

И.Г. Половцев

ВЫСОКОТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИУСОВ КРИВИЗНЫ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Институт оптического мониторинга СО РАН, Томск

Поступила в редакцию 13.05.98 г.

Принята к печати 15.12.98 г.

Анализируются погрешности автоколлимационного способа измерения радиуса кривизны сферических оптических поверхностей с использованием интерферометра.

Предложена методика высокоточных ($\Delta R/R \approx 10^{-5}$) измерений. Суть ее заключается в итерационном физическом уточнении положения детали по результатам обработки интерферограмм. Получено соотношение, связывающее погрешность измерений с характеристиками цифрового интерферометра.

Хорошо известна методика измерения радиусов кривизны с помощью автоколлимационного микроскопа [1]. Эта методика заключается в измерении перемещения контролируемой детали между двумя ее положениями (рис. 1). Первый отсчет делается при положении вершины в плоскости расположения изображения сетки микроскопа 1, второй – при размещении сферической поверхности в положении, конфокальном этому изображению. В результате обоих отражений наблюдается автоколлимационное изображение. Отсюда название методики.

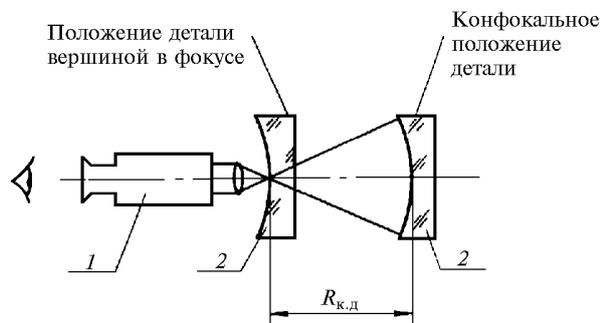


Рис. 1. Геометрия измерения радиуса кривизны автоколлимационным способом: 1 – прибор, контролирующий продольные наводки; 2 – измеряемая деталь

В классическом способе для индикации положений детали используется традиционная сетка, подсвечиваемая с помощью автоколлимационного окуляра [2]. Более интересной представляется возможность контроля продольных наводок прибора в схеме интерферометра Тваймана–Грина или лазерного интерферометра с совмещенными ветвями с вынесенным фокусом F' (рис. 2). В этом случае под прибором 1 (см. рис. 1) подразумевается соответствующий интерферометр. В [3] положение детали вершиной в фокусе называется cat's-eye. Для краткости здесь будем называть его точечным положением, второе – конфокальным. Точечное и конфокальное положения детали фиксируются по минимальному искривлению полос интерференционной картины. По сравнению с автоколлимационным микроскопом интерференционная схема обладает более высокой чувствительностью.

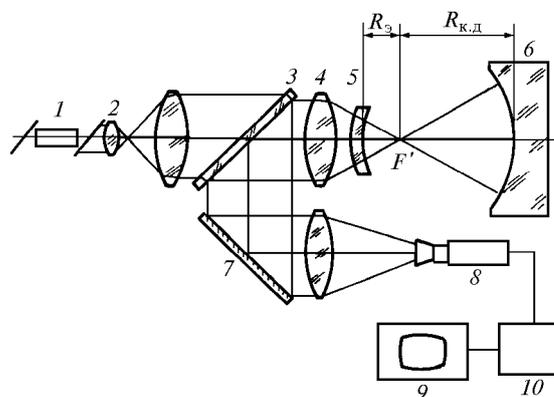


Рис. 2. Оптическая схема интерферометра с совмещенными ветвями: 1 – лазер; 2 – расширитель лазерного пучка; 3 – светоделиватель; 4 – освещающий объектив; 5 – апланатический мениск; 6 – контролируемая деталь; 7 – поворотное зеркало; 8 – TV-камера; 9 – видеоконтрольное устройство; 10 – устройство обработки интерферограмм; F' – фокус интерферометра

Погрешности интерференционного автоколлимационного метода достаточно подробно проанализированы в [3]. Здесь показано, что погрешность измерений радиуса составляет $\sim 0,01\%$. Однако в ряде технических задач этой точности оказывается недостаточно. Например, при аттестации пробных стекол [1], при контроле шаровых опор современных гироскопических систем [4] погрешность измерений должна составлять $0,001\%$ и менее. Наибольший вклад в погрешность этих измерений вносят ошибки Аббе [2] и дефокусировки.

Ошибка Аббе ΔR_A вызвана несовпадением оси измерительного прибора и измеряемой длины – в данном случае оси перемещения детали или оптической оси интерферометра (рис. 3, а). Достаточно эффективно её можно устранить путём использования либо двух измерительных шкал, расположенных по разные стороны интерферометра, либо таких средств измерения перемещений, которые могут быть конструктивно размещены на оптической оси интерферометра, например лазерного измерителя перемещений (рис. 3, б).

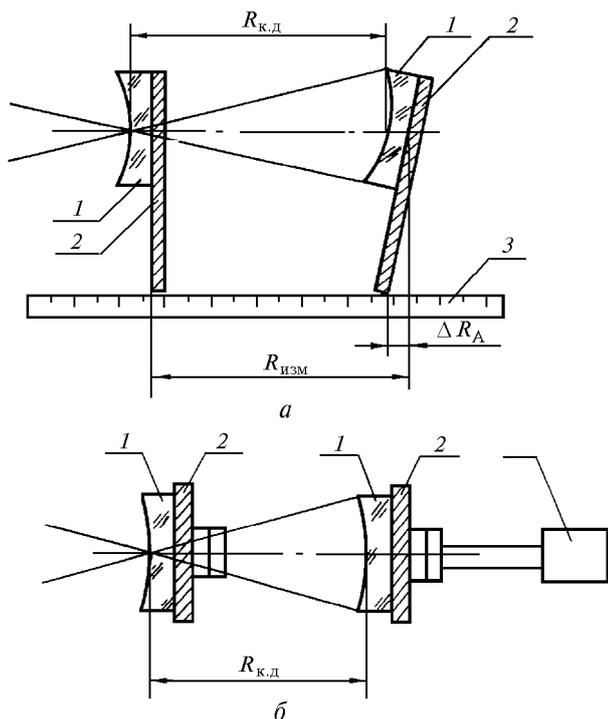


Рис. 3. Ошибка в измерении радиуса ΔR_A , связанная с нарушением принципа Аббе: 1 – контролируемая деталь; 2 – держатель детали с кронштейном крепления к отсчетному приспособлению; 3 – отсчетное приспособление с измерительной шкалой; 4 – лазерный измеритель перемещений

Погрешность дефокусировки появляется потому, что положение контролируемой детали фиксируется по минимальному искривлению полос интерференционной картины. Минимальное искривление может быть зафиксировано с некоторой остаточной кривизной интерференционных полос, соответствующей отступлению волнового фронта от плоскости наилучшей установки – $\Delta W_{о.к}$. Величина $\Delta W_{о.к}$ может быть проинтерпретирована как волновая aberrация. Тогда в соответствии с [6] можно записать

$$\Delta W_{о.к} = \Delta L_{о.к} \cdot 0,125 (D_{к.д}/R_{к.д})^2, \quad (1)$$

где $L_{о.к}$ – дефокусировка; $D_{к.д}$ – световой диаметр детали; $R_{к.д}$ – её радиус кривизны.

Величина $\Delta R_{о.к} = 2\Delta L_{о.к}$ соответствует погрешности в определении радиуса кривизны детали; $\Delta W_{о.к}$ – погрешность фиксации минимального искривления интерференционной картины.

Вопрос минимизации влияния отклонений формы поверхности от номинала – $\Delta W_{к.д}$ на $\Delta W_{о.к}$ – сводится к тому, что прецизионному измерению радиуса кривизны следует подвергать высококачественные детали с точки зрения формы поверхности. Это достаточно очевидно.

В [5] показано, что $\Delta W_{о.к}$ может достигать в интерферометре с совмещенными ветвями довольно малых значений при существенной величине $W_{о.а}$ за счет вычитания aberrаций. Этого нельзя сказать про положение точечного отражения. Поскольку в этом случае наблюдается зеркальное отражение предметного волнового фронта, то при несимметричных $W_{о.а}$ в уравнении интерференции будет возникать удвоение волновой aberrации. Это соображение требует особого подхода при выборе и изготовлении компонентов осветительной ветви интерферометра (см. рис. 1).

В [3] рассматривается ситуация, когда фиксация положений детали производится визуально, но $\Delta W_{о.к}$ может быть определена из результатов цифровой обработки интерферограмм. Тогда, зная $D_{к.д}/R_{к.д}$, можно определить из (1) значение $\Delta R_{о.к}$ и тем самым уменьшить эту составляющую погрешности измерения радиуса.

Для качественной коррекции требуется точное знание относительных отверстий эталона D_3/R_3 с погрешностью $\sim 0,1 \div 0,2\%$ [3].

Поскольку $\frac{d(D_3/R_3)}{(D_3/R_3)} = \frac{dD_3}{D_3} - \frac{dR_3}{R_3}$, то можно записать

$$\frac{dD_3}{D_3} \leq 0,1\%, \quad \frac{dR_3}{R_3} \leq 0,1\%. \quad (2)$$

Выполнение условий (2) весьма проблематично, особенно когда это касается величины dD_3/D_3 .

Выходом из этой ситуации может быть следующая измерительная программа: не корректировать численно положение детали в плоскости наилучшей установки по вычисленному значению карты $\Delta W_{о.к}$, а последовательно устранять $\Delta W_{о.к}$ путем физического перемещения детали до фактического достижения ею положения наилучшей установки. Таким образом, информация о текущей карте анализируемого волнового фронта должна служить исходной при принятии решения о выработке сигнала обратной связи для устройства перемещения детали.

Конечно, такая методика приводит к существенно большим затратам времени и вычислительных ресурсов, позволяя, однако, достигать хороших результатов. Для ускорения процесса сходимости можно использовать:

- интерполяцию кривой $\Delta W_{о.к}(l)$, где l – смещение от некоторой начальной точки, и нахождение ее минимума;
- итерационную процедуру последовательного нахождения $\Delta R_{о.к} = \Delta R_{о.к}(\Delta W_{о.к})$ с использованием соотношения (1) на каждом шаге.

В силу того что на искривление интерференционных полос, помимо смещения детали, оказывают влияние случайные факторы (например, фотометрические шумы), целесообразно в качестве критерия оценки установки детали выбрать среднеквадратическое отклонение волнового фронта W_{rms} . Это также целесообразно и с точки зрения устойчивости результата к случайным выбросам.

Согласно [6], в рамках действия критерия Штреля, можно записать

$$W_{rms}^2 = \frac{W_{20}^2}{12} + \frac{W_{20}W_{40}}{6} + \frac{4W_{40}^2}{45} + \frac{W_{11}^2}{4} + \frac{W_{11}W_{31}}{3} + \frac{W_{31}^2}{8} + \frac{W_{22}^2}{16} + \frac{W_{22}W_{20}}{6}, \quad (3)$$

где W_{ij} – коэффициент в разложении волновой aberrации, соответствующий W_{20} – дефокусировке, W_{40} – сферической aberrации, W_{11} – наклону волнового фронта, W_{31} – коме, W_{22} – астигматизму.

Из соотношения (3) понятно, что за счет дефокусировки могут быть частично компенсированы только сферическая aberrация и астигматизм, т.е. те, которые обладают зеркальной симметрией относительно оптической оси прибора.

Кома может быть частично уменьшена (перевесана) только за счет наклона волнового фронта. Это операция и осуществляется при юстировке положения эталонного мениска при точечном отражении от контролируемой детали. Таким образом, кома является самой неприятной aberrацией в интерферометрической системе для измерения радиусов. Поэтому в дальнейшем анализе ограничимся только ситуацией, когда в интерферометре присутствуют

кома и наклон волнового фронта. В плоскости наилучшей установки W_{rms} принимает значение $W_{\text{rms}}^{\text{опт}}$. В этом случае кома частично скомпенсирована за счет наклона. Согласно [6] оптимальным наклоном является такой, когда

$$W_{11} = -2W_{31}/3. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3) при $W_{20} = 0$, получим для комы

$$(W_{\text{rms}}^{\text{опт}})^2 = \frac{W_{31}^2}{72} = \frac{\lambda^2}{m^2}, \quad (5)$$

где m – некоторое целое число, характеризующее остаточную aberrацию в долях λ .

Если предположить, что W_{ij} достаточно малы, то при небольшой дефокусировке контролируемой детали значения этих коэффициентов, кроме W_{20} , изменятся не очень сильно и тогда aberrация $W_{\text{rms}}^{\text{н}}$ волнового фронта, дефокусированного из оптимального, запишется в виде

$$(W_{\text{rms}}^{\text{н}})^2 = \frac{W_{20}^2}{12} + \frac{W_{31}^2}{72}. \quad (6)$$

Если система обработки интерферограмм позволяет различать изменения среднеквадратического отклонения

$$\Delta W_{\text{rms}} = (W_{\text{rms}}^{\text{опт}} - W_{\text{rms}}^{\text{н}}) = \frac{1}{n},$$

где n – некоторое целое число, характеризующее точность устройства обработки в долях λ , то при условии $\lambda/n \ll W_{\text{rms}}^{\text{опт}}$ можно записать

$$W_{20} \approx \lambda \sqrt{24/(nm)}. \quad (7)$$

В соответствии с (1) определим из (7) погрешность измерения радиуса кривизны при aberrациях W_{rms} волнового фронта, отраженного от детали:

I.G. Polovtsev. High-Accuracy Measurements of Optical Surfaces' Curvature Radius Using Digital Interferometry.

The errors of autocollimation method are analyzed used in measurements of curvature radius of spherical optical surfaces by means of an interferometer. A method of high-accuracy ($\Delta R/R \approx 10^{-5}$) measurements is proposed, which suggests iteration correction of a worked member position from the results of interferograms processing. A relationship is obtained connecting the measuring error with characteristics of a digital interferometer.

$$\Delta R = 16 \frac{R_{\text{к.д.}}}{D_{\text{к.д.}}} \lambda \sqrt{24(nm)} = 16 \frac{R_{\text{к.д.}}}{D_{\text{к.д.}}} \sqrt{24W_{\text{rms}} D W_{\text{rms}}}. \quad (8)$$

Соотношение (8) может быть использовано для предъявления требований к техническим средствам при проектировании интерферометрических систем для высокоточного измерения радиусов кривизны.

Из (8) можно получить, что для сферических поверхностей с $R_{\text{к.д.}} \approx 10$ мм в интерферометре с апертурой $D_{\text{к.д.}}/R_{\text{к.д.}} = 1:1$ измерения по вышеописанной методике имеют относительную погрешность $\Delta R/R \leq 6 \cdot 10^{-5}$, например при остаточных aberrациях $W_{\text{rms}} \leq \lambda/40$, и погрешности устройства обработки $W_{\text{rms}} \leq \lambda/200$.

При этом допуски на значения остаточных сферической aberrации и комы на основании (3) могут быть назначены следующим образом:

$$W_{40} \leq \lambda/4, \quad W_{31} \leq \lambda/13.$$

Жесткость этих требований может быть обеспечена за счет очень тщательного отбора всех компонентов оптической схемы и в первую очередь объективов.

1. *Справочник оптика-технолога* / П.Я. Бубис, В.А. Вейденбах, И.И. Духопел и др. / Под общ. ред. С.М. Кузнецова и М.А. Окатова Л.: Машиностроение, 1983. 414 с.
2. *Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т.* Оптические измерения: Учебник для вузов / Под общ. ред. Д.Т. Пуряева М.: Машиностроение, 1987. 264 с.
3. *Lars A. Selberg* Radius measurement by interferometry // *Optical Engineering*. 1992. V. 31. N 9. P. 1961.
4. *Половцев И.Г.* Интерференционный контроль несферичности и радиуса кривизны высокоапертурных шаровых опор гироскопов // Всесоюзная научно-техническая конференция «Гироскопические системы и их элементы». Тула, 1989.
5. *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.
6. *Сокольский М.Н.* Допуски и качество оптического изображения. Л.: Машиностроение, 1989. 221 с.