

УДК 535-15: 535.4: 681.7.02-04:681.787

## Высокоточный метод контроля параметров локальных отклонений нанометрового уровня поверхности оптической детали

© 2018 г. **Н. В. Барышников\***, доктор техн. наук; **Д. Г. Денисов\***, канд. техн. наук; **В. Е. Карасик\***, доктор техн. наук; **М. А. Абдулкадыров\*\***, канд. техн. наук; **А. Н. Игнатов\*\***; **В. Е. Патрикеев\*\***; **А. П. Семенов\*\***, канд. техн. наук; **А. Б. Морозов\*\***; **И. Н. Судариков\*\***; **Ю. А. Шаров\*\***

\*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва

\*\*Лыткаринский завод оптического стекла, г. Лыткарино Московской обл.

E-mail: lastro@lzos.ru

Поступила в редакцию 21.08.2017

Разработан, научно обоснован и экспериментально подтвержден метод контроля локальных отклонений нанометрового уровня поверхностей крупногабаритных оптических деталей (элементов) от заданного профиля на основе алгоритма расчета целевой функции — спектральной плотности одномерной корреляционной функции в широком спектральном диапазоне пространственных частот. Проведены теоретические и экспериментальные исследования неисключенной систематической и случайной составляющих погрешности определения оптимизационного параметра используемой целевой функции — среднего квадратического отклонения локальных отклонений поверхностей крупногабаритных оптических деталей от заданного профиля.

**Ключевые слова:** оптический контроль, характеристики волновых фронтов, характеристики профилей поверхностей, спектральная плотность корреляционной функции, динамическая интерферометрия, анализ случайных погрешностей, эффект «утечки» частоты.

**Коды OCIS:** 220.0220, 220.0230, 220.4610, 350.1260

### ВВЕДЕНИЕ

Современные оптические технологии, ориентированные на создание перспективных технологичных изделий, обладающих высокими показателями качества [1–4], на сегодняшний день невозможны без применения высокоточных методов и оптико-электронной аппаратуры диагностики локальных неоднородностей поверхностей изготавливаемых оптических деталей.

Особый интерес представляют технологии производства и сопутствующий им оперативный высокоточный аттестационный контроль показателей качества (высотных статистических параметров профилей [5–8]) крупногабаритных изделий астрономической и лазерной оптики.

Одним из уникальных инженерных и научно-технических проектов, связанных с разработкой крупногабаритной высокоточной астрономической оптики, является проект Европейской Южной обсерватории (ESO, *European Southern Observatory*),

направленный на создание телескопа ELT (*Extremely Large Telescope* — Экстремально большой телескоп) с главным зеркалом диаметром 39 м, состоящим из 798 сегментов диаметром 1,4 м. Для реализации такого проекта необходима разработка как перспективных технологий формования профилей сегментов зеркал с погрешностью формы до уровня RMS (*root mean square*) в несколько нанометров, так и методик высокоточного аттестационного контроля, реализующего обратную связь в едином технологическом комплексе [1, 2]. Стоит отметить, что качество изображений объектов, формируемых главными зеркалами астрономических телескопов, во многом определяется минимальным светорассеянием изготавливаемых профилей зеркал, а следовательно, минимальными локальными отклонениями поверхностей крупногабаритных оптических деталей от заданного профиля (далее локальных отклонений), и шероховатостью поверхности.

Другой технологической задачей, связанной с производством высококачественной крупногабаритной оптики, является разработка крупногабаритных лазерных элементов активных сред лазерных комплексов для реализации управляемого термоядерного синтеза [4]. Научно-технический задел в данном направлении существует как у отечественных («Дельфин-1», ФИАН, Москва, СССР, «Искра-5» РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, РФ), так и у зарубежных (NIF (США), «Мегаджоуль» (Франция), ITER (США, Европа, Япония, Россия), «Nova», Lawrence Livermore National Laboratory (США)) разработчиков, что позволяет в перспективе перейти на принципиально новый уровень получения выходной энергии — мегаджоульный. Получение такого уровня энергии требует значительного качества изготовления лазерных активных сред и разработки методов аттестационного контроля показателей их профилей [1, 2–8].

С целью создания и успешного развития в России рассмотренных перспективных технологических направлений необходимо иметь не только современную отечественную технологию производства крупногабаритных оптических элементов (ОЭ) нового поколения, но и комплекс современной оптико-электронной аппаратуры диагностики статистических показателей их качества [1–5].

## ПОСТАНОВКА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ

В настоящей работе рассмотрены оригинальный метод и схмотехнические решения по разработке оптико-электронной аппаратуры высокоточного аттестационного контроля локальных отклонений нанометрового уровня поверхности крупногабаритных ОЭ от заданного профиля. Предложенный метод основан на частотном анализе [6, 7] профиля контролируемой поверхности с помощью измерительного стенда на базе динамического интерферометра [3, 4].

В общем случае функцию, описывающую структуру локальных отклонений профиля оптической детали, можно представить в виде набора гармоник соответствующих пространственных частот, определяющих такие его технологические параметры, как непрямолинейность и волнистость [3, 8]. Эти локальные отклонения обусловлены свойствами обрабатываемых инструментов и погрешностью метода обработки оптических изделий [3, 8]. Помимо указанных параметров формы профиля гармоник высоких частот [3, 4] характеризуют степень шероховатости, которая образуется при съеме материала в процессе формообразования детали полирующими суспензиями [1, 2]. Для описания неоднородностей искажений волновых фронтов (ВФ) при контроле ОЭ можно использовать международный классификатор качества изготовления активных лазерных сред технологического комплекса NIF (*National Ignition Facility*, США), представленный в виде набора характеристик в четырех пространственно-частотных диапазонах [3, 4] (табл. 1).

Диапазоны I–III характеризуют искажения параметров ВФ лазерного пучка, обусловленные ошибками формы исследуемых оптических деталей, а четвертый диапазон — шероховатость профилей их поверхностей.

Указанные в табл. 1 значения искажений ВФ оцениваются в диапазоне I статистическими показателями PV (*peak to valley* — максимальное расстояние между высотой наибольшего выступа и глубиной наибольшей впадины искажений),  $RMS_{grad}$  (*root mean square gradient* — средний квадратический градиент искажений), а в диапазонах II и III — параметром RMS, характеризующим отклонения формы ВФ [3, 4, 8]. Для оценки шероховатости в IV диапазоне используют параметр Rq, который определяет RMS точек профиля поверхности оптической детали в пределах заданной области исследования (базовой площади) [3–5, 8]. Аналитическое описание параметра Rq имеет тот

Таблица 1. Технологические требования к оптическим деталям при пространственно-частотном анализе неоднородностей поверхности

Характеристика	Пространственно-частотный диапазон			
	I	II	III	IV
Пространственная частота неоднородностей искажений ВФ, мм <sup>-1</sup>	0–0,03	0,03–0,10	0,4–1,0	10–100
Пространственный масштаб неоднородностей искажений ВФ, мм	до 33	33–2,5	2,5–0,1	0,1–0,01
Статистические показатели искажений ВФ				
PV, нм	208	–	–	–
$RMS_{grad}$ , нм/см	7	–	–	–
RMS, нм	–	1,8	1,1	–
Rq, нм	–	–	–	0,4

же вид, что и величина RMS, но определяется на малой базовой площади [3, 8].

Стоит отметить, что при переходе от указанных статистических показателей искажений ВФ к параметрам профиля [3, 4] исследуемой детали вводится нормирующий множитель 0,5, впоследствии учитываемый в алгоритме расчета.

Важно отметить, что приведенные в табл. 1 показатели качества являются оптимизационными параметрами целевой функции аттестационного контроля профиля оптической детали, в качестве которой предлагается использовать спектральную плотность одномерной корреляционной функции профиля поверхности СПКФ1, или  $S1D(v)$ ,  $\text{нм}^2/\text{мм}$  (где  $v$  — пространственная частота,  $1/\text{мм}$ ). В качестве критериев оптимизации данной функции используются допустимые (максимальные) значения погрешностей определения приведенных в табл. 1 показателей качества.

Традиционный метод аттестационного контроля [3, 4] основан на сравнении построенной функции  $S1D(v)$  с функцией  $S1D_{\text{ISO}}(v)$ , определяемой согласно стандарту ISO 10110 [8]. При превышении функцией  $S1D(v)$  в указанном пространственно-частотном диапазоне функции  $S1D_{\text{ISO}}(v)$  можно судить о наличии недопустимых локальных отклонений поверхности от заданного профиля и говорить о непригодности оптической детали для ее последующего функционирования (рис. 1а, б). Детально данная методика приведена в работе [3].

Следует отметить, что возможные пространственные неоднородности в промежуточных сечениях исходной функции —  $S2D(v_x, v_y)$ , обусловленные наличием локальных отклонений поверхности (рис. 1а), могут внести существенный вклад

в структуру погрешности определения результирующего значения какого-либо статистического показателя качества исследуемой формы ВФ. Поэтому данный метод аттестационного контроля не позволяет судить об истинном качестве оптической детали в широком диапазоне пространственных частот локальных отклонений.

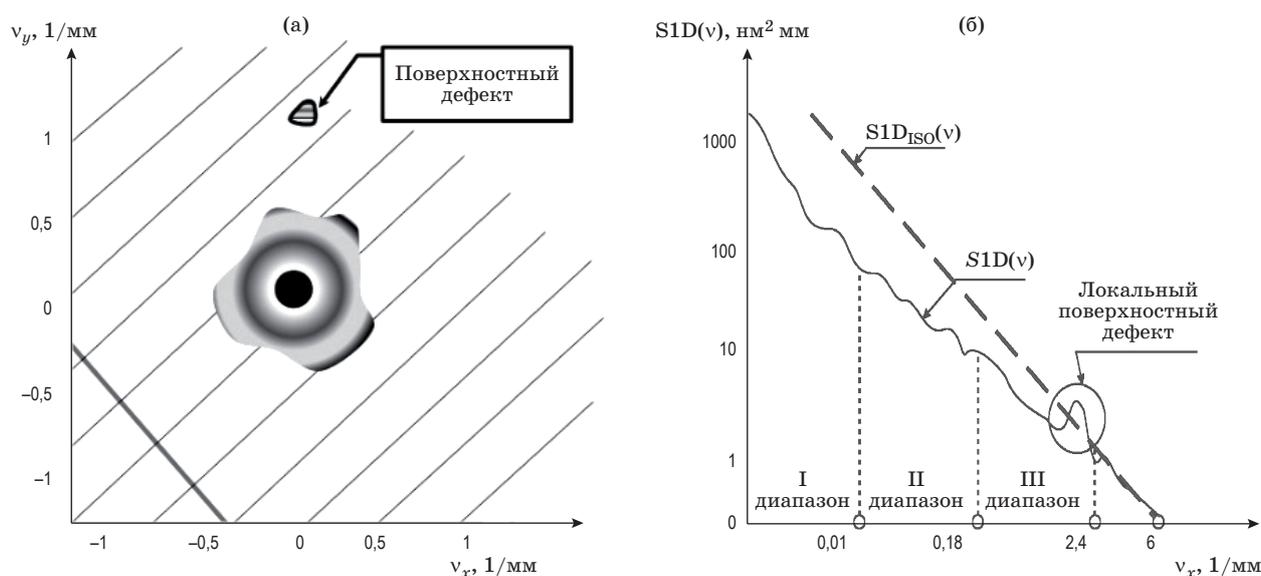
В данной работе предлагается альтернативный метод, основанный на использовании алгоритма расчета  $S1D(v)$  в результате статистического усреднения отдельно взятых направлений вдоль радиуса-вектора в информативной матрице исходной функции  $S2D(v_x, v_y)$ .

Для получения функции  $S2D(v_x, v_y)$  можно использовать два подхода. Первый базируется на теории статистических измерений и позволяет определить искомую функцию как интеграл от автокорреляционной функции распределения высот исследуемой карты профиля  $h(x, y)$  [3–5, 8]

$$S2D(v_x, v_y) = \frac{1}{ab} \int_{-b/2-a/2}^{b/2} \int_{-a/2}^{a/2} AKr[h(x, y)] \times \exp\{-2\pi i(v_x x + v_y y)\} dx dy,$$

где  $a, b$  — размеры световой апертуры детали, характеризующие область исследования вдоль осей  $x, y$ , соответственно;  $AKr[h(x, y)]$  — автокорреляционная функция, или математическое ожидание произведения разностей функций высотных параметров профиля  $h(x, y)$ .

Реализация второго метода расчета функции  $S2D(v_x, v_y)$  предполагает использование теоремы Винера–Хинчина [3, 4, 6, 7]. При этом можно найти искомую двумерную функцию стационарного



**Рис. 1.** Иллюстрация методики аттестационного контроля локальных отклонений поверхности ОП технологического комплекса NIF. Вид исходной функции  $S2D(v_x, v_y)$  и ее сечение под углом  $60^\circ$  (а), соответствующая сечению усредненная функция  $S1D(v)$  и построенная согласно стандарту [8] функция  $S1D_{\text{ISO}}(v)$  (б).

в широком смысле случайного процесса как квадрат модуля преобразования Фурье функции высотных параметров карты профиля оптической поверхности  $h(x, y)$ , приведенной к единичной площади  $a \times b$  (области исследований)

$$S2D(v_x, v_y) = |\mathfrak{F}\{h(x, y)\}|^2 / (ab), \quad (1)$$

где

$$\mathfrak{F}\{h(x, y)\} = \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} h(x, y) \exp(-2\pi i(v_x x + v_y y)) dx dy$$

— преобразование Фурье функции  $h(x, y)$ .

Для дальнейших исследований будем использовать второй метод, поскольку его применение обеспечивает более высокую точность вычислений. Приведенный алгоритм позволяет проанализировать пространственные частоты и рассчитать значения RMS соответствующих им неоднородностей поверхности (см. табл. 1) на основе теоремы Парсеваля [3, 4, 6, 7]

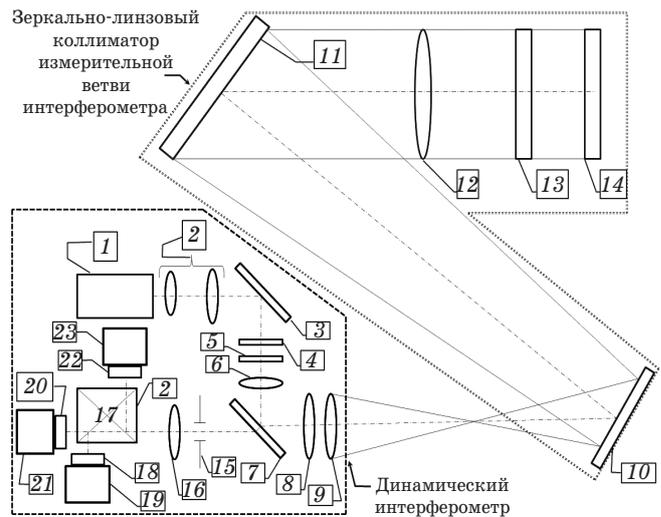
$$RMS_{S1D}(v) = \left( 2\pi \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} S1D(v) dv \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где  $v_{\max}$ ,  $v_{\min}$  — максимальная и минимальная пространственные частоты исследуемой области (частотный диапазон исследования) на поверхности детали.

## ПРИНЦИП РАБОТЫ И СОСТАВ АППАРАТУРЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СТЕНДА ВЫСОКОТОЧНОГО ПОЛНОАПЕРТУРНОГО АТТЕСТАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ

С целью реализации алгоритма полноапертурного аттестационного контроля неоднородностей искажений ВФ при контроле крупногабаритных ОЭ в I диапазоне соответствующих пространственных частот в результате расчета одномерной целевой функции  $S1D(v)$  был разработан измерительный стенд (рис. 2) на базе динамического интерферометра «Intellium H2000» (ESDI, США) и зеркально-линзового коллиматора, имеющего диаметр световой апертуры порядка 1000 мм.

Стоит отметить, что для корректного расчета и анализа функции  $S1D(v)$  необходимо получить распределение высот топограммы поверхности детали  $h(x, y)$  в режиме реального времени с учетом минимального влияния турбулентных потоков воздушных масс, а также вибраций, существующих в производственных помещениях. Этому требованию удовлетворяет перспективный класс высокоточной оптико-электронной аппаратуры современного метрологического обеспечения в оптических технологиях — динамические интерференционные системы [3].



**Рис. 2.** Функциональная схема измерительного стенда на базе динамического интерферометра *Intellium H2000* и зеркально-линзового коллиматора. 1 — источник излучения, 2 — афокальная оптическая система, 3 — плоское зеркало, 4, 18, 20, 22 — поляризаторы, 5, 15 — поляризационный и пространственный фильтры, 6 — микрообъектив, 7 — полупрозрачная пластина, 8 — объектив-коллиматор, 9 — объектив, 10, 11 — плоские поворотные зеркала автоколлиматора, 12 — коллимирующий объектив, 13 — оптический клин с эталонной поверхностью сравнения, 14 — крупногабаритное плоское контролируемое зеркало, 16 — объектив сопряжения, 17 — светоделительный куб, 19, 21, 23 — ФПЗС матрицы.

Особенностью функциональной схемы динамического интерферометра, представленной на рис. 2, является отсутствие подвижных конструктивных элементов, что, несомненно, делает его более виброустойчивым в процессе производственного контроля по сравнению с классическими интерферометрами со сдвигом фазы.

Виброустойчивость и высокая стабильность динамического интерферометра обусловлена спецификой аппаратного решения, реализующего сдвиг фаз регистрируемых интерферограмм с помощью трех линейных поляризаторов, плоскости поляризации которых ориентированы друг относительно друга под углом  $120^\circ$ . Это позволяет за один кадр получать три интерферограммы при минимальном времени экспозиции с помощью широкоформатных матричных приемников излучения. Данное решение обеспечивает нечувствительность метода контроля к турбулентным потокам воздушных масс и влиянию низкочастотных вибраций, существующих в производственных условиях.

В состав аппаратуры измерительного стенда (рис. 2) входят осветительный, измерительный и приемный оптические каналы.

Осветительный канал прибора содержит источник излучения (He-Ne лазер, длина волны излучения  $0,6328 \text{ мкм}$ ), афокальную оптическую систему, плоское зеркало, поляризационные элементы, микрообъектив и светоделительную пластину.

Источник излучения осветительной ветви формирует линейно поляризованное излучение, которое на выходе трансформируется в две ортогонально поляризованные составляющие ( $s$ - и  $p$ - типов поляризации). Обе составляющие излучения распространяются по своим направлениям с различными фазовыми скоростями. В осветительной ветви интерферометра они образуют два пространственно разнесенных источника излучения, расположенные под небольшим углом (порядка трех миллирадиан относительно оптической оси прибора).

Таким образом, в измерительный канал прибора, состоящий из объектива-коллиматора, фокусирующего объектива, коллимирующего объектива, оптического клина с эталонной оптической поверхностью и плоского контролируемого ОЭ, одновременно попадают обе ортогонально поляризованные компоненты излучения, каждая из которых в дальнейшем образует две плоские волны, отраженные от эталонной поверхности оптического клина и контролируемой поверхности плоского ОЭ.

В результате в приемный канал прибора, в состав которого входят объектив, полупрозрачная пластина, пространственный фильтр (точечная диафрагма), приемная оптическая система, светоделительный куб, три матрицы фоточувствительных приборов с зарядовой связью (матрицы ФПЗС), поступают две пары ортогонально поляризованных составляющих исходной плоской линейно поляризованной волны —  $(s_{st}, p_{soph})$  и  $(s_{soph}, p_{st})$  (индексы «st», «soph» относятся к эталону и контролируемой поверхности плоского ОЭ — оптической детали). Эти компоненты попарно интерферируют в плоскости поляризаторов, установленных перед тремя матрицами ФПЗС приемного канала. При наклоне контролируемой поверхности плоского ОЭ на угол, соответствующий ориентации двух исходных источников ( $s$ - и  $p$ - типов поляризации) осветительной ветви интерферометра относительно его оптической оси, можно последовательно регистрировать результат суперпозиции составляющих двух пар —  $(s_{st}, p_{soph})$  или  $(s_{soph}, p_{st})$ . С целью исключения паразитной засветки и минимизации пространственных шумов в приемный канал динамического интерферометра встроен фильтр пространственных частот в виде точечной диафрагмы. Для проведения первичных юстировочных работ измерительного и осветительного каналов в составе интерферометра предусмотрен блок наведения, ориентирующий автоколлимационные блики от эталонной и контролируемой поверхностей. Таким образом, в приборе реализуется поляризационная калибровка [3], позволяющая учитывать инструментальную погрешность измерительного стенда. Для отработки его экспериментальных данных на основе представленной функциональной схемы (рис. 2) в работе предлагается алгоритм расчета статистических показателей, характеризующих

искажения ВФ лазерного пучка (табл. 1) при контроле плоских ОЭ.

Разработанный алгоритм позволяет учесть влияние погрешностей дискретизации, математического аппарата быстрого преобразования Фурье (БПФ), преобразования двумерного стационарного сигнала в одномерный, краевых эффектов БПФ, эффекта спектральной «утечки» частоты [3, 4, 6, 7] и повысить в результате этого точность измерения. Рассмотрим кратко основные этапы алгоритма.

На первом этапе карта профиля оптической поверхности  $h(x, y)$  контролируемой детали формируется приемной апертурой диаметром  $A$  в плоскости матричного приемника излучения с количеством чувствительных элементов  $M \times N$  по горизонтали и вертикали соответственно, после этого выполняется операция дискретного БПФ карты профиля оптической поверхности

$$h_{mn} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} h_{mn} \exp\left(\frac{-2\pi i n}{N}\right) \exp\left(\frac{-2\pi i m}{M}\right),$$

где  $M, N, m, n$  — максимальное количество значимых точек по горизонтальной и вертикальной осям, соответственно, и их координаты,  $h_{mn}$  — дискретное представление карты профиля оптической поверхности.

Полученный спектр  $h_{mn}$  регистрируемой карты профиля формируется с учетом линейных размеров исследуемой области детали так, что нормированный спектр имеет вид

$$h_{mn}^H = h_{mn} (A/M)(A/N),$$

где  $A/M, A/N$  — шаги дискретизации с учетом линейного увеличения приемного объектива по горизонтальной и вертикальной осям.

На втором этапе вычисляется функция  $S2D(v_x, v_y)$  как квадрат модуля двумерного спектра карты профиля, приведенного к единичной области (площади) исследования, в соответствии с формулой (1)

$$S2D_{mn} = S^{-1} \left| h_{mn}^H \right|^2,$$

где  $S = (dxdy)C$  — площадь контролируемой (исследуемой) детали,  $dx = 1/u_{\max}$ ,  $dy = 1/v_{\max}$  — шаги дискретизации, ограничивающие максимальные пространственные частоты  $u_{\max} = M/(2A)$ ,  $v_{\max} = N/(2A)$  вдоль горизонтальной и вертикальной осей матрицы  $h_{mn}^H$ ,  $C$  — количество элементов матрицы, содержащей информацию о профиле ВФ, отраженного от поверхности плоского ОЭ (информативная матрица).

При этом матрица суммарных пространственных частот определяется выражением

$$v_{p\ mn} = \sqrt{(u_m)^2 + (v_n)^2}, \quad (3)$$

где

$$u_m = (m - M + 1/2)/A, \quad v_n = (n - N + 1/2)/A$$

— векторы частотных сеток по горизонтальной и вертикальной осям.

В полученной матрице частот последовательно рассматривается каждая суммарная пространственная частота (3) от меньшей к большей до частоты Найквиста, соответствующей радиусу максимальной окружности (карты профиля оптической поверхности  $h_{mn}$ ) диаметром

$$D = 2\sqrt{S/\pi},$$

вписанной в матрицу фотоприемного устройства. В итоге определяются модули векторов суммарных пространственных частот по различным направлениям  $v_{p\ mn}$  и соответствующие им среднеквадратические значения векторов  $S1D(v)$ , которые представляют искомую целевую функцию, приведенную к одномерному виду.

На заключительном этапе в соответствии с выражением (2) находят RMS искажений ВФ при контроле локальных отклонений изотропной поверхности [5] в заданном частотном диапазоне исследования  $v_{p\min} - v_{p\max}$ , проводя сравнительную оценку с данными, представленными в табл. 1,

$$RMS_{S1D}(v_p) = \left[ 2\pi \int_{v_{p\min}=0}^{v_{p\max}} SID(v_p) dv_p \right]^{1/2}, \quad (4)$$

где  $v_{p\min}$ ,  $v_{p\max}$  — радиальные значения минимальной и максимальной пространственных частот диапазона исследования искажений ВФ при контроле плоского ОЭ.

Существенным фактором, влияющим на методическую погрешность определения RMS во втором спектральном диапазоне при построении одномерной целевой функции  $S1D(v_p)$ , является эффект спектральной «утечки» частоты. Он проявляется в переналожении пространственных частот первого и второго диапазонов, в результате этого амплитудные значения гармоник низких пространственных частот в значительной степени превышают амплитудные значения гармоник высоких пространственных частот, что приводит к существенной погрешности вычисления одномерной целевой функции  $S1D(v_p)$  и, как следствие, значения RMS (4). Для оценки влияния данного эффекта на погрешность измерений была проведена серия расчетов RMS по 4 реализациям топографических карт искажений ВФ для пространственных неоднородностей, отнесенных ко второму пространственно-частотному диапазону (см. табл. 2).

Анализ представленных в табл. 2 результатов позволяет сделать вывод о необходимости предварительной пространственно-частотной фильтра-

**Таблица 2. Анализ влияния низких пространственных частот на определение RMS высокочастотных неоднородностей**

№ реализации	Параметр RMS с учетом влияния низких пространственных частот, нм	Параметр RMS после оконной фильтрации низких пространственных частот, нм
1	6,045	4,863
2	7,149	5,967
3	16,176	8,387
4	14,545	9,789

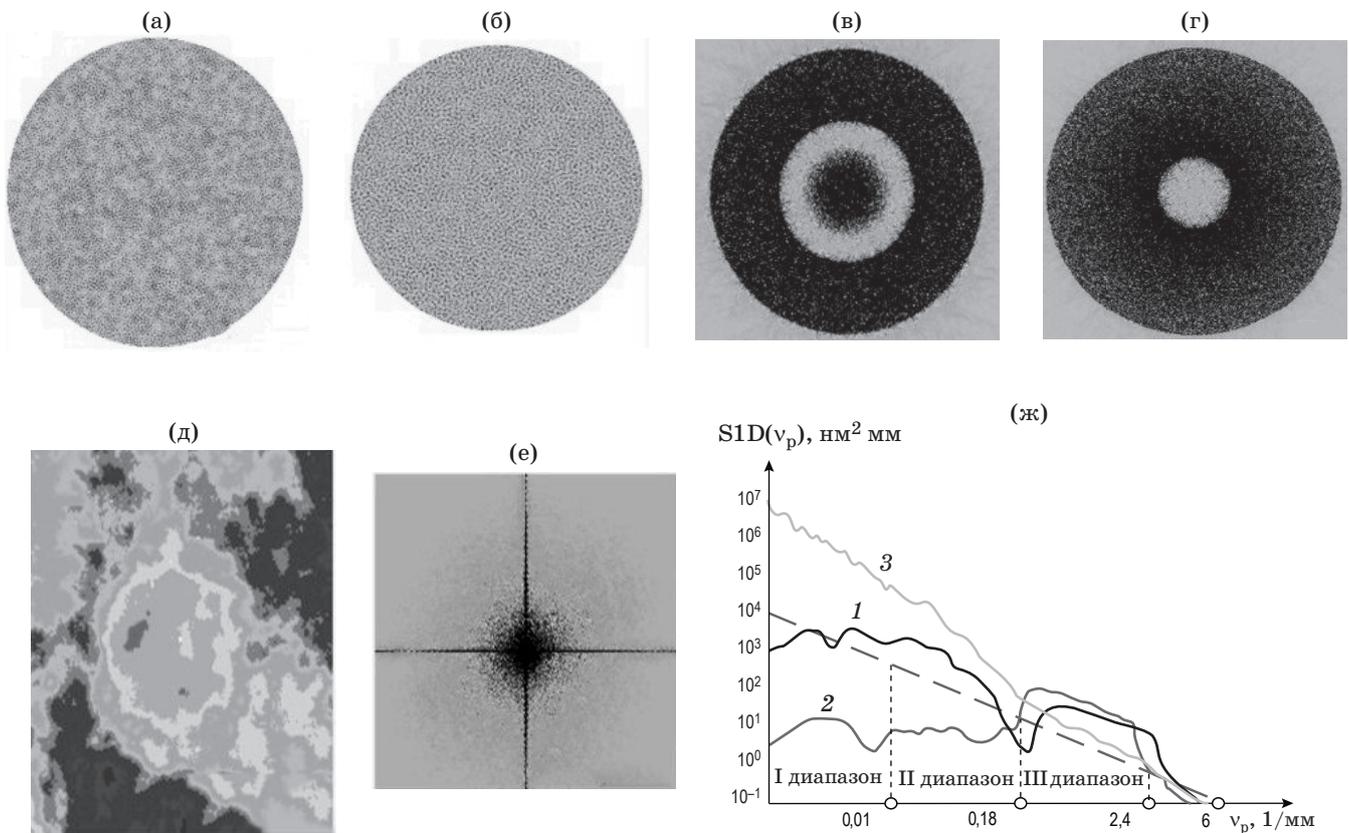
ции гармоник первого диапазона с целью минимизации погрешности измерения RMS высокочастотных пространственных неоднородностей.

Проведенные в работе исследования свидетельствуют также о том, что минимизация влияния эффекта спектральной «утечки» частоты на результирующую погрешность определения значения RMS может быть устранена путем подбора оптимальных оконных фильтров, например, оконных фильтров Ханна или Уолша [3], использованных в данной работе, имеющих более гладкую огибающую функцию [4, 6, 7].

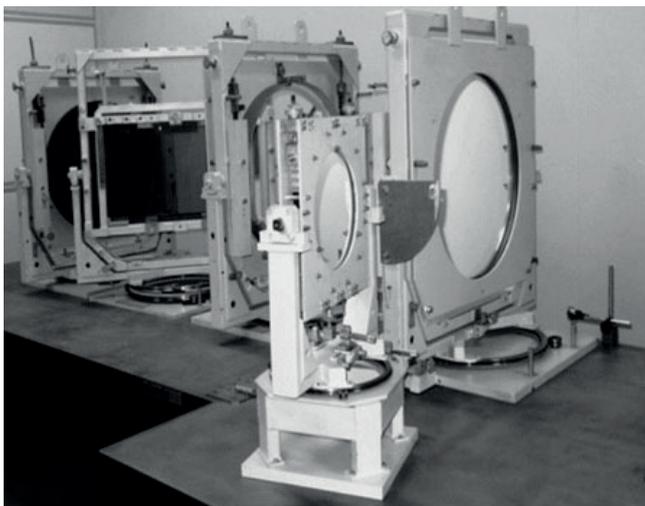
#### **АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ АТТЕСТАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ RMS НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ИСКАЖЕНИЙ ВОЛНОВОГО ФРОНТА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ В ДИАПАЗОНАХ I, II**

С целью апробации представленного алгоритма было разработано программное обеспечение Collapser по оригинальному алгоритму, позволяющее проводить аттестационный контроль качества оптических деталей на базе измерений, полученных на измерительном стенде (рис. 2). Разработанное программное обеспечение было протестировано на модельных топографических картах (рис. 3а–г), созданных в среде Matlab с заданным RMS неоднородностей искажений ВФ, а также на результатах экспериментальных измерений (рис. 3д, е), полученных при контроле крупногабаритных ОЭ в цеховых условиях на АО «Лыткаринский завод оптического стекла» на базе измерительного стенда (рис. 4).

Для минимизации краевых эффектов, обусловленных спецификой математического аппарата дискретного БПФ, были использованы непрямоугольные оконные фильтры Ханна и Уолша [1–3]. По результатам обработки построенных графических зависимостей одномерных целевых функций  $S1D(v_p)$  пространственных частот остаточных неоднородностей (рис. 3ж) можно определить RMS в диапазонах I, II в соответствии с формулой (4).



**Рис. 3.** Результаты апробации разработанного алгоритма расчета RMS неоднородностей искажений ВФ для топографических карт  $h(x, y)$  крупногабаритных оптических элементов в I и II спектральных диапазонах. Модельные топографические карты  $h(x, y)$ , построенные по степенному закону (а) и закону Лоренца (б), распределения неоднородностей искажений ВФ и соответствующие им целевые функции  $S2D(v_x, v_y)$  (в, г), экспериментально зарегистрированная топографическая карта  $h(x, y)$  (д) и соответствующая ей двумерная целевая функция  $S2D(v_x, v_y)$  (е), численные результаты построения и расчета одномерных целевых функций  $S1D(v)$  для модельных (1, 2) и экспериментальной (3) топографических карт (ж).



**Рис. 4.** Фотография измерительного стенда контроля неоднородностей искажений ВФ крупногабаритных ОЭ.

**Таблица 3.** Результаты расчета RMS неоднородностей модельных топографических карт профилей оптической поверхности в частотном диапазоне I-II

Модель	$RMS_m, \text{нм}$	$RMS_m^*, \text{нм}$	$\Delta_m, \%$
1	15,454	15,452	1,6087
2	15,476	15,479	1,9690
3	14,346	14,349	2,04

**Таблица 4.** Результаты расчета RMS искажений ВФ неоднородностей экспериментальных топографических карт контролируемого плоского ОЭ в частотных диапазонах I и II

Реализация	$RMS_e, \text{нм}$	$RMS_e^*, \text{нм}$	$\Delta_e, \%$
Исходная карта	32,52	32,521	0,7
I диапазон	31,76	31,77	2,5
II диапазон	5,21	5,26	13

В табл. 3 приведено сравнение значений RMS модельных топографических карт  $RMS_m$ , рассчитанных в среде Matlab, с полученными в результате расчета по разработанному алгоритму  $RMS_m^*$ . Расхождение между расчетными значениями, представленное в виде относительной погрешности

$$\Delta_m = \sqrt{(RMS_m)^2 - (RMS_m^*)^2} / RMS_m,$$

как следует из табл. 3, не превышает 2%.

Приведенные в табл. 3 результаты позволяют судить о корректности рассмотренных в работе научных положений разработки алгоритма обработки экспериментальных результатов, полученных при контроле искажений ВФ плоских ОЭ.

В табл. 4 представлены значения RMS экспериментальных данных, полученных с помощью встроенного в прибор и разработанного алгоритма — соответственно  $RMS_e$ ,  $RMS_e^*$ , а также относительные погрешности

$$\Delta_e = \sqrt{(RMS_e)^2 - (RMS_e^*)^2} / RMS_e.$$

Из табл. 4 можно видеть, что максимальная относительная погрешность определения RMS неоднородностей искажений ВФ при контроле крупногабаритного ОЭ составила не более 13%.

С использованием данных табл. 3, 4 можно оценить как численное значение RMS простран-

ственных неоднородностей ВФ (4) в результате оптимизации целевой функции  $S1D(v_{p\ mn})$ , так и определенный тип локального отклонения поверхности от заданного профиля с соответствующей пространственной частотой  $v_{p\ mn}$  в пределах заданной области (апертуры) исследования ОЭ детали по виду характерного пика на расчетной кривой  $S1D(v_{p\ mn})$  (см. рис. 3г).

Приведенные в табл. 4 данные были получены на измерительном стенде контроля неоднородностей искажений ВФ плоских крупногабаритных ОЭ, фотография которого представлена на рис. 4.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанный метод динамической интерферометрии контроля неоднородностей искажений ВФ плоских ОЭ позволил в производственных условиях с высокой точностью определить наличие и размер неоднородностей в частотных диапазонах I, II, в которых значения RMS составили 31,77 и 5,26 нм. Достигнутое при оптимизации целевой функции значение максимальной неисключенной систематической погрешности алгоритма в первом и втором частотных диапазонах (табл. 1) составила величину порядка 2%, что вполне удовлетворяет указанным в табл. 1 требованиям по точности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абдулкадыров М.А., Добриков Н.С., Патрикеев А.П., Патрикеев В.Е., Семенов А.П. Технология изготовления высокоточных крупногабаритных облегченных асферических зеркал с высокой стабильностью формы поверхности // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 12. С. 6–15.
2. Абдулкадыров М.А., Белоусов С.П., Патрикеев А.П., Патрикеев В.Е., Семенов А.П. Изготовление оптических элементов составных зеркал для больших астрономических телескопов // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 4. С. 18–23.
3. Денисов Д.Г., Барышников Н.В., Гладышева Я.В., Карасик В.Е., Морозов А.Б., Патрикеев В.Е. Метод аттестационного контроля поверхностных неоднородностей оптических деталей на основе частотного анализа профиля поверхности // Измерительная техника. 2017. № 2. С. 15–19.
4. Campbell J.H., Hawley-Fedder R.A., Menapace J.A., Borden M.R. NIF optical materials and fabrication technologies // Proc. SPIE. 2004. V. 5341. DOI: 10.1117/12.538462
5. Денисов Д.Г., Карасик В.Е., Орлов В.М. Измерение параметров микронеровностей крупногабаритных шлифованных поверхностей оптических деталей при помощи лазерной интерферометрии // Метрология. 2009. № 9. С. 15–24.
6. Sidick E. Power spectral density specification and analysis of large optical surfaces // Proc. SPIE. 2009. V. 7390. DOI: 10.1117/12.823844
7. Alcock S.G., Ludbrooka G.D., Owenb T., Dockreec R. Using the power spectral density method to characterise the surface topography of optical surfaces // Proc. SPIE. 2010. V. 7801. DOI: 10.1117/12.861539
8. ISO 10110-6:2015. Optics and photonics — Preparation of drawings for optical elements and systems — Part 6: Centring tolerances. 2<sup>nd</sup> ed. Vernier, Geneva, Switzerland: ISO, 2015.