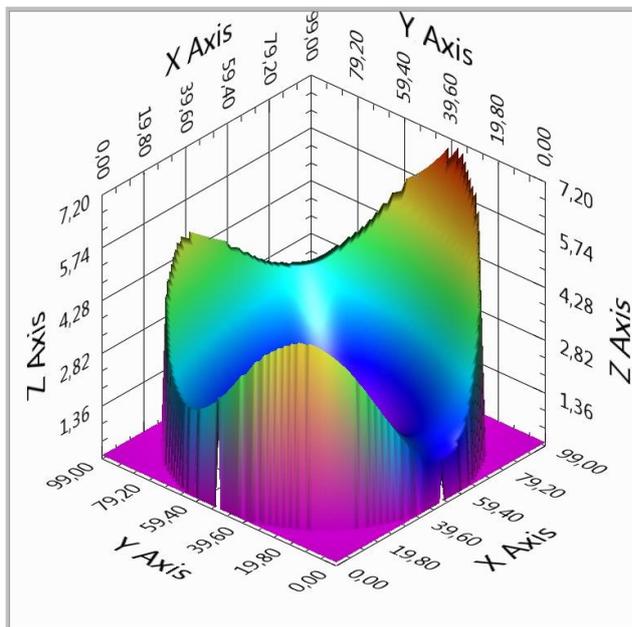
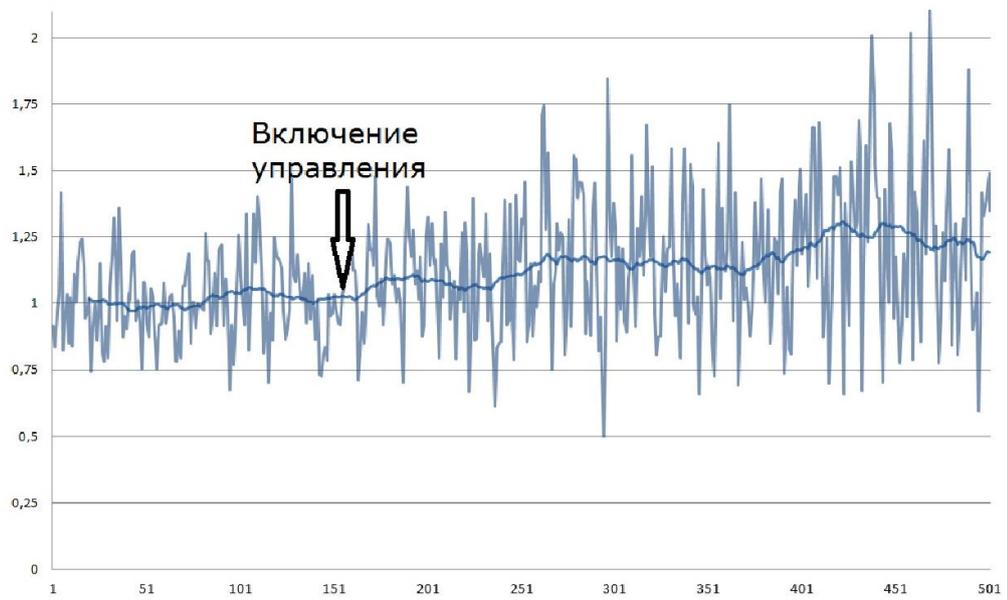


Рисунок 16- нормированный эхо-сигнал и восстановленный волновой фронт до и после адаптивного управления

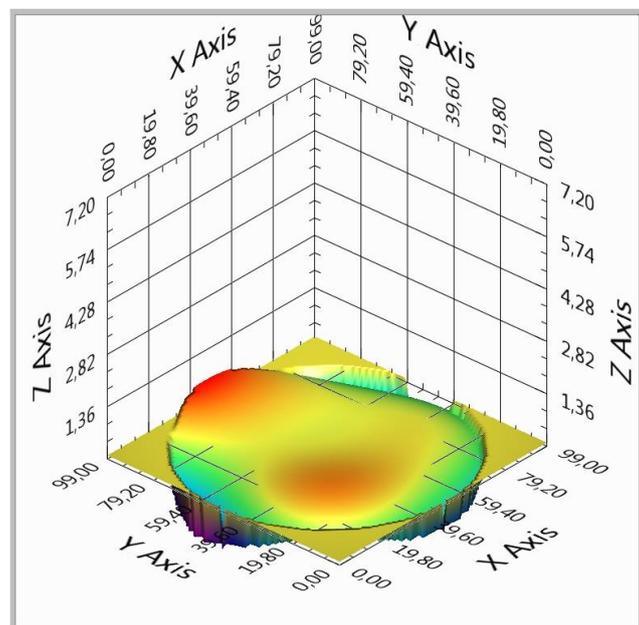
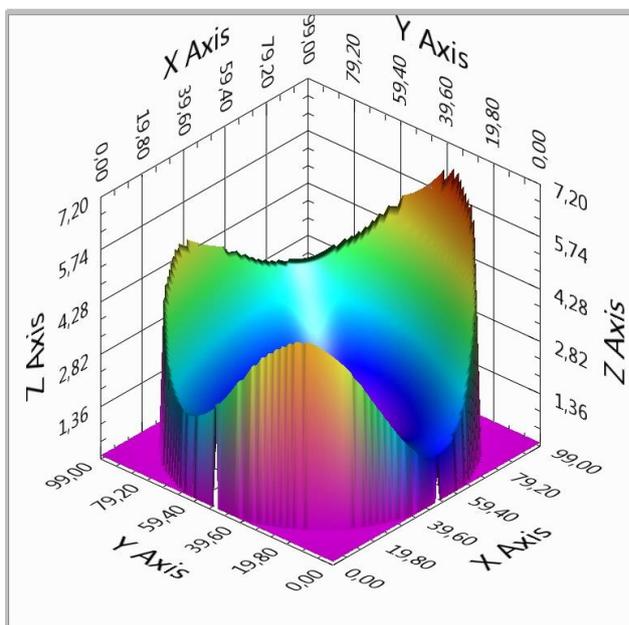


Рисунок 17- нормированный эхо-сигнал и восстановленный волновой фронт до и после адаптивного управления

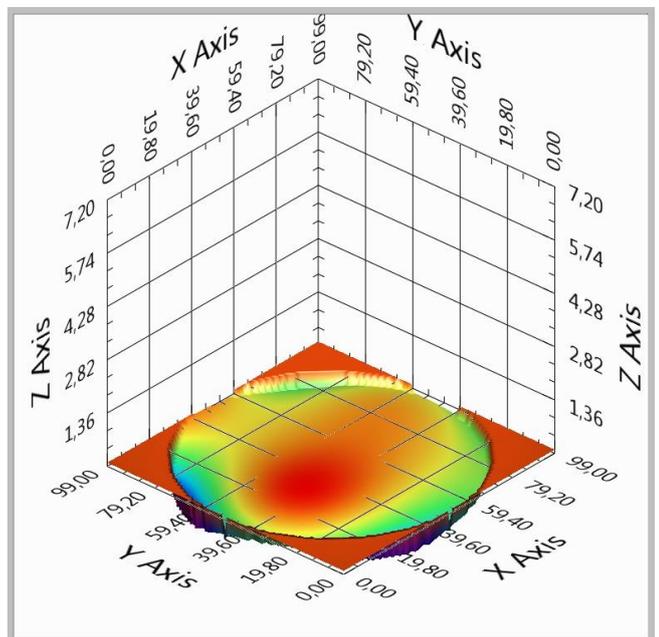
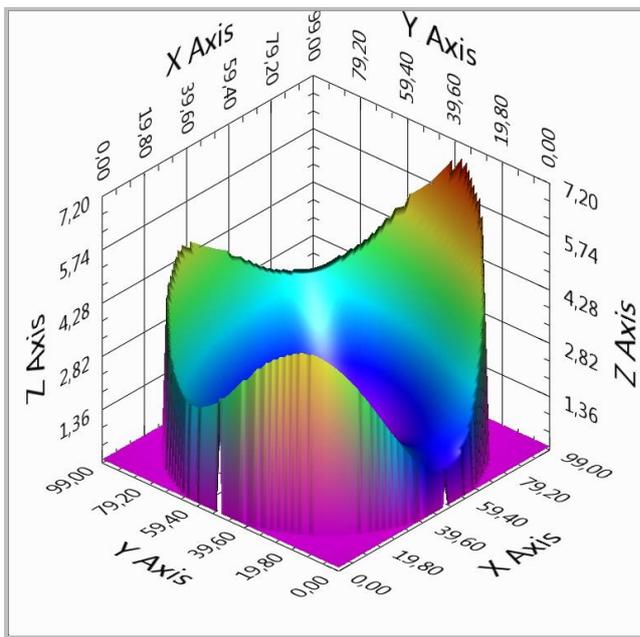


Рисунок 18- нормированный эхо-сигнал и восстановленный волновой фронт до и после адаптивного управления

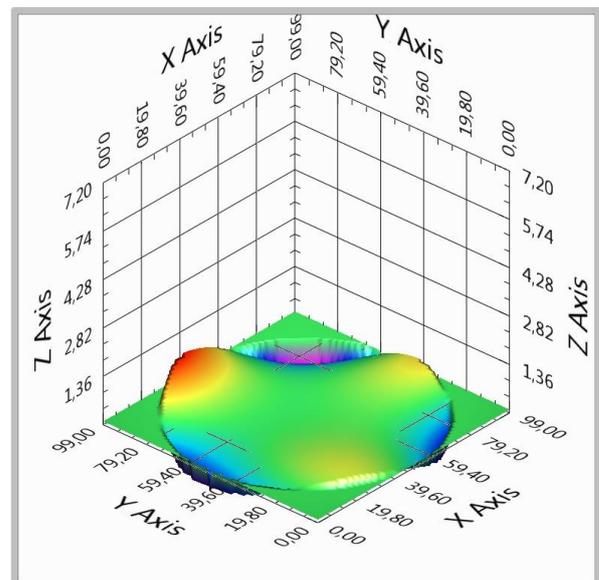
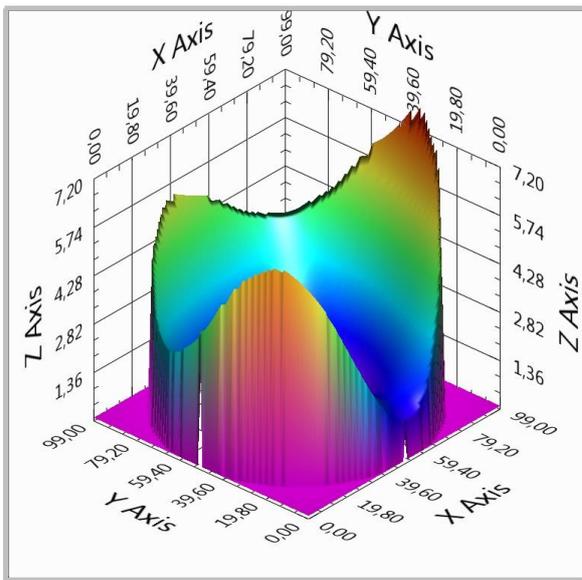
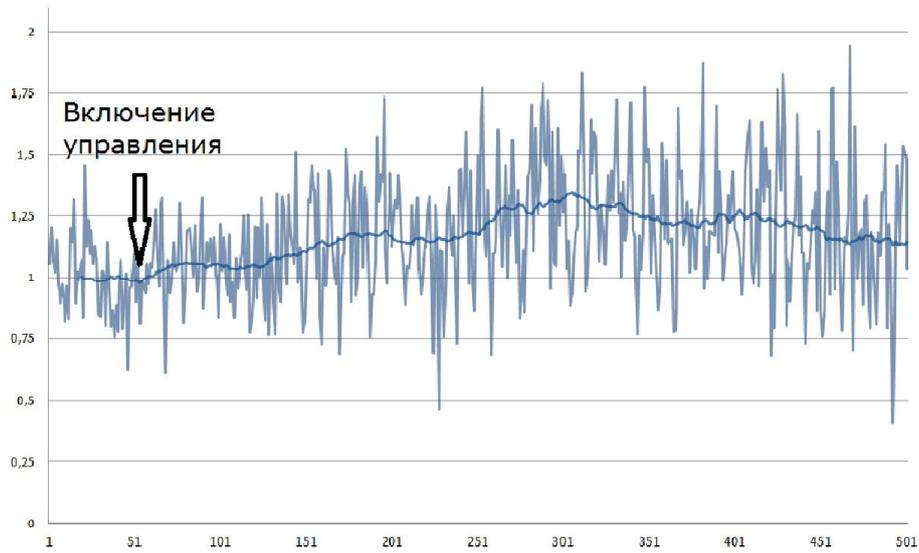


Рисунок 19- нормированный эхо-сигнал и восстановленный волновой фронт до и после адаптивного управления

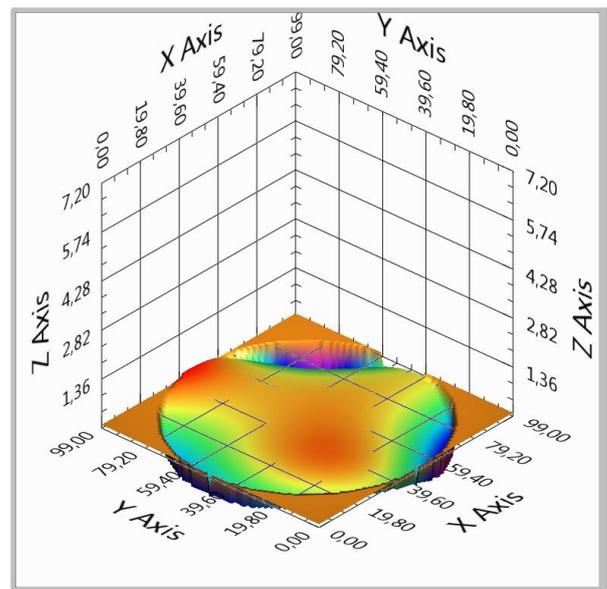
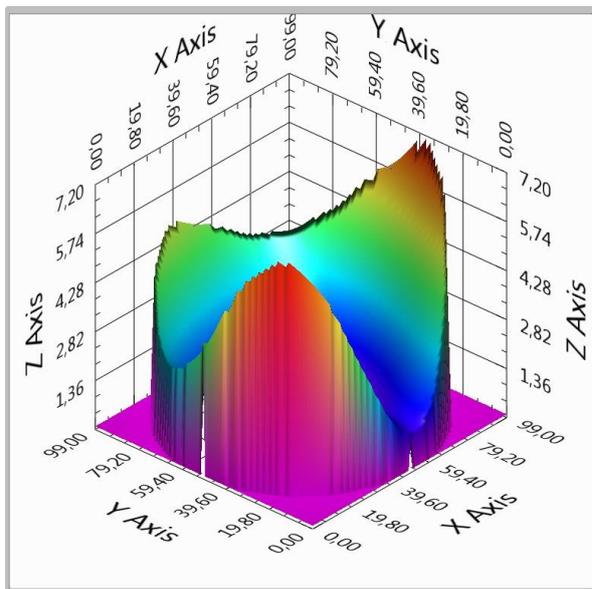
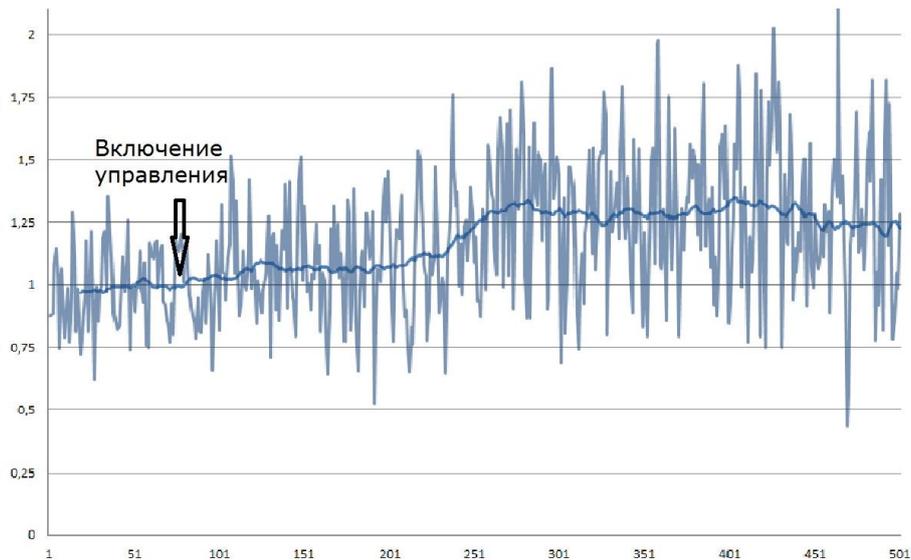


Рисунок 20- нормированный эхо-сигнал и восстановленный волновой фронт до и после адаптивного управления

Видно, что хотя увеличение эхо-сигнала от зондирующего лазерного пучка было небольшим (примерно в 1,2-1,3 раза), происходило значительное подавление aberrаций ВФ основного лазерного пучка- максимальные отклонения волнового фронта уменьшались в 7 раз (примерно с 7λ до 1λ).

Таким образом, адаптивное управление по сигналу обратного атмосферного рассеяния дополнительного лазерного источника на другой длине волны позволяет значительно снизить уровень aberrаций ВФЛП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных работ можно сделать следующие выводы:

- 1) введение в оптическую схему атмосферного стенда двух телескопов позволяет осуществлять независимую фокусировку основного и дополнительного лазерных пучков;
- 2) внедрение дополнительного оптического канала содержащего в себе датчик Шака-Гартмана позволяет отслеживать компенсацию aberrаций волнового фронта основного лазерного в ходе адаптивного управления по сигналу обратного атмосферного рассеяния излучения дополнительного лазерного источника с использованием методом апертурного зондирования;
- 3) атмосферный эхо-сигнала лазерного излучения на длине волны по 1,069 мкм с дистанции 300 м позволяет выполнять адаптивное управление гибким зеркалом и осуществлять коррекцию искусственно введенных aberrаций волнового фронта пучка излучения другого (основного) лазерного источника на длине волны 0,532 мкм. Происходит падение aberrаций волнового фронта, измеренных датчиком Шака-Гартмана, до уровня в 1λ от плоской волны, при начальных отклонениях за счет aberrаций до 7λ .

В дальнейшем рекомендуется экспериментальное исследование качества подавления aberrаций при различной дальности фокусировки дополнительного лазерного пучка, а так же увеличение уровня вносимых искусственно aberrаций ВФ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhmylevskii V.V., Ignatiev A.B., Konyaev Yu.A., et al, Abstr. XI Joint Int. Symp. «*Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics*» Tomsk, 2004, p.92
2. Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатъев А.Б. и др., О возможности использования обратного аэрозольного рассеяния в адаптивном контуре атмосферных оптических систем // *Квант. Электрон.* 2008. Т. 38 № 8. С. 764-768.
3. Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатъев А.Б., и др, Коллимация начального волнового фронта частично когерентного светового пучка по сигналу обратного рассеяния // *Оптика и спектроскопия.* 2010. Т. 108 № 1. С. 113-122.
4. Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатъев А.Б, и др., Компенсация абберационных искажений волнового фронта импульсного лазерного пучка по сигналу обратного рассеяния // *Оптика и спектроскопия.* 2011. Т. 111 № 3. С. 488-496.
5. Банах В.А., Ларичев А.В., Разенков И.А., и др., Апробация стохастического алгоритма параллельного градиентного спуска в лабораторных условиях // *Оптика атмосф. и океана.* 2012. Т. 25 № 12. С. 1099-1104.
6. Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатъев А.Б, и др, Подавление начальных искажений лазерного пучка при использовании рассеянного на экране излучения для управления гибким зеркалом // *Оптика атм. и океана.* 2013. Т. 26 № 12. С. 1023-11028.
7. Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатъев А.Б, и др., Управление начальным волновым фронтом оптического пучка по сигналу обратного атмосферного рассеяния при несоосном приеме рассеянного излучения // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27 № 11. С. 962-969.
8. Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатъев А.Б, и др., 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., V 15, № 10, P. 2745-2758.*
10. Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатъев А.Б, и др., Компенсация абберационных искажений волнового фронта по сигналу обратного рассеяния в атмосфере при бистатической схеме локации // *Распространение радиоволн (РРВ-24)* труды конференции. 2014 Т.2 2014 С. 184-187
11. Кусков В.В., Цвык Р.Ш., Шестернин А.Н. Влияние угла поля зрения на компенсацию начальных искажений волнового фронта лазерного пучка // *Известия вузов. Физика* 2013 Т.56 №8/3 С.221 ;
12. Кусков В.В., Цвык Р.Ш., Шестернин А.Н. Зависимость компенсации начальных искажений волнового фронта лазерного пучка от угла поля зрения // *XX юбилейная рабочая группа «Аэрозоли Сибири» Тезисы докладов.* 2013 С.92.;
13. Кусков В.В Компенсация начальных искажений волнового фронта по сигналу обратного рассеяния на аэрозоле // *Труды всероссийской конференции студенческих научно-исследовательских инкубаторов 15-17 мая 2014 г. Томск* С.121;
14. Кусков В.В. Компенсация начальных искажений волнового фронта // *Актуальные проблемы радиофизики. Труды международной молодежной научной школы 9–12 октября 2014 г. Томск;*
15. Кусков В.В., Цвык Р.Ш., Сазанович В.М., и др. Результаты атмосферного эксперимента по компенсации начальных искажений волнового фронта // *Аэрозоли Сибири. Юбилейная XX Рабочая группа: тезисы докладов.* г. Томск 2014 С.93;
16. Кусков В.В., Цвык Р.Ш., Сазанович В.М., и др. Установка для калибровки угла поворота автоматизированного зеркала // *Аэрозоли Сибири. Юбилейная XX Рабочая группа: тезисы докладов.* г. Томск 2014 С.93;

17. Кусков В.В. Шестернин А.Н. Автоматизация компенсации разъюстировки оптических осей в установке по уменьшению aberrаций волнового фронта// *Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы :Тезисы докладов XXI международного симпозиума 22-26 июня 2015. г. Томск, С.36;*
18. Кусков В.В. Шестернин А.Н. Компенсация начальных aberrаций волнового фронта в соосной схеме «передатчик- приёмник» // *Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы :Тезисы докладов XXI международного симпозиума 2015. г. Томск, С.36;*
19. Кусков В.В. Шестернин А.Н. Компенсация разъюстировки осей лазерных пучков с использованием дихроичной пластины// *Аэрозоли Сибири. XXII Рабочая группа: тезисы докладов. г. Томск 2015 С.79;*
20. Кусков В.В. Шестернин А.Н. Устройство совмещения лазерных пучков на основе дифракционной решетки и управляемого поворотного зеркала// *Аэрозоли Сибири. XXII Рабочая группа: тезисы докладов. г. Томск 2015 С.80;*
21. Кусков В.В., Разенков И.А., Гордеев Е.В. Контроль качества коррекции aberrаций адаптивной системы по сигналу обратного аэрозольного рассеяния// *Аэрозоли Сибири. XXIII Рабочая группа: тезисы докладов. г. Томск 2016. С.134*

ПРИЛОЖЕНИЕ А
МИНОБРАНАУК РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
Высшего профессионального образования
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

ОТЧЁТ

о проведении патентно-информационных исследований по теме «**Контроль качества компенсации начальных aberrаций волнового фронта лазерного пучка**»

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие данные об объекте исследований.....	3
1.1. Краткое описание исследуемого объекта, его назначение, область применения.....	3
2. Основная (аналитическая) часть отчета о патентных исследованиях.....	4
3. Заключение.....	5

1. Общие данные об объекте исследований

В последние годы всё чаще появляются статьи посвященные исследованию возможности компенсации начальных aberrаций волнового фронта частично когерентного лазерного пучка. Возможно это стало благодаря распространению ЭВМ с высокой скоростью быстрого действия и созданию в 80-е годы XX века управляемого гибкого зеркала. Такие системы призваны улучшить качество передаваемого пучка в режиме реального времени.

1.1. Краткое описание исследуемого объекта, его назначение, область применения

Мощное лазерное излучение является частично когерентным. Это приводит к неравномерному нагреву оптических элементов и как следствие к искажениям волнового фронта в передающей системе. В случае слабой турбулентности или коротких атмосферных трасс, эти начальные aberrации являются основным фактором увеличения расходимости лазерного излучения.

Контролировать присутствующие в системе aberrации волнового фронта можно используя датчик Шака-Гартмана.

Приёмно-передающая система, используется для контроля и компенсации начальных aberrаций волнового фронта лазерного пучка. Суть системы заключается в том, что когерентный пучок идущий от одного лазерного генератора совмещаясь с пучком от второго лазерного генератора через управляемое гибкое зеркало попадает в передающий телескоп. Часть излучения при этом отводится на датчик Шака-Гартмана. Оптическая схема собрана так, что излучение от первого лазерного источника фокусируется в плоскости фокусировки приёмной системы на достаточно близкое расстояние, а излучение от второго лазерного источника коллимируется. Перед приёмником стоит светофильтр пропускающий излучение от первого источника и останавливающий всё остальное. Таким образом, в случае присутствия в системе начальных aberrаций, лазерный пучок «размыт» в области фокуса приёмной системы и сигнал на приёмнике ослаблен, а соответственно, лазерный пучок от второго источника является так же не является коллимированным. Используя управляемое гибкое зеркало и перефокусируя излучение от первого источника излучения на заданное место, компенсируются и aberrации второго источника лазерного излучения и он снова фокусируется в дальней зоне. Таким образом, используя излучение от первого лазерного источника ведётся управление компенсацией aberrаций для второго лазерного источника.

2. Основная (аналитическая) часть отчета о патентных исследованиях

При проведении данных исследований, прежде всего, стояла задача определить – ориентировочно – уровень новизны исследуемой разработки. Одновременно необходимо было определить организации (фирмы), занимающиеся разработками в области адаптивной оптики.

Для решения поставленных задач были отобраны патенты РФ, США и ЕПВ (Европейское патентное ведомство), относящиеся к объекту исследования. Глубина поиска определялась сроком 15 лет, т. к. именно в это время компенсация аберраций начинает вызывать большой исследовательский интерес. Прежде всего, это связано с интенсивным развитием лазерных технологий и оптоэлектроники.

Проведенные исследования показали, что за последние 15 лет и в России, и за рубежом не ведется интенсивных разработок методов компенсации аберраций волнового фронта для передающей системы.

Наряду с проведением патентного поиска производился мониторинг отчётов о научных работах организаций (фирм), занимающихся разработками в области компенсации аберраций передающих систем. Данные по этой активности представлены в **приложении №1**.

Мониторинг патентной активности организаций (фирм), занимающихся данной тематикой представлены в **приложении №2**.

Как видно из представленных данных, в последние годы активно ведётся научная деятельность в области адаптивной компенсации аберраций передающих систем.

3. Заключение

В результате проведенных исследований установлено следующее:

3.1. Решение, которое содержит исследуемый объект – система компенсации начальных аберраций передающей системы, не опубликовано в патентных фондах Российской Федерации, Европы и США с ретроспективой 15 лет.

3.2. Фирм, специализирующихся на разработках в сфере систем по компенсации начальных аберраций волнового фронта найдено не было.

3.3. В Российской Федерации нет патентов, защищающих систему для компенсации начальных аберраций волнового фронта. Из этого можно сделать вывод, что при выводе на рынок данной системы, она не будет иметь конкурентов.

По проведенному анализу представленных данных можно сделать вывод, что на сегодняшний день ведется низкая активность патентования в области компенсации аберраций передающих систем. Однако, данная область является перспективной и в ней очень активно ведутся исследования, что говорит о её востребованности в будущем. Это

позволяет сделать вывод о целесообразности патентования системы для компенсации начальных aberrаций волнового фронта. Кроме того, имеется возможность патентования метода по компенсации aberrаций передающих систем.

Таблица В.6.2 - Научно-техническая, конъюнктурная, нормативная документация и материалы государственной регистрации (отчёты о научно-исследовательских работах)

Предмет поиска	Наименование источника информации с указанием страницы источника	Автор, фирма - держатель технической документации	Год, место и орган издания (утверждения, депонирования источника)
1	2	3	4
Компенсация начальных aberrаций волнового фронта частично-когерентного лазерного пучка	<ol style="list-style-type: none"> 1. Коллимация начального волнового фронта частично когерентного светового пучка по сигналу обратного рассеяния 2. Компенсация aberrационных искажений волнового фронта импульсного лазерного пучка по сигналу обратного рассеяния 3. Управление положением лазерного пучка по обратному аэрозольному рассеянию. Модельный эксперимент 4. Experimental demonstration of coherent beam combining over a 7 km propagation path 5. Апробация стохастического алгоритма параллельного градиентного спуска в лабораторных экспериментах 6. Подавление начальных искажений лазерного пучка при использовании 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ИОА СО РАН; ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей»; 2. ИОА СО РАН; ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей»; 3. ИОА СО РАН; ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей»; 4. University of Dayton, USA; Optonicus, USA; 5. ИОА СО РАН; ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей»; 6. ИОА СО РАН; ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей»; 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Журнал: Оптикаиспектроскопия. 2010. Т.108. №1. С.113-122. 2. Журнал: Оптикаиспектроскопия. 2011. Т. 111, № 3. С.488–496 3. Журнал: Оптика атмосферы и океана 2011. Т.24. № 12. С.1056-1060 4. Журнал: OPTICS LETTERS. Vol. 36, No. 22 November 15, 2011 5. Журнал: Оптика атмосферы и океана 2011 Т.24 №7. С. 549-554 6. Журнал: Оптика атмосферы и океана. 2012. Т.25. №12

	<p>рассеянного на экране излучения для управления гибким зеркалом</p> <p>7. Компенсация искажений волнового фронта частично-когерентного лазерного пучка по обратному атмосферному рассеянию</p> <p>8. Atmospheric Turbulence Compensation and Coherent Beam Combining over a 7 km Propagation Path Using a Fiber-Array System with 21 Sub-apertures</p> <p>9. Управление начальным волновым фронтом оптического пучка по сигналу обратного атмосферного рассеянию при несоосной приеме рассеянного излучения</p> <p>10. Optical-beam wavefront control based on the atmospheric backscatter signal</p>	<p>7. ИОАСОРАН; ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей»;</p> <p>8. Optonicus, USA; Intelligent Optics Laboratory, School of Engineering, University of Dayton, USA; Intelligent Optics Laboratory, Computational and Information Sciences Directorate, United States Army Research Laboratory, USA;</p> <p>9. ИОА СО РАН; ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей»;</p> <p>10. ИОА СО РАН; ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей»;</p>	<p>C.1099-1104</p> <p>7. Журнал: Оптика атмосферы и океана 2013 Т.26 № 12. С.1023-1028</p> <p>8. Журнал: PW2E.3.pdf Imaging and Applied Optics. 2014 OSA</p> <p>9. Журнал: Оптика атмосферы и океана 2014 Т.27 № 11. С.962-969</p> <p>10. Журнал: Quantum Electronics 45 (2) 153 – 160 (2015)</p>
--	---	--	---

Уважаемый пользователь! Обращаем ваше внимание, что система «Антиплагиат» отвечает на вопрос, является ли тот или иной фрагмент текста заимствованным или нет. Ответ на вопрос, является ли заимствованный фрагмент именно плагиатом, а не законной цитатой, система оставляет на ваше усмотрение.

Отчет о проверке № 1

дата выгрузки: 13.06.2017 14:45:26
 пользователь: vsyakuskov@gmail.com / ID: 4589133
 отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат»
 на сайте <http://www.antiplagiat.ru>

Информация о документе

№ документа: 2
 Имя исходного файла: Диплом кусков.pdf
 Размер текста: 3537 кБ
 Тип документа: Не указано
 Символов в тексте: 51081
 Слов в тексте: 6084
 Число предложений: 271

Информация об отчете

Дата: Отчет от 13.06.2017 14:45:26 - Последний готовый отчет
 Комментарии: не указано
 Оценка оригинальности: 88.29%
 Заимствования: 11.71%
 Цитирование: 0%



Оригинальность: 88.29%

Заимствования: 11.71%

Цитирование: 0%

Источники

Доля в тексте	Источник	Ссылка	Дата	Найдено в
6.09%	[1] Скачать pdf-версию статьи	http://sibran.ru	11.11.2016	Модуль поиска Интернет
4.66%	[2] Скачать pdf-версию статьи	http://sibran.ru	15.03.2017	Модуль поиска Интернет
3.02%	[3] Журнал "Оптика атмосферы и океана"	http://ao.iao.ru	17.10.2014	Модуль поиска Интернет

