

Презентация лекционного курса по
дисциплине
**«Системы адаптивной оптики
и их приложения»**

для студентов, обучающихся
по направлению 12.04.05 «Лазерная техника и лазерные технологии»

Составители:
Лексин А.Ю.
Честнов И.Ю.

Владимир, 2016

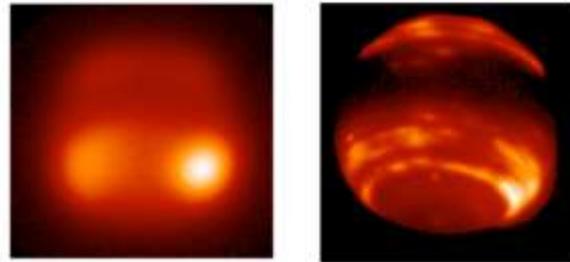
Содержание курса

- **Раздел 1. Структура и классификация систем адаптивной оптики.**
 - Принципиальная схема адаптивной оптической системы.
 - Классификация систем адаптивной оптики.
- **Раздел 2. Элементы систем адаптивной оптики.**
 - Корректор волнового фронта.
 - Датчик волнового фронта.
 - M2-датчик.
 - Система управления.
- **Раздел 3. Электронное и программное обеспечение систем адаптивной оптики.**
 - Адаптивный алгоритм фазового сопряжения.
 - Метод определения управляющих напряжений.
 - Электронный блок управления.
- **Раздел 4. Приложения адаптивных оптических систем.**
 - Приложения в оптике атмосферы.
 - Приложения в оптических системах мощных лазеров.
 - Приложения в лазерных технологиях.

Назначение и некоторые области применения систем адаптивной оптики

ИК изображение Нептуна,
полученное с помощью телескопа Кекка

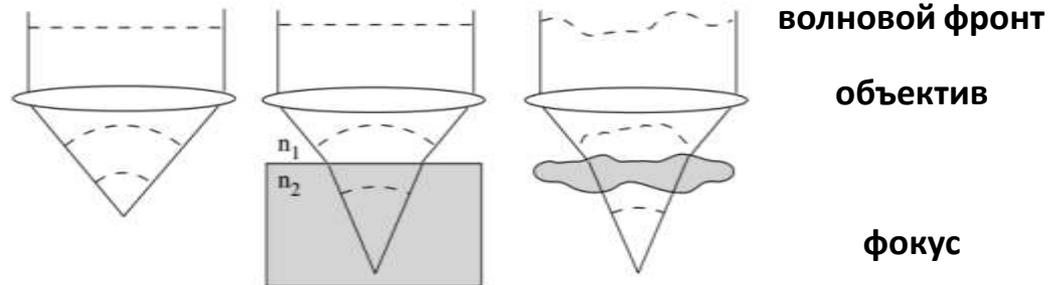
Астрономия



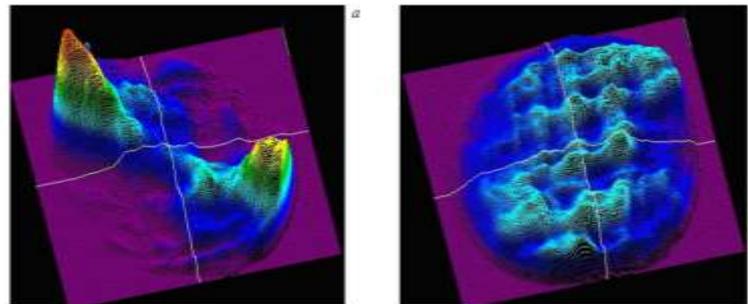
Без АО С использованием АО

Причины ухудшения изображения в микроскопии

Микроскопия



Системы мощных лазеров



Без АО С использованием АО

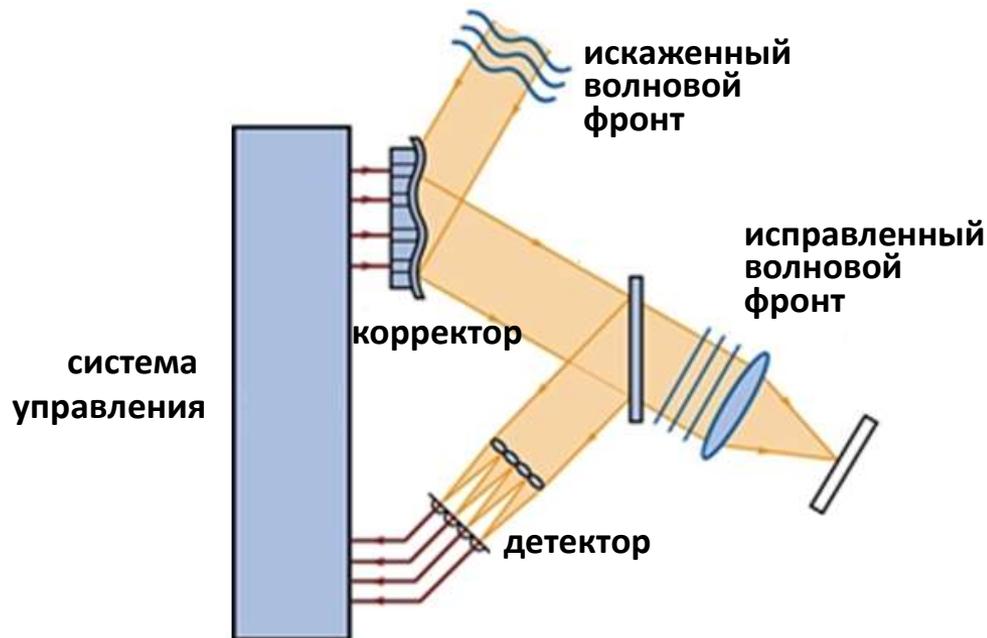
Раздел 1

Структура и классификация систем адаптивной оптики

Принципиальная схема адаптивной оптической системы

В состав любой адаптивной оптической системы (АОС) входят:

- 1) устройство воздействия на волновой фронт (**корректор**), которое может быть отражающим или преломляющим;
- 2) измерительное устройство (**детектор**), которое принимает свет и вырабатывает сигнал, связанный с оптимизируемым свойством;
- 3) устройство обработки информации, воспринимающее результаты измерений и преобразующее их в сигналы для управления устройством воздействия на волновой фронт.

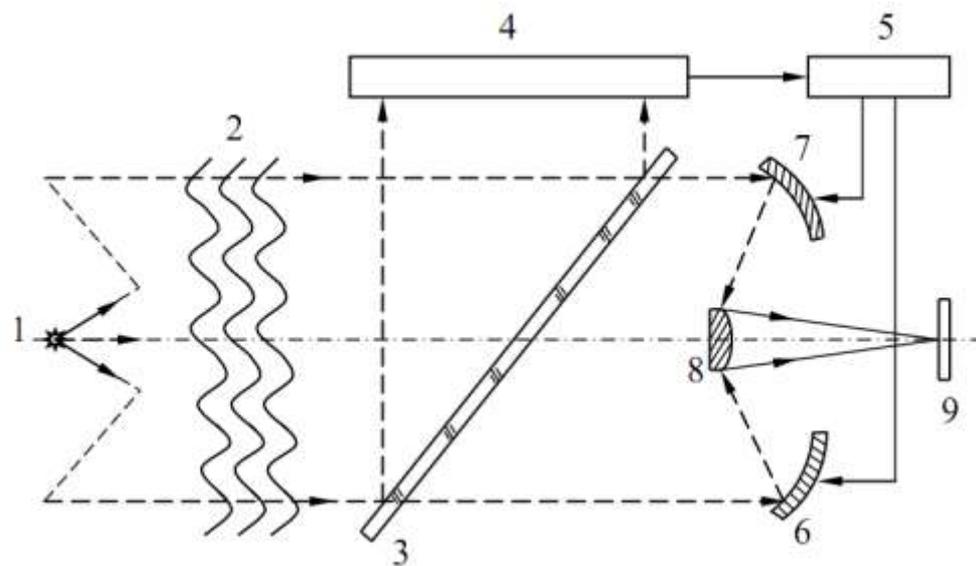


Классификация адаптивных оптических систем

Классификация № 1. По способу управления.

Системы с прямым управлением

1 – сигнал;
2 – абберационные искажения волнового фронта;
3 – светоделитель;
4 – детектор искажения волнового фронта;
5 – управляющее устройство;
6, 7 и 8 - адаптивные зеркала;
9 – плоскость изображения (образец, экран, выходной зрачок оптической системы).



Преимущества:

- Контур управления устойчив.
- Высокое быстродействие.

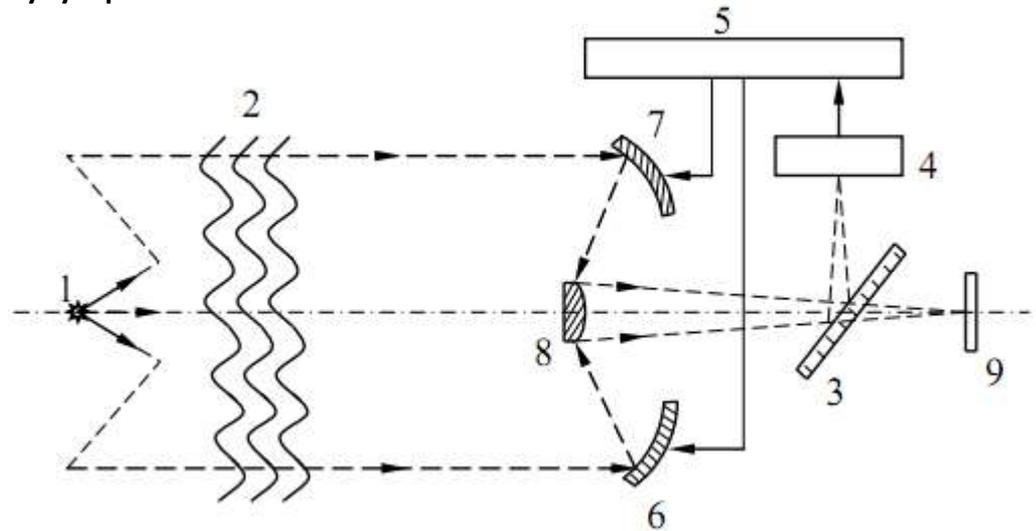
Недостатки:

- не устраняет искажения волнового фронта, возникающие после прохождения световым пучком светоделителя 3, поскольку датчик 4 расположен до формирующей изображение системы
- Очень высокие требования к точности корректора, т.к. его работа ничем не контролируется

Классификация адаптивных оптических систем

Классификация № 1. По способу управления.

Системы с обратной связью



Датчик расположен после корректора!

Преимущества:

- Более высокая степень коррекции aberrаций.
- Сниженные требования к быстродействию и точности корректора.

Недостатки:

- Заметно менее быстрые.
- Возможны проблемы с устойчивостью контура управления.

Из-за очевидных преимуществ системы с обратной связью являются наиболее распространенными

Классификация адаптивных оптических систем

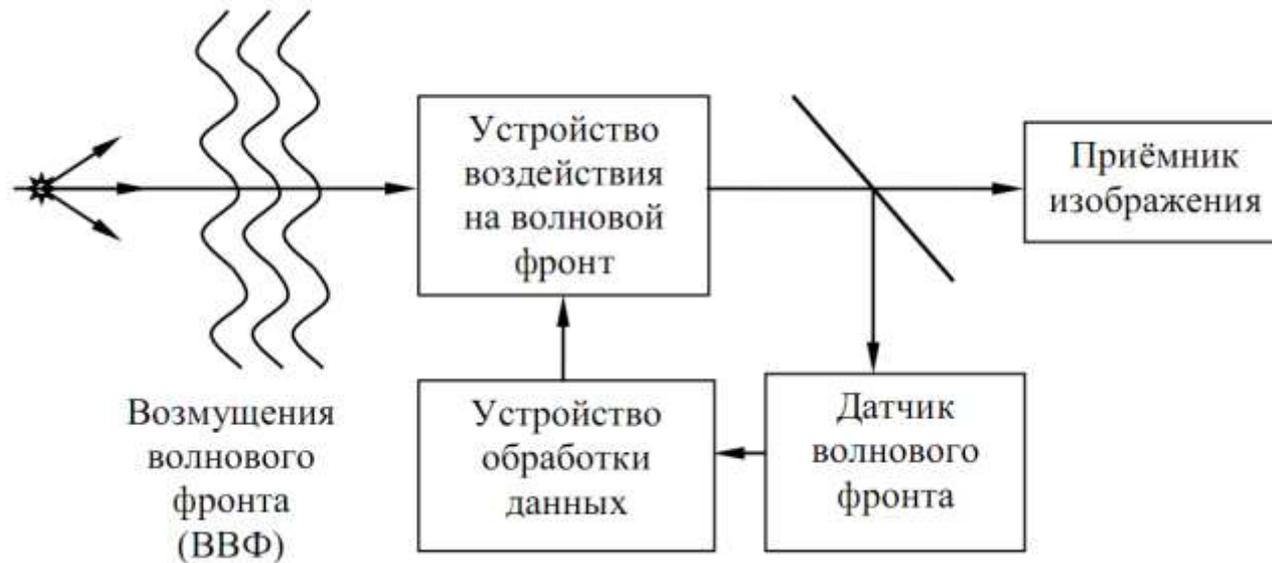
Классификация № 2. По назначению.

Для получения максимальной резкости изображения

Области использования:

- астрономия
- офтальмология

Вариант 1. На основе метода отклонения формы волнового фронта от номинальной



Пример АОС, основанной на принципе компенсации отклонений формы волнового фронта от номинальной

Классификация адаптивных оптических систем

Классификация № 2. По назначению.

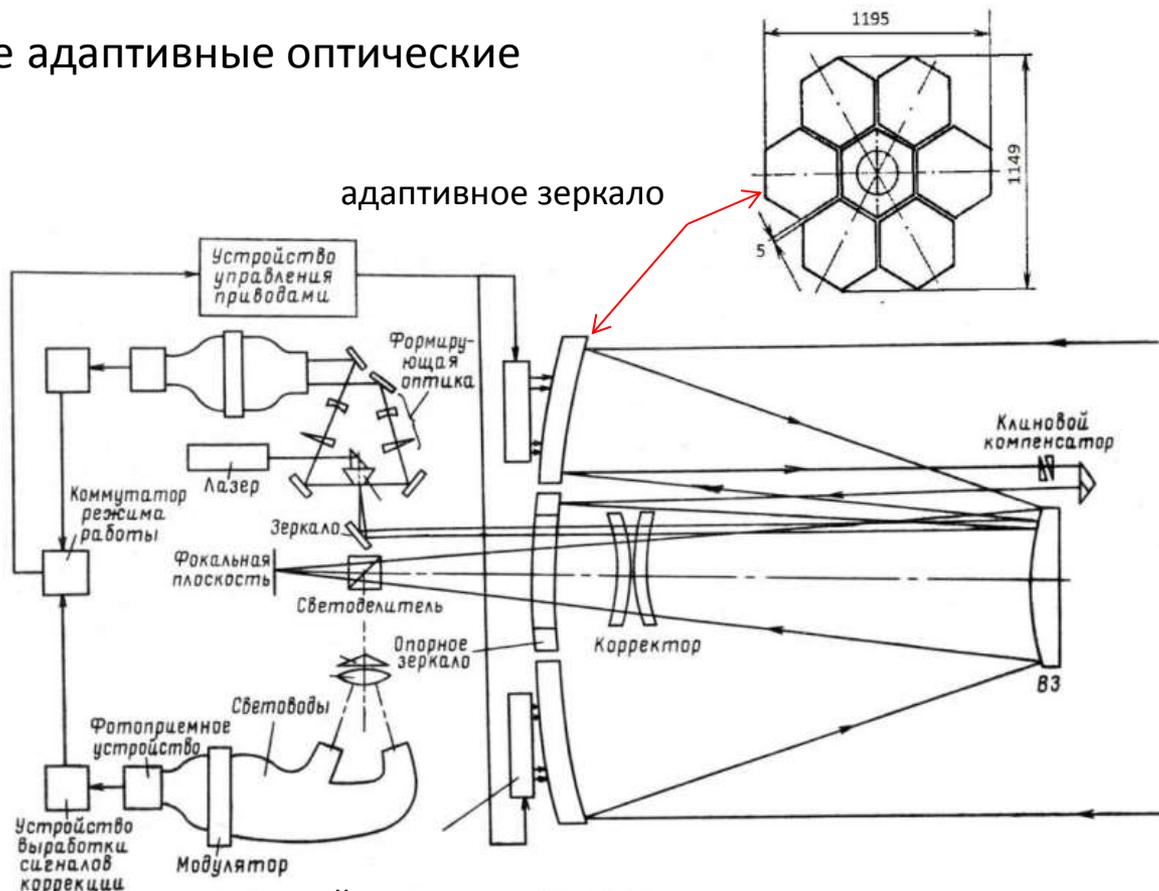
Для получения максимальной резкости изображения

Реальные астрономические адаптивные оптические системы намного сложнее

Телескоп с основным адаптивным зеркалом

Диаметр зеркала $D = 1,2$ м

Такие системы на практике оказываются достаточно медленными для коррекции быстрых атмосферных флуктуаций



Экспериментальный телескоп АСТ-1200

Из работы [Астрономический телескоп АСТ-1200 с составным главным зеркалом / Н. Д. Устинов, А. С. Васильев и др. // Оптико-механическая промышленность. - 1985. - № 11. - С. 22 - 25]

Классификация адаптивных оптических систем

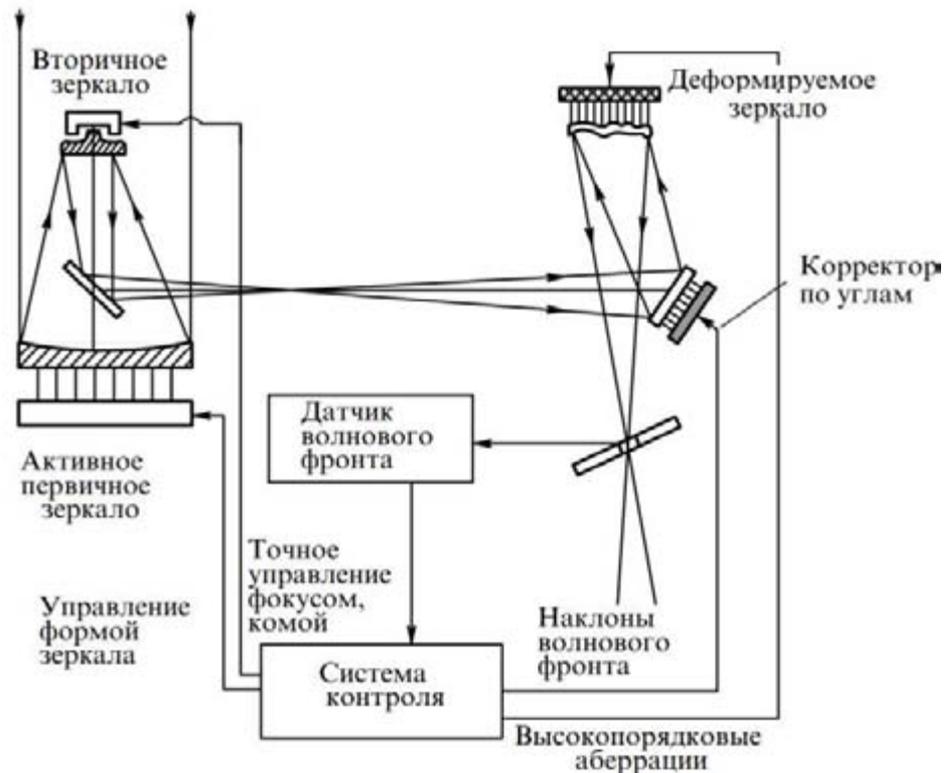
Классификация № 2. По назначению.

Для получения максимальной резкости изображения

Реальные астрономические адаптивные оптические системы намного сложнее

Схема астрономического телескопа с составным главным зеркалом и адаптивной системой коррекции изображения

Диаметр зеркала $D = 1,2$ м



Блок-схема проектного десятиметрового телескопа АСТ-10
Из работы [Лукин В. П. "Атмосферная адаптивная оптика", УФН 173 887–893 (2003)]

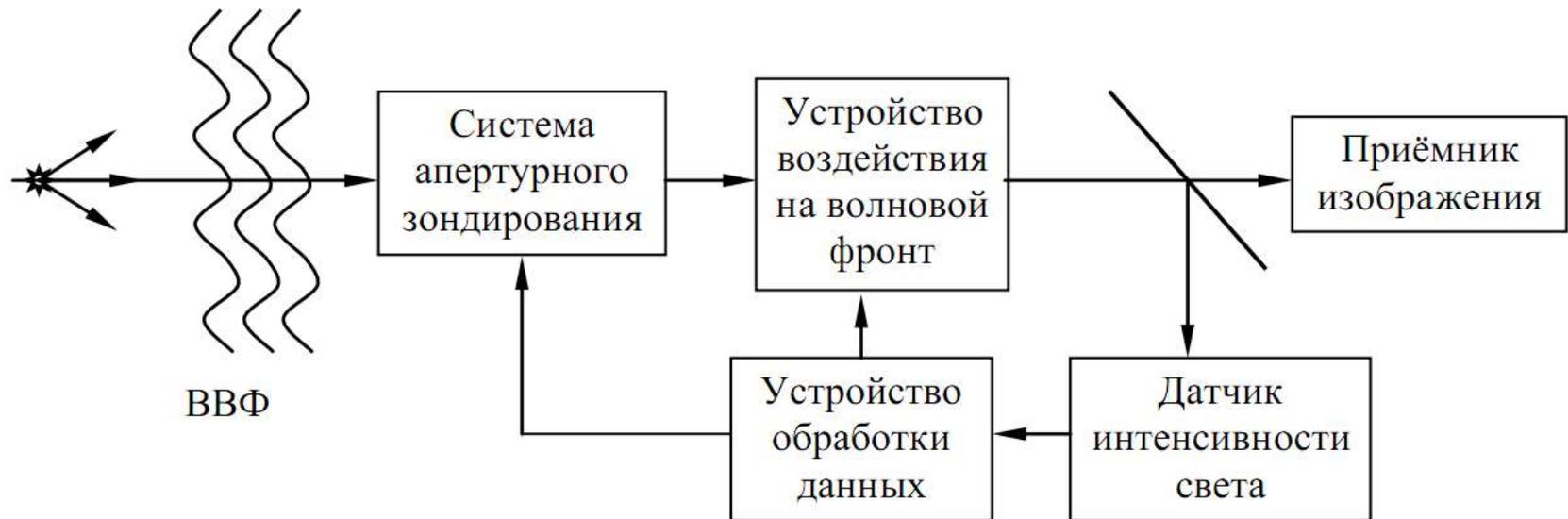
Классификация адаптивных оптических систем

Классификация № 2. По назначению.

Для получения максимальной резкости изображения

Датчик волнового фронта может быть заменен датчиком интенсивности

Вариант 2. Метод повышения резкости изображения



Пример АОС, основанной на методе повышения резкости изображения

Принцип повышения резкости изображения

Принцип повышения резкости изображения нацелен на решение задачи сравнения идеального реального изображения с идеальным на основании некоторого критерия качества

$E_I(x,y)$ - идеальное распределение поля в плоскости изображения

$E_R(x,y)$ - реальное распределение поля в плоскости изображения

$$E_R(x,y) \neq E_I(x,y)$$

Реальное показание датчика интенсивности всегда отличаются от идеальных (целевой функции)

Параметры, характеризующие степень качества изображения (Э. Линфут):

$$T_L = \iint E_R^2(x,y) dx dy / \iint E_I^2(x,y) dx dy \quad \text{- относительное содержание изображения}$$

$$\Phi_L = 1 - \frac{\iint (E_I(x,y) - E_R(x,y))^2 dx dy}{\iint E_I^2(x,y) dx dy} \quad \text{- правдоподобие изображения}$$

$$Q_L = \frac{\iint E_I(x,y) E_R(x,y) dx dy}{\iint E_I^2(x,y) dx dy} \quad \text{- корреляционное качество изображения}$$

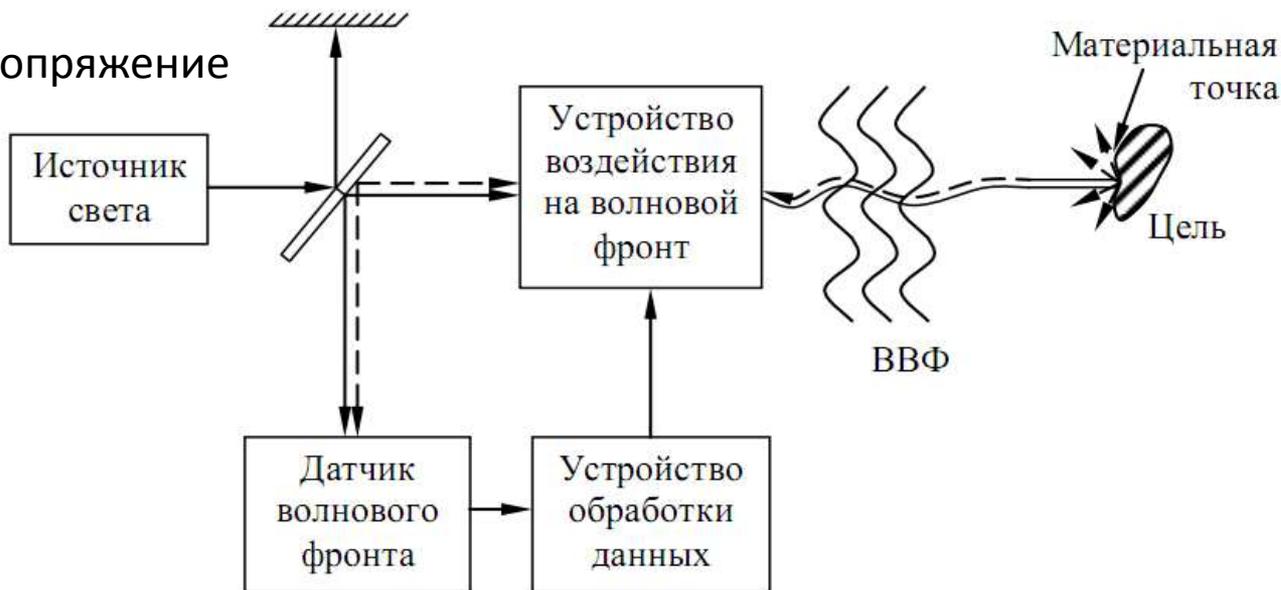
Классификация адаптивных оптических систем

Классификация № 2. По назначению.

Для получения максимальной плотности мощности излучения в плоскости изображения

Чаще всего используется в лазерных системах

Вариант 1. Фазовое сопряжение



Пример АОС, основанной на принципе фазового сопряжения

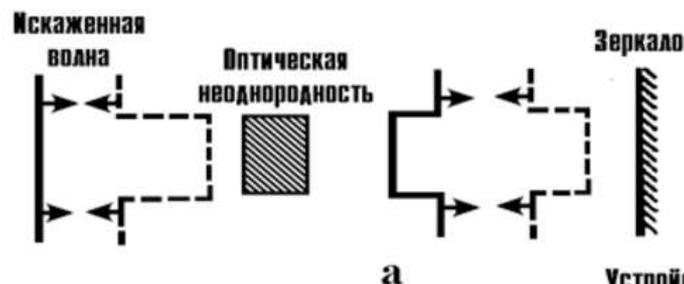
Аберрационные искажения вносятся в пучок после оптической системы, а значит, не могут быть непосредственно померены.

Измеряются искажения, вносимые в отраженный пучок

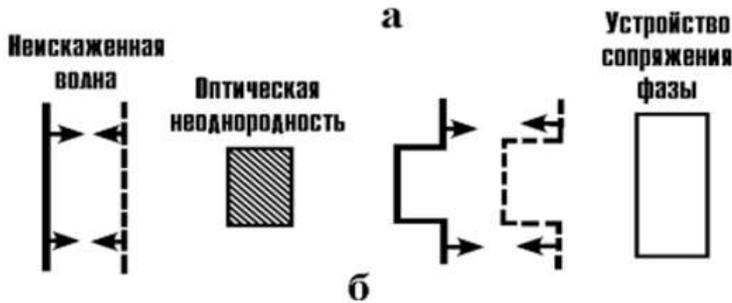
Время прохождения светом расстояния от корректора до мишени и обратно должно быть меньше характерного времени протекания турбулентных процессов, искажающих волновой фронт

Фазовое сопряжение. Основные принципы

Без фазового сопряжения
Обычное зеркало



С фазовым сопряжением.
Устройство сопряжения фазы
(адаптивное зеркало
формирует волну с
сопряженным изменением



компенсация оптической неоднородности
методом фазового сопряжения

В основе метода фазового сопряжения лежит принцип обратимости световых пучков, согласно которому при изменении направления распространения света на противоположное соответствует изменению фазы ϕ на $-\phi$.

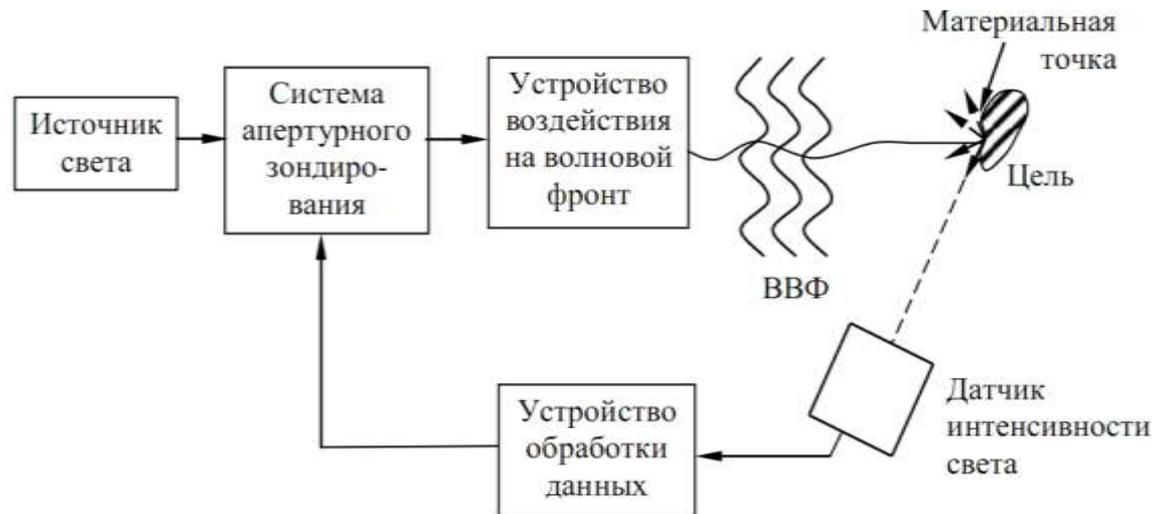
Использование системы фазового сопряжения для интенсивных лазерных пучков затруднительно, т.к. в таких системах из-за нелинейных эффектов принцип оптической обратимости нарушается. В таком случае наиболее эффективной оказывается схема с апертурным зондированием

Классификация адаптивных оптических систем

Классификация № 2. По назначению.

Для получения максимальной плотности мощности излучения в плоскости изображения

Вариант 2. Апертурное зондирование (метод пробных возмущений)



Пример АОС, функционирующей на принципе апертурного зондирования

Принцип работы:

Система апертурного зондирования вносит малые пробные искажения волнового фронта. Детектор регистрирует изменение распределение поля в плоскости изображения. Таким образом процесс коррекции сводится к решению задачи оптимизации целевой функции (максимальной плотности мощности)

Апертурное зондирование. Основные понятия

Виды целевых функций:

- Пиковая интенсивность
- Радиус пучка
- Комбинации нескольких параметров

Особенность построения схемы:

1) Обычно в системах используются разные зеркала: одно для внесения пробных искажений, другое – непосредственно для корректировки.

Первое зеркало должно быть быстрыми, обладать широкой частотной характеристикой и узким динамическим диапазоном. От него зависит быстродействие алгоритма.

Второе зеркало предназначено для коррекции может быть массивным и потому более инерционным. Обладает узкой частотной характеристикой

2) Плохо сочетается с мембранными зеркалами из-за нелокальности отклика последних.

Сравнение



— реальное распределение фазы
— результат аппроксимации в детекторе: разбиение на субапертуры

Системы, основанные на принципе сопряжения волнового фронта и отклонения формы волнового фронта от номинальной

Величина отношения сигнал/шум не зависит от числа апертур

$$\sigma \sim \sqrt{N}$$

N – число фотонов, попадающих на приемник

Возможно использование систем с большим количеством субапертур (множество датчиков). Их общее количество ограничено сложностью одновременного управления ими с учетом их вибраций

Недостатки:

Нестабильность алгоритма при возникновении самовоздействия (из-за нелинейности). В результате в плоскости наблюдения возникают устойчивые осцилляции параметров

Системы апертурного зондирования

Отношение сигнал/шум падает при увеличении числа субапертур

$$\sigma \sim \frac{\sqrt{N}}{k}$$

k – число субапертур

На практике чаще всего в таких системах используется одна субапертура (один датчик)

Недостатки:

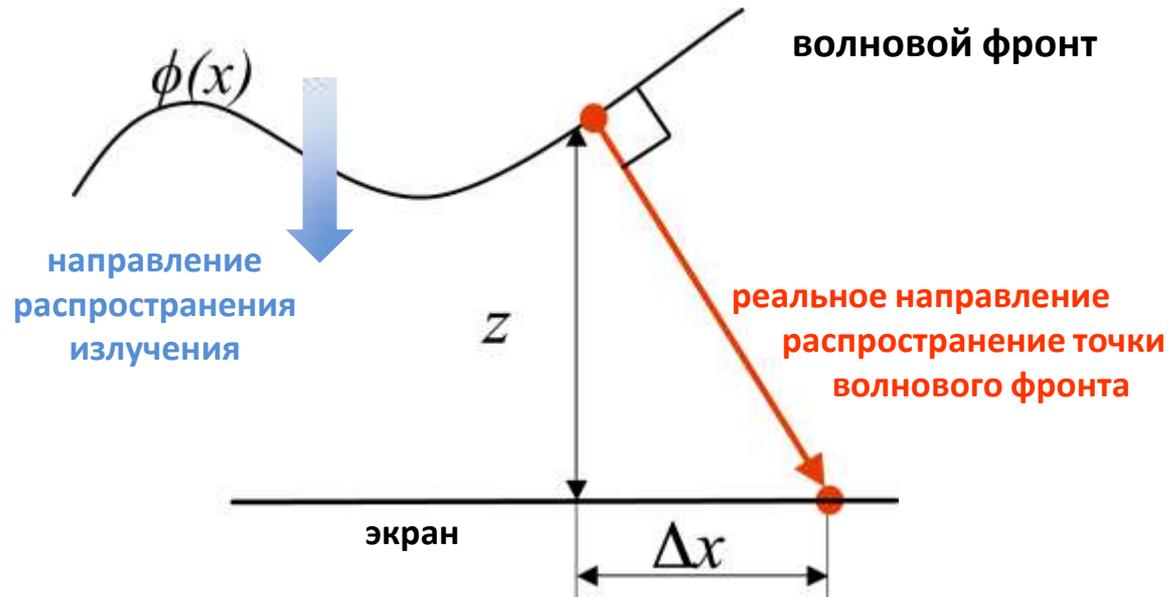
Проблема локальных экстремумов, когда глобальный максимум еще не достигнут, а управление уже прекратилось.

Раздел 2

Элементы систем адаптивной оптики

Датчики волнового фронта

Назначение



$\phi(x)$ – форма кривизны волнового фронта

Δx – смещение точки в плоскости экрана

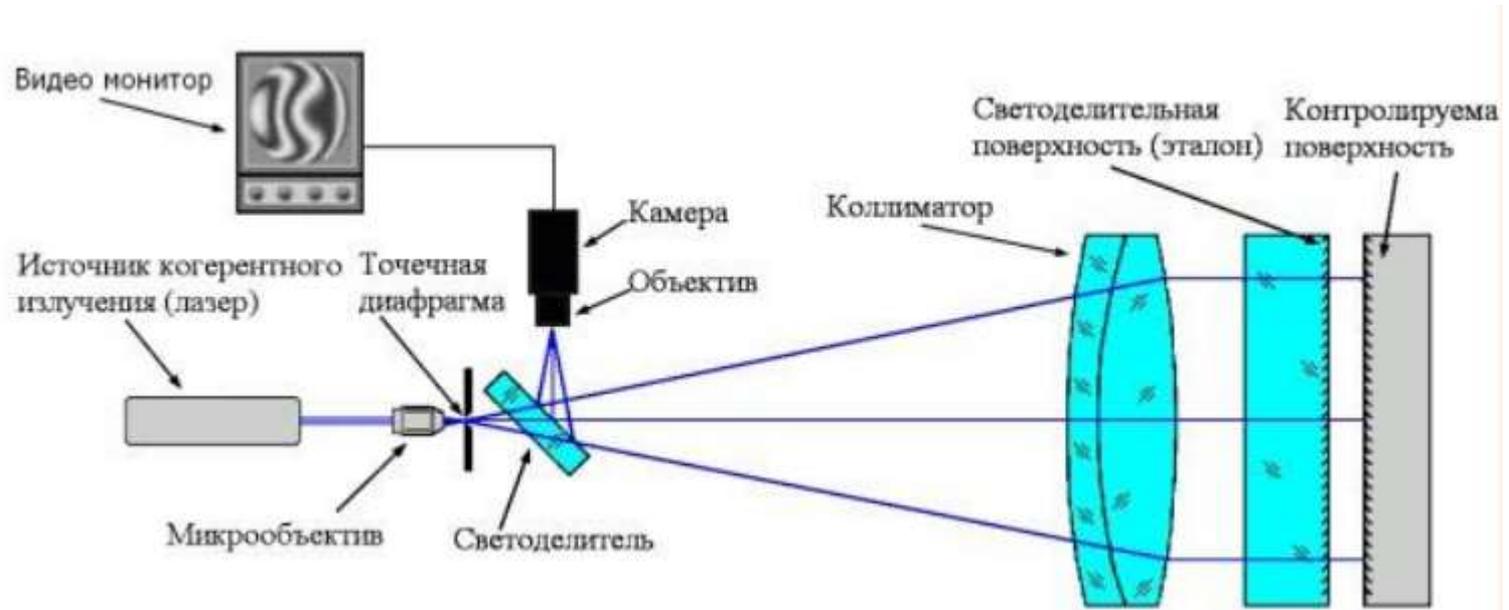
Таким образом, за размытие изображения на экране отвечают локальные наклоны волнового фронта излучения.

Датчики волнового фронта должны измерять это отклонение.

Интерферометр Физо

Основная задача датчика волнового фронта – измерение фазы.

Данная задача также встречается в оптике, где для ее решения используют интерферометрические методы



Интерферометр Физо с лазером в роли источника света – типичное устройство измерения фазы пучка в оптике.

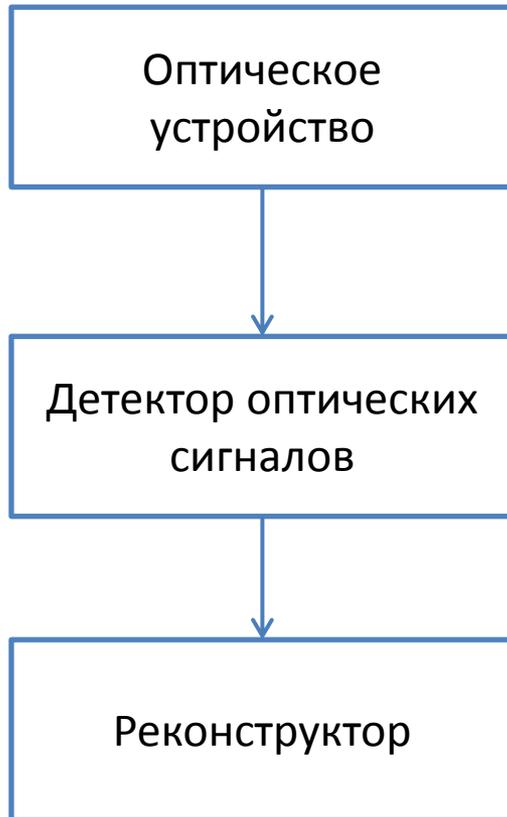
Чаще всего используется для контроля качества оптических поверхностей

Принцип работы интерферометра Физо необходимо **изучить самостоятельно**

Почему обычные интерферометры не подходят на роль датчиков волнового фронта?

1. Интерферометры способны определять фазу с неопределенностью в 2π , в то время как атмосферные искажения фазы обычно превосходят 2π . Существующие алгоритмы развертывания фазы работают медленно, а датчики волнового фронта должны уметь отслеживать быстрые изменения в реальном времени.
2. Датчики волнового фронта должны работать с некогерентными и неточечными источниками (в первую очередь, в астрономических приложениях).
3. Использование фильтров для получения хроматических картинок чаще всего не допустимо, т.к. снижает чувствительность. Категорически не допустимо в астрономии, где свет звезд может быть очень тусклым.

Компоненты любого датчика волнового фронта



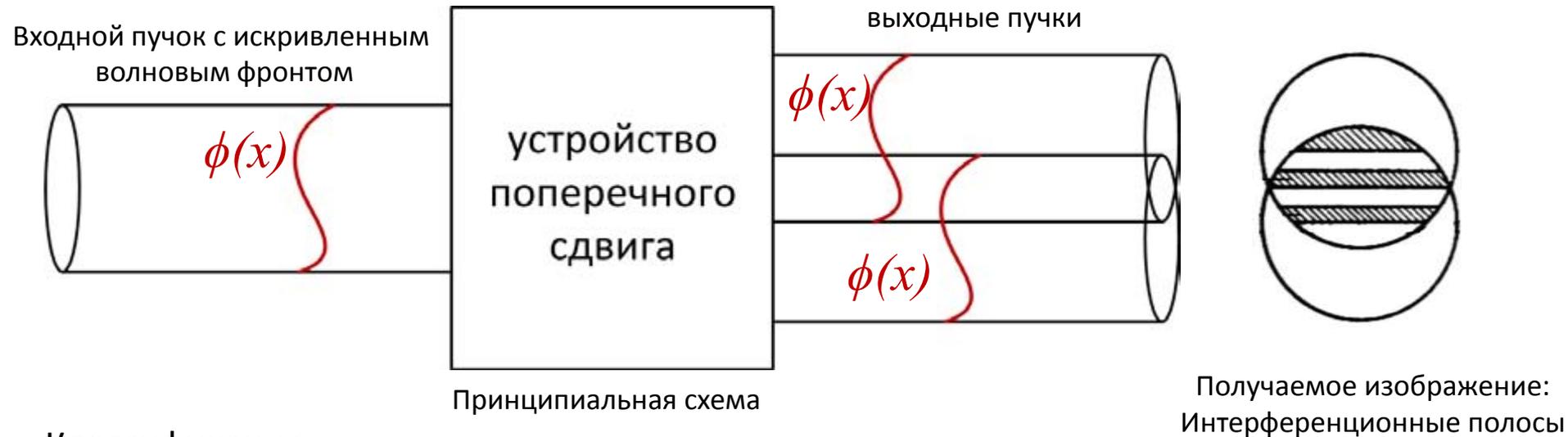
Оптическое устройство – отвечает за преобразование aberrаций волнового фронта в изменение интенсивности. Необходимость связана с тем, что фаза не может быть непосредственно измерена. Основные требования: точность и высокое пространственное разрешение

Детектор – отвечает за преобразование модулированного по интенсивности оптического сигнала в электрические импульсы. Основные требования: должен обладать малым шумом, высокое быстродействие.

Реконструктор – отвечает за интерпретацию электрических сигналов и восстановление информации о фазовых aberrациях. Основные требования: высокое быстродействие (на практике чаще всего используются линейные реконструкторы)

Детекторы волнового фронта, основанные на интерферометрических методах

Интерферометры сдвига



Классификация

- Интерферометры радиального сдвига
- Интерферометры поперечного сдвига

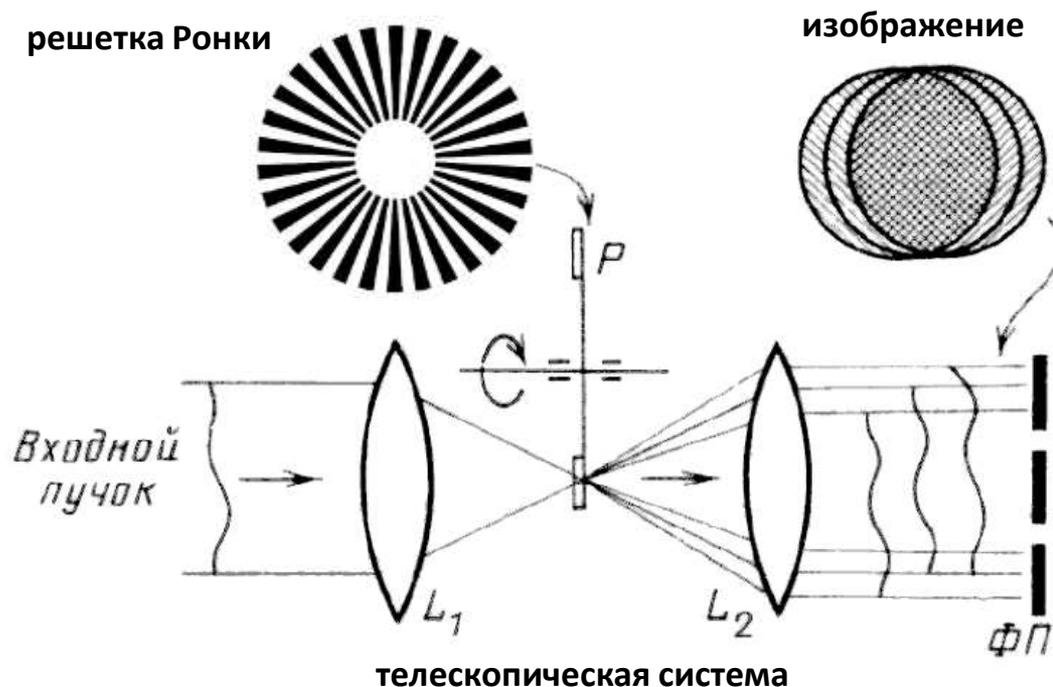
Поперечный сдвиг может осуществляться за счет:

- Вращающиеся дифракционные решетки (метод Ронки)
- Плоско-параллельные пластины
- Двухлучепреломляющая среда

Интерферометр сдвига на решетках Ронки

Принципиальная схема

Решетка Ронки помещена в фокальную плоскость и вращается вокруг своей оси



Решетка Ронки – чередование пропускающих и затемненных полос равной ширины. Изготавливают вакуумным напылением хрома на стеклянную подложку.

Если прозрачные и темные полосы одинаковой ширины, то четные дифракционные порядки отсутствуют

Применение в адаптивной оптике

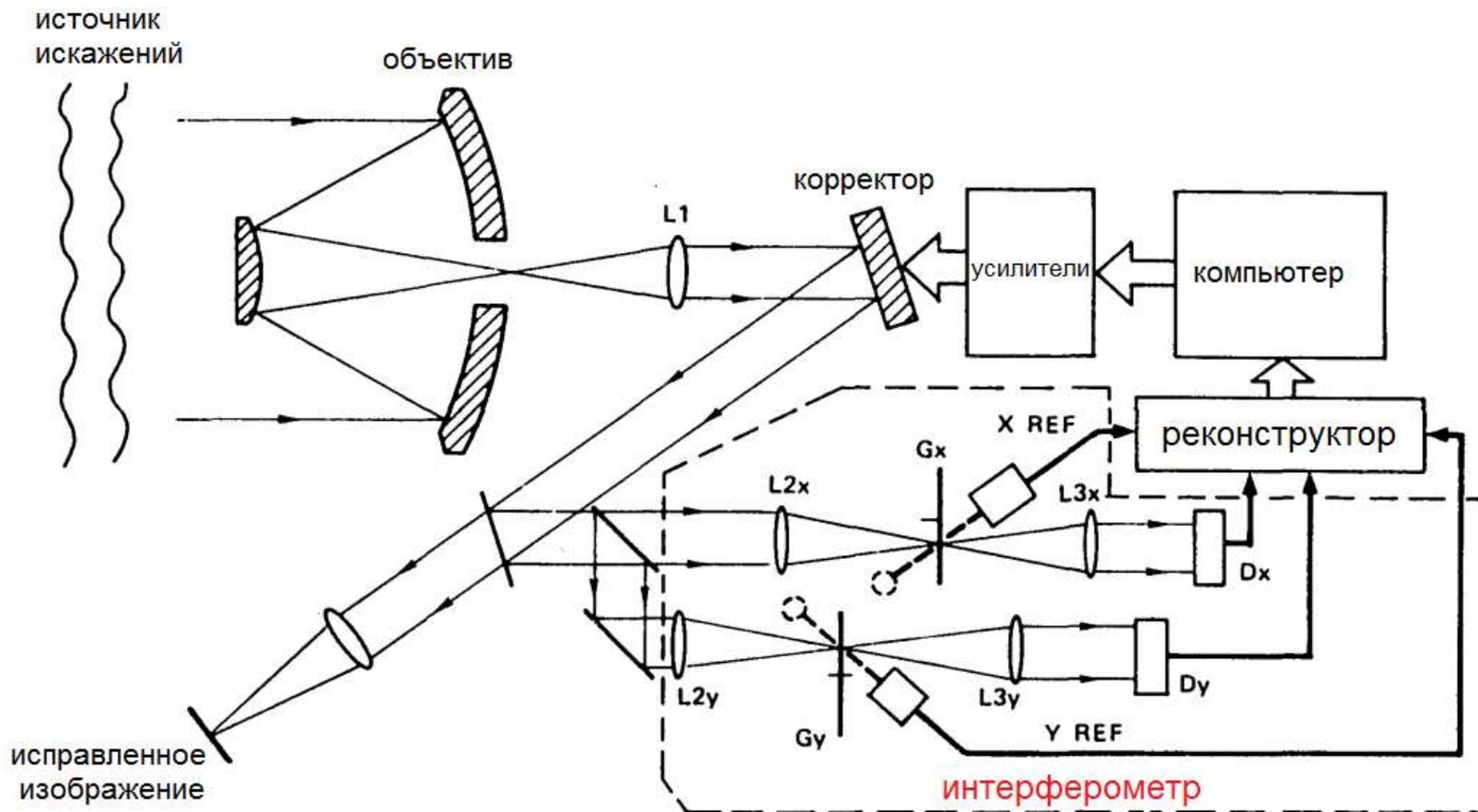
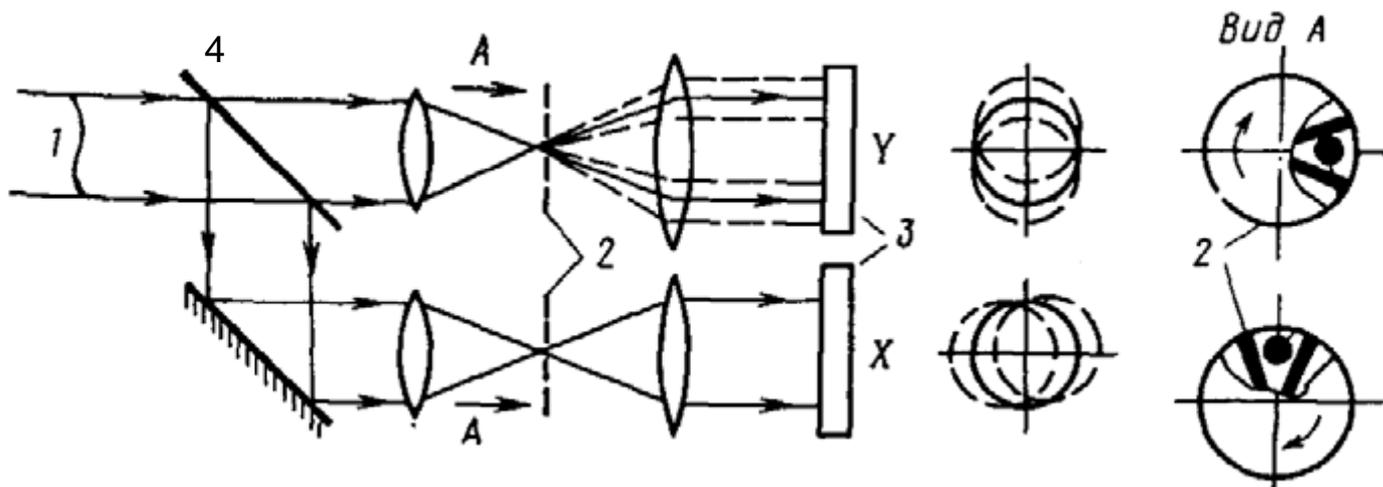


Схема адаптивной оптической системы, использующей интерферометр поперечного сдвига в качестве детектора

Применение в адаптивной оптике



упрощенная схема интерферометра поперечного сдвига.

1 – излучение с искривленным волновым фронтом;

2 – вращающиеся радиальные решетки Ронки;

3 – приемники;

4 – светоделитель.

Одна решетка осуществляет сдвиг пучка вдоль оси X , а другая – вдоль оси Y .

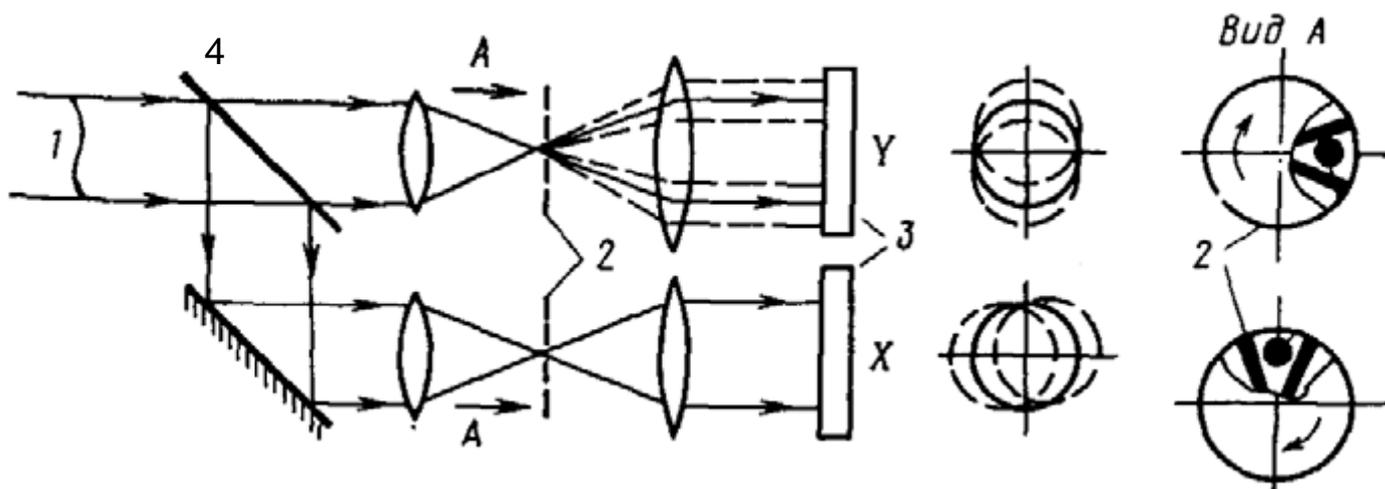
Изменение интенсивности на матрице приемников:

$$S(t, x) \sim \frac{1}{2} + \frac{2m}{\pi} \cos(\omega t + \gamma(x))$$

m – глубина модуляции сигнала

Сигнал модулирован во времени из-за вращения решетки с частотой ω и в пространстве $\gamma(x)$ за счет кривизны волнового фронта.

Применение в адаптивной оптике



упрощенная схема интерферометра поперечного сдвига.

1 – излучение с искривленным волновым фронтом;

2 – вращающиеся радиальные решетки Ронки;

3 – приемники;

4 – светоделитель.

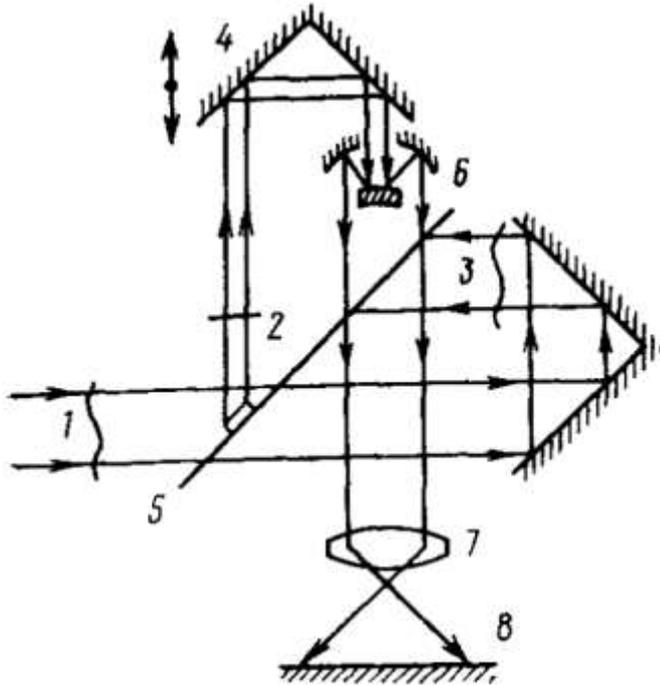
Форма волнового фронта $\phi(x)$ может быть восстановлена с использованием соотношений:

$$\phi(x) = \frac{\partial \gamma(x)}{\partial x} \quad \phi(y) = \frac{\partial \gamma(y)}{\partial y}$$

Очень высокая чувствительность прибора! Может применяться в астрономии

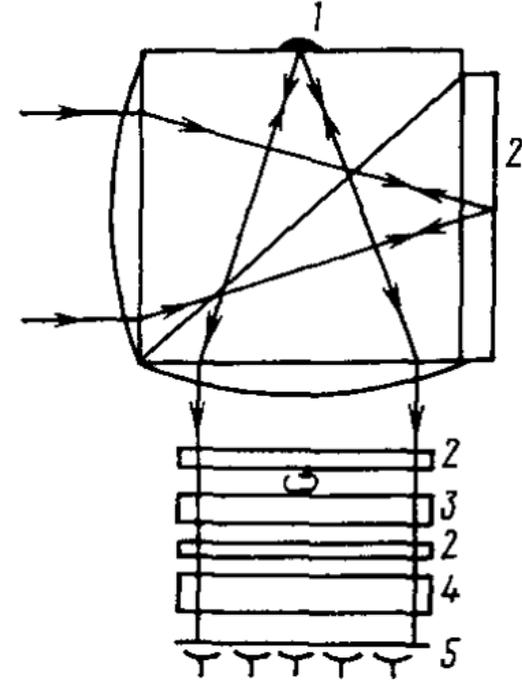
Интерферометр сдвига. Различные варианты

Интерферометр радиального сдвига



1 — излучение; 2, 3 — интерферирующие пучки с радиальным сдвигом; 4 — уголкового отражатель, совершающий возвратно-поступательное движение; 5 — светоделитель; 6 — телескоп; 7 — объектив; 8 — экран

Интерферометр с отражающим пятном



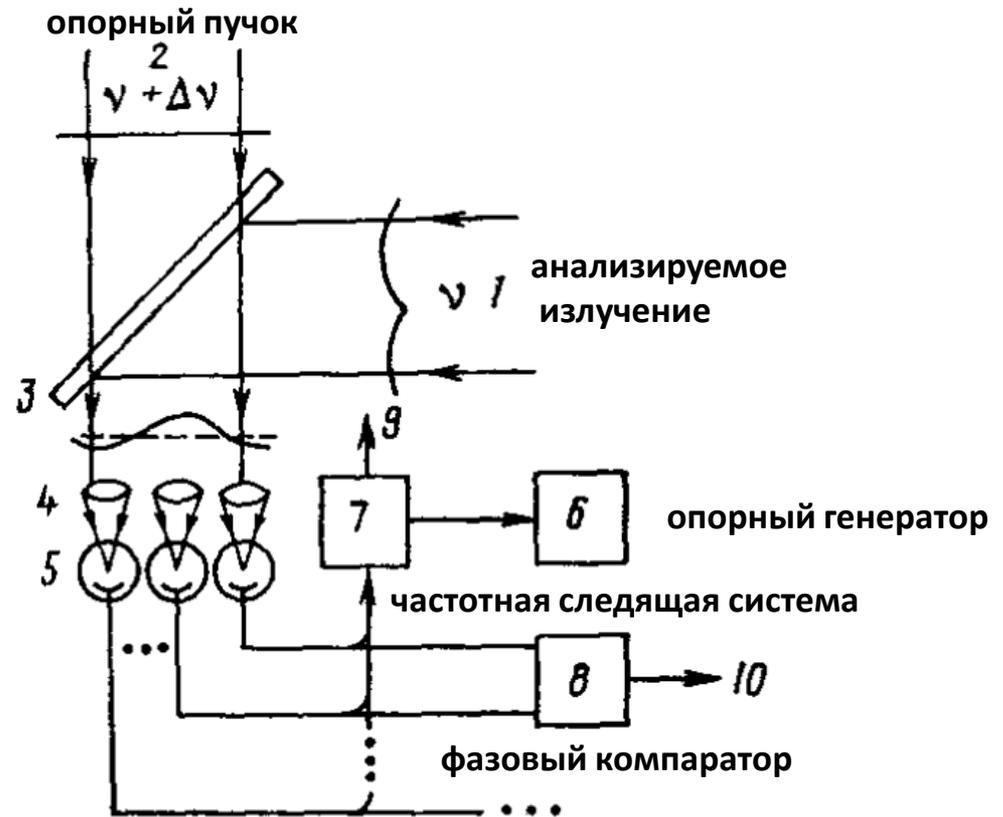
1 — отражающее пятно; 2 — четвертьволновые пластинки; 3 — вращающаяся полуволновая пластинка; 4 — поляризатор; 5 — матрица приемников

Низкая оптическая эффективность

Гетеродинные датчики волнового фронта

Схема гетеродинного датчика волнового фронта

субапертуры датчика
матрица детекторов

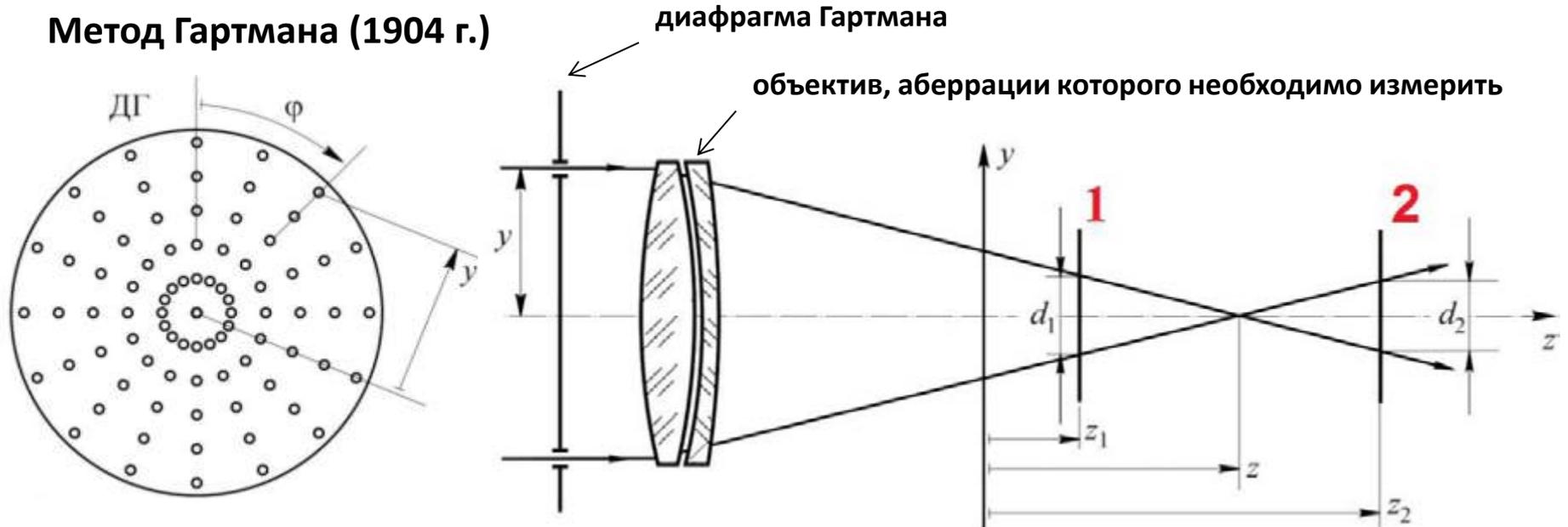


Частотная отстройка $\Delta\nu$ лежит в области акустических частот.
Опорный пучок должен обладать чрезвычайно высокой степенью когерентности.
Из-за этого для создания опорного пучка используют часть излучения.

Датчики гартмановского типа

Принцип работы таких датчиков основан на методе определения качества телескопических систем, предложенным Гартманом

Метод Гартмана (1904 г.)

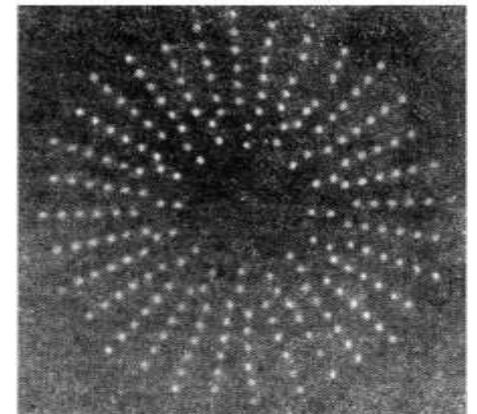


Типичный вид диафрагмы Гартмана

Иллюстрация метода Гартмана

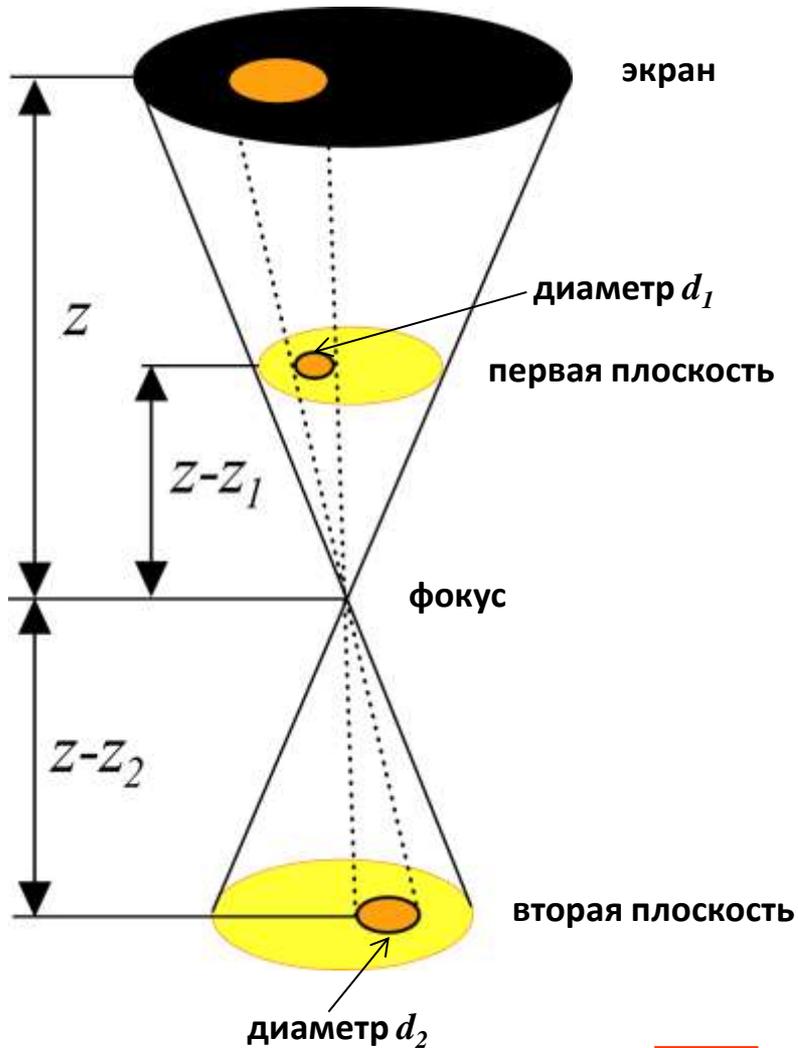
Измерения распределения поля производятся в двух положениях:
перед фокальной плоскостью (положение **1**)
за фокальной плоскостью (положение **2**)

Расстояние между плоскостями $z_2 - z_1$ должно быть известно.



Типичный вид гартманограммы

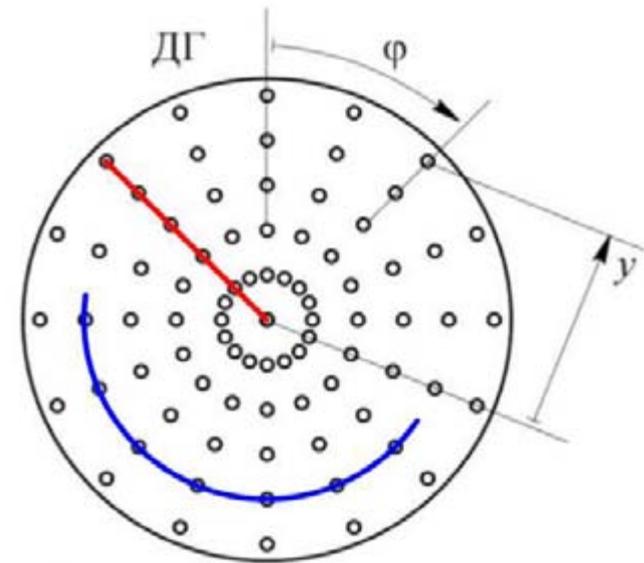
Метод Гартмана. Пояснение



Положение фокальной плоскости для данной зоны (пропорционально кривизне волнового фронта)

$$z(y) = z_1 + \frac{d_1}{d_1 + d_2} (z_2 - z_1)$$

Тест Гартмана и aberrации



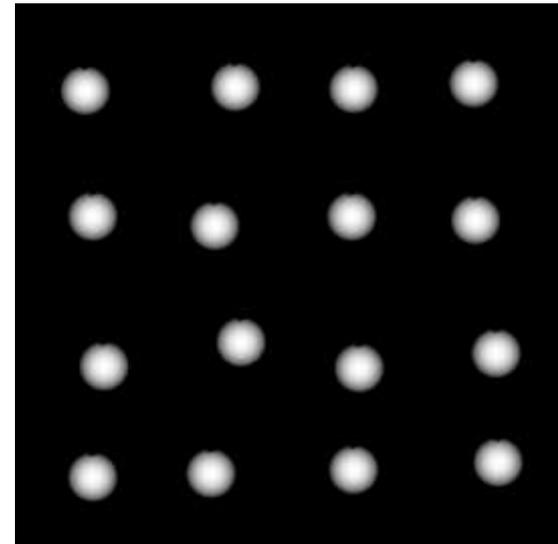
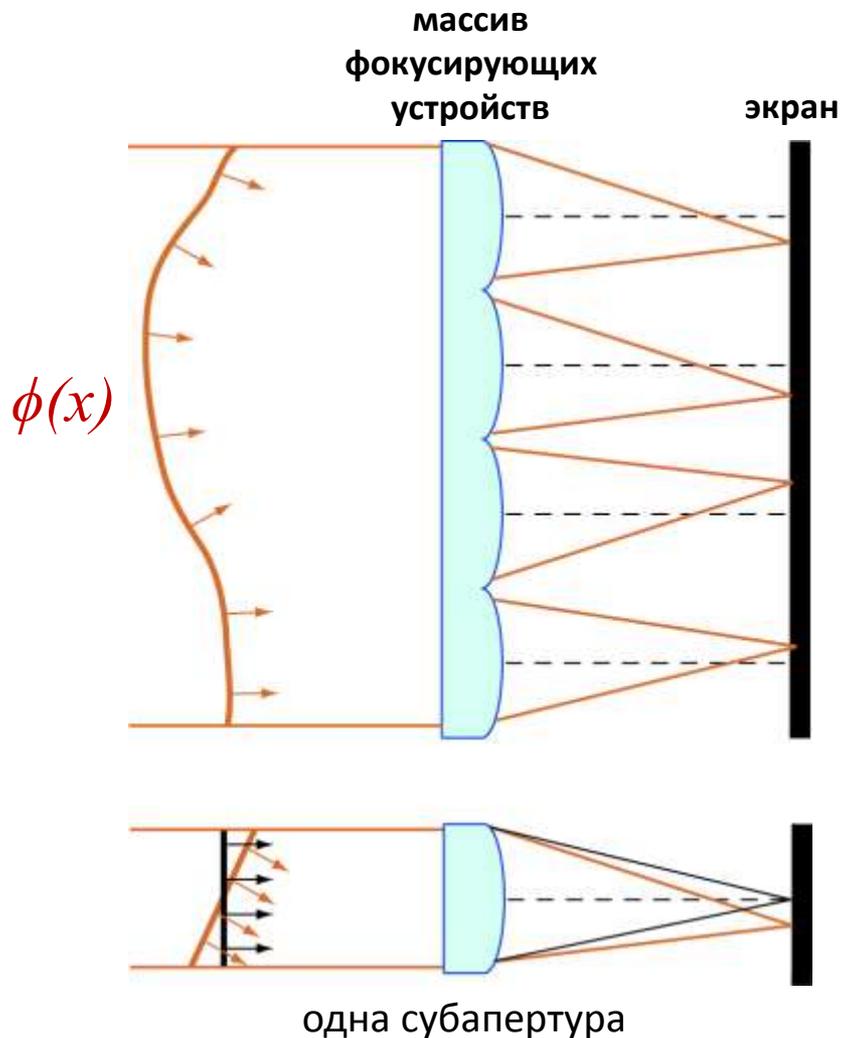
зависимость $z(y)$ вдоль этой линии описывает сферическую aberrацию объектива



зависимость $z(y)$ вдоль этой линии описывает осевой астигматизм

Датчик Шака-Гартмана

Датчик Гартмана отличается низкой энергетической эффективностью из-за использования непрозрачного экрана. Кроме того, считывание изображения в двух плоскостях требует двух детекторов. Датчик был модифицирован Шаком в 1971 г.



типичная картинка фокальных пятен

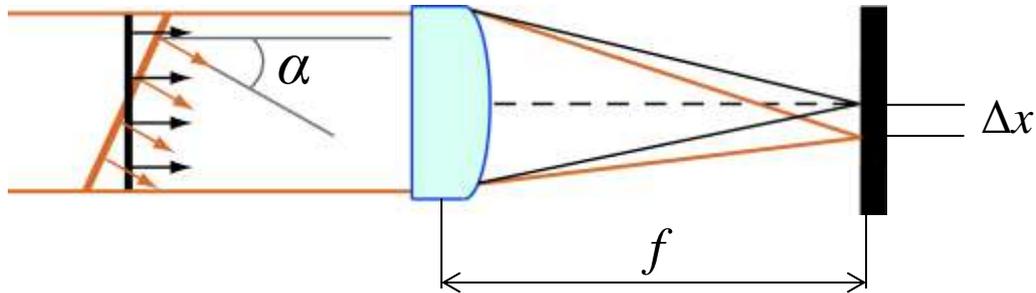
Преимущества:

- Ахроматичность,
- Работает как с точечными, так и с протяженными источниками.
- Быстродействие в сочетании с ПЗС-камерой

Датчик Шака-Гартмана

Как получить информацию о волновом фронте?

Смещение фокального пятна пропорционально среднему наклону волнового фронта.



Разрешение датчика равно размеру субапертуры.

Средний наклон волнового фронта $\alpha = \frac{\Delta x}{f}$

Реальное распределение поля на экране не точка, а пятно причем не обязательно круглое и симметричное. Если в качестве детектора используется ПЗС-матрица, координаты «центра тяжести» пятна:

$$\Delta x = \frac{\sum_{i,j} x_{ij} I_{ij}}{\sum_{i,j} I_{ij}} \quad \Delta y = \frac{\sum_{i,j} y_{ij} I_{ij}}{\sum_{i,j} I_{ij}}$$

i, j – координаты точки;
 $I_{i,j}$ – интенсивность в точке

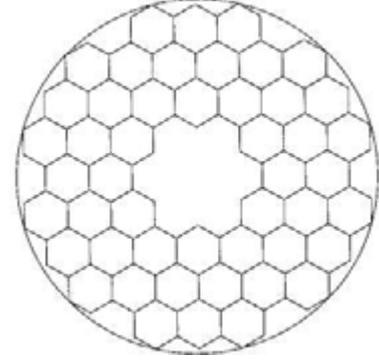
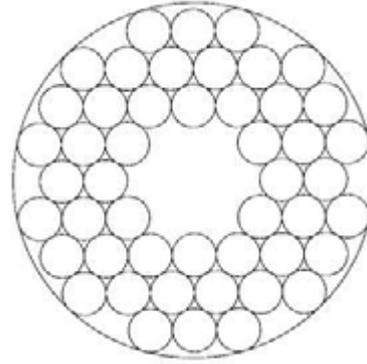
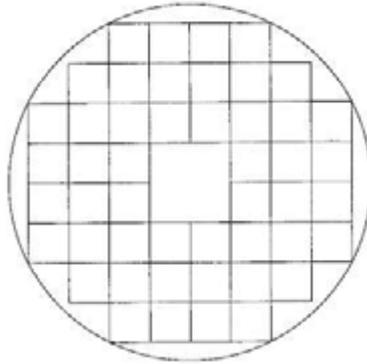
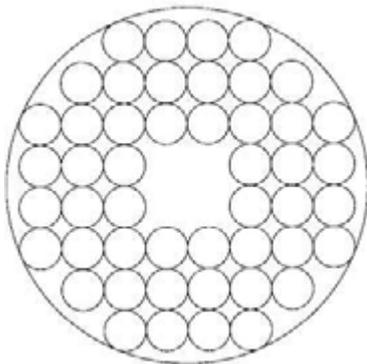
Реальное распределение фазы волнового фронта удовлетворяет соотношению

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2\pi S} \int \frac{\partial \phi(\vec{r})}{\partial x} d\vec{r} \quad \Delta y = \frac{\lambda}{2\pi S} \int \frac{\partial \phi(\vec{r})}{\partial y} d\vec{r}$$

λ – длина волны излучения;
 S – площадь субапертуры. 33

Влияние количества каналов на работу датчика

Зависимость относительной статистической ошибки (отклонения восстановленной формы волнового фронта от реальной) от формы микролинз
(из работы Voitsekhovich V. et al. // Applied Optics. 2001. V. 40. No. 9. P. 1299-1304.)



Без фотонного шума

0,99

0,79

1,00

0,86

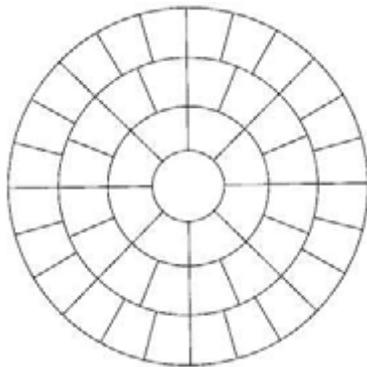
С фотонным шумом

1,65

1,47

1,66

1,51



Без фотонного шума

0,64

С фотонным шумом

1,24

Число N приемных элементов:

$$N \approx \frac{S}{\pi} \left(\frac{4}{\pi l_s} \right) \ln \frac{\sigma_s}{\sigma}$$

l_s – характерный масштаб возмущений волнового фронта;

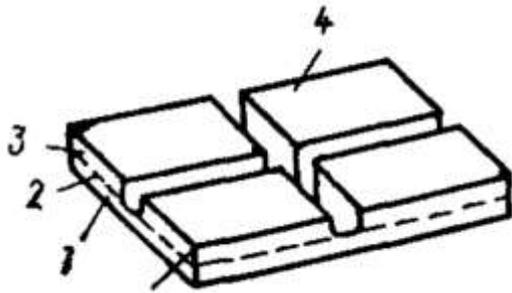
σ_s – среднеквадратичная амплитуда возмущений волнового фронта;

σ – ошибка аппроксимации фазы;

S – площадь субапертуры.

Квадрантные детекторы в датчиках Шака-Гартмана

В астрономии часто используют **квадрантные детекторы** (большое число пикселей дает шум)



схематичное изображение
квадрантного детектора

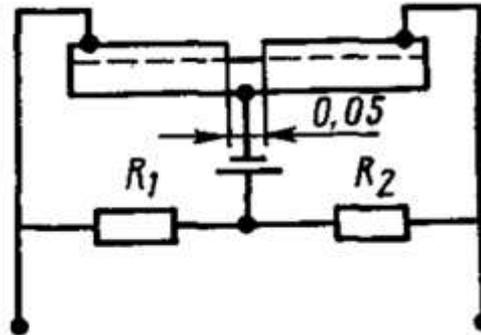
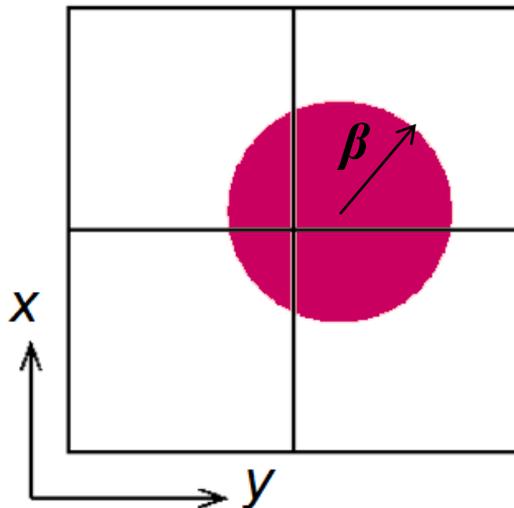


Схема подключения
квадрантного детектора

- 1 — подложка;
- 2 — n-слой;
- 3 — слой материала p-типа;
- 4 — контакты прозрачные
для излучения



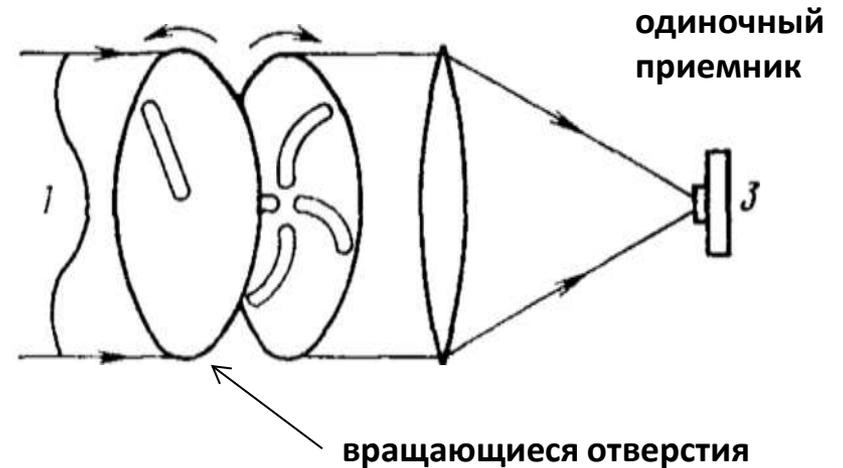
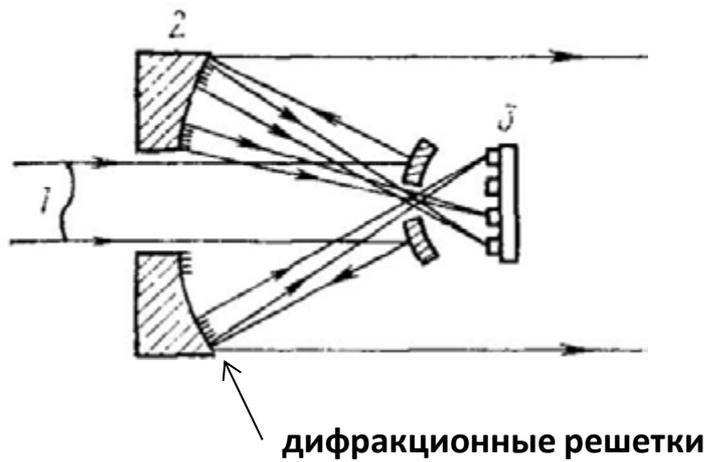
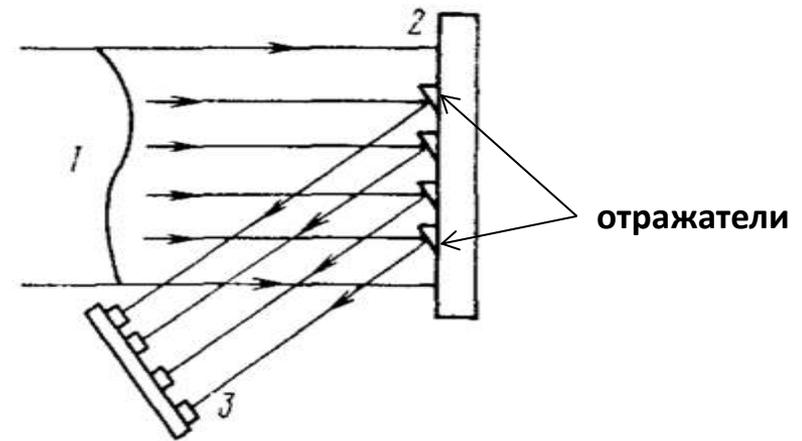
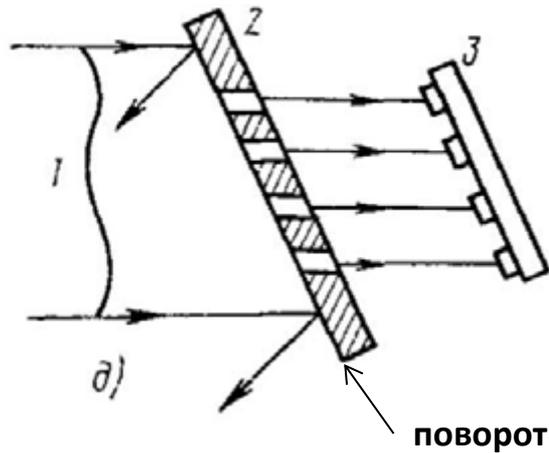
К определению положения пятна
квадрантным детектором

Координаты «центра тяжести» пятна

$$\Delta x = \frac{\beta (I_1 + I_2 - I_3 - I_4)}{2 (I_1 + I_2 - I_3 - I_4)}$$

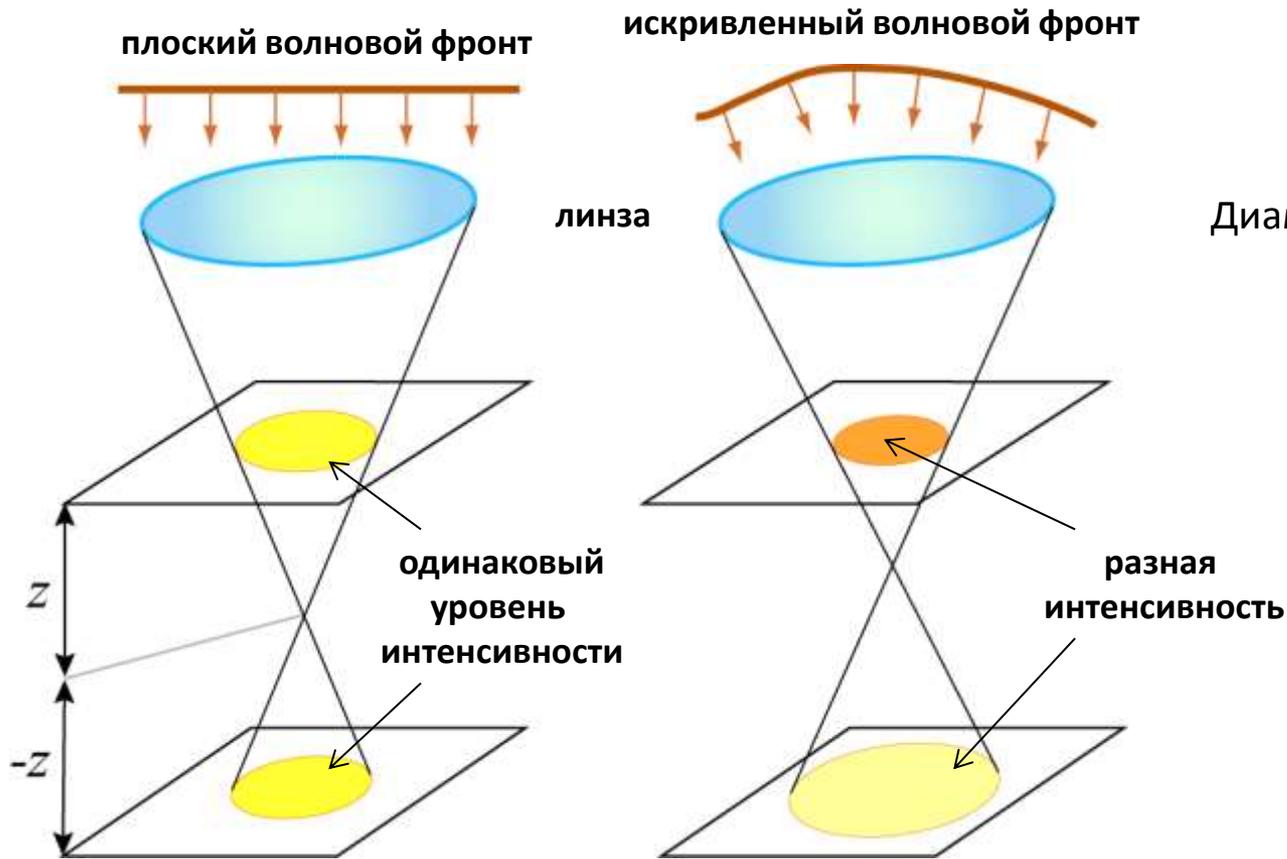
$$\Delta y = \frac{\beta (I_2 + I_3 - I_1 - I_4)}{2 (I_1 + I_2 - I_3 - I_4)}$$

Варианты исполнения датчиков Гартмана



- 1 – излучение;
- 2 – система разделения излучения на субапертуры;
- 3 – массив датчиков

Датчики кривизны. Принцип работы



Диаметры пятен относятся как:

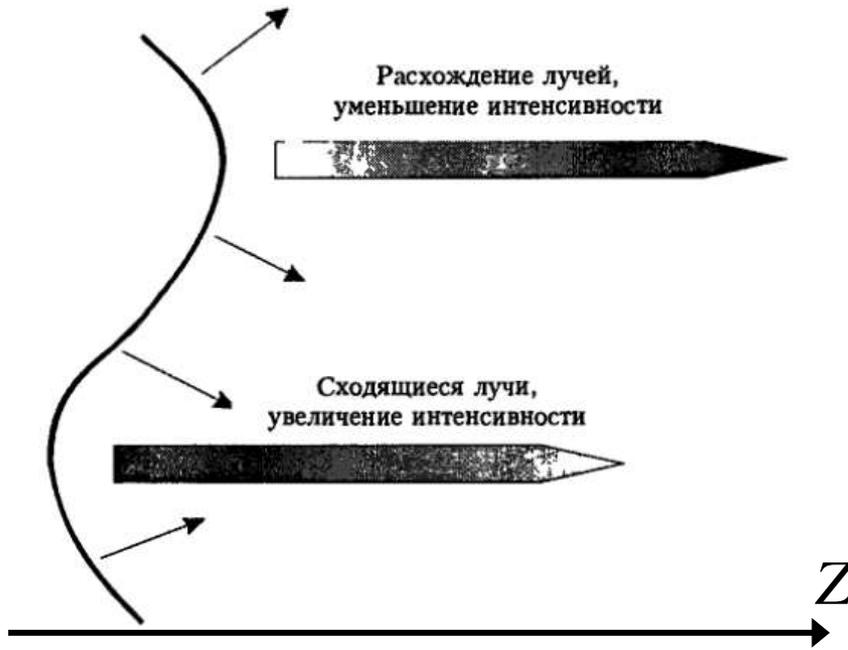
$$\frac{z}{f - z}$$

К объяснению принципа работы датчика кривизны

Между кривизной волнового фронта и средней интенсивностью пятна расфокусированного изображения есть **линейная зависимость**.

Датчики кривизны. Математическое описание

В основу регистрации фазы в датчиках искривления положено уравнение переноса энергии



Изменение интенсивности в процессе распространения в зависимости от кривизны волнового фронта

$$\frac{I_1(\vec{r}) - I_2(\vec{r})}{I_1(\vec{r}) + I_2(\vec{r})} = \frac{\lambda f (f - z)}{2\pi z} \left[\frac{\partial}{\partial n} \phi \left(\frac{f\vec{r}}{z} \right) \delta_c - \nabla^2 \phi \left(\frac{f\vec{r}}{z} \right) \right]$$

f – фокальный отрезок линзы; z – степень расфокусировки; δ_c – краевая функция;
 n – нормаль к краю области;

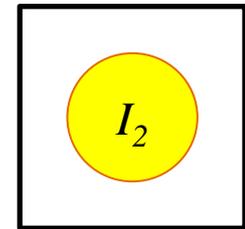
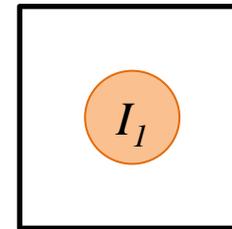
Уравнение переноса

$$\frac{\partial I(r)}{\partial Z} = -\frac{\lambda}{2\pi} \nabla (I(r) \nabla \phi(r))$$

$I(r)$ – распределение интенсивности

$\phi(r)$ – распределение фазы

Результаты измерения в датчике кривизны:



Датчики кривизны. Особенности измерений

Чувствительность датчика кривизны обратно пропорциональна величине расфокусировки z . Однако при большой расфокусировке диаметр пятна становится больше размера субапертуры d .

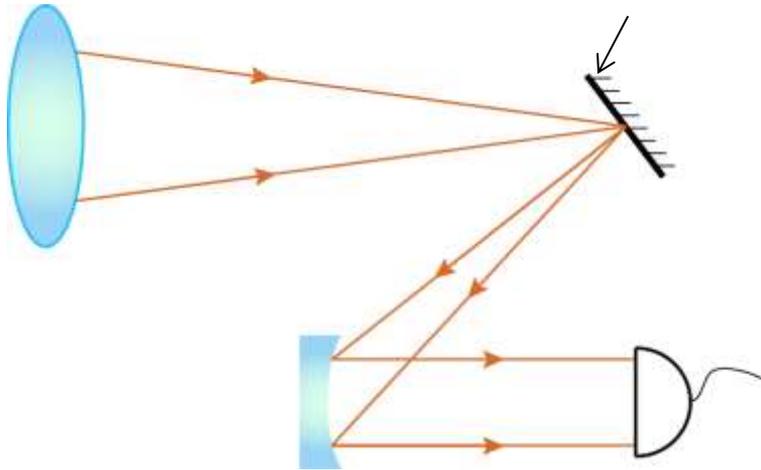
Реальная величина расфокусировки ограничена:

$$z > \beta \frac{f^2}{d}$$

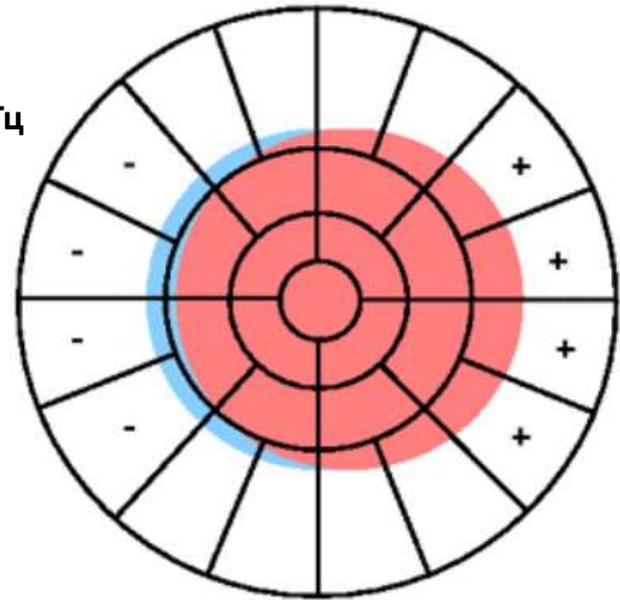
β - угловой размер источника

Для измерения радиального градиента используют специальный датчик

гибкое (мембранное) зеркало ,
осциллирующее на определенной частоте ~ 2 кГц



система, использующая один детектор

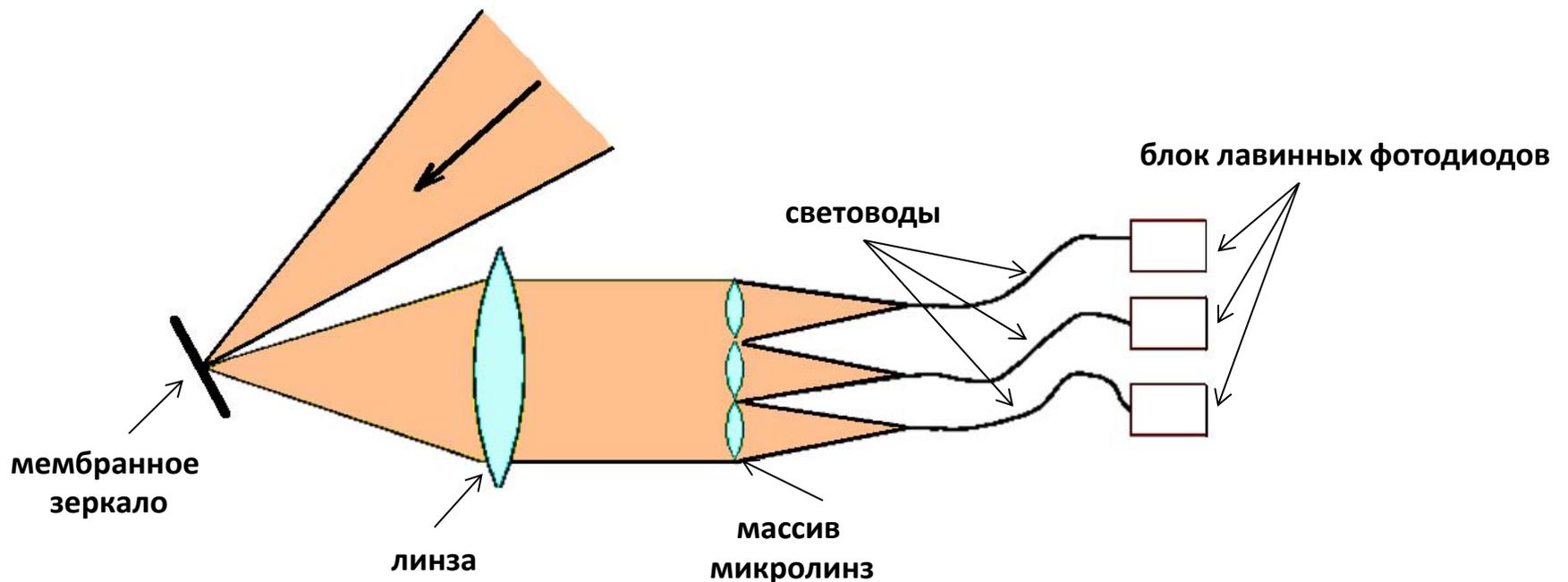


Способ измерения
радиального градиента

Датчики кривизны. Применение в астрономии

Из-за чрезвычайно низкого уровня сигнала в астрономии в качестве детекторов используют лавинные светодиоды (APD) с квантовой эффективностью до 60%.

Поскольку APD очень дороги, применяются схемы с мембранным зеркалом, которые позволяют использовать один APD на субапертуру.



Фотодиоды, соответствующие внешним сегментам, регистрируют сигналы по краям апертуры. Эти сигналы пропорциональны величине градиента волнового фронта вдоль нормали к границе $\frac{\partial}{\partial n} \phi \left(\frac{f\vec{r}}{z} \right)$

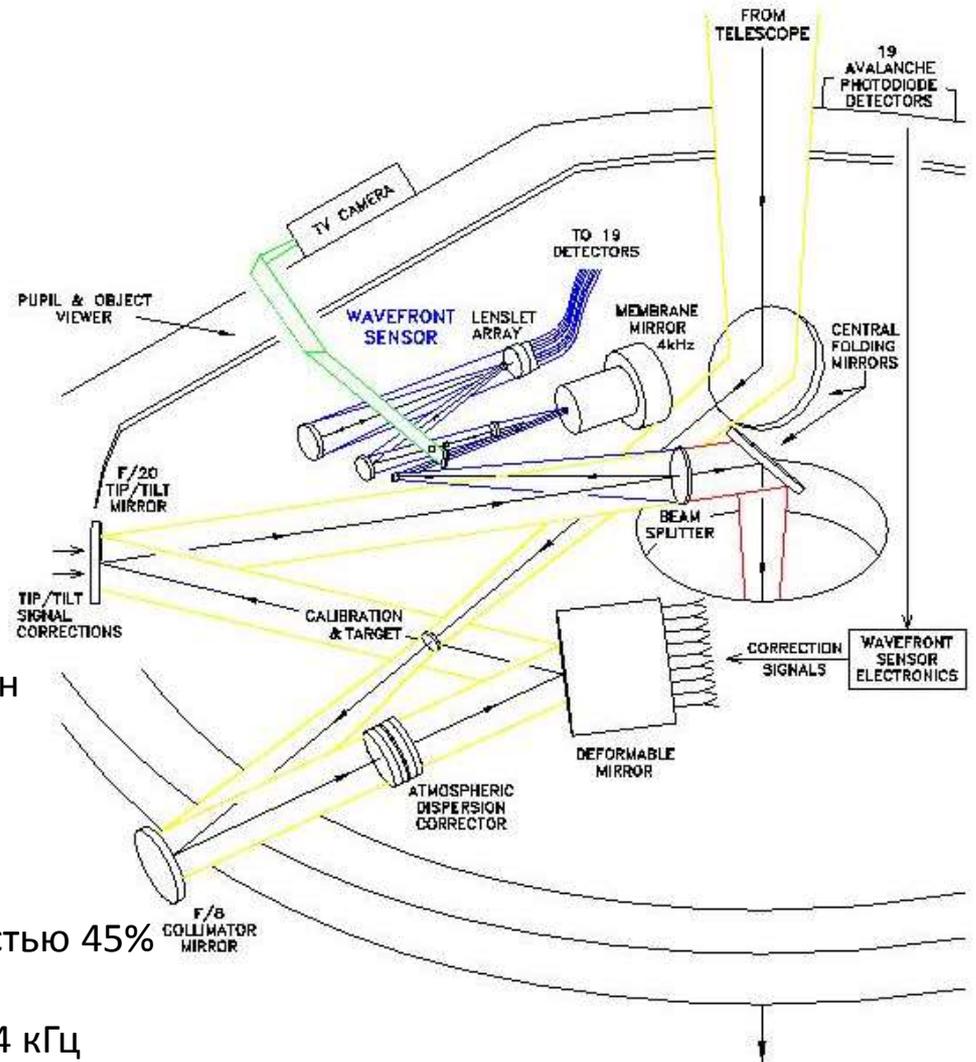
Датчики кривизны. Применение в астрономии.

Реальный пример



Телескоп Канада-Франция-Гавайи (CFHT) с системой адаптивной оптики PUEO, установленной на нем.

Детектор волнового фронта сконструирован на основе датчика кривизны.

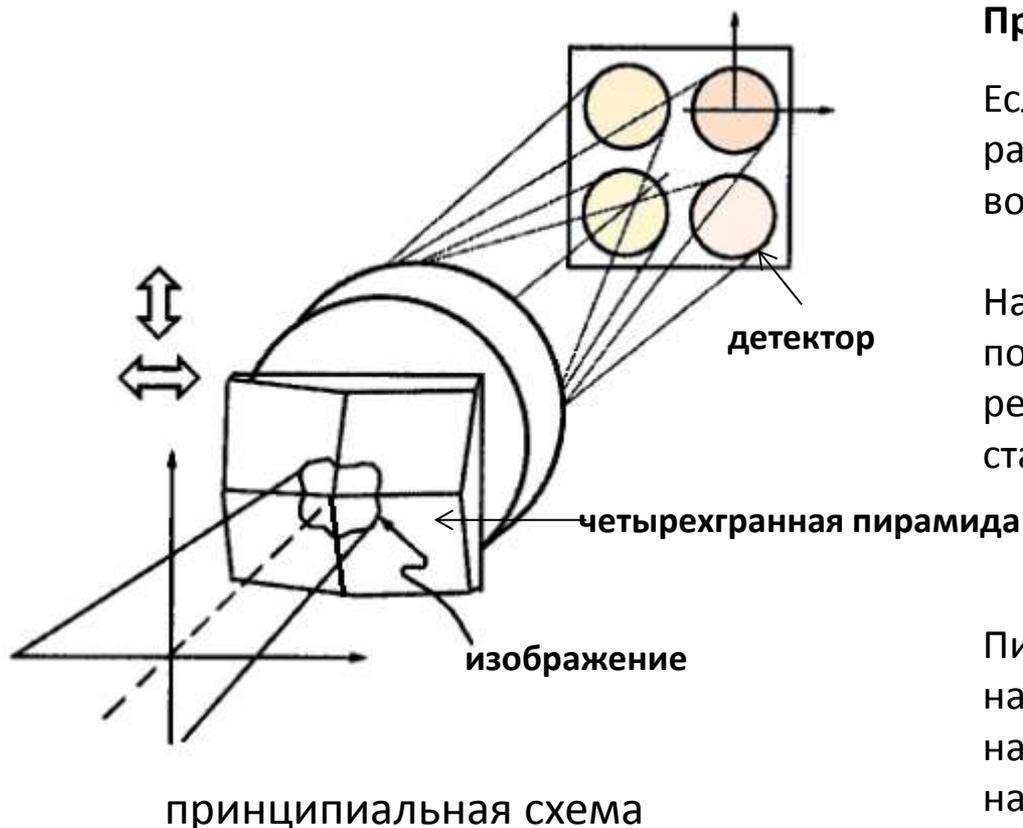


Оптическая схема системы телескопа.

Синим изображен датчик волнового фронта.

Изображение с сайта <http://www.cfht.hawaii.edu/>

Пирамидальный датчик волнового фронта



Принцип работы

Если волновой фронт плоский, то распределение интенсивности одинаково во всех четырех пятнах.

Наклон волнового фронта изменяет положение изображения на пирамиде. В результате распределение интенсивности становится неодинаковым.

Пирамида осциллирует в различных направлениях, что позволяет оценить наклоны волнового фронта вдоль этих направлений.

Преимущество:

Более простая конструкция детектора, нет решетки линз

Недостаток:

Сложность изготовления призмы (сложно получить точечную вершину и отполировать грани, не испортив качество ребер)

Сравнение наиболее распространённых датчиков волнового фронта

Характеристика	Интерферометр сдвига	Гетеродинный датчик	Датчик Гартмана
Метод	Движущаяся решетка	Гетеродинное выделение фазы	Выделение парциальных пучков
Наблюдаемый параметр	Фазовая модуляция	Фазовая модуляция	Положение парциального пучка
Измеряемый параметр	Наклон волнового фронта	Оптическая фаза	Наклон волнового фронта
Расположение приемника	Плоскость апертуры	Плоскость апертуры	Плоскость апертуры
Спектральная полоса	Широкая	Узкая	Широкая
Оптическая эффективность	Высокая	Высокая	Высокая
Быстродействие	Высокое	Высокое	Высокое
Сложность оптической системы	Средняя	Средняя	Очень сложная
Число приемников	$2N$	N	$4N$
Блок электроники	N каналов	N каналов	N каналов

Требования к датчикам волнового фронта

При разработке датчика необходимо учитывать следующие особенности:

- высокое пространственное разрешение (многоканальность) датчика;
- быстродействия датчика;
- согласование большого динамического диапазона датчика с проблемой фазовой неоднозначности при возмущениях свыше 2π рад;
- независимость результатов фазовых измерений от случайных изменений интенсивности света на приемной апертуре;
- чувствительность или эффективность, с которой используется световой поток;
- ширина спектра рабочего излучения;
- сложность датчика, которая включает рассмотрение надежности, потенциальной стоимости, степени технической проработки и т. п.

Общие требования к числу каналов:

$$N \approx \left(\frac{2D}{\pi l_s} \right) \ln \frac{\sigma_s}{\sigma}$$

D – диаметр апертуры,

l_s – масштаб неоднородностей,

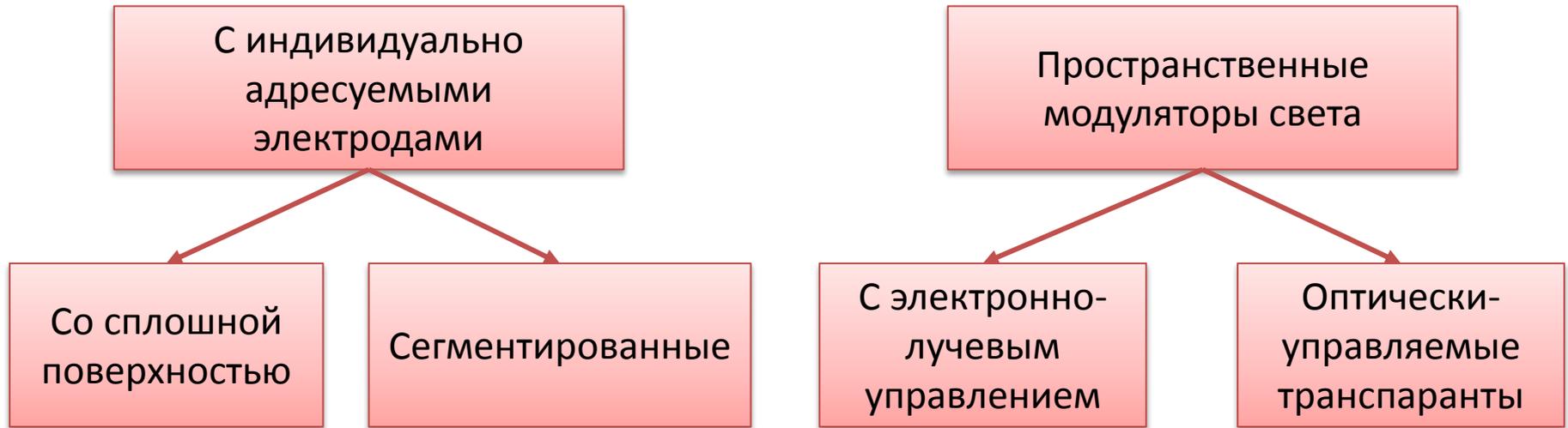
σ_s – среднеквадратичная амплитуда возмущений волнового фронта;

σ – ошибка аппроксимации фазы;

Для интерферометров и датчиков гартмановского типа число приемных каналов не обязательно должно совпадать с числом каналов корректора

Корректоры волнового фронта. Классификация

Классификация корректоров волнового фронта по конструктивному исполнению



Относительно малое число степеней свободы.
На каждую степень свободы приходится свой канал управления

Большое эффективное число степеней свободы

Общие требования, предъявляемые к корректору волнового фронта:

- широкий динамический диапазон;
- малое число актуаторов;
- эффективность воспроизведения аберраций;
- температурная стабильность;
- совместимость с датчиком волнового фронта;
- простота изготовления и применения.

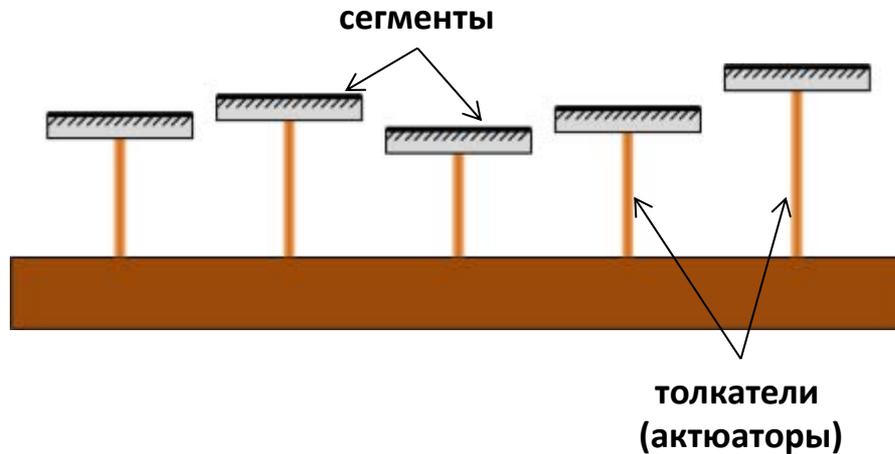
Корректоры волнового фронта. Применение в различных областях

Выбор конструкции корректора при проектировании объясняется спецификой его применения

Область применения	Количество зон управления	Рабочая частота АОС (Гц)	Размер активной апертуры (мм)	Спектральный диапазон (мкм)
Астрономия	Сто-несколько тысяч	100-200	До нескольких сотен	0.4-2
Лазерные технологии (обработка материалов)	Не более 40	До 100	До 100	0.4-10.6
Медицина	Не более 30	До 100	До 80	0.4-10.6
Оптическая связь (в т.ч. в космосе)	До 200	До 1000	До 150	0.78-1.55
Системы формирования диаграммы направленности излучения мощных лазеров	Не более 40	До 100	До 400	0.4-10.6
Компенсация атмосферных искажений в задачах передачи оптической информации на расстояния	Сто-несколько тысяч	Сто-несколько тысяч	До 400	0.4-10.6

Сегментные зеркала

Возникновение сегментных зеркал связано с необходимостью создания телескопов чрезвычайно большого диаметра (больше 5 м), что влечет за собой чрезвычайно большие трудности

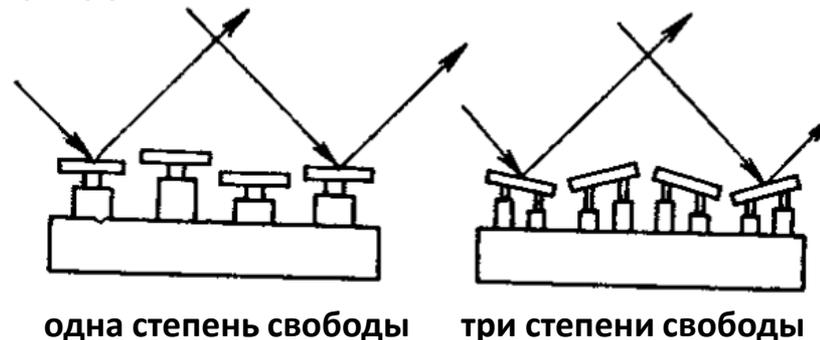


Форма сегмента:

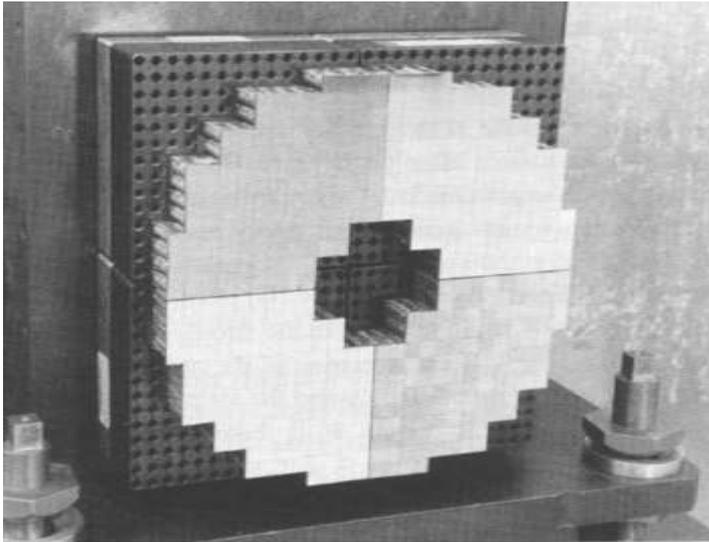
- квадратная
- гексагональная

Различаются также по числу степеней свободы.

- **одна** степень – регулируется только положение;
- **две** степени свободы – регулируется только наклоны;
- **три** степени свободы – регулируется и положение и наклоны.



Сегментные зеркала. Реальный пример



Диаметр	22 см
Количество элементов	512
Число степеней свободы	~1500
Время отклика	100 мкс
Смещения (макс.)	8 мкм

Зеркало, созданное фирмой Thermotrex
для систем вооружений.

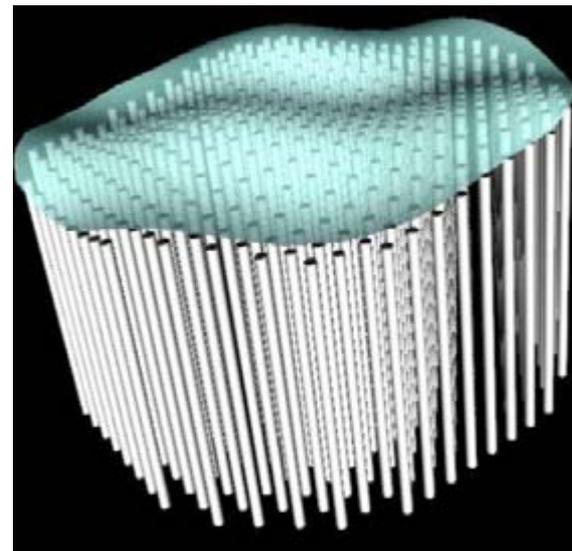
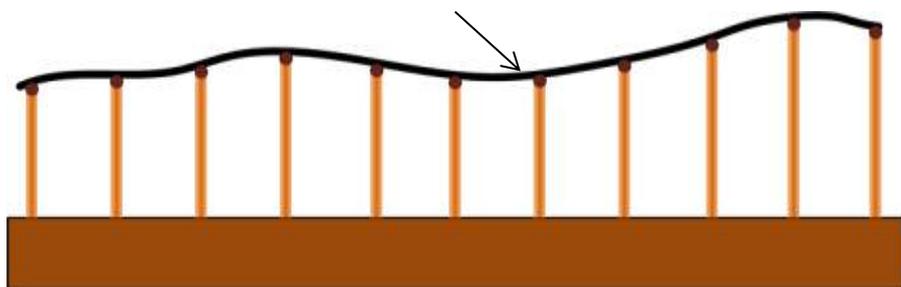
На каждый сегмент приходится 3 степени свободы

Недостатки сегментных зеркал:

- необходимость контролировать положение элементов;
- сложность решения задачи термостабилизации;
- между элементами должен оставаться зазор, что уменьшает резкость изображения

Сплошные деформируемые зеркала

тонкая мембрана



Основные параметры

Количество актуаторов	100-1500
Промежутки между актуаторами	210 мм
Форма электродов	прямоугольная ли шестиугольная
Напряжение	несколько сотен вольт
Амплитуда перемещения	несколько мкм
Резонансная частота	несколько кГц
Стоимость	высокая

Особенность сплошных зеркал — наличие взаимодействия между соседними точками деформируемой поверхности. В результате функция отклика — нелокальная, а имеет характерную колоколообразную форму.

Особенности конструкции

Требования к материалу мембраны
(для применений с мощными источниками):

- хорошие упругие свойства;
- высокая теплопроводность;
- малая термическая деформация.

Можно ввести комплексный параметр $P=EL/a$,
 E – модуль Юнга,
 L – теплопроводностью,
 a – коэффициент теплового расширения

Материал	E (10^{10} Н/м ²)	L (Вт м ⁻¹ К ⁻¹)	a (10^{-6} К ⁻¹)	P , 10^{-16}
Mo	30	138	5.27	785
Si	13.5	150	2.54	797
Al	7	237	23.3	71.2
Сталь	20	60	12	100
Ti	11	150	8.3	199
Cu	12	401	16.7	288
Be	30	200	9.2	652

По совокупности параметров лучшими материалами являются **кремний** и **молибден**

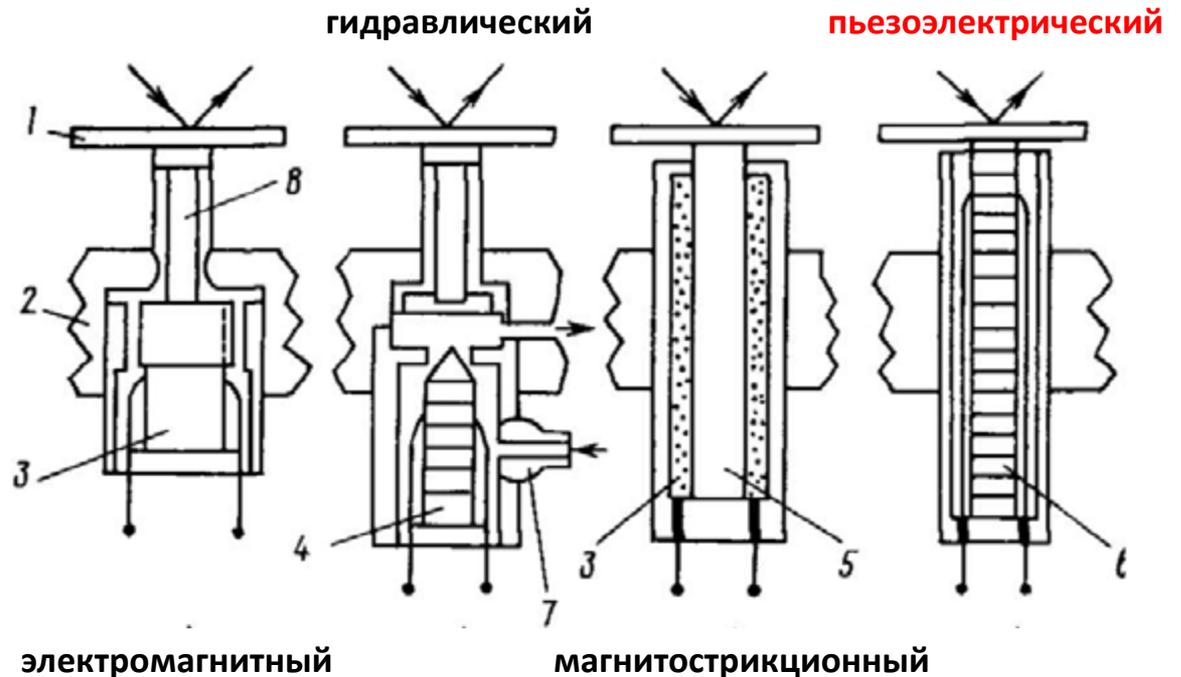
Типы толкателей

Приводы деформируемых зеркал должны одновременно обладать большим динамическим диапазоном и высоким быстродействием

Различают следующие типы толкателей:

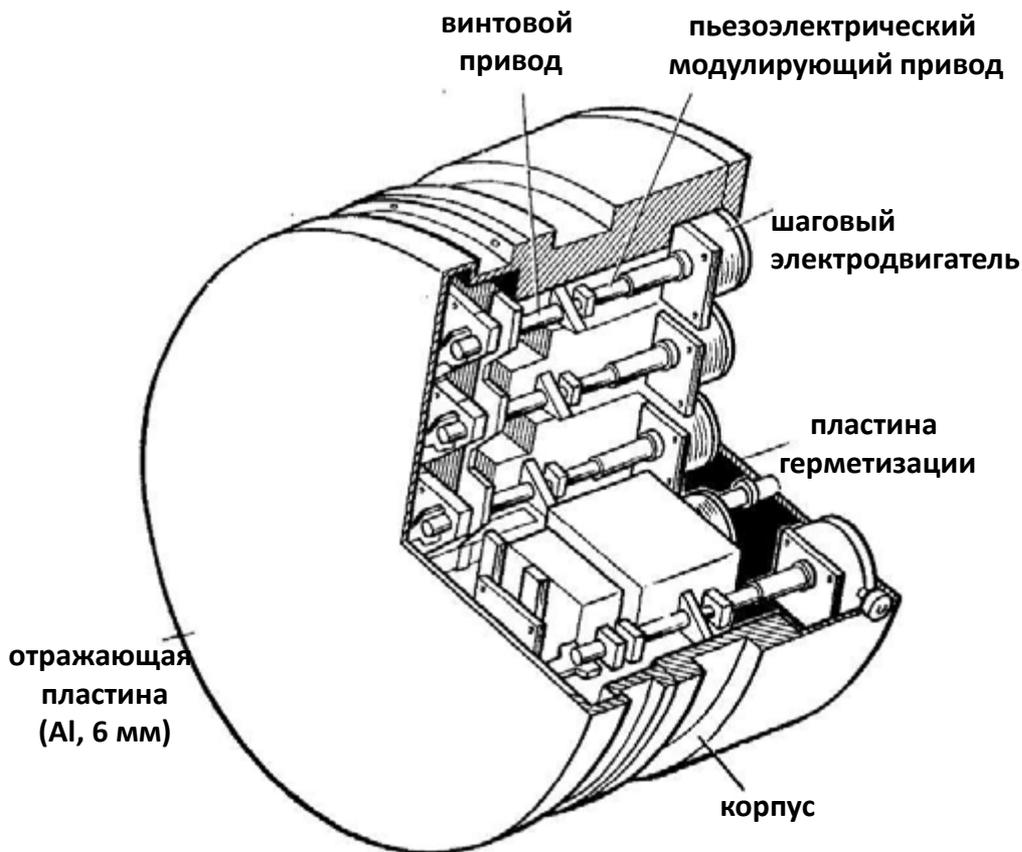
- пьезоэлектрический
- электромагнитный
- гидравлический
- магнитоstrictionный
- электромеханический (винт и шаговый двигатель)

- 1 — зеркальная поверхность;
- 2 — опорная плита;
- 3 — соленоид;
- 4 — пьезоэлектрический золотник;
- 5 — магнитоstrictionный стержень;
- 6 — пьезокерамический столбик;
- 7 — штуцер для впуска жидкости;
- 8 — толкатель



Деформируемые зеркала. Устройство

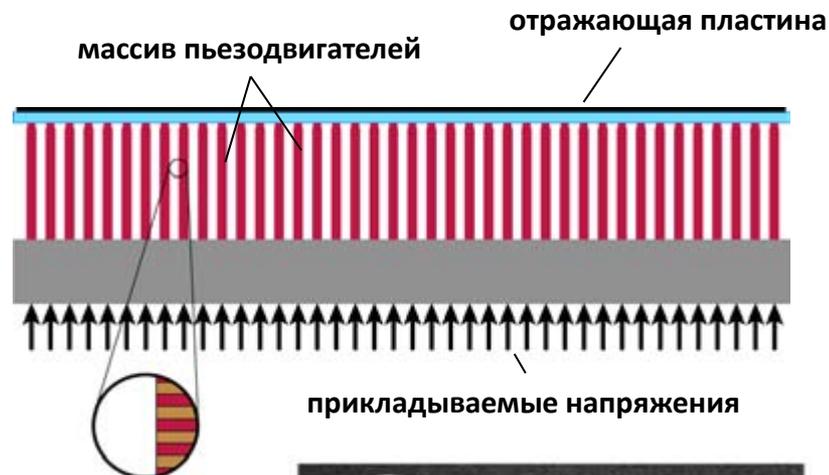
Зеркало с винтовыми толкателями



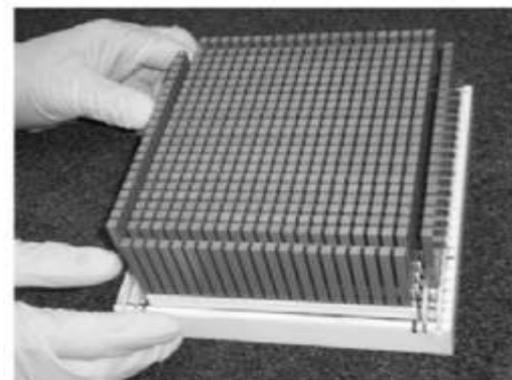
Конструкция зеркала, разработанного фирмой Rockwell International

Зеркало с пьезотолкателями

За счет продольного пьезоэффекта



N слоев пьезоэлементов (пьеzoпакет)

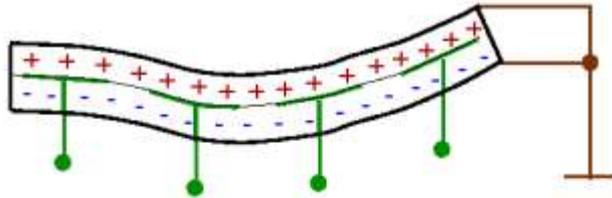


Конструкция привода адаптивного зеркала, установленного на Большом канарском телескопе

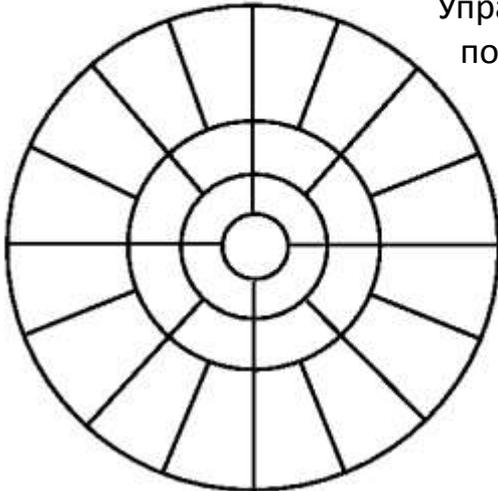
Такие зеркала хороши для компенсации быстрых искажений

Биморфные зеркала

Схематичное изображение
биморфного зеркала



Управляющие напряжения
подаются в противофазе



вид сверху на расположение
пьезоэлементов

Поперечный пьезоэффект

Балка, закрепленная с одного конца

$$\Delta h = 3d_{31}U \left(\frac{l}{h} \right)$$

l – длина балки,
 U – напряжение,
 h – толщина балки,
 d_{31} – пьезомодуль

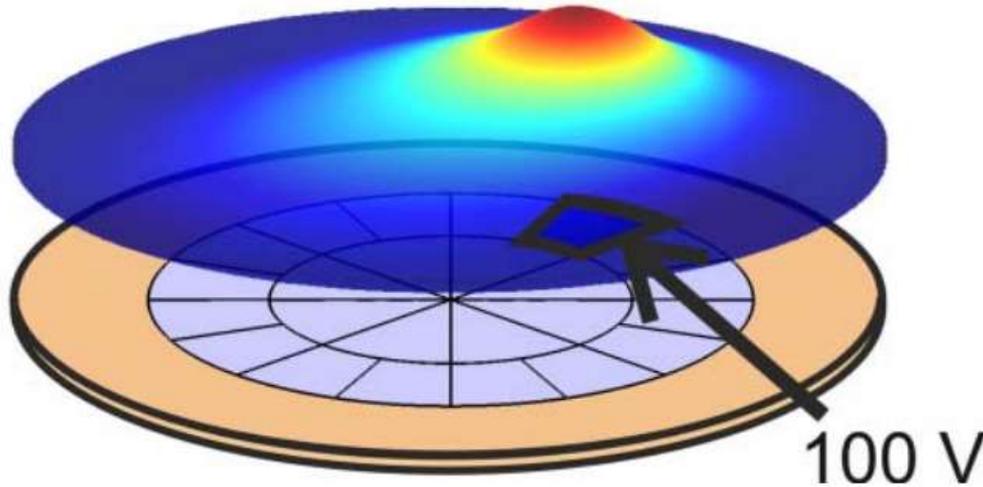
Диск, закрепленный по окружности

$$\Delta h = 0.75d_{31}U \left(\frac{D}{h} \right)$$

D – диаметр диска,
 U – напряжение,
 h – толщина диска,
 d_{31} – пьезомодуль

Большие амплитуды деформации удается достичь
за счет большого соотношения D/h (или l/h)

Биморфные зеркала. Особенности



Биморфные зеркала также обладают нелокальным откликом

Резонансные частоты будут определяться размерами зеркала. Диаметр биморфного зеркала должен быть выбран относительно малым для того, чтобы избежать попадания в полосу управляющих частот САО.

Достоинства: простота изготовления, дешевизна

Недостатки: низкая резонансная частота

Функция отклика биморфного зеркала $\sim k^{-2}$
Спектр атмосферной турбулентности $\sim k^{-11/6}$

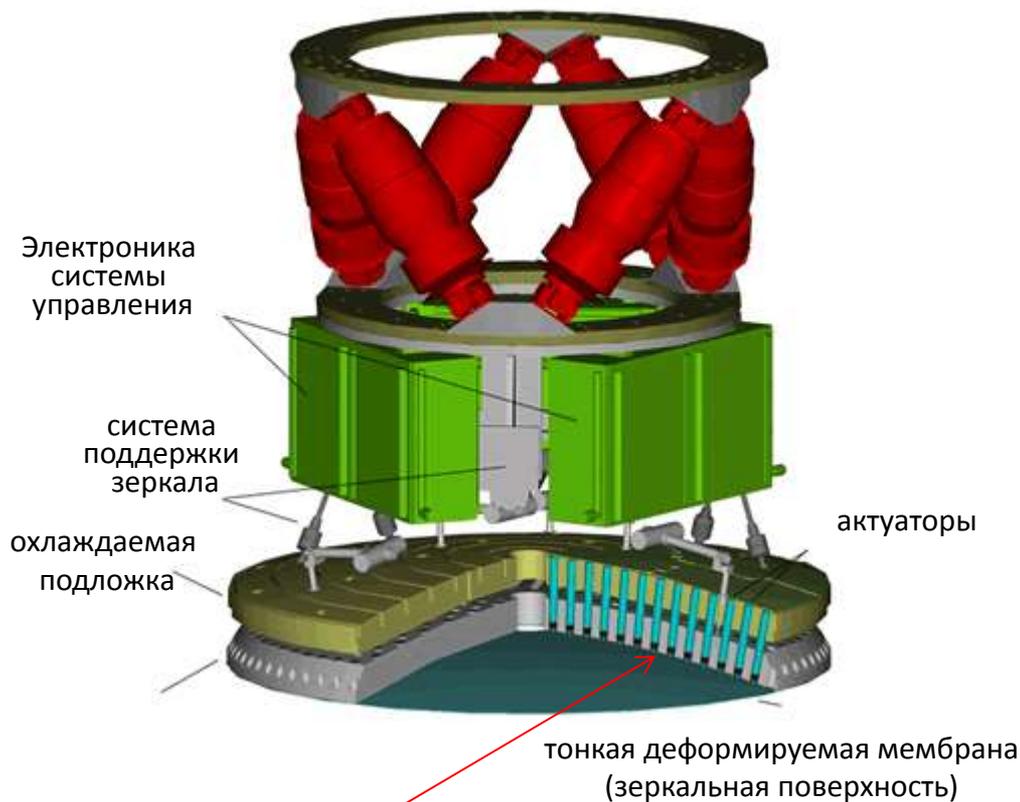
В результате зависимость между амплитудой управляющих напряжений и их частотой – практически линейная

Типичные параметры биморфных зеркал

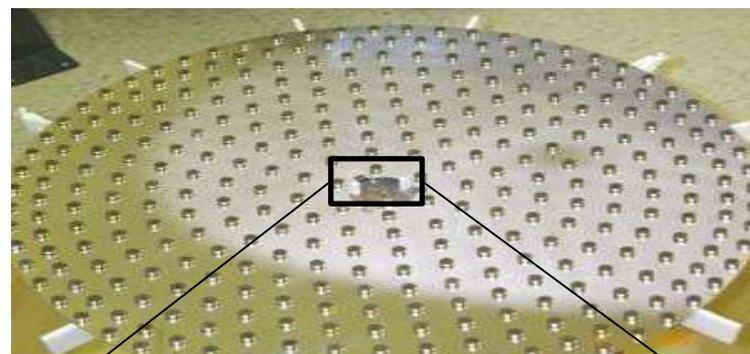
Количество актуаторов	13-85
Размер зеркала	30-200 мм
Форма электродов	радиальная
Напряжение	~100 В
Резонансная частота	>500 герц
Стоимость	умеренная

Зеркала на основе «звуковой катушки» (voice-coil actuator)

Конструкция:



Вторичное зеркало телескопа обсерватории MMT

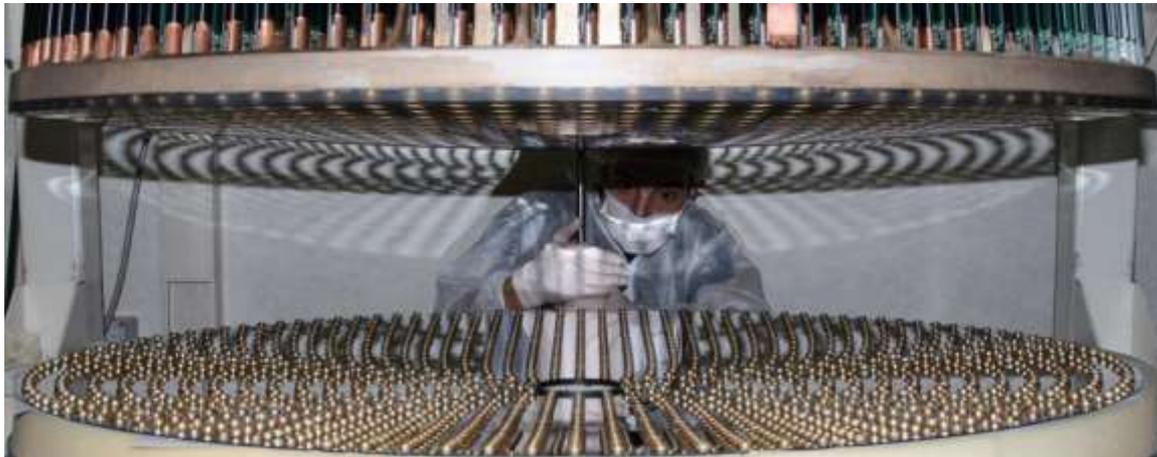


постоянные магниты

Расстояние между приводом и мембраной – несколько десятков микрон. Пространство заполнено разреженным воздухом для того, чтобы демпфировать осцилляции. Форма зеркала контролируется массивом емкостных датчиков, которые связаны с катушками в систему с замкнутым циклом.

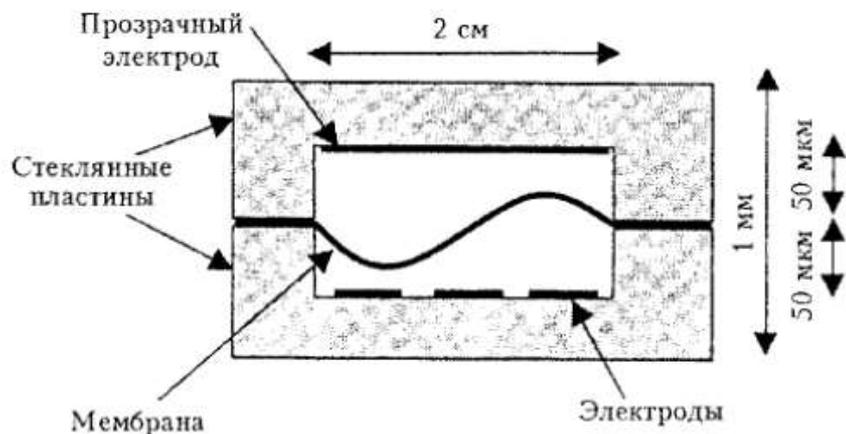
Voice-coil actuator

Типичная конструкция звуковой катушки



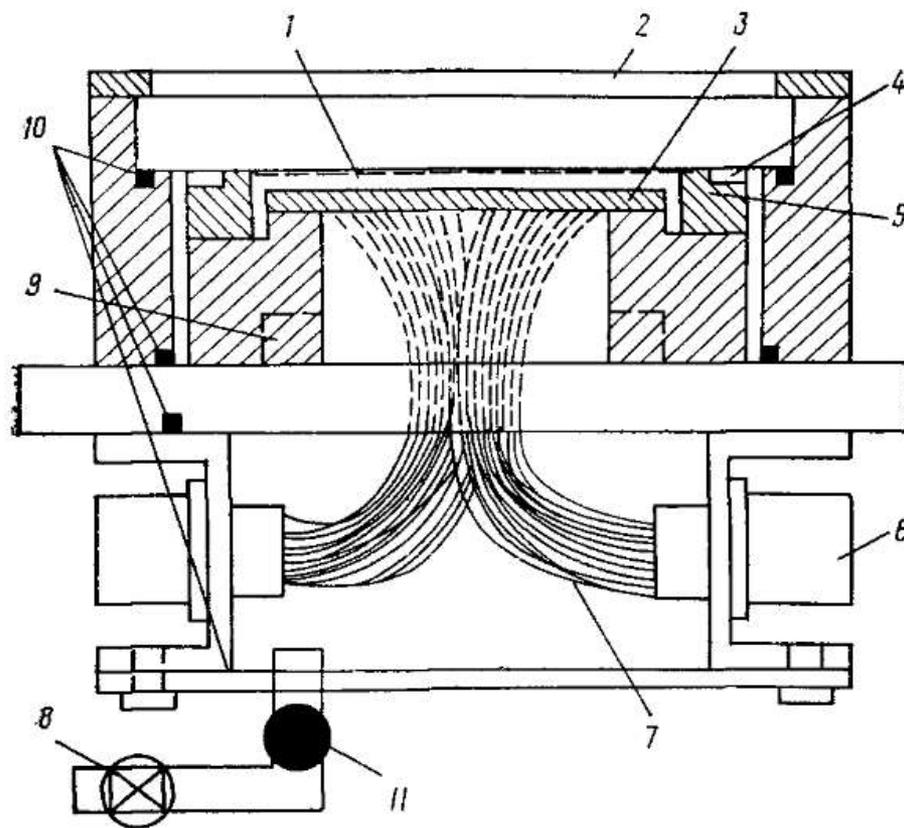
Мембранное зеркало

Принцип работы



- 1 — мембрана;
- 2 — окно;
- 3 — плата с электродами;
- 4 — майларовые прокладки;
- 5 — оправа мембраны;
- 6 — электрический разъем;
- 7 — многожильный провод с тефлоновой изоляцией;
- 8 — штуцер для откачки воздуха;
- 9 — пружина;
- 10 — кольца;
- 11 — запирающий клапан.

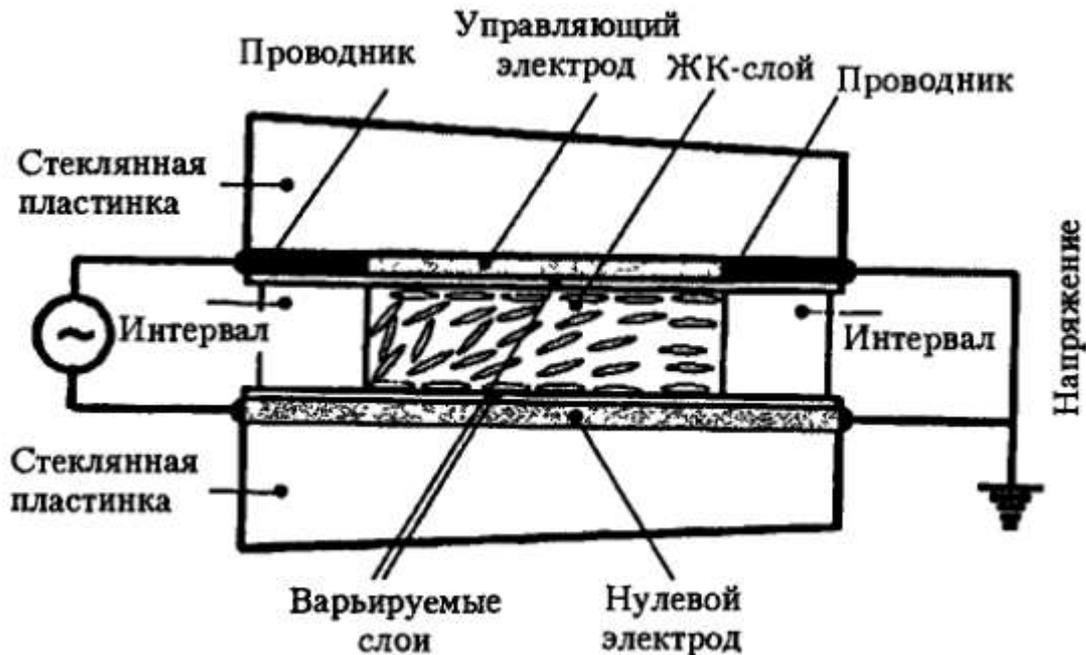
Конкретный пример



Конструкция мембранного зеркала,
Разработанного фирмой Perkin-Elmer

Пространственный модулятор фазы

Конструкция



Преимущества:

- низкие управляющие напряжения;
- малая мощность;
- малые размеры;
- глубокая модуляция;
- отсутствие вибраций

Недостатки:

- плохо корректирует наклоны;

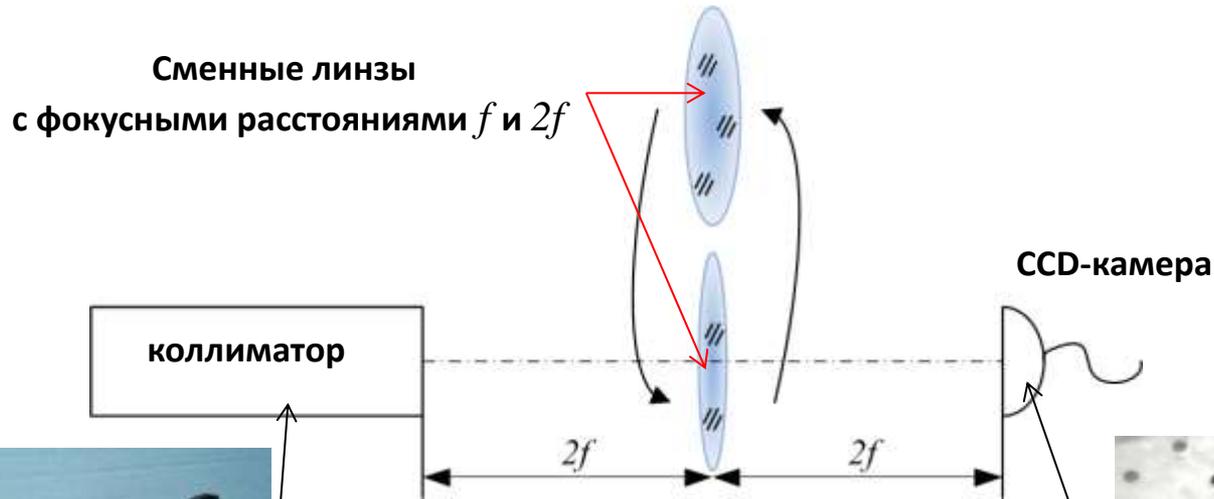
M^2 -датчик

Используется в системах апертурного зондирования

Смысла величины M^2 : реальный пучок обладает расходимостью в M^2 раз большей, чем идеальный гауссовый пучок с такой же длиной волны.

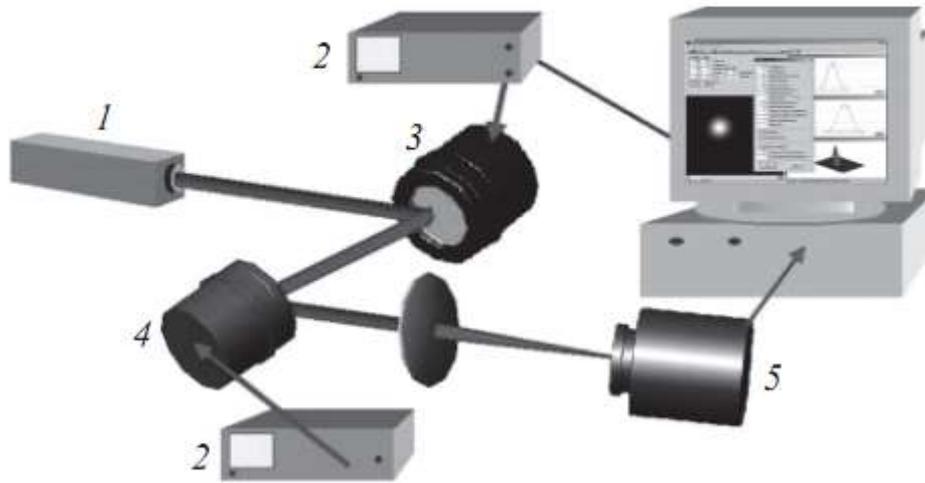
Подробное рассмотрение вопроса остается для самостоятельного изучения.

Один из способов измерения величины M^2



M^2 -датчик

Схема установки апертурного зондирования, основанной на измерении параметра M^2



- 1 – лазер;
- 2 – блок управления;
- 3, 4 – биморфные зеркала;
- 5 – M^2 датчик

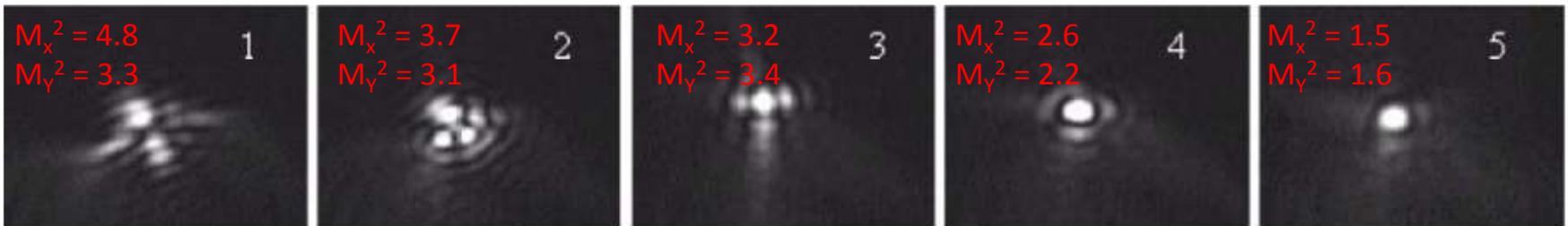
Расчетная зависимость

$$M_{x,y}^2 = \frac{\pi}{4\lambda f} d_0 d_{x,y}$$

Величина $d_{x,y}$ оценивается из вторых моментов распределения интенсивности на CCD камере

$$d_y = 4 \left(\frac{\iint y^2 I(x, y) dx dy}{\iint I(x, y) dx dy} \right)^{1/2} \quad d_x = 4 \left(\frac{\iint x^2 I(x, y) dx dy}{\iint I(x, y) dx dy} \right)^{1/2}$$

Иллюстрация процесса корректировки формы лазерного пучка



Распределение поля в фокальном пятне

Система управления

Параметры системы управления на примере ЭСУ-32-300

Число управляемых каналов	32
Диапазон выходных напряжений	-300 В - + 300 В
Время установления напряжения на одном канале	1 мс
Время установления напряжения на всех каналах	1 мс
Емкостная нагрузка канала, не более	0.1 мкФ
Способ управления	от компьютера через USB порт
Напряжение питания	220 В, 50 Гц
Габариты	480x450x135мм
Масса	8.4 кг



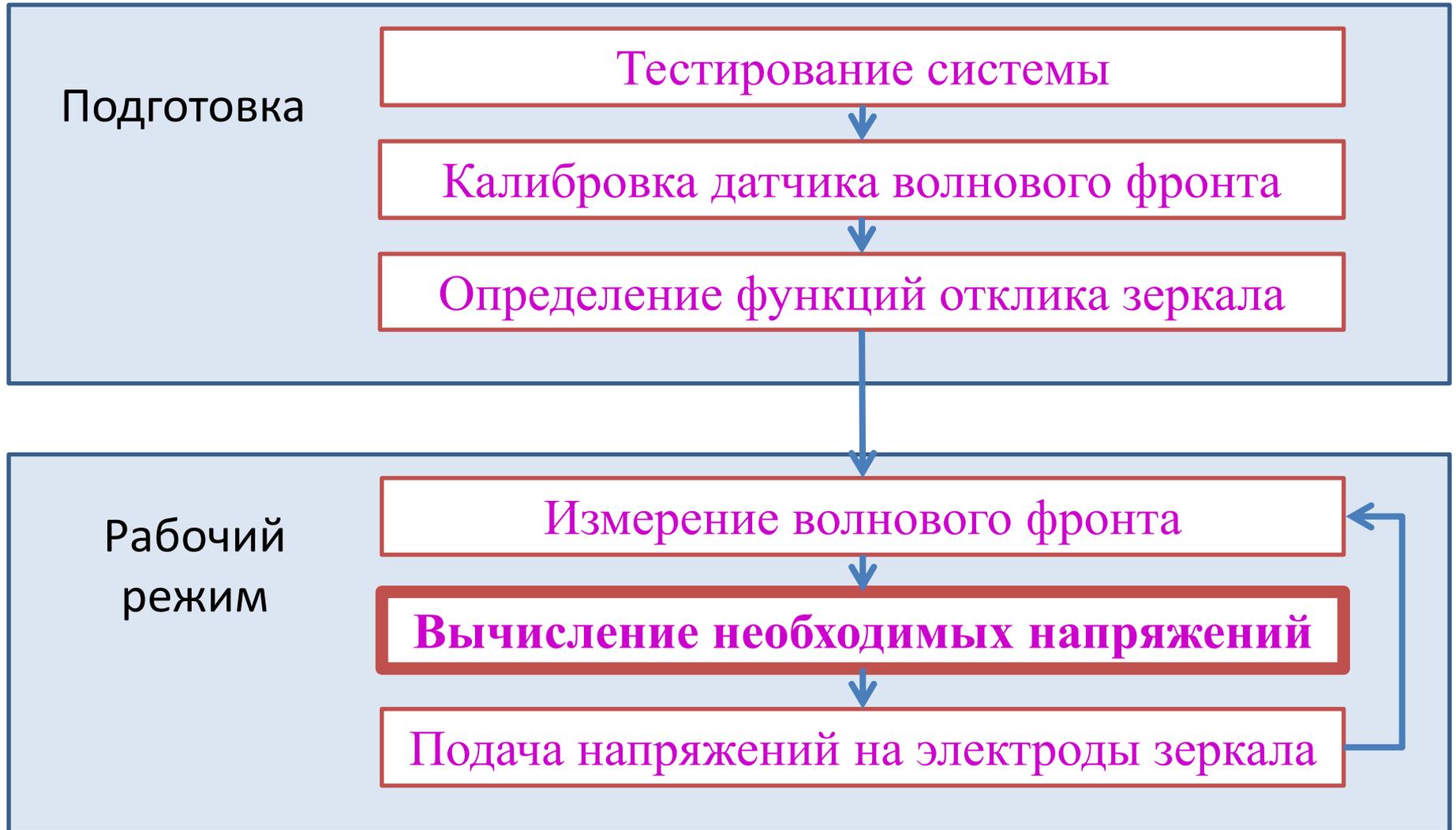
Раздел 3

Электронное и программное обеспечение систем адаптивной ОПТИКИ

Адаптивный алгоритм фазового сопряжения

- **Основная задача** программного ядра адаптивной оптической системы - определение набора управляющих воздействий на адаптивное зеркало, приводящих к изменению его поверхности и компенсации фазовых искажений волнового фронта.
- **Для биморфного адаптивного зеркала** воздействие реализуется в виде управляющих напряжений, подаваемых на электроды.
- **Модуль управления** должен выполнять расчёт этих напряжений на основе исходных данных о свойствах зеркала и на основе текущих данных о форме искажённого волнового фронта
- **Адаптивный алгоритм** решает данную задачу

Адаптивный алгоритм фазового сопряжения

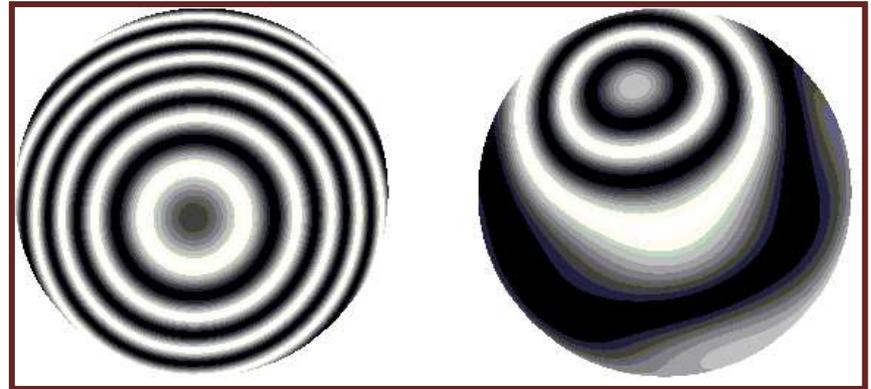


Адаптивный алгоритм фазового сопряжения

- Описание свойств адаптивного зеркала - функции отклика электродов.
- Функция отклика - результат деформации поверхности адаптивного зеркала от приложения единичного напряжения только к данному электроду по сравнению с референсным положением.
- Последовательным приложением напряжений ко всем электродам адаптивного зеркала вычисляются смещения фокальных пятен для всех функций отклика.

Адаптивный алгоритм фазового сопряжения

Примеры функций отклика



- Графически функции отклика можно представить в виде интерферограмм .
- Функции отклика в виде массивов смещений сохраняются в отдельный файл.
- В файл записывается также информация об опорном волновом фронте, о координатах прямоугольных окрестностей фокальных пятен для сетки, о радиусе пучка излучения и о технических характеристиках системы (количество электродов адаптивного зеркала, фокусное расстояние линзового раstra и др.)

Адаптивный алгоритм фазового сопряжения

Любое искажение волнового фронта, представленное в виде смещений центров фокальных пятен, может быть представлено как суперпозиция функций отклика электродов адаптивного зеркала:

$$S = \sum_{j=1}^{NE} U_j \cdot RF_j ,$$

где

- NE – число электродов адаптивного зеркала;
- S – матрица смещений фокальных пятен для компенсируемого волнового фронта;
- U – вектор управляющих напряжений;
- RF – матрица функции отклика.

Требуется найти управляющие напряжения U_j .

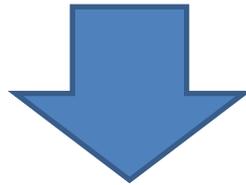
Адаптивный алгоритм фазового сопряжения

Предварительные вычисления:

- определение центров опорного изображения волнового фронта
- определение центров искажённого волнового фронта
- расчёт смещений фокальных пятен
- считывание данных о функциях отклика электродов
- расчёт коэффициентов при полиномах Цернике для текущего искажённого фронта и для всех функций отклика

Адаптивный алгоритм фазового сопряжения

В любом случае в вычислении управляющих напряжений участвуют смещения фокальных пятен и функции отклика электродов .



Можно представить их не в виде смещений, а в виде значений фазы.

1. Для каждого центра фокального пятна гартманогаммы искажённого волнового фронта вычислить значение фазы.
2. Для каждой функции отклика электродов рассчитать значение фазы в каждом фокальном пятне.

Адаптивный алгоритм фазового сопряжения

Система с вектором фаз для корректируемого волнового фронта в левой части и матрицей фаз для функций отклика в правой

$$\begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi_1^1 & \varphi_1^2 & \cdots & \varphi_1^{NE} \\ \varphi_2^1 & \varphi_2^2 & \cdots & \varphi_2^{NE} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_N^1 & \varphi_N^2 & \cdots & \varphi_N^{NE} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_{NE} \end{pmatrix},$$

φ_i – значение фазы для i -й точки гартманогаммы искажённого волнового фронта;

U_i – управляющее напряжение на i -м электроде;

φ_i^j – значение фазы в i -й точке j -й функции отклика;

N – число фокальных пятен;

NE – число функций отклика (число электродов).

Адаптивный алгоритм фазового сопряжения

Значения смещений будут заменены наборами значений фаз, и методом наименьших квадратов будет минимизироваться уже функционал разности значений функции профиля волнового фронта.

После нахождения управляющих напряжений на электродах адаптивного зеркала необходимо проверить качество коррекции волнового фронта. Умножив смещения одного фокального пятна для каждой функции отклика на соответствующие вычисленные управляющие напряжения и просуммировав значения по всем функциям отклика, получим «корректирующие» смещения для данного фокального пятна. Аналогичную процедуру необходимо проделать со всеми остальными фокальными пятнами.

Адаптивный алгоритм фазового сопряжения

Если вычесть из смещений фокальных пятен анализируемой гартманогаммы «корректирующие» смещения, то результатом будут смещения центров фокальных пятен для скорректированного волнового фронта от референсного.

$$\begin{pmatrix} S_1^{corrected} \\ S_2^{corrected} \\ \vdots \\ S_N^{corrected} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_1^{phase} - \sum_{i=1}^{NE} U_i \cdot S_{i1}^{resp} \\ S_2^{phase} - \sum_{i=1}^{NE} U_i \cdot S_{i2}^{resp} \\ \vdots \\ S_N^{phase} - \sum_{i=1}^{NE} U_i \cdot S_{iN}^{resp} \end{pmatrix},$$

$S_i^{corrected}$ – «скорректированные» смещения i -го фокального пятна;

S_i^{phase} – значения смещений для i -го фокального пятна анализируемой гартманогаммы;

U_i – управляющее напряжение на i -м электроде;

S_{ij}^{resp} – смещения j -го фокального пятна i -й функции отклика;

N – число фокальных пятен;

NE – число функций отклика.

Адаптивный алгоритм фазового сопряжения

На основании полученных смещений можно найти коэффициенты при полиномах Цернике для скорректированного волнового фронта и построить картину распределения интенсивности.

В идеале она должна быть плоской, но в связи с тем, что напряжение на электродах измеряется с точностью до 1 вольта и в связи с явлением гистерезиса адаптивного зеркала приемлемые корректирующие напряжения находятся, как правило, за 3-4 итерации.

Электронный блок управления

Электронный блок предназначен для управления деформируемым биморфным зеркалом путем изменения напряжения на его электродах.

В учебной лаборатории используется блок ЭСУ-32-300. Блок предназначен для работы в лабораторных условиях при температуре от 15 до 25 градусов Цельсия, влажности не более 80% и отсутствии пыли и паров агрессивных веществ.

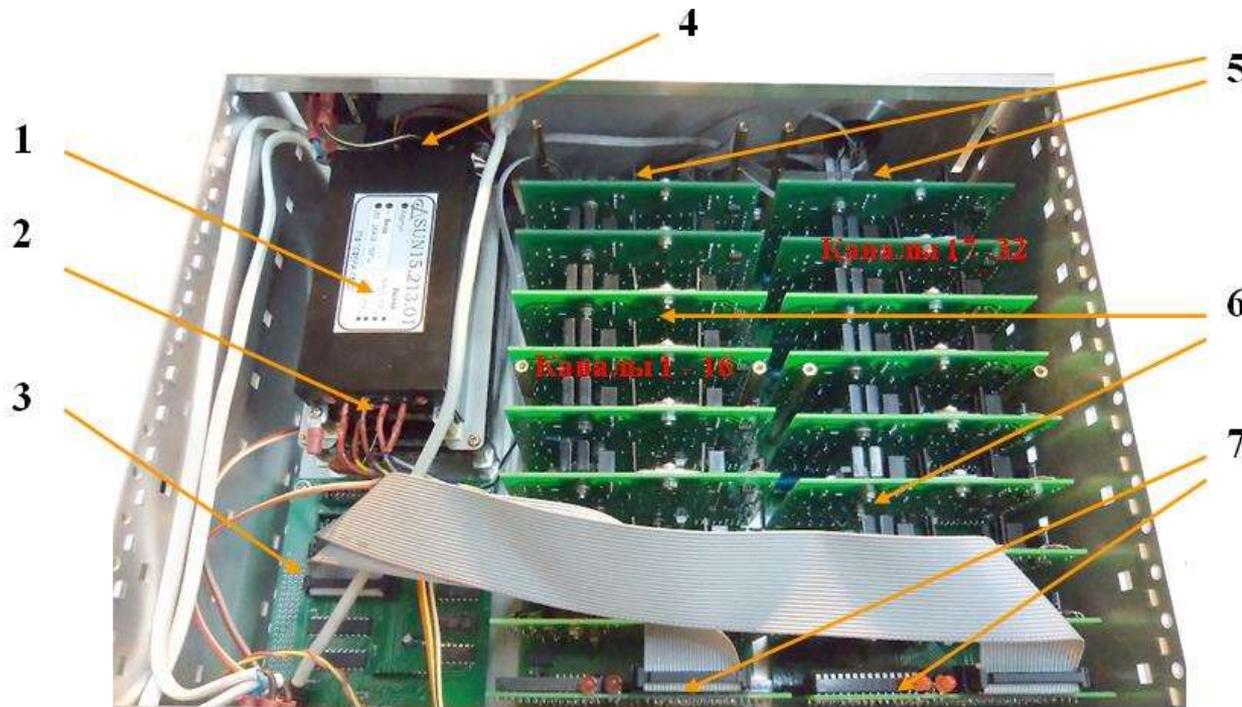


Электронный блок управления

Работа с блоком требует соблюдения мер безопасности из-за наличия опасных для жизни напряжений:

- не допускается включение блока без защитного кожуха;
- не допускается снятие защитного кожуха во время работы блока;
- разрешается выполнять переключение зеркала не ранее, чем через 5 минут после выключения блока;
- недопустимо выключение сетевого напряжения на блоке тумблером при наличии высокого напряжения на его выходных усилителях – это может привести к выходу из строя корректора. Если желтый светодиод светится, а компьютер выключен или нарушена связь компьютера и блока, то необходимо включить компьютер, подключить кабель USB, запустить управляющую программу, выключить высокое напряжение, после чего можно отключить питание блока.

Электронный блок управления



1. Низковольтные импульсные источники питания (+12 В, -12 В и + 5 В).
2. Высоковольтные импульсные источники питания (-300 В и +300 В).
3. Контроллер USB для связи с компьютером.
4. Вентилятор охлаждения.
5. Высоковольтные усилители каналов 1...32.
6. Кросс-плата
7. Платы ЦАП

Электронный блок управления

- **Низковольтные импульсные источники питания** вырабатывают напряжения +12 В, -12 В и + 5 В, необходимые для питания низковольтной части.
- **Контроллер USB** обеспечивает интерфейсный обмен данными между компьютером и блоком.
- **Высоковольтные импульсные источники питания** вырабатывают напряжения -300 В и +300 В, необходимые для питания высоковольтных усилителей.
- **Кросс-плата** предназначена для установки плат высоковольтных усилителей и платы ЦАП. Обеспечивает подачу напряжений +12 В, - 12 В, + 5 В, - 300 В, +300 В и коммутацию усилителей с выходным разъемом блока.
- **Высоковольтные усилители** обеспечивают подачу напряжения в диапазоне от -300 В до +300 В на электроды зеркала. Загрузка ЦАП производится от контроллера, далее высоковольтный усилитель постоянного тока увеличивает напряжение до заданной величины.

Раздел 4

Приложения адаптивных оптических систем

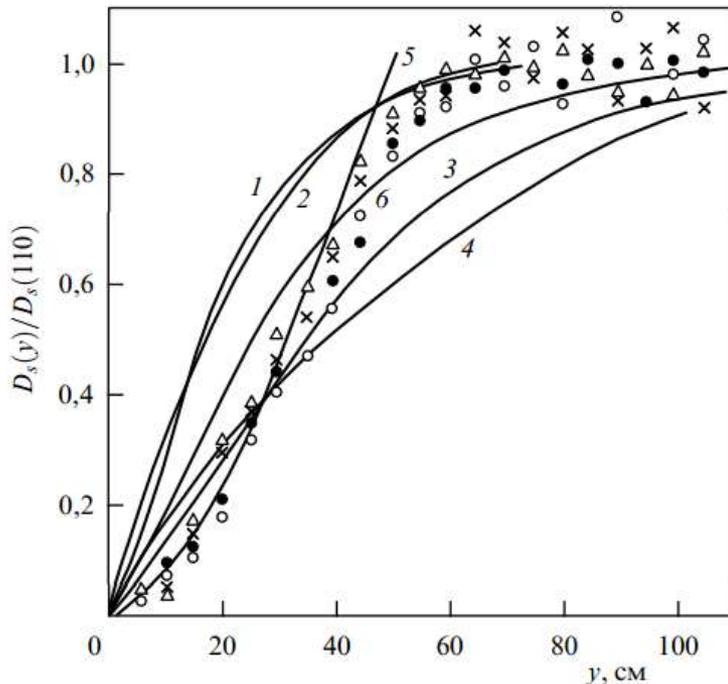
Приложения в оптике атмосферы

Исторически первая область применения систем адаптивной оптики – астрономические наблюдения через турбулентную атмосферу.

- 1950-е годы – зарождение идей адаптивной оптики (Линник, Бэбкок)
- 1960-е годы – развитие техники и технологий когерентной оптики (лазеры)
- 1970-е годы – появление первых быстродействующих оптических зеркал с изменяемой геометрией поверхности; теория обращения волнового фронта.
- 1977 год – первый оптический телескоп с компенсацией атмосферной турбулентности
- с 1980-х годов – активное внедрение адаптивных оптических систем

Приложения в оптике атмосферы

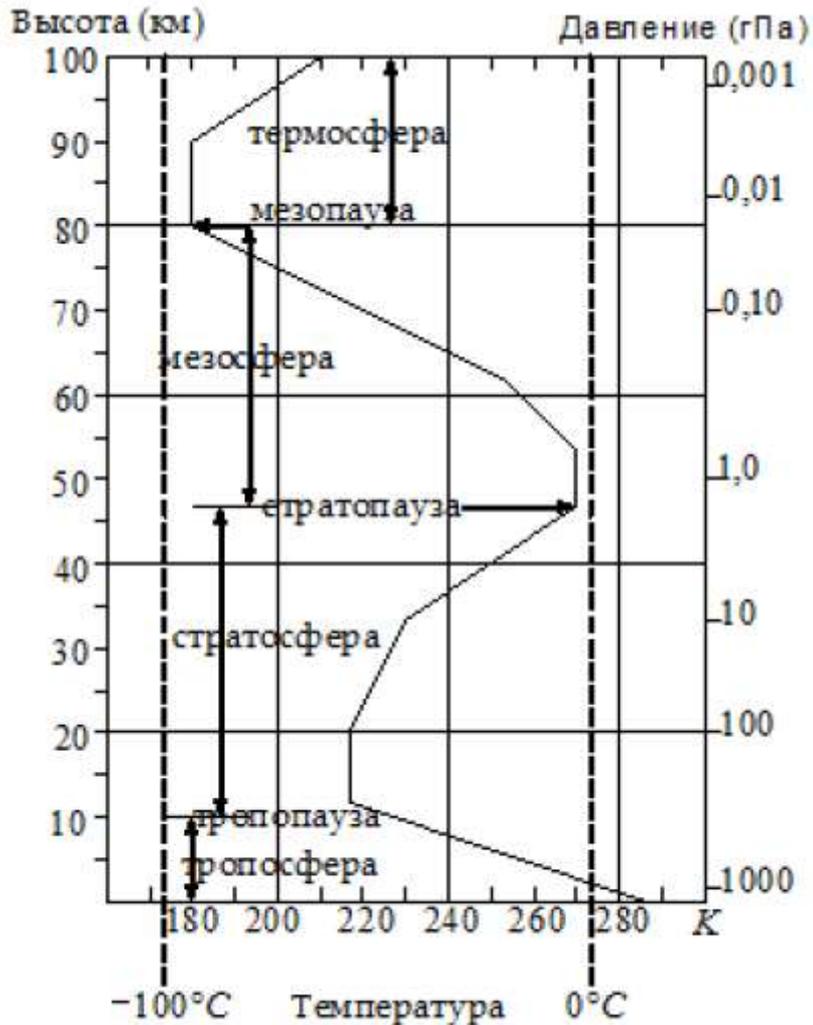
В основе проектирования систем адаптивной оптики для подобных задач лежит анализ флуктуаций показателя преломления, обусловленных турбулентностью атмосферы.



Структурная функция фазы оптической волны в турбулентной атмосфере:
1-4,6 – результаты расчётов для моделей спектра с конечным внешним масштабом,
5 – расчёт для модели спектра Колмогорова-Обухова,
символы обозначают экспериментальные данные.

По материалам: В.П.Лукин. Атмосферная адаптивная оптика. Успехи физических наук, т.173, №8 (2003), с.887-893

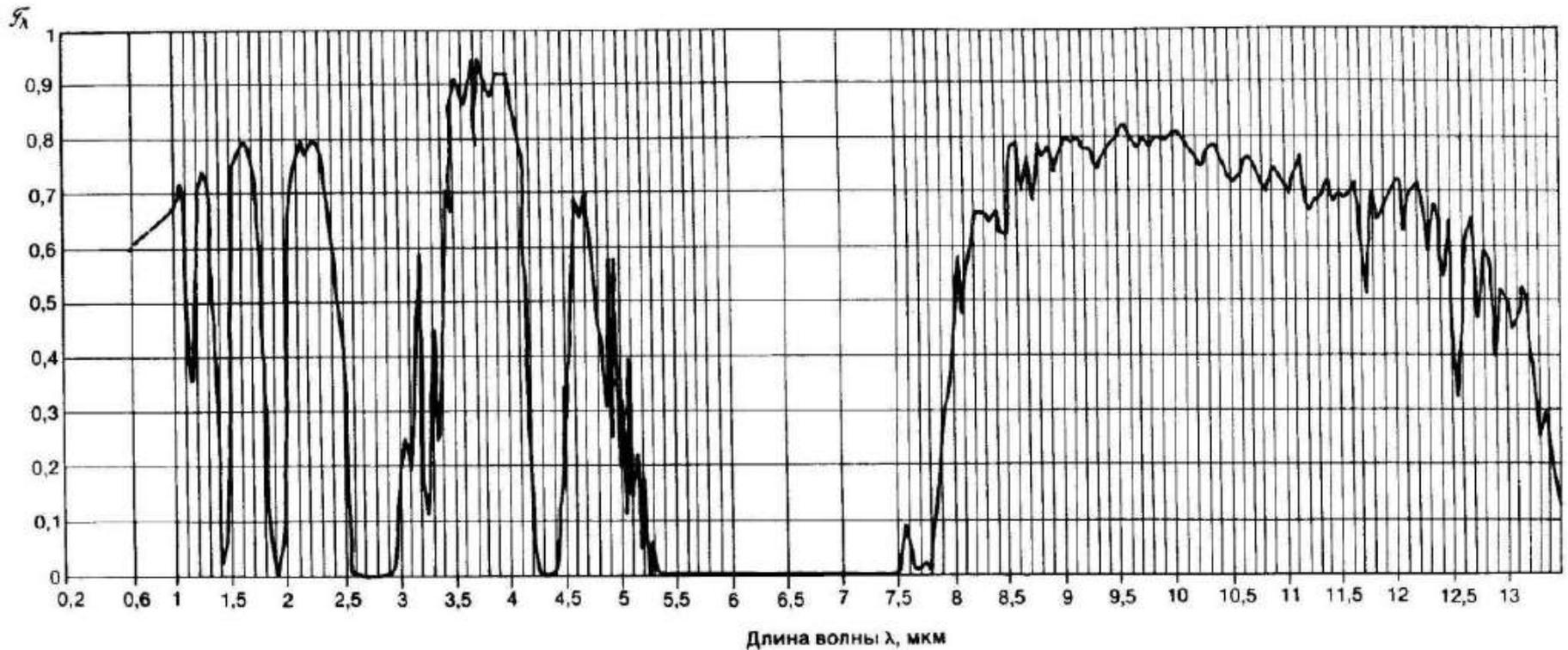
Приложения в оптике атмосферы



Вертикальное распределение температуры в атмосфере.

По материалам:
Е.В. Ермолаева, В.А. Зверев,
А.А. Филатов. Адаптивная
оптика. СПб: НИУ ИТМО,
2012. – 297 с.

Приложения в оптике атмосферы



Спектральный коэффициент пропускания атмосферы.

По материалам: Е.В. Ермолаева, В.А. Зверев, А.А. Филатов.
Адаптивная оптика. СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 297 с.

Приложения в оптике атмосферы

Воздушная масса постоянно находится в движении.

- Нагрев поверхности Земли солнечным излучением, что приводит к возникновению конвекционных потоков.
- Воздушные потоки могут быть ламинарными, носящими однородный характер, и турбулентными, т. е. включающими случайные неоднородности за счёт разнонаправленного движения воздуха внутри самих потоков.
- Объективным параметром, который позволяет отличать ламинарный поток от турбулентного, является число Рейнольдса (англ.: Reynolds number):

$$Re = v_{flow} l / \nu$$

v_{flow} – скорость потока

l – характерный размер элемента потока

ν – кинематическая вязкость жидкости

Приложения в оптике атмосферы

Если характерное значение Re превышает Re_c , поток такой жидкости является турбулентным.

Кинематическая вязкость атмосферного воздуха оценивается как $\nu \simeq 1.5 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. При характерной скорости воздушного потока $v_{flow} = 1 \text{ м/с}$ и характерном пространственном масштабе l от нескольких метров до километра число Рейнольдса для атмосферы принимает значения, превышающие 10^6 . Этого значения достаточно, чтобы считать атмосферные потоки преимущественно турбулентными.

Приложения в оптике атмосферы

Статистическая зависимость некоторой случайной переменной $\chi(\mathbf{r}; t)$ в двух точках пространства или в двух разных моментах времени.

$g_\chi(\mathbf{r}_1; \mathbf{r}_2) = \langle \chi(\mathbf{r}_1)\chi(\mathbf{r}_2) \rangle$ - корреляционная функция

$D_\chi(\mathbf{r}_1; \mathbf{r}_2) = \langle [\chi(\mathbf{r}_2) - \chi(\mathbf{r}_1)]^2 \rangle$ - структурная функция

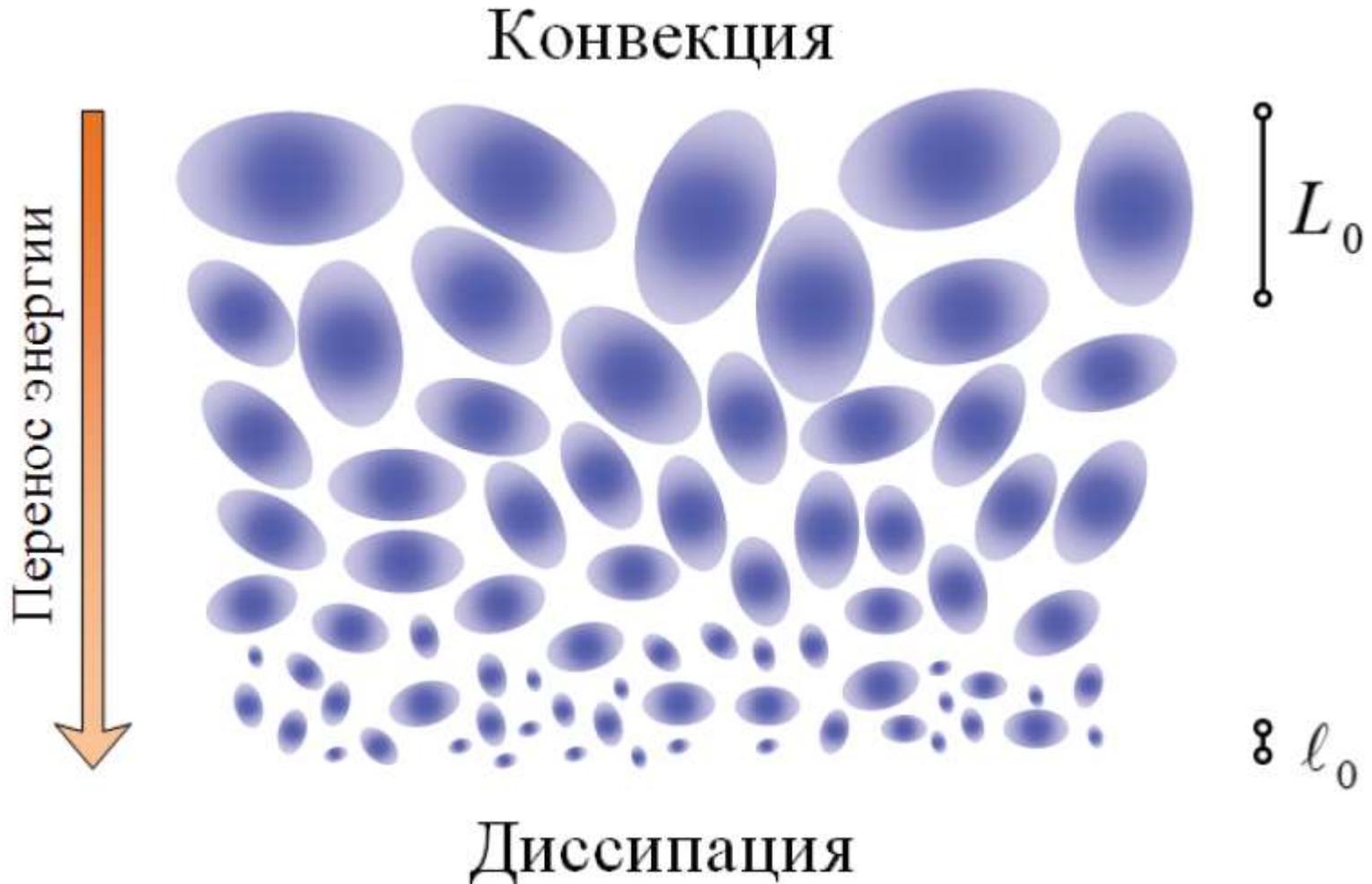
На малых масштабах t и r можно пренебречь зависимостью от времени. Тогда

$$D_\chi(R) = 2[g_\chi(0) - g_\chi(R)]$$

$\Phi_\chi(K) = \int g_\chi(R) \exp(2\pi i \mathbf{K} \mathbf{R}) d\mathbf{R}$ – спектральная плотность (\mathbf{K} – вектор обратного пространства)

Приложения в оптике атмосферы

Теория турбулентности Колмогорова.



Приложения в оптике атмосферы

Теория турбулентности Колмогорова.

- В ходе распространения воздушного потока образуются локальные неустойчивости воздушной массы, приводящие к формированию вихрей.
- Каждый вихрь описывается характерными размерами L_0 , существенно меньшими пространственного масштаба исходного потока.
- Под воздействием внешних сил большие вихри распадаются на всё более и более мелкие с характерными размерами ℓ .
- В результате энергия от больших вихрей передаётся малым, формируя так называемый энергетический каскад.

Приложения в оптике атмосферы

Теория турбулентности Колмогорова.

- Процесс дробления вихрей происходит до тех пор, пока их размеры ℓ не приблизятся к некоторому значению ℓ_0 , и пока число Рейнольдса Re не достигнет критического значения Re_c , когда вязкость начинает вносить существенный вклад в распространение потока.
- При этом происходит диссипация энергии (нагрев), и каскадная передача энергии прекращается.
- Область размеров вихрей от ℓ_0 до L_0 , в которой происходит каскадная передача энергии, называется инерционным интервалом.
- Применительно к атмосферной турбулентности малый масштаб ℓ_0 составляет единицы миллиметров, а большой L_0 — десятки метров.

Приложения в оптике атмосферы

Структурная функция флуктуаций скорости потока

$$D_v(R) = \langle (v_1 - v_2)^2 \rangle = C_v^2 R^{2/3}$$

Структурная функция флуктуаций температуры

$$D_T(R) = \langle (T_1 - T_2)^2 \rangle = C_T^2 R^{2/3}$$

Спектральная плотность температурных флуктуаций

$$\Phi_T(K) = \frac{0.033}{\sqrt{(2\pi)^3}} C_T^2 K^{-11/3}$$

Приложения в оптике атмосферы

Поскольку показатель преломления воздуха напрямую зависит от его температуры, можно применить к нему приведённые для температуры рассуждения.

Структурная функция изменения показателя преломления

$$D_n(R) = C_n^2 R^{2/3}$$

C_n^2 - структурная постоянная показателя преломления [$\text{м}^{-2/3}$].

В общем случае показатель преломления воздуха также зависит от его влажности, однако эта зависимость на фоне температурного вклада оказывается пренебрежимо малой.

Структурная постоянная показателя преломления лежит в основе предсказания искажений волнового фронта.

Приложения в оптике атмосферы

$$C_n^2 \simeq \left(79 \times 10^{-6} \frac{P}{T^2} \right) C_T^2 \quad (1)$$

P – давление воздуха [мбар]

T – температура [К]

$$\Phi_n(K) = \frac{0.033}{\sqrt{(2\pi)^3}} C_n^2 K^{-11/3} \quad (2)$$

Данные величины позволяют оценить флуктуации показателя преломления атмосферы, приводящие к искажениям волнового фронта. Размер этих флуктуаций должен быть учтён при проектировании корректоров волнового фронта (размах деформация адаптивного зеркала, быстродействие).

Приложения в оптике атмосферы

Практические методы определения зависимости $C_n^2(h)$

- Использование метеозонда для измерения температуры на разных высотах. Этот метод позволяет получить статистическую зависимость величины структурной постоянной температуры от высоты h . Зависимость структурной постоянной показателя преломления восстанавливается с использованием выражения (1).

Приложения в оптике атмосферы

Практические методы определения зависимости $C_n^2(h)$

- Измерение $C_n^2(h)$ по размытию дифракционной картины в фокусе линзы. В соответствии с данным методом на приёмник через толщу атмосферы посылается когерентное (лазерное) излучение, фокусируется и пропускается через медленно движущуюся узкую щель, ширина которой сравнима с длиной волны излучения. После этого измеряется ширина дифракционной картины в фокусе.

Приложения в оптике атмосферы

Практические методы определения зависимости $C_n^2(h)$

- Радиоакустическое зондирование атмосферы. В атмосферу посылается акустическая волна. Её характеристики восприимчивы к флуктуациям параметров атмосферы. Информацию об изменении параметров звуковой волны получают при помощи электромагнитных волн, также посылаемых в атмосферу и отражённых от неоднородностей воздуха, вызванных акустической волной.
- Анализ результатов детектирования прошедшего через атмосферу излучения одиночных и двойных звёзд при помощи сцинтилляторных сенсоров.

Приложения в оптике атмосферы

Теоретические модели оценки величины $C_n^2(h)$ структурной постоянной показателя преломления, разработанные на основе анализа экспериментальных данных:

- модель Хафнагеля-Волли;
- модель SLC Day;
- модель SLC Night;
- модель Гринвуда;
- теория турбулентности фон Кармана.

Приложения в оптике атмосферы

- модель Хафнагеля-Волли

$$C_n^2(h) = 5.94 \left(\frac{v_m}{27} \right)^2 (10^{-5.3} h)^{10} e^{-h/1000} + 2.7 \times 10^{-16} e^{-h/1500} + C_{n,0}^2 e^{6H_0/7 - h/100}$$

h – высота над уровнем моря

v_m – среднее квадратическое значение скоростей
воздушного потока в диапазоне высот от 5 до 20 км

H_0 – высота точки наблюдения над уровнем моря

$$C_{n,0}^2 = C_n^2(h = H_0)$$

Наиболее популярная модель, модифицированная с учётом эффектов, вызванных влиянием граничного воздушного слоя.

Приложения в оптике атмосферы

- модели SLC

Модели построены на основе статистической обработки результатов измерений показателя преломления в ночное (SLC Night) и дневное (SLC Day) время.

Поскольку измерения проводились в зоне субтропического климата, эта модель может быть неприменима в иных географических поясах.

SLC Day		SLC Night	
$C_n^2(h), \text{M}^{-2/3}$	h, M	$C_n^2(h), \text{M}^{-2/3}$	h, M
1.70×10^{-13}	(0, 18.5)	8.40×10^{-15}	(0, 18.5)
$3.13 \times 10^{-13} / h^{1.05}$	(18.5, 240)	$2.87 \times 10^{-12} / h^2$	(18.5, 110)
1.30×10^{-15}	(240, 880)	2.50×10^{-16}	(110, 1500)
$8.87 \times 10^{-7} / h^3$	(880, 7200)	$8.87 \times 10^{-7} / h^3$	(1500, 7200)
$2.00 \times 10^{-16} / h^{0.5}$	(7200, 20000)	$2.00 \times 10^{-16} / h^{0.5}$	(7200, 20000)

Приложения в оптике атмосферы

- модель Гринвуда

$$C_n^2(h) = (2.2 \times 10^{-13}(h + 10)^{-1.3} + 4.3 \times 10^{-17}) e^{-h/4000}$$

Все представленные модели справедливы при определении изменения величины $C_n^2(h)$ в вертикальном направлении. Если наблюдение происходит под некоторым углом к зениту θ , то высоту h следует заменить величиной $h/\cos(\theta)$.

Приложения в оптике атмосферы

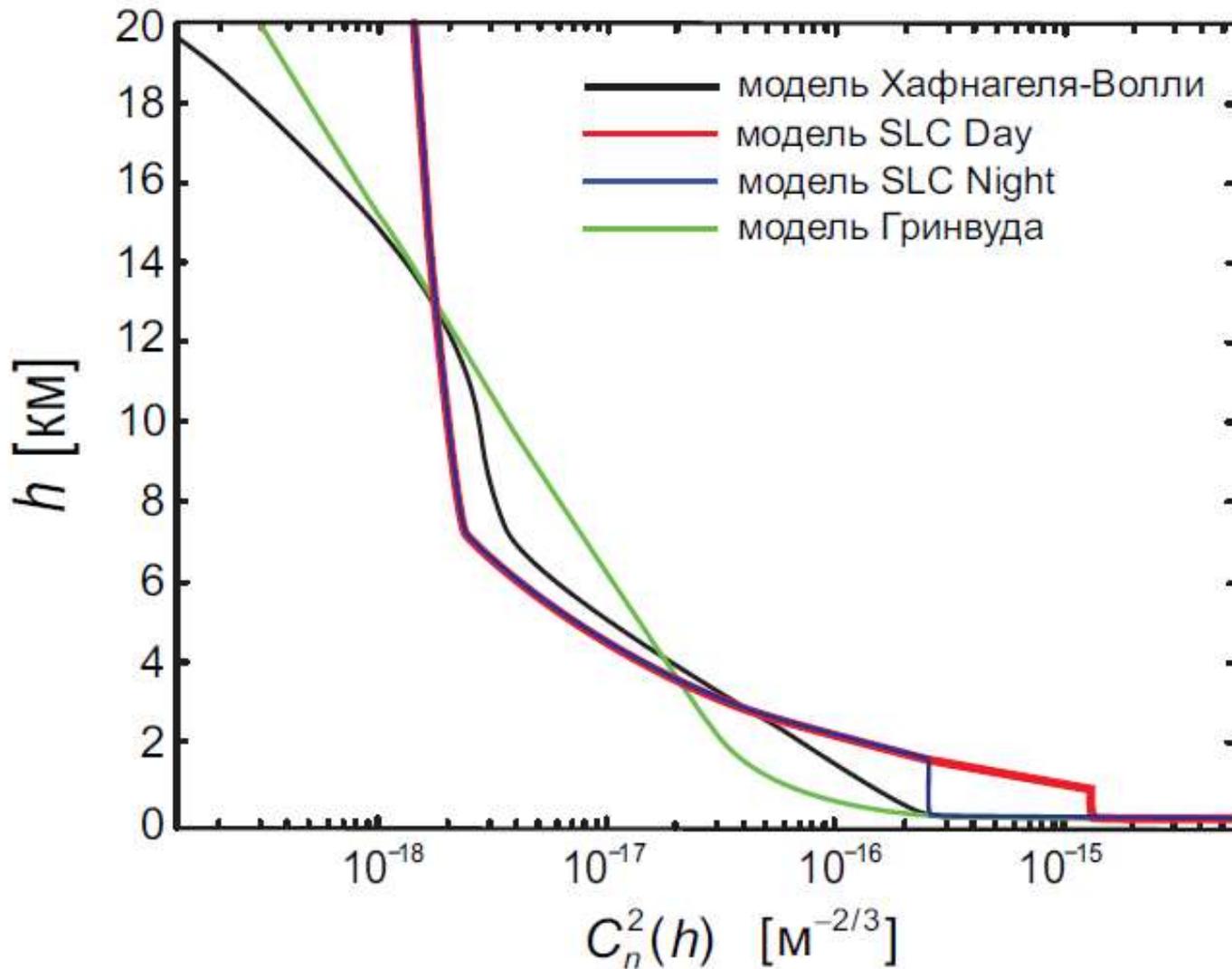
- теория турбулентности фон Кармана

Теория турбулентности Колмогорова справедлива, когда размер вихрей ℓ попадает в интервал от ℓ_0 до L_0 . Фон Карман разработал обобщённую модель атмосферной турбулентности, которая описывает флуктуации показателя преломления за пределом этого интервала.

$$\Phi_n(K) = \frac{0.033}{\sqrt{(2\pi)^3}} C_h^2 \left(K^{-11/3} + L_0^{11/3} \right) \exp \left[- \left(\frac{K \ell_0}{5.92} \right)^2 \right]$$

Данное выражение справедливо для вихрей любого размера ℓ . Таким образом, колмогоровский спектр является частным случаем спектра фон Кармана.

Приложения в оптике атмосферы



Приложения в оптических системах мощных лазеров



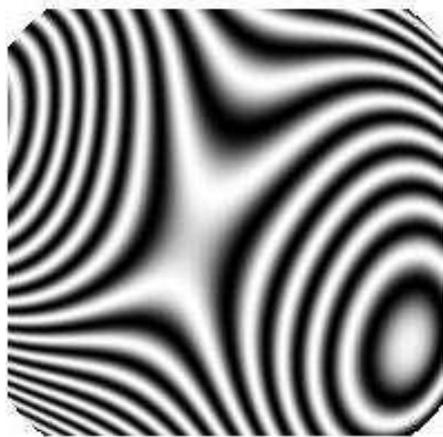
$$I \text{ (Вт/см}^2\text{)} = \frac{W \text{ (Дж)}}{\tau \text{ (с)} S \text{ (см}^2\text{)}} = \frac{10 \text{ Дж}}{10^{-14} \text{ с} \cdot 10^{-7} \text{ см}^2} = \frac{10^{15} \text{ Вт}}{10^{-7} \text{ см}^2} = 10^{22} \text{ Вт/см}^2$$

- Фемтосекундные длительности импульсов
- Петаваттные пиковые мощности

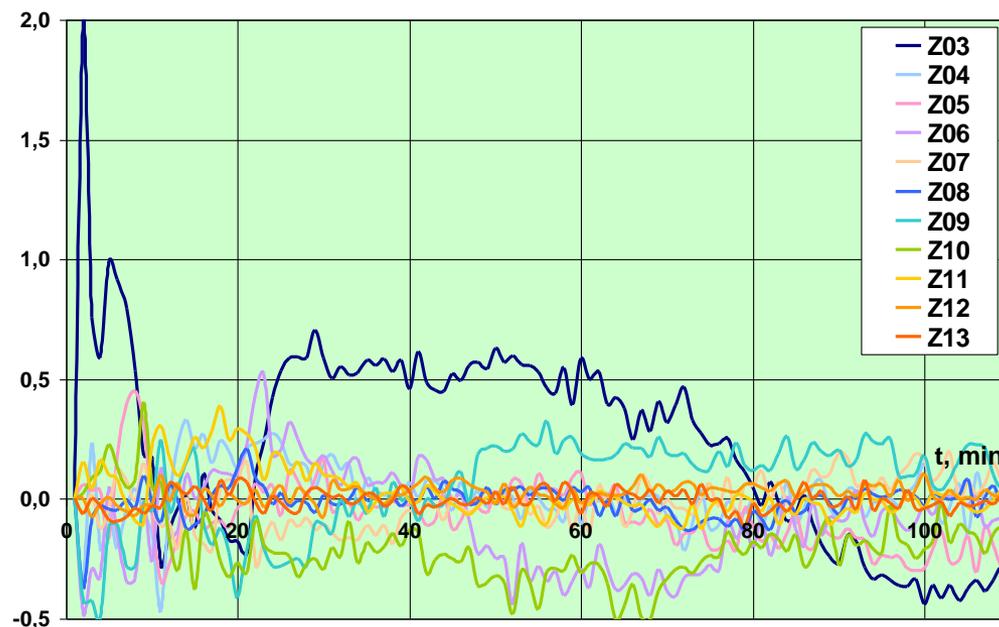
Приложения в оптических системах мощных лазеров

Проблемы качества излучения:

- статические aberrации активных элементов больших размеров: качество оптики, внутренние напряжения
- термодформация активных элементов
- неоднородность оптической накачки
- самофокусировка, нелинейные эффекты и др.



Статические aberrации активных элементов $P-V = 7 \text{ мкм}$
(без дефокусировки)



Динамика aberrаций, вызванные оптической накачкой и самовоздействием мощного лазерного излучения

Лазер Nd:стекло, $E = 3 \text{ кДж}$, $\tau \sim 1-3 \text{ нс}$,

1 импульс за 2 часа, размеры пучка $240 \times 240 \text{ мм}$

Приложения в оптических системах мощных лазеров

Основные задачи, которые могут быть решены методами и элементами адаптивной оптики:

1. Стабилизация и оптимизация различных параметров лазерного излучения
2. Улучшение качества изображения
3. Формирование и поддержание заданных характеристик лазерного излучения на мишени

Приложения в оптических системах мощных лазеров

Образцы адаптивных зеркал

100 mm glass mirror,
YAG laser, 80 J, 100 ps

120 mm Cu mirror,
50 kW CW CO₂ laser

40 mm Cu mirror,
5 kW CW CO₂ laser

40 mm Si mirror
with central hole

30 mm glass mirror, TiSa laser, 1.5 J, 100 ps

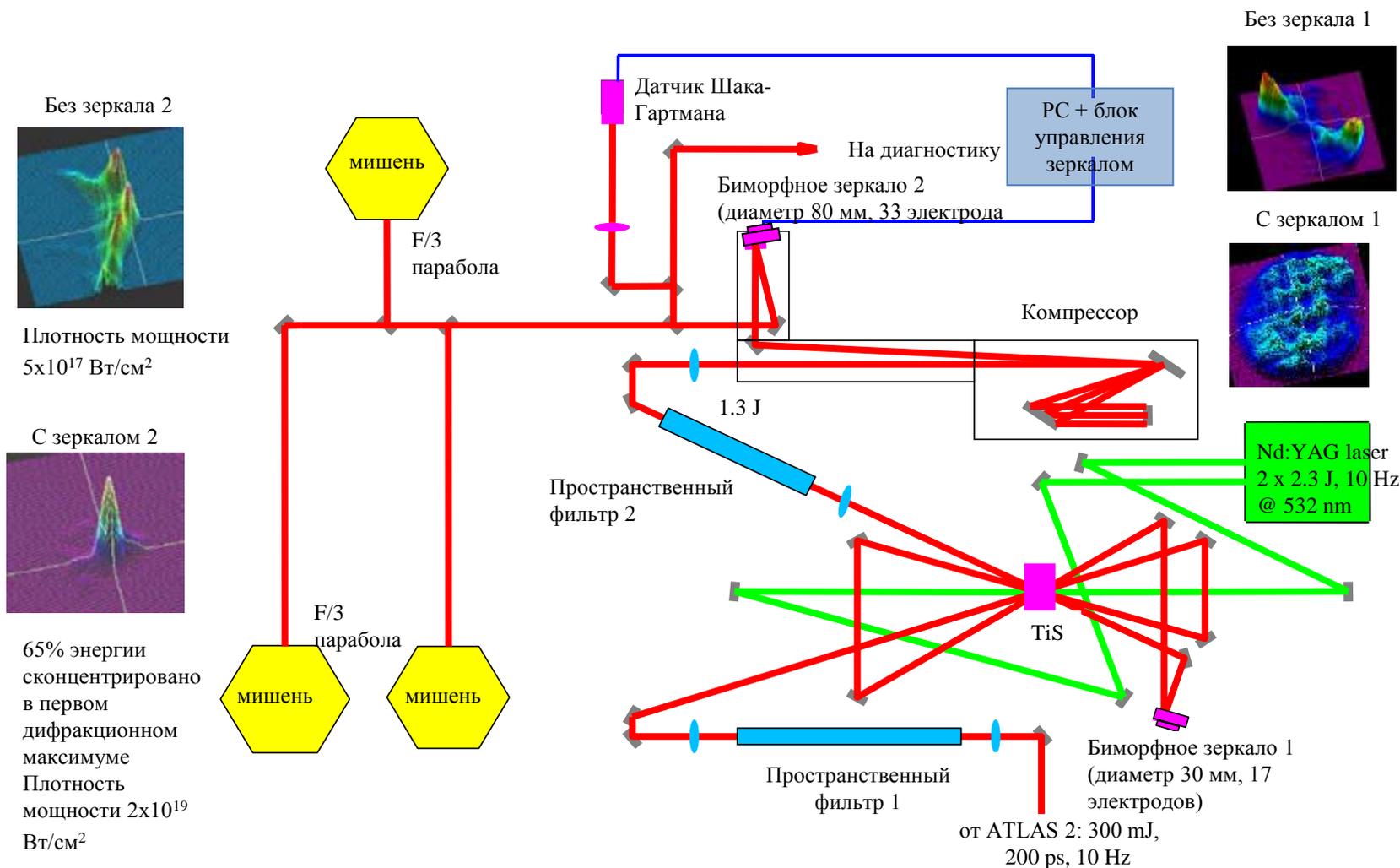
Ag coated glass mirror,
TiSa laser, 1.5 mJ, 5fs

40 mm pure
PZT mirror

Приложения в оптических системах мощных лазеров

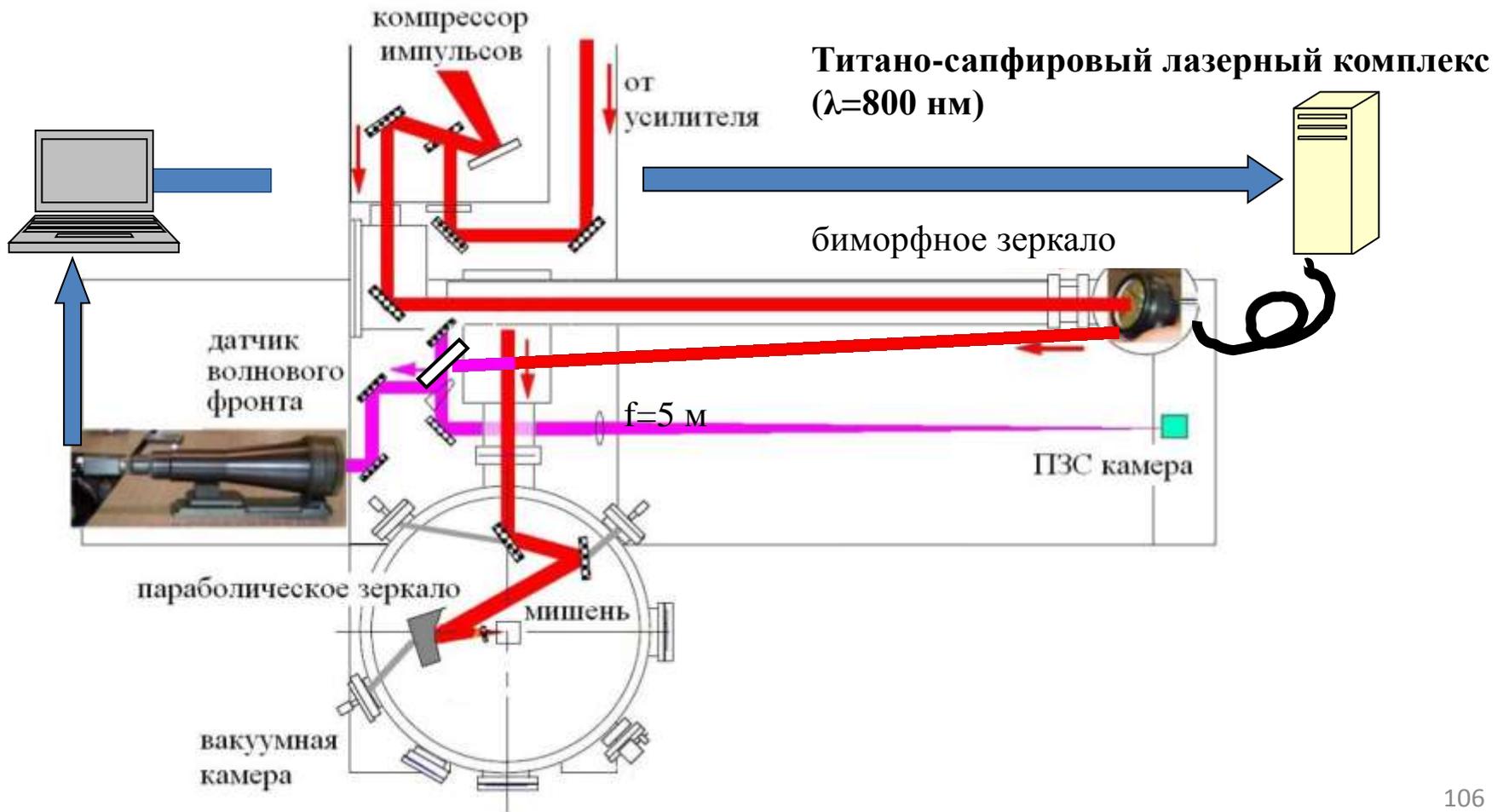
мощных лазеров

ATLAS 10 с использованием двух биморфных зеркал



Приложения в оптических системах мощных лазеров

Использование адаптивной оптической системы в JAERI, Япония



Приложения в оптических системах мощных лазеров

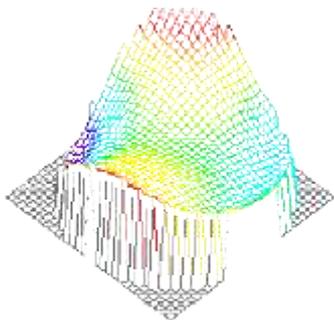
Использование адаптивной оптической системы в JAERI, Япония

Перед параболическим зеркалом (в
фокусе линзы $f=5$ м):

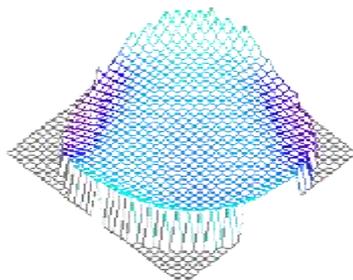


Величина aberrаций волнового фронта:

2,36 мкм

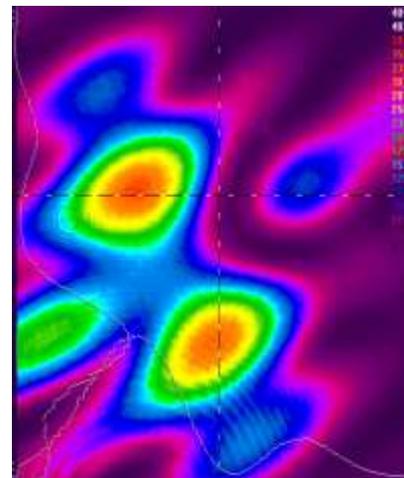


0,28 мкм



После параболического зеркала:

Плотность мощности в фокусе
параболического зеркала –
 $1,2 \times 10^{20} \text{ Вт/см}^2$
(до коррекции $2,6 \times 10^{19} \text{ Вт/см}^2$)



Другие применения систем адаптивной оптики

- офтальмология
- микроскопия
- метрология и прецизионные оптические измерения
- промышленные лазерные технологии
- системы лазерного наведения и целеуказания
- дистанционное зондирование

Направления исследований

- повышение быстродействия корректоров волнового фронта
- разработка новых алгоритмов управления адаптивными оптическими системами
- разработка новых типов деформируемых зеркал
- расширение применения систем адаптивной оптики

Рекомендуемые источники

1. Абрамочкин, Евгений Григорьевич. Современная оптика гауссовых пучков : [научное издание] / Е. Г. Абрамочкин, В. Г. Волостников .— Москва : Физматлит, 2010 .— 184 с. : ил. — Библиогр.: с. 180-184.
2. Шанин О.И. Адаптивные оптические системы коррекции наклонов. Резонансная адаптивная оптика. – М.: Техносфера, 2013. – 296с.
3. Ермолаева Е.В., Зверев В.А., Филатов А.А. Адаптивная оптика. // Учебное пособие. СПб: ИТМО, 2012.
4. Больбасова Л.А. Адаптивная коррекция атмосферных искажений оптических изображений на основе искусственного опорного источника [Электронный ресурс]/ Больбасова Л.А., Лукин В.П.— Электрон. текстовые данные.— М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012.— 126 с.
5. Ф.Ю.Канев, В.П.Лукин. Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования.// Изд. Института оптики атмосферы СО РАН, 250 с., 2005.
6. Воронцов М.А., Кудряшов А.В., Шмальгаузен В.И. Гибкие зеркала для адаптивных систем атмосферной оптики. Теоретический анализ.// Изв. вузов: Радиофизика. - Т. 27. - N 11. -С. 1419-1430.
7. Ю.В.Шелдакова, А.В.Кудряшов, А.Л.Рукосуев, Т.Ю.Черезова, Использование гибридного алгоритма управления биморфным зеркалом для фокусировки светового излучения.// *Оптика атмосферы и океана*, том 20, № 4, сс.380-383 (2007).