

А.Н. Алиханов, Е.А. Берченко, В.Ю. Киселев, В.Н. Кулешов, С.Н. Ларин,
Э.А. Нарусбек, Б.В. Прилепский, В.Г. Сон, А.С. Филатов

Адаптивные оптические системы апертурного зондирования на основе датчиков волнового фронта с пространственным разделением каналов управления

ГУДП ГП «НПО Астрофизика», ОКБ «СОЛТО» г. Москва

Поступила в редакцию 26.08.2004 г.

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований адаптивных оптических систем на основе датчиков волнового фронта с пространственным разделением каналов управления. Главная особенность таких систем состоит в том, что сигналы, полученные каждым фотодетектором, могут непосредственно использоваться для контроля актюаторов гибкого зеркала. Для этого применяется фазовая модуляция световой волны на той же частоте, что и весь волновой фронт. Многоэлементный фотодетектор располагается в плоскости, оптически сопряженной с фазовым корректором оптической системы. Поэтому такие системы в определенной степени аналогичны системам апертурного зондирования.

Теоретический анализ показал, что возможны два варианта адаптивных оптических систем на основе датчиков волнового фронта с пространственным разделением каналов управления: первый – с фазовой модуляцией непосредственно в плоскости корректора, и второй – с фазовой модуляцией в фокальной плоскости объектива датчика волнового фронта. В обоих случаях сигнал от фотоприемника равен нулю, если локальная кривизна волнового фронта в соответствующей области также равняется нулю. Такие датчики волнового фронта часто называются датчиками кривизны.

Показано, что стабильность адаптивных оптических систем на основе датчика волнового фронта с пространственным разделением каналов управления и модуляцией фазы волны в плоскости корректора сильно зависит от углов наклона волнового фронта. Но их чувствительность (при равных фокальных расстояниях) значительно выше, чем у адаптивных оптических систем с фазовой модуляцией в фокальной плоскости объектива датчика волнового фронта.

Дано описание лабораторной установки, используемой для экспериментального исследования адаптивных оптических систем на основе датчиков волнового фронта с пространственным разделением каналов управления. В этой установке мы использовали гибкие зеркала с 7 и 37 пьезоактюаторами специального типа. Одной из особенностей пьезоактюаторов было существование двух секций – секции управления и секции модуляции. Для изучения работы адаптивной оптической системы с фазовой модуляцией в фокальной плоскости объектива датчика волнового фронта использовались специальные конструкции фазовых транспарантов.

Введение

В работе [1] описана адаптивная оптическая система, в которой использован датчик волнового фронта, названный в этой работе оптическим процессором. Ключевым элементом этого датчика волнового фронта является гибкое зеркало с переменной кривизной, вершина которого располагается в фокальной плоскости объектива датчика. Кривизна зеркала меняется во времени, например, по гармоническому закону. Сигнал с многоэлементного приемника света после синхронного детектирования и усиления прямо используется для управления корректором адаптивной оптической системы. При этом корректор и приемник расположены в оптически сопряженных плоскостях и геометрия расположения чувствительных площадок элементов приемника света повторяет (с соответствующим увеличением) геометрию размещения актюаторов по

поверхности корректора. Адаптивная оптическая система аналогичного принципа действия описана в работе [2].

В работе [3] был проведен анализ, который показал, что метод измерения искажений волнового фронта в датчиках адаптивных оптических систем, описанных в работах [1, 2], можно считать одним из вариантов метода апертурного зондирования, который в 70-е гг. прошлого века использовал О'Мира для коррекции атмосферных искажений в многоканальных когерентных передающих оптических системах [4].

Основное отличие систем [1, 2] от ранних систем апертурного зондирования состоит в том, что последние использовали многочастотную фазовую модуляцию поля световой волны во входном зрачке. Сигнал измерялся расположенным в фокусе приемного объектива одноэлементным приемником с чувствительной площадкой, примерно соответствующей

размеру дифракционной точки, а для выделения сигнала управления в соответствующем канале использовались радиотехнические методы.

В работе [3] отмечается, что возможны два варианта построения систем апертурного зондирования, использующих пространственное разделение каналов управления. В первом варианте модуляция фазы световой волны (на одной частоте) в каждой точке волнового фронта создается, как и в ранних системах апертурного зондирования, непосредственно на корректоре (во входном зрачке датчика). Во втором варианте модуляция фазы световой волны создается в выходном зрачке датчика (в плоскости приемников) изменением параметров транспаранта, установленного в фокальной плоскости объектива датчика (зеркало с переменной кривизной в работах [1, 2]).

В данной статье мы приведем основные положения работы [3], на основе которых можно сделать вывод о родстве ранних систем апертурного зондирования и систем, описанных в работах [1, 2].

Датчики волнового фронта для систем апертурного зондирования с модуляцией на корректоре назовем датчиками типа I, а с модуляцией фазы в плоскости, в которой установлены чувствительные площадки приемников, — датчиками типа II.

1. Датчики волнового фронта для адаптивных оптических систем апертурного зондирования с пространственным разделением каналов

На рис. 1 приведена обобщенная оптическая схема датчика волнового фронта для адаптивных оптических систем апертурного зондирования с пространственным разделением каналов. Будем считать, что корректор волнового фронта находится во входном зрачке оптической системы датчика.

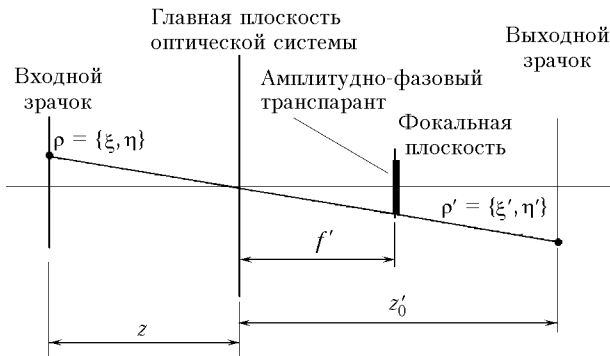


Рис. 1

Точке $\rho\{\xi, \eta\}$ входного зрачка соответствует точка $\rho'\{\xi', \eta'\}$ в выходном зрачке, где помещен многоэлементный приемник света. Введем в фокальной плоскости свою систему координат $\mathbf{r}(x, y)$. Положим, что в фокальной плоскости оптической систе-

мы датчика волнового фронта установлен амплитудно-фазовый фильтр с функцией пропускания $T(\mathbf{r})$.

Распределение поля световой волны в выходном зрачке для точечного источника света, находящегося на бесконечности, с точностью до несущественных фазовых множителей может быть рассчитано по формуле

$$E_{\text{вых}}(\rho') = \frac{\beta}{\lambda^2 f'^2} \int_{\rho} E_{\text{вх}}(\rho) H(\rho + \beta\rho') d^2\rho,$$

где λ — длина волны излучения; f' — эквивалентное фокусное расстояние оптической системы объектива датчика волнового фронта; $1/\beta$ — увеличение оптической системы датчика волнового фронта в зрачках; $H(\rho + \beta\rho')$ — передаточная функция датчика волнового фронта

$$H(\rho + \beta\rho') = \int_{\mathbf{r}} T(\mathbf{r}) \exp\left[-\frac{ik}{f'} \mathbf{r}(\rho + \beta\rho')\right] d^2\mathbf{r},$$

$k = 2\pi/\lambda$ — волновое число.

В работе [5] был проведен анализ особенностей сигналов на частоте модуляции в датчиках волнового фронта с пространственным разделением каналов типов I и II с учетом ошибок юстировки оптики этих датчиков. Анализ проводился для случая, когда поле световой волны во входном зрачке задано в виде

$$E_{\text{вх}}(\rho) = \exp[ik\Delta(\rho)];$$

$$\Delta(\rho) = \begin{cases} -\alpha_x(\xi - \xi_0) - \alpha_y(\eta - \eta_0) + \\ + \Delta \left(1 - \frac{(\xi - \xi_0)^2 + (\eta - \eta_0)^2}{\rho_0^2} \right) \end{cases} \text{ при } \rho \leq \rho_0,$$

$$0 \text{ при } \rho > \rho_0,$$

где $\alpha = \{\alpha_x, \alpha_y\}$ — наклоны волнового фронта; ρ_0 — пространственный масштаб искажений волнового фронта; Δ — максимальная деформация волнового фронта в точке с координатами $\rho_0 = \{\xi_0, \eta_0\}$. Кривизна волнового фронта q связана с максимальной деформацией Δ и пространственным масштабом ρ_0 соотношением $q = 2\Delta/(\rho_0^2)$. При этом предполагалось, что чувствительные площадки приемников света адаптивной системы находятся далеко от границы выходного зрачка.

Для датчиков типа I прозрачность транспаранта определялась как

$$T(\mathbf{r}) = \exp\left[-r^2/(2r_0^2)\right],$$

и $q \rightarrow q(\Delta) + qm \sin(\omega t)$. Прозрачность транспаранта для датчиков типа II задавалась в виде

$$T(\mathbf{r}, t) = \exp\left(ikqm(t)r^2/2\right),$$

где $qm(t) = qm \sin(\omega t)$.

Особенности сигналов, несущих информацию об искажениях волнового фронта, будем исследовать, изучая поведение функции

$$S(q) = \frac{I_1(q)}{I(0,0)} \cdot 100\%,$$

где $I(q,t)$ — интенсивность излучения на чувствительных площадках приемников света в зависимости от кривизны волнового фронта q ; $I_1(q)$ — амплитуда первой гармоники в спектре функции $I(q,t)$.

В работе [5] показано, что сигналам на частоте модуляции с выхода датчиков типа I присущи следующие особенности.

1. Если центр чувствительной площадки фотоприемника совпадает с изображением точки ρ_0 , то при $q(\Delta) = 0$ сигнал равен нулю вне зависимости от наклона волнового фронта.

2. Если центр чувствительной площадки фотоприемника не совпадает с изображением точки ρ_0 , то при наличии наклона волнового фронта и $q(\Delta) = 0$ сигнал отличается от нуля. Его величина зависит от ошибок союстировки приемников и актюаторов гибкого зеркала, от наклона волнового фронта и от амплитуды модуляции q . Сигнал равен нулю, если наклоны волнового фронта равны нулю.

3. Если центр чувствительной площадки приемника совпадает с изображением точки ρ_0 , то крутизна S зависимости величины сигнала на частоте модуляции от локальной кривизны волнового фронта $q(\Delta)$ зависит от наклона волнового фронта. При этом изменение величины наклона может привести к изменению знака крутизны S .

В общем случае знак крутизны S определяется значением величины смещения αs , которая определяется соотношением

$$\alpha s = \sqrt{(\delta r q)^2 + 2\delta r q \alpha \cos \Psi + \alpha^2},$$

где δr — смещение центра фотоприемника от точки с координатами $\{\xi_0, \eta_0\}$; Ψ — угол между векторами

$$\{\delta \xi, \delta \eta\} = \{\xi + \beta \xi', \eta + \beta \eta'\}$$

и α . Изменение знака крутизны приводит к структурной неустойчивости замкнутого контура адаптивной системы. Для того чтобы система была устойчива, необходимо выполнить условия

$$\alpha s < \frac{r_0}{f'} \sqrt{1 + \left(\frac{f' q(\Delta)}{k r_0^2} \right)^2} \approx \frac{r_0}{f'}$$

Для адаптивных систем с датчиками типа II сигнал с выхода приемника для внутренних точек выходного зрачка не зависит от наклонов волнового фронта и определяется только локальной кривизной. Однако для получения сигналов на частоте модуляции, сопоставимых по величине с сигналами, регистрируемыми с выхода датчиков типа I (при равных фокусных расстояниях объективов),

требуются значительно большие значения амплитуд модуляции $qm(t)$ (~ в 100 раз).

2. Фазовый транспарант Ньютона

Устройство датчика волнового фронта с транспарантом Ньютона показано на рис. 2. В фокальной плоскости объектива 1 датчика установлена плосковыпуклая линза 2 с прижатой к ее вершине плоскопараллельной пластиной 3. Ко второй поверхности плоскопараллельной пластины приклеена пластина 4 из пьезокерамики (униморф) с отверстием в центре. Размер отверстия значительно больше размеров дифракционной точки и составляет единицы миллиметров. На пьезокерамическую пластину подается модулирующее напряжение. Параметры линзы 2 таковы, что она строит изображение выходного зрачка (гибкого зеркала адаптивной системы) в плоскости 5, в которой расположены чувствительные площадки фотоприемников датчика.

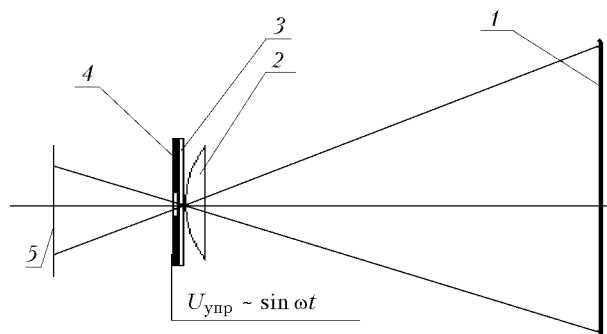


Рис. 2. Управляемый фазовый транспарант Ньютона

Рабочий участок поверхности транспаранта Ньютона — небольшая область контакта пластины с линзой размерами порядка 100–200 мкм при параметрах оптики датчика волнового фронта, приведенных в следующем разделе. Точного количественного описания изменений оптического сигнала при прохождении этой области мы не имеем. Однако для систем апертурного зондирования, в которых при компенсации искажений волнового фронта сигналы на частоте модуляции обнаруживаются и по ним не проводится реконструкция волнового фронта, в таком описании нет необходимости.

Качественный анализ работы этого транспаранта мы проводили, считая, что в рабочей области транспаранта Ньютона оптическая сила «сэндвича» линза — плоскопараллельная пластина меняется по закону

$$q(r) = q_c + (q_0 - q_c) \left[1 - r^{2p} \exp\left(-\frac{r^2}{2r_0^2}\right) \right],$$

где r — расстояние от вершины линзы до рассматриваемой точки в фокальной плоскости объектива; r_0 — параметр, характеризующий размер области контакта линзы с плоскопараллельной пластиной; q_c — оптическая сила транспаранта в центре области контакта; p — параметр, определяющий свойства

модели транспаранта Ньютона; q_0 — оптическая сила линзы. Так как линза с оптической силой q_0 совместно с объективом датчика переносят с заданным увеличением поверхность плоскости гибкого зеркала корректора на плоскость, в которой расположены чувствительные площадки приемников, то можно считать, что прозрачность транспаранта Ньютона для принятой модели описывается формулой

$$T(r) = \exp \left[-i \frac{k \delta q r^{2(p+1)}}{2} \exp \left(-\frac{r^2}{2r_0^2} \right) \right],$$

где $\delta q = q_0 - q_c$. При подаче на униформф транспаранта Ньютона модулирующего напряжения в общем случае во времени могут меняться оба параметра (r_0 и δq) транспаранта. При этом получаемый вид кривых для характеристики $S(q)$ весьма разнообразен.

Наблюдаемое экспериментально поведение адаптивной системы с таким датчиком волнового фронта качественно может быть объяснено, когда характеристика $S(q)$ имеет вид, показанный на рис. 3. Нижняя кривая на этом рисунке детализирует поведение функции $S(q)$ в области нулевых значений локальной кривизны волнового фронта в области отдельного приемника, а верхняя показывает ее в большом диапазоне изменения локальной кривизны. Видно, что в области нулевых значений локальной кривизны сигналы на частоте модуляции равны нулю, при $q = 0$ имеем точку перегиба кривой. Справа и слева от нулевой локальной кривизны имеются две точки, для которых $S(q) = 0$. При больших искажениях волнового фронта $S(q) \rightarrow 0$.

На фотографиях транспаранта Ньютона (рис. 4), полученных при его подсвете рассеянным светом,

видна характерная система колец интерференционной картины. Различные фотографии соответствуют различным напряжениям, поданным на транспарант.

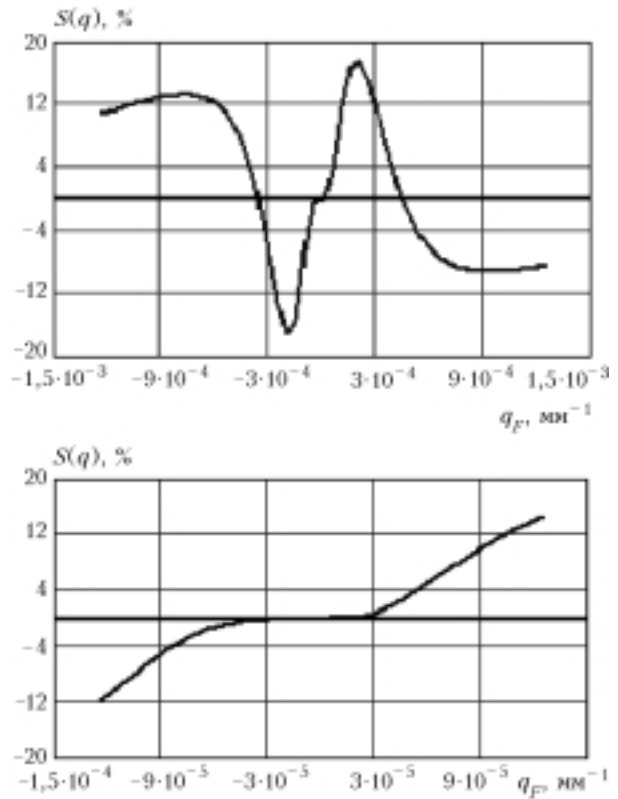


Рис. 3. Характерные модельные модуляционные характеристики транспаранта Ньютона

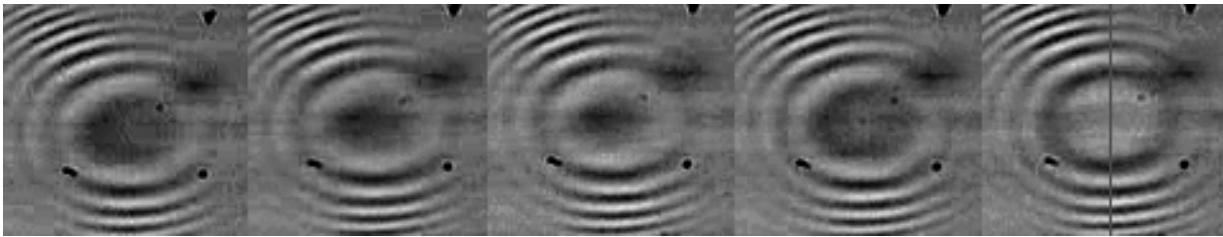


Рис. 4

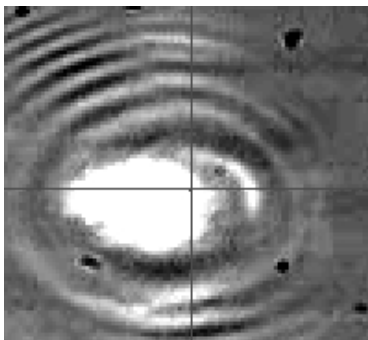


Рис. 5

Видно, что при изменении напряжения вид центральной области изменяется.

На рис. 5 дано изображение транспаранта Ньютона при подсвете двумя источниками света. Один из них — рассеянный пучок, дающий систему интерференционных колец Ньютона, а второй соответствует излучению газового лазера, сфокусированному в зону контакта плоскопараллельной пластины с линзой.

Подсвет транспаранта сфокусированным лазерным излучением не создает характерной для подсвета рассеянным светом системы интерференционных полос.

3. Лабораторная установка для исследования адаптивных оптических систем апертурного зондирования с пространственным разделением каналов

На рис. 6 показана схема лабораторной установки, на которой проводились исследования адаптивных оптических систем апертурного зондирования на основе датчиков волнового фронта с пространственным разделением каналов. На рис. 7 приведен ее общий вид.

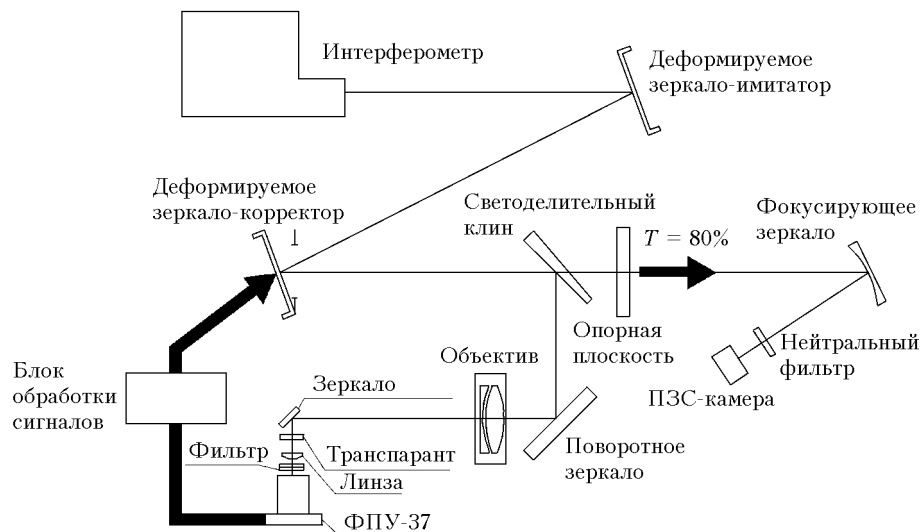


Рис. 6. Схема лабораторной установки для исследования адаптивных оптических систем апертурного зондирования с пространственным разделением каналов

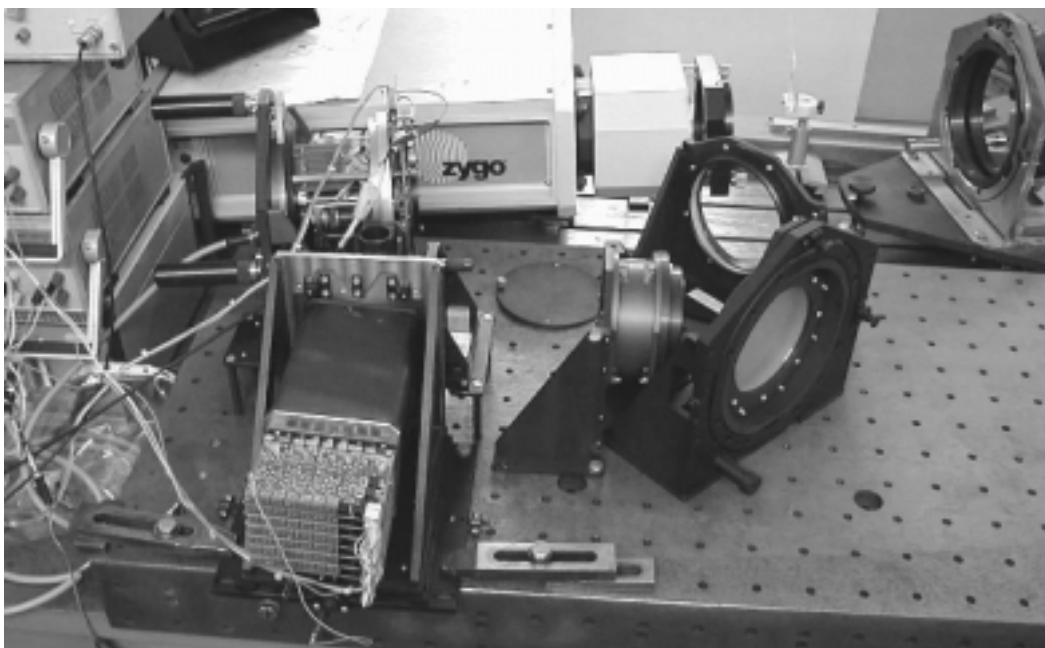


Рис. 7. Общий вид лабораторной установки

Источником коллимированного светового пучка служил стандартный интерферометр Mark IV. Световой пучок диаметром 80 мм с помощью биморфного деформируемого зеркала направлялся на датчик волнового фронта.

Биморфное деформируемое зеркало (рис. 8), имеющее 32 активные зоны на световом диаметре 180 мм, использовалось в лабораторной установке в качестве имитатора атмосферных искажений волнового фронта светового пучка. Мембрана этого зеркала имеет толщину 2,5 мм и выполнена из кремния. С помощью зеркала-имитатора создавались как статические, так и динамические искажения, компенсируемые затем адаптивной системой.



Рис. 8. Биморфное зеркало для имитации искажений волнового фронта

Отражающая плоскость деформируемого зеркала-корректора (рис. 9) размещается во входном зрачке оптики датчика за имитатором искажений. Нормаль к зеркалу с оптической осью датчика составляет угол, равный 10° .



Рис. 9. Гибкое зеркало-корректор

Зеркало-корректор представляет собой кремниевую мембрану толщиной 2 мм, которая деформируется 37 отдельными столбчатыми пьезоактюаторами (рис. 10).

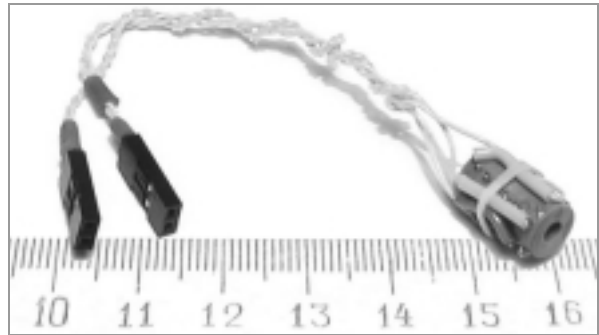


Рис. 10. Столбчатый пьезоактюатор гибкого зеркала-корректора

Для проведения экспериментов с адаптивными оптическими системами апертурного зондирования типа I каждый актюатор выполнялся в виде двух секций (большой и малой), которые могут управляться раздельно. Большая по длине секция используется для коррекции искажений волнового фронта, вторая секция пьезотолкателя – для модуляции фазы волнового фронта. Геометрия размещения толкателей по поверхности зеркала приведена на рис. 11.

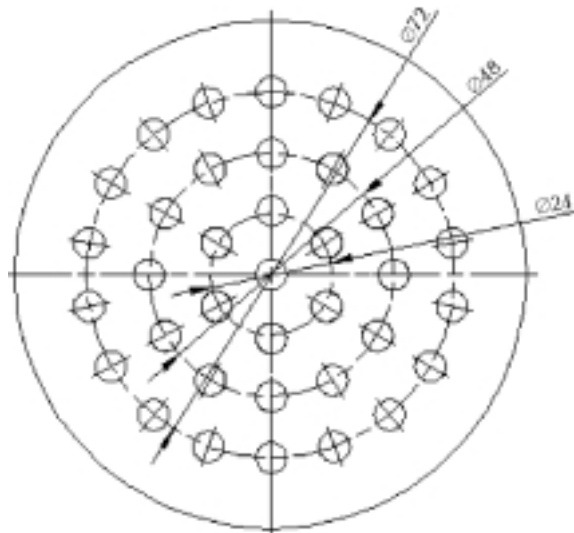


Рис. 11. Геометрия размещения толкателей по поверхности гибкого зеркала-корректора

В таблице приведены параметры гибких зеркал для коррекции и имитации искажений волнового фронта.

Параметр	Для коррекции	Для имитации
Размер световой апертуры, мм	Ø 80	Ø 180
Материал мембраны	Монокристаллический кремний	Монокристаллический кремний
Толщина мембраны, мм	2	2,5
Геометрия расположения актюаторов	3 кольца на Ø 72 мм	3 кольца на Ø 160 мм
Тип актюаторов	PZT	PZT
Максимальная локальная деформация по большой секции ($U_{\text{упр}} = \pm 200$ В), мкм	± 2	—
Максимальная локальная деформация по малой секции ($U_{\text{упр}} = \pm 20$ В), мкм	$\pm 0,05$	—
Максимальная локальная деформация биморфа ($U_{\text{упр}} = \pm 200$ В), мкм	—	2,5
Частота первого резонанса, кГц	~1	—
Максимальная рабочая частота, Гц	80	30

Свет, отраженный корректором, поступает на светоделительный клин, который 80% излучения пропускает к длиннофокусному зеркалу, формирующему распределение света для контроля качества работы адаптивной системы, а 20% отражает на поворотное зеркало датчика волнового фронта (см. рис. 6).

За поворотным зеркалом располагается объектив, перед фокальной плоскостью которого установлено плоское зеркало, направляющее свет на транспарант датчика волнового фронта. Линза, расположенная за транспарантом, строит изображение плоскости входного зрачка (выходной зрачок) с заданным увеличением. В плоскости выходного зрачка располагаются входные торцы оптических волокон блока, входящего в состав фотоприемного устройства ФПУ-37. На выходе каждого моноволоконка установлен приемник фотоприемной матрицы.

Для уменьшения потерь света из-за неплотного заполнения волокнами выходного зрачка сердцевина волокон диаметром 600 мкм изготовлена из стекла с высоким показателем преломления, а стеклянная оболочка волокна имеет толщину порядка 10 мкм. На рис. 12 приведены общий вид конструкции волоконного блока и вид волоконного блока при прохождении через него излучения лазера.

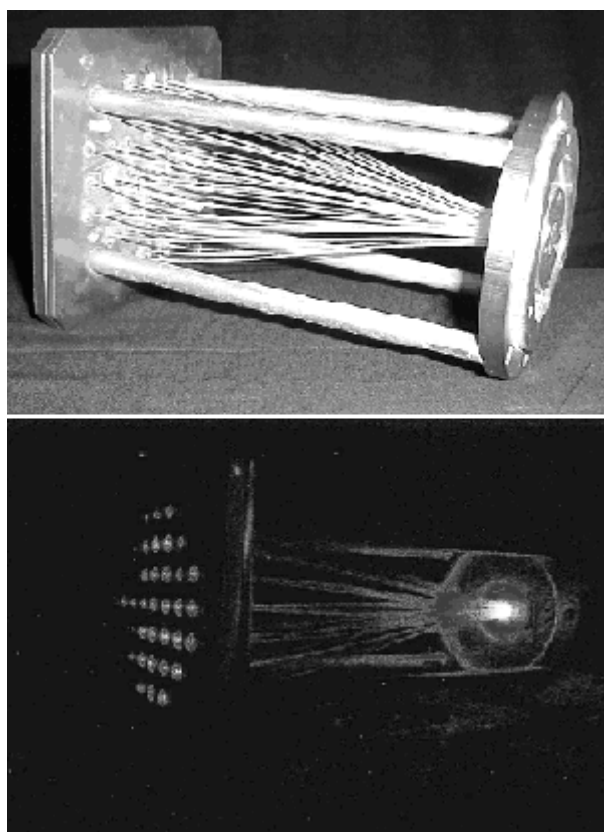


Рис. 12. Оптический волоконный блок датчика волнового фронта

С выходов приемников сигналы проходят через узкополосные фильтры, настроенные на частоту модуляции $f = 2$ кГц. Из отфильтрованных сигна-

лов методом синхронного детектирования выделяются полезные сигналы, содержащие информацию о возмущениях фазы волнового фронта в каждой из 37 зон управления. После интегрирования эти сигналы усиливаются высоковольтными усилителями и подаются на соответствующие толкатели корректора таким образом, чтобы в замкнутой цепи осуществлялась отрицательная обратная связь. Результатом совместного действия корректора и системы управления является исправление волнового фронта рабочего излучения.

Качество светового пучка при проведении экспериментов контролировалось двумя методами. Во-первых, ПЗС-камерой регистрировалось распределение света в фокальной плоскости длиннофокусного ($F = 6,25$ м) зеркала. Во-вторых, регистрировалась интерферограмма светового пучка, возвращенного в интерферометр опорной плоскостью, установленной на выходе адаптивной системы.

Ниже приведены параметры оптической системы датчика волнового фронта, используемого в лабораторном макете.

Диаметр входного зрачка, мм.....	80
Удаление входного зрачка от первой поверхности объектива, мм	325
Фокусное расстояние объектива, мм	300
Увеличение в зрачках	1/12
Диаметр кружка в фокальной плоскости, содержащего 84% энергии излучения, мкм	10
Рабочая длина волны излучения, мкм.....	0,63

4. Результаты экспериментальных исследований

4.1. Система апертурного зондирования типа I

При исследовании адаптивных оптических систем апертурного зондирования типа I в качестве амплитудных транспарантов использовались точечные диафрагмы размером 50 и 100 мкм.

Для эффективной модуляции поверхности гибкого зеркала-корректора соседние толкатели должны смещаться в противофазе. Однако реализованная в конструкции геометрия размещения толкателей по поверхности зеркала не позволяет это осуществить. Поэтому знак амплитуды смещения при модуляции менялся по кольцам. Форма зеркала при модуляции имела вид, показанный на рис. 13.

В результате проведенных экспериментов было установлено, что качественно модуляционная характеристика датчика волнового фронта адаптивной системы имеет вид, показанный на рис. 14. Она имеет довольно узкий допустимый диапазон изменения локальной кривизны волнового фронта. В большем диапазоне изменения локальной кривизны наблюдается неоднократное изменение знака сигнала при постоянном знаке локальной кривизны волнового фронта. Это, видимо, объясняется формой зеркала, меняющейся под действием деформаций, создаваемых отдельным толкателем [4].

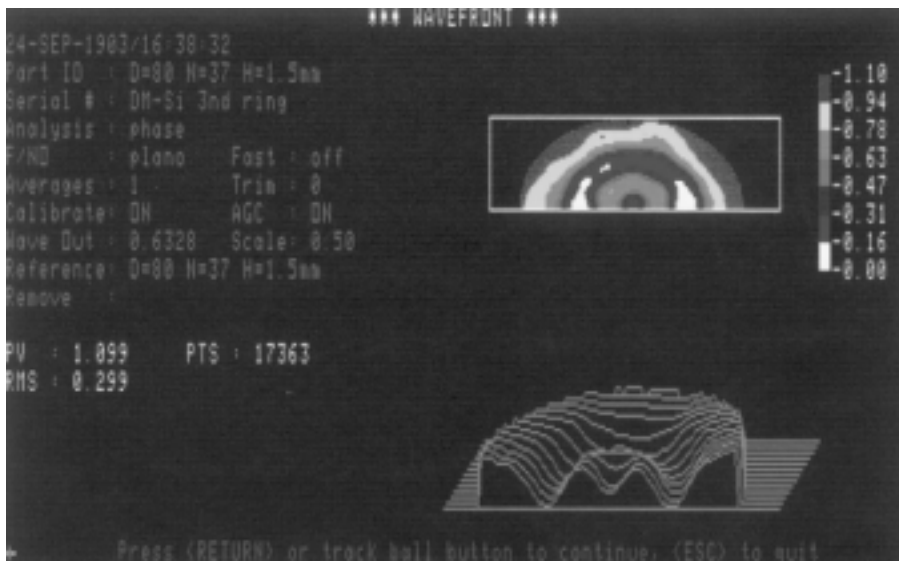


Рис. 13. Форма поверхности гибкого зеркала при подаче на малые секции его толкателей модулирующего напряжения

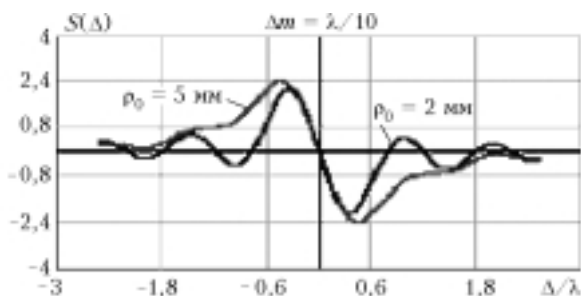


Рис. 14. Вид модуляционной характеристики для датчика волнового фронта адаптивной оптической системы типа I

Изменение знака сигнала наблюдается также и при постоянной кривизне, если менять в небольших пределах общий наклон волнового фронта. Однако если наблюдаемый локальный участок волнового фронта плоский, то даже при наличии общего наклона волнового фронта сигнал с соответствующего приемника равен нулю. Теоретически такое поведение модуляционной характеристики адаптивных оптических систем типа I при изменении общего наклона было предсказано в работе [5]. При замыкании макета адаптивной системы апертурного зондирования с пространственным разделением каналов типа I практически никогда не удавалось получить устойчивой работы.

Таким образом, экспериментально установлено, что датчики волнового фронта в адаптивных оптических системах типа I можно считать датчиками кривизны.

4.2. Адаптивные оптические системы типа II

При исследовании адаптивных оптических систем апертурного зондирования с пространственным разделением каналов типа II использовался управляемый транспарант Ньютона. Следует отметить, что наличие только небольшой области, в которой меняются оптические свойства этого транспаранта, переносит на него некоторые характерные признаки

адаптивных оптических систем типа I. Наиболее существенными из них являются ограниченный диапазон изменения кривизны, при котором его можно использовать в замкнутой системе, и влияние на знак обратной связи общего наклона волнового фронта.

При юстировке оптики датчика волнового фронта зона контакта выводилась из фокальной плоскости объектива датчика. В работе [5] показано, что такое смещение эквивалентно введению в волновой фронт сферической составляющей искажений. Этим способом мы смещали модуляционную характеристику датчика в точку, в которой она пересекает ось абсцисс без перегиба.

Многочисленные изменения знака модуляционной характеристики для такого транспаранта не характерны. Результаты экспериментов качественно соответствовали виду модуляционной характеристики, показанному на рис. 3. На рис. 15 приведен ряд последовательных кадров, демонстрирующих характер изменения пятна в фокальной плоскости длиннофокусного зеркала при коррекции статического искажения. Первое изображение этого рисунка соответствует изображению точки для разомкнутой системы. Над каждым из кадров построена поверхность, отображающая распределение интенсивности в фокальном пятне. В данном случае амплитуда сигнала в максимуме плохо отражает процесс адаптации, так как он занимает время, которое существенно меньше длительности кадра. Поэтому при прозрачности оптического фильтра перед ПЗС-камерой (см. рис. 6), оптимальной для светового пятна при откорректированном волновом фронте, практически не регистрируется световое пятно для искаженного волнового фронта. Более показательным на этом рисунке являются форма светового пятна, появление характерного дифракционного ядра и дифракционных колец. Их изменения от кадра к кадру более отчетливо видны на рис. 16, где приведена та же, что и на рис. 15, серия снимков и построены линии уровня интенсивности.

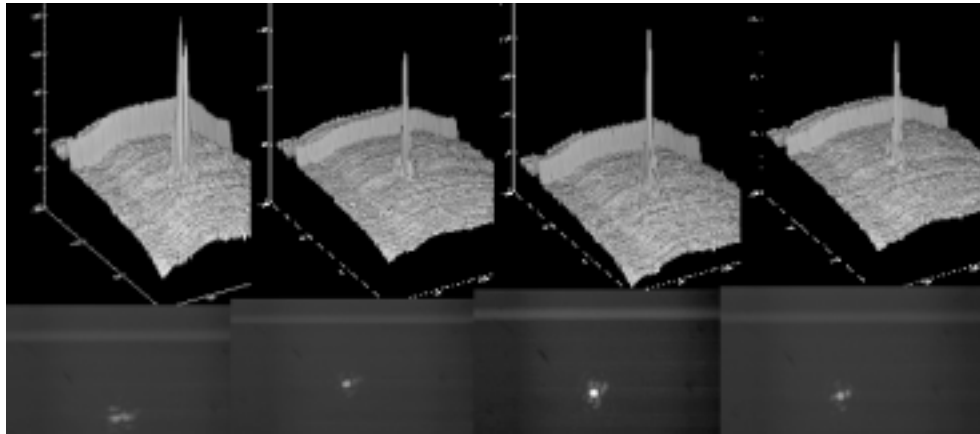


Рис. 15. Изменение формы пятна на приемнике, расположенном в дальней зоне

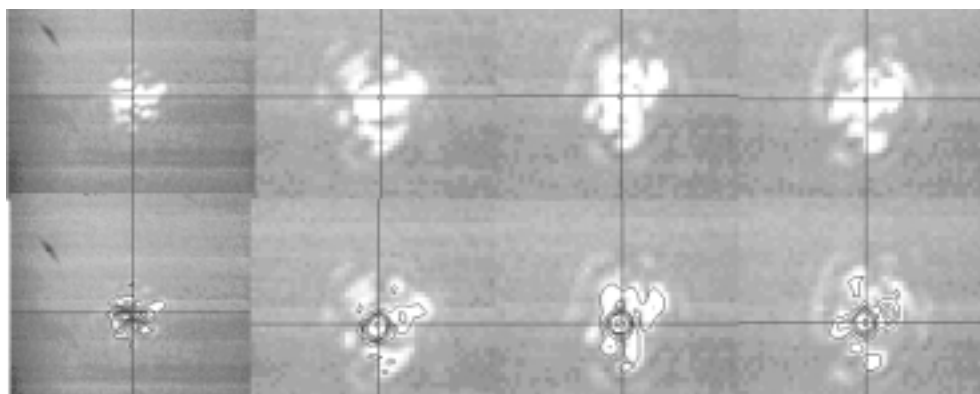


Рис. 16. Линии уровня в распределении интенсивности изображения в фокальной плоскости для серии изображений (см. рис. 15)

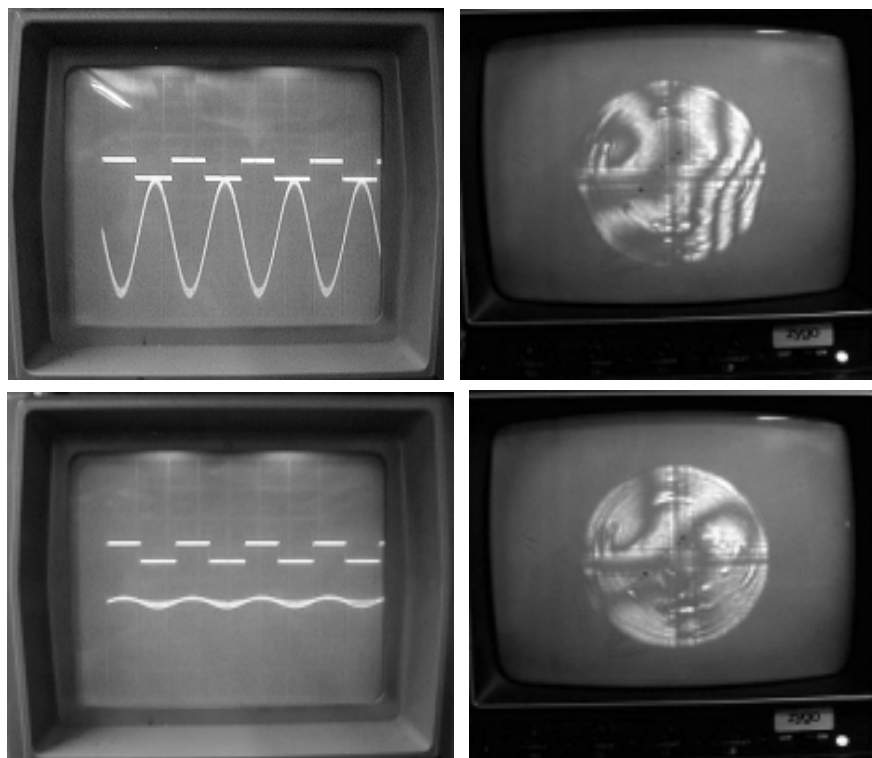


Рис. 17. Характер сигналов с приемника отдельного канала адаптивной системы и интерферограмма поверхности зеркала до коррекции искажения и в процессе коррекции

На рис. 17 приведены осциллограммы сигналов с выхода одного канала адаптивной системы и интерферограммы поверхности зеркала, зарегистрированные до и после включения обратной связи.

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что логика работы адаптивной системы типа II с управляемым транспарантом Ньютона качественно соответствует теоретическому анализу в [5].

Выводы

В результате теоретических и экспериментальных исследований адаптивных оптических систем апертурного зондирования с пространственным разделением каналов можно сделать следующие выводы:

1. Датчики волнового фронта в этих адаптивных системах являются, по существу, датчиками кривизны.

2. Адаптивные оптические системы апертурного зондирования типа I при высокой чувствительности к искажениям волнового фронта обладают небольшим рабочим диапазоном и очень чувствительны к ошибкам наклона волнового фронта.

3. Адаптивные оптические системы типа II с управляемым транспарантом Ньютона при высокой чувствительности к искажениям волнового фронта имеют больший динамический диапазон и менее чувствительны к наклонам волнового фронта.

1. *Rodier F.* Adaptive Optics in Astronomy. Cambridge: University Press, 1999.
2. Александров А.Б., Иншин П.П. Адаптивное управление на основе выделения функции резкости в оптическом процессоре // Квант. электрон. 1992. Т. 19. № 11. С. 1122–1125.
3. Прилепский Б.В., Алиханов А.Н., Берченко Е.А., Киселев В.Ю., Нарусбек Э.А., Филатов А.С. Измерение искажений волнового фронта методом апертурного зондирования с пространственным разделением каналов (в печати).
4. О'Мира Г. Теория адаптивных оптических систем с многоканальной фазовой модуляцией, использующих деформируемые зеркала с зональным управлением // Адаптивная оптика / Под ред. Э.А. Витриченко. М.: Мир, 1980.
5. Алиханов А.Н., Прилепский Б.В., Филатов А.С. Ошибки юстировки в адаптивных оптических системах апертурного зондирования с пространственным разделением каналов // Квант. электрон. (в печати).

A.N. Alikhanov, E.A. Berchenko, V.Yu. Kiselev, V.N. Kuleshov, S.N. Larin, E.A. Narusbek, B.V. Prilepskiy, V.G. Son, A.S. Filatov. **Adaptive optical system with wave front sensor with spatially separated control channels.**

This paper presents the results of theoretical and experimental research of adaptive optical systems with wave front sensor with spatially separated control channels. The main peculiarity of such systems consists in the fact that signals received by each photodetector can be directly used for corresponding deformable mirror (DM) actuator control. To make it possible, light wave phase modulation is used at the same frequency for the whole wave front (WF). Multi-element photodetector is placed in the plane optically conjugated with an optical system phase corrector (DM). That is why such system seem analogous, to some extent, to aperture sounding ones.

Theoretical analysis has shown that two variants of adaptive optical systems with wave front sensor (WFS) with spatially separated control channels configuring are possible. The first one involves phase modulation directly in the corrector (DM) plane. The second one involves phase modulation in the focal plane of WFS objective. In the both cases, a signal from photoreceiver is equal to zero if local curvature of WF in the corresponding region is also equal to zero. Such WFS are often referred to as curvature sensors.

It is shown that stability of adaptive optical systems with wave front sensor with spatially separated control channels and modulation of the wave phase in the corrector plane depends strongly on WF tilts. But their sensitivity (for equal focal distances) is much higher than for AOS with phase modulation in the WFS objective focal plane.

The description is given for the laboratory setup used for experimental research of adaptive optical systems with wave front sensor with spatially separated control channels. In this setup, we used deformable mirrors with correspondingly 7 and 37 PZT actuators of special type. One of peculiarities of actuators was existence of two sections: control section and modulation one. For investigations of operation of AOS with phase modulation in the WFS objective focal plane, we used special designs of transparent phase modulators.