

В.Г. Максимов, И.Г. Половцев

ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ АБЕРРАЦИЙ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИНТЕРФЕРОМЕТРА С СОВМЕЩЕННЫМИ ВЕТВЯМИ

Обсуждается вопрос о влиянии остаточных aberrаций на погрешность контроля оптических деталей в интерферометре с совмещенными ветвями. Предложена методика расчета допусков на остаточные aberrации освещающей ветви интерферометра, по заданной точности интерференционных измерений.

В ряде астрономических задач, а также в задачах оптического зондирования атмосферы необходимо использовать высококачественные оптические антенны, так как качество оптики определяет погрешность измерения параметров. Неотъемлемой частью технологического процесса изготовления оптических деталей является контроль качества изготовления формы поверхностей этих деталей. Наиболее точный прибор для этой цели – лазерный интерферометр [8].

На рис. 1 изображена принципиальная оптическая схема лазерного интерферометра с совмещенными ветвями (ИСВ). Параллельный пучок света от лазерного источника 1, расширяясь в коллиматоре 2, проходит через светоделительный элемент 3 и фокусируется объективом 4 в точке F' . За объективом расположен апланатический светоделительный мениск 5 таким образом, что его задняя поверхность имеет центр кривизны в точке F' . Отраженная от этой поверхности часть волнового фронта является эталонным фронтом сравнения. Пройдя часть волнового фронта, отразившись от контролируемой поверхности 6 и пройдя по тому же пути обратно (так как центр кривизны поверхности 6 также совпадает с точкой F'), интерферирует с эталонным фронтом сравнения. Интерференционную картину можно зарегистрировать с помощью фото- или телекамеры 7. По наблюдаемой картине можно оценить погрешность изготовления контролируемой поверхности. Оценка проводится визуально или путем цифровой обработки интерферограммы [4]. Данная схема является достаточно универсальной, поскольку предполагает возможность установки деталей с радиусом $R_{к.д}$, который изменяется в пределах длины когерентности лазера.

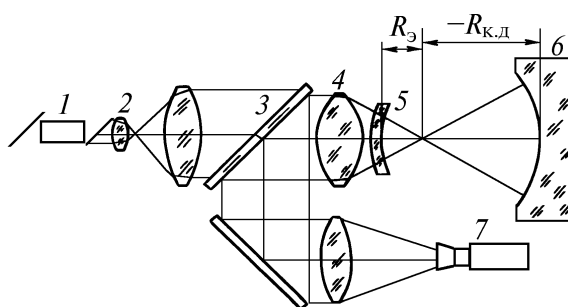


Рис. 1. Оптическая схема интерферометра с совмещенными ветвями

На погрешность интерференционных измерений в ИСВ влияют следующие факторы:

- 1) погрешность обработки интерферограммы;
- 2) погрешность изготовления эталонной поверхности;
- 3) остаточные aberrации оптических элементов интерферометра.

Первые два фактора достаточно очевидны, поскольку напрямую входят в уравнение интерферограммы. Что касается остаточных aberrаций, то особенностью ИСВ является то, что между эталонной поверхностью и контролируемой деталью нет других оптических поверхно-

стей. Следовательно, остаточная aberrация осветительной ветви $W_{o.a}$ должна компенсироваться, но не полностью. Причина этого – разность опорного и предметного плечей ($R_s - R_{к.д}$). Рассмотрим рис. 2 [1]. Здесь представлена схема движения реального волнового фронта из положения ε_1 в положение ε_2 . По теореме косинусов можно записать:

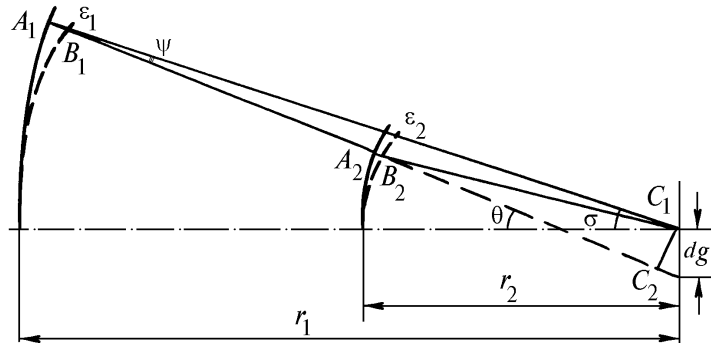


Рис. 2. Схема движения волновых фронтов

$$(B_2C_1)^2 = (B_1B_2)^2 + (B_1C_1)^2 - 2(B_1B_2)(B_1C_1) \cos \psi;$$

$$B_1C_1 = r_1 - N_1; B_2C_1 = r_2 - N_2;$$

$$B_1B_2 = r_1 - r_2; \cos \psi = \left[1 - \left(\frac{dg' \cos \theta}{r_1 - N_1} \right)^2 \right]^{1/2},$$

где N_1, N_2 – волновые aberrации фронтов ε_1 и ε_2 в точках B_1, B_2 , лежащих на одном луче; C_1 – центр параксиальной сферы; r_1 и r_2 – параксиальные радиусы кривизны волновых фронтов ε_1 и ε_2 ; dg' – поперечная геометрическая aberrация луча B_1B_2 .

Тогда для N_2 имеем:

$$N_2 = r_2 - \left[(r_1 - r_2)^2 + (r_1 - N_1)^2 - 2(r_1 - r_2)(r_1 - N_1) \cos \psi \right]^{1/2}. \quad (1)$$

Если в качестве сферы сравнения фронта ε_2 выбрать не параксиальную сферу с центром кривизны в точке C_1 , а некоторую другую, центр которой смещен на расстояние dz относительно плоскости Гаусса, то формула (1) примет вид

$$N_2 = r_2 + dz \left(1 - \frac{\rho^2}{2} \sin^2 \sigma \right) - \left[(r_1 - r_2 + dz)^2 + (r_1 - N_1)^2 - 2(r_1 - r_2 + dz)(r_1 - N_1) \cos \psi \right]^{1/2} \times$$

$$\times \left[(r_1 - r_2 + dz)^2 + (r_1 - N_1)^2 - 2(r_1 - r_2 + dz)(r_1 - N_1) \cos \psi \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где $\rho = \frac{(m^2 + M^2)^{1/2}}{a}$; m, M – координаты точки B_1 волнового фронта ε_1 ; σ – задний апертурный угол; $2a$ – световой диаметр фронта ε_1 .

Соотношения (1) и (2) показывают, что волновая aberrация фронта ε_1 в общем случае изменяется по мере его распространения. Величина этого изменения определяется параметрами геометрии $r_1, r_2, r_1 - r_2, \sigma$ и конкретным видом исходной aberrации N_1 . Обозначим буквой W_1 – волновую aberrацию фронта, прошедшего предметную ветвь ИСВ до контролируемой детали и обратно до встречи с волновым фронтом, отраженным от эталонной поверхности мениска, и W_2 – волновую aberrацию фронта, отраженного от эталонной поверхности мениска. Тогда погрешность ИСВ $\Delta W(x, y)$, обусловленная трансформацией остаточной aberrации $W_{o.a}$, определится из соотношения

$$\Delta W(x, y, W_{o.a}) = W_2(x, y, W_{o.a}) - W_1(x, y, W_{o.a}), \quad (3)$$

где x, y – координаты точки на эталонной поверхности мениска.

Исследование влияния $W_{o.a}$ на ΔW проводилось ранее [5–7]. В данной статье сделана попытка представить $\Delta W(W_{o.a})$ в виде, удобном для использования при разработке интерферометра. В качестве метода исследования $\Delta W(x, y, W_{o.a})$ выбран метод численного моделирования. Основой программы является стандартный алгоритм расчета хода лучей через оптическую систему.

Известно, что функцию волновой aberrации в любой точке выходного зрачка можно разложить в ряд по степеням нормированных полярных координат этой точки. Выражение для этого имеет следующий вид [2]:

$$W(\rho, \varphi) = \sum_i \sum_j W_{ij} \rho^i \cos^j \varphi$$

или

$$W(\rho, \varphi) = W_{00} + W_{20} \rho^2 + W_{11} \rho \cos \varphi + W_{40} \rho^4 + W_{31} \rho^3 \cos \varphi + W_{22} \rho^2 \cos^2 \varphi + \dots, \quad (4)$$

где W_{ij} – коэффициент волновой aberrации, выраженный в длинах волн и равный значению волновой aberrации на краю выходного зрачка при $\rho = 1, \varphi = 0; i \geq j; i + j$ – четное число; $i + j - 1$ – порядок разложения; W_{00} – постоянная составляющая, не влияющая на качество изображения (обычно в разложение не включается), остальные слагаемые соответствуют геометрическим aberrациям: дефокусировке, поперечному смещению (первый порядок разложения), сферической aberrации, коме, астигматизму (третий порядок разложения) и т.д. Составляющие поперечной aberrации, входящие в соотношения (1), (2), связаны с волновой aberrацией следующими соотношениями [2]:

меридиональная составляющая:

$$\partial g' \cong \frac{1}{\sin \sigma} \left[\cos \varphi \frac{\partial W(\rho, \varphi)}{\partial \rho} - \frac{\sin \varphi}{\rho} \frac{\partial W(\rho, \varphi)}{\partial \varphi} \right];$$

сагиттальная составляющая:

$$\partial G' \cong \frac{1}{\sin \sigma} \left[\sin \varphi \frac{\partial W(\rho, \varphi)}{\partial \rho} + \frac{\cos \varphi}{\rho} \frac{\partial W(\rho, \varphi)}{\partial \varphi} \right]. \quad (5)$$

На рис. 3 представлены результаты моделирования сферической aberrации, комы, астигматизма и кривизны поля изображения. Эти результаты показывают, что ΔW имеет тот же характер, что и $W_{o.a}$ с точки зрения разложения (4), а также дает основание далее оперировать только меридиональной составляющей aberrаций.

Типичные графики зависимости $\Delta W(R_3 - R_{к.д})$ представлены на рис. 4. Анализ графиков позволяет сделать следующие выводы:

- наибольший вклад в ΔW при прочих равных условиях вносит сферическая aberrация;
- при установке детали на минимальное искривление полос интерференционной картины (плоскость наилучшей установки) сферическая aberrация компенсируется на 73,1%, кома на 57,7%, астигматизм на 50%, кривизна поля изображения компенсируется полностью;
- наилучшие контролируемые детали с точки зрения устойчивости к $W_{o.a}$ – вогнутые, наихудшие – выпуклые, лежащие в интервале :

$$R_{к.д} < R_3/5. \quad (6)$$

Первые два вывода дают основание в дальнейшем рассматривать только сферическую aberrацию в плоскости наилучшей установки, третий – ограничивать исследуемый диапазон контролируемых деталей. Другими словами, если при световом диаметре $2a$ сменного объектива 4 (рис. 1) радиус контролируемой детали удовлетворяет соотношению (6), то целесообразно перейти к другому объективу со световым диаметром $2a' < 2a$ таким образом, чтобы соотно-

шение (6) не выполнялось. На основании этих положений результаты численного эксперимента были представлены в виде таблицы. В качестве параметров выступает $2a$ – световой диаметр объектива 4 (рис. 1), и $2a/R_3$ – относительное отверстие эталонной сферы. При этом учитывалось ограничение на длину предметной ветви (6) и соотношение

$$(R_3 - R_{к.д}) < 4000 \text{ мм}, \quad (7)$$

которое связано с длиной когерентности лазера и требованиями к виброзащите. Параметры $2a$ и $2a/R_3$ были выбраны на основании анализа известных промышленных интерферометров MARK-IV [8] и ИКД-110 [9]. Неравенством (7) объясняются некоторые нарушения в закономерностях данных таблицы.

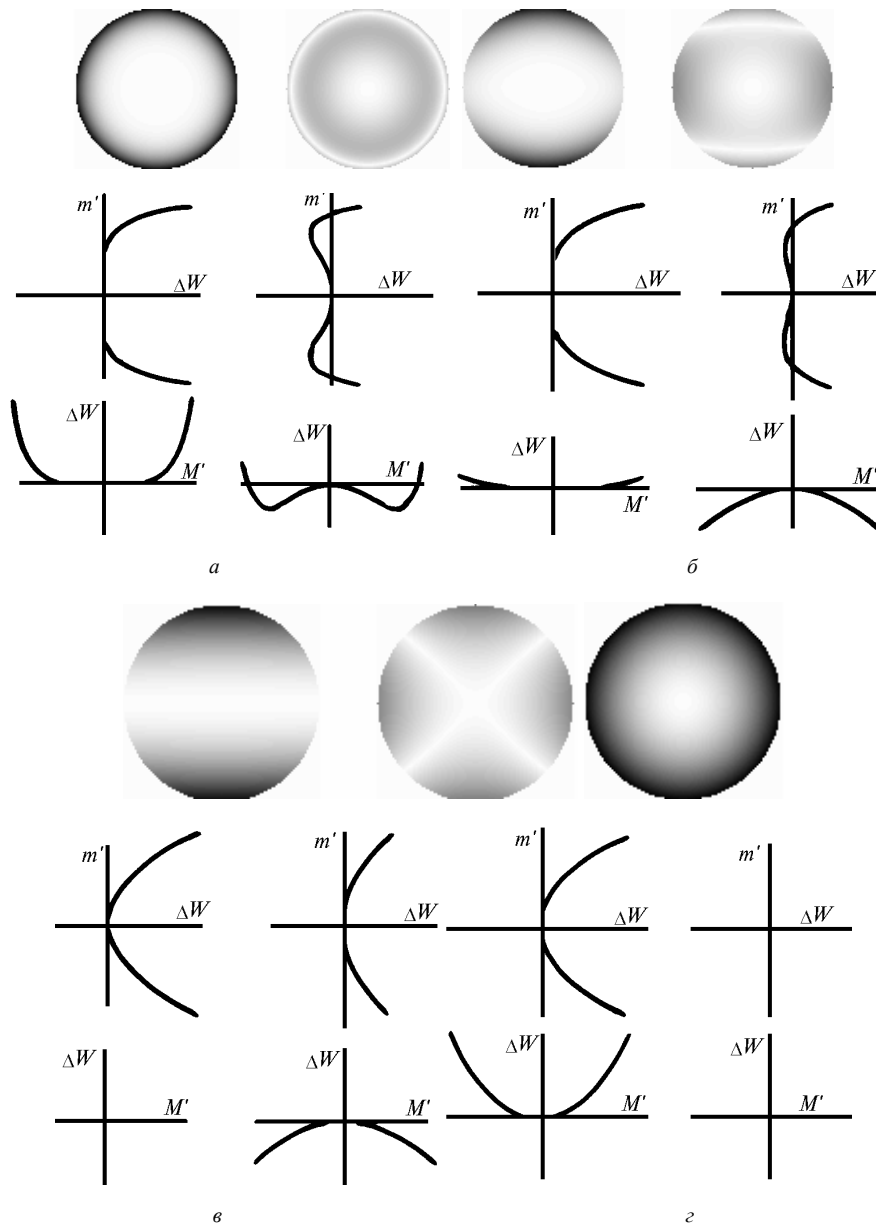


Рис. 3. Распределение ΔW , отн. ед., в плоскости выходного зрачка объектива (верхние пары рисунков), а также в меридиональном и сагиттальном сечениях (средние и нижние пары рисунков), при наличии *a*) сферической аберрации, *б*) комы, *в*) астигматизма, *г*) кривизны поля изображения. Картины слева и справа соответствуют ΔW при установке центра кривизны контролируемой детали в плоскости Гаусса и в плоскости наилучшей установки

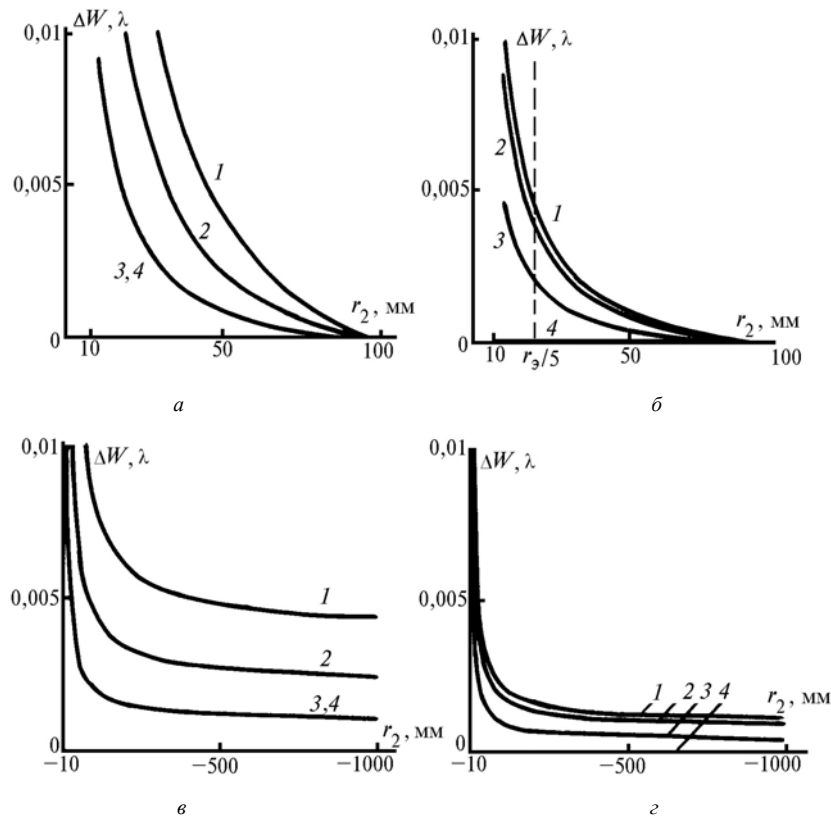


Рис. 4. Зависимость ΔW от радиуса контролируемой детали для ИСВ с $2a = 100$ мм, $R_s = 100$ мм, при $W_{0,a} = 2\lambda$. Кривые соответствуют: 1 – сферической aberrации, 2 – коме, 3 – астигматизму, 4 – кривизне поля изображения; а, в – центр кривизны контролируемой детали в плоскости Гаусса, б, г – в плоскости наилучшей установки, а, б – для выпуклых поверхностей, в, г – для вогнутых поверхностей

Остаточная сферическая aberrация (в мкм), приводящая к погрешности ΔW

$2a$, мм	ΔW , дл. волн	Относительные отверстия $2a/R_s$					
		1:0,66	1:1,5	1:3	1:10	1:50	1:70
30	1/500	0,511	0,403	0,296	0,163	0,072	0,061
	1/200	0,808	0,637	0,467	0,257	0,113	0,095
	1/100	1,141	0,898	0,658	0,362	0,158	0,132
	1/50	1,610	1,267	0,927	0,508	0,220	0,183
	1/20	2,535	1,991	1,454	0,790	0,336	0,279
100	1/500	0,935	0,738	0,542	0,300	0,133	0,196
	1/200	1,478	1,166	0,856	0,473	0,209	0,308
	1/100	2,088	1,647	1,209	0,667	0,294	0,434
	1/50	2,950	2,325	1,705	0,939	0,412	0,610
	1/20	4,653	3,663	2,683	1,472	0,640	0,952
150	1/500	1,446	0,904	0,664	0,367	0,307	0,354
	1/200	1,811	1,429	1,049	0,580	0,485	0,559
	1/100	2,559	2,018	1,482	0,818	0,684	0,789
	1/50	3,616	2,850	2,092	1,153	0,963	1,112
	1/20	5,706	4,494	3,294	1,811	1,511	1,746

Приведенные результаты дают возможность назначить допуск на $W_{0,a}$, исходя из значения ΔW , заданного техническим заданием.

1. Пуряев Д. Т. Методы контроля оптических асферических поверхностей. М.: Машиностроение, 1976. 261 с.
2. Сокольский М. Н. Допуски и качество оптического изображения. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1986. 221 с.
3. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. М.: Машиностроение, 1969. 652 с.
4. Ган М. А., Устинова С. И., Котов В. В. // ОМП. 1990. N 8. С. 17.
5. Половцев И. Г., Симонова Г. В. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. N 5. С. 557.
6. Половцев И. Г., Симонова Г. В. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. N 6. С. 662.

7. Калинин С.Т. // ОМП. 1991, N 5. С. 16.

8. MARK-IV XP. Interferometer sistem. Рекламный проспект фирмы L.O.T. GmbH. Darmstad.

9. Каталог продукции АО ЛОМО, г. Санкт-Петербург.

Конструкторско-технологический институт «Оптика» СО РАН,
г. Томск

Поступила в редакцию
27 марта 1996 г.

V.G. Maksimov, I.G. Polovtsev. **Influence of Permanent Aberrations on Fiseau Interferometer Error.**

Influence of permanent aberrations on the error of the control of optical elements by a Fiseau interferometer is discussed. We propose a technique to calculate an allowance for the permanent aberrations of the illuminating arm of the interferometer when branch desirable accuracy of interferometric measurements is given.