

УДК 681.7.08

**Адаптивный замкнутый контур для коррекции фазовых искажений  
волнового фронта и измерение пространственных характеристик  
лазерного излучения**

*Антонова С.А., студент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»*

*Научный руководитель: Денисов Д.Г., к.т.н,  
доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы»,  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
[rl2@bmstu.ru](mailto:rl2@bmstu.ru)*

**Введение.**

**Цель работы** заключается в изучение принципов работы, методов и аппаратуры адаптивной системы для коррекции фазовых искажений волнового фронта. Для достижения этой цели решаются следующие **научно-технические задачи**:

1. Анализ существующих адаптивных методов и систем в современных оптических технологиях (ретрансляторы, импульсные мощные лазерные установки, и др.)
2. Исследование областей применения адаптивных систем в оптических технологиях
3. Изучение принципов, состава и алгоритма работы аппаратуры адаптивного замкнутого контура (АЗК)
4. Разработка функционально-оптической схемы для АЗК
5. Проведение теоретических и экспериментальных исследований по оценке измеряемой погрешности параметров волнового фронта.

Поставленные научно-технические задачи весьма актуальны ввиду **существующих научных проблем**:

1. Обеспечение доставки энергии без потерь и искажений на объект с помощью лазерной системы при дистанционном энергообеспечении воздушных, наземных и космических аппаратов (*ретрансляторы*).
2. Проблема получения контролируемой термоядерной реакции для создания чистого и неисчерпаемого источника энергии (*импульсные мощные лазерные установки*)

3. Проблема наблюдения дистанционных объектов и передачи их изображения на дальние расстояния через слой турбулентной атмосферы без искажений, потерь и требуемого качества (*лазерные системы видения*).

В рамках первой задачи были рассмотрены и проанализированы существующие адаптивные системы: ретрансляторы, импульсные мощные лазерные установки и лабораторный стенд адаптивного замкнутого контура, представленный в НОЦ «Фотоника и ИК-техника».

### **Анализ существующих адаптивных систем в современных оптических технологиях.**

**Ретрансляторы** – устройства, главным назначением которых является передача скорректированного мощного лазерного излучения на большие дистанции.

На рисунке 1 представлен возможный вариант концепции построения стратосферного комплекса лазерного энергообеспечения. Так как процесс передачи энергии при дистанционном энергообеспечении воздушных, космических аппаратов (особенно при наземном расположении лазерной системы) зависит от состояния атмосферы и от погодных условий, то поэтому в ретрансляторах есть канал с адаптивной системой, который обеспечивает доставку энергии без потерь и искажений на объект.

**Импульсные мощные лазерные установки** также используют адаптивную оптическую систему. Применяются для создания термоядерных реакций для реализации управляемой реакции термоядерного синтеза и создания чистого и неисчерпаемого источника энергии.

Назначение адаптивного канала в составе ИМЛУ:

1. Коррекция параметров волнового фронта для равномерного подвода энергии ИМЛУ и точного, прецизионного наведения лучей ИМЛУ к поверхности мишени
2. Позволяет существенно уменьшить расходимость излучения и улучшить спектральные характеристики импульсного мощного лазерного излучения

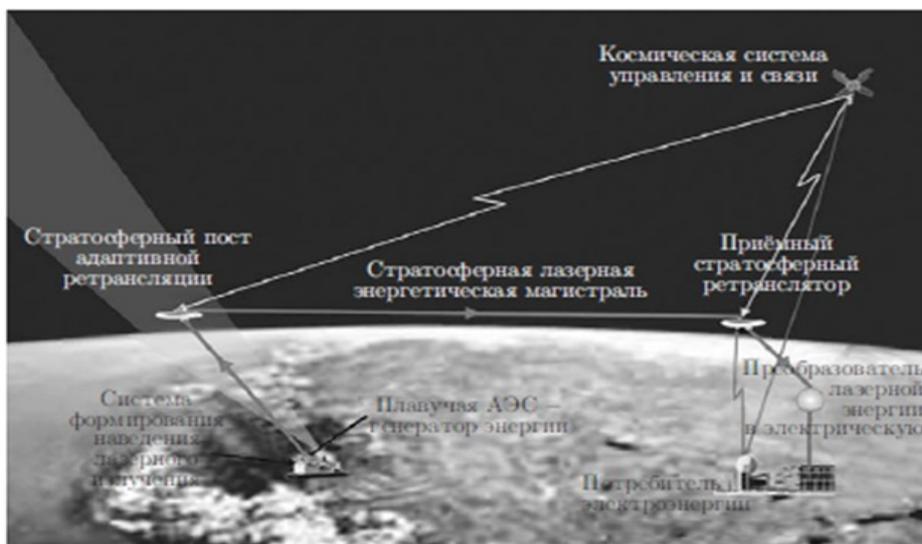


Рис. 1. Возможный вариант концепции построения стратосферного (базирования) комплекса лазерного энергообеспечения.

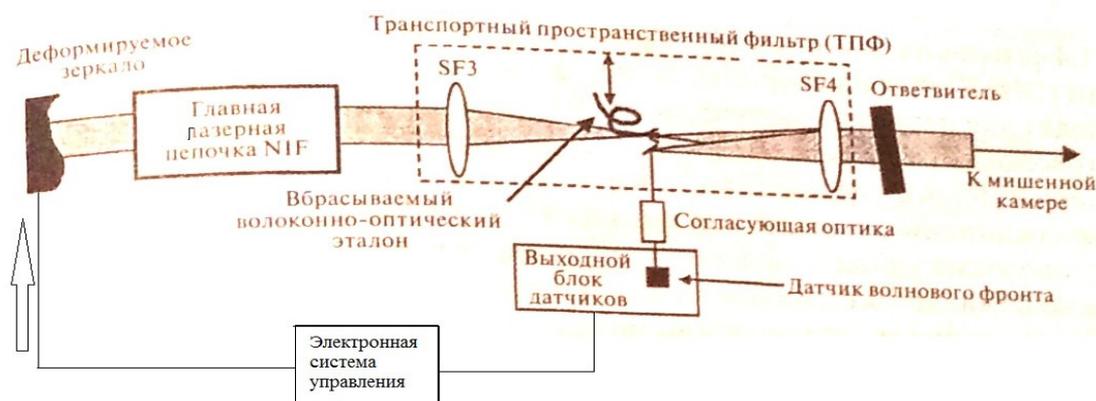


Рис. 2. Блок-схема ИМЛЮ с адаптивной системой

Как видно из рисунка 2 оптический измерительный тракт от выхода пространственного фильтра до ПЗС-матрицы ДВФ содержит большое кол-во неидеальных оптических элементов, вносящих фазовые искажения, поэтому сначала подается эталонный волновой фронт, полученные данные о волновом фронте на выходе ДВФ считываются ЭСУ и становятся базовыми при формировании сигналов коррекции волнового фронта для силового канала. Данные о реальном волновом фронте так же считываются на выходе из ДВФ, затем ЭСУ вычисляет и подает необходимые сигналы на электроды КВФ.

## Адаптивный замкнутый контур для коррекции фазовых искажений волнового фронта.

Совместно с институтом адаптивной оптики в г.Шатура был разработан лабораторный стенд адаптивного замкнутого контура.

На рисунке 3 представлена функциональная схема АЗК.

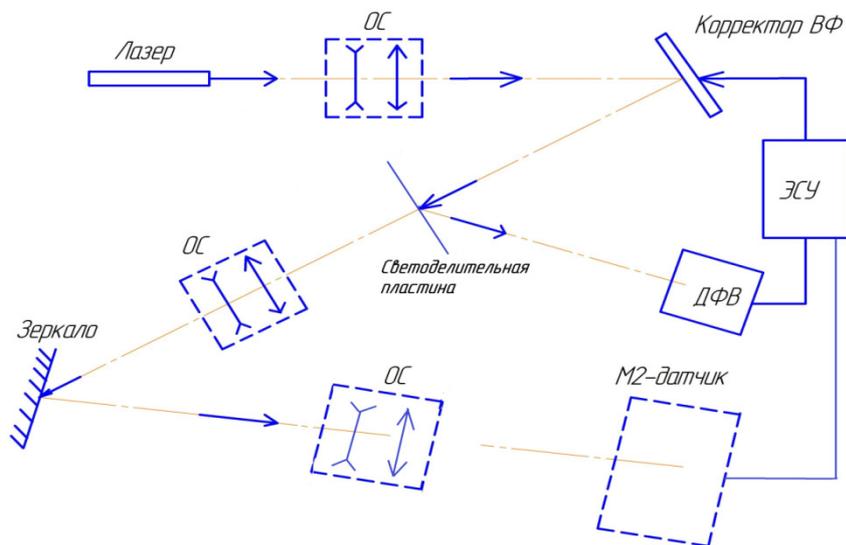


Рис. 3. Функциональная схема АЗК

Входящий пучок от лазера Л отражается от КВФ и попадает на датчик волнового фронта ДВФ. Компьютер анализирует показания ДВФ и электронная система управления вырабатывает управляющие напряжения для КВФ. Под действием управляющих напряжений КВФ изменяет свою форму таким образом, что в волновой фронт излучения на входе в усилитель вносятся искажения, компенсирующие влияние оптических неоднородностей усилителя. В результате волновой фронт выходного излучения корректируется, что улучшает фокусируемость пучка. Часть излучения попадает на М2-датчик, который выдает нам показания, позволяющие судить о качестве лазерного пучка по минимизации фокального пятна.

**Назначение** лабораторного стенда:

1. Контроль и адаптация фазовых искажений волнового фронта, прошедшего через слой турбулентной атмосферы
2. Исследование режимов работы лазерных систем видения в условиях плохой видимости
3. Адаптация лазерного излучения по минимизации фокального пятна с помощью М2-контура ( М2-датчик с формирующей ОС)

**Принцип работы системы** основан на коррекции (адаптации) параметров волнового фронта, за счет обратной связи между адаптивным зеркалом и датчиком волнового фронта, а также между адаптивным зеркалом и  $M^2$ -датчиком.

#### **Применение:**

1. Проведение теоретических и экспериментальных исследований принципов работы аппаратуры АЗК с целью достижения её оптимальных режимов работы.
2. Разработка алгоритмов и методов контроля фазовых искажений волнового фронта, прошедшего через слой турбулентной атмосферы.
3. Диагностика пространственных характеристик лазерного излучения по контролю  $M^2$ - параметра.

#### **Изучение принципов, состава и алгоритма работы аппаратуры адаптивного замкнутого контура (АЗК)**

**Датчик волнового фронта типа Шака-Гартмана (ДВФ-50)** - один из важнейших узлов адаптивной системы.

На рис. 5 представлен принцип действия ДВФ Шака-Гартмана. Основные элементы датчика: приемник ПЗС-камеры и линзовый растр – матрица микролинз, которая разбивает проходящий волновой фронт на локальные участки, фокусирующиеся затем на приемнике, где формируется изображение, называемое гартманограммой. Датчик Гартмана измеряет локальные наклоны волнового фронта, пропорциональные локальным смещениям фокальных пятен.

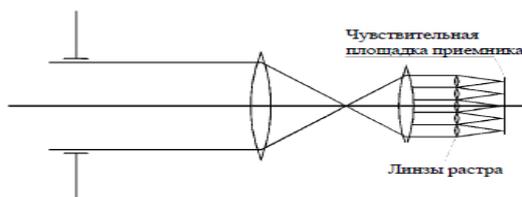


Рис. 4. Принцип действия ДВФ Шака-Гартмана

Гартманограмма показана на рис.5,а, а на рис.5,б изображена одиночная микролинза растра, фокусирующая падающее излучение на приемном элементе ПЗС-камеры.

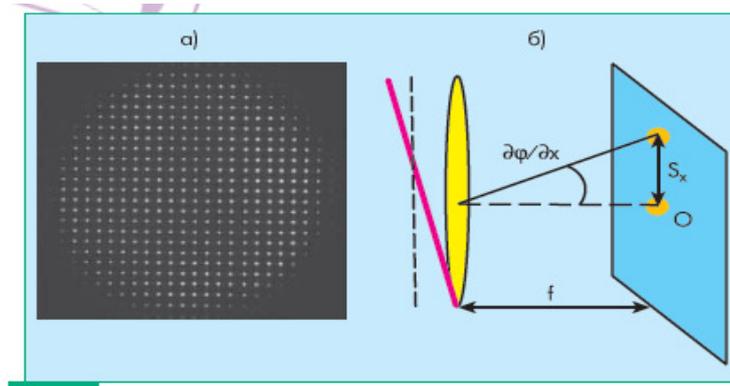


Рис. 5. а) Гартманограмма;  
 б) Преломление лучей одиночной микролинзой

Рассмотрим математическое описание принципа работы ДВФ. Центры фокальных пятен  $(x_k, y_k)$  находятся методом центроидов для каждой из локальных областей, на которые разбивается вся поверхность приемника, с помощью выражения (1):

$$x_k = \frac{\sum_{j=1}^n \left( \sum_{i=1}^m x_i I_{ij} \right)}{\sum_{j=1}^n \left( \sum_{i=1}^m I_{ij} \right)}, \quad y_k = \frac{\sum_{j=1}^n \left( \sum_{i=1}^m y_i I_{ij} \right)}{\sum_{j=1}^n \left( \sum_{i=1}^m I_{ij} \right)}, \quad (1)$$

где  $m, n$  - число чувствительных элементов (пикселей) ПЗС-матрицы по осям  $x, y$  в пределах  $k$ -ой локальной области,  $I_{ij}$  - значение интенсивности в пикселе.

Локальный наклон волнового фронта  $\varphi$  по координатам  $x, y$  можно записать в виде формулы (2):

$$\frac{\partial \varphi(x_k, y_k)}{\partial x} = \frac{1}{f} S_x^k, \quad \frac{\partial \varphi(x_k, y_k)}{\partial y} = \frac{1}{f} S_y^k, \quad k=1, \dots, N_k, \quad (2)$$

где  $f$  – фокусное расстояние микролинзы,  $(x_{0k}, y_{0k})$  - центр  $k$ -го фокального пятна для плоского волнового фронта,  $N_k$  – число фокальных пятен на гартманнограмме. Т.о. локальный наклон волнового фронта в  $k$ -ой области пропорционален смещению фокального пятна, которое находится экспериментально согласно выражению (3):

$$S_{x_k} = x_{0k} - x_k, \quad S_{y_k} = y_{0k} - y_k, \quad (3)$$

С другой стороны локальный наклон можно представить в виде разложения по полиномам Цернике (4):

$$\frac{\partial \varphi(x_k, y_k)}{\partial x} = \sum_{p=1}^{NP} a_p \frac{\partial F_p(x_k, y_k)}{\partial x} \quad \text{и} \quad \frac{\partial \varphi(x_k, y_k)}{\partial y} = \sum_{p=1}^{NP} a_p \frac{\partial F_p(x_k, y_k)}{\partial y} \quad (4)$$

где  $N_p$  – число полиномов разложения,  $a_p$  – коэффициенты при полиномах Цернике,  $F_p(x_k, y_k)$  – значение полинома Цернике  $p$ -го порядка в точке  $(x_k, y_k)$ .

Коэффициенты при полиномах Цернике показывают величину aberrаций волнового фронта, например, дефокусировку, астигматизмы, комы и т.д.

Приравнивая правые части выражений (1) и (2) получаем систему уравнений относительно неизвестных коэффициентов Цернике. В матричной форме система выглядит  $S = a \cdot dF$ , где  $S$  – вектор смещений, отнесенных к фокусному расстоянию  $f$ ;  $a$  – коэффициенты Цернике;  $dF$  – прямоугольная матрица производных от двухмерных полиномов Цернике, размером  $2N_p \times N_k$ .

Для решения системы был использован метод наименьших квадратов, суть которого заключается в минимизации функционала разности между наклонами волнового фронта, определенными экспериментально по (1), с одной стороны, и, представленными по разложению (2).

Решением полученной системы уравнений является выражение (5) для нахождения коэффициентов полиномов Цернике:

$$a = (dF^t \cdot dF)^{-1} dF^t \cdot S \quad (5)$$

где  $dF^t$  – транспонированная матрица.

Для представления фазового распределения в виде интерференционной картины, удобной для визуальной оценки величины aberrаций, волновой фронт рассчитывался по найденным коэффициентам Цернике согласно формуле (6):

$$\varphi(x, y) = \sum_{p=1}^{N_p} a_p F_p(x, y) \quad (6)$$

а распределение интенсивности света для каждой точки апертуры рассчитывалось по формуле:  $I(x, y) = 2\{1 + \cos[2\pi/\lambda\varphi(x, y)]\}$ , где  $I(x, y)$  – интенсивность в точке  $(x, y)$  интерференционной картины.

## Аберрации, представленные полиномами Цернике.

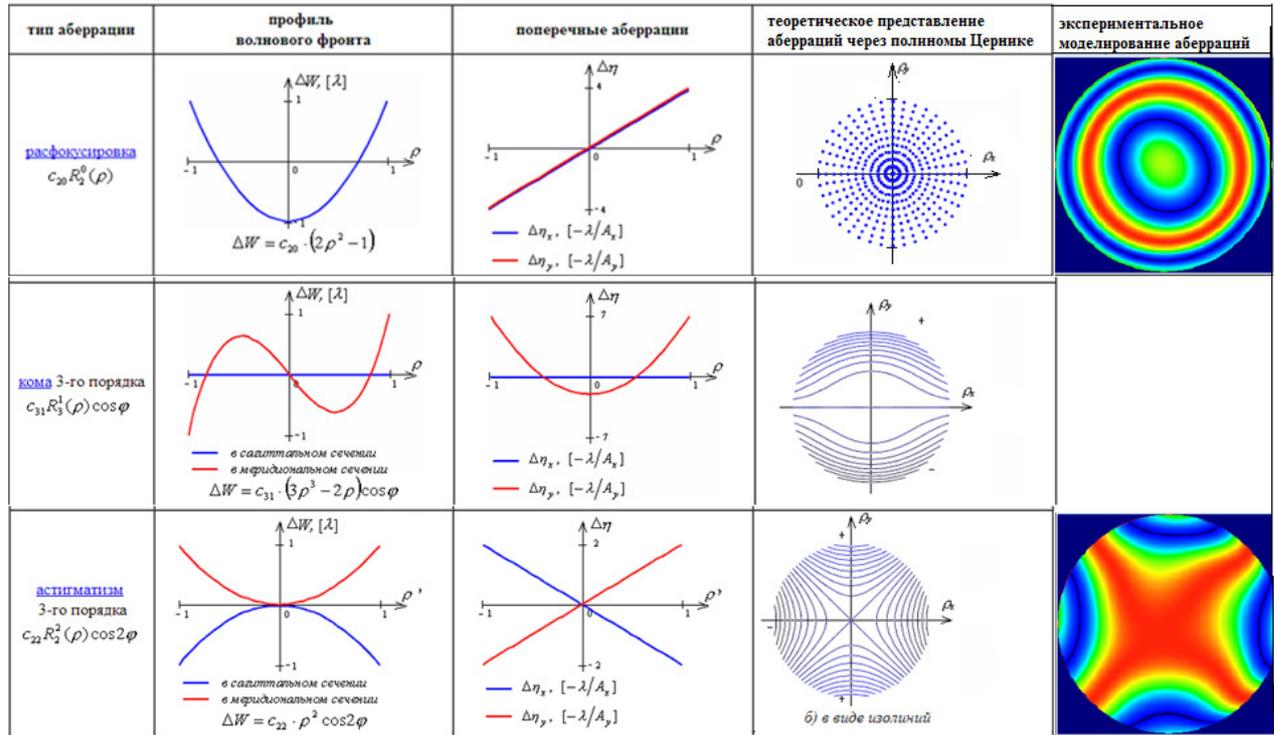


Рис. 6. Основные виды аберраций, представленных полиномами Цернике

На рисунке 6 продемонстрировано *теоретическое представление аберраций через полиномы Цернике* и экспериментальное моделирование (практическая реализация) аберраций за счет принудительного прогиба сегментов КВФ.

Практическая реализация аберраций имеет прикладное значение, так как с помощью такого моделирования мы можем вынужденно имитировать вид аберрации и исследовать его, что сыграет немаловажную роль для научно-исследовательских задач и формирования в последующем лабораторных и научных исследований

### Расчет предельной чувствительности ДВФ-50.

Был проведен расчет по предельной чувствительности ДВФ на максимальное отклонение ВФ от плоского профиля при условии, что ВФ с астигматизмом.

Сначала определили максимальное отклонение волнового фронта, которую может почувствовать ДВФ, *геометрически*, используя рисунок 7, и с учетом размеров матрицы линзового раstra, фокусного расстояния и диаметра микролинзы.

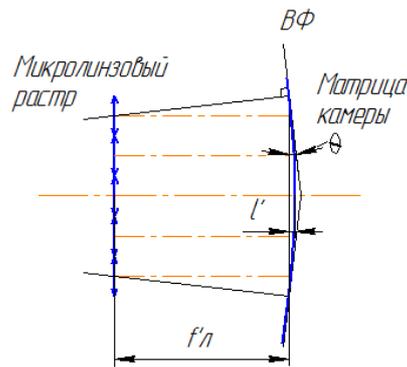


Рис. 7. Максимальное отклонение нормали ВФ на крайних питчах матрицы

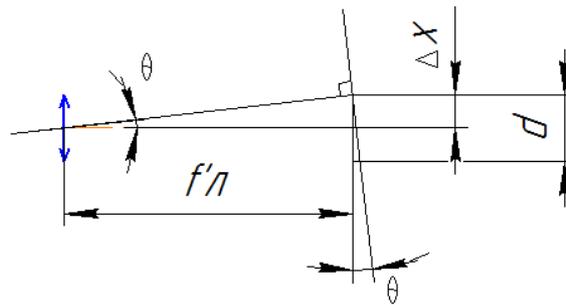


Рис. 8. Отклонение нормали ВФ на крайней микролинзе:  $\Delta x$  – отклонение нормали,  $d$  – диаметр микролинзы,  $f'_{л}$  – фокусное расстояние микролинзы

Из рисунка 8 видно соотношение для углов по свойству внешнего угла треугольника:  $\theta + 90^\circ = 90^\circ + \alpha$ . Следовательно,  $\alpha = \theta$ .

Из геометрических соображений:  $tg\theta = \frac{\Delta x}{f'_{л}}$

Из-за малости углов примем допущение:  $\theta \approx tg\theta \approx \sin\theta$ . Тогда максимальный динамический диапазон определяется согласно выражению (1):

$$\Delta x = \theta f'_{л} \quad (1)$$

Нормаль к ВФ не должна выходить за пределы матрицы, поэтому максимальное отклонение будет определяться размерами питча  $d$  по формуле (2):

$$\Delta x = \frac{d}{2} \quad (2)$$

Сопоставив, (1) и (2), получим выражение (3) для угла:

$$\theta = \frac{d}{2f'_{л}} \quad (3)$$

Из геометрических соображений для угла  $\theta$ :  $\sin\theta = \frac{D_M}{2R}$ . С учетом выше указанного допущения окончательно получим выражение (4):

$$\theta = \frac{D_M}{2R} \quad (4)$$

Приравняем (3) и (4) и выразим радиус кривизны ВФ в виде (5):

$$R = \frac{D_M f'_L}{d} \quad (5)$$

Максимальное отклонение ВФ от плоского профиля определим в виде (6.1) или (6.2):

$$l' = R - R \cos \theta \quad (6.1)$$

$$l' = R - \sqrt{R^2 - \frac{D_M^2}{4}} \quad (6.2)$$

Подставим (5) в (6), получим выражение (7) для максимального отклонения ВФ от плоскостности:

$$l' = \frac{D_M f'_L}{d} - \sqrt{\frac{D_M^2 f_L'^2}{d^2} - \frac{D_M^2}{4}} = D_M \left[ \frac{f'_L}{d} - \sqrt{\frac{f_L'^2}{d^2} - \frac{1}{4}} \right] \quad (7)$$

$$l' = 5.1 \left[ \frac{16}{0.3} - \sqrt{\frac{16^2}{0.3^2} - \frac{1}{4}} \right] = 0.01239 \text{ мм} = 12.4 \text{ мкм};$$

Провели расчет предельной чувствительности ДВФ на максимальное отклонение ВФ с помощью полиномов Цернике. Деформация волнового фронта ответственная за появление астигматизма имеет характерную седловидную форму на рисунке 9,а и описывается полиномом Цернике в полярных координатах выражением (8.1), (8.2) и в декартовой форме (9.1), (9.2):

$$W = \sqrt{6} r^2 \cos 2\theta; \quad (8.1)$$

$$W = \sqrt{6} r^2 \sin 2\theta; \quad (8.2)$$

$$\text{По осям от } 0 \text{ до } \frac{\pi}{2}: \quad \Delta W = y^2 - x^2 \quad (9.1)$$

$$\text{По осям } \pm \frac{\pi}{4}: \quad \Delta W = 2xy \quad (9.2)$$

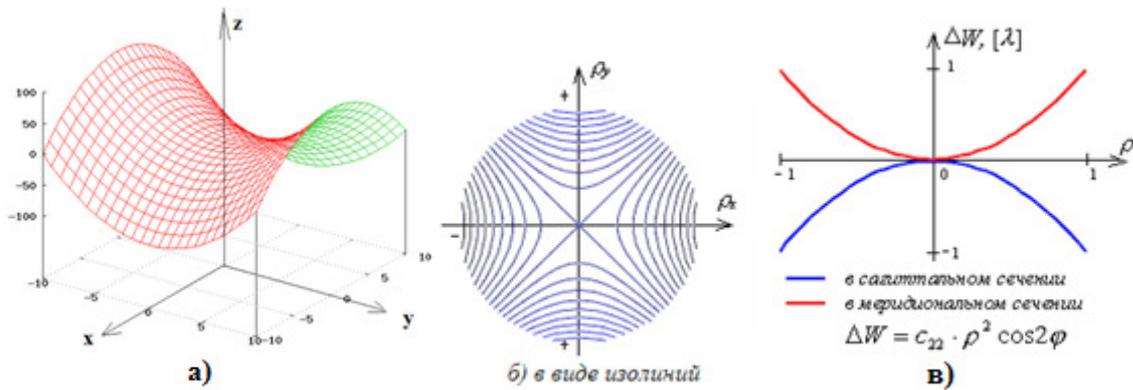


Рис. 9.

- а) Деформация волнового фронта ответственная за появление астигматизма;
- б) Отклонение волнового фронта в плоскости XOY;
- в) Отклонение волнового фронта в меридиональном и сагиттальном сечении

На рис.9, б в плоскости XOY волновой фронт, разложенный по полиномам Цернике, имеет вид гипербол, описываемых в декартовых координатах уравнением:  $y^2 - x^2 = 1$  (канонический вид).

Вычислив, отклонение волнового фронта в виде (10), вписанного в матрицу линзового раstra, нашли максимальное отклонение ВФ от плоскости в этом сечении по формуле (11).

$$W_{\max} = y^2 - x^2 = 6.75^2 - 5.1^2 = 19.55 \quad (10)$$

$$\Delta W = W_{\max} - W_{\min} = 19.55 - 1 = 18.55\lambda = 12.057 \text{ мкм} \quad (11)$$

В плоскостях XOZ и YOZ ( в меридиональном и сагиттальном сечении) астигматическая поверхность отклонения волнового фронта будет иметь вид параболы. С учетом этого, вычислим максимальное отклонение ВФ в этих плоскостях соответственно по формулам (12) и (13).

$$\Delta W = y^2 = 45.56\lambda = 29.64 \text{ мкм} \quad (12)$$

$$\Delta W = x^2 = 26.01\lambda = 16.9 \text{ мкм} \quad (13)$$

Эти данные позволяют судить нам о чувствительности ДВФ по астигматизму на максимальное отклонение ВФ от плоскости в различных сечениях.

Рассмотрим след узел АЗК - **корректор ВФ**. В лабораторном стенде использовались **секционированные биморфные зеркала**.

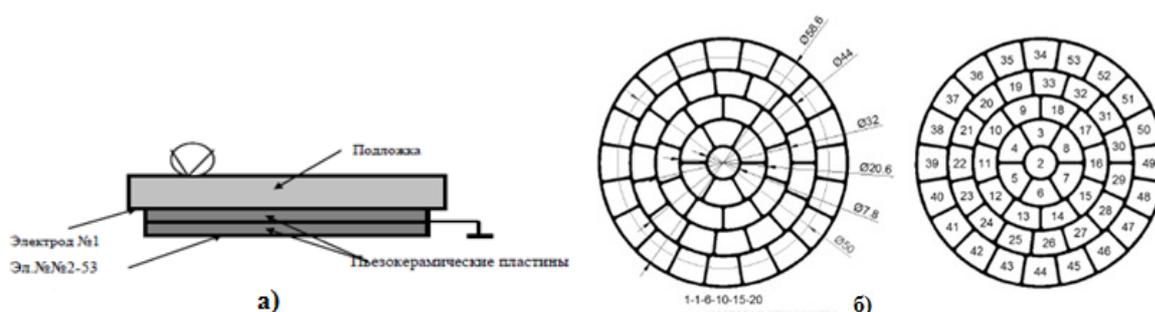


Рис. 10.

а) Устройство биморфного зеркала;

б) схема расположения управляющих электродов

На рисунке 10,а представлено устройство биморфного зеркала и на рис.10,б схема управляющих электродов. Зеркало состоит из подложки с отражающим покрытием и двух приклеенных к ней пьезодисков с противоположным направлением поляризации. Подача электрического напряжения на такой элемент вызовет расширение одного слоя и сжатие другого, т. е. изгиб двухслойного элемента. Внутренний диск со сплошными электродами служит для коррекции общей кривизны поверхности (воспроизводит дефокусировку). На поверхности второго диска электроды выполнены в виде секторов, которые служат для воспроизведения aberrаций низких порядков, таких как астигматизм, кома, сферическая aberrация и т. д.

Основными характеристиками биморфного зеркала, используемого в лабораторном стенде, являются: количество управляемых сегментов (53 штуки), размер 1 сегмента (3..5 мм), мах деформация поверхности зеркала по параметру PV (40 мкм).

#### **$M^2$ -датчик.**

В лабораторном стенде для регистрации фокального пятна, качество которого определяется  $M^2$ - параметром, использовали  $M^2$ -датчик. Этот узел АОС также позволяет получать другие важные параметры лазерного излучения:

1. Диаметр пучка  $D$
2. Угол расходимости  $\Theta$

Конструкция  $M^2$ -датчика представлена на рисунке 11.

Была предложена удобная схема измерений параметра  $M^2$  с помощью сменных линз, представленная на рисунке 12.

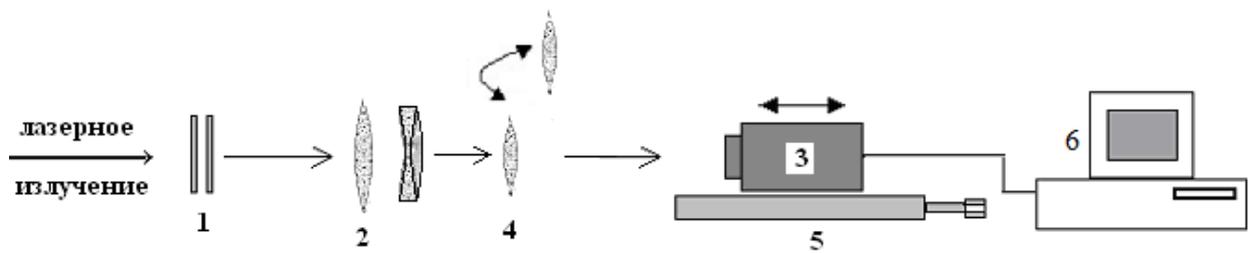


Рис. 11. Схема  $M^2$ -датчика: 1 – ослабляющие фильтры, 2 – масштабирующий телескоп, 3 – детектирующая система (CCDкамера), 4 – приспособление для смены линз револьверного типа, 5 – юстировочный столик, 6 – компьютер

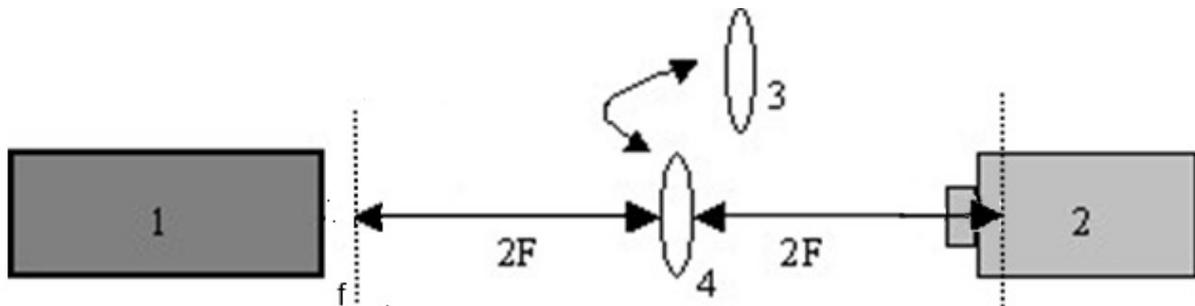


Рис. 12. Схема определения  $M^2$  при помощи двух линз. 1 – лазер, 2 – ПЗС-камера, 3 – линза с фокусным расстоянием  $2F$ , 4 – линза с фокусным расстоянием  $F$

Установка состоит из ПЗС-камеры 2 и двух линз 3, 4. Для измерения диаметра перетяжки пучка  $d_0$  может использоваться фокусирующая линза 4 с фокусным расстоянием  $F$ , расположенная на расстоянии  $2F$  от выходного отверстия лазера. Согласно известным оптическим принципам, изображение перетяжки будет располагаться на расстоянии  $2F$  от линзы. Чтобы измерить угол расходимости  $\theta$ , устанавливается линза 3 с фокусным расстоянием  $2F$ , в фокальной плоскости которой измеряется диаметр сфокусированного пучка  $d_f$ . Угол расходимости вычисляется согласно (1):

$$\theta = \frac{d_f}{f}. \quad (1)$$

$M^2$  вычисляется по формуле (2):

$$M^2 = \frac{\pi}{4\lambda_0} n d_0 \theta = \frac{\pi}{4\lambda} d_0 \theta \quad (2)$$

Методика измерения параметра качества лазерного пучка, основанная на измерении моментов распределения интенсивности (согласно международному стандарту) ISO 11146:

1. Для оценки угла расходимости и параметра качества луча M2 используется диаметр пучка, для вычисления которого распределение интенсивности регистрируется ПЗС-камерой в нескольких сечениях, расположенных до и после фокальной плоскости линзы, данные вводятся в компьютер для вычисления диаметров пучка  $d$ . Диаметр пучка определяется для радиально симметричного пучка, как

$$d(z) = 2\sqrt{2}\sigma(x) \quad (3)$$

Вторые моменты распределения интенсивности  $I(x,y,z)$  в положении  $z$ :

$$\begin{aligned} \sigma^2(z) &= \frac{\iint r^2 I(r, z) dr d\varphi}{\iint I(r, z) dr d\varphi} \\ \sigma_x^2(z) &= \frac{\iint (x - \bar{x})^2 I(x, y, z) dx dy}{\iint I(x, y, z) dx dy} \\ \sigma_y^2(z) &= \frac{\iint (y - \bar{y})^2 I(x, y, z) dx dy}{\iint I(x, y, z) dx dy} \end{aligned} \quad (4)$$

где  $r$ - расстояние до центра тяжести  $(\bar{x}, \bar{y})$ , координаты которого дают первые моменты – координаты центра распределения плотности интенсивности в поперечном сечении пучка.

$$\bar{x} = \frac{\iint x I(x, y, z) dx dy}{\iint I(x, y, z) dx dy}, \quad \bar{y} = \frac{\iint y I(x, y, z) dx dy}{\iint I(x, y, z) dx dy} \quad (5)$$

Точность определения  $M^2$  должна составлять не менее 10%. Для обеспечения достаточной точности диаметр и положение перетяжки должны определяться следующим образом:

1. Проводится не менее двадцати измерений профилей распределения интенсивности, равномерно распределённых по оси распространения пучка  $z$ , половина из которых должна лежать на расстоянии одной длины Релея по обе стороны от предполагаемого положения перетяжки, а другая половина должна располагаться в пределах двух длин Релея от перетяжки пучка.
2. Для каждого измерения вычисляется диаметр пучка  $d$ .
3. Полученные данные аппроксимируются параболой согласно (6):

$$d^2 = A + Bz + Cz^2 \quad (6)$$

4. Коэффициенты  $A, B, C$  определяют обычно подходящими численными или статистическими методами криволинейной аппроксимации. Чаще всего путем минимизации суммы квадратов относительных отклонений при измерениях диаметра.

5. Когда коэффициенты  $A, B, C$  получены, положение  $z_0$  можно определить как координату вершины параболы (условие: дискриминант  $D=0$ ) по формуле (7):

$$z_0 = \frac{-B}{2C} \quad (7)$$

6. Подставив выражение для вершины параболы вместо  $z$ , получим диаметр перетяжки  $d_0$  в виде (8):

$$d_0 = \sqrt{A - \frac{B^2}{4C}} \quad (8)$$

7. Длина Релея, по определению, - это расстояние, на котором диаметр становится равным  $d_{z_R} = \sqrt{2}d_0$ . Подставив значение  $d_{z_R}$  вместо  $d$ , получим (9):

$$z_R = \frac{1}{C} \sqrt{AC - B^2 / 4} \quad (9)$$

8. С другой стороны, длину Релея можно определить по формуле (10):

$$z_R = \frac{\pi d_0^2}{\lambda} \quad (10)$$

откуда можно выразить параметр качества  $M^2$ , приравняв (9) и (10), в виде (11):

$$M^2 = \frac{\pi}{4\lambda} \sqrt{AC - B^2 / 4} \quad (11)$$

9. Из используя выражение для  $M^2$ :  $M^2 = \frac{\pi}{4\lambda_0} n d_0 \theta = \frac{\pi}{4\lambda} d_0 \theta$  и выражение (11), угол расходимости вычислим по формуле (12):

$$\theta = \sqrt{C} \quad (12)$$

10. Зная  $M^2$ -параметр, найдем диаметр фокального пятна по выражению (13):

$$d_f = M^2 \frac{4\lambda f}{\pi d_0} \quad (13)$$

## Алгоритм работы АОС с замкнутой обратной связью

Управление поверхностью биморфного зеркала осуществляется подачей напряжения на электроды. Величины этих напряжений рассчитываются по предложенному нами алгоритму.

Предварительно (до включения системы) измеряются координаты центров фокальных пятен для плоского волнового фронта и функции отклика электродов зеркала. Число таких функций равно числу электродов, а сама функция – результат деформации поверхности зеркала, вызванной приложенным единичным напряжением  $u_0$  к данному электроду.

Затем измеряются смещения фокальных пятен корректируемого волнового фронта относительно референсных. И наконец, методом наименьших квадратов вычисляются напряжения, которые необходимо подать на электроды для минимизации смещений  $\Delta S$ .

Автоматическое управление напряжениями на электродах осуществляется линейным пропорциональным алгоритмом.

Блок-схема алгоритма на рисунке 13.

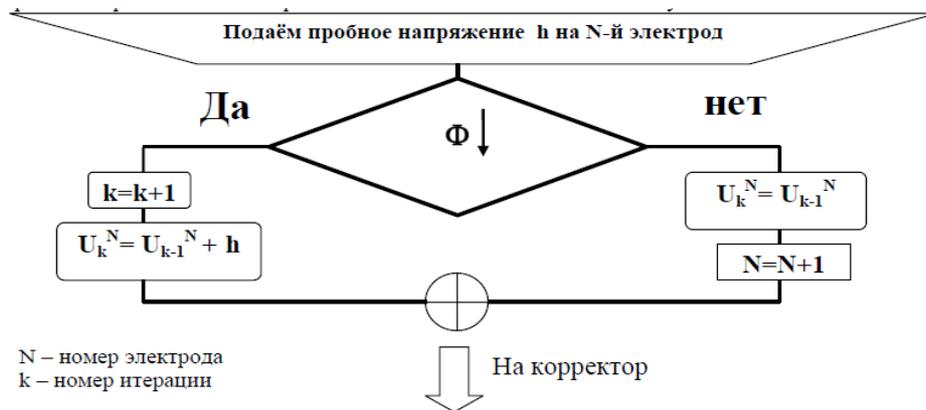


Рис. 13. Блок-схема алгоритма подачи напряжения на электроды зеркала

Сначала мы подаём пробное напряжение на один из электродов зеркала. Если целевая функция  $\Phi$  выражение (1):

$$\Phi = \min \left\{ \sum_i \Delta S^2 \right\} \quad (1)$$

где  $i$ - номер субапертуры линзлета, улучшается, мы продолжаем изменять напряжение на этом электроде в том же направлении до тех пор, пока  $\Phi$  не начнёт ухудшаться. После этого мы подаём пробное напряжение на следующий электрод и так далее по всем электродам. Процедура достаточно проста, но занимает много времени

## Экспериментальные исследования.

Для апробации результатов был проведен эксперимент по оценке измеряемой с помощью АЗК.

На первом этапе исследований регистрировалась гартнограмма и интерферограмма волнового фронта, прошедшего через фазовую пластинку, представлено на рисунке 14.

На втором этапе выводилась фазовая пластина из канала АЗК и при неизменных условиях регистрировалась гартнограмма и интерферограмма волнового фронта, скорректированного КВФ (адаптивным зеркалом), представлено на рисунке 15.

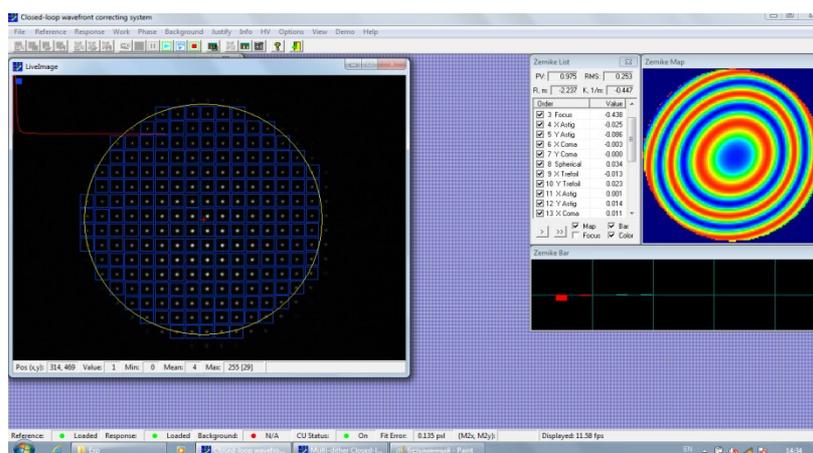


Рис. 14. Гартнограмма и интерферограмма волнового фронта с фазовой пластинкой, внесшей дефокусировку

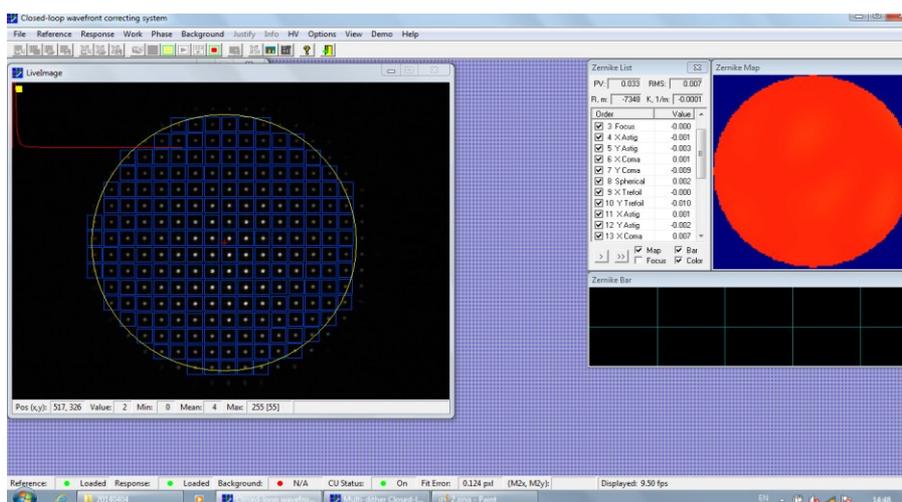


Рис. 15. Гартнограмма и интерферограмма волнового фронта, отработанного КВФ

## Внешний вид стенда

На рисунке 16 представлен **внешний вид стенда** в соответствии с функциональной схемой, созданной совместно с институтом адаптивной оптики, и представленным в НОЦ «Фотоника и ИК-техника».

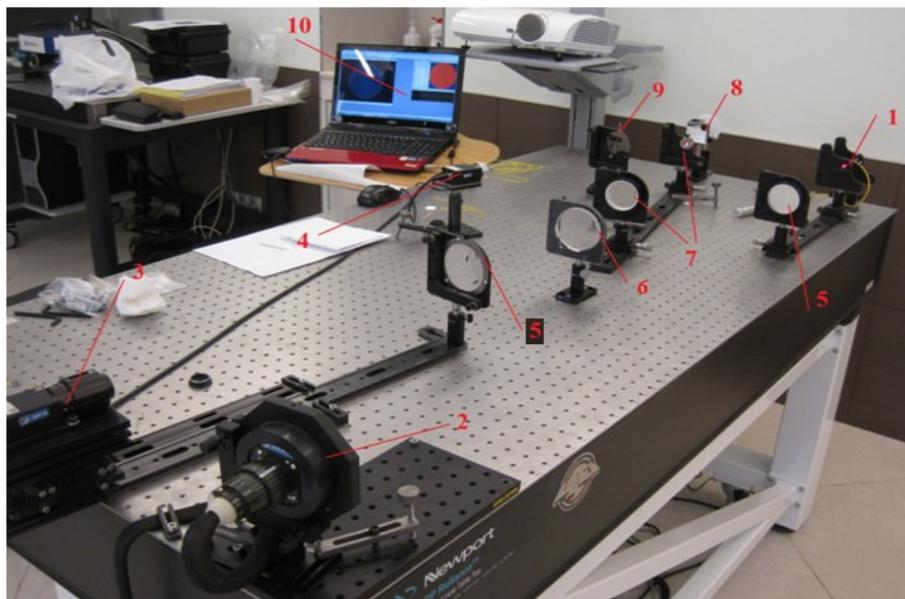


Рис. 16. Внешний вид стенда:

- 1 – лазер BOBWFS650, 2 – КВФ-50-53, 3 – ДВФ-50, 4 –  $M^2$ -датчик,  
5 – фокусирующая линза, 6 – светоделительная пластинка, 7 –  
масштабирующий телескоп, 8 – зеркало, 9 – приспособление для смены линз  
револьверного типа, 10 - ПК

## Заключение

На основе проведенного изучения адаптивных систем в рамках научно-исследовательской работы можем сделать следующие **выводы**:

1. Проведён анализ существующих адаптивных систем в современных оптических технологиях (ретрансляторы, ИМЛУ, и др.)
2. Проанализированы области применения адаптивных систем в оптических технологиях
3. Изучены принципы и алгоритм работы аппаратуры адаптивного замкнутого контура

4. Проведен расчет предельной чувствительности ДВФ по астигматизму (при диаметре микролинзового растра 5,1 мм, фокусном расстоянии микролинзы 16 мм, диаметре микролинзы 0,3 мм)  $\Delta l = 12.39$  мкм
5. Получены экспериментальные результаты интерференционных измерений с помощью АЗК:  
  
по P-V: с фазовой пластинкой  $W1 = 0.975$  мкм  
  
без фазовой пластинки  $W2 = 0.033$  мкм  
по RMS: с фазовой пластинкой  $W1 = 0.253$  мкм  
  
без фазовой пластинки  $W2 = 0.007$  мкм  
  
по  $M^2$ -датчику в АЗК:  $M^2_x = 5,901$ ,  $M^2_y = 10.047$
6. На базе рассмотренной функционально-оптической схемы адаптивного замкнутого контура (АЗК) предполагается впоследствии спроектировать как изображающую систему видения, так и АЗК, работающий по минимизации фокального пятна. Универсальность данного решения позволит одновременно проводить исследования как параметров ИМЛУ, так и решить проблемы видения в турбулентной атмосфере.

#### Список литературы

1. Адаптивная оптическая система для коррекции излучения лазера. Техническое описание, инструкция пользователя, 2012. 70 с.
2. Шанин О.И. Адаптивные оптические системы в импульсных мощных лазерных установках. М.: Техносфера, 2012. 200 с.
3. Кишко В.И., Матюхин В.Ф. Принципы построения адаптивных ретрансляторов для стратосферных систем передачи энергии // Автометрия. 2012. № 2. С. 59-66.
4. Александров А.Г., Кудряшов А.В., Рукосуев А.В., Самаркин В.В. Адаптивная оптика для мощных лазеров с короткими импульсами // Фотоника. 2012. № 6. С. 16-20.
5. Kudryashov A.V., Samarkin V.V., Rukosuev A.V. Real-time high speed adaptive optical system for imaging and laser beam control. // Proc. SPIE 4493, Adaptive Optics for Industry and Medicine, 2013. 30 p.