

И.Г. Половцев, Г.В. Симонова

О ВЛИЯНИИ ОСТАТОЧНОЙ АБЕРРАЦИИ ИНТЕРФЕРОМЕТРА НА КАЧЕСТВО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Проанализированы различные схемы интерферометров с точки зрения влияния остаточных aberrаций на точность интерференционных измерений. Показана существенность этого фактора, приведены рекомендации по назначению допусков на компоненты оптической схемы интерферометров.

Интерференционные измерения очень часто используются как в задачах оптического зондирования атмосферы, так и при изготовлении оптики для лидарных систем.

Оценка качества волновых фронтов в интерферометрии, как правило, производится визуально. С появлением средств для автоматизированной обработки интерферограмм появилась принципиальная возможность получать информацию о качестве контролируемой волновой поверхности с чрезвычайно низкой погрешностью $\lambda/100$ по амплитуде ошибки (воспроизводимость результатов) [1]. Но на результатах интерферометрических измерений существенно сказываются остаточные aberrации интерферометра, обусловленные оптикой прибора. Эта погрешность является систематической и может быть учтена путем цифровой коррекции.

Так, например, известный интерферометр «МАРК II» [1] имеет погрешность контроля $\lambda/20$ для плоских и $\lambda/10$ для сферических волновых фронтов. Интерферометр «МАРК III» при той же оптической схеме, но снабженный системой цифровой коррекции, имеет погрешность $\lambda/50$. Следует отметить, что остаточная aberrация интерферометра и погрешность интерференционных измерений есть неравнозначные понятия, поскольку интерференционная картина характеризует разность волновых фронтов в плечах интерферометра. Поэтому при наличии остаточной aberrации чрезвычайно важным является вопрос об оптическом пути в разных плечах интерферометра.

В [2] показано, что волновая aberrация N сферического волнового фронта радиуса R на расстоянии ΔR получает приращение ΔN , описываемое соотношением

$$|\Delta N| = \left| \frac{R \cdot \Delta R}{2(R - \Delta R)} \right| \varphi^2,$$

где φ — угол отклонения нормали волнового фронта. В [3] показано, что максимальный угол отклонения нормали φ_{\max} можно определить отношением

$$\varphi_{\max} \simeq k N_{\max} / D,$$

где D — диаметр волнового фронта; k — некий коэффициент, определяемый конкретным видом волновой aberrации; N_{\max} — максимальная волновая aberrация на световом диаметре. Отсюда максимальное изменение волновой aberrации

$$|\Delta N_{\max}| \simeq \begin{cases} k_c^2 \frac{|R \cdot \Delta R|}{2|R - \Delta R|} \left(\frac{N_{\max}}{D} \right)^2 & \text{для сферического волнового фронта;} \\ k_n^2 \frac{|\Delta R|}{2} \left(\frac{N_{\max}}{D} \right)^2 & \text{для плоского волнового фронта.} \end{cases} \quad (1)$$

Коэффициенты k_c и k_n могут быть определены расчетным путем. Если ΔR — разность оптических путей в плечах интерферометра, ΔN_{\max} — максимальная систематическая ошибка интерференционных измерений в приборе, остаточная aberrация которого в плоскости эталонной поверхности N_{\max} , D — световой диаметр эталонной поверхности, R — радиус кривизны эталонного фронта, то из соотношения (1) можно увидеть существенное влияние как остаточных aberrаций, так и геометрии схемы на результаты измерений.

В [4] показано, что влияние длины рабочей ветви интерферометра Тваймана–Грина (рис. 1, а) при наличии остаточной аберрации N хотя и мало $\Delta N \ll N$, но существенно для прецизионных измерений на длинной трассе.

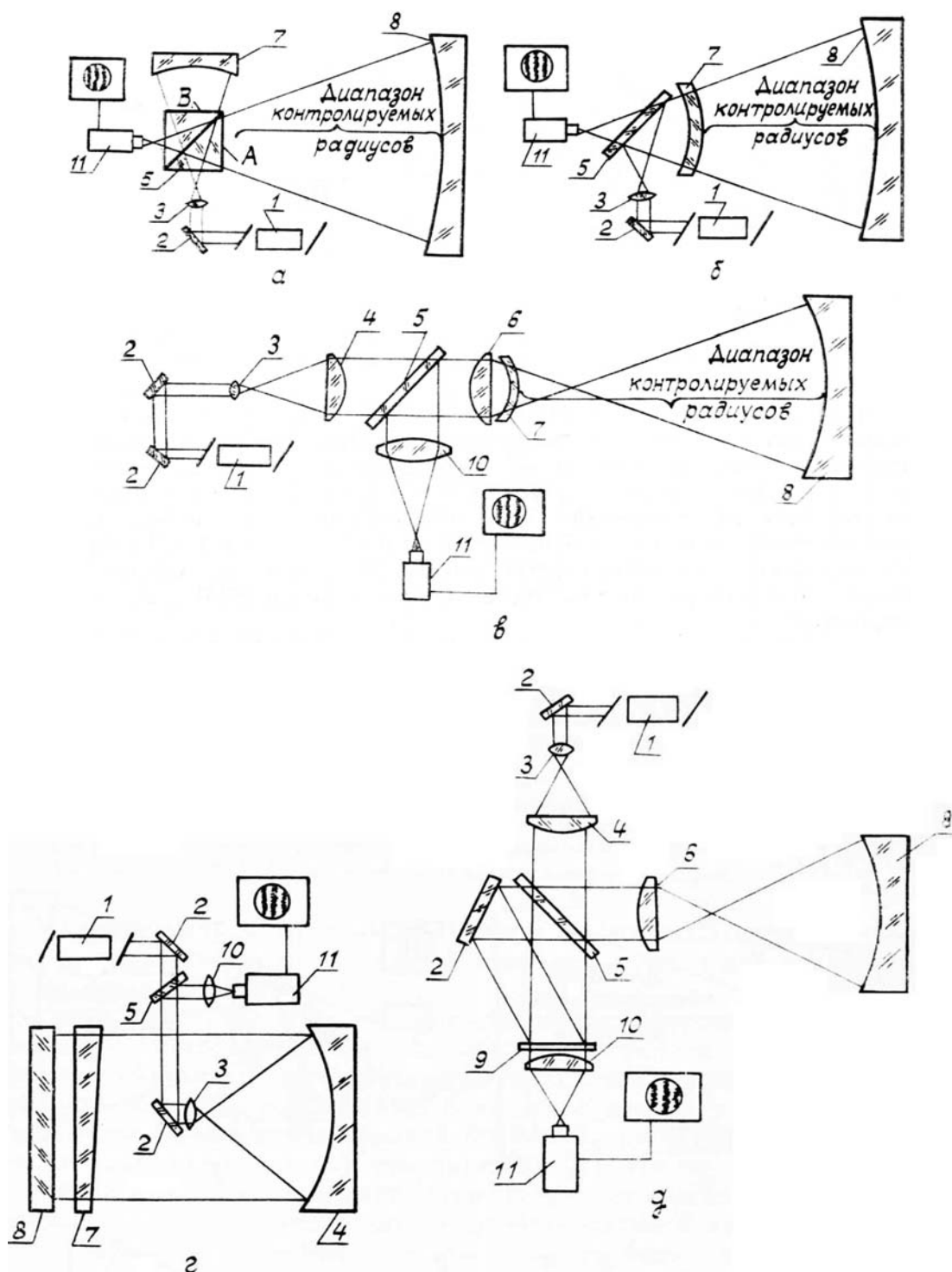


Рис. 1. Схемы интерферометров: а – интерферометр Тваймана–Грина для контроля вогнутых сферических поверхностей; б – ИСП для контроля вогнутых сферических поверхностей; в – ИРП для контроля выпуклых и вогнутых сферических зеркал; г – ИПП для контроля плоских поверхностей; д – ИГ для контроля выпуклых и вогнутых сферических зеркал. 1 – лазерный источник света; 2 – направляющие зеркала; 3 – микрообъектив; 4 – коллимирующий объектив (зеркало); 5 – светоделитель; 6 – формирующий объектив; 7 – оптический элемент с эталонной поверхностью (эталонное зеркало, апланатический мениск, клин); 8 – контролируемая поверхность; 9 – голограмма; 10 – собирающий объектив; 11 – TV-камера с ВКУ

С помощью простого технического приема [4] можно существенно уменьшить влияние остаточной аберрации на качество интерференционного контроля, при этом погрешность не превышает величины $\lambda/90$. Тем не менее схему Тваймана–Грина вряд ли можно считать приемлемой для прецизионных измерений, поскольку в ней имеется большое количество поверхностей, погрешность изготовления формы которых еще более существенно влияет на результаты контроля, и поэтому их необходимо изготавливать с очень высоким качеством. На рис. 1, *a* это поверхности *A* и *B* и поверхность эталонного зеркала. Остальные поверхности общие, и их воздействие осуществляется через остаточную аберрацию.

Более благополучными с этой точки зрения являются интерферометры с совмещенными ветвями. На рис. 1, *b* приведена схема интерферометра для работы в сходящемся пучке (ИСП), на рис. 1, *в* – в расходящемся пучке (ПРИ), на рис. 1, *г* – в параллельном пучке (ИПП, интерферометр Физо). ИСП имеет оптическую схему, позволяющую работать как с выпуклыми, так и с вогнутыми поверхностями. При этом все компоненты оптической схемы в отличие от интерферометра, приведенного на рис. 1, *a*, являются общими, а мениск 7 с эталонной задней поверхностью выполнен апланатическим. Тем не менее обилие оптических компонентов (позиции 3, 4, 5, 6, 7 на рис. 1, *в*) в общей части ИСП заставляет выдвигать достаточно строгие требования к качеству оптики. В табл. 1 приведены результаты численных расчетов на ЭВМ для ИСП с параметрами:

- световой диаметр светоделительного мениска $D = 30$ мм,
- радиус кривизны эталонного волнового фронта $R = 32,73$ мм.

Волновая аберрация моделировалась путем изменения эксцентриситета одного из компонентов объектива 6. По данным первой колонки ΔN_p определено среднее значение

$$\bar{k}_c^2 \approx 310,$$

и рассчитаны по формуле (1) значения ΔN_T . Полученные результаты хорошо согласуются между собой. Ошибка оценки ΔN при использовании соотношения (1) не превышает 50%, при этом следует иметь в виду, что по мере приближения к каустике погрешность этой оценки увеличивается [2].

При $\Delta R = R$, т.е. при положении контролируемой поверхности в каустике, соотношение (1) имеет особенность, а разность волновых аберраций имеет максимальное значение. Отсюда следует, что остаточная аберрация ИСП легко может быть проконтролирована. Для этого достаточно установить в каустику любую оптическую поверхность.

Соотношение (1) может быть использовано для определения допусков на изготовление оптики. Так, например, для высокоточного контроля в описываемом интерферометре поверхностей с радиусом кривизны не менее 5 мм с систематической погрешностью не более $\lambda/20$ остаточная аберрация N_{\max} должна удовлетворять соотношению (с учетом погрешности (1))

$$|N_{\max}| \leq 0,5 \sqrt{\left| \frac{\Delta N_{\max} \cdot D^2 \cdot 2(R - \Delta R)}{R \cdot \Delta R \cdot 310} \right|} = 0,5 \text{ мкм.}$$

Жесткие ограничения на остаточную аберрацию приводят к жестким допускам на изготовление светоделительного мениска. Так, например, для мениска с параметрами $r_1 = 23,33$, $r_2 = 32,73$, $d = 6$, $\varnothing = 28$ мм, $n = 1,5147$ допуски $\Delta r_{1,2} = \pm 0,008$ мм, $\Delta d = \pm 0,01$ мм, $\Delta n = \pm 0,0001$.

Таблица 1

Влияние остаточной аберрации N и разности плеч ИСП ΔR на погрешность контроля.
 ΔN_p – ошибки, полученные прямым расчетом, ΔN_T – по формуле (1)

ΔR , мм	N , мкм					
	2,72		0,857		4,061	
	ΔN_p	ΔN_T	ΔN_p	ΔN_T	ΔN_p	ΔN_T
1032,73	1,030	0,043	0,004	0,0043	0,089	0,1
132,73	0,053	0,055	0,005	0,0054	0,122	0,123
62,73	0,093	0,087	0,009	0,009	0,214	0,19
37,73	0,565	0,31	0,057	0,03	1,324	0,7
22,73	0,045	0,09	0,005	0,009	0,105	0,2
2,73	0,003	0,004	0,0002	0,0003	0,005	0,009

Интерферометр для работы в расходящемся пучке ИРП имеет гораздо меньше оптических элементов (позиции 3, 5, 7 на рис. 1, *в*) в осветительной части. При введении устройства точечной

фильтрации вообще остается одна поверхность зеркала 5 и мениск 7. Поэтому если нет необходимости работать со сходящимся пучком, то имеет смысл использовать схему ИРП. Для назначения допусков на оптику можно использовать соотношение (1) по аналогии с ИСП при $k_c^2 = 310$.

При контроле плоских поверхностей очень распространенной схемой является схема интерферометра Физо — ИПП (рис. 1, з). Обычно считается, что расстояние между эталонной и контролируемой поверхностями должно быть как можно меньше, чтобы влияние остаточной aberrации, а также погрешностей настройки свести до минимума. На самом деле схема ИПП допускает существенную разницу плеч при значительной остаточной aberrации, что очень важно при интерференционных измерениях на длинной трассе.

В табл. 2 приведены результаты численного расчета для ИПП с диаметром апертуры $D = 300$ м. Волновая aberrация N моделировалась путем изменения эксцентриситета одного из компонентов оптической схемы. По данным первой колонки ΔN_p определено среднее значение

$$\bar{k}_T^2 \approx 94$$

и рассчитаны по формуле (1) значения ΔN_T . Полученные результаты хорошо согласуются между собой. Ошибка оценки ΔN при использовании соотношения (1) не превышает 50%.

Из соотношения (1) можно определить, что для высококачественного контроля с систематической погрешностью не более $\lambda/20$, при разнице плеч $1 \div 1000$ мм, необходима коррекция остаточной aberrации до величины (с учетом погрешности оценки (1))

$$N_{\max} \leq 0,5 \sqrt{\frac{\Delta N_{\max} \cdot 2D^2}{\Delta R \cdot 94}} = 3,9 \text{ мкм.}$$

при разнице плеч $1000 \div 8000$ мм — $N_{\max} \leq 1,5$ мкм, а на малых трассах до 100 мм — $N_{\max} \leq 12,3$ мкм. Однако следует отметить, что приведенные оценки остаточной aberrации включают в себя ограничение на фокусность пучка, поэтому остаточная aberrация ИПП может быть достаточно большой, если в нем очень точно выполнена юстировка на бесконечность.

Голографический интерферометр ИГ может быть построен для любой схемы, описанной выше. На рис. 1, д приведен пример аналога ИСП с голографической коррекцией остаточной aberrации (ОА).

Из объектива коллиматора 4 широкий пучок лазерного излучения делится на рабочий и опорный. Рабочий проходит к объективу 6 типа фотографического, с фокусом которого совмещен центр кривизны образцовой сферы 8, опорный — к зеркалу 2. После отражения от детали оба пучка встречаются на фотопластинке 9, образуя голографическую запись интерферирующих волн. Если после экспозиции и химической обработки пластину (голограмму) поместить на прежнее место, то за голограммой в направлении рабочего и опорного пучков можно наблюдать две интерференционные картины.

Таблица 2

Влияние остаточной aberrации N и разности плеч ИПП ΔR на погрешность контроля. ΔN_p — ошибка, полученная прямым расчетом, ΔN_T — по формуле (1)

ΔR_p мм	N , мкм					
	5,75		10,56		15,68	
	ΔN_p	ΔN_T	ΔN_p	ΔN_T	ΔN_p	ΔN_T
1	$0,1 \cdot 10^{-4}$	$0,17 \cdot 10^{-4}$	$0,7 \cdot 10^{-4}$	$0,57 \cdot 10^{-7}$	$0,26 \cdot 10^{-3}$	$0,13 \cdot 10^{-3}$
5	$0,4 \cdot 10^{-4}$	$0,85 \cdot 10^{-4}$	$0,4 \cdot 10^{-3}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$	$0,12 \cdot 10^{-2}$	$0,65 \cdot 10^{-3}$
10	$0,13 \cdot 10^{-3}$	$0,17 \cdot 10^{-3}$	$0,8 \cdot 10^{-3}$	$0,57 \cdot 10^{-3}$	$0,24 \cdot 10^{-2}$	$0,13 \cdot 10^{-2}$
15	$0,25 \cdot 10^{-3}$	$0,26 \cdot 10^{-3}$	$0,12 \cdot 10^{-2}$	$0,87 \cdot 10^{-3}$	$0,37 \cdot 10^{-2}$	$0,2 \cdot 10^{-2}$
20	$0,34 \cdot 10^{-3}$	$0,34 \cdot 10^{-3}$	$0,16 \cdot 10^{-2}$	$0,11 \cdot 10^{-2}$	$0,49 \cdot 10^{-2}$	$0,26 \cdot 10^{-2}$
50	$0,84 \cdot 10^{-3}$	$0,85 \cdot 10^{-3}$	$0,25 \cdot 10^{-2}$	$0,29 \cdot 10^{-2}$	$0,12 \cdot 10^{-1}$	$0,6 \cdot 10^{-2}$
100	$0,17 \cdot 10^{-2}$	$0,17 \cdot 10^{-2}$	$0,41 \cdot 10^{-2}$	$0,57 \cdot 10^{-2}$	$0,24 \cdot 10^{-1}$	$0,13 \cdot 10^{-1}$
1000	$0,17 \cdot 10^{-1}$	$0,17 \cdot 10^{-1}$	$0,82 \cdot 10^{-1}$	$0,57 \cdot 10^{-1}$	0,24	0,13
8000	0,12	0,14	0,59	0,47	1,72	1

При контроле вместо образцовой детали устанавливается проверяемая. Об ошибках поверхности судят, как и в обычных интерферометрах, по форме получаемых интерференционных полос, при

этом волновой фронт, восстановленный с голограммы, играет роль эталонного. Понятно, что когда радиус контролируемой детали равен радиусу эталонной, то коррекция ОА производится абсолютно (с точностью до погрешностей волнового фронта, вызванных обработкой голограммы). Но при изменении радиуса контролируемой детали, с учетом вышеизложенного, влияние ОА будет расти. Поэтому возможность коррекции ОА в ИГ должна быть обеспечена с помощью достаточно большого количества эталонов.

Другой особенностью ИГ является необходимость очень точной установки голограммы на место. Любая разъюстировка приводит к существенному росту остаточной аберрации. Расчет допусков на остаточную аберрацию ИГ может быть выполнен с использованием соотношения (1).

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы, которые необходимо иметь в виду при разработке интерферометров и выборе схемы:

- высококачественным может считаться такой интерферометр, в котором погрешность контроля обеспечивается не более $\lambda/20$ по амплитуде ошибки;
- наиболее приемлемыми схемами для высококачественных интерференционных измерений следует считать интерферометры с совмещенными ветвями;
- задача создания высокоточного интерферометра достаточно сложна и требует применения высококачественной оптики во всех частях интерферометра, при этом в каждом конкретном случае желательно упрощать схему с учетом специфики задачи, пусть даже в ущерб универсальности;
- при проведении расчетов и назначении допусков на компоненты оптической схемы, а также при оценке систематической погрешности интерферометра, можно использовать соотношение

$$\Delta N = \begin{cases} 310 \cdot \frac{R \cdot \Delta R}{2(R - \Delta R)} \left(\frac{N_{\max}}{D} \right)^2 & \text{для сферического волнового фронта;} \\ 94 \cdot \frac{\Delta R}{2} \left(\frac{N_{\max}}{D} \right)^2 & \text{для плоского волнового фронта.} \end{cases} \quad (2)$$

1. Измерительные приборы обеспечения качества в оптической промышленности. Рекламный проспект фирмы ORIEL.
2. Пуряев Д.Т. Методы контроля оптических асферических поверхностей. М.: Машиностроение, 1976. С. 110–111.
3. Половцев И.Г. //Оптика атмосферы. 1989 Т. 2. № 4. С. 376–383.
4. Половцев И.Г., Симонова Г.В. //Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 5. С. 527–531.
5. Справочник оптика-технолога. Л.: Машиностроение. 1983. 321 с.
6. Духопел И.И., Федина Л.Г. //Оптико-механич. пром-сть, 1973. № 8. С. 50–58.
7. Коломийцева Т.С., Федина Л.Г. //Оптико-механич. пром-сть, 1976. № 2. С. 32–35.

СКВ НП «Оптика» СО АН СССР,
Томск

Поступила в редакцию
18 июля 1989 г.

I. G. Polovtsev, G. V. Simonova. **Influence of Residual Aberrations in an Interferometer on the Quality of Interferometric Measurements.**

Different optical arrangements of interferometers are analyzed in the paper from the standpoint of minimizing the influence of residual aberrations on the accuracy of interferometric measurements. It is shown that this factor can be quite significant and some recommendations on estimating admissible errors in optical quality of the interferometer optical components are given.