

В. П. Коронкевич, Г. А. Ленкова

(Новосибирск)

ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ДИФРАКЦИОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Проведены аналитические исследования полной и минимизированной инструментальных погрешностей дифракционного интерферометра с общим ходом интерферирующих лучей. Интерферометр основан на зонной пластинке и предназначен для контроля формы поверхностей и зеркал 2-го порядка. В анализируемой схеме интерферируют неинвертированные волновые фронты. Показано, что характер изменения инструментальной погрешности относительно координат контролируемой поверхности не зависит от значения ее конического параметра. При фокусном расстоянии зонной пластинки, значительно меньшем радиуса кривизны поверхности, контроль сферических деталей осуществляется нулевым методом, а при контроле асферических деталей в результаты измерений вводятся предварительно рассчитанные поправки. Полученная зависимость между величиной смещения зеркала и инструментальной погрешностью позволяет рассчитать допустимую точность установки зеркала.

Введение. Дифракционные интерферометры с общим ходом референтного (опорного) и измерительного пучков [1–4], предназначенные для контроля формы поверхностей 2-го порядка (сферических и асферических), имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными интерферометрами Физо, Тваймана – Грина и другими [5]. Они не требуют эталонных поверхностей, громоздких дорогостоящих светоделителей и объективов, что позволяет создавать компактные устройства с устойчивой интерференционной картиной, мало подверженной механическим колебаниям и температурным изменениям среды. Собственно интерферометр состоит из зонной пластинки и контролируемой поверхности. Зонная пластинка выполняет одновременно функции светоделителя и линзы.

В работе [1] оптические схемы дифракционных интерферометров классифицируются в зависимости от положения контролируемой поверхности относительно зонной пластинки. В первой модификации центр кривизны поверхности находится вблизи центра зонной пластинки или совпадает с ним, во второй и третьей – совпадает с отрицательным (–1-м) или положительным (+1-м) дифракционным фокусом зонной пластинки соответственно. В основе этой классификации лежит конструктивный принцип, а по существу все схемы дифракционных интерферометров можно разделить на две группы. В схемах первой группы (первая модификация) интерферируют неинвертированные волновые фронты, а в схемах второй группы (вторая и третья модификации) – инвертированные, т. е. повернутые вокруг оптической оси один относительно другого на 180° .

Схемы первой группы, в которых отсутствует поворот волновых фронтов, имеют ряд существенных достоинств. Они малочувствительны к качеству изготовления оптических элементов и аберрациям освещающего пучка. В центре интерференционного поля разность хода всегда равна нулю и наблюдается максимум интенсивности, поэтому характерные центральные засветки практически не влияют на результат измерения. Отсутствуют жесткие требования к пространственной и временной когерентности источника света, так как интерферирующие лучи происходят из одного луча и максимальная разность их хода не превышает нескольких длин волн. Интерферометр может работать не только с монохроматическими источниками света, но и с источниками, имеющими широкий спектр излучения, такими, как полупроводниковый лазер, светодиод или лампа накаливания (источник белого света).

Наряду с указанными преимуществами схемы первой группы имеют недостаток, который заключается в наличии инструментальной погрешности. По этой причине распространение получили в основном дифракционные интерферометры второй группы (с инвертированными волновыми фронтами). Применение интерферометров первой группы (с неинвертированными волновыми фронтами) известно только для особого случая контроля параболической поверхности, когда нулевая компенсация аберраций достигается при равенстве фокусных расстояний зонной пластинки и параболы [3]. Последнее обстоятельство может приводить к существенному увеличению габаритов прибора. Подробный анализ инструментальной погрешности дифракционных интерферометров с неинвертированными волновыми фронтами ранее не проводился. В работе [4] сообщается о первых результатах применения интерферометров этой группы для контроля сферических и параболических поверхностей.

Цель данной работы – аналитическое исследование инструментальной погрешности дифракционного интерферометра с неинвертированными волновыми фронтами и оценка возможностей и условий его применения для контроля поверхностей 2-го порядка (сферических и асферических).

Оптическая схема. На рис. 1 представлена принципиальная оптическая схема дифракционного интерферометра. Центр зонной пластинки совпадает с центром кривизны зеркала. В интерферометр поступает сходящийся пучок лучей, сформированный от источника света 1 с помощью объектива 2 и отраженный от светоделительной пластины 3. Часть пучка [0], проходящая через зонную пластинку 4 без отклонения (0-й порядок дифракции), фокусируется в центре зеркала 5 в точке A_1 . Этот пучок не искажается аберрациями зеркала и функционирует как опорный. Другая часть [+1], дифрагирующая в +1-й порядок, формирует измерительный пучок, который сначала фокусируется в промежуточной точке A_2 , а затем заполняет расходящимся пучком апертуру зеркала. После отражения от зеркала и вторичного прохождения через зонную пластинку референтный пучок дифрагирует в +1-й порядок, а измерительный проходит без отклонения. В результате после прохождения зонной пластинки оба пучка ([0, +1], [+1, 0]) идут практически по одному и тому же пути и фокусируются вблизи точки A_3 . Далее пучки проходят через диафрагму 6 и объектив 7 и образуют в плоскости фотоматрицы 8 интерференционные полосы, которые несут информацию о форме поверхности зеркала. С помощью объектива 7 на фотоматрицу проектируется также поверхность зеркала.

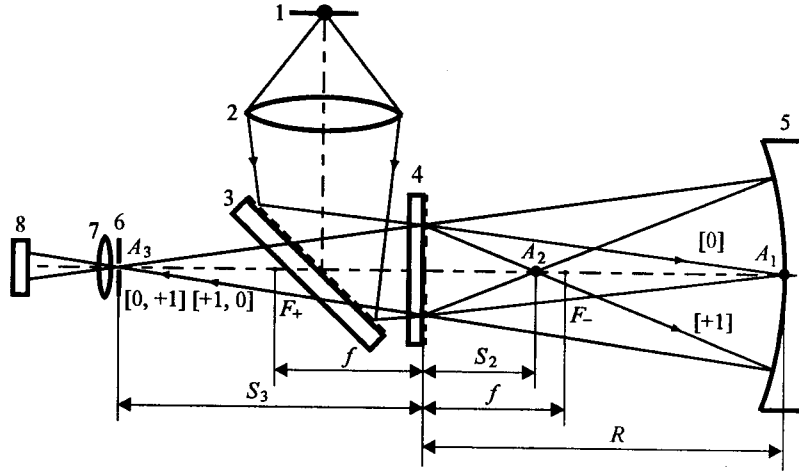


Рис. 1. Оптическая схема дифракционного интерферометра

Если расстояние между зонной пластинкой и зеркалом точно равно радиусу кривизны зеркала, то точки фокусировки референтного и измерительного пучков совпадают в точке A_3 . В этом случае на основании формул геометрической оптики расстояния от точек A_2 и A_3 (изображения точки A_1 , которые формируются зонной пластинкой как линзой в проходящем и отраженном от зеркала свете) до пластинки соответствуют следующим соотношениям:

$$S_2 = fR/(R + f), \quad (1)$$

$$S_3 = fR/(R - f), \quad (2)$$

где f – фокусное расстояние зонной пластинки; R – расстояние предмета от зонной пластинки, равное радиусу кривизны зеркала. Из (1) и (2) видно, что если $f \ll R$, то S_2 и S_3 близки по значению к f , но $S_2 < f$, а $S_3 > f$. Точки A_2 и A_3 расположены от отрицательного (F_-) и положительного (F_+) фокусов соответственно на расстояниях

$$\Delta = f^2/(R + f), \quad \Delta' = f^2/(R - f). \quad (3)$$

Для зеркала точка A_2 является предметом, а точка A_3 – изображением. Эти точки расположены от зеркала на расстояниях $S_1 = R - S_2$ и $S'_1 = R + S_3$ соответственно. S_1 и S'_1 связаны соотношением

$$S'_1 = (S_1 R)/(2S_1 - R). \quad (4)$$

Инструментальная погрешность. Разные условия формирования измерительного и опорного пучков приводят в рассматриваемой схеме к возникновению инструментальной погрешности. Зонная пластинка работает в измерительном плече интерферометра в сходящемся пучке, а в опорном – в расходящемся. В первом случае сферические aberrации вносятся при изображении точки A_1 в точку A_2 , а во втором – точки A_1 в точку A_3 . В измерительном плече волновой фронт дополнительно искажается при изображении в зеркале точки A_2 , которая не является анаберрационной, в точку A_3 (для сфе-

рической поверхности анаберрационная точка – центр кривизны, а для параболической – фокус). В результате инструментальная погрешность складывается из волновой аберрации, возникающей при формировании изображения в зеркале, и разности сферических аберраций, вносимых зонной пластинкой при прохождении света в измерительном и опорном плечах.

Рассмотрим инструментальную погрешность дифракционного интерферометра в общем случае, т. е. когда контролируемая поверхность имеет произвольный конический параметр k , связанный с эксцентриситетом e соотношением $k = -e^2$. Известно [6], что при изображении предмета в зеркале 2-го порядка возникает продольная сферическая аберрация

$$\Delta S'_m = -u^2 \frac{kS_1^2 + (R - S_1)^2}{R(R - 2S_1)^2}, \quad (5)$$

где u – радиальная координата на поверхности зеркала; R – радиус кривизны поверхности в параксиальной области; S_1 – расстояние от зеркала до предмета. Волновая аберрация δ_m может быть определена из соотношения [7]:

$$\delta_m = - \int_0^u \Delta S'_m \frac{u}{(S'_1)^2} du, \quad (6)$$

где S'_1 – расстояние от зеркала до изображения. Подставляя (4) и (5) в (6) и производя замену $S_1 = R - S_2$, получаем

$$\begin{aligned} \delta_m &= - \frac{u^4}{4R^2} \left(\frac{2S_1 - R}{S_1^2} - \frac{k+1}{R} \right) = \\ &= - u^4 \left[\frac{1}{R(R - S_2)} \left(\frac{1}{2R} - \frac{1}{4(R - S_2)} \right) - \frac{k+1}{4R^3} \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Соотношение (7) совпадает по абсолютному значению с аналитическим выражением оптической разности хода между центральным и крайними лучами, полученным в [3]. С учетом (1) преобразуем (7) в

$$\delta_m = (u^4 / 4R^3) [k + (f/R)^2]. \quad (8)$$

Структура зонной пластинки в рассматриваемой схеме может быть произвольной, например рассчитанной на параллельный пучок. Сферические аберрации, вносимые пластинкой, зависят только от ее положения в оптической схеме как изображающего элемента. В измерительном и опорном плечах интерферометра зонная пластинка работает как положительная линза, предметом для которой является точка A_1 . Однако в первом случае пластинка расположена в сходящемся пучке и вносит аберрации δ_{zt} , а во втором – в расходящемся и вносит аберрации δ_{zr} . Если применяется пластинка Френеля, в которой радиусы зон прямо пропорциональны корням квадратным из последовательности целых чисел, то δ_{zt} и δ_{zr} равны [8]:

$$\delta_{zt} = (\rho^4 / 8f^3) [3(f/R)^2 + 3(f/R) + 1], \quad (9)$$

$$\delta_{zr} = (\rho^4 / 8f^3) [3(f/R)^2 - 3(f/R) + 1], \quad (10)$$

где ρ – радиальная координата на зонной пластинке; R – расстояние от зонной пластинки до предметной точки, равное радиусу кривизны зеркала.

Из (9) и (10) следует, что разность aberrаций, вносимых зонной пластинкой в измерительный и референтный пучки, имеет вид

$$\delta_z = \delta_{zi} - \delta_{zr} = 3\rho^4 / 4Rf^2. \quad (11)$$

Выше указывалось, что $f \ll R$, а S_2 близко по значению к f , следовательно, $\rho \approx uf/R$ и (11) преобразуется в

$$\delta_z = (3u^4 / 4R^3)(f/R)^2. \quad (12)$$

На основании (8) и (12) сферическая aberrация схемы (полная инструментальная погрешность)

$$\delta = \delta_m + \delta_z = (b/4R^3)u^4, \quad (13)$$

где $b = k + 4(f/R)^2$. Из (13) следует, что в центре зеркала ($u = 0$) aberrация равна нулю, а в крайних точках ($u = D/2$, где D – диаметр зеркала) достигает максимального значения. Инструментальную погрешность можно уменьшить, если снизить aberrацию до нуля также при некотором выбранном значении апертуры зеркала ($u = u_x$). Для этого необходимо сдвинуть зеркало вдоль оси относительно зонной пластинки на величину c . При этом выходные зрачки, т. е. точки фокусировки измерительного и референтного пучков, сместятся относительно точки A_3 на $c'_i = \frac{-2c(R^2 + f^2)}{(R - f)^2}$ и $c'_r = \frac{-2cf^2}{(R - f)^2}$ соответственно, а взаимно – на $\Delta_c = c'_r - c'_i$. Если $f \ll R$, то практически изменяется положение только зрачка в измерительном плече и $\Delta_c \approx 2c$. В этом случае вводимая компенсирующая aberrация, соответствующая разности хода интерферирующих пучков с обратным знаком [9], имеет вид

$$\delta_c = -c(u/R)^2. \quad (14)$$

Приравнивая δ (13) к δ_c (14) при $u = u_x$, определяем

$$c = -(b/4R)u_x^2. \quad (15)$$

На основании (13)–(15) зависимость остаточной минимизированной инструментальной погрешности δ^0 от радиальной координаты u можно представить в виде

$$\delta^0 = \delta - \delta_c = -(b/4R^3)u^2(u_x^2 - u^2). \quad (16)$$

Полагая далее, что u и u_x – относительные координаты (выраженные в значениях $D/2$), преобразуем выражения (13), (15) и (16) в (13а), (15а) и (16а):

$$\delta = \delta_m + \delta_z = (bD^4/64R^3)u^4, \quad (13a)$$

$$c = -(bD^2/16R)u_x^2, \quad (15a)$$

$$\delta^0 = -(bD^4/64R^3)u^2(u_x^2 - u^2). \quad (16a)$$

При $u_x = 0$ и $u_x = 1$ формула (16а) переходит в соотношения, первое из которых соответствует случаю полной волновой аберрации (13а), а второе – компенсации аберраций в крайних точках апертуры зеркала:

$$\delta^0 = -(bD^4/64R^3)u^2(1 - u^2). \quad (17)$$

На рис. 2 показаны графики функций инструментальной погрешности δ^0 (16а), нормированной на коэффициент $a = -bD^4/64R^3$, постоянный при заданных параметрах зеркала и зонной пластинки. На рисунке $y = \delta^0/a$, следовательно,

$$y = u^2(u_x^2 - u^2). \quad (16б)$$

Графики $y_1 - y_9$ построены для смещений зеркала c (15а), приводящих к компенсации аберраций до нуля на расстояниях $u_x = 0; 0,4; 0,6; 0,8; 0,95; 1,0; 1,2; 1,4$ и $1,6$ от центра. Значения $u_x > 1$ соответствуют смещениям, при которых точки компенсации аберраций находятся за пределами апертуры зеркала. Графики характеризуют также изменения разности хода между измерительным и опорным пучками в направлении от центра к краю зеркала или

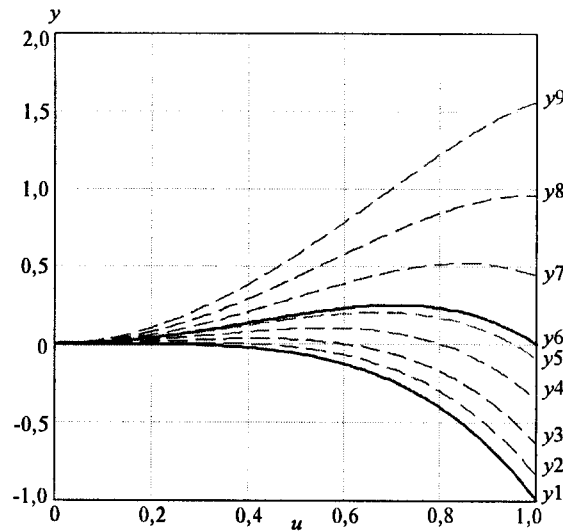


Рис. 2. Графики функций нормированной инструментальной погрешности

форму полос, наблюдаемых в дифракционном интерферометре при идеальной форме контролируемой поверхности.

Из выражения (16б) и рис. 2 следует, что при $u = 0,707u_x$ наблюдается экстремум функции (изгиб интерференционных полос). В этих положениях $y = 0,25u_x^4$ и aberrация составляет

$$\delta_{\max}^0 = 0,25au_x^4 = -(bD^4/256R^3)u_x^4. \quad (18)$$

При $u_x = 1$ экстремум функции (16б) находится в положении $u = 0,707$, при $u_x = 1,41$ – на краю поля ($u = 1$), при $u_x \geq 1,41$ – за пределами апертуры зеркала. При $u = 1$ инструментальная погрешность δ^0 (16а) принимает минимальное значение

$$\delta_{\min}^0 = a(u_x^2 - 1) = -(bD^4/64R^3)(u_x^2 - 1). \quad (16в)$$

На основании соотношений (18) и (16в) можно представить максимальную инструментальную погрешность как $\delta_{\max} = \delta_{\max}^0 - \delta_{\min}^0 = ay_x$ или после нормировки в виде

$$\begin{aligned} y_x &= 1 - u_x^2 + 0,25u_x^4 \quad \text{при } 0 \leq u_x \leq 1; \\ y_x &= 0,25u_x^4 \quad \text{при } 1 < u_x \leq 1,41; \\ y_x &= -(1 - u_x^2) \quad \text{при } 1,41 < u_x \leq 1,6. \end{aligned} \quad (19)$$

Значение погрешности δ_{\max} с обратным знаком соответствует удвоенной величине PV (pike-valley) для картины интерференционных полос.

Из анализа выражений (19) следует, что инструментальная погрешность $\delta_{\max} = ay_x$ принимает при $u_x = 1$ минимальное значение

$$\delta_{\max} = -bD^4/256R^3. \quad (20)$$

Это значение в 4 раза меньше, чем полная волновая aberrация δ^0 (13а) в крайних точках апертуры контролируемой поверхности (при $u = 1$), и имеет по сравнению с ней обратный знак. Минимизация инструментальной погрешности существенно зависит от точности выполнения условия $u_x = 1$. Дифференцируя первое из уравнений (19) относительно u_x , можно определить, что при отклонении u_x от единицы, например, на 5% (соответствует переходу от кривой убк кривой у5 на рис. 2), значение δ_{\max} увеличивается на 20%. Для наглядности на рис. 3, а показана функция y_x (19), а на рис. 3, б – функция смещения зеркала $y_c = c/d = u_x^2$, представляющая функцию (15а), нормированную на коэффициент $d = -bD^2/16R$. Функции y_x и y_c соответствуют значениям u_x , для которых построены функции на рис. 2.

Минимизация инструментальной погрешности при контроле сферических и параболических поверхностей. Рассмотрим особенности инструментальной погрешности для конкретных, наиболее распространенных, форм поверхностей: сферической и параболической, хотя аналогично можно анализировать погрешность для любой формы поверхности 2-го по-

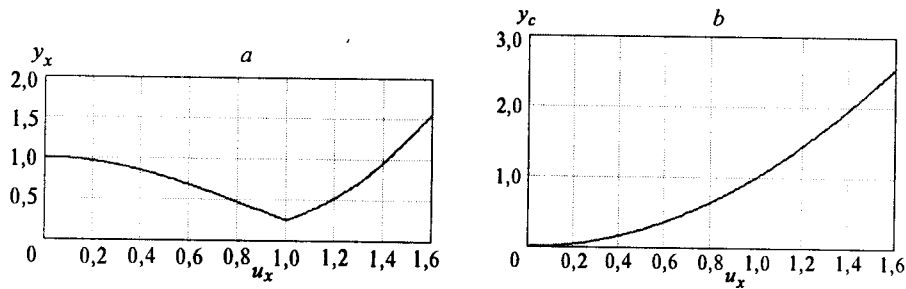


Рис. 3. Зависимости инструментальной погрешности и смещения зеркала от u_x : y_x (19) (a) и c (15a) (b)

рядка. Подставляя $b = k + 4(f/R)^2$ в (17), (20) и (15a), получаем функции δ^0 , δ_{\max} и c в зависимости от параметров схемы k , R , D и f в виде следующих соотношений:

$$\delta^0 = -[k + 4(f/R)^2](D^4/64R^3)u^2(1-u^2), \quad (21)$$

$$\delta_{\max} = -[k + 4(f/R)^2](D^4/256R^3), \quad (22)$$

$$c = -\{[k + 4(f/R)^2]D^2/16R\}u_x^2. \quad (23)$$

Для сферической поверхности $k = 0$ и, следовательно,

$$\delta^0 = -(D^4/16R^3)(f/R)^2 u^2(1-u^2), \quad (21a)$$

$$\delta_{\max} = -(D^4/64R^3)(f/R)^2, \quad (22a)$$

$$c = -(D^2/4R)(f/R)^2 u_x^2. \quad (23a)$$

Из (21a) и (22a) следует, что инструментальная погрешность при контроле сферических поверхностей может быть снижена практически до нуля, если $f \ll R$. При этих условиях параметры зонной пластинки не влияют на габариты устройства и, кроме того, одна и та же зонная пластинка может применяться в широком диапазоне изменения R . Так, при фокусном расстоянии зонной пластинки f , равном 25 мм, инструментальная погрешность δ_{\max} не превышает 0,006–0,03 мкм (0,01–0,05 интерференционной полосы) в интервале относительных апертур зеркал $D/R = 1/10$ – $1/5$ соответственно, что удовлетворяет промышленным допускам на изготовление оптических поверхностей.

Сравнение (21) и (22) с (21a) и (22a) показывает, что инструментальные погрешности δ^0 (21) и δ_{\max} (22) фактически складываются из отступлений контролируемой поверхности от сферической, имеющей такой же радиус кривизны, и погрешностей δ^0 (21a) и δ_{\max} (22a), возникающих при контроле сферической поверхности. В величине смещения c (23) также содержатся

две составляющие, из которых одна определяется коническим параметром контролируемой поверхности k , а вторая равна смещению сферической поверхности (23а). Например, в случае параболической поверхности ($k = -1$) имеем

$$\delta^0 = (D^4/64R^3)u^2(1-u^2) - (D^4/16R^3)(f/R)^2 u^2(1-u^2), \quad (21б)$$

$$\delta_{\max} = (D^4/256R^3) - (D^4/64R^3)(f/R)^2, \quad (22б)$$

$$c = (D^2/16R)u_x^2 - (D^2/4R)(f/R)^2 u_x^2. \quad (23б)$$

Из (21б) и (22б) видно, что инструментальная погрешность при контроле параболических поверхностей может быть снижена до нуля, если $f/R = 1/2$. Из этого условия следует, что фокус f зонной пластинки зависит от радиуса кривизны R контролируемой поверхности, т. е. для каждой поверхности нужна своя пластинка. При больших значениях R это обстоятельство может привести также к существенному увеличению габаритов устройства. Если $f \ll R$, то вторые части соотношений (21б) и (22б) будут пренебрежимо малы, а δ^0 и δ_{\max} сведутся к отклонениям контролируемой поверхности от сферической:

$$\delta^0 = (D^4/64R^3)u^2(1-u^2), \quad (21в)$$

$$\delta_{\max} = D^4/256R^3. \quad (22в)$$

Контроль параболических поверхностей в этом случае может осуществляться не нулевым методом, а путем сопоставления формы интерференционных полос с теоретической кривой, построенной в соответствии с (21в). Причем фокус зонной пластинки может оставаться постоянным в широком диапазоне изменения R , так же как в случае сферических поверхностей при $f \ll R$. Следует отметить, что характеристики, аналогичные для сферических ((21а) и (22а)) и параболических ((21в) и (22в)) поверхностей, имеют противоположные знаки. Кроме того, при одних и тех же параметрах для сферических поверхностей эти характеристики меньше, чем для параболических, в соотношении, равном $0,25(R/f)^2$.

Величина смещения c , необходимая для достижения минимального значения инструментальной погрешности, в случае параболы и при $f \ll R$ фактически соответствует

$$c = (D^2/16R)u_x^2. \quad (23в)$$

Как видно из (23а) и (23в), для установки в положение $u_x = 1$, т. е. для достижения минимальной инструментальной погрешности, сферическое зеркало должно приближаться к зонной пластинке, а параболическое удаляться от нее. Причем в первом случае смещение меньше, чем во втором случае в таком же соотношении, как для погрешностей. Например, при $R = 1499,7$ мм, $D = 150$ мм и $f = 50$ мм для сферической поверхности ($k = 0$) $c = -4,16 \cdot 10^{-3} u_x^2$ мм (23а), а для параболической поверхности ($k = -1$)

$c = 0,94u_x^2$ мм (23в), т. е. для первой поверхности c приблизительно в 225 раз меньше, чем для второй.

Чтобы оценить точность установки зеркала интерферометра в положение минимальной инструментальной погрешности, представим максимальную погрешность (19) в интервале значений u_x от 0 до 1 как

$$\delta_{\max} = a(1 - u_x^2 + 0,25u_x^4), \quad (24)$$

а затем через смещение c (15а) в виде

$$\delta_{\max} = a(1 - c/d + 0,25c^2/d^2), \quad (24а)$$

где $a = -bD^4/64R^3$, $c = du_x^2$, $d = -bD^2/16R$. Дифференцируя (24а) по c и полагая далее, что $c = d$ при $u_x = 1$, получаем после подстановки значений a и d в дифференциальное уравнение следующее соотношение:

$$\Delta c = (8R^2/D^2)\Delta\delta_{\max}, \quad (25)$$

где Δc – смещение зеркала относительно положения $u_x = 1$; $\Delta\delta_{\max}$ – изменение инструментальной погрешности. Такое же соотношение для Δc и $\Delta\delta_{\max}$ получается при рассмотрении (19) в интервале значений u_x от 1 до 1,41. Таким образом, точность установки Δc в положение минимальной инструментальной погрешности вблизи $u_x = 1$ не зависит от абсолютного значения δ_{\max} , а определяется только допустимым отклонением от него $\Delta\delta_{\max}$ и параметрами контролируемой поверхности.

Для иллюстрации на рис. 4, $a1 - d1$ и $a2 - d2$ представлены графики изменения погрешности (в виде числа длин волн N) и распределения интенсивности в интерференционной картине I в зависимости от радиуса нормированной апертуры зеркала u для четырех положений зеркала (23в) относительно зонной пластинки, соответствующих $u_x = 0$ ($N1$ и $I1$); 0,4 ($N2$ и $I2$); 1,0 ($N6$ и $I6$) и 1,4 ($N8$ и $I8$). На рис. 4, $a3 - d3$ показаны смоделированные на компьютере картины интерференционных полос, характерные для вышеуказанных значений u_x , при установке центра зеркала на оптической оси (кольца) и при его смещении в поперечном направлении относительно оси (полосы). Графики и интерференционные картины рассчитаны на основе (16а) для идеальной параболической поверхности (зеркала) с параметрами: $R = 1499,7$ мм, $D = 150$ мм и длины волны $\lambda = 0,65$ мкм. Рис. 4, $a1 - a3$ соответствуют положению зеркала относительно зонной пластинки на расстоянии, равном радиусу кривизны, когда наблюдается полная инструментальная погрешность (13а); рис. 4, $b1 - b3$ – положению зеркала, смещенного относительно предыдущего на $c = 0,15$ мм, при котором в центральной части поля (приблизительно до $0,5u$) наблюдаются прямые полосы. Рис. 4, $c1 - c3$ соответствуют минимизированной инструментальной погрешности (17), при этом погрешность имеет максимальное значение (20) в точке $u = 0,707$, а $c = 0,91$ мм. На рис. 4, $d1 - d3$ показаны графики и интерференционные полосы для положения зеркала ($c = 1,79$ мм), при котором максимальная погрешность наблюдается на краю апертуры зеркала.

По аналогии с обычными методами контроля формы поверхности по полосам Ньютона [5] абerrацию (13а) можно назвать «вершинной» (одно-

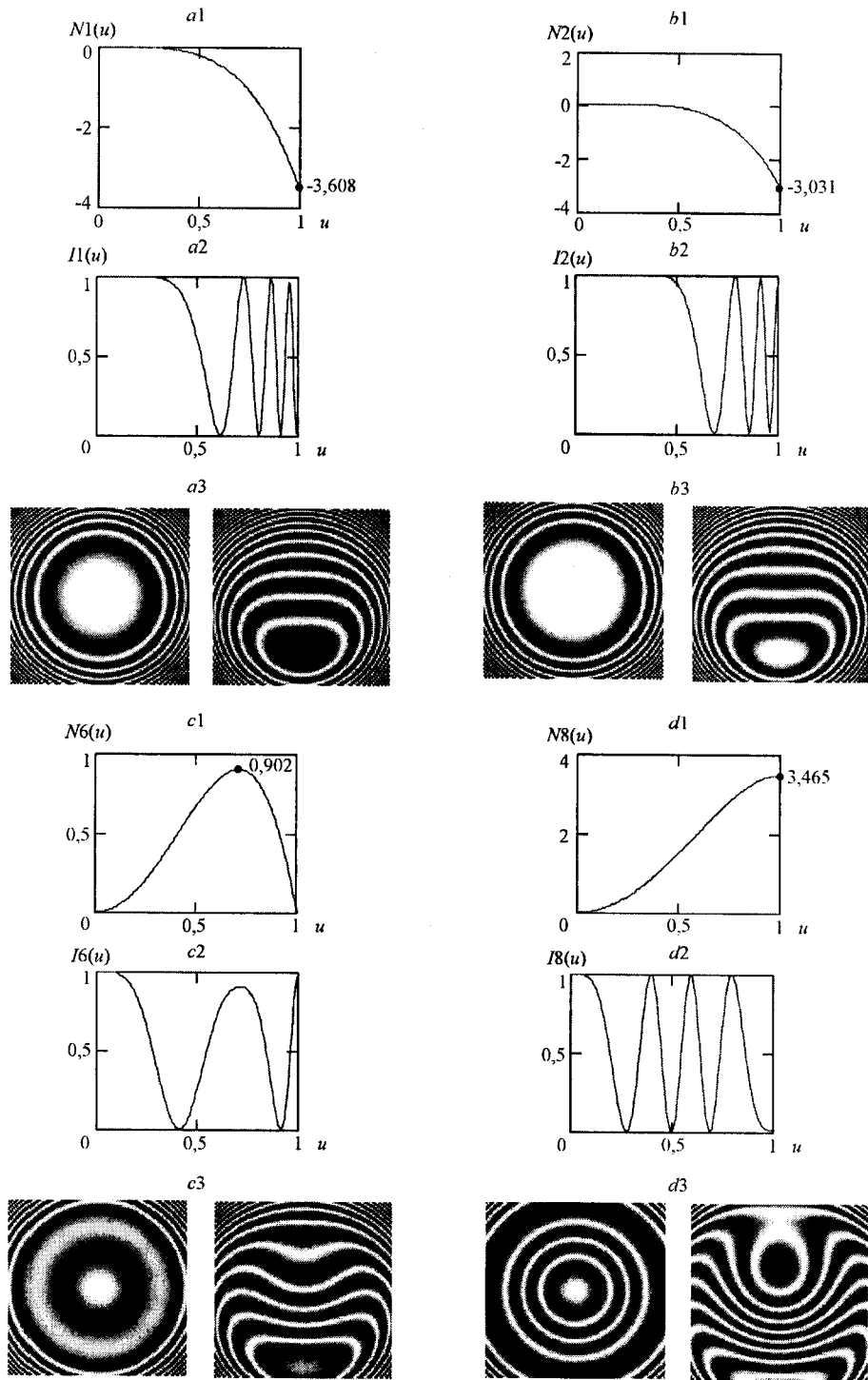


Рис. 4. Изменения инструментальной погрешности ($\lambda = 0,65$ мкм) в пределах апертуры идеальной параболы ($R = 1499,7$ мм, $D = 150$ мм) для четырех ее положений относительно зонной пластинки ($f = 25$ мм)

ческой), а ее половинное значение δ_a – вершинной асферичностью поверхности. На основании (13а) в относительных координатах

$$\delta_a = -(bD^4/128R^3)u^4. \quad (26)$$

Смещая контролируемую поверхность ближе к зонной пластинке или дальше от нее, мы переходим к ее сравнению с ближайшей сферой и уменьшаем наблюдаемую асферичность. Отступление Δ ближайшей сферы от вершинной выражается через разность их радиусов кривизны ΔR как

$$\Delta = \Delta R(D^2/8R^2)u^2, \quad (27)$$

где u – нормированная радиальная координата на поверхности зеркала. Приравнявая значения вершинной асферичности из (26) к Δ из (27) в крайних положениях апертуры зеркала, т. е. при $u = 1$, можно определить, что

$$\Delta R = -bD^2/16R. \quad (28)$$

Отступление контролируемой поверхности от ближайшей сферы δ_a^0 , называемое также «трехточечной» асферичностью, с учетом (28) определяется как

$$\delta_a^0 = \delta_a - \Delta = (bD^4/128R^3)u^2(1-u^2). \quad (29)$$

δ_a^0 (29) в сравнении с δ^0 (17) в 2 раза меньше по абсолютному значению. Из выражения (29) следует, что максимальное значение $\delta_{a\max}^0$ наблюдается при $u = 0,707$. Это значение в 4 раза меньше, чем отступление от вершинной сферы (26) в крайних положениях апертуры зеркала (при $u = 1$), и имеет обратный знак.

В оптическом производственном контроле результаты измерения отклонений контролируемой поверхности от ближайшей сферы сравниваются с теоретической кривой, рассчитанной по формуле, аналогичной (29). Так как расчетная кривая асферичности зависит от параметров поверхности, то представляет интерес определить, с какой точностью необходимо знать значения этих параметров. Например, при контроле параболических поверхностей $b = -1 + 4(f/R)^2$ и максимальное значение трехточечной асферичности (29) при $f \ll R$ без учета знака имеет вид

$$\delta_{a\max}^0 = D^4/512R^3. \quad (30)$$

Дифференцируя (30), находим, что при допустимом отклонении $\Delta\delta_{a\max}^0$ точность задания параметров D и R составляет

$$\Delta D = \frac{128}{(D/R)^3} \Delta\delta_{a\max}^0, \quad \Delta R = \frac{170,7}{(D/R)^4} \Delta\delta_{a\max}^0. \quad (31)$$

Как видно из (31), наибольшие требования предъявляются к диаметру контролируемой поверхности D . Например, при $\Delta\delta_{a\max}^0 = 0,01$ мкм ($\sim 0,03$ полосы)

точность задания D составляет $\Delta D = 0,16-1,28$ мм в интервале относительных апертур $D/R = 1/5-1/10$ соответственно.

Заключение. Получены аналитические выражения для расчета полной и минимизированной инструментальных погрешностей дифракционного интерферометра с неинвертированными волновыми фронтами, предназначенного для контроля поверхностей 2-го порядка. Показано, что характер изменения инструментальной погрешности относительно координат контролируемой поверхности не зависит от значения конического параметра. Определено, что для поверхностей с коническим параметром, отличным от нуля, инструментальная погрешность состоит из двух частей: отклонения контролируемой поверхности от сферы, имеющей такой же радиус кривизны, и инструментальной погрешности, возникающей при контроле сферической поверхности. Если фокусное расстояние зонной пластинки значительно меньше радиуса кривизны контролируемой поверхности, то при контроле сферических поверхностей минимизированная инструментальная погрешность практически равна нулю, а при контроле асферических (в частности параболических) поверхностей состоит только из отклонения контролируемой поверхности от сферической. В последнем случае результат измерения должен сравниваться с расчетной инструментальной погрешностью, наблюдаемой при контроле поверхности идеальной формы. Таким образом, показано, что дифракционный интерферометр с неинвертированными волновыми фронтами может применяться для контроля сферических поверхностей как нулевой метод, а для контроля асферических поверхностей как метод с введением в результаты измерений поправок, предварительно рассчитанных для данной поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smartt R. N. Zone plate interferometer // Appl. Opt. 1974. 13. P. 1093.
2. Nomura T., Kamiya K., Miyashiro H. et al. Method to obtain a clear fringe pattern with a zone-plate interferometer // Appl. Opt. 1995. 34. P. 2187.
3. Huand J., Ohyama N., Honda T. A null test of conic surfaces in zone plate interferometer // Opt. Commun. 1989. 72. P. 17.
4. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Маточкин А. Е. Синтетическое пробное стекло // Автометрия. 2002. 38, № 3. С. 20.
5. Оптический производственный контроль /Под ред. Д. Малакары. М.: Машиностроение, 1985.
6. Михельсон Н. Н. Оптические телескопы. Теория и конструкция. М.: Наука, 1976.
7. Максудов Д. Д. Астрономическая оптика. Л.: Наука, 1979.
8. Ленкова Г. А. К вопросу о безабберационных дифракционных линзах // Автометрия. 2000. № 3. С. 126.
9. Захарьевский А. Н. Интерферометры. М.: ГИОМ, 1952.

*Институт автоматки и электрометрии СО РАН,
E-mail: lenkova@iae.nsk.su*

*Поступила в редакцию
6 июня 2003 г.*