

## ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 621 375:551.521

# Управление начальным волновым фронтом пространственно частично когерентного пучка методом апертурного зондирования по сигналу обратного атмосферного рассеяния. I. Экспериментальная установка

**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.

Приведены оптическая схема и технические характеристики экспериментальной установки для атмосферных исследований возможности компенсации aberrаций начального волнового фронта оптического пучка методом апертурного зондирования по сигналу обратного атмосферного рассеяния излучения дополнительного лазерного источника.

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

### Введение

При формировании лазерных пучков большой мощности в оптическом тракте из-за несовершенства изготовления и термических деформаций оптических элементов под воздействием излучения волновой фронт (ВФ) формируемого пучка приобретает неконтролируемые случайные отклонения от заданного распределения. Пучок становится пространственно частично когерентным [1], его расходимость значительно возрастает, а плотность мощности излучения в приосевой области уменьшается. В ряде случаев расходимость пучка за счет искажений в оптическом тракте может существенно превышать его турбулентное уширение. Возникает задача повышения качества пучка, т.е. исправления ВФ пространственно частично когерентного пучка.

Для компенсации искажений лазерных пучков предложены и детально исследованы различные методы [2–9], в том числе метод адаптивного управления ВФ пучка по сигналу, отраженному от твердой мишени [2, 3, 5–7, 9]. В [10–12] теоретически показано, что для адаптивного управления ВФ лазерного пучка методом апертурного зондирования (АЗ) [3, 5–7, 9] можно также использовать излучение, рассеянное в обратном направлении в атмосфере.

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

В [13] представлены результаты атмосферных экспериментов по компенсации начальных искажений фазы пучка методом АЗ, в которых для управления зеркалом использовался стохастический алгоритм параллельного градиентного спуска [14, 15], по максимуму мощности принимаемого излучения, рассеянного на экране. В [16] представлены результаты атмосферных экспериментов по компенсации aberrаций начального ВФ частично когерентного лазерного (основного) пучка методом АЗ по сигналу обратного атмосферного рассеяния другого – «зондирующего» пучка с отличающейся длиной волны, но прошедшего тот же оптический тракт и подвергнувшийся тем же искажениям ВФ, что и основной пучок. Основной и зондирующий лазерные пучки в эксперименте [16] сначала совмещались, а затем фокусировались одним и тем же линзовым телескопом на одно и то же расстояние в атмосфере. Рассеянное назад из области перетяжки излучение зондирующего пучка регистрировалось в приемном телескопе и использовалось для управления начальным ВФ зондирующего и основного пучков с помощью деформируемого (гибкого) зеркала. В соответствии с теорией [10–12] поле зрения приемника в эксперименте задавалось достаточно малым, чтобы обеспечить чувствительность приемника к изменениям средней принимаемой мощности обратнорассеянного излучения вследствие деформаций ВФ зондирующего пучка. Основным недостатком экспериментальной установки [16] в том, что геометрия распространения основного и зондирующего пучков в атмосфере одна и та же.

Для практических же целей нужна возможность реализовать разные геометрии распространения пучков. Важно, чтобы необходимость фокусировать зондирующий пучок на короткое расстояние для повышения мощности сигнала обратного рассеяния не ограничивала возможность задания для основного пучка другой геометрии распространения.

В настоящей работе описана оптическая схема и представлены технические характеристики экспериментальной установки для атмосферных исследований возможности компенсации aberrаций начального ВФ оптического пучка методом АЗ по сигналу обратного атмосферного рассеяния, когда основной и зондирующий пучки сначала формируются разными линзовыми телескопами и лишь затем совмещаются. В этом случае появляется возможность задавать геометрию распространения основного пучка независимо от зондирующего.

## 1. Принципиальная схема экспериментальной установки

На рис. 1 показаны две схемы построения экспериментальной установки. В одном случае (рис. 1, *a*) основной и зондирующий пучки выводятся в атмосферу через кольцевую апертуру большого диаметра. Рассеянное излучение зондирующего пучка из области перетяжки принимается на круглую апертуру меньшего диаметра. В другом случае (рис. 1, *б*), наоборот, основной и зондирующий пучки выводятся в атмосферу через круглую апертуру небольших размеров, а прием рассеянного излучения осуществляется кольцевой апертурой большого размера.

Рис. 1, *a* практически повторяет схему эксперимента [16]. Отличие в том, что геометрия распространения основного и зондирующего пучков разная. Схема на рис. 1, *б* реализована впервые.

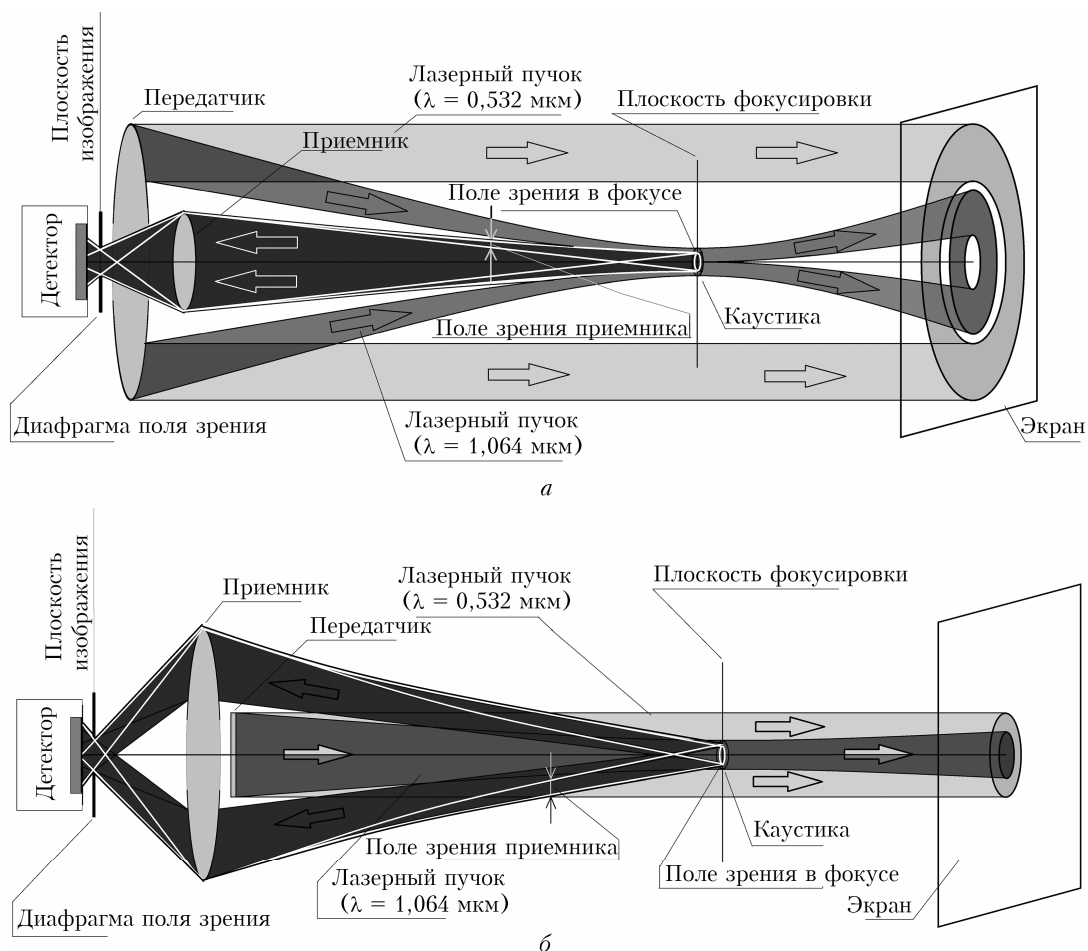


Рис. 1. Принципиальная схема установки адаптивного управления лазерным пучком методом апертурного зондирования с кольцевой передающей и круглой приемной апертурами (*a*); с круглой передающей и кольцевой приемной апертурами (*б*)

В обеих схемах, представленных на рис. 1, плоскость резкого изображения в приемном телескопе настроена точно на плоскость фокусировки зондирующего пучка, а оси передатчика и приемника совмещены. Поперечное сечение пучка в фокусе на рис. 1 показано в виде эллипса. Белым эллипсом внутри него показана область, попадающая в поле зрения приемника. Для устойчивости процесса адаптивной компенсации важно, чтобы в поле зрения приемника все время оставалась хотя бы часть перетяжки зондирующего пучка.

## 2. Оптическая схема экспериментальной установки с кольцевой передающей апертурой

Оптическая схема установки для проведения экспериментов с широкоформатными кольцевыми основным и зондирующим пучками приведена на рис. 2. В качестве зондирующего лазера применялся волоконный импульсный лазер с длиной волны 1,064 мкм, а непрерывный лазер на гранате с длиной волны 0,532 мкм использовался как основной. В отличие от [16], где пучки сначала совмещаются, а затем расширяются одним и тем же телескопом, в схеме на рис. 2 пучки основного и зондирующего лазеров сначала расширяются разными линзовыми телескопами, Л1–Л2 и Л3–Л4 соответственно, и лишь после этого совмещаются. После расширения поворотное зеркало 31 направляет зондирующий пучок на дихроичную пластину (светоделитель) ДП (отражение 0,532 мкм – 97%, пропускание 1,064 мкм – 97%). После совмещения оптических осей пучки через зеркало 32 попадают на гибкое (адаптивное) зеркало с блоком управления. Гибкое зеркало (ГЗ) направляет пучки на передающий телескоп Т50. В отличие от [16], часть

излучения при помощи светоделителя (СВ) и зеркала 34 отводится на датчик ВФ Шака–Гартмана со встроенным светофильтром с рабочей длиной волны  $\lambda = 0,532$  мкм. Введение в схему этого нового, по сравнению с [16], элемента позволяет идентифицировать aberrации и визуализировать ВФ основного пучка.

Для ГЗ определен набор подаваемых на электроды управляющих напряжений, при которых в ВФ пучка, падающего на ГЗ, воспроизводятся те или иные типовые aberrации. Это позволяет задавать в пучке определенный тип aberrаций и в процессе адаптивного управления ВФ по сигналу обратного атмосферного рассеяния контролировать с помощью датчика Шака–Гартмана скорость и качество компенсации искажений. Подавая случайные управляющие напряжения на ГЗ, можно идентифицировать типы возникающих вследствие этого aberrаций ВФ основного и зондирующего пучков и отследить изменения их величины в процессе коррекции. В программном обеспечении датчика Шака–Гартмана реализована возможность визуализации ВФ пучка во время работы ГЗ.

Диаметр выходной апертуры передающего телескопа Т50 системы Кассегрена – 500 мм, фокусное расстояние – 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 Л5 и 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. Рассеянное излучение отводится в сторону плоским поворотным зеркалом 33 эллиптической формы, закрепленным на растяжках в корпусе телескопа Т50, и подается в приемный телескоп системы Ньютона Т15 диаметром 150 мм с  $f = 750$  мм. В фокальной плоскости

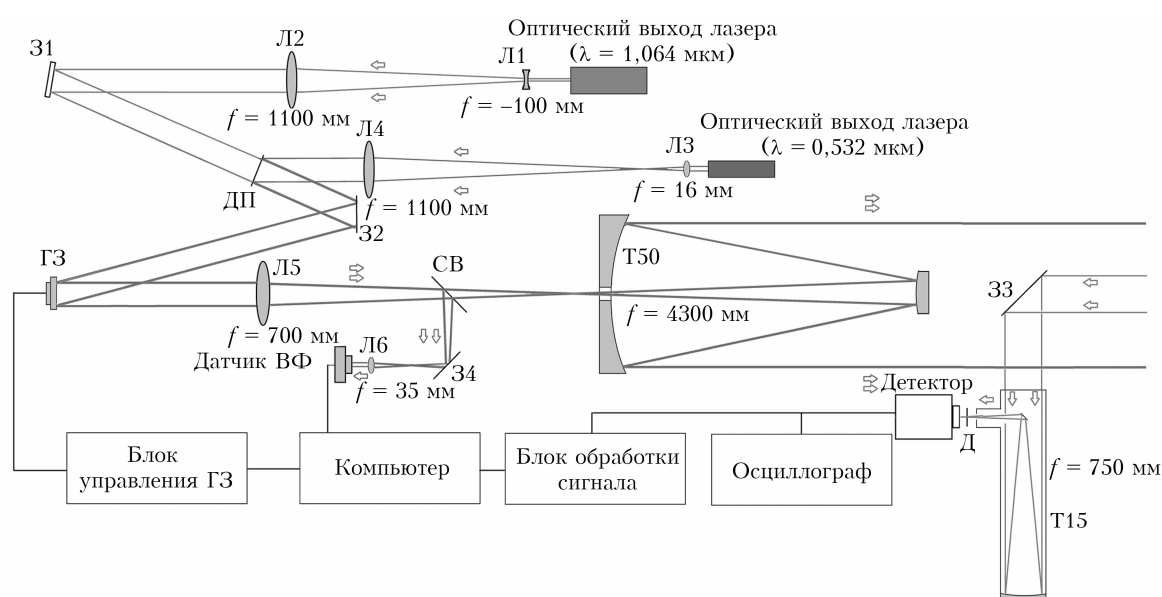


Рис. 2. Оптическая схема экспериментальной установки с кольцевой передающей апертурой

приемного телескопа располагается апертурная диафрагма Д, ее размер определяет поле зрения приемника, в качестве которого использовался фотоэлектронный умножитель (ФЭУ). Для выработки сигнала управления адаптивным зеркалом осуществляется накопление регистрируемых ФЭУ эхосигналов. Для этого сигнал с ФЭУ подается в специально разработанный блок обработки сигнала, который подает импульс синхронизации на блок управления зондирующего лазера и на осциллограф, производит интегрирование и накопление эхосигналов, рассчитывает и передает в компьютер значения средней мощности аккумулярованных эхосигналов с выбранной дальности. В компьютере с использованием стохастического алгоритма параллельного градиентного спуска [14, 15] по рассчитанным значениям средней мощности вычисляются управляющие напряжения для элементов ГЗ с последующей передачей их на блок управления ГЗ.

Технические характеристики компонентов экспериментальной установки приведены в табл. 1–4. Поскольку экспериментальная установка создана с использованием приборов, которые применялись в экспериментах [16], то в таблицах частично воспроизводятся технические характеристики, приведенные ранее в [16].

Таблица 1

Технические характеристики приемо-передатчика	
Характеристика	Значение
<i>Лазер 1064 нм (зондирующий)</i>	
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
<i>Лазер 0,532 нм (основной)</i>	
Модель	GLM-10
Тип	непрерывный
Мощность минимальная	0,5 Вт
Мощность максимальная	10,5 Вт
Диаметр пучка (гауссовый $1/e^2$ )	1,5 мм
<i>Телескоп Т50</i>	
Тип	Кассегрен
Диаметр	500 мм
Фокусное расстояние	4300 мм
<i>Телескоп Т15</i>	
Тип	Ньютон
Диаметр	150 мм
Фокусное расстояние	750 мм
<i>Фотоприемник (ФЭУ)</i>	
Модель	H10330-75
Режим работы	счетный
Квантовая эффективность (1,067 мкм)	2%
Входная апертура	18 мм

В табл. 2 приведены технические характеристики адаптивного зеркала – биморфное 32-сегментное

зеркало диаметром 100 мм (производства фирмы «Визионика», г. Москва).

Таблица 2

**Технические характеристики гибкого зеркала и блока управления**

Характеристика	Значение
<i>ГЗ</i>	
Модель	U-Flex-100
Тип	биморфное
Число сегментов	32
Величина деформации	25 мкм
Диаметр	100 мм
Максимальная частота	1 КГц
Диапазон напряжений	± 300 В
<i>Блок управления ГЗ</i>	
Модель	PAD-300
Максимальная частота	1 КГц
Диапазон напряжений	± 300 В
Количество каналов	32

Таблица 3

**Технические характеристики датчика ВФ**

Характеристика	Значение
Модель	ShaH-0620(a)
Диаметр входной апертуры	6 мм
Пространственное разрешение	150 мкм
Количество пятен гартманаграммы	1500
Максимальный наклон ВФ	± 25 мрад
Минимальный радиус кривизны	± 0,12 м
Повторяемость результатов (СКО)	0,4 нм
Абсолютная точность (СКО)	$\lambda/100$
Относительная точность (СКО)	$\lambda/1800$
Максимальный радиус кривизны ВФ	5,8 км
Частота измерений	До 60 Гц
Рабочая длина волны	0,35–1,1 мкм

Таблица 4

**Технические характеристики вспомогательной аппаратуры**

Характеристика	Значение
<i>Блок обработки сигнала</i>	
Интервал накопления	400 нс
Положение строба	кратное 400 нс
Время накопления	от 40 мкс
<i>Осциллограф</i>	
Модель	Tektronix, TDS-5034
Частота	500 МГц
Режим работы	накопление импульсов

Внешний вид стенда показан на рис. 3–5. Обозначения некоторых элементов полностью совпадают с обозначениями на рис. 2. Все элементы установки смонтированы на стальном столе размером 4000 × 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.д.

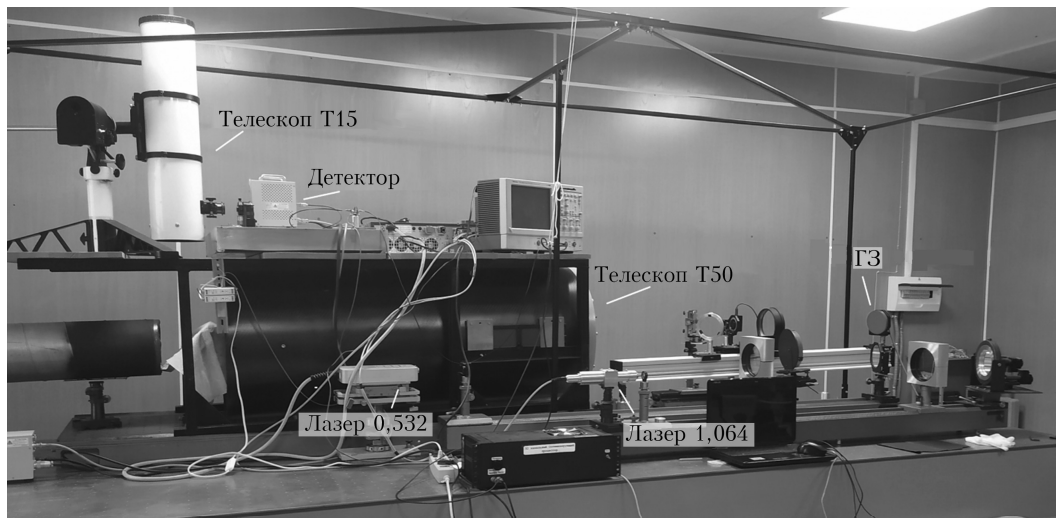


Рис. 3. Вид экспериментальной установки сбоку

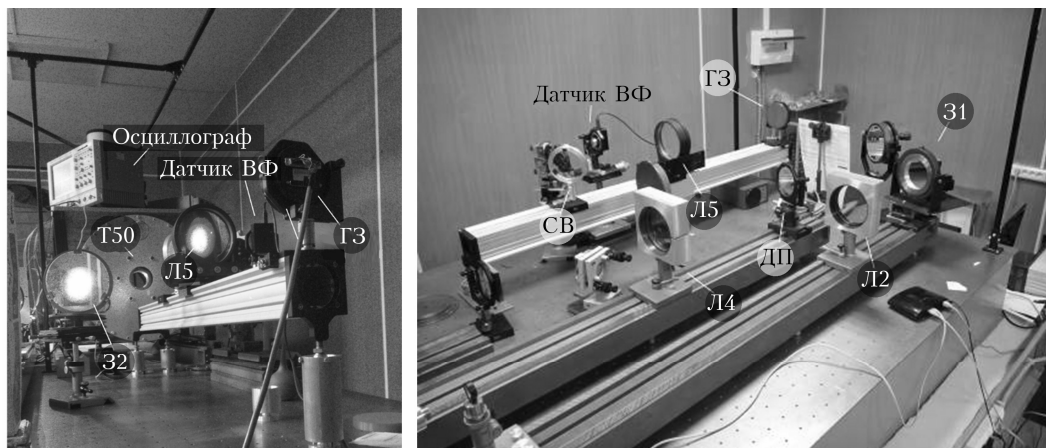


Рис. 4. Вид установки сзади

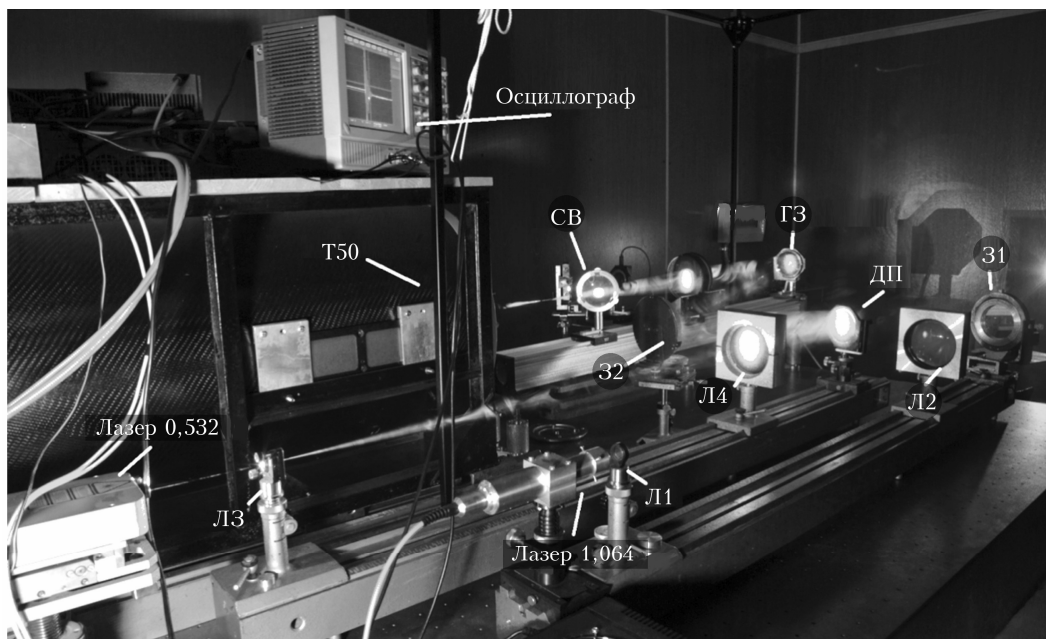


Рис. 5. Вид установки спереди

### 3. Оптическая схема экспериментальной установки с круглой передающей апертурой

На рис. 6 приведена оптическая схема установки для проведения экспериментов с основным и зондирующим пучками, формируемыми малоразмерной круглой апертурой.

В основном схема содержит те же оптические элементы, что и схема на рис. 2 для кольцевых пучков. Отличия сводятся к следующему: после ГЗ совмещенные пучки основного и зондирующего излучения через зеркала З3 и З4 сразу выводятся в атмосферу соосно с приемным телескопом. В качестве приемного в этой схеме вместо ньютоновского телескопа Т15 используется телескоп Кассегрена Т50. Часть излучения после ГЗ также отводится в сторону при помощи СВ и зеркала З5, поперечный размер пучков отведенной части излучения уменьшается при помощи коллимирующей системы Л5 и Л6, после чего через интерференционный светофильтр с рабочей длиной волны 0,532 мкм поступает на датчик ВФ.

#### Заключение

Приведены оптическая схема и технические характеристики экспериментальной установки для атмосферных исследований возможности компенсации аберраций начального волнового фронта оптического пучка методом апертурного зондирования по сигналу обратного атмосферного рассеяния излучения дополнительного лазерного источника. В отличие от [16], где основной и зондирующий лазерные пучки сначала совмещались, а затем фокусировались одним и тем же линзовым телескопом на одно и то же расстояние в атмосфере, в настоящей статье описана экспериментальная установка, в которой основной и зондирующий пучки сначала формируются разными линзовыми телескопами

и лишь затем совмещаются. В этом случае имеется возможность изменять волновой фронт основного пучка независимо от зондирующего, что повышает эффективность адаптивного управления. Представлены две модификации установки. В одном случае основной и зондирующий пучки выводятся в атмосферу через кольцевую апертуру большого диаметра. Рассеянное излучение зондирующего излучения из области перетяжки принимается на круглую апертуру меньшего диаметра. В другом случае, наоборот, основной и зондирующий пучки выводятся в атмосферу через круглую апертуру небольших размеров, а прием рассеянного излучения осуществляется кольцевой апертурой большого размера. Результаты выполненных на этой установке экспериментов по компенсации аберраций начального волнового фронта оптического пучка представлены во второй части статьи.

1. Кон А.И., Татарский В.И. К теории распространения частично-когерентных световых пучков в турбулентной атмосфере // Изв. вузов. Радиофиз. 1972. Т. 15, № 10. 1547 с.
2. Лукин В.П., Черноцкий М.И. Принцип взаимности и адаптивное управление параметрами оптического излучения // Квант. электрон. 1982. Т. 9, № 5. С. 952–958.
3. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 336 с.
4. Лукин В.П. Атмосферная адаптивная оптика. Новосибирск: Наука, 1986. 286 с.
5. Лукьянов Д.П., Корниенко А.А., Рудницкий Б.Е. Оптические адаптивные системы. М: Радио и связь, 1989. 240 с.
6. Тараненко В.Г., Шанин О.И. Адаптивная оптика. М: Радио и связь, 1990. 112 с.
7. Tyson R.K. Principles of adaptive optics. Boston: Academic Press, 1998. 345 p.
8. Лукин В.П., Фортес Б.В. Адаптивное формирование пучков и изображений в атмосфере. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 214 с.
9. Канев Ф.Ю., Лукин В.П., Макенова Н.А. Методы и технические средства адаптивной оптики. Томск: РИО ТГУ, 2004. 106 с.

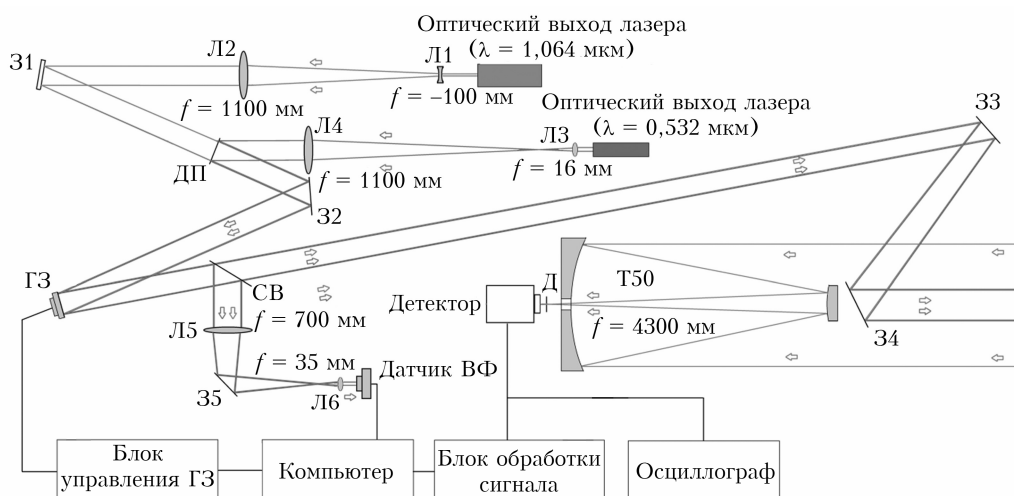


Рис. 6. Оптическая схема экспериментальной установки с круглой передающей апертурой

10. *Zhmilevskii V.V., Ignatiev A.B., Konyaev Yu.A., Morozov V.V., Lukin V.P.* To the problem of backscattered radiation using for closing of adaptive loop: Abstracts of the XI Joint Intern. Symp.: Atmos. Ocean Opt. Atmos. Phys. Tomsk, 2004. P. 92.
11. *Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатьев А.Б., Морозов В.В., Смалихо И.Н.* Коллимация начального волнового фронта частично когерентного светового пучка по сигналу обратного рассеяния // Опт. и спектроскоп. 2010. Т. 108, № 1. С. 113–122.
12. *Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатьев А.Б., Морозов В.В., Смалихо И.Н.* Компенсация абберационных искажений волнового фронта импульсного лазерного пучка по сигналу обратного рассеяния // Опт. и спектроскоп. 2011. Т. 111, № 3. С. 488–496.
13. *Банах В.А., Жмылевский В.В., Игнатьев А.Б., Морозов В.В., Цвык Р.Ш., Шестернин А.Н.* Подавление начальных искажений лазерного пучка при использовании рассеянного на экране излучения для управления гибким зеркалом // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 12. С. 1023–1028; *Banakh V.A., Zhmylevskii V.V., Ignat'ev A.B., Morozov V.V., Tsvyk R.Sh., Shesternin A.N.* Mitigation of initial distortions of a laser beam when using radiation scattered at a screen to control for a flexible mirror // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 4. P. 366–371.
14. *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.
15. *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; *Banakh V.A., Larichev A.V., Razenkov I.A., Shesternin A.N.* Test of the stochastic parallel gradient descent algorithm in laboratory experiments // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 4. P. 337–344.
16. *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.

*V.A. Banakh, E.V. Gordeev, V.V. Kuskov, A.P. Rostov, A.N. Shesternin.* **Controlling the initial wavefront of a spatially partially coherent beam by the aperture sensing technique based on backscatter signals in the atmosphere. I. Experimental setup.**

The optical scheme and technical characteristics are described of an experimental setup for atmospheric studies of a possibility of compensating for aberrations of the initial wavefront of an optical beam by the aperture sensing technique based on the signal of atmospheric backscatter of radiation from an additional laser source.