



ИНСТИТУТ
ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ
ИМ. В.Е. ЗУЕВА СО РАН

Повышение эффективности транспортировки лазерной энергии на значительные расстояния

Кусков Василий Вадимович

Актуальность

Транспортировка лазерной энергии на
значительное расстояние.

Проблема- искажения волнового фронта

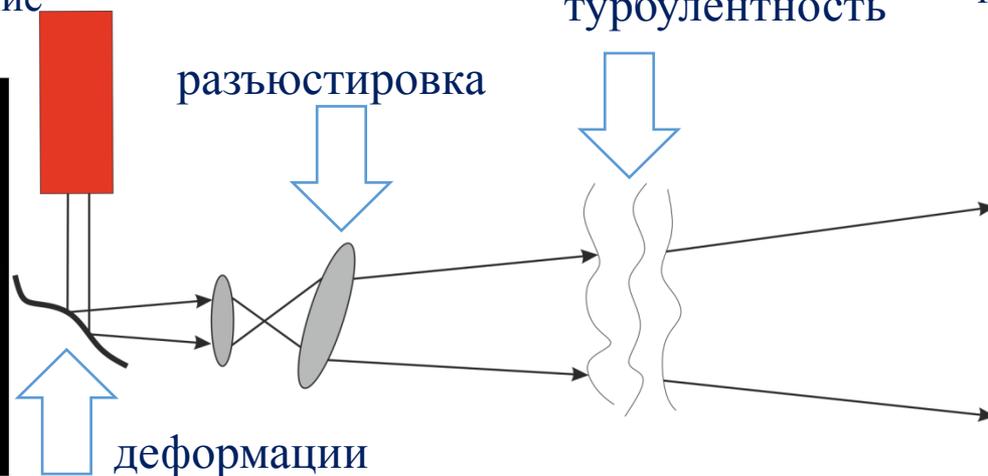
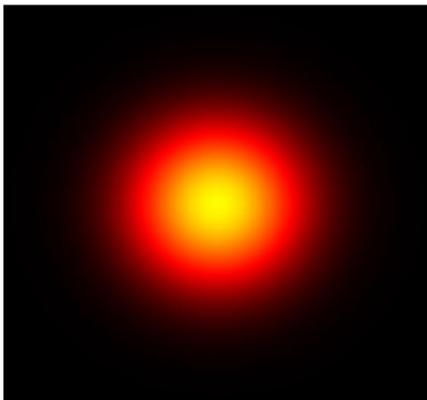
возникновение искажений **внутри**
передающей системы из-за
деформации оптических элементов,
разъюстировки и т.п.

снижение эффективности передачи
энергии

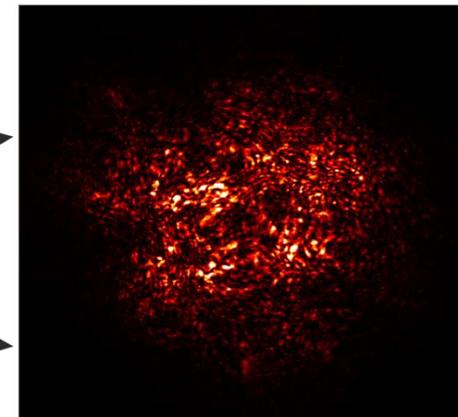
возникновение искажений **при**
распространении в атмосфере
из-за турбулентных неоднородностей
показателя преломления

снижение эффективности передачи
энергии

начальное распределение
интенсивности



конечное распределение
интенсивности

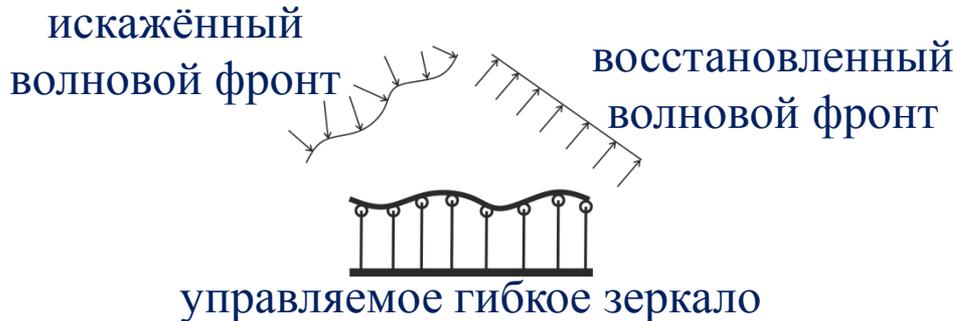
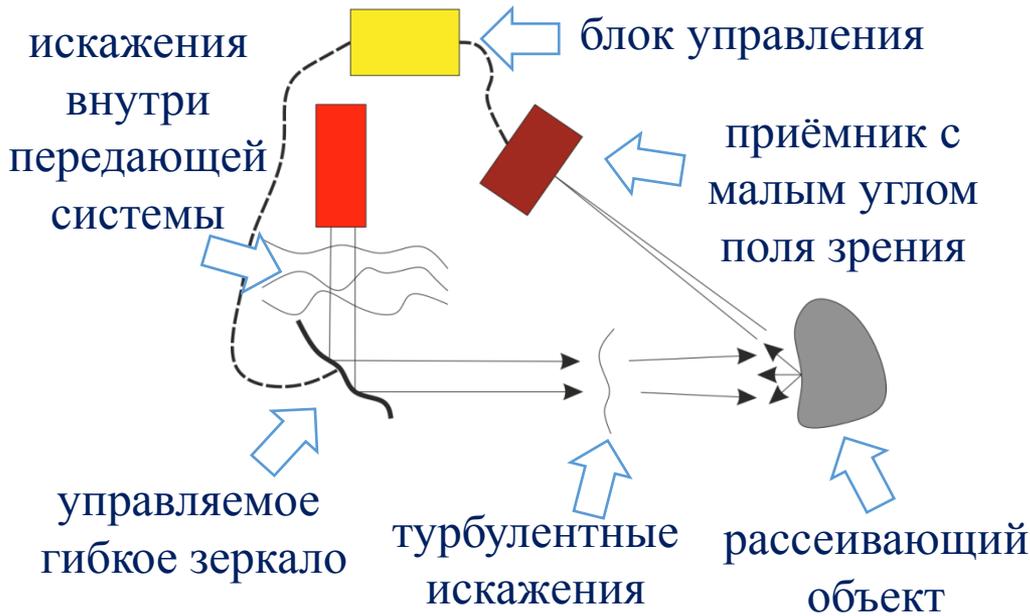


Актуальность

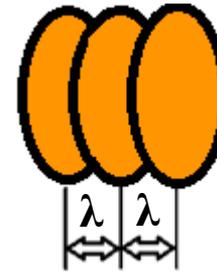
Передача лазерной энергии. **Решение**

Адаптивная оптика

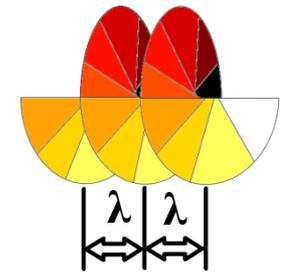
Вихревой лазерный пучок?



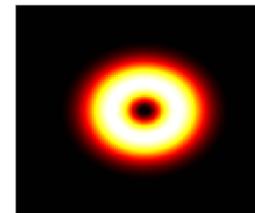
волновой фронт обычного пучка



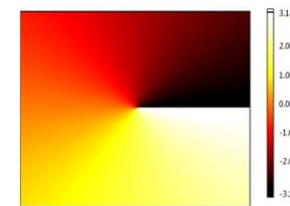
волновой фронт вихревого пучка



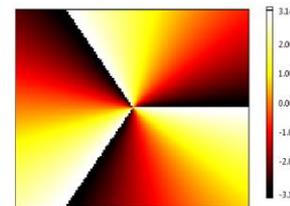
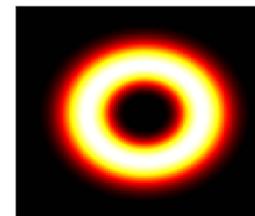
интенсивность



фаза



$l=1$



$l=3$

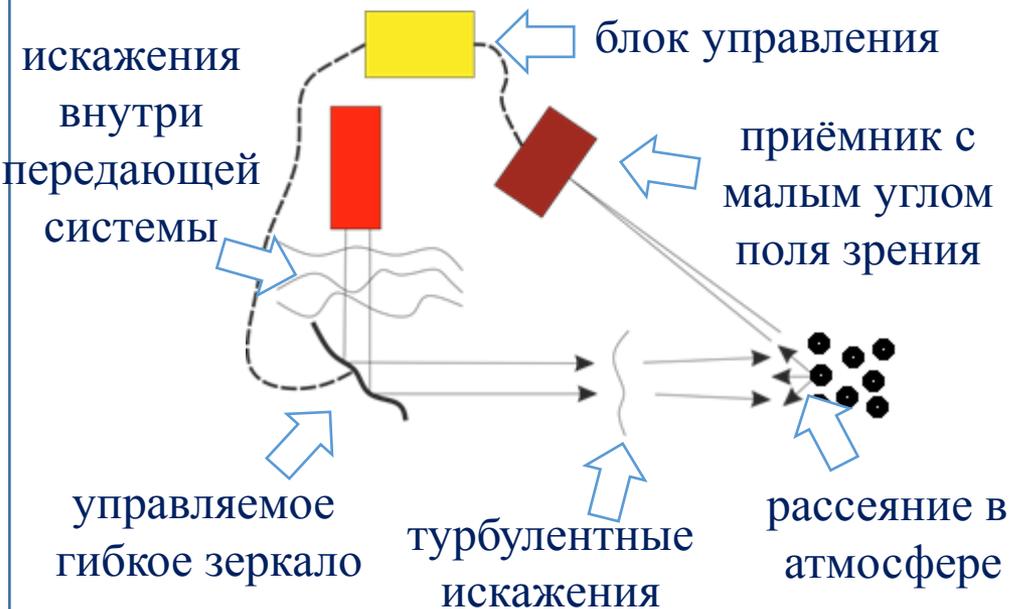
l - величина топологического заряда

Актуальность

Передача лазерной энергии. **Решение**

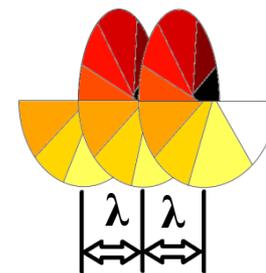
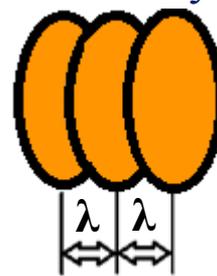
Адаптивная оптика

Вихревой лазерный пучок?



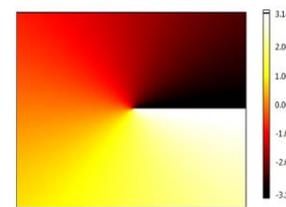
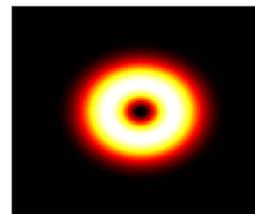
волновой фронт
обычного пучка

волновой фронт
вихревого пучка

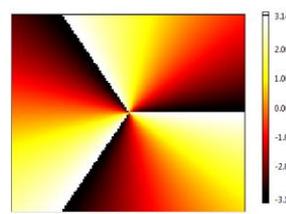
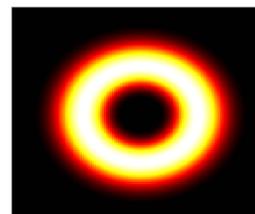


интенсивность

фаза



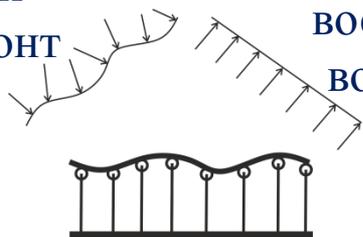
$l=1$



$l=3$

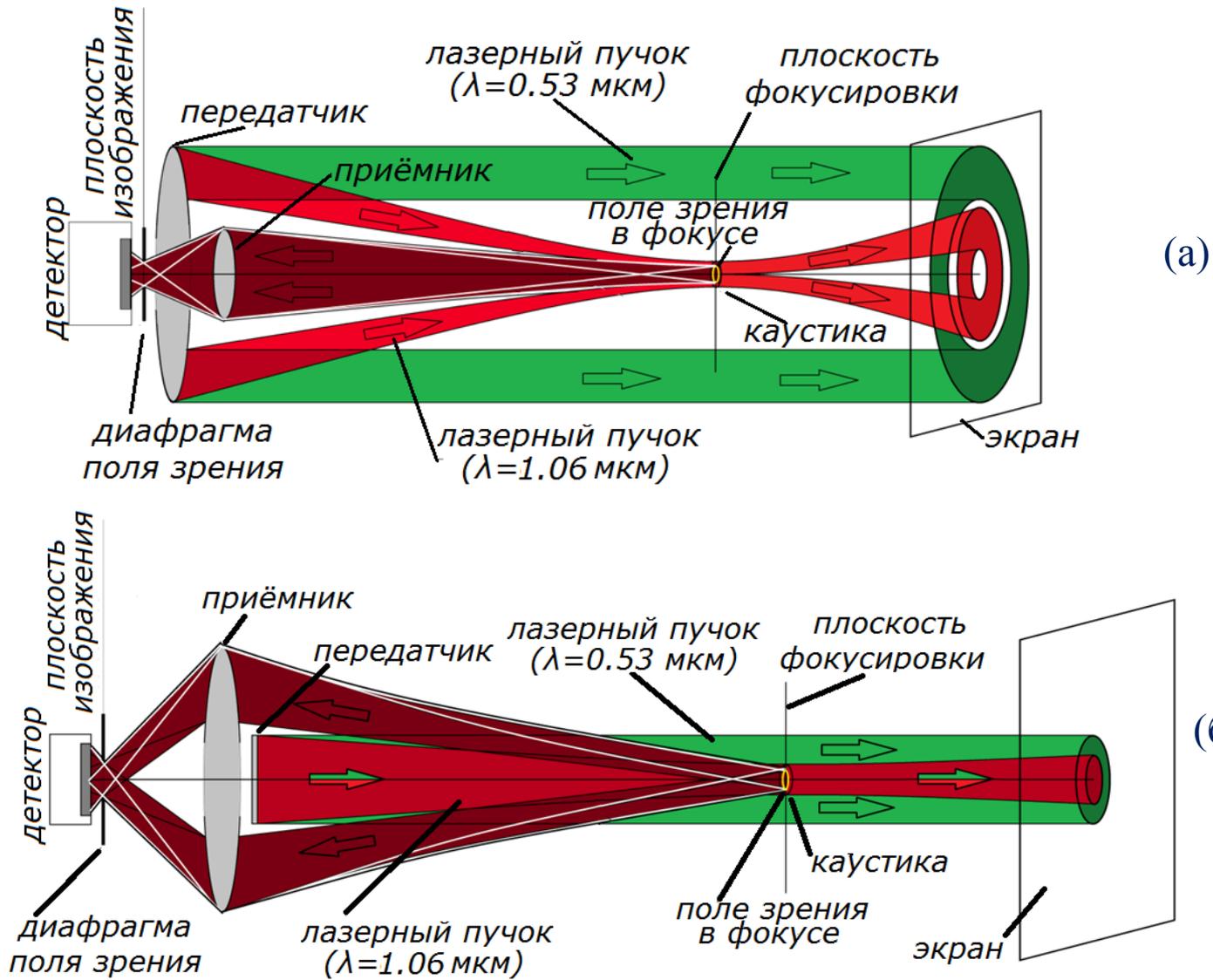
искажённый
волновой фронт

восстановленный
волновой фронт



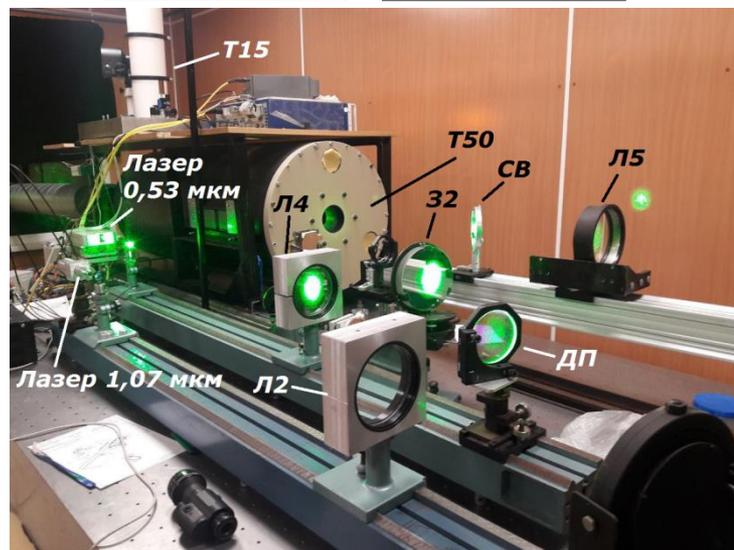
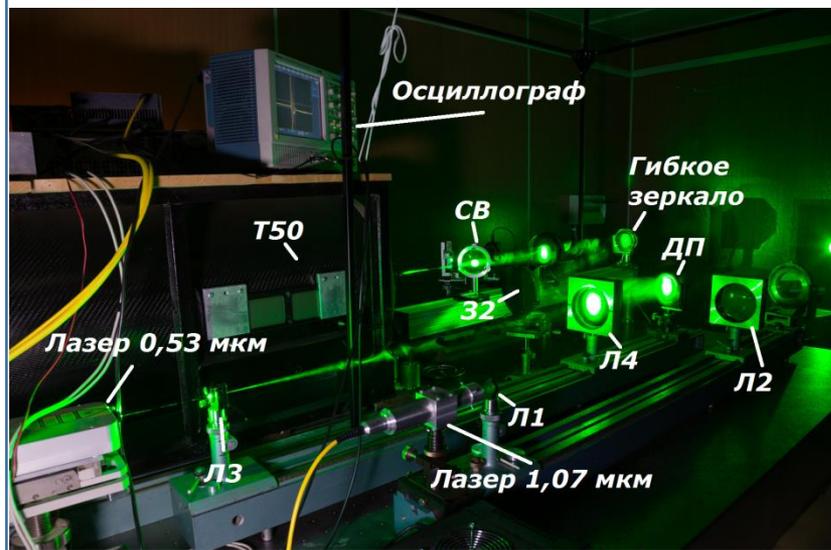
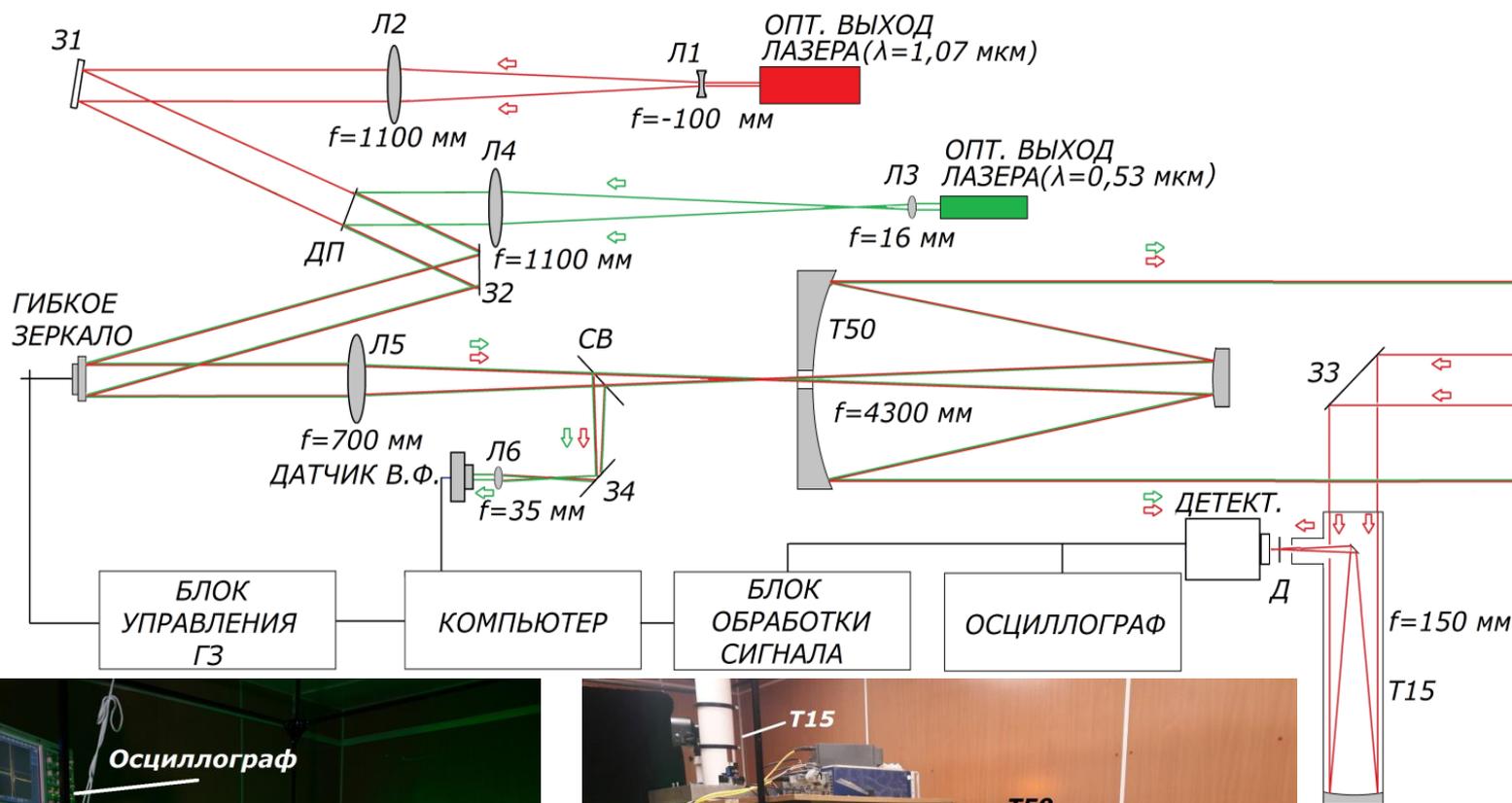
управляемое гибкое зеркало

l - величина топологического заряда

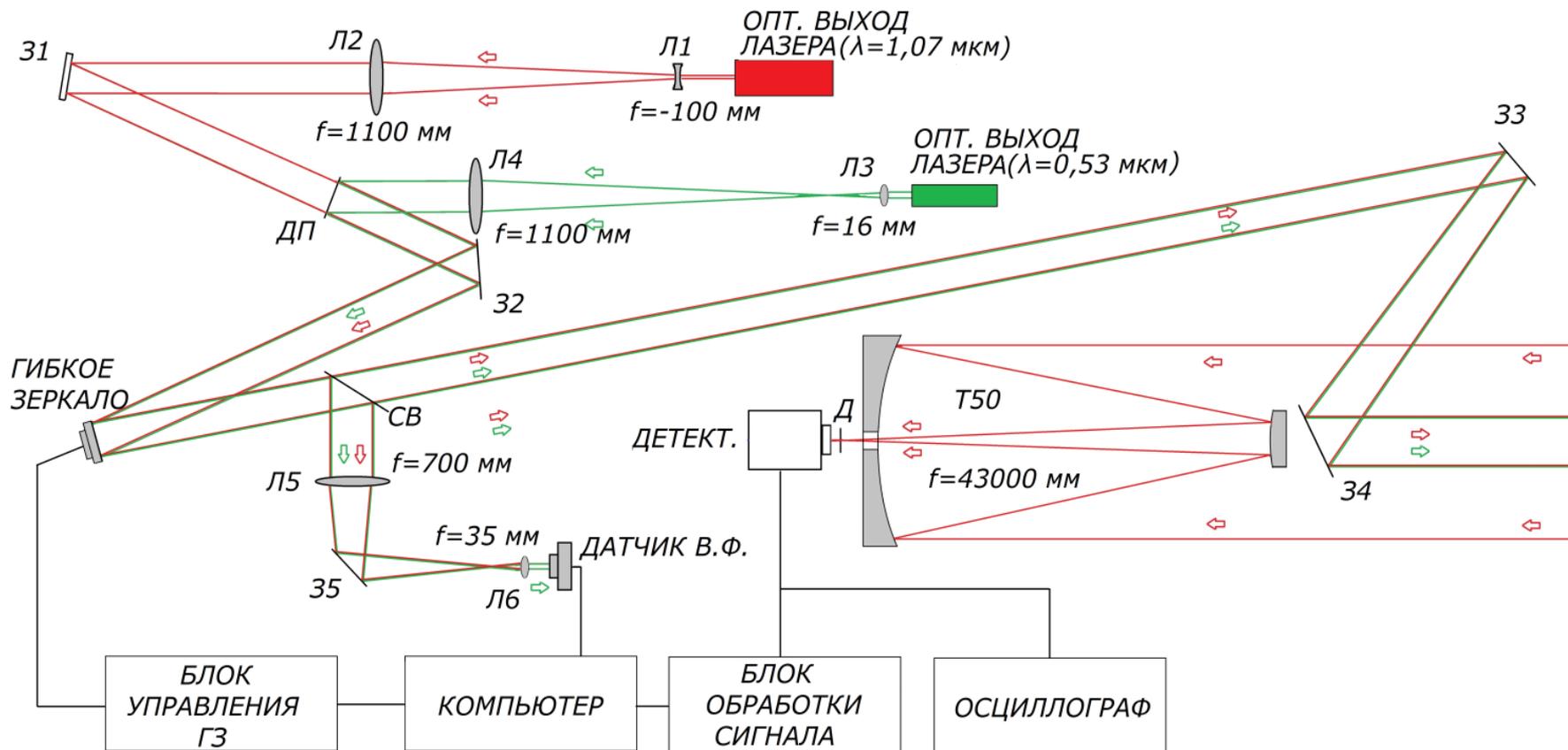


Принципиальная схема установки адаптивного управления лазерным пучком методом апертурного зондирования. Апертуры: кольцевая передающая и круглая приёмная (а), круглая передающая и кольцевая приёмная(б)

Оптическая схема экспериментальной установки с «большой» кольцевой передающей апертурой и фотографии установки



Оптическая схема экспериментальной установки с «малой» круглой передающей апертурой



Т50- передающий телескоп; Т15- приёмный телескоп; Л-линза; З-зеркало; ДП - дихроическая пластина; Св- светоделительная пластина, Датчик В.Ф.- датчик волнового фронта; Д- диафрагма; Детект.-детектор излучения

Результаты экспериментов на адаптивном атмосферном стенде апертурного зондирования

8

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

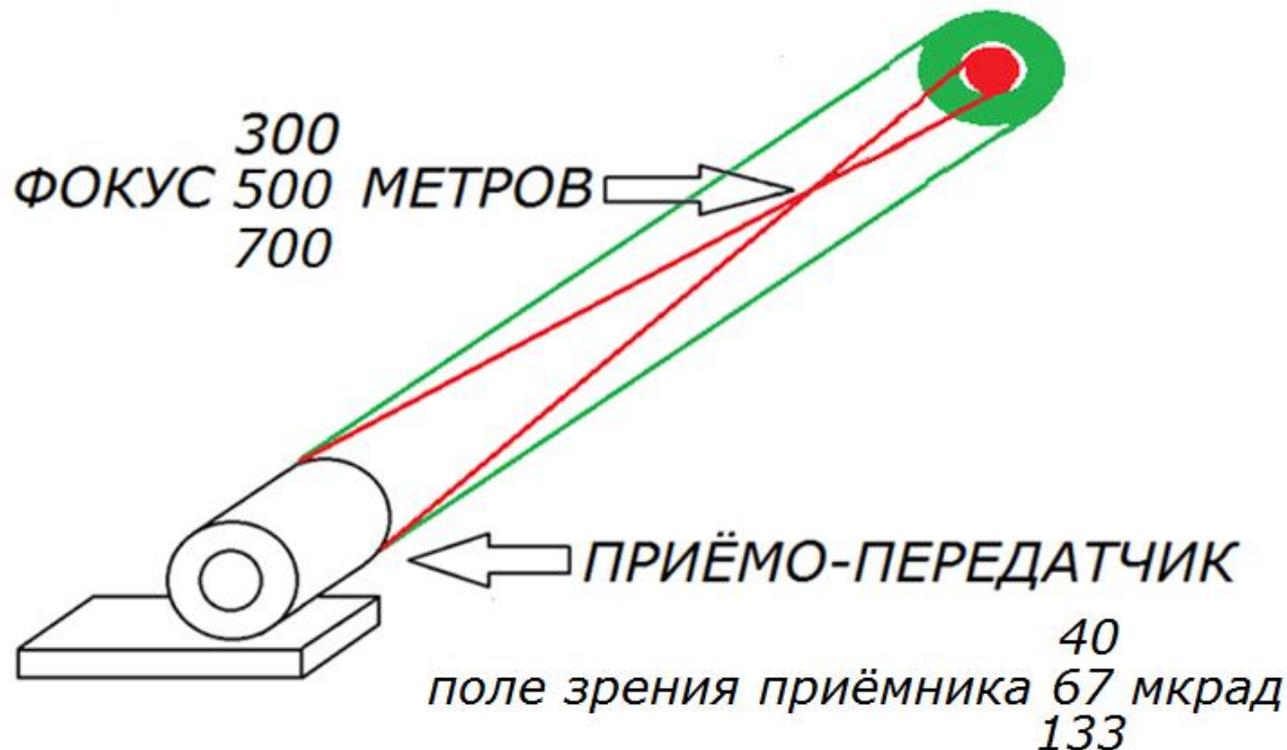
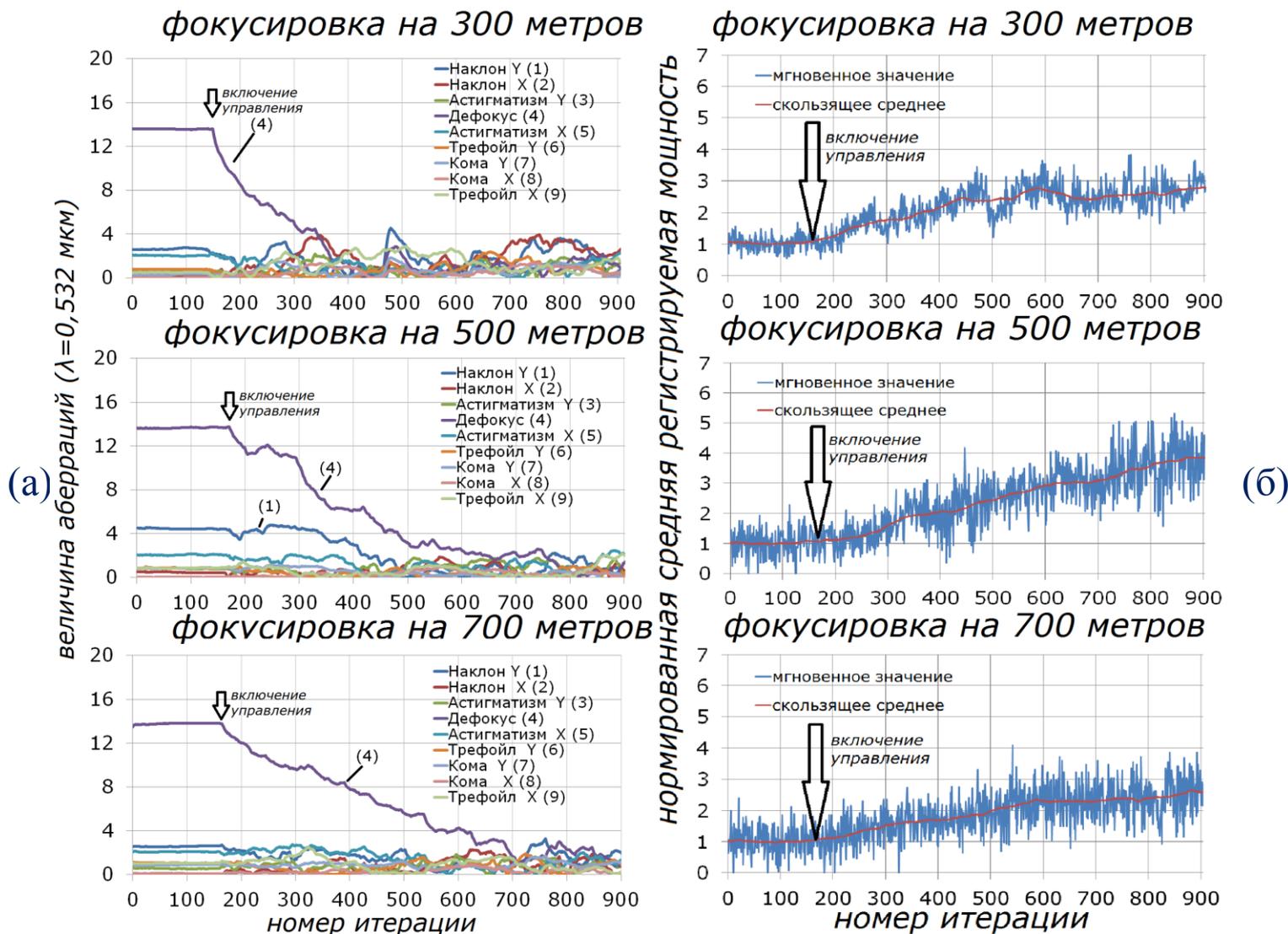


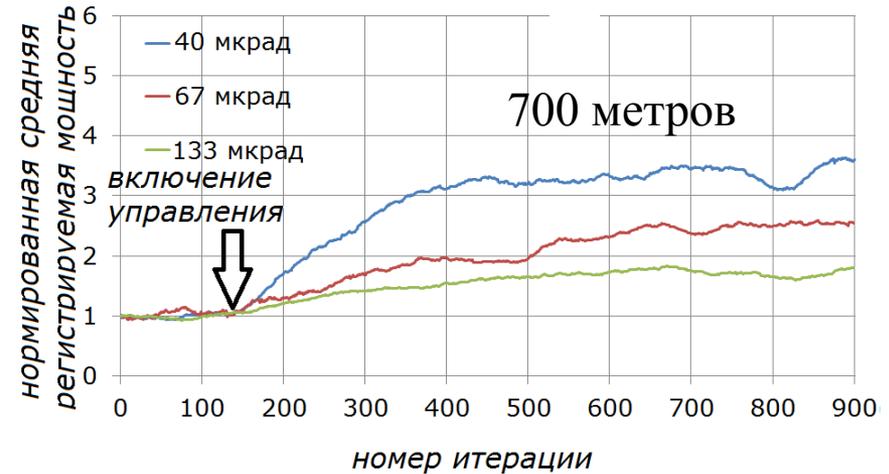
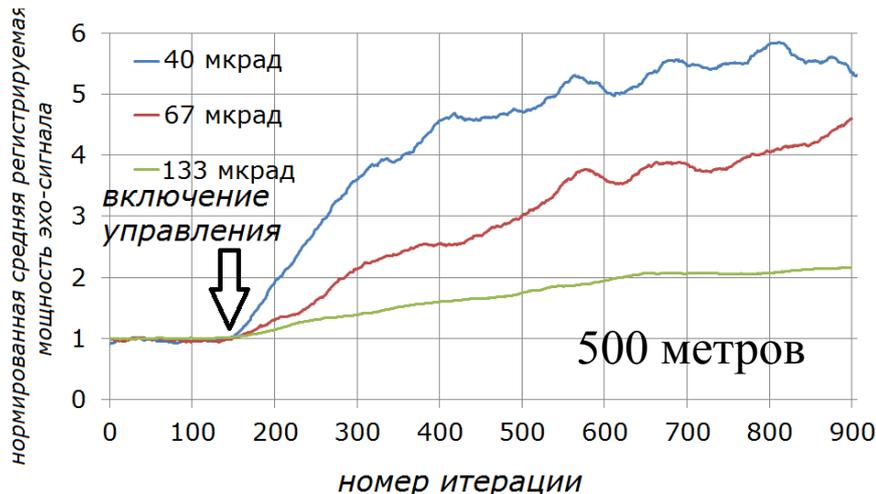
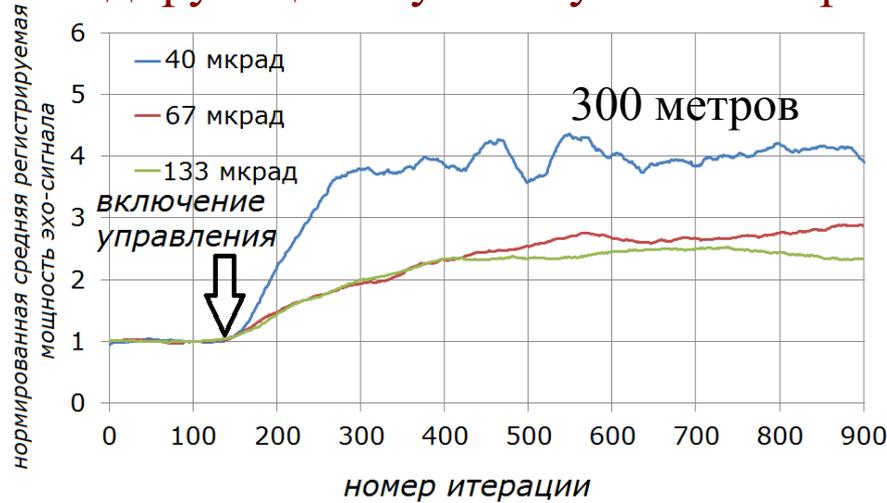
Схема эксперимента. **Большая** передающая апертура

Эффективность коррекции в зависимости от дальности фокусировки



Величина различных аберраций ВФ основного пучка в представлении полиномов Цернике (а), нормированная на начальный уровень мощность сигнала обратного рассеяния (б); Угол поля зрения приёмника **67 мкрад**.

Эффективность коррекции в зависимости от дальности фокусировки зондирующего пучка и угла поля зрения приёмника рассеянного излучения



Нормированная на начальное значение мощность сигнала обратного рассеяния при углах поля зрения приёмника 40, 67 и 133 мкрад и дальности фокусировки зондирующего пучка 300, 500 и 700 метров в процессе адаптации. Каждая кривая построена в результате усреднения по пяти реализациям итерационного процесса, полученным при различных атмосферных условиях

Коррекция случайных искажений «широкого» коллимированного лазерного пучка

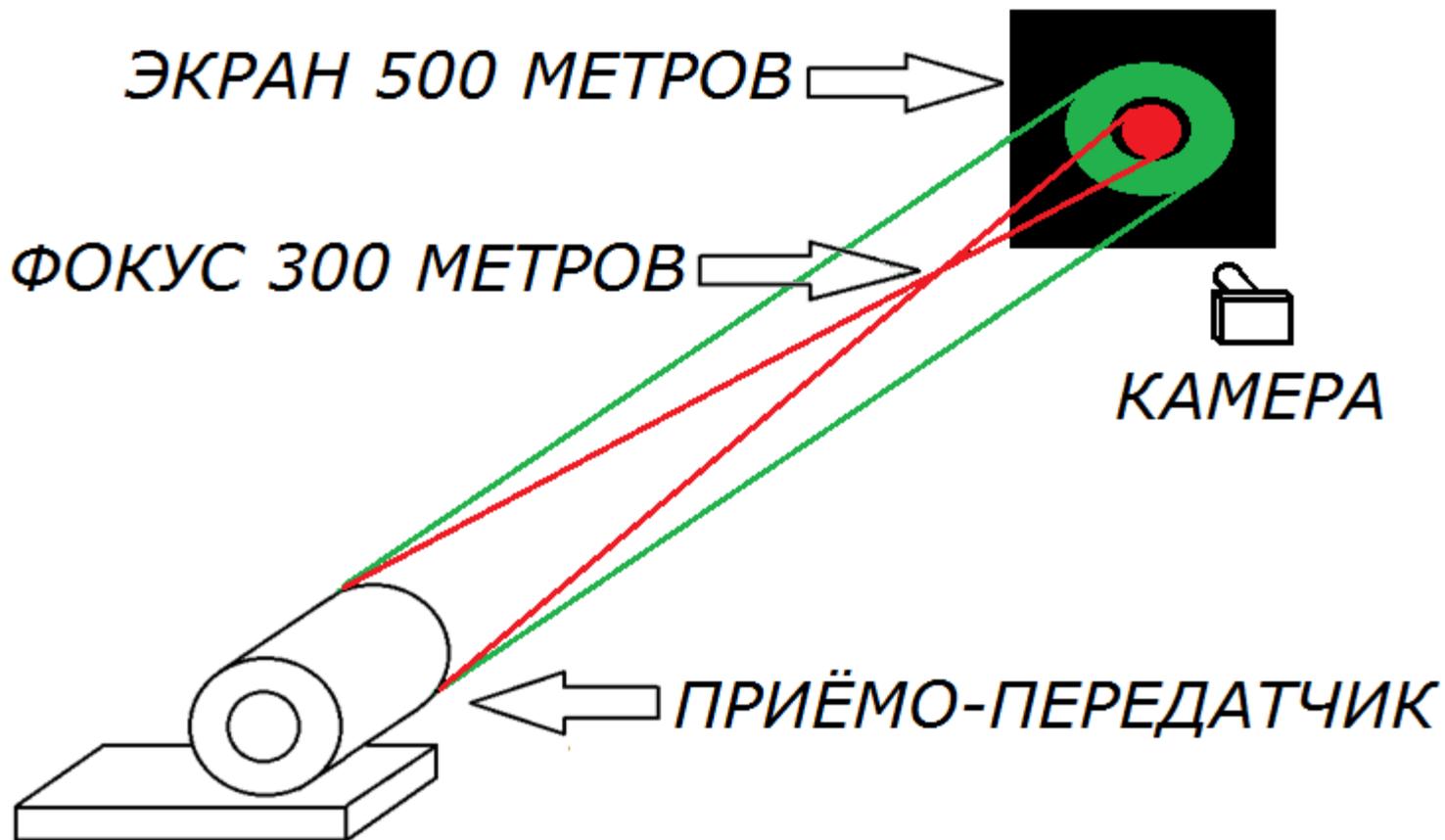
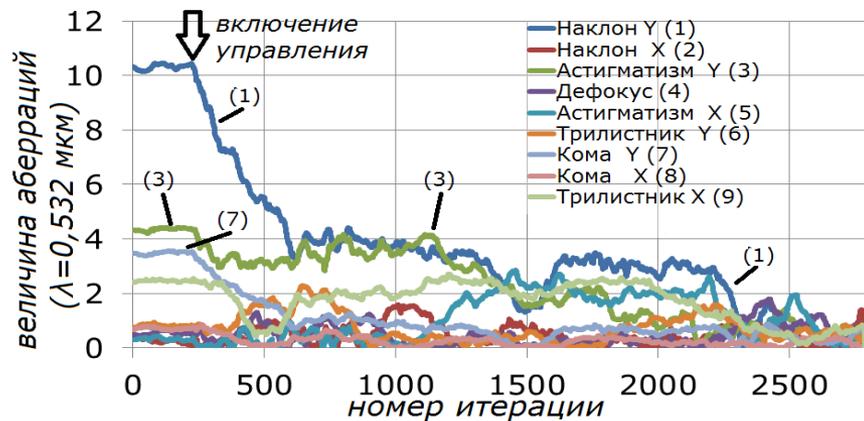
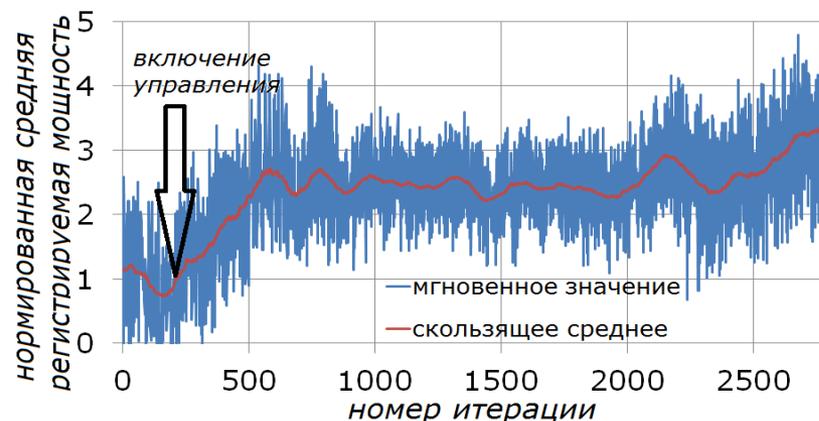


Схема эксперимента

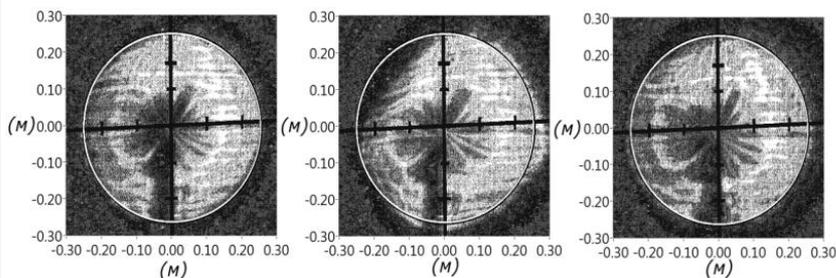
Компенсация aberrаций ВФ «широкого» коллимированного пучка



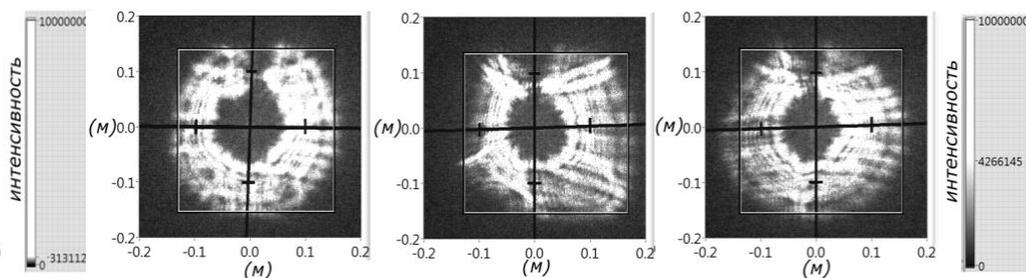
(а)



(б)



(в)



(г)

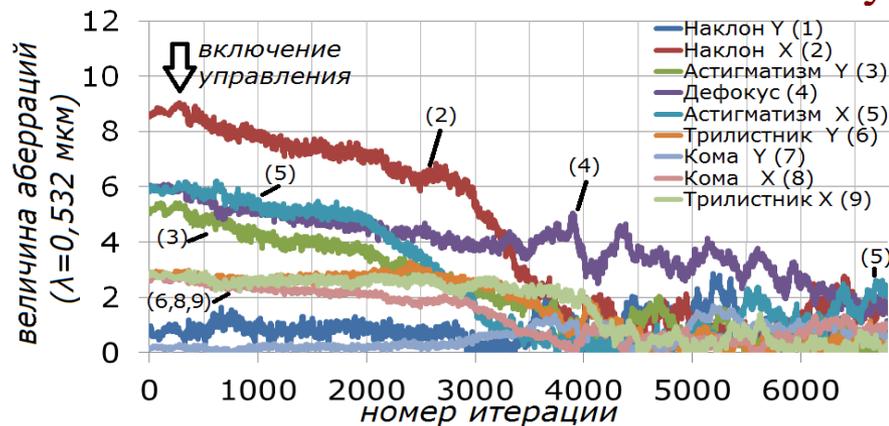
$$R = 1,37$$

Аберрации ВФ основного пучка (а), мощность сигнала обратного рассеяния (б), фотографии основного (в) и зондирующего (г) пучков на экране до (слева) и после (посередине) внесения искажений и после коррекции (справа).

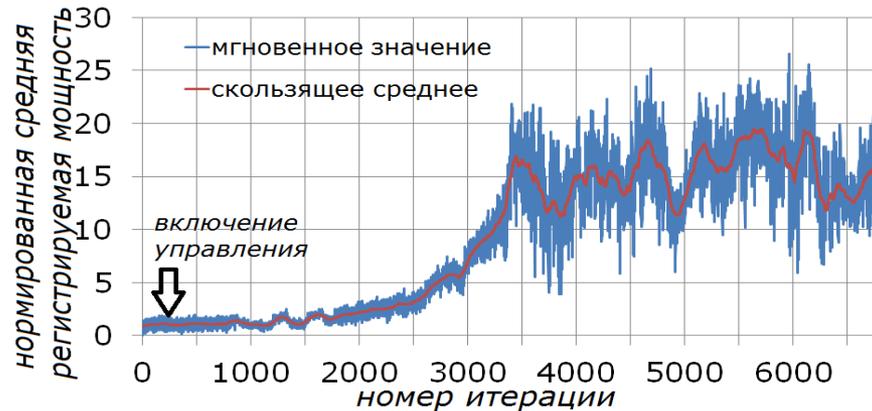
$$R = \frac{\sum_{i=1}^N |I_0(\mathbf{r}_i) - I_a(\mathbf{r}_i)|}{\sum_{i=1}^N |I_0(\mathbf{r}_i) - I_c(\mathbf{r}_i)|}$$

$I_0(\mathbf{r}_i)$ - интенсивность в неискаженном пучке, $I_a(\mathbf{r}_i)$ - интенсивность в искаженном пучке, $I_c(\mathbf{r}_i)$ -интенсивность в пучке после компенсации искажений. Суммирование по всем точкам \mathbf{r}_i для которых выполнялось условие $|I_0(\mathbf{r}_i) - I_a(\mathbf{r}_i)| / |I_0(\mathbf{r}_i) - I_c(\mathbf{r}_i)| > 0,25$

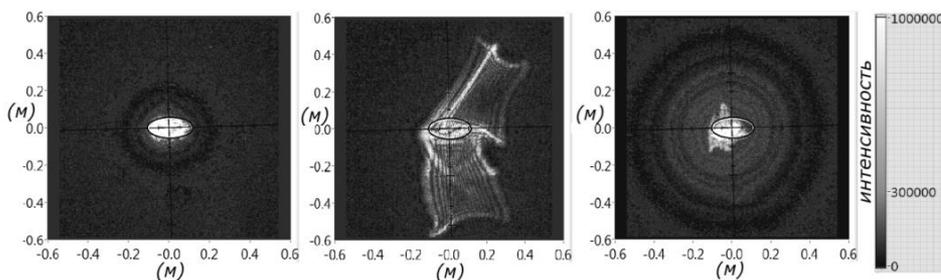
Коррекция случайных искажений «узкого» коллимированного лазерного пучка 13



(а)

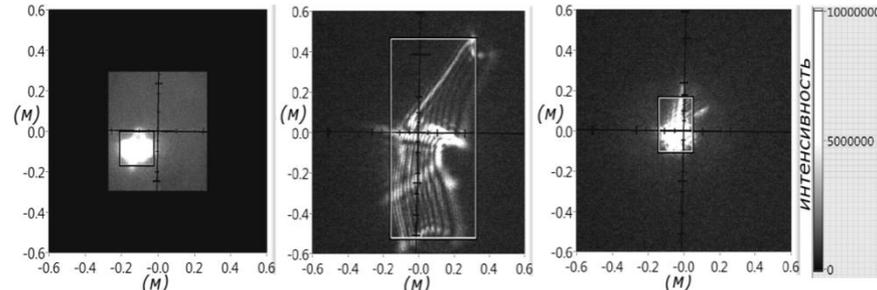


(б)



(в)

$T = 4,76$



(г)

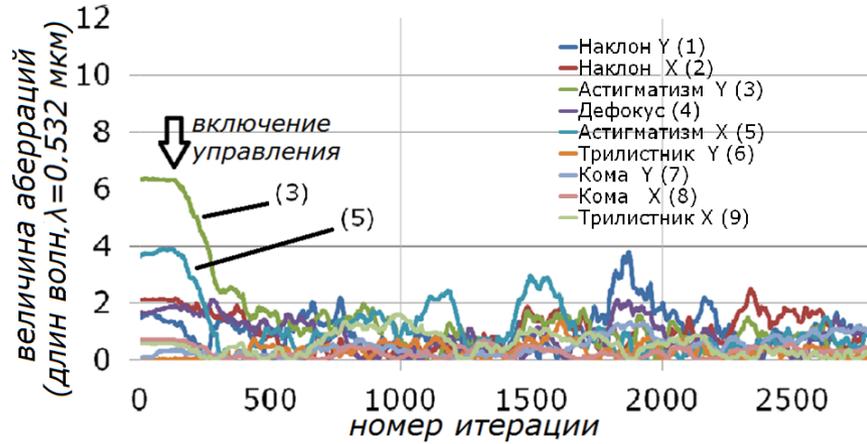
Аберрации ВФ основного пучка (а), мощность сигнала обратного рассеяния (б), фотографии основного (в) и зондирующего (г) пучков на экране до (слева) и после (посередине) внесения искажений и после коррекции (справа).

$$T = \frac{P_{cS}}{P_{aS}}$$

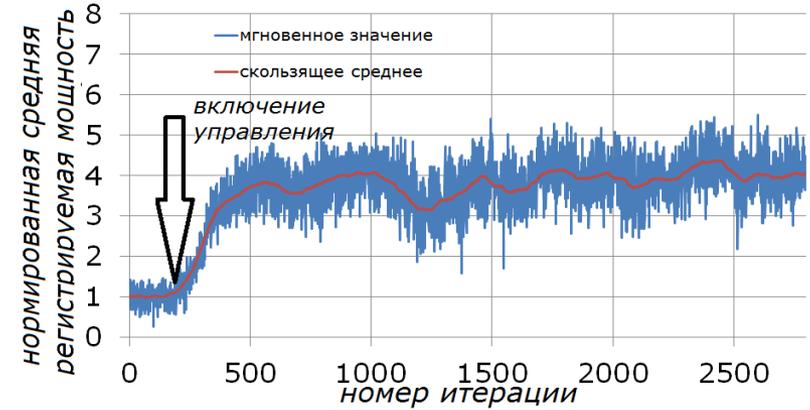
P_{cS} , P_{aS} - мощности приходящиеся на площадку S в компенсированном и искаженном пучке соответственно. Размер S определяется исходными размерами пучка на экране.

Адаптивная фокусировка расходящихся пространственно частично когерентных лазерных пучков.

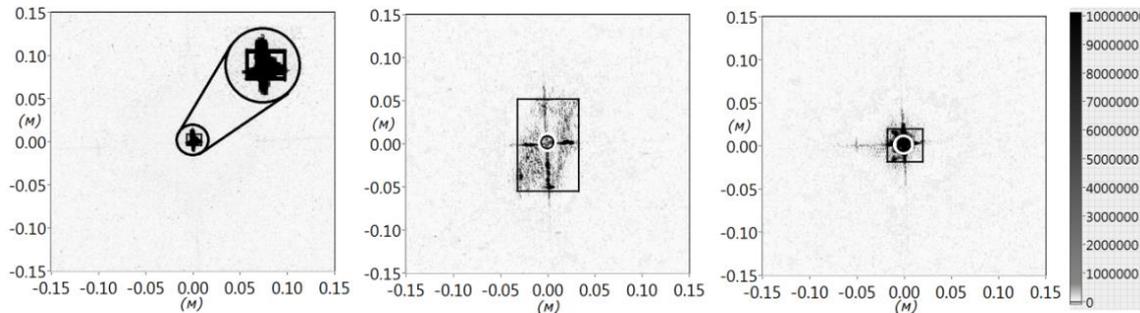
Компенсация aberrаций ВФ широкого сфокусированного пучка



(а)



(б)

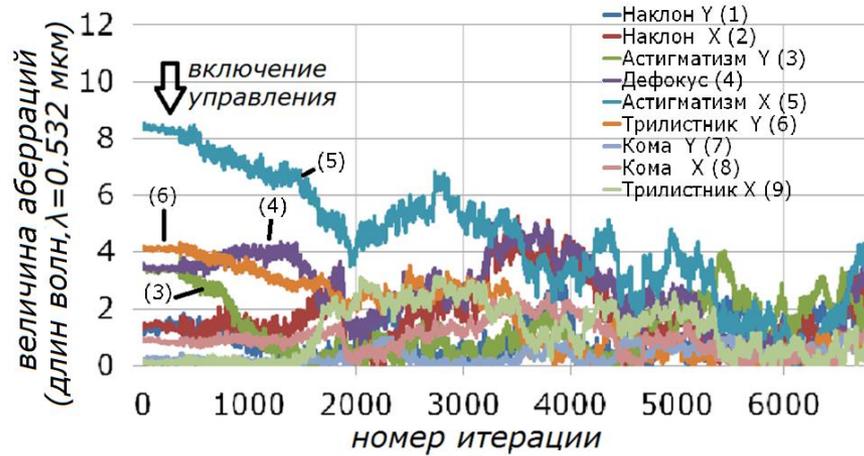


(в)

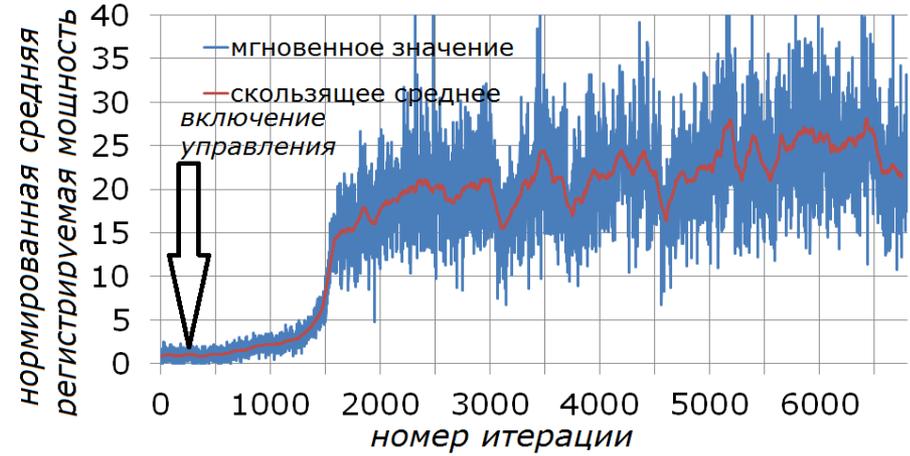
Аберрации ВФ основного пучка (а), мощность сигнала обратного рассеяния (б), фотографии основного (в) и зондирующего (г) пучков на экране до (слева) и после (посередине) внесения искажений и после коррекции (справа).

$$T = 27,4$$

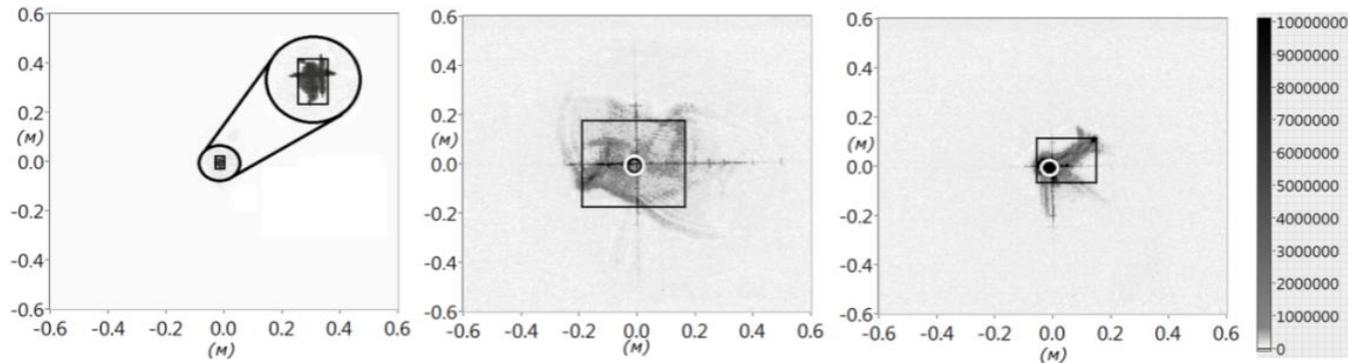
Компенсация aberrаций ВФ «узкого» сфокусированного пучка



(а)



(б)



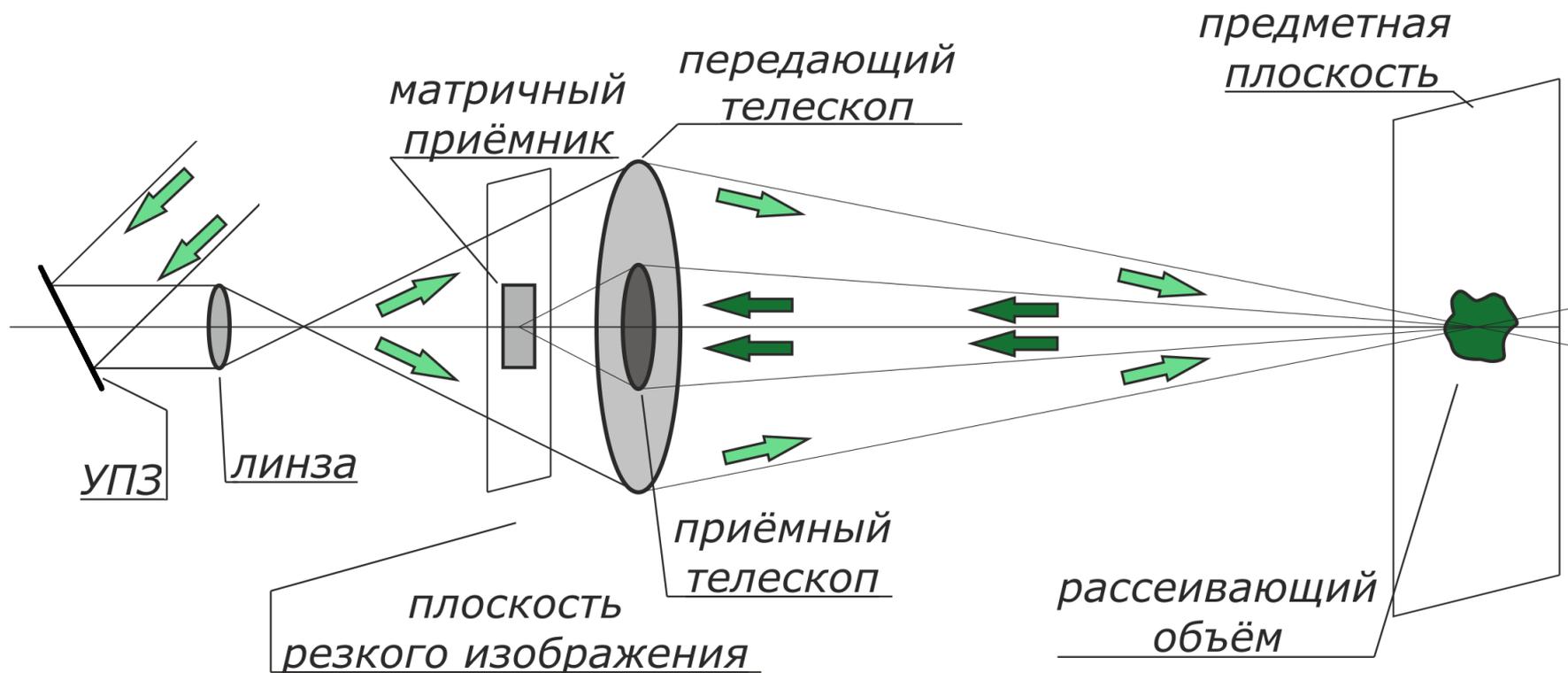
(в)

Аберрации ВФ основного пучка (а), мощность сигнала обратного рассеяния (б), фотографии основного (в) и зондирующего (г) пучков на экране до (слева) и после (посередине) внесения искажений и после коррекции (справа).

$$T = 37,5$$

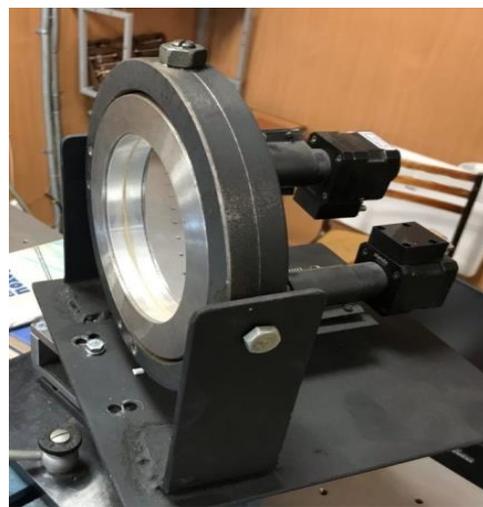
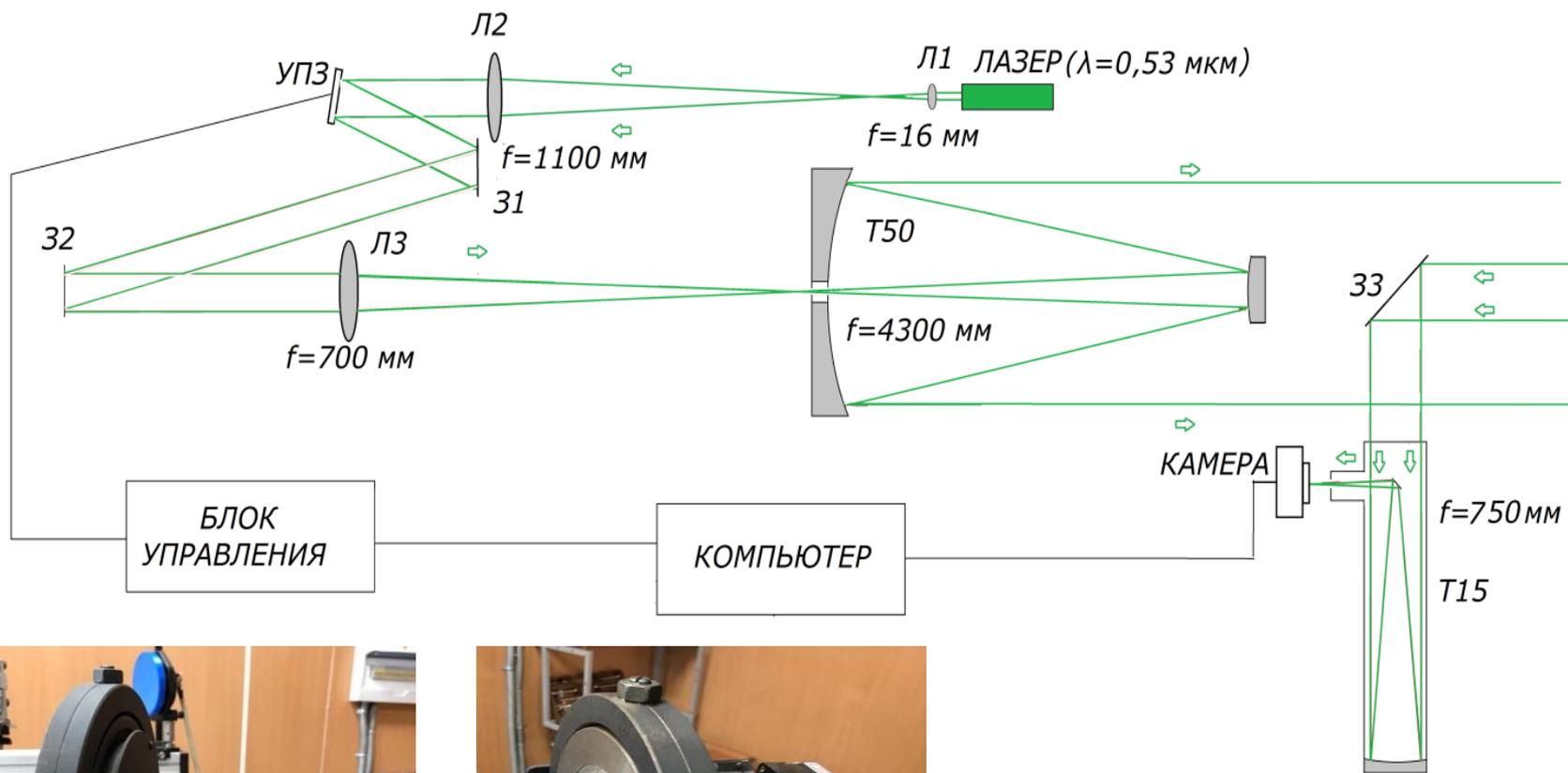
Адаптивное управление направлением распространения лазерного пучка по обратно рассеянному излучению

экспериментальный стенд адаптивного управления направлением распространения.



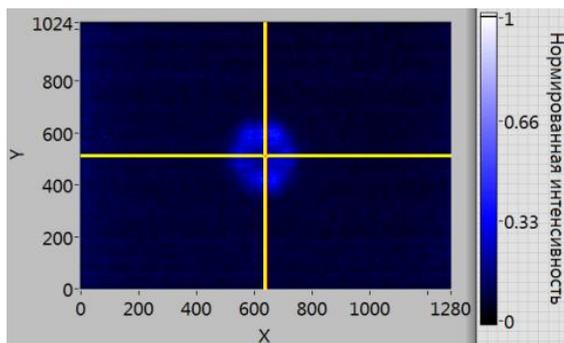
Принцип построения экспериментальной установки

Оптическая схема экспериментальной установки и фотографии управляемого поворотного зеркала (УПЗ)

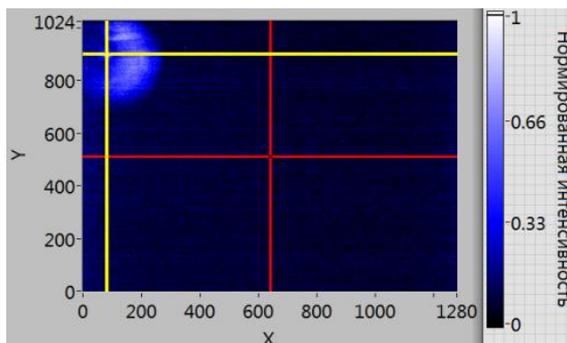


Эксперименты по адаптивной компенсации рассогласования по обратно 18 рассеянному излучению.

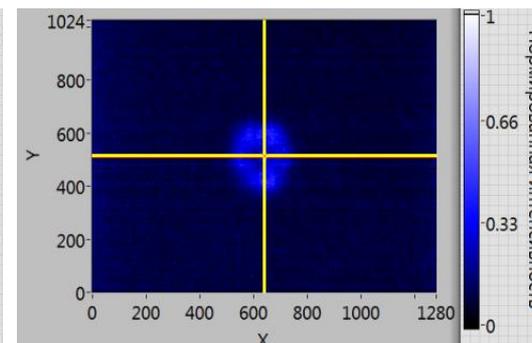
Компенсация рассогласования оптических осей **сфокусированного** лазерного пучка и приёмного телескопа



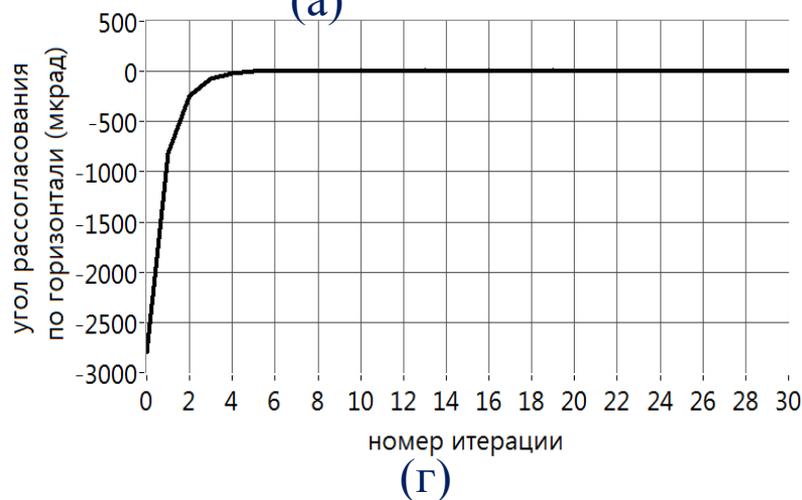
(а)



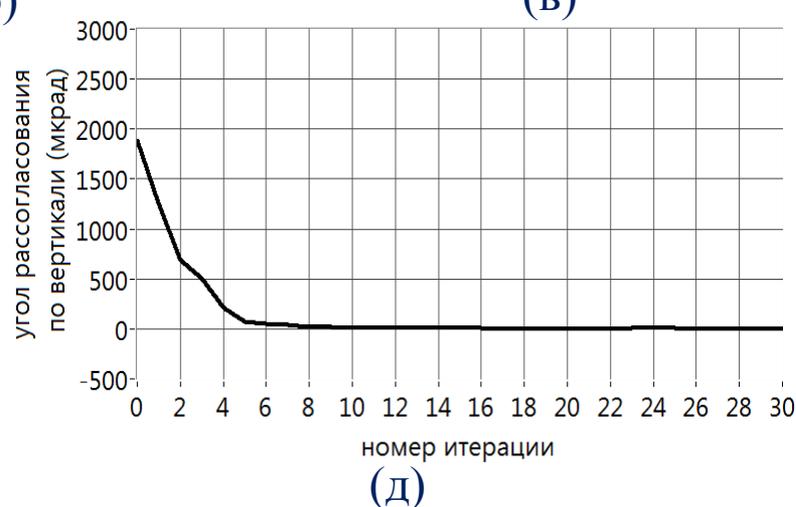
(б)



(в)



(г)



(д)

Исходное (а), после внесения рассогласования (б) и после компенсации рассогласования (в) положение видеоизображения пятна подсвета; угол рассогласования по горизонтальной и вертикальной осям в зависимости от номера итерации (г,д).

Вихревые лазерные пучки

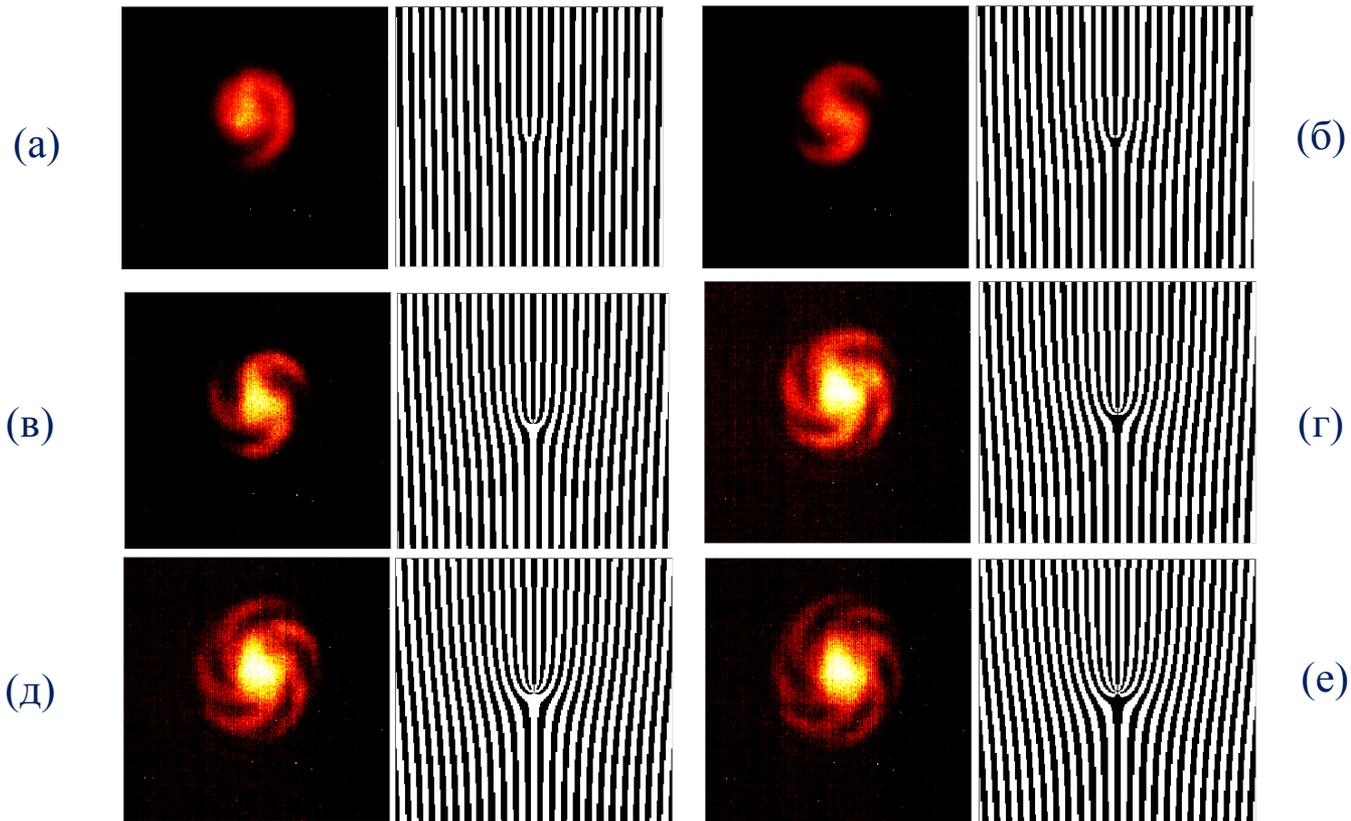
Дифракционная решетка задавалась выражением:

$$h(x, y) = \text{sgn}(\cos(2\pi\alpha + 2\pi\delta(x, y)) - \cos(\pi q(x, y))),$$

sgn – сигнум функция, α – шаг дифракционной решетки

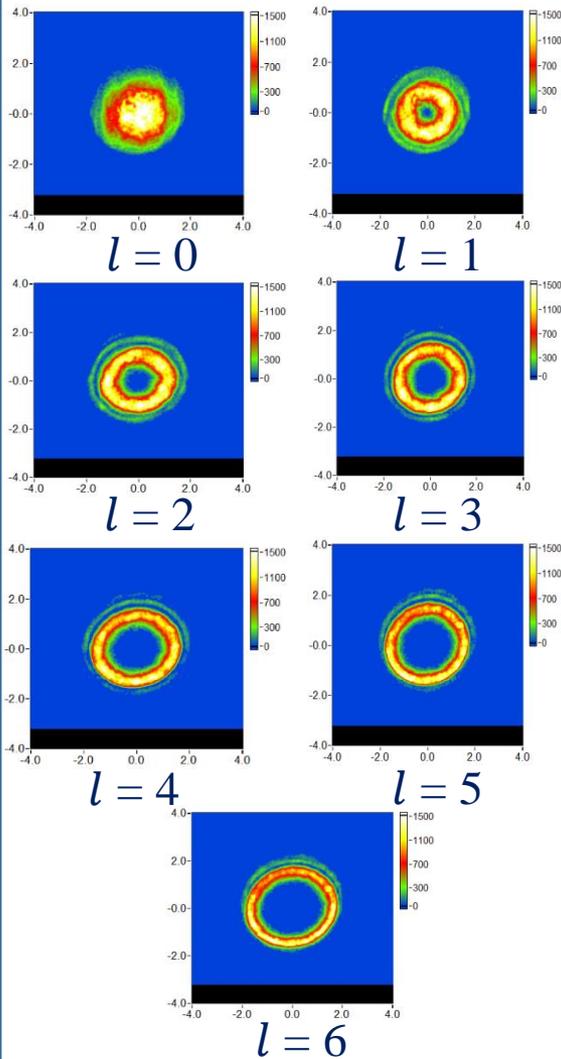
$$q(x, y) = \frac{\arcsin(A(x, y))}{\pi}, \quad \delta(x, y) = \frac{\varphi(x, y)}{2\pi}, \quad A(x, y) - \text{распределение амплитуды и фазы } \varphi(x, y) \text{ пучка.}$$

Для вихревого пучка $\varphi(x, y) = \pm l \arctg 2(y/x)$, где l – топологический заряд

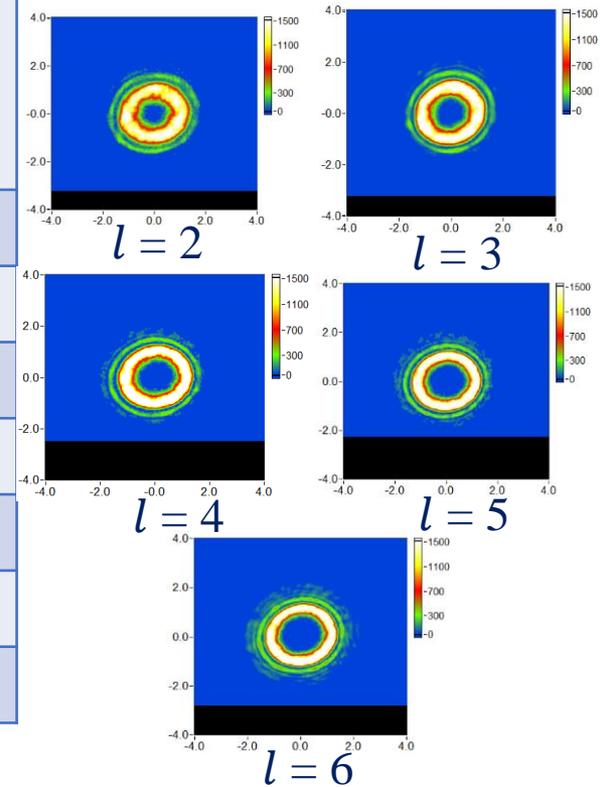


Интерферограмма сложения вихревого и исходного лазерного пучков (слева) и соответствующая бинарная маска, задаваемая на матрице микрозеркал (справа), для различных значений топологического заряда ($l = 1$ -а, $l = 2$ -б, $l = 3$ -в, $l = 4$ -г, $l = 5$ -д, $l = 6$ -е).

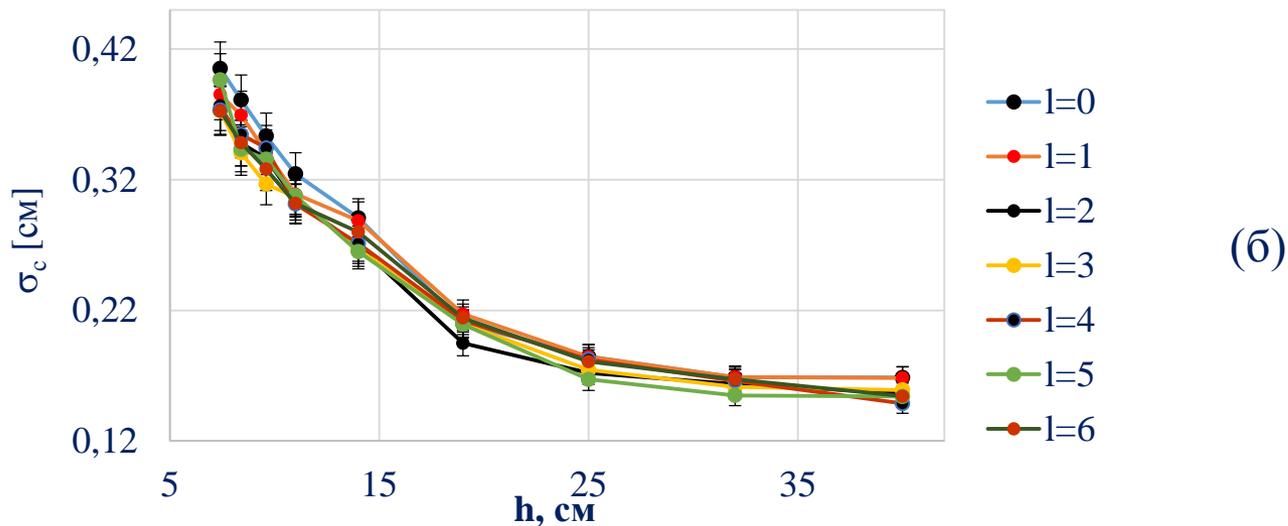
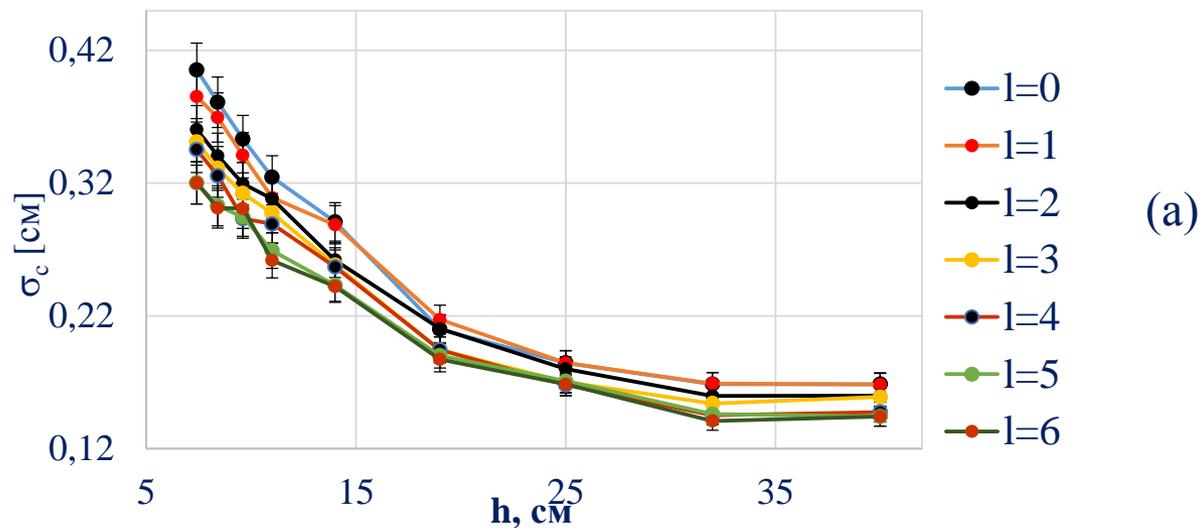
Поперечные размеры вихревых лазерных пучков



	a [см] различные размеры	a [см] «одинаковы»
$l = 0$	1.41	
$l = 1$	1.41	
$l = 2$	1.49	1.41
$l = 3$	1.57	1.32
$l = 4$	1.66	1.32
$l = 5$	1.74	1.41
$l = 6$	1.82	1.49



Распределения интенсивности вихревых пучков на экране для различных значений топологического заряда l при **различных размерах (слева)** и после **приведения к радиусу гауссова пучка (справа)**



Среднеквадратическое отклонение энергетического центра тяжести вихревых пучков при различных значениях топологического заряда: (а) – с различающимися начальными поперечными размерами; (б) – с одинаковыми начальными поперечными размерами в зависимости от высоты над нагреваемой поверхностью.

Цикл научных работ

- 1) Banakh V.A., Gordeev E.V., **Kuskov V.V.**, Rostov A.P. and Shesternin A.N. Controlling the Initial Wavefront of a Spatially Partially Coherent Beam by the Aperture Sensing Technique Based on Backscatter Signals in the Atmosphere: I. Experimental Setup. Atmospheric and Oceanic Optics. – 2021. – V. 34. No. 06. – P. 625–631. – (Published: 11.01. 2022).
- 2) Banakh V.A., Gordeev E.V., **Kuskov V.V.**, Rostov A.P. and Shesternin A.N. Controlling the Initial Wavefront of a Spatially Partially Coherent Beam by the Aperture Sensing Technique Based on Backscatter Signals in the Atmosphere: II. Experiment. // Atmospheric and Oceanic Optics, 2021. – V. 34. No. 06. – P. 632–642. - (Published: 11.01. 2022).
- 3) **Kuskov V.V.**, Banakh V.A. Partially Coherent Beam Focusing Based on Atmospheric Backscatter Signals // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2022. – V. 35. No. 03. – P. 226–231. - (Published: 17.07. 2022)
- 4) **Кусков В.В.**, Банах В.А., Гордеев Е.В., Шестернин А.Н. Использование обратного атмосферного рассеяния для компенсации ухода пучка от заданного направления. // Оптика атмосферы и океана. – 2022. – Т. 35. № 10. – С. 836–842.
- 5) Falits A.V., **Kuskov V.V.**, Banakh V.A. Propagation of vortex optical beams through artificial convective turbulence // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2023. – Vol. 302 Art. Numb. 108568.

Спасибо за внимание!