

СОВРЕМЕННЫЕ КИНООБЪЕКТИВЫ И ИХ КОНТРОЛЬ

© 2005 г. Е. В. Гаврилов*, В. К. Кирилловский**, доктор техн. наук

** ЗАО “Оптика-Элит”, Санкт-Петербург

** Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

Приведены принципиальные оптические схемы новых объективов для профессиональной кинематографии. Рассмотрены средства контроля параметров качества изображения, образованного объективом, и погрешностей изготовления деталей объектива.

Коды OCIS: 080.3630.

Поступила в редакцию 08.12.2004.

Прогресс в развитии приемных устройств определил существенное уменьшение габаритов съемочных камер при одновременном улучшении качества регистрируемого изображения. По мере роста решающей способности приемных устройств росли требования к качеству изображения, образованного оптикой камер, а уменьшение габаритов камер способствовало росту углового поля применяемых объективов.

1. Классификация объективов кино- и телекамер

По ряду признаков [1] все многообразие объективов можно разделить на классы, группы, типы и виды.

По виду применения различают три больших класса объективов камер:

- для стандартного телевидения (SDTV),
- для телевидения высокой четкости (HDTV),
- для профессионального кинематографа.

По назначению разделяют семь групп объективов камер:

- для студийных передач (Studio),
- для внестудийных съемок (EFP),
- для видеожурналистики (ENG),
- для электронной кинематографии (Cine Style),
- для пленочной кинематографии,
- для телеконференций (Videoconferencing),
- для макросъемок (Macro).

По основным оптическим характеристикам объективы можно разделить на пять видов:

- длиннофокусные ($f' > 150$ мм, без учета экстендера),
- светосильные ($1:F \geq 1:2$),
- широкоугольные ($2w_{\max} > 70^\circ$),
- высокой кратности изменения фокусных расстояний ($M > 50\times$),
- стандартные, со средними характеристиками ($1:F < 1:2$, $2w_{\max} < 70^\circ$, $M < 50\times$).

По размеру регистрируемого кадра изображения известны объективы:

для киноплёнки: объективы для формата пленки S16 мм, 35 мм, S35 мм;

для CCD-матрицы формата 1", 2/3", 1/2", 1/3".

Рассмотрим объективы для 35-миллиметровой пленки как наиболее часто применяемые при профессиональных киносъемках.

2. Киносъемочные объективы для S35-миллиметровой пленки

Наиболее часто при профессиональных киносъемках применяются объективы для формата пленки S35 мм. Качество оптического изображения таких объективов должно удовлетворять следующим условиям:

высокий контраст изображения: не менее 0,5 на 40 лин/мм, не менее 0,4 на 60 лин/мм или не менее 200 лин/мм при визуальной аттестации объектива по всему полю изображения;

сохранение геометрического подобия снимаемой картины ее изображению, что требует исправления дисторсии с точностью не ниже 5%, за исключением объективов типа “рыбий глаз”;

компенсация “rumping”-эффекта (или пульсации изображения, т. е. изменение масштаба изображения при перефокусировке объектива на конечные дистанции, не должны превышать 3%).

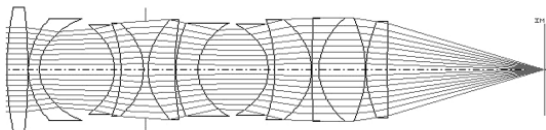
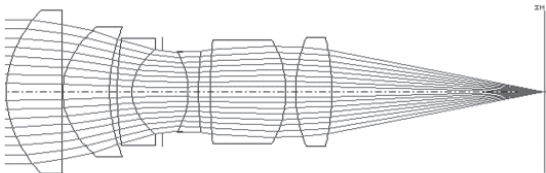
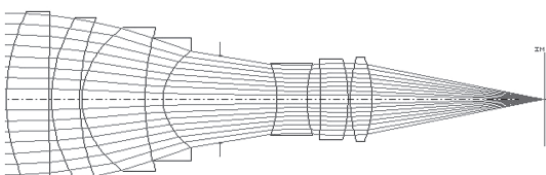
Фокусные расстояния разработанной линейки лежат в диапазоне от 9,6 до 500 мм, что соответствует углам поля зрения от 155° до $2,5^\circ$.

Наибольшее применение находят те объективы линейки, фокусные расстояния которых равны 28, 35, 40, 50, 75 и 100 мм.

Основное внимание при разработке таких объективов уделяется простоте конструкции и технологичности изготовления деталей и сборки объектива в целом.

В некоторых случаях требуемых параметров объективов можно достичь, выбрав известную исходную схему и добавив компоненты с заранее известными свойствами. В общем случае при разра-

Таблица 1. Принципиальные схемы объективов основной линейки

Техническая характеристика			Оптическая схема
F' , мм	$2w$, град	D/F'	
35	47	1:1,3	
75	23	1:1,3	
100	17	1:1,6	

ботке новых оптических систем с форсированными параметрами наиболее эффективно применение метода композиции оптических систем, предложенного и разработанного Русиновым М.М. [2].

Основные технические характеристики и принципиальные схемы некоторых современных профессиональных объективов приведены в табл. 1.

В группу светосильных широкоугольных объективов входят анастигматы с фокусными расстояниями 9,6, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24 мм, разработанные на основе оригинальных схем. Создание такого рода систем является очень сложной задачей, при их разработке приходится сталкиваться со следующими трудностями [3, 4]:

необходимостью обеспечения достаточно высокой освещенности изображения на краях поля зрения;

необходимостью устранения ряда неэлементарных aberrаций, наблюдаемых лишь при больших угловых полях;

невозможностью использования геометрического виньетирования для устранения полевых aberrаций.

Оптические схемы таких объективов являются продолжением схем, используемых при расчете объективов основной линейки и дополненных некоторыми компонентами с заранее известными габаритными и aberrационными свойствами.

Такие объективы имеют поля зрения больше 70° , и задача уменьшения диаметра первой линзы представляет для конструктора серьезные трудности. Первая проблема связана с коррекцией aberrаций. Она является прямым следствием такого ограничения размера первой линзы, поскольку в ранее разработанных конструкциях этот размер не был существенным

фактором и проблема решалась вполне удовлетворительно. Обычно входной зрачок расположен приблизительно на интервале одного фокусного расстояния f' от переднего элемента, а задний отрезок часто бывает больше $2f'$. Такое сочетание достигается при значительной отрицательной силе переднего компонента. Здесь одновременная коррекция дисторсии и астигматизма является главной проблемой, особенно если принять во внимание хроматические изменения дисторсии и астигматизма при фокусировке объектива на конечные расстояния.

Для полного исправления дисторсии в такого рода объективах используются компенсаторы, построенные на основе пар отрицательных менисков. Для упрощения технологии изготовления широкоугольных объективов применяется сочетание слабой положительной линзы перед отрицательной линзой, способной вносить положительную дисторсию и тем самым компенсировать отрицательную дисторсию всего переднего компонента. Этот прием был использован, например, при расчете объектива с $f' = 20$ мм (см. табл. 2).

Вторая проблема связана с фокусировкой. Изменение aberrаций, особенно зависящих от апертуры, более явно проявляется в предельных по параметрам объективах. Проведенный анализ принципиальных схем показал, что возможны следующие принципиальные схемы построения объективов, обладающих минимальным “pumping”-эффектом. При этом для компенсации изменения угла поля зрения объектива в процессе фокусировки в нем используется специальная панкратическая система, механически связанная с фокусирующей подвижкой. Ввиду необходимости компенсации относительно

Таблица 2. Принципиальные схемы широкоугольных объективов

Техническая характеристика			Оптическая схема
F' , мм	$2w$, град	D/F'	
12	115	1:1,8	
20	78	1:1,2	
22	72	1:1,2	

небольшого изменения фокусного расстояния для компенсации “pumping”-эффекта оптическая схема такого объектива с переменным фокусным расстоянием значительно упрощается. Объектив может также строиться на основе обычного объектива в сочетании с мультиплексором, расположенным между последней поверхностью объектива и плоскостью кадра. За счет изменения фокусного расстояния такого мультиплексора осуществляется компенсация “pumping”-эффекта.

Освещенность рассмотренных объективов соответствует правилу $\cos^4\theta$ даже при виньетировании, обусловленном абберацией в изображении входного зрачка, и уменьшении угла наклона внеосевых лучей в пространстве изображения.

Основные технические характеристики и принципиальные схемы некоторых разработанных короткофокусных и среднефокусных объективов приведены в табл. 2.

В группу светосильных длиннофокусных объективов входят анастигматы с фокусными расстояниями 200, 300, 500 мм, созданные на основе схемы объектива “Телегоир” и “Таир”.

За счет усложнения фронтального компонента в объективе с $f' = 300$ мм до трехлинзовой комбинации удалось достичь высокого качества изображения и увеличить относительное отверстие.

Проблема вторичного спектра, присущая длиннофокусным объективам, успешно решается применением искусственного флюорита или разумным выбором обычных марок стекол, например, сочетанием ТФ4, ТФ5, ТФ10 с ОФ4, СТК19 и другими. При этом удается получить достаточно высокий уровень коррекции вторичного спектра при сравнительно простой конструкции объектива.

Основные технические характеристики и принципиальные схемы некоторых длиннофокусных объективов приведены в табл. 3.

Таблица 3. Принципиальные схемы длиннофокусных объективов

Техническая характеристика			Оптическая схема
F' , мм	$2w$, град	D/F'	
200	10	1:2,8	
300	5	1:2,8	

3. Этапы создания объектива

Указанные в разд. 2 параметры объективов достигаются в процессе его создания путем решения двух основных задач:

1) современного расчета объектива, когда результат расчета, т. е. математическая модель объектива, показывает, что найденные конструктивные параметры обеспечивают достижение необходимого коэффициента передачи контраста и дисторсии, а также минимализации “pumping”-эффекта и паразитной засветки, вызванной рассеянием света;

2) изготовления компонентов объектива и всей оптической системы в соответствии с расчетом, т. е. обеспечением:

а) точности заданных расчетных размеров в соответствии с допусками,

б) показателя преломления и дисперсии оптических сред согласно данным расчета,

в) неоднородности и свильности стекла, не нарушающих требования конструкторской документации.

4. Коррекция современных кинообъективов и задачи контроля

Итак, на сегодняшний день оптика объективов для профессиональной кинематографии достигла высокого уровня. Современные концепции, методы и программное обеспечение при расчетах оптических систем и прогресс в разработке и производстве оптических стекол позволили создать объективы, расчетные характеристики которых достаточно высоки. Так, рассматривая расчетные характеристики вышеприведенных схем, констатируем, что сложный объектив (см., например, табл. 1) формирует волновой фронт, деформации которого не превышают $\Delta W \leq (2-3)\lambda$. Имея в виду, что в среднем схема содержит 20 оптических поверхностей, находим, что требования к точности изготовления каждой поверхности находятся на уровне $\Delta N = 0,2$ (кольца), что соответствует $\Delta W_{\text{пов}} \approx 0,1\lambda$. Столь высокие требования объясняются тем, что в сложной системе ошибки поверхностей складываются. Для контроля столь малых ошибок необходимы методы и средства, обладающие соответствующей чувствительностью, а для количественной оценки качества изображения и аберраций систем в условиях производства необходимы средства измерения, погрешности которых существенно ниже ошибок исследуемой системы.

При изготовлении объективов в настоящее время существует ряд операций, качество которых определяется квалификацией рабочего. По мере совершенствования технологий средств контроля и благодаря применению современной высокотехнологичной

аппаратуры и методов контроля эти субъективные факторы должны быть выведены из ряда доминирующих.

Решение этих задач в условиях реального производства требует разработки методов и технологического оборудования, обеспечивающих требуемые точности изготовления.

Приборы и методы контроля современной оптики должны обеспечивать:

1) контроль погрешностей изготовления оптических деталей, требования к точности которых в части ошибок оптических поверхностей составляют, как показано, $\Delta W_{\text{пов}} \approx 0,1\lambda$;

2) измерение характеристик качества изображения, сформированного системой, и оценку качества изображения;

3) измерение аберраций изготовленной системы для ее аттестации на соответствие расчету.

Формулируя требования к характеристикам аппаратуры для технологического контроля линз современной кинооптики, отметим следующее: необходима аппаратура контроля, позволяющая выполнять контроль ΔN без применения пробных стекол, т. е. бесконтактно, так как наложение пробного стекла едва ли позволит избежать динамических и термических деформаций оптических поверхностей, соизмеримых с ошибкой в $0,1\lambda$. Таким образом, требуется интерферометр, собственная погрешность которого в 5–10 раз меньше измеряемой ошибки, т. е. составляет $(0,01-0,02)\lambda$.

5. Требования к точности образцовых элементов для классических и традиционных интерферометров

Если контролируемую поверхность оптической детали привести в контакт с образцовой поверхностью эталона, то при несоответствии их формы образуется воздушный промежуток переменной величины, который можно рассматривать как пластину толщиной h с показателем преломления $n = 1$ (воздух, вакуум). Разность хода δ лучей света с длиной волны λ , падающих на пластину под углом α и отраженных оптическими поверхностями, ограничивающими зазор, равна [5]:

$$\delta = 2h \cos \alpha + \frac{\lambda}{2}. \quad (1)$$

При падении света по нормали к поверхности имеем $\cos \alpha = \cos 0 = 1$, и тогда

$$\delta = 2h + \frac{\lambda}{2}. \quad (2)$$

Если разность хода кратна четному числу $\lambda/2$, то происходит усиление света. Распределение от-

носительной интенсивности в интерференционной картине определяется выражением

$$\tilde{I} = \cos^2 \frac{\pi \delta}{\lambda}. \quad (3)$$

Разность хода в волновой мере обозначим как

$$\omega = \frac{\delta}{\lambda}. \quad (4)$$

Если одна поверхность заклонена относительно второй на угол θ , то пространственная частота интерференционных полос, вызванных наклоном (полосы равной толщины), составит

$$v = \frac{\sin \theta}{\lambda}. \quad (5)$$

При малых углах принимают $\sin \theta = \theta$. Тогда

$$v = \frac{\theta}{\lambda}. \quad (6)$$

Распределение относительной интенсивности в интерференционной картине при введении заклона v поверхности можно описать выражением

$$\tilde{I} = \cos^2 \pi(vy + \omega), \quad (7)$$

где y – протяженность на оптической поверхности по нормали к ребру клина.

Выражение (7) описывает формирование картины интерференции двух заклоненных плоских или сферических волновых фронтов. Интерференционные полосы прямолинейны, параллельны и разделены равными промежутками, с косинусоидальным характером распределения интенсивности в интерференционной картине (в направлении по нормали к интерференционной полосе). Величина ω указывает фазовый сдвиг в периодической картине полос на участке, где имеется дополнительная разность хода, вызванная ошибкой исследуемой оптической поверхности, если образцовая поверхность ошибок не имеет.

Традиционные интерферометры (например, по схеме Физо или Тваймана–Грина) характеризуются тем, что для формирования опорного волнового фронта в их конструкции необходимо применение образцового оптического элемента (обычно образцовой оптической поверхности, плоской или сферической). Такой элемент создает волновой фронт, содержащий неизбежные остаточные ошибки (деформации). Эти ошибки порождаются рядом причин, в числе которых следующие:

1. Остаточные ошибки изготовления вследствие того, что применяемые традиционно методы обработки и контроля точных оптических поверхностей не позволяют гарантировать, что погрешности формы оптических поверхностей будут меньше чем $\lambda/20$.

2. Возможность неконтролируемого изменения формы оптической поверхности образцовой детали. Наличию таких ошибок будут способствовать:

- а) динамические воздействия (например, пережатие в оправках),
- б) гравитационные воздействия (нарушение разгрузки детали),
- в) температурные воздействия,
- г) вибрационные воздействия.

Таким образом, на практике распределение интенсивности в интерференционной картине определяется выражением

$$\tilde{I} = \cos^2 \pi(vy + \omega_T + \omega_R), \quad (8)$$

где фазовый сдвиг определяется суммой ошибок

$$\omega_R = \frac{W_R}{\lambda} \text{ и } \omega_T = \frac{W_T}{\lambda}.$$

Итак, точность интерференционного контроля при соблюдении прочих условий решающим образом определяется величиной W_R . Учитывая обычное метрологическое требование, что погрешность средства измерения должна быть на порядок меньше измеряемой ошибки изделия, можем определить типовые требования к точности измерений аберраций и ошибок оптических систем разных классов точности [5]. W_T – предельно допустимая ошибка образцового волнового фронта прибора для контроля эталонной поверхности интерферометра. Можно считать, что значения требуемой точности в случае интерферометрии относятся, при соблюдении прочих условий (вакуум, устранение влияния вибраций и т. д.), к допустимым остаточным погрешностям образцового волнового фронта, которые в свою очередь определяются ошибками образцовой оптической поверхности.

Таким образом, можно сформулировать требования к контролю образцовых элементов наивысшей точности для универсальных интерферометров (традиционных типов):

1. Требования к точности устройства для контроля эталонов показаны в табл. 4.

Таблица 4. Требования к точности контроля оптических приборов

Тип оптической системы	Требование к точности системы, не хуже	Требование к точности прибора контроля	W_R	W_T
Современный фотографический объектив	1λ	$(0,1-0,2)\lambda$	$0,15\lambda$	$0,015\lambda$
Оптические поверхности линз объектива	$0,1\lambda$	$(0,01-0,02)\lambda$	$0,015\lambda$	$0,003\lambda$

2. В связи с возможной нестабильностью эталона его разовая аттестация к моменту продажи прибора заказчику не может считаться достаточной. В действительности для обеспечения и поддержания указанной точности на практике становится необходимым оперативный самоконтроль реального состояния опорного волнового фронта в момент каждого сеанса контроля.

Исследования [7] показали, что выполнение приведенных условий становится возможным с созданием альтернативного интерферометра с дифрагированным опорным волновым фронтом.

6. Выбор схемного решения интерферометра

Одним из наиболее распространенных методов исследования деформаций волнового фронта, в том числе связанных с ошибками формы прецизионных полированных поверхностей и абберациями фокусирующих оптических систем, является метод интерферометрии.

Схемные решения традиционных интерферометров основаны на формировании опорного волнового фронта путем использования образцовых оптических поверхностей. К таким устройствам относятся ставшие классическими интерферометры Тваймана и Физо [10, 11] (например, рис. 1).

Известные достоинства таких схемных решений послужили основой их широкого применения. Однако в последние десятилетия повысился спрос на оптические системы и элементы высокого класса точности. К таким изделиям сегодня можно отнести оптические системы профессиональных кинообъек-

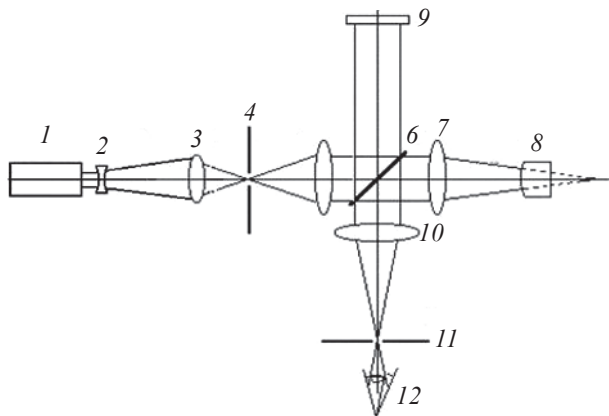


Рис. 1. Интерферометр Тваймана. 1 – лазер, 2 и 3 – элементы объектива осветительной системы, 4 – диафрагма, 5 – коллиматорный объектив, 6 – светоделитель, 7 – исследуемая оптическая система, 8 – образцовая сферическая поверхность, 9 – образцовая плоская сферическая поверхность, 10 – объектив наблюдательной системы, 11 – наблюдательная диафрагма, 12 – приемник изображения (например, глаз).

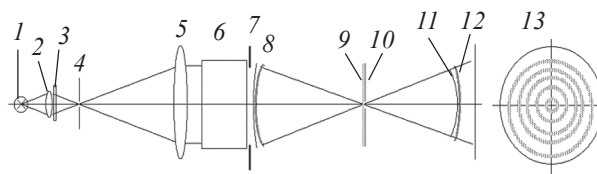


Рис. 2. Схема интерферометра Линника. 1 – лампа, 2 – конденсор, 3 – светофильтр, 4 – точечная диафрагма, 5 – коллиматорный объектив, 6 – исследуемая оптическая система, 7 – выходной зрачок, 8 – волновой фронт, сформированный исследуемой системой, 9 – пластинка Линника, 10 – светоделительное покрытие с точечной диафрагмой, 11 – исследуемый искаженный волновой фронт, 12 – дифрагированный сферический опорный фронт, 13 – интерференционная картина.

тивов. Требования к точности их оптических поверхностей, как показано, находятся на уровне $(0,1-0,2)\lambda$. Таким образом, для контроля при их изготовлении и применении необходимы приборы, обеспечивающие точность на уровне $(0,01-0,02)\lambda$, т. е. на порядок точнее традиционных.

Недостатком классических интерферометров при контроле оптики наивысшего класса точности является необходимость присутствия в их схемах образцового оптического элемента, точность изготовления которого ограничена. При этом нет гарантии от неконтролируемого изменения точности образцового оптического элемента в процессе эксплуатации интерферометра.

Альтернативным направлением интерферометрии стало создание интерферометров, в которых опорный сферический волновой фронт создается путем дифракции пучка излучения, сфокусированного на точечной диафрагме [8], соизмеримой по диаметру с длиной волны. Первая известная схема такого рода была предложена Линником [9] (рис. 2).

Здесь дифрагирующее отверстие в полупрозрачном оптическом покрытии устанавливается в плоскости пятна рассеяния, сформированного испытуемой оптической системой в схеме контроля. Недостатки такого интерферометра с совмещенными ветвями состоят в сложной настройке, отличающейся от традиционной, невысоком качестве интерференционной картины и определенных сложностях ее интерпретации.

Высокую эффективность при контроле высокоточных оптических поверхностей и систем показал лазерный интерферометр с дифрагированным опорным волновым фронтом и разнесенными ветвями [6, 10] (рис. 3).

Разработаны разновидности схем интерферометра с дифрагированным эталонным волновым фронтом. Этот прибор имеет традиционную методику настройки и интерпретации интерференционной

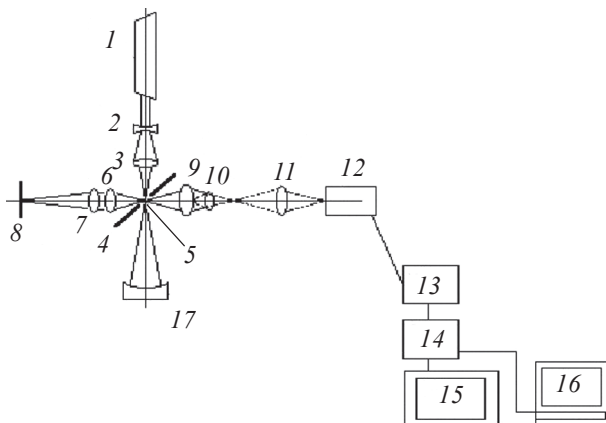


Рис. 3. Интерферометр с дифрагированным опорным фронтом и автоколлимационным осветительным плечом. 1 – лазер, 2 и 3 – осветительная система, 4 – наклонное зеркало, 5 – точечная диафрагма, 6 и 7 – встречные коллиматорные объективы, 8 – плоское автоколлимационное зеркало, 9–11 – элементы наблюдательного микроскопа с линзой Бертрана, 12 – видеокамера, 13 – блок обработки видеосигнала, 14 – блок выделения центров интерференционных полос, 15 – телевизионный монитор, 16 – компьютер, 17 – измеряемая поверхность.

картины, обеспечивает высокое качество интерферограммы, гибкость при исследовании оптических систем и элементов с различными коэффициентами пропускания (отражения) от 98% (зеркальные покрытия) до 0,15% (просветляющие покрытия).

Прибор отличается отсутствием образцовых оптических элементов и ошибок их изготовления, конструктивная простота, малогабаритность и легкость в эксплуатации.

С другой стороны, анализ [7] функции преобразования (ФП) для метода интерферометрии деформаций волнового фронта показывает, что относительная интенсивность в интерференционной картине $\tilde{I}$ связана с искажениями волнового фронта ω (в волновой мере) периодической зависимостью

$$\tilde{I} = \cos^2 \pi \omega. \quad (9)$$

Здесь $\tilde{I} = \frac{I_i}{I_0}$, где I_i – значение интенсивности в данной точке интерференционного изображения, I_0 – интенсивность в той же точке при отсутствии аберраций, $\omega = \frac{W}{\lambda}$, где W – нормальное отклонение вол-

нового фронта, λ – длина волны излучения в интерферометре. Анализ показывает ряд преимуществ, создаваемых здесь периодической характеристикой чувствительности:

1) наглядное отображение карты ошибок волнового фронта, где интерференционные полосы играют роль изолиний;

2) количественный характер метода, где интерферограмма удобна для прямых геометрических измерений координат положения полос, связанных с исследуемыми ошибками волнового фронта.

В работе [7] дан анализ возможностей и ограничений методов и средств исследования прецизионных поверхностей. Недостатки плавных характеристик преобразования:

– ограниченный динамический диапазон, лежащий в рамках линейного участка ФП;

– низкая чувствительность визуальных измерительных наводок, связанная с нечеткостью элементов изображения (теневая картина, пятно рассеяния, пятна гартманогаммы);

– высокая избыточность информации при автоматизированной расшифровке и интерпретации таких изображений.

Для устранения выявленных недостатков и получения эффективных методов и средств исследования прецизионных поверхностей, обладающих новыми свойствами и расширенными возможностями, дано развитие системы одномерных ФП [7]. Предложен ряд типовых ФП, которым присвоены условные названия, взятые в кавычки, по признаку внешней формы графика функции: “импульс” и “гребенка”.

Поскольку рассматриваемые инвариантные зависимости могут связывать между собой в разных конкретных случаях разные величины, для всех ФП приняты единые значения функции и аргумента: $W_{y,z}$ – независимая переменная, соответствующая исследуемому двумерному параметру; $I_{y',z'}$ – зависимая переменная, соответствующая двумерному распределению интенсивности в оптико-измерительном изображении.

ФП метода исследования прецизионных поверхностей типа “импульс” может быть наглядно представлена выражением с использованием δ -функции $I = \delta(W) = \lim_{N \rightarrow \infty} N \exp(-N^2 \pi W^2)$, которое при $W = 0$ принимает вид $I(W) = I_{\max}$, а при $W \neq 0$ – $I_{\max} = 0$.

Периодическая ФП метода исследования прецизионных поверхностей типа “гребенка” может быть наглядно представлена выражением

$$I_{y,z} = \text{comb}(W/\lambda_w) = \sum_{n=1}^N \delta(W - n\lambda_w),$$

где $\lambda_w \leq W \leq n\lambda_w$. На практике она может быть определена как

$$I(W) = I_{\max} \quad \text{при} \quad \frac{W}{\lambda_w} = 0, 1, 2, 3, \dots,$$

$$I(W) = 0 \quad \text{при} \quad \frac{W}{\lambda_w} \neq 0, 1, 2, 3, \dots$$

Анализ показал, что разработанная система ФП дает ряд специальных положительных эффектов,

таких как сокращение избыточности информации, улучшение наглядности и выявление новых деталей и свойств объекта, повышение чувствительности контроля и точности измерений, повышение оперативности и производительности, упрощение задачи автоматизации контроля и исследований.

Разработанный аппарат развитых инвариантных функций преобразования, как показали исследования, становится теоретической основой для современных методов обработки оптической измерительной информации, создания современных компьютеризированных методов оптических измерений и контроля, включая новые принципы, алгоритмы и программное обеспечение.

Взаимовлияние синтезируемых методов исследования прецизионных поверхностей с получением новых результатов и свойств иллюстрируется также на примере предложенного (и реализованного в виде серийного прибора) метода изометрии второй производной функции пространственного распределения интенсивности, позволяющего, например, выделять центры (оси) интерференционных полос. Эта разработка дала возможность создать автоматизированный интерферометр нового типа, позволяющий повысить точность расшифровки интерферограмм в 10–40 раз в реальном времени.

Операция электронного выделения и визуализации центров интерференционных полос (рис. 4) с умножением частоты полос осуществлена согласно ФП вида

$$I_{\text{ок}} = \text{comb} \left[\frac{1}{\lambda} (y \sin \theta + kW) \right],$$

где $I_{\text{ок}}$ – относительная интенсивность в оконтуренной интерферограмме, θ – угол заклона образцового волнового фронта интерферометра относительно рабочего волнового фронта, W – волновая абберрация, y – координата в интерферограмме, ориентированная по нормали к направлению интерференционной полосы; k – коэффициент умножения полос.

Если $k = 2$, то при этом цена шага интерференционной полосы составляет $\lambda/4$, что создает эффект интерферометрии с использованием излучения, имеющего $\lambda \approx 300$ нм.

Точность определения координат интерференционных полос возрастает, как показали исследова-



Рис. 4. Этапы обработки интерферограмм.

ния, в 40 раз по сравнению с точностью измерения необработанной интерферограммы, что соответствует возможности визуального обнаружения деформации волнового фронта на уровне $\lambda/200$ в реальном времени.

Точностные характеристики прибора исследования прецизионных поверхностей зависят от принципа и конструкции измерительного преобразователя и могут быть определены при анализе функции преобразования.

Итак, в данных дифракционных интерферометрах генерация неискаженного сферического эталонного фронта волны основана на использовании хорошо воспроизводимого физического явления дифракции лазерного пучка на точечном отверстии диаметром, соизмеримым с длиной волны. В этих приборах отсутствует образцовая оптическая деталь и присущие ей неизбежные остаточные погрешности, возникающие при изготовлении.

Испытания и аттестация реализованных приборов не выявили погрешностей, которые превышали бы значения $0,02\lambda$. Практика работы дифракционных интерферометров с телевизионным аналоговым анализатором интерферограмм (ТАИ-1) показала возможность обнаружения и оценки ошибок волнового фронта на уровне $0,005\lambda$ в реальном времени в интерактивном режиме.

Сферические вогнутые поверхности могут контролироваться таким прибором с точностью лучше $0,01$ длины волны.

Преимущества аттестации приборов при использовании интерферометров с дифракцией точечным отверстием:

- отсутствие ошибок изготовления эталона,
- простота конструкции,
- простота юстировки,
- уменьшенная вибросочувствительность,
- уменьшенные габариты,
- высокое качество интерферограммы.

Разработанные методы и автоматизированная аппаратура могут быть использованы в различных областях науки и практики для расширения возможностей оптико-физических исследований, контроля и измерений.

7. Развитие средств и методик дифракционной интерферометрии в области контроля систем и элементов современных линзовых кинообъективов

Базовая схема дифракционного интерферометра позволяет контролировать вогнутую оптическую сферическую поверхность с наивысшей точностью в безэталонном режиме, т. е. непосредственно с помощью дифракционного волнового фронта.

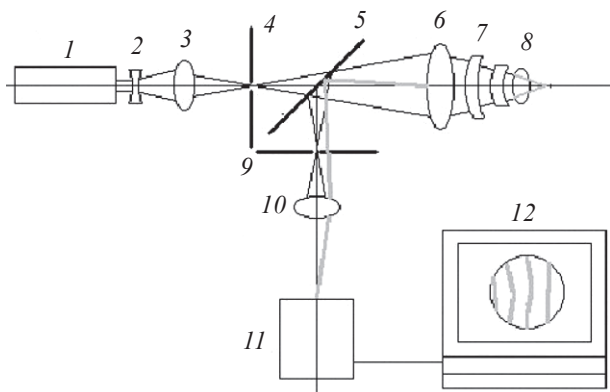


Рис. 5. Интерферометр Физо. 1 – лазер, 2 и 3 – элементы осветительной системы, 4 – точечная диафрагма, 5 – светоделитель, 6 – коллиматорный объектив, 7 – объектив интерферометра с образцовой фронтальной поверхностью, 8 – деталь с исследуемой выпуклой сферической поверхностью, 9 – наблюдательная диафрагма, 10 – проекционный объектив системы наблюдения, 11 – приемник изображения, 12 – компьютер.

Значительное число выпуклых поверхностей в объективах требует других схемных решений. На практике одним из наиболее распространенных для этих целей является интерферометр Физо (рис. 5).

Как известно, схема Физо реализует принцип бесконтактного пробного стекла.

Применение лазерного излучения с большой длиной когерентности позволяет, используя одну образцовую поверхность, контролировать выпуклые исследуемые поверхности с радиусами кривизны, лежащими в пределах радиуса кривизны образцовой поверхности, а также с апертурой, лежащей в пределах апертуры образцовой поверхности.

Заметим, что при этом для исследуемых вогнутых поверхностей радиус кривизны ограничивается лишь длиной когерентности излучения, которая, например, для He–Ne-лазеров составляет десятки метров.

Использование принципов дифракционной интерферометрии при работе с интерферометром Физо можно наметить в следующих направлениях:

постоянный контроль дифракционным интерферометром состояния образцовой поверхности в ходе сеанса работы интерферометра Физо,

формирование дифракционного волнового фронта точечной диафрагмой, благодаря чему устраняется влияние aberrаций, создаваемых осветительной системой интерферометра.

Изготовление деталей и систем интерферометра Физо в схеме, использующей дифракционный интерферометр, создает возможность разработки и изготовления интерферометра Физо совершенно нового типа.

Например, допуск на aberrации волнового фронта интерферометров типа Zygo (аналоги ИКД-У и

ИКД-110) составляет $\Delta W = 1,6\lambda$ при точности образцовой поверхности на уровне $(0,1-0,2)\lambda$.

Понятно, что при ужесточении требований к образцовой поверхности до уровня $0,01\lambda$ допуск на ΔW составляет $0,16\lambda$. Таким образом, схема контроля интерферометра должна быть рассчитана и изготовлена другим способом, что не может быть достигнуто без применения дифракционной интерферометрии.

Анализ возможностей разрабатываемых систем дифракционной интерферометрии показывает, что средства интерферометрии данного класса позволяют:

вести контроль ошибок оптических поверхностей без применения пробных стекол, в бесконтактном режиме;

выполнять изготовление и контроль образцовых поверхностей для традиционных интерферометров с достижением ошибки на уровне $0,01\lambda$;

контролировать оптические поверхности с любыми коэффициентами отражения (зеркальные, просветленные, непокрытые) без замены образцового элемента (эталона) в интерферометре;

осуществить интерферометр с обеспечением самоконтроля образцовой поверхности в процессе каждого сеанса работы, определением карты остаточных отклонений формы образцовой поверхности на момент контроля и введением этих данных в компьютер для оперативной коррекции результатов измерения.

Выводы

Представлены схемы объективов, обеспечивающие высокий контраст изображения при полной апертуре, малые значения поперечных и продольных сферических aberrаций, минимальное значение дисторсии, неизменность качества изображения при фокусировке на конечные дистанции. Рассмотрены требования к контролю современной кинооптики. Показаны пути повышения точности контроля для максимального приближения расчетных моделей к производимой продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шубин С.В. Справочник по телевизионной оптике. М.: D&C корпорация, 2002.
2. Фролов Д.Н. Синтез оптических систем линзовых микрообъективов // Оптический журнал. 2002. № 9. С. 16–20.
3. Русинов М.М. Техническая оптика. Л.: Машиностроение, 1979.
4. Волосов Д.С. Фотографическая оптика. М.: Искусство, 1971.
5. Кирилловский В.К., Кузнецов Д.Н., Трухин М.М. Интерферометр с дифрагированным фронтом сравнения для контроля прецизионных оптических поверхностей

- тей // Тез. докл. на Научно-технич. конф. “Прикладная оптика-98”. СПб.: ГОИ, ГИТМО, 1998.
6. Кирилловский В.К. Лазерный интерферометр с дифрагированным опорным фронтом // Тез. докл. на Российск. научно-практич. конф. “ОПТИКА. – ФПЦ Интеграция”. СПб.: ИТМО (ТУ), 1999.
7. Кирилловский В.К. Характеристики чувствительности структурометрических систем // Тез. докл. на 4-й Всесоюзн. конф. “Фотометрия и ее метрологическое обеспечение”. М.: ВНИИОФИ АН СССР, 1982.
8. Kirillovsky V.K. Diffraction Reference Wavefront Laser Interferometer // Proc. SPIE. 1992. V. 1751. P. 197–200.
9. Линник В.П. Простой интерферометр для исследования оптических систем // Труды ГОИ. 1934. Т. X. В. 95.
10. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. Л.: Машиностроение, 1984.
11. Малакара Д. Оптический производственный контроль. М.: Машиностроение, 1995.
-