

**В. П. Коронкевич, Г. А. Ленкова, А. Е. Маточкин, В. Г. Максимов,
В. А. Тартаковский, С. А. Чудинов**

(Новосибирск – Томск)

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПО НЬЮТОНОВСКИМ ПОЛОСАМ*

Определены условия контроля сферических и параболических поверхностей в дифракционном интерферометре с зонной пластинкой. Показано, что методами трассирования нулевой полосы и «хребтовых линий» можно отделить ошибки формы зеркала от инструментальной погрешности интерферометра. Результаты испытаний параболической поверхности сравниваются с результатами измерений абсолютным методом Ричи. Расхождение средних значений асферичности не превышало $\lambda/20$.

В дифракционных интерферометрах с совмещенными ветвями и общим ходом интерферирующих пучков зонная пластинка играет роль синтетического пробного стекла [1]. Определение формы оптических поверхностей осуществляется по ньютоновским интерференционным полосам [2]. Последние обладают рядом уникальных особенностей.

1. Центр поля интерференции имеет особую точку, где разность хода равна нулю. В этой точке сравниваемые волновые фронты находятся в постоянном виртуальном контакте, подобно механическому контакту у традиционных пробных стекол.

2. Полосы наблюдаются в белом или квазимонохроматическом свете.

3. Вибрации и изменения показателя преломления в оптическом ходе пучков не приводят к смещению полос и практически не нарушают стабильность интерференционной картины.

4. Пучок 0-го порядка, прошедший зонную пластинку в прямом и обратном ходе без отклонений, фокусируется в центр поля, образуя яркую, «горячую», точку [3], совпадающую с точкой нулевой разности хода и являющуюся репером при настройке прибора.

5. Изменения ширины и направления полос не оказывают влияние на положение особой точки. Иными словами, смещение и наклоны испытуемого зеркала не вызывают изменения разности хода пучков в центре поля.

6. Форма нулевой полосы характеризует отступление исследуемой поверхности от вершинной («одноточечной») сферы или ближайшей («трехто-

* Работа выполнена при поддержке гранта Сибирского отделения Российской академии наук (интеграционный проект № 17 «Интерферометрия конформных оптических поверхностей при помощи компьютерно-синтезированных голограмм», 2003 г.).

чечной») сферы Гаусса, если нулевая полоса проходит через центр и края поля.

7. Для контроля не требуется применения нуль-корректоров и компьютерных голограмм, моделирующих форму эталонной волны.

Другие особенности поля интерференции для интерферометров с общим ходом и совмещенными опорным и измерительным пучками приведены в [1]. Предлагаемая работа является ее естественным продолжением. Здесь особое внимание уделено сравнению результатов контроля асферической поверхности (параболы) на исследуемом приборе и абсолютным методом Ричи в схеме интерферометра Физо, а также способам обработки статичной («замороженной») интерференционной картины путем трассирования нулевой полосы и новым вариантом классического метода «хребтовых линий».

Оптическая схема. Принципиальная оптическая схема интерферометра представлена на рис. 1. Собственно интерферометр состоит из двух элементов: зонной пластинки 1 и контролируемой поверхности 2, расположенных на расстоянии радиуса кривизны R (толщина интерферометра) испытуемой поверхности. В наблюдательную часть входят диафрагма 3, объектив 4 и ПЗС-матрица 5. В интерферометр поступает сходящийся пучок лучей, выделенный на схеме серым цветом. Стандартная схема освещения, состоящая из источника, линзы и разделительного блока, на рис. 1 не представлена. Часть сходящегося пучка проходит зонную пластинку без отклонения (0-й порядок дифракции) и собирается в точке A_1 (центре зеркала). Здесь наблюдается изображение источника света или входной диафрагмы интерферометра (входного зрачка). Эта часть пучка функционирует как референтный (опорный) пучок. Другая часть, дифрагирующая в +1-й порядок, фокусируется в точке A_2 и действует как измерительный пучок, заполняя после прохождения A_2 апертуру испытуемого зеркала. После отражения от зеркала пучки собираются в точке A_3 , при этом референтный пучок дифрагирует в +1-й порядок (на рис. 1 обозначен как $[0, +1]$), а измерительный пучок проходит зонную пластинку без отклонения (на рис. 1 обозначен как $[+1, 0]$). После объектива 4 референтный $[0, +1]$ и измерительный $[+1, 0]$ пучки рекомбинируют, образуя в плоскости фотоматрицы 5 интерференционные полосы, которые несут полную информацию о форме поверхности контролируемого зеркала (нахо-

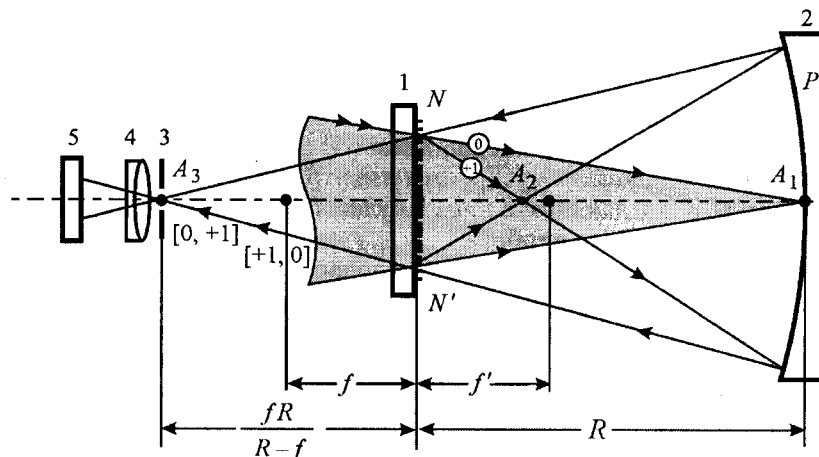


Рис. 1.

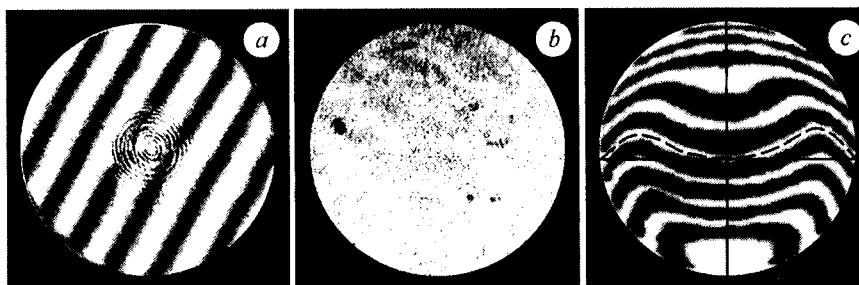


Рис. 2

дящегося в плоскости 2), поскольку опорный пучок не искажается дефектами испытываемой поверхности.

Интерферограммы в плоскости 5 (рис. 2) получены при испытании сферической (рис. 2, *a, b*) и параболической (рис. 2, *c*) поверхностей. Нулевая полоса на интерферограмме параболической поверхности отмечена штриховой линией («оттрассирована»). Сплошной линией показано сечение, по которому ведется обработка интерферограммы модифицированным методом хребтовых линий. При наблюдении полос в центре поля (см. рис. 2, *a*) видна яркая нулевая (горячая) точка, сопровождаемая круговыми дифракционными полосами. Она образуется пучками 0-го порядка дифракции $[0, 0]$, прошедшими зонную пластинку в прямом и обратном ходе. В этом месте разность хода интерферирующих пучков равна нулю. При изменении ширины и направления полос горячая точка сохраняет свое положение и является центром трансформации полос. Полосы «привязаны» к ней. От нее можно вести отсчет фаз в поле интерференции.

При настройке интерферометра на полосы равной толщины сравниваемые волновые фронты образуют между собой небольшой клин. Ребро клина (светлая нулевая полоса) проходит через центр поля (горячую точку). Изменение формы нулевой полосы характеризует асферичность испытываемой поверхности. В рассматриваемом случае испытываемая поверхность – высококачественная сфера ($R = 1380,4$ мм, $D = 120$ мм), общие и зональные ошибки которой не превышают $\lambda/20$. Здесь D – диаметр зеркала. Подтверждение этому факту – прямые полосы (см. рис. 2, *a*). При настройке (т. е. при совмещении выходных зрачков) поле залито «однородным» цветом (см. рис. 2, *b*), что свидетельствует об идеальном совпадении референтной и измерительной поверхностей.

При контроле параболической поверхности (см. рис. 2, *c*) на форму полос оказывают влияние следующие факторы:

- зональные и общие ошибки формы испытываемой поверхности;
- волновые aberrации зеркала, поскольку контроль осуществляется не в анаберрационных точках;
- погрешность, вызванная разными оптическими условиями прохождения через зонную пластинку референтного и измерительного пучков.

Фактически при контроле необходимо отделить ошибки формы поверхности от влияния двух последних факторов. Сумма волновой aberrации зеркала и разность сферических aberrаций зонной пластинки составляют инструментальную погрешность интерферометра. Для осуществления нулевого тестирования она должна быть исключена из результата путем обработки ин-

терферограммы или подбором параметров прибора с учетом конической постоянной испытуемой поверхности.

Метод измерения формы поверхности по нулевой полосе. Изменение разности хода по полю, характеризуемое формой светлой нулевой полосы (см. рис. 2, *c*), можно определить, вычислив разность стрелок прогиба сравниваемых поверхностей (параболы и сферы). Такой прием, принятый в технической интерферометрии, дает приемлемую для практики точность. Тогда разность хода

$$\delta = \frac{y^2}{2R} - \frac{x^2 + y^2}{2(R + \Delta R)}. \quad (1)$$

Здесь x, y – координаты относительно центра зеркала (x – вдоль оптической оси перпендикулярно к поверхности, y – радиальная); ΔR – отклонение толщины интерферометра от исходной, равной радиусу контролируемой поверхности R .

При $\Delta R = 0$ и отсутствии ошибок формы поверхности ход нулевой полосы по полю будет характеризовать вершинную (одноточечную) асферичность. Действительно, из (1) для параболы ($y^2 = 2xR$) следует, что

$$\delta = -\frac{y^4}{8R^3}. \quad (2)$$

При увеличении толщины интерферометра на половину стрелки прогиба параболы $\Delta R = \frac{H^2}{4R}$ ($H = y = \frac{D}{2}$) соотношение (1) переходит в

$$\delta = \frac{y^2}{8R^3} (H^2 - y^2). \quad (3)$$

Ход полосы по полю характеризует отступление испытуемой поверхности от ближайшей (трехточечной) сферы сравнения. Максимальное значение изгиба полосы (обычно обозначаемое как PV) наблюдается при $y = 0,707H$. В традиционных интерферометрах совмещение волновых фронтов испытуемой поверхности и ближайшей референтной сферы требует от наблюдателя определенного навыка и неизбежно связано с субъективными ошибками [4]. В рассматриваемой системе нулевая полоса интерференционного поля всегда проходит через его центр. Информацию о совпадении ее с ближайшей сферой дает положение, когда центр полосы и ее края лежат на одной линии.

В (2) и (3) не учтено влияние инструментальной погрешности интерферометра. Она вносит дополнительную разность хода и изменяет ход нулевой полосы. Коррекцию в результат можно внести [5] путем умножения значений разности хода в соотношениях (2) и (3) на постоянный коэффициент $b = k + (f/R)^2$, где f – фокус зонной пластинки, а k – конический параметр поверхности, связанный с эксцентриситетом $k = -e^2$.

Для сферической ($k=0$, $b=4(f/R)^2$) и параболической ($k=1$, $b=[4(f/R)^2 - 1]$) поверхностей соотношения (2) и (3) переходят соответственно в

$$\delta_c = \frac{y^2}{2R^3} \left(\frac{f}{R} \right)^2 (H^2 - y^2), \quad (4)$$

$$\delta_n = \frac{y^2}{8R^3} \left[4 \left(\frac{f}{R} \right)^2 - 1 \right] (H^2 - y^2). \quad (5)$$

Из (4) следует, что при контроле сферических поверхностей, когда $f \ll R$, изменения формы полосы можно снизить до значений $< \lambda/20$. Тогда интерференционная картина будет нести информацию только о погрешностях формы зеркала, что позволит осуществлять нулевое тестирование. В этом случае одна и та же зонная пластинка может быть применена для контроля поверхностей с разными радиусами кривизны R . Например, при $f = 25$ мм инструментальная погрешность не превышает $\lambda/20$ и можно контролировать зеркала, относительные отверстия D/R которых лежат в пределах $1/10-1/5$. Для более высоких значений относительных отверстий ($1/5-1/1$) контроль сферических поверхностей можно осуществлять путем введения поправок в окончательный результат по формуле (4).

При контроле параболической поверхности нулевое тестирование возможно только в одном случае, когда $f = R/2$. Это означает, что для каждой тестируемой поверхности нужно изготавливать специальную зонную пластинку с $f = R/2$. Не останавливаясь на технических трудностях изготовления интерферометра, в котором $f = R/2$, укажем, что габариты прибора должны быть $\sim 2R$, а диаметр зонной пластинки $D/2$. Это значительно снижает его эксплуатационные преимущества. Если зонная пластинка выбрана так, что $f \ll R$, то нулевое тестирование параболических поверхностей невозможно. Волновая абберация зеркала будет входить в результат измерения, но ее можно исключить аналогично тому, как это делается при контроле теневым методом [6, 7]. Иными словами, изменение формы нулевой полосы, вызванное погрешностью изготовления зеркала, должно быть отделено от его волновой абберации. При условии $f \ll R$ ($4(f/R)^2 \rightarrow 0$) погрешность идеального параболического зеркала фактически представляет отклонение его поверхности от ближайшей сферы и соотношение (5) можно использовать для введения поправки при обработке интерферограммы.

Рассмотрим, как меняется ход нулевой полосы по полю при изменении толщины дифракционного интерферометра. Обратимся к рис. 3. Здесь представлены вид поля интерференции и графики волновой абберации для трех положений зонной пластинки относительно испытуемого зеркала, т. е. для трех характерных случаев изменения радиуса синтетического пробного стекла (ΔR). Три волновых фронта, форма которых зафиксирована на интерферограммах, фокусируются в области схождения маргинальных (периферических) пучков (интерферограмма a), параксиальных пучков (c) и области наилучшей фокусировки (b), где среднеквадратичная ошибка отступления от ближайшей сферы минимальна. Графики волновой абберации, повторяющие форму нулевой полосы, построены при $\Delta R = H^2/2R$ (кривая 1),

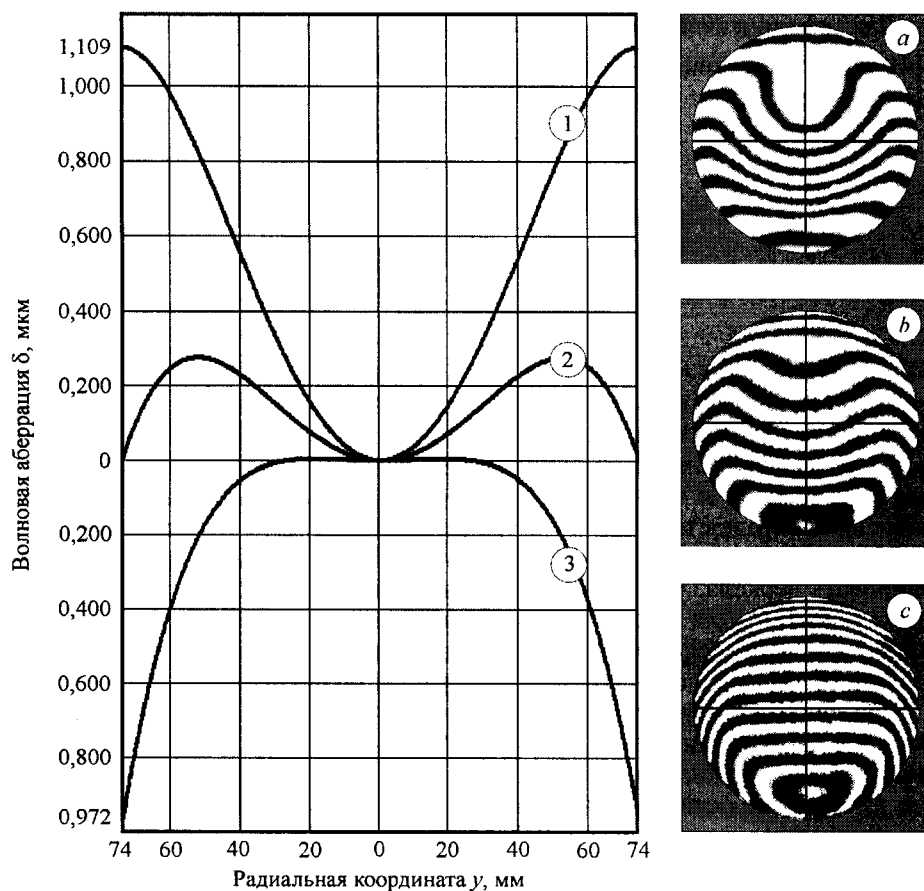


Рис. 3

$\Delta R = H^2/4R$ (кривая 2) и $\Delta R = 0$ (кривая 3) с использованием соотношений (1)–(3).

На интерферограмме *c* в центральной зоне наблюдаются прямые полосы, свидетельствующие о совпадении радиуса «вершинной» референтной сферы с радиусом параксиальной зоны параболы. Подобная интерференционная картина может быть получена при работе с пробными стеклами. Для ее образования референтная сфера должна войти в «тело» испытуемой детали, касаясь вершины зеркала. Такого положения при работе с пробными стеклами добиться нельзя. В интерферометрах Физо и Тваймана – Грина можно наблюдать аналогичные картины, но нет гарантии, что разность хода в центре равна нулю. Важное преимущество рассматриваемого интерферометра – возможность экспрессного визуального определения отступления поверхности от ближайшей сферы по форме нулевой полосы до детальной обработки интерферограммы. Последнее будет полезным при работе в цеховых условиях.

Обработка интерферограмм и метрология. В дифракционных интерферометрах рассматриваемого типа применение динамических методов обработки интерферограмм затруднено, поскольку разность хода по полю не-

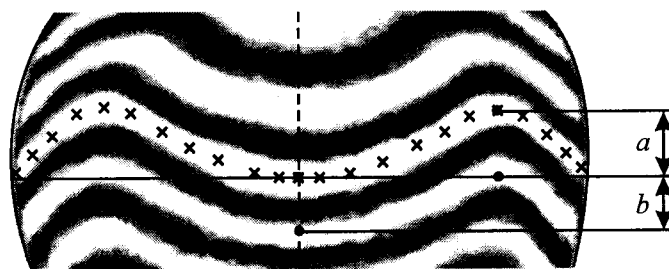


Рис. 4

линейно зависит от сдвига зеркала. В центре поля разность хода всегда равна нулю. Попытки преодолеть эти трудности предприняты в [3].

На наш взгляд, наиболее адекватным является применение статических методов обработки интерферограмм. Фотометрирование или трассирование замороженной интерференционной картины позволяет получить такую же точность, как в динамическом методе [8]. Далее обработка интерферограмм осуществлялась только по одному сечению зеркала путем трассирования нулевой полосы и модифицированным методом хребтовых линий [9]. В качестве критерия точности принято сравнение полученных результатов с результатами измерений асферичности абсолютным методом Ричи на интерферометре "Zygo".

Когда нулевая полоса проходит через центр и края поля, то ее форма несет информацию об отступлении испытываемой поверхности от ближайшей сферы. Определяя ее изгиб в долях полосы и затем вычитая из полученных значений волновую aberrацию зеркала (параболы), определим величину отступления испытываемой поверхности от заданной. Ход операции обработки понятен из интерферограммы, представленной на рис. 4. Она может быть выполнена на компьютере после трассирования нулевой полосы и визуально при контроле непосредственно на рабочем месте: a – величина асферичности в максимуме изгиба полосы (при $0,7H$), b – ширина полосы, $(a/b)(\lambda/2)$ – результат контроля.

Процедуру подобной операции разъясняет рис. 5, где представлены результаты контроля параболы ($R = 1499,7$ мм, $D = 150$ мм), имеющей отступ-

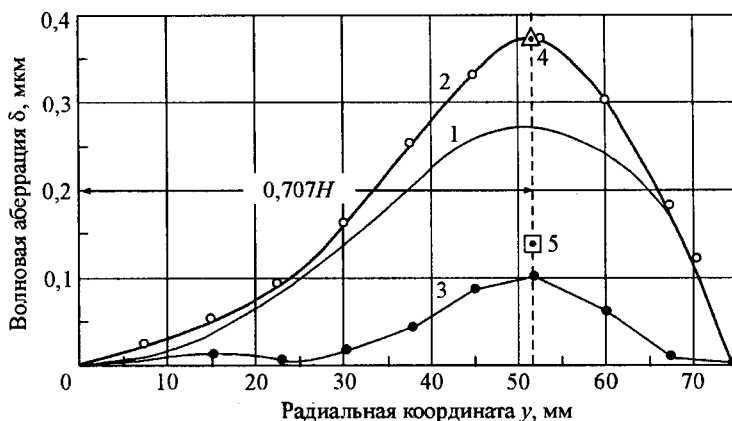


Рис. 5

ление от заданной формы выше производственного допуска. Кривая 1 вычислена из соотношения (3). Она характеризует отступление идеальной параболической поверхности от ближайшей сферы (волновая аберрация). Эти значения обычно задаются в документации [10]. Кривая 2 – результат обработки интерферограммы, полученной на исследуемом приборе. Фактически она представляет ход нулевой интерференционной полосы. Разность ординат между кривыми 2 и 1 – кривая 3 – соответствует ошибкам контролируемой поверхности. На рис. 5 приведены также результаты контроля исследуемой параболы на интерферометре “Zygo”. Точка 4 (треугольник) показывает максимальное отступление (PV) параболической поверхности от ближайшей сферы при контроле параболы «из радиуса». Это значение определено как среднее шести измерений и равно 0,372 мкм. Точка 5 (квадрат) соответствует максимальному изгибу полос PV при контроле параболы методом Ричи («из фокуса»). Здесь $PV = 0,137$ мкм. Среднеквадратичное отклонение обоих измерений не превышает $\sim 0,02$ мкм.

Из представленных результатов видно, что максимальное отступление формы параболической поверхности от заданной, измеренное на исследуемом приборе и интерферометре “Zygo” из радиуса, практически совпадают (максимум кривой 2 и точка 4). Результаты контроля абсолютным методом Ричи (максимум кривой 3 и точка 5) для рассматриваемого примера отличаются на $\sim 0,04$ мкм.

Дополнительно для обработки был применен новый адаптивный алгоритм прослеживания интерференционных полос. Он является вариантом классического метода хребтовых линий и основан на взаимно однозначном соответствии между линиями равных фаз и экстремальными линиями интерференционных полос. Новый аналог традиционного метода совпадает со своим прототипом в главном, а именно фаза интерполируется между известными значениями в максимумах и минимумах интерференционных полос.

В отличие от традиционного метода не используется упорядочение полос, которое сложно логически и не всегда устойчиво. Вместо него учитываются свойства монотонности фазы и критерий неразрывности полос, поэтому значение фазы в экстремальной точке опорного сечения присваивается всем точкам экстремальной линии интерференционной полосы. Термин «экстремальная линия» применяется в том смысле, что он связан с экстремумом идеальной интерференционной полосы, тогда как локальные экстремумы реальной интерференционной полосы могут быть вызваны шумом. Критерий неразрывности полос и дискретность отсчетов интерференционной картины определяют необходимость ограничения локального максимального наклона полосы. В данной реализации допустимый локальный наклон интерференционной полосы выбран равным 45° .

Реализованный в виде расчетной программы алгоритм включает три основных этапа: предварительную обработку интерферограммы, построение экстремальных линий и моделирование поверхности волнового фронта объекта. Предварительная обработка заключается в наложении «масок» и подавлении аддитивных шумов интерферограммы. Маски предназначены для исключения неинформативной части поля и определения требуемой области обработки интерферограммы. Далее последовательно приведены основные этапы обработки интерферограммы параболы ($R = 1499,7$ мм, $D = 150$ мм). Вид исходной интерферограммы представлен на рис. 2, с. На интерферограмму накладывается маска и выбирается положение опорного

сечения с таким расчетом, чтобы оно пересекало все интерференционные полосы.

В процессе обработки опорного скана дважды применяется фильтрация опорного сечения (рис. 6). Сглаживающий фильтр используется для подавления высокочастотных аддитивных шумов. Затем сверткой с гауссовым окном, ширина которого меньше минимальной ширины интерференционной полосы, находится средняя линия опорного сечения интерферограммы. Процедурой приведения фильтрованного сечения к средней линии устраняются влияния мультипликативной составляющей шумов и неоднородности фона освещения интерферограммы. После этого находится положение границ каждой полосы в опорном сечении интерферограммы и положение экстремальных точек сечения полос. Массив координат экстремальных точек опорного сечения (на рисунке координаты обозначены «x») интерферограммы используется как начальная информация для построения экстремальных линий интерференционных полос по полю. Каждой найденной экстремальной точке n опорного сечения присваивается значение фазы $n\pi$, где n – номер точки, начиная с нуля.

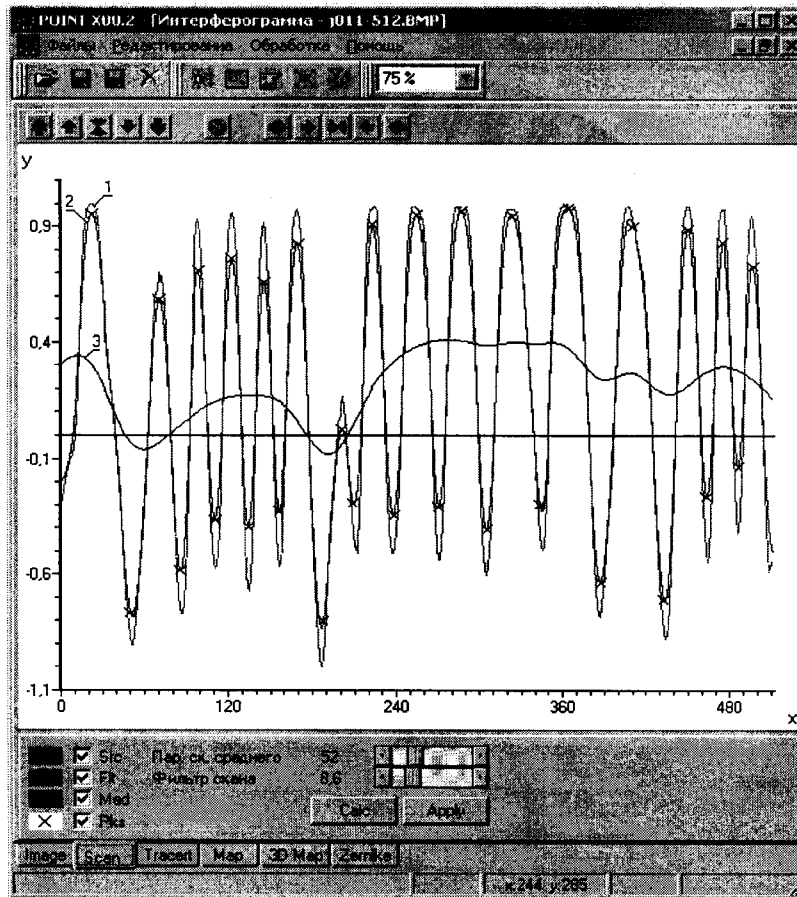


Рис. 6

Построение экстремальных линий заключается в последовательной обработке сечений интерферограммы с целью нахождения координат экстремальных точек интерференционных полос. Прослеживание каждой интерференционной полосы начинается от соответствующей экстремальной точки на опорном сечении интерферограммы. В окрестности текущей экстремальной точки строится модель идеальной интерференционной полосы. Далее на нескольких участках следующего сечения интерферограммы выборки сечения сравниваются с моделью идеальной полосы. Ширина выборок определяется построенной моделью идеальной полосы, а их сдвиг вдоль сечения относительно текущей экстремальной точки ограничен критерием локального максимального наклона интерференционной полосы. Модель полосы постоянно адаптируется к форме реальной полосы, чтобы не допустить потери отслеживаемой полосы на сильно зашумленных участках интерферограммы. Сдвиг участка реальной интерференционной полосы с минимальным отклонением от модели идеальной полосы определяет сдвиг следующей опорной точки экстремальной линии прослеживаемой полосы относи-

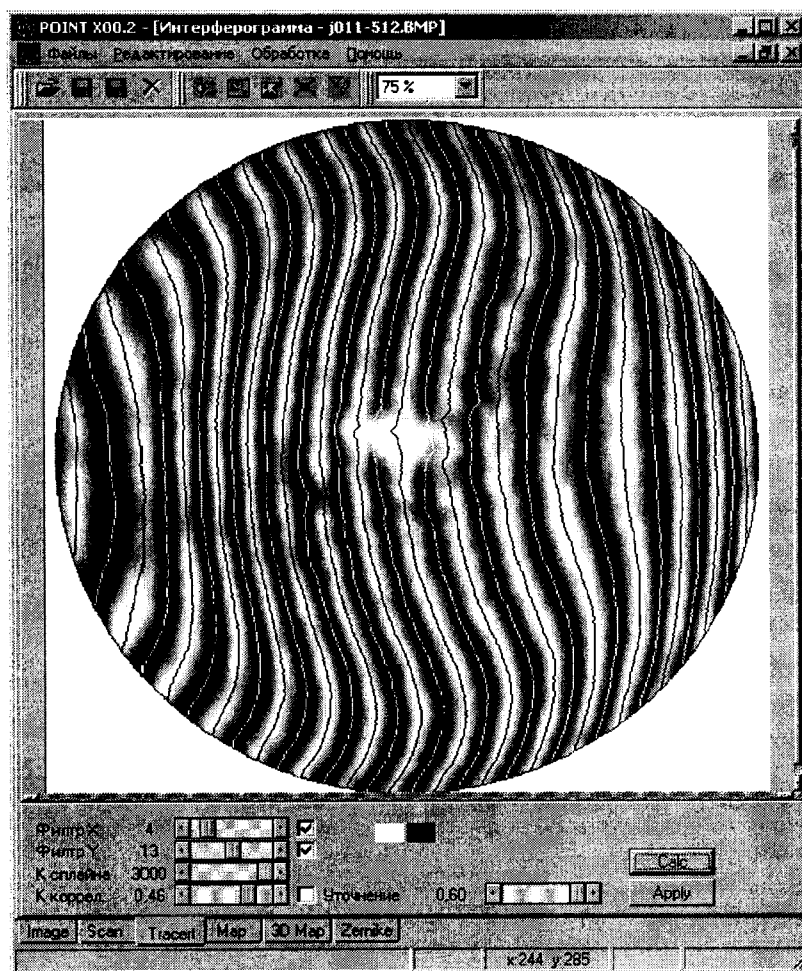


Рис. 7

тельно текущей точки. Экстремум модели полосы определяет положение точки хребтовой линии на текущем сечении интерферограммы. Этой точке в плоскости интерферограммы передается значение фазы πl от точки в предыдущем сечении, а ее координаты заносятся в массив, по которому формируются экстремальные линии интерферограммы (см. рис. 6: кривая 1 – сечение исходной интерферограммы, 2 – сечение после фильтрации, 3 – средняя линия опорного сечения интерферограммы).

После обработки всей интерференционной картины внутри маски пошло устойчивою работу алгоритма при обработке интерферограмм. Координаты точек экстремальных линий служат узлами интерполяции при построении фазовой поверхности на всей апертуре, где определена интерферограмма. Перевод отдельных сечений фазы в непрерывную поверхность происходит на основе критерия неразрывности полос, основанного на близости значений фазы в соседних сечениях. После построения фазовой поверх-

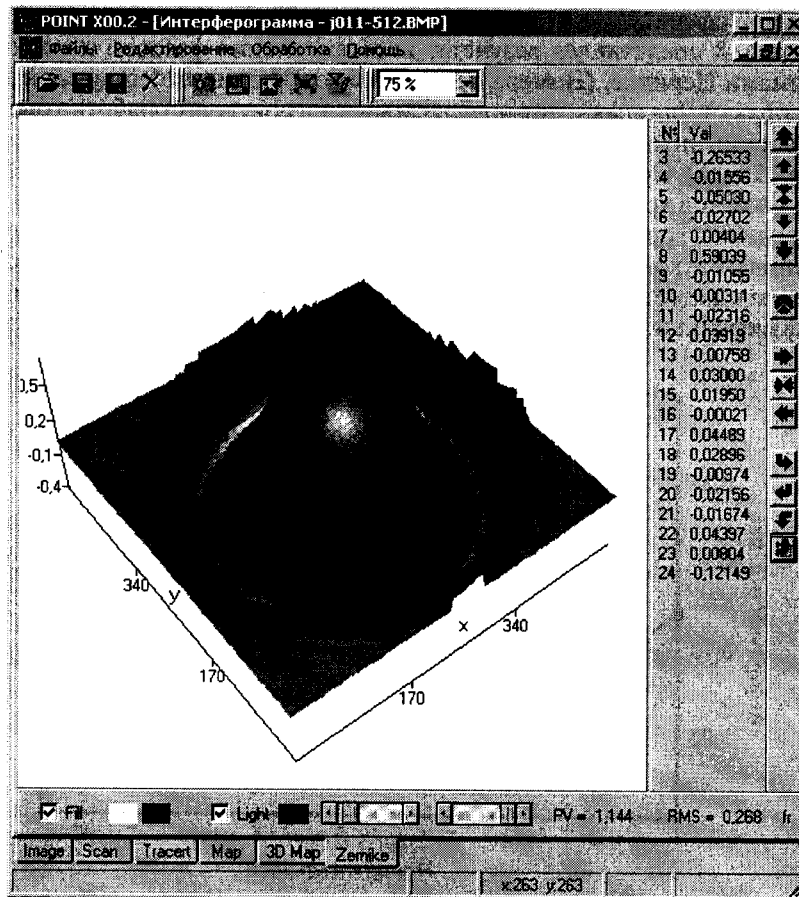


Рис. 8

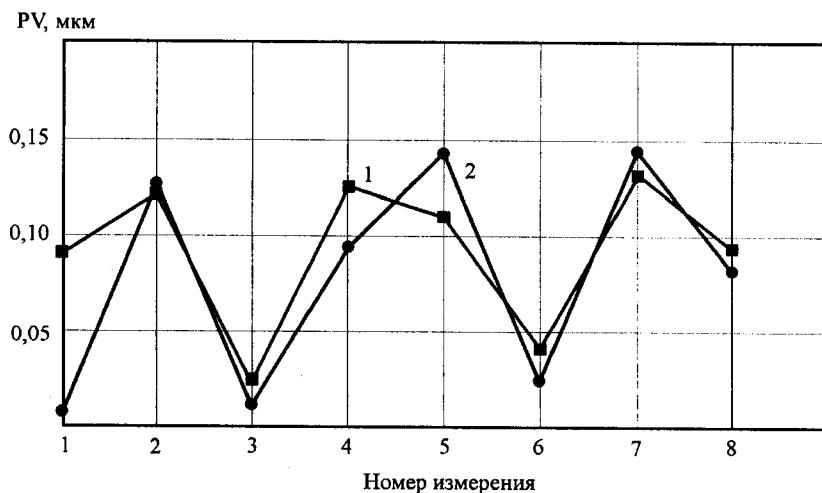


Рис. 9

ности при необходимости может быть выполнена процедура приведения ее к ближайшей сфере.

На рис. 8 представлен результат восстановления фазовой поверхности полиномами Цернике. (Номера и значения коэффициентов приведены в колонке справа.) Для сравнения предлагаемых алгоритмов обработки были выбраны восемь интерферограмм с различной шириной полос (от 5 до 17 полос на поле 150 мм). Сравнение полученных результатов представлено на рис. 9: кривая 1 – метод хребтовых линий; 2 – метод расчета по форме нулевой полосы. Результаты хорошо коррелируют между собой (за исключением первого измерения). Расхождение в среднем составляет 0,033 мкм ($\sim \lambda/20$), что можно признать допустимым. На рис. 10 приведены результаты аттестации параболы на дифракционном интерферометре (кривая 1) и абсолютным методом

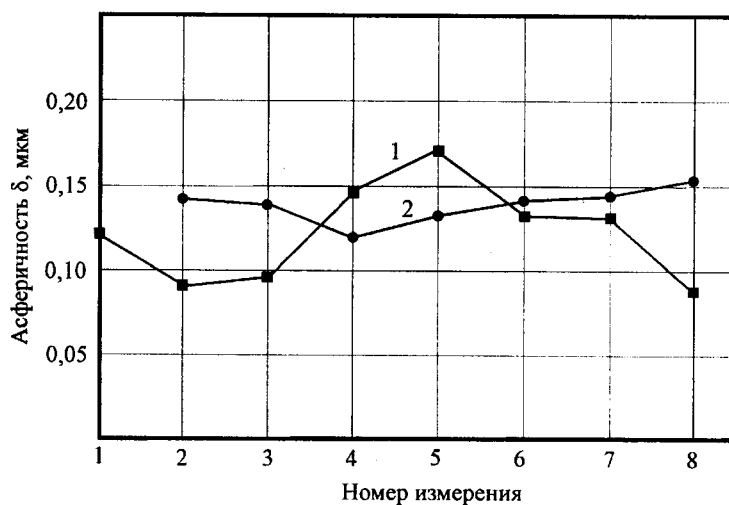


Рис. 10

Ричи на интерферометре “Zygo” (кривая 2). Среднее значение асферичности для серии из семи измерений методом Ричи составило 0,138 мкм при среднеквадратичной погрешности 0,028 мкм. Восемь интерферограмм, полученных на исследуемом интерферометре, были обработаны путем трассирования нулевой полосы. Среднее значение асферичности равнялось 0,114 мкм. Расхождение средних значений асферичности по абсолютному методу Ричи и исследуемому, равное 0,024 мкм, было меньше $\lambda/20$. Однако разброс результатов, полученных по нулевым полосам, в 2 раза превышал аналогичный разброс результатов по методу Ричи. Последнее объясняется шумами интерферограмм дифракционного интерферометра [1].

Особенно серьезные помехи вызывали круговые дифракционные полосы, локализованные вокруг горячей точки (см. рис. 2 и рис. 7). В [1] мы подробно рассмотрели шумы, которые возникают в рабочей интерференционной картине из-за автоколлимационных бликов от нерабочих поверхностей разделительного блока и зонной пластинки, а также выяснили влияние деструктивных интерференционных картин. Было показано, что этот род шумов можно подавить или существенно ослабить. Ослабление яркости центральной горячей точки и сопутствующих ей круговых дифракционных полос достигается применением бинарной фазовой зонной пластинки. В этом случае удастся получить приемлемую для практики интерференционную картину. Оценки показывают, что разброс результатов обработки интерферограмм можно существенно снизить, если применять не амплитудную, а фазовую зонную пластинку. В заключение отметим основные особенности дифракционного интерферометра.

1. Поле интерференции – локализованные полосы Ньютона, наблюдаемые в квазимонохроматическом свете ($\Delta\lambda/\lambda \sim 1$). В центральной особой точке поля существует постоянный виртуальный контакт между сравниваемыми волновыми фронтами.

2. Изменение радиуса референтной сферы (за счет увеличения толщины интерферометра) позволяет по интерферограмме определить отступление контролируемой поверхности от вершинной или ближайшей сферы сравнения.

3. Условия нулевого тестирования осуществляются для сферических поверхностей при $f \ll R$ и параболических поверхностей при $f = R/2$. При $f \ll R$ параболическую поверхность можно контролировать путем трассирования нулевой полосы и модифицированным методом хребтовых линий с учетом волновой аберрации зеркала.

4. Результаты аттестации параболической поверхности абсолютным методом Ричи на интерферометре Физо отличаются от результатов, полученных на дифракционном интерферометре, не более $\lambda/20$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Маточкин А. Е. Синтетическое пробное стекло // Автометрия. 2002. 38, № 3. С. 20.
2. Оптический производственный контроль /Под ред. Д. Малакары. М.: Машиностроение, 1985.
3. 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.

4. Пуряев Д. Т. Методы контроля оптических асферических поверхностей. М.: Машиностроение, 1976.
5. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А. Инструментальная погрешность дифракционного интерферометра // Автометрия. 2003. 39, № 6. С. 26.
6. Максудов Д. Д. Астрономическая оптика. Л.: Наука, 1979.
7. Максудов Д. Д. Теневые методы исследования оптических систем. М.: ОНТИ, 1934.
8. Ветриченко Э. А., Лукин В. П., Пушной Л. А., Тартаковский В. А. Проблемы оптического контроля. Новосибирск: Наука, 1990.
9. Тартаковский В. А., Исаев Ю. Н., Несветайло В. Д. и др. Математическая модель радиального сечения годичных колец деревьев // Автометрия. 2003. 39, № 5. С. 118.
10. Детали оптические с асферическими поверхностями. Показатели технологичности // ОСТ 3-4918-81.

*Институт автоматизации и электротехники СО РАН,
Институт мониторинга климатических
и экологических систем СО РАН,
E-mail: koronkevich.v.p.@iae.nsk.su*

*Поступила в редакцию
30 июля 2004 г.*