

АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 681.787

В.Г. Максимов, И.Г. Половцев

ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПЛОСКОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИНТЕРФЕРОМЕТРА С СОВМЕЩЕННЫМИ ВЕТВЯМИ

Обсуждается вопрос о влиянии положения плоскости наблюдения интерференционной картины на погрешность контроля оптических деталей в интерферометре с совмещенными ветвями. Предложена методика выбора положения плоскости наблюдения интерференционной картины.

Схема интерферометра с совмещенными ветвями [1] наиболее часто используется для контроля качества оптических поверхностей. Среди достоинств этой схемы можно отметить такие, как простота изготовления и юстировки, универсальность оптической схемы и др. Интересной особенностью данного типа интерферометров является также устойчивость результата измерений к остаточным aberrациям измерительной ветви. Подробно этот вопрос рассмотрен в работе [4], в которой показано, что погрешность интерферометра с совмещенными ветвями хотя и существенно меньше остаточной aberrации осветительной ветви, тем не менее не равна нулю из-за трансформации остаточной aberrации на длине рабочего плеча интерферометра. Помимо рассмотренных в [4] геометрических факторов, как-то: действующее относительное отверстие, длина рабочего плеча, можно ожидать, что на качестве измерений будет сказываться и положение плоскости наблюдения интерференционной картины.

Деформация волнового фронта при его перемещении на расстояние  $\Delta r_0$  описывается соотношением [1]:

$$\Delta N_0 = \frac{\Delta r_0}{2} \left( \frac{\delta S'}{r_0} \right)^2 \sin^2 u', \tag{1}$$

где  $\delta S'$  – продольная сферическая aberrация волнового фронта с параксиальным радиусом кривизны  $\Delta r_0$ ;  $u'$  – угол между лучом, идущим от рассматриваемой точки, и оптической осью (рис. 1).

Предполагая, что  $\Delta r_0$  – расстояние от поверхности (эталона или контролируемой детали);  $r_0$  – радиус кривизны этой поверхности;  $\delta S'$  – продольная остаточная сферическая aberrация, и применяя (1) последовательно к эталонному и рабочему волновому фронту, можно рассчитать, как погрешность интерферометра  $\Delta W_{\text{макс}}$  зависит от положения плоскости наблюдения. Пример такой зависимости представлен кривой 4 на рис. 2,а. На достаточном удалении от каустики  $\Delta W_{\text{макс}}$  изменяется незначительно (тысячные доли процента) относительно  $\Delta W_{\text{макс}}$  в плоскости эталонной поверхности, но существенно увеличивается по мере приближения к каустике. Соотношение

(1) получено с использованием ряда приближений [1], поэтому была предпринята попытка получения более достоверного результата.

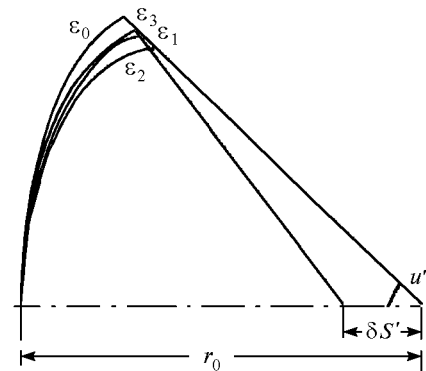


Рис. 1. Расположение волновых фронтов в рабочей части интерферометра

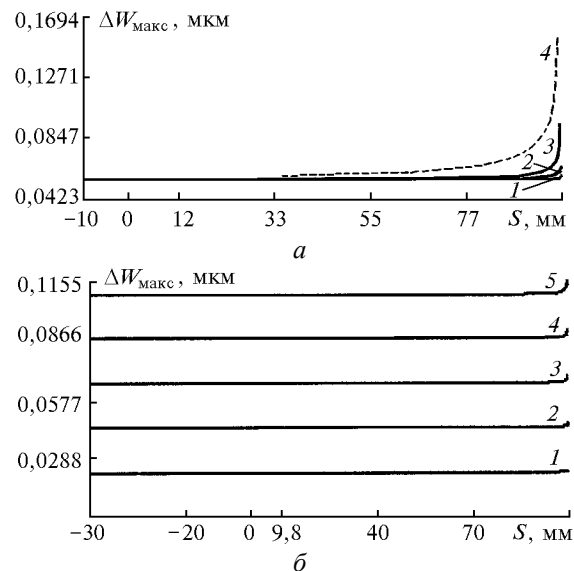


Рис. 2. Зависимость погрешности интерференционных измерений  $\Delta W_{\text{макс}}$  от положения плоскости наблюдения интерференционной картины  $S$  при  $R_{\text{ст}} = 100$  мм и  $a$  – при различных диаметрах входного зрачка эталонной поверхности  $D_p$ , мм: 1 – 100, 2 – 60, 3 – 20, 4 – 100 (с применением соотношения (1));  $b$  – при  $D_p = 100$  мм и при различных значениях остаточной aberrации  $W_{\text{ст}}$ : 1 – 0,4λ, 2 – 0,8λ, 3 – 1,2λ, 4 – 1,6λ, 5 – 2λ.

Наибольший вклад в погрешность интерферометра с совмещенными ветвями вносит сферическая aberrация третьего порядка [4]. Это обстоятельство дает основание ограничиться рассмотрением только этой aberrации.

На рис. 1 показано взаиморасположение опорного  $\varepsilon_1$  и предметного  $\varepsilon_2$  волновых фронтов относительно сферы сравнения  $\varepsilon_0$ , при внесении сферической aberrации в освещающий пучок; фронты имеют в сечении вид  $W_1 \rho^4$  и  $W_2 \rho^4$  [3], где  $W_1$  и  $W_2$  – коэффициенты сферической aberrации фронтов  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ , разница между которыми обусловлена трансформацией остаточной aberrации на расстоянии от эталонной до контролируемой поверхности. Обычно интерферометр настраивается по минимуму искривления интерференционных полос, т.е. центр контролируемой оптической поверхности находится в плоскости наилучшей установки. В этом случае предметным будет фронт  $\varepsilon_3$ , имеющий вид

$$W_2 \rho^4 - W_3 \rho^2,$$

где  $W_3$  – коэффициент дефокусировки, обусловленной смещением центра контролируемой поверхности относительно плоскости Гаусса. Разность хода  $\Delta W$  между опорным и предметным фронтами распределится по сечению пучка, как на рис. 3, а максимальная разность  $\Delta W_{\text{макс}}$  и будет составлять aberrационную погрешность интерференционных измерений для фиксированного положения плоскости наблюдения.

Чтобы рассчитать трансформацию  $\Delta W_{\text{макс}}$  при изменении положения плоскости наблюдения, нужно оценить деформацию волновых фронтов  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_3$  при движении их вдоль оптической оси. Воспользуемся прямым моделированием волновых фронтов  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_3$  на расстоянии  $S$  от плоскости эталонной поверхности путем интерполяции их по массиву точек, координаты которых получены исходя из условия равенства эйконалов при распространении волнового фронта в

однородной среде. Затем рассчитаем  $\Delta W_{\text{макс}}$ , вычисляя при помощи простых итераций расстояние между точками, в которых луч, проходящий через центр сферы сравнения, пересекает фронты  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_3$  в положении  $S$ . Заданная точность (порядка  $10^{-10}$ ) указанных численных методов позволяет достаточно точно оценить погрешность интерферометра  $\Delta W_{\text{макс}}$ , обусловленную сферической aberrацией третьего порядка.

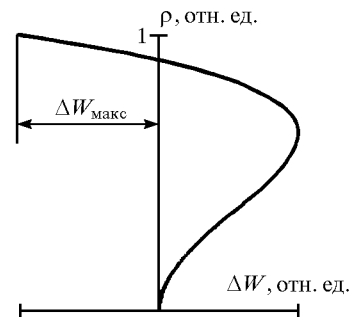


Рис. 3. Зависимость  $\Delta W$  от  $\rho$  – высоты точки пересечения лучом плоскости входного зрачка эталона – при условии, что контролируемая деталь находится в плоскости наилучшей установки

Результаты расчета для различных величин  $\Delta W_{\text{оа}}$  остаточной сферической aberrации и параметров рабочей ветви интерферометра приведены на рис. 2 и в таблице. Здесь  $D_p$  – диаметр выходного зрачка эталона;  $R_{\text{эт}}$  – радиус кривизны эталонной поверхности;  $S$  – положение плоскости наблюдения относительно эталона.

Из таблицы видно, что стабильность  $\Delta W_{\text{макс}}$  сохраняется в широком диапазоне  $S$ . Разница погрешности, вдали от каустики, при больших значениях остаточной aberrации составляет  $5 \cdot 10^{-4}$  мкм. Это достаточно малая величина, чтобы ею пренебречь даже в высокоточном интерферометре. В непосредственной близости к каустике (см. рис. 2) имеет место увеличение  $\Delta W_{\text{макс}}$ , связанное с увеличением взаимной кривизны фронтов  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_3$ .

$\Delta W_{\text{макс}}$ , мкм, для  $D_p = 100$  мм,  $W_{\text{оа}} = 2\lambda$

Относительное отверстие	S					
	$-10R_{\text{эт}}$	$-R_{\text{эт}}$	0	$0,5R_{\text{эт}}$	$1,5R_{\text{эт}}$	$10R_{\text{эт}}$
1/1	0,1080812	0,1080815	0,1080818	0,1081143	0,1080813	0,1080809
1/10	0,1080812	0,1080816	0,1080818	0,1085204	0,1080814	0,1080812

Таким образом, проведенный расчет показал, что интерферометр с совмещенными ветвями имеет такие достоинства, как устойчивость к расфокусировке наблюдательной системы и постоянство погрешности при изменении положения плоскости наблюдения в широких пределах. Результаты, полученные с использованием соотношения (1), не противоречат этому выводу и являются оценкой погрешности сверху. Следовательно, с точки зрения влияния остаточных aberrаций на качество интерференционных измерений, поло-

жение плоскости наблюдения в интерферометре с совмещенными ветвями может быть выбрано произвольно вдали от каустики.

Традиционно разработчики интерферометров идут по следующему пути. Плоскость наблюдения помещается в плоскости входного зрачка контролируемой детали, обеспечивая при этом возможность перефокусировки (в зависимости от значения  $R_{\text{кд}}$ ) и зуммирования (для обеспечения масштаба) в наблюдательной части [7]. Однако в этом случае весьма про-

блематичным представляется возможность коррекции дисторсионных масштабных искажений интерференционной картины, поскольку из-за перефокусировки и зуммирования изменяется схема наблюдательной части, а значит, и значение дисторсии.

Помимо этого при контроле высокоапертурных оптических деталей часто встречается ситуация, когда апертура интерферограммы определяется диаметром зрачка эталонной поверхности, и тогда дифракционные явления на краю эталона будут съедать часть информации о контролируемой детали, но на этот раз не на краю, а в пределах светового диаметра.

Поэтому более перспективной представляется схема, когда плоскость наблюдения расположена в плоскости входного зрачка эталонной поверхности. В этом случае отпадает необходимость перефокусировки наблюдательной системы, так как плоскость наблюдения фиксирована. Учет дисторсионных искажений в этом случае может быть выполнен достаточно про-

сто, например путем цифровой калибровки интерференционного поля.

Результаты, приведенные выше, дают основание для применения этой схемы наблюдения.

1. *Пурыев Д.Т.* Методы контроля оптических асферических поверхностей. М.: Машиностроение, 1976. 261 с.
2. *Коломийцев Ю.В.* Интерферометры. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1976. 296 с.
3. *Сокольский М.Н.* Допуски и качество оптического изображения. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. 221 с.
4. *Максимов В.Г., Половцев И.Г.* Влияние остаточных aberrаций на погрешность интерферометра с совмещенными ветвями // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. N 8. С. 1131 – 1136.
5. *Духонел И.И., Симоненко Т.В.* Деформация интерференционных полос при неточной фокусировке на исследуемый объект // ОМП. 1977. N 11. С. 18.
6. *Коломийцева Т.С.* Искажение интерференционной картины при контроле сферических поверхностей // ОМП. 1990. N 12. С. 15.
7. *Mark IV XP Interferometer sistem.* Рекламный проспект фирмы L.O.T. GmbH. Darmstad.

Конструкторско-технологический институт «Оптика»,  
Томск

Поступила в редакцию  
11 июля 1997 г.

*V.G. Maksimov, I.G. Polovtsev.* **Influence of Position of Observation Plane on the Error of Fiseau Interferometer.**

Influence of observation plane position on the error of the optical elements control by Fiseau interferometer is discussed. We propose a technique to choice the plane position for observation of interferation pattern.