

12, декабрь 2015

УДК 681.7.08

Оптико-электронная система на основе датчика волнового фронта для аттестационного контроля параметров формы вогнутых сферических зеркал

Веремьева А.А., студент

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

Соколовский В.А., студент

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

*Научные руководители: Денисов Д.Г., к.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы»*

*Животовский И.В., к.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы»*

rl2@bmstu.ru

1. Введение

В современных оптических технологиях одной из важнейших технических задач является проектирование высокоточной аппаратуры метрологического обеспечения аттестационного контроля параметров формы оптических изделий. К ряду таких оптических деталей можно отнести крупногабаритные зеркала астрономических телескопов, имеющие конструктивные параметры: $\frac{D}{f} = (\frac{1}{2} \div \frac{1}{4})$ при диаметре зеркала $D = 1 \div 6$ м.

Трудности, возникающие при разработке стендовой базы аппаратуры контроля гаммы зеркал в первую очередь связаны с подбором эталонной поверхности сравнения, а также с задачами юстировки схемы. Последний фактор, в частности, определяет погрешности измерения радиусов кривизны оптических зеркал при работе измерительных систем по схеме автоколлимационного хода лучей, что связано с высокоточным совмещением центра кривизны крупногабаритного зеркала с задним фокусом фокусирующих насадок.

Для решения описанных выше проблем авторами статьи совместно с ООО «Активная оптика НайдН» была предложена оптическая схема с совмещенными осветительной и эталонной ветвями на базе датчика волнового фронта (ДВФ) типа Шака-Гартмана. На рис.1. представлена схема для контроля параметров формы плоских оптических деталей.

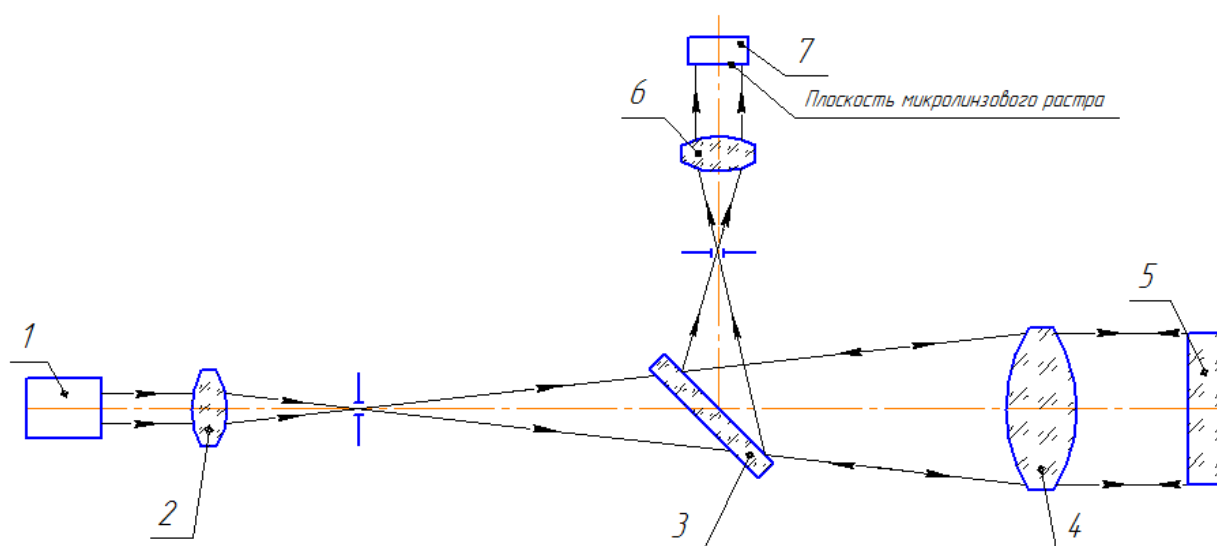


Рис. 1. Структурно-функциональная схема ОЭСДВФ: 1 – источник излучения; 2,4,6 – объектив; 3 – светоделитель; 5 – плоская контролируемая деталь; 7 – ДВФ

Авторами статьи в рамках одной из научно-технических задач представлен сравнительный анализ характеристик интерференционных систем и датчиков волнового фронта ДВФ, результаты которого представлены в таблице 1. Были проанализированы интерферометры и ДВФ ведущих компаний таких, как Zygo, ESDI, Визионика.

Таблица 1

Сравнительный анализ интерферометров типа Физо и ДВФ

Интерферометры			
Характеристика	DynaFiz™	Zygo Verifire	Intellium™ Z40
Источник излучения	HeNe-лазер, $\lambda=632,8$ нм	HeNe-лазер, $\lambda=633$ нм	HeNe-лазер, $\lambda=632,8$ нм
Длина когерентности	> 100 м	> 100 м	> 100 м
Повторяемость результатов	≤ 4 нм PV	$\leq 0,035$ нм PV	$\frac{\lambda}{15}$ PV

Погрешность измерения	$\frac{\lambda}{15} - \frac{\lambda}{10} PV$	$\frac{\lambda}{15} - \frac{\lambda}{10} PV$	$\frac{\lambda}{10} PV$
ДВФ			
Характеристика	ShaH-03500 («Визионика»)	ShaH-0620A («Визионика»)	ShaH-04130 («Визионика»)
Максимальный наклон волнового фронта	±25 мрад	±25 мрад	±35 мрад
Минимальный радиус кривизны	±0,06 м	±0,12 м	±0,06 м
Максимальный радиус кривизны	1,1 км	5,8 км	1,2 км
Повторяемость результатов (RMS)	0,5 нм	0,4 нм	1 нм
Абсолютная погрешность (RMS)	$\frac{\lambda}{100}$	$\frac{\lambda}{100}$	$\frac{\lambda}{100}$
Относительна погрешность (RMS)	$\frac{\lambda}{1000}$	$\frac{\lambda}{1800}$	$\frac{\lambda}{6500}$

Что касается интерферометров типа Физо, наибольшее влияние на погрешность измерения оказывает погрешность изготовления эталона, а типичное значение погрешности составляет $\frac{\lambda}{15} - \frac{\lambda}{10} PV$ для одного эталона. Высокоточные эталоны необходимы для каждого измерения. Кроме того, хотя интерферометры и позволяют получить высокое разрешение, но обладают малым угловым динамическим диапазоном (типовой диаметр выходного зрачка в пределах от 50 до 100 мм, а при его увеличении, стоимость сильно возрастает).

Приведенная схема позволяет устранить воздействие этих факторов и обладает следующими преимуществами:

1. Не требуется источник с большой длиной когерентности, что необходимо при контроле длиннофокусных зеркал;
2. Не требуется постоянный высокоточный эталон, что важно при работе с выходным зрачком диаметром больше 50 мм;
3. Нечувствительность к вибрациям и флуктуациям атмосферы;
4. Большой угловой динамический диапазон измерений, что позволяет проводить контроль гаммы зеркал с заданным D/f' ;

5. Контроль деталей с различными оптическими покрытиями (следствие пункта 1);
6. Контроль асферических профилей с большими отклонениями от ближайшей сферы;
7. Возможность работы с динамическим эталоном (адаптация к внешним факторам, что позволит расширить динамический диапазон).

2. Принцип работы ДВФ

Далее рассмотрим более наглядно принцип работы ДВФ и особенности регистрации им параметров волнового фронта.

В данной ОЭС используется ДВФ Шака-Гартмана, структурно-функциональная схема которого изображена на рис. 2.

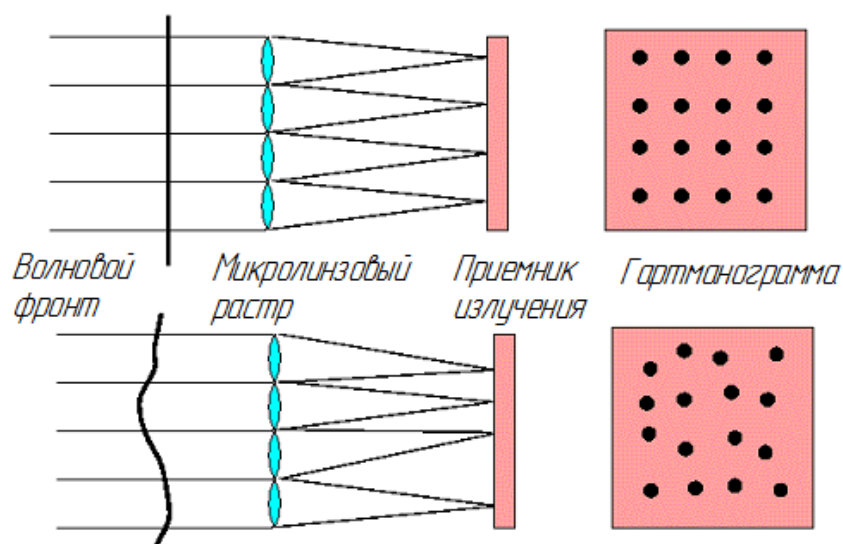


Рис. 2. Структурно-функциональная схема ДВФ Шака-Гартмана

Главными элементами датчика являются приемник ПЗС или КМОП камеры и линзовый растр. Линзовый растр представляет собой матрицу микролинз, которые разбивают проходящий волновой фронт на локальные участки, фокусирующиеся затем на приемнике. На приемнике формируется изображение, называемое гартманограммой. Пример гартманограммы показан на рис. 3. Одним из методов восстановления параметров волнового фронта является модальный метод, на котором основан принцип действия ДВФ типа Шака-Гартмана.

2.1. Модальный метод восстановления параметров волнового фронта

Принцип действия датчика типа Шака-Гартмана основан на измерении локальных наклонов волнового фронта, которые пропорциональны локальным смещениям фокальных пятен. [1, 2]

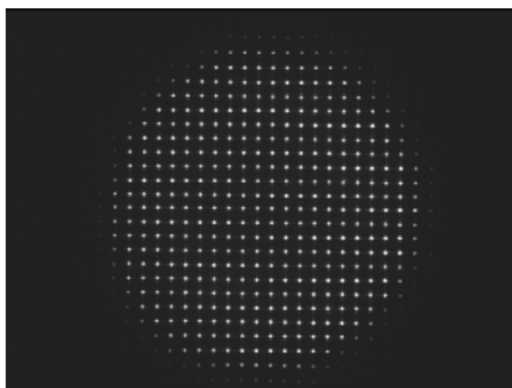


Рис. 3. Пример гартманограммы

На рис. 4. представлен алгоритм измерения ДВФ. Сначала, регистрируя распределение интенсивности в пределах каждого локального участка, получают гартманограмму. Затем проводят обработку изображения с помощью быстрого преобразования Фурье. Целью такой обработки является определение числа фокальных пятен по оси x и по оси y .

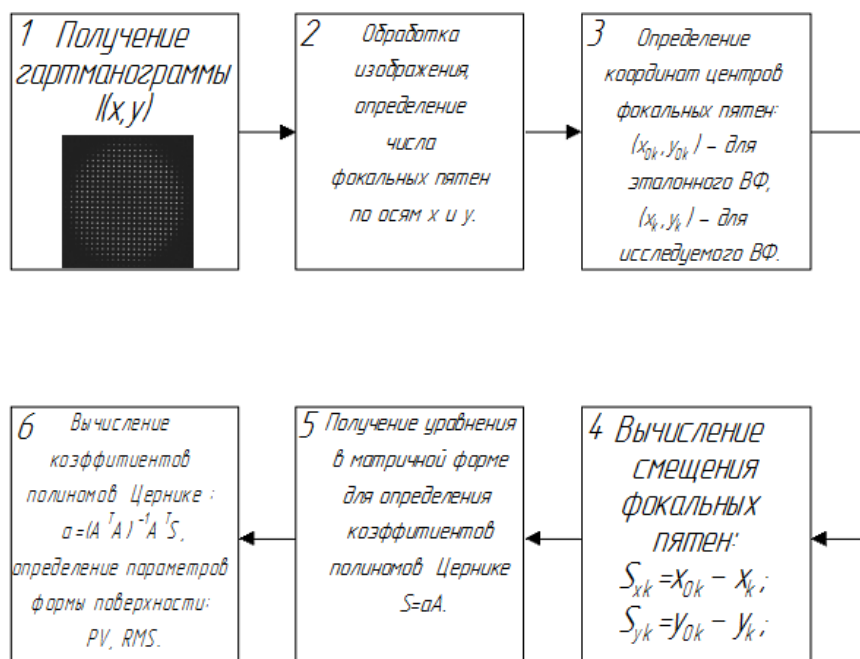


Рис. 4. Алгоритм измерения ДВФ

В третьем блоке центры фокальных пятен (x_k, y_k) находят методом центроидов для каждой из локальных областей, на которые разбивается вся поверхность приемника по формулам:

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

где m, n – число пикселей ПЗС-матрицы по осям x, y в пределах k -ой локальной области, I_{ij} – значение интенсивностей в пикселе.

Далее в четвертом блоке определяют смещения фокальных пятен исследуемого волнового фронта от ранее записанного эталонного, соответственно по оси x и по оси y (рис. 5):

$$S_{xk} = x_{0k} - x_k, S_{yk} = y_{0k} - y_k.$$

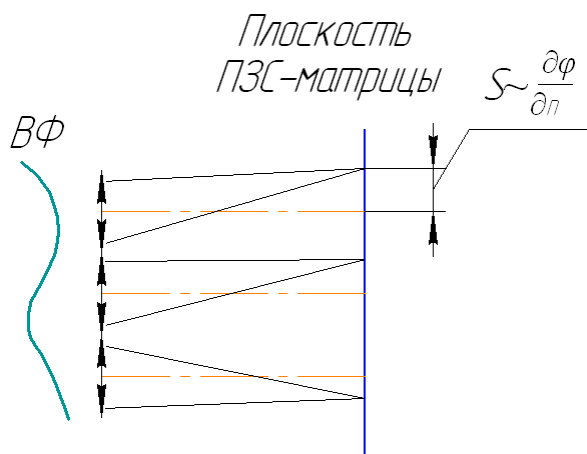


Рис. 5. Смещение фокальных пятен по оси y

В пятом блоке вычисляют локальный наклон исследуемого волнового фронта по формуле:

$$\frac{\partial \varphi(x_k, y_k)}{\partial x} = \frac{1}{f} S_{xk}, \frac{\partial \varphi(x_k, y_k)}{\partial y} = \frac{1}{f} S_{yk}, k = 1, \dots, NK, \quad (1)$$

где f – фокусное расстояние микролинзы, NK – число фокальных пятен на гартманограмме.

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

$$\frac{\partial \varphi(x_k, y_k)}{\partial x} = \sum_{p=1}^{NP} a_p \frac{\partial F_p(x_k, y_k)}{\partial x}, \quad \frac{\partial \varphi(x_k, y_k)}{\partial y} = \sum_{p=1}^{NP} a_p \frac{\partial F_p(x_k, y_k)}{\partial y}, \quad (2)$$

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

Приравнявая правые части (1) и (2) получаем систему уравнений относительно неизвестных коэффициентов Цернике. В матричной форме система выглядит как $S = a \cdot A$, где S – вектор смещений, отнесенных к фокусному расстоянию микролинзы, a –

коэффициенты Цернике, A – прямоугольная матрица производных от двумерных полиномов Цернике размером $2NPNK$.

И, наконец, в последнем шестом блоке определяют коэффициенты при полиномах Цернике, решая систему методом наименьших квадратов, суть которого заключается в минимизации функционала разности между наклонами волнового фронта, определенными экспериментально по (1), с одной стороны, и, представленными по разложению (2). Метод удобно представить в матричной форме: $\min |S - a \cdot A|^2$. Решение системы уравнений получают в виде:

$$a = (A^T A)^{-1} A^T S.$$

Коэффициенты при полиномах Цернике показывают величину aberrаций волнового фронта, например, дефокусировку, астигматизмы, комы и т.д. Aberrации и вид полиномов Цернике представлены в таблице 2.

Таблица 2

Полиномы Цернике

Полином	Описание	Декартова форма
Zern0	Общий сдвиг фазы (не используется)	1
Zern1	Наклон по оси X	x
Zern2	Наклон по оси Y	y
Zern3	Дефокусировка (кривизна)	$-1 + 2x^2 + 2y^2$
Zern4	Астигматизм по осям 0 или $\pi/2$	$y^2 - x^2$
Zern5	Астигматизм по осям $\pm\pi/4$	$2xy$
Zern6	Кома третьего порядка по оси X	$-2x + 3xy^2 + 3x^3$
Zern7	Кома третьего порядка по оси Y	$-2y + 3x^2y + 3y^3$
Zern8	Сферическая aberrация	$1 - 6x^2 - 6y^2 + 6x^4 + 12x^2y^2 + 6y^4$

Для представления фазового распределения в виде интерференционной картины, удобной для визуальной оценки величины aberrаций, волновой фронт рассчитывался по найденным коэффициентам Цернике [3]:

$$\varphi(x, y) = \sum_{p=1}^{NP} a_p F_p(x, y).$$

Альтернативой рассмотренному модальному методу является зональный метод восстановления волнового фронта.

2.2. Зональный метод восстановления параметров волнового фронта

Для измерительной сетки, изображенной на рис. 6, согласно [4] можно записать следующие выражения, связывающие наклоны волнового фронта и значения фазы в узлах сетки:

$$\frac{S_{i+1,j}^x + S_{ij}^x}{2} = \frac{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}}{h}, i = 1, \dots, N-1; j = 1, \dots, N \quad (3)$$

$$\frac{S_{i+1,j}^y + S_{ij}^y}{2} = \frac{\varphi_{i,j+1} - \varphi_{i,j}}{h}, i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

где $h=D/N$, D – размер апертуры.

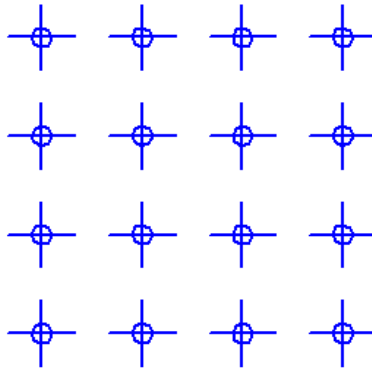


Рис. 6. Измерительная сетка для восстановления волнового фронта зональным методом

Представим выражения (3) и (4) в матричном виде:

$$DS = A \varphi,$$

где D – матрица, представляющая усредненные наклоны волнового фронта. Тогда для решения методом наименьших квадратов получим выражение:

$$(A^T A) \varphi = A^T D S.$$

Учтем только ненулевые элементы в последнем выражении:

$$g_{jk} \varphi_{jk} - [\varphi_{j+1,k} + \varphi_{j-1,k} + \varphi_{j,k+1} + \varphi_{j,k-1}] = \frac{1}{2} [S_{j,k+1}^y - S_{j,k-1}^y + S_{j+1,k}^x - S_{j-1,k}^x] h, \quad (5)$$

где

$$g_{jk} = \begin{cases} 2, & j = 1 \text{ или } N; k = 1 \text{ или } N \\ 3, & \begin{cases} j = 1 \text{ или } N; k = \overline{2, N-1} \\ k = 1 \text{ или } N; j = \overline{2, N-1} \end{cases} \\ 4, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

g – диагональные элементы матрицы $A^T A$, которые равны либо 2, либо 3, либо 4 в зависимости от того, какой точкой является узел сетки: угловой, граничной или внутренней. Введем обозначения в (5) b_{jk} и $\bar{\varphi}_{jk}$:

$$b_{jk} = \frac{1}{2} (S_{j,k+1}^y - S_{j,k-1}^y + S_{j+1,k}^x - S_{j-1,k}^x) h,$$

$$\bar{\varphi}_{jk} = \frac{[\varphi_{j+1,k} + \varphi_{j-1,k} + \varphi_{j,k+1} + \varphi_{j,k-1}]}{g_{jk}}.$$

Тогда, переписав (5) в виде:

$$\varphi_{jk} = \bar{\varphi}_{jk} + \frac{b_{jk}}{g_{jk}},$$

получим окончательное выражение для решения системы (5) относительно неизвестных значений фаз в узлах измерительной сетки итерационными методами решения систем уравнений:

$$\varphi_{jk}^{(k+1)} = \bar{\varphi}_{jk}^{(k)} + \frac{b_{jk}}{g_{jk}}. \quad (6)$$

Найденные значения фаз (6) в узловых точках позволяют восстановить регистрируемый волновой фронт.

Приведенные выше алгоритмы используются в методике определения параметров волнового фронта и, в частности, для измерения радиуса кривизны оптических зеркал. Разобьем данную задачу на две:

1. измерение радиуса кривизны малогабаритных зеркал;
2. измерение радиуса кривизны крупногабаритных зеркал.
- 3.

3. Измерение радиуса кривизны вогнутых сферических зеркал

3.1. Измерение радиуса кривизны малогабаритных вогнутых сферических зеркал

При переходе от контроля плоских поверхностей к контролю сферических изделий, в схему, изображенную на рисунке 1 вводится насадка, фокусирующая излучение.

Для измерения радиуса кривизны малогабаритных вогнутых сферических зеркал, необходимо получить автоколлимационный ход лучей в оптической системе, что наблюдается в двух характерных положениях зеркала:

- 1) положение 1 показано на рис. 7, когда насадка 8 фокусирует излучение в центр кривизны зеркала;
- 2) положение 2 изображено на рис. 8, когда прибор, смещаясь, фокусирует излучение в вершину сферического зеркала.

Разница между этими положениями определяет радиус кривизны зеркала по формуле (7):

$$R_3 = x_0 - x_1. \quad (7)$$

Критерием автоколлимационного хода лучей служит минимальное значение одного из полиномов, представленных в таблице 2, а именно, величины дефокусировки. Значение последней в двух характерных положениях ОЭСДВФ (рис. 7, 8) и будет определять методическую погрешность измерения радиуса кривизны.

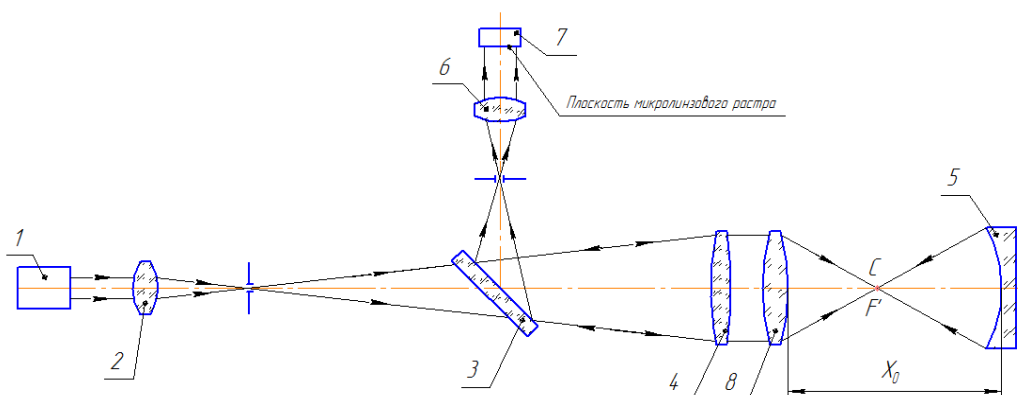


Рис. 7. Функционально-оптическая схема ОЭС на основе ДВФ для измерения радиуса кривизны вогнутых сферических зеркал (положение 1): 1 – источник излучения; 2,4,6 – объектив; 3 – светоделитель; 5 – деталь; 7 – ДВФ; 8 – фокусирующая насадка

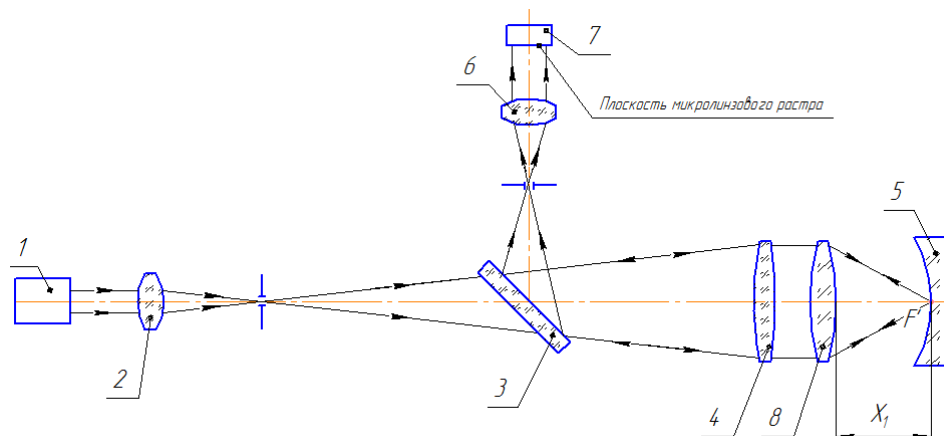


Рис. 8. Функционально-оптическая схема ОЭС на основе ДВФ для измерения радиуса кривизны вогнутых сферических зеркал (положение 2): 1 – источник излучения; 2,4,6 – объектив; 3 – светоделитель; 5 – деталь; 7 – ДВФ; 8 – фокусирующая насадка

На основе представленных функциональных схем методики измерения была разработана эквивалентная расчетная схема (рис. 9) регистрирующей ветви для определения зависимости смещения фокального пятна ΔS в плоскости ПЗС-матрицы от величины рассогласования Δ центра кривизны контролируемого зеркала и фокуса насадки и конструктивных параметров оптической системы. Представленное выражение (8), связывающее смещение фокального пятна для крайнего элемента раstra, получено в приближении тонких компонентов.

$$\Delta S = -f'_4 \frac{tg(\sigma_3) \left[\frac{-f'^2_2(R-2\Delta) + 2f'_2\Delta(\Delta-R)}{2\Delta(\Delta-R)} - d \right] f'_1}{a'_3} \quad (8)$$

где f'_1, f'_2, f'_3, f'_4 - фокусные расстояния коллимирующего объектива, фокусирующей насадки, объектива и микролинзового растра, соответственно (см. рис. 9), R - радиус кривизны контролируемого зеркала, d - расстояние между коллимирующим объективом и фокусирующей насадкой, σ_3 - угол, под которым луч приходит на растр, a'_3 - положение изображения относительно второго объектива.

Выражение (8) позволяет оценить потенциальную точность ОЭСДВФ при влиянии различных факторов, связанных с конструктивными особенностями аттестационного контроля.

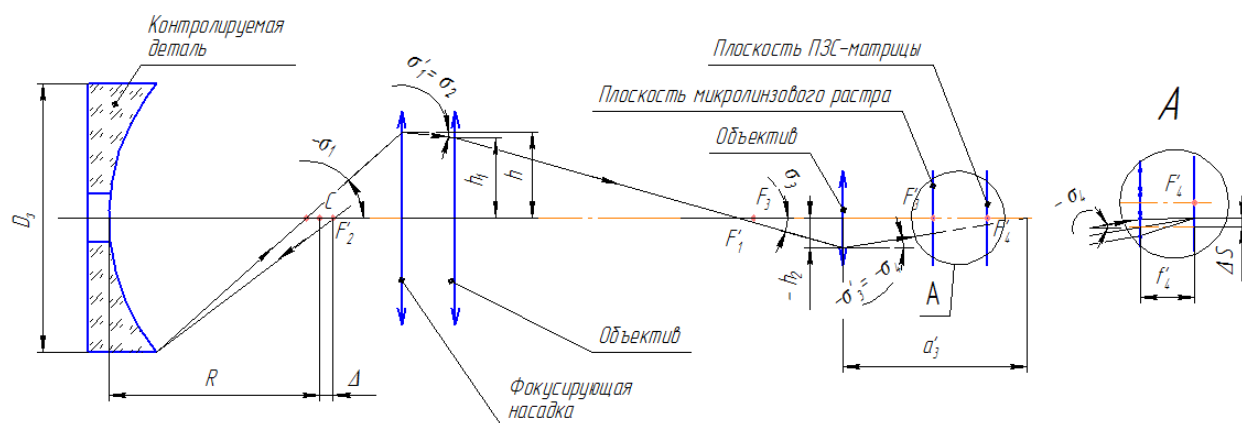


Рис. 9. Эквивалентная расчетная схема приемной ветви

Как видно из рис. 9, после отражения от контролируемого зеркала при наличии рассогласования Δ между центром кривизны C зеркала и фокусом насадки нарушается автоколлимационный ход лучей. Это приводит к непараллельности лучей, выходящих из фокусирующей насадки, и, как следствие, к нарушению параллельности лучей после второго объектива. Угол, под которым крайний луч приходит на микролинзовый растр и определяет смещение фокального пятна ΔS крайнего элемента растра.

3.2. Измерение радиуса кривизны крупногабаритных вогнутых сферических зеркал

Приведенная выше методика может быть реализована и для контроля крупногабаритных астрономических зеркал.

Особенность измерения в данном случае заключается в том, что, как правило, крупногабаритные астрономические зеркала имеют центральное конструктивное

отверстие. Этот фактор является ограничивающим при прямом транспонировании методик, поскольку, в этом случае, не удаётся получить автоколлимационный ход лучей в положении 2 (рис.8). Однако, если неоднократно проводить измерения, перемещая ОЭС ДВФ (рис.7) в окрестности точки «С», являющуюся центром радиуса кривизны измеряемого зеркала, то можно минимизировать величину дефокусировки « Δ ». При этом каждому положению прибора (фокального пятна) относительно точки «С» будет соответствовать свой квазиавтоколлимационный ход лучей и свое рабочее выражение, связанное величиной смещения пятна центроида в плоскости анализа ДВФ с конструктивными параметрами схемы стенда. Таким образом реализуется система из N уравнений с неизвестной величиной «R», решая которую алгоритмически прибор минимизирует погрешность в измерении искомой величины—радиуса кривизны.

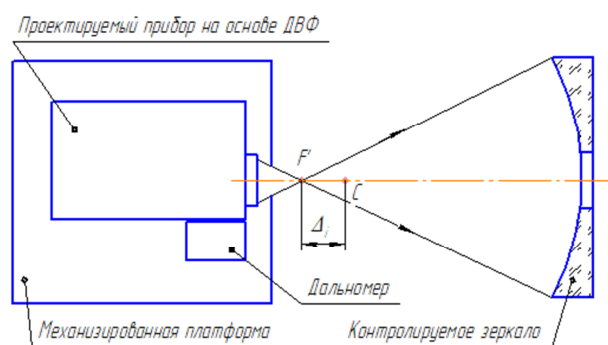


Рис. 10. Структурно-функциональная схема прибора на основе ДВФ для измерения радиуса кривизны крупногабаритных зеркал

4. Эталонирование и калибровка ДВФ

4.1. Эталонирование ДВФ

Как можно видеть из соотношения (8) результат измерения «R» определяется динамическим диапазоном работы ДВФ в ОЭС. Для корректной отработки ДВФ динамического диапазона предварительно проводится эталонирование ДВФ. Данная операция проводится с помощью автоколлиматора, который формирует идеальный плоский волновой фронт. Микролинзовый растр разбивает плоский волновой фронт в опорные волновые фронты, которые формируют картину из светлых пятен на ПЗС матрице. Во всех опорных волновых фронтах находятся и нумеруются поисковые квадраты, начиная с квадрата, расположенного в центре картины. Предполагается, что при измерении опорных фронтов датчик был точно съюстирован, и центральному поисковому квадрату соответствует центр распределения интенсивности лазерного излучения, использованного для снятия опорных фронтов. Для каждого поискового квадрата строятся

зависимости координат центра фокальных пятен X и Y от диаметра измеряемого пучка. На основании полученных зависимостей для каждого квадрата исследуемого излучения определяется диаметр D_i , после чего вычисляется среднее значение $D_{ср} = \sum D_i / N$, где N – количество поисковых квадратов.

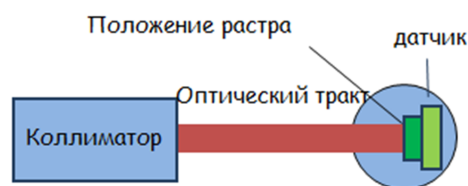


Рис. 11. Схема записи эталонного волнового фронта

4.2. Калибровка ДВФ

Для повышения точности измерений, т.е. для снижения составляющей систематической погрешности, которые возникают в следствии неточности установки микролинзового раstra относительно ПЗС матрицы, были проведены исследования и разработан метод калибровки. Данный метод основан на изменении наклона эталонного ВФ регистрируемого ДВФ, создаваемый плоскостным интерферометром Физо, как идеальным коллиматором и сравнение экспериментального ВФ с теоретическим [5]. Предварительно перед экспериментом был прокалиброван угол по эталону типа РПС который был в дальнейшем назначен экспериментальным углом. По результатам эксперимента был построен сравнительный график, на котором видно изменение PV от угла экспериментальных значений и теоретических. В результате проведенных экспериментальных исследований по калибровке заданного фокального расстояния была получена коррекция в его значении, которая составила $\Delta f = 0,4 \text{ мкм}$, т.е. отличие $f_{\text{эсп}} = 11,6 \text{ мкм}$ $f_{\text{теор}} = 12 \text{ мкм}$.

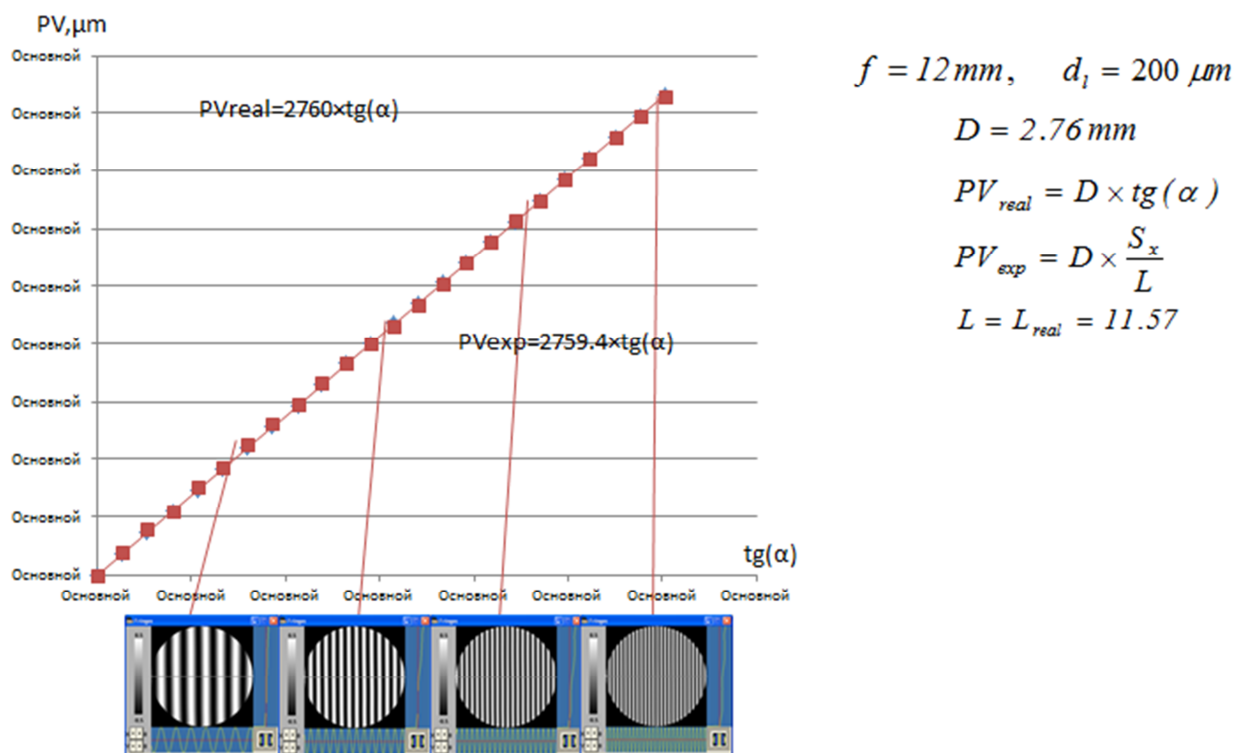


Рис. 12. Результаты калибровки заданного фокального отрезка

5. Экспериментальные исследования

На основе разработанной структурно-функциональной схемы собран стенд для контроля плоских оптических поверхностей, внешний вид которого представлен на рис. 13.

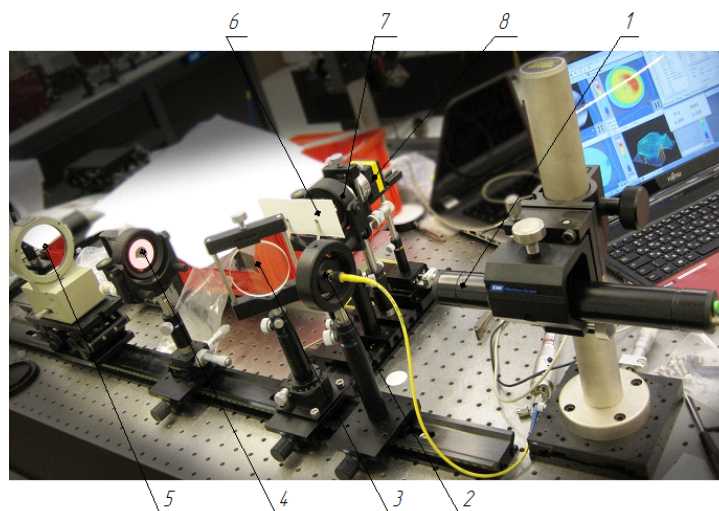


Рис. 13. Внешний вид экспериментального стенда: 1 – юстировочный лазер: He-Ne лазер; 2 – источник излучения: лазер BOB VFL650; 3 – светоделитель; 4 – объектив, $f'_1 = 350 \text{ мм}$; 5 – исследуемая поверхность; 6 – точечная диафрагма $D_\phi = 20 \text{ мкм}$; 7 – объектив, $f'_2 = 40 \text{ мм}$; 8 – ДВФ

Осветительная ветвь состоит из волоконного лазера 2, светоделителя 3 и объектива 4, преобразующего падающий на него пучок лучей в параллельный. Для юстировки был использован He-Ne лазер. Регистрирующая ветвь состоит из согласующей фокальной системы, в которую входит объектив 4 и объектив 7, светоделитель, точечная диафрагма 6 и ДВФ 8.

Экспериментальные измерения были проведены на интерферометре Zygo RTI 250 и на лабораторном стенде, результаты измерений представлены на рис. 14.

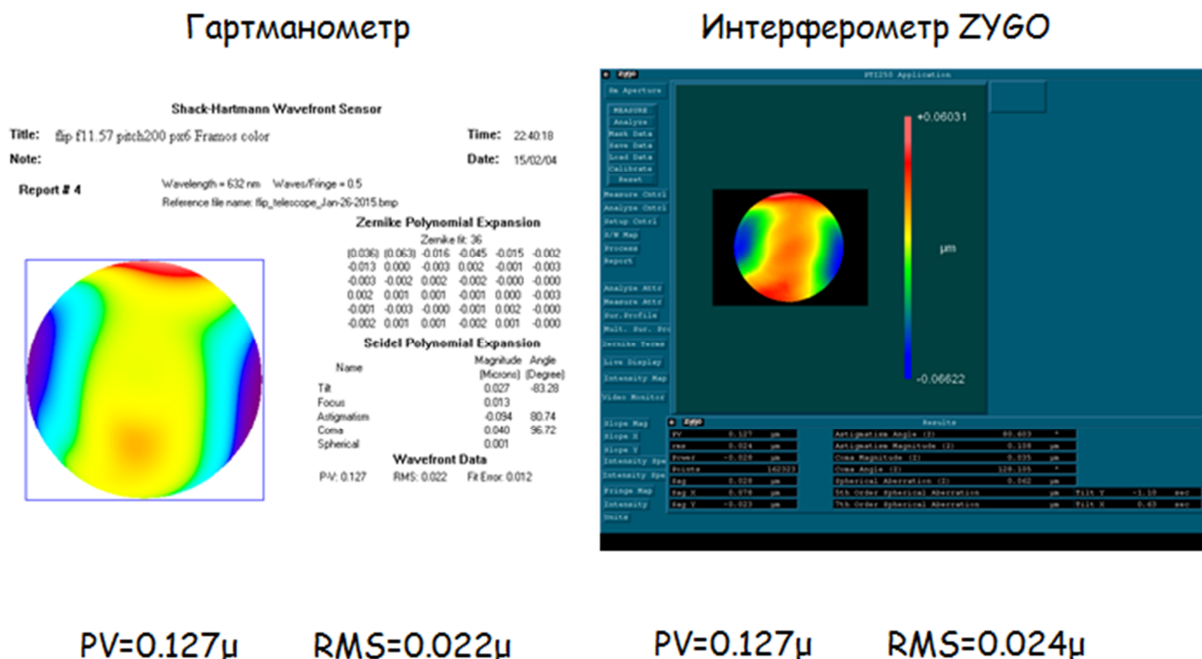


Рис. 14. Результаты измерения образца двумя методами

Как видно из приведенных результатов измерения по PV достигнута идеальная сходимость экспериментальных результатов: и на интерферометре и в ОЭСДВФ отклонение детали от плоскостности составило 0,127 мкм по параметру PV. Таким образом, калибровка ДВФ позволила увеличить точность измерения.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Проведён анализ современного состояния элементной базы интерференционной аппаратуры технологического и аттестационного контроля параметров профилей оптических поверхностей и датчиков волнового фронта;
2. Рассмотрен алгоритм работы и принцип действия ДВФ;

3. Предложены методики измерения радиуса кривизны малогабаритных и крупногабаритных сферических зеркал и соответствующие структурно-функциональные схемы;
4. Проведен расчет максимальной величины рассогласования центра кривизны зеркала и заднего фокуса насадки в соответствии с формулой (8):
 $\Delta = \pm 150 \text{ мкм}$ при $f'_1=425 \text{ мм}$, $f'_2=76 \text{ мм}$, $f'_3=33 \text{ мм}$, $f'_4=12 \text{ мм}$, $D'=3 \text{ мм}$, $D_3/R=1/2$;
 $\Delta = \pm 830 \text{ мкм}$ при $f'_1=300 \text{ мм}$, $f'_2=100 \text{ мм}$, $f'_3=66 \text{ мм}$, $f'_4=3,6 \text{ мм}$, $D'=11 \text{ мм}$, $D_3/R=1/2$;
5. Рассмотрена методика эталонирования и калибровки ДВФ;
6. Получены экспериментальные результаты измерения эталонного пробного стекла на интерферометре Zygo RTI 250 и ОЭСДВФ, обладающие хорошей сходимостью, что обеспечила реализованная калибровка ДВФ.

Список литературы

1. Берченко Е.А., Калинин Ю.А., Киселев В.Ю., Польшинкин М.А., Прилепский Б.В., Филатов А.С. Датчики волнового фронта. Режим доступа: http://www.physics-online.ru/php/paper.phtml?jrnid=nts&paperid=6364&option_lang=rus (дата обращения 14.03.2014).
2. Адаптивная оптическая система для коррекции излучения лазера. Техническое описание, инструкции пользователя. М.: Наука, 2012. 70 с.
3. Zavalova V.Ye., Kudryashov A.V. Shack-Hartmann wavefront sensor for laser beam analyses // High-Resolution Wavefront Control: Methods, Devices, and Applications III: Proc. SPIE. 2002. Vol. 4493. P.277-284. DOI: 10.1117/12.454723.
4. Southwell W.H. Wave-front estimation from wave-front slope measurements // J. Opt. Soc. Am. 1980. Vol. 70. P. 998-1006. DOI: 10.1364/JOSA.70.000998.
5. Neal D.R., O'Hern T.J., Torczynski J. R., Warren M. E., Shul R. Wavefront sensors for optical diagnostics in fluid mechanics: application to heated flow, turbulence and droplet evaporation // SPIE. Vol. 20. 2005, 1993. P. 194-203.