

Анализ погрешностей метода динамической интерферометрии при контроле локальных поверхностных неоднородностей нанометрового уровня профилей оптических деталей

Д. Г. Денисов, М. Н. Устюгова, В. Е. Фролова, Д. А. Машошин, И. И. Гафаров

Разработан, научно обоснован и экспериментально подтверждён метод динамической интерферометрии контроля локальных отклонений нанометрового уровня поверхностей оптических деталей от заданного профиля на основе алгоритма расчёта целевой функции – спектральной плотности одномерной корреляционной функции (СПКФ1 от англ. PSD (Power Spectral Density One Dimension)). Представлены теоретические и экспериментальные исследования, посвящённые определению среднего квадратического отклонения (СКО) локальных отклонений поверхностей оптических деталей диаметром до 100 мм и до 1000 мм, с учётом неисключённой систематической и случайной составляющих погрешностей определения целевой функции.

Ключевые слова: оптический контроль, интерферометрия, измерения поверхности, спектральная плотность корреляционной функции, анализ систематических методических и случайных погрешностей, краевой эффект, эффект «утечки» частоты.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-1-71-89

Введение

Современные оптические технологии, ориентированные на создание перспективных высокотехнологичных изделий, обладающих высокими показателями качества [1–3], на сегодняшний день, не возможны без применения высокоточных методов и оптико-электронной аппаратуры аттестационного контроля.

Одним из перспективных научных направлений в области современных оптических технологий, является задача создания высококачественной крупногабаритной лазерной оптики 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, г. Саров, РФ)), так и у зарубежных («NIF» – National Ignition Facility (США), «Megaджоуль» (Франция), «ITER» – International Thermonuclear Experimental Reactor (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 высокого качества изготовления лазерных активных сред и разработки методов аттестационного контроля показателей их профилей [1–6].

Для создания и успешного развития в России данного технологического направле-

Денисов Дмитрий Геннадьевич, доцент, к.т.н.

E-mail: denisov_dg@mail.ru

Устюгова Мария Николаевна, студент.

E-mail: mariy2000@mail.ru

Фролова Валерия Евгеньевна, студент.

E-mail: v.e.frolova@mail.ru

Машошин Денис Андреевич, студент.

E-mail: den_m01@mail.ru

Гафаров Исмагил Ильдусович, студент.

E-mail: gafarovismagil@gmail.com

МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

Статья поступила в редакцию 10 февраля 2022 г.

© Денисов Д. Г., Устюгова М. Н., Фролова В. Е.,
Машошин Д. А., Гафаров И. И., 2022

ния необходимо иметь не только современную отечественную технологию производства крупногабаритных оптических элементов нового поколения, но и комплекс высокоточной оптико-электронной аппаратуры диагностики их статистических показателей качества [7–11].

Постановка научно-технической задачи

С целью отработки схмотехнических и конструкторских решений стендовой аппаратуры полноапертурного (до 1000 мм) контроля локальных отклонений поверхностей крупногабаритных оптических изделий, а также оценки точностных возможностей разрабатываемого алгоритма расчёта величины СКО в настоящей работе рассмотрен метод и его реализация на базе динамического интерферометра с диаметром выходного зрачка 100 мм и зеркально-линзового коллиматора с диаметров выходного зрачка 1000 мм. Предложенный метод, основан на частотном анализе [5, 6, 12, 13] профиля контролируемой детали в заданном диапазоне масштабов локальных неоднородностей, совокупность которых описывает структуру её исследуемой поверхности.

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 [1–3, 7–11]. Эти локальные отклонения обусловлены свойствами обрабатываемых инструментов с погрешностью метода обработки оптических изделий [1–3]. Помимо указанных параметров формы

профиля высокочастотные гармоники, характеризуют степень шероховатости, которая образуется при съёме материала в процессе формообразования детали полирующими суспензиями [1–3]. Для описания неоднородностей искажений волновых фронтов при контроле оптических элементов можно использовать международный классификатор качества изготовления активных лазерных сред технологического комплекса NIF (National Ignition Facility, США) [4, 5, 15], представленный в виде набора характеристик для четырёх пространственно-частотных диапазонов (табл. 1).

Диапазоны I–III характеризуют искажения параметров волнового фронта [7, 10, 11] лазерного пучка, обусловленные ошибками формы исследуемых оптических деталей, а четвёртый диапазон характеризует шероховатость профилей их поверхностей. Указанные в таблице величины искажений волнового фронта оцениваются в диапазоне I статистическими показателями PV (peak to valley – максимальное расстояние между высотой наибольшего выступа и глубиной наибольшей впадины искажений) [1–3, 7–11], RMS_{grad} (root mean square gradient – СКО градиента искажений) [7–11], а в диапазонах II и III параметром RMS [7–11], характеризующим отклонения формы волнового фронта в высокочастотной области. Для оценки шероховатости в IV диапазоне используют параметр Rq [3–6], который определяет СКО точек профиля поверхности оптической детали в пределах заданной области исследования (базовой площади). Аналитическое описание параметра Rq имеет то же вид, что и величина RMS , но определяется на малой базовой площади [3–6].

Таблица 1

Технологические требования к оптическим деталям при пространственно-частотном анализе неоднородностей оптической поверхности

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

Стоит отметить, что при переходе от указанных статистических показателей искажений волнового фронта к параметрам профиля [7–11] исследуемой детали вводится нормирующий множитель 0,5, впоследствии учитываемый в алгоритме расчёта.

Важно отметить, что приведённые в таблице 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 $\overline{S1D}(v)$, $\text{нм}^2 \text{мм}$ (где v – пространственная частота, $1/\text{мм}$). В качестве критериев оптимизации данной функции используются допустимые (максимальные) значения погрешностей определения приведённых в табл. 1 показателей качества.

Традиционный метод аттестационного контроля [4–6] основан на сравнении построенной функции $\overline{S1D}(v)$ с функцией

$S1D_{\text{ISO}}(v)$, $\text{нм}^2 \text{мм}$, определяемой согласно стандарту ISO 10110 [11]

$$S1D_{\text{ISO}}(v) = \frac{A}{v^B}, \quad \frac{1}{1000 \times D} < v < \frac{1}{1000 \times C}$$

где $S1D_{\text{ISO}}(v)$ – СПКФ1, построенная в соответствии со стандартом ISO 10110; A – константа (1 для стекла [1, 2], 15 для кристаллических сред [4–6, 15]); $1 < B < 3$ – константа; C – предел разрешения прибора (мкм); D – длина, на которой производится измерение (мкм); v – пространственная частота, мкм^{-1} .

При превышении функции $\overline{S1D}(v)$ 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 её последующего функционирования (рис. 1, а, б). Детально данная методика приведена в [3, 4].

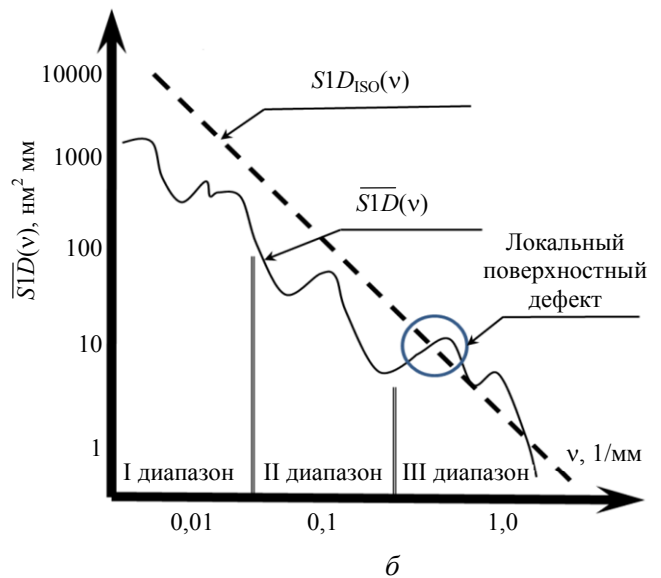
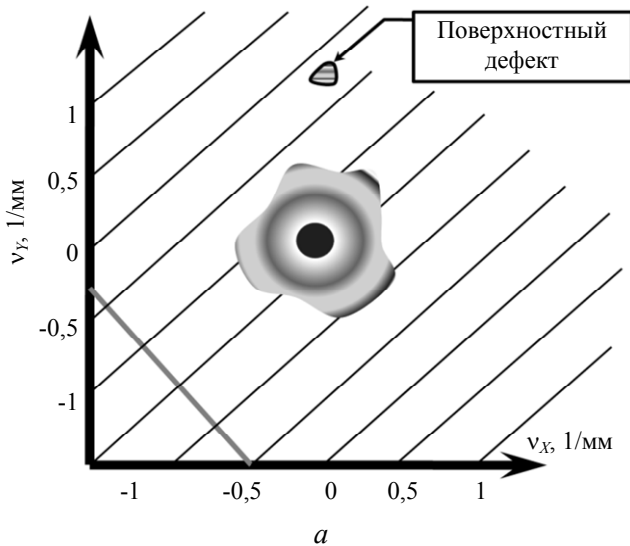


Рис. 1. Иллюстрация методики аттестационного контроля локальных отклонений поверхности оптического элемента технологического комплекса NIF: а – вид исходной функции $S2D(v_x, v_y)$ и её сечение под углом 60° ; б – соответствующая сечению усреднённая функция $\overline{S1D}(v)$ и построенная согласно стандарту [15] функция $S1D_{\text{ISO}}(v)$

Следует отметить, что возможные пространственные неоднородности в промежуточных сечениях исходной функции $S2D(v_x, v_y)$, $\text{нм}^2 \text{мм}^2$, обусловленные наличием локальных отклонений поверхности

(рис. 1, а), могут внести существенный вклад в структуру погрешности определяющего значения какого-либо статистического показателя качества исследуемой формы волнового фронта. 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 расчёта $\overline{SID}(v)$ 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, 7, 8, 11]:

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

где a, b – размеры световой апертуры детали, характеризующие область исследования вдоль осей x, y , соответственно; $Kr[h(x, y)] = M[(h(x_1, y_1) - \overline{h(x, y)}) \times (h(x_2, y_2) - \overline{h(x, y)})]$ – автокорреляционная функция или математическое ожидание произведения разностей функций высотных параметров профиля $h(x_1, y_1)$, $h(x_2, y_2)$ и их среднего значения $\overline{h(x, y)}$.

Реализация второго метода расчёта функции $S2D(v_x, v_y)$ предполагает использование теоремы Винера–Хинчина [4, 5, 14]. При этом можно найти искомую двумерную функцию стационарного в широком смысле случайного процесса как квадрат модуля преобразования Фурье функции высотных параметров карты профиля оптической поверхности $h(x, y)$, приведённой 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. Приведённый алгоритм позволяет проанализировать пространственные частоты и количественно рассчитать СКО соответствующих им неоднородностей поверхности (см. табл. 1) на основе теоремы Парсеваля [4, 5, 14]:

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

где v_{\max}, v_{\min} – значения максимальной и минимальной пространственных частот исследуемой области (частотный диапазон исследования) на поверхности детали (см. табл. 1).

Стоит отметить, что значения границ диапазонов ($v_{\max} - v_{\min}$) указанной частотной шкалы (2) определяются с одной стороны линейной величиной элемента пикселя матрицы приёмника излучения, а с другой стороны размером световой апертурой контролируемой оптической детали. Указанные в табл. 4 требования к искажению волнового фронта лазерного пучка, приводятся для световой апертуры 603 мм (диаметральный размер, соответствующий линейному размеру изделия 1000 мм). Для исследования качества поверхностей оптических деталей других диаметров необходимо ввести коэффициент масштабирования шкалы частот $K = 603/D$. Так, для плоской оптической детали $D = 100$ мм пространственно-частотные диапазоны I, II и III будут составлять соответственно $\Delta v_I = 0,01 - 0,18 \text{ мм}^{-1}$; $\Delta v_{II} = 0,18 - 2,4 \text{ мм}^{-1}$; $\Delta v_{III} = 2,4 - 6 \text{ мм}^{-1}$. Частотные шкалы диагностики целевой функции $\overline{SID}(v)$ при расчёте СКО точек профиля поверхности оптической детали в пределах заданной области исследования диаметром 100 мм и 603 мм представлены на рис. 2. В первом случае для проведения экспериментальных исследований качества оптиче-

ской поверхности используется лабораторный измерительный стенд на базе динамического интерферометра с выходной апертурой 100 мм (рис. 3), а во втором случае для расширения

световой апертуры совместно с последним применяется зеркально-линзовый коллиматор (рис. 4), имеющий диаметр выходного зрачка порядка 1000 мм.

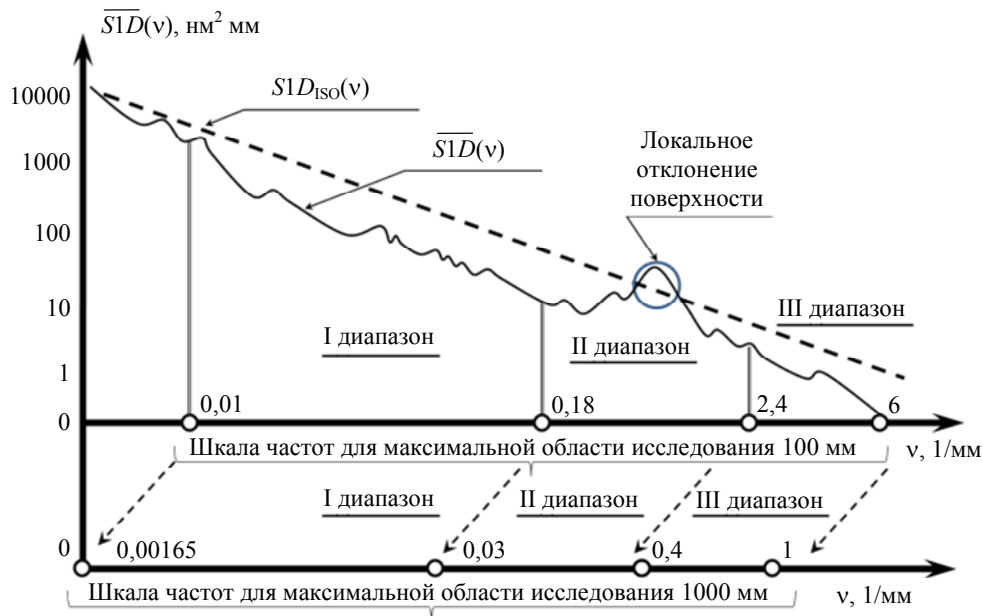


Рис. 2. Иллюстрация связи пространственных частот в трёх диапазонах в случаях максимальных областей исследования 100 мм и 1000 мм соответственно

Анализируя представленную связь пространственных частот в работе предлагается на первом этапе провести исследование погрешности СКО профиля поверхности оптической детали в пределах апертуры диаметром 100 мм, а на втором этапе в пределах апертуры диаметром до 1000 мм. Как можно видеть из рис. 2 первый частотный диапазон во втором случае, за счёт применения зеркально-линзового коллиматора уширяется в низкочастотной области примерно в 6 раз, что даёт возможность исследовать СКО профиля крупногабаритной оптической детали на всей световой апертуре.

Принцип работы и состав аппаратуры лабораторного измерительного стенда

С целью отработки алгоритма полноапертурного (до 1000 мм) аттестационного контроля неоднородностей искажений волновых фронтов при контроле крупногабаритных оптических деталей в I и II диапазонах соответствующих пространственных частот (см. табл. 1), в результате расчёта одномерной це-

левой функции $\overline{S1D}(v)$, была разработана методика и измерительный стенд (рис. 3) на базе динамического интерферометра «IntelliumH2000» (ESDI, США). Данный интерферометр построен по оптической схеме Физо и имеет выходную апертуру диаметром 100 мм. Функциональная схема прибора представлена на рис. 2. Измерительный стенд состоит из динамического интерферометра и оптико-механического узла крепления плоского эталонного (контролируемого) зеркала в оправе. Отличительной особенностью используемого в измерительной схеме динамического интерферометра является то, что сдвиг фаз регистрируемых интерферограмм реализуется с помощью трёх поляризаторов, плоскости поляризации которых ориентированы друг относительно друга под углом 120 градусов. Эта особенность позволяет за один кадр получать три реализации при минимальном времени экспозиции 100 мкс при помощи широкоформатных матричных приёмников излучения, что обеспечивает нечувствительность метода контроля к турбулентным потокам воздушных масс и влиянию низкочастотных

вибраций, существующих в производственных условиях.

В состав аппаратуры динамического интерферометра входят осветительный, измерительный и приёмный оптические каналы. Осветительный канал прибора включает источник излучения 1 (He-Ne-лазер, $\lambda = 0,6328$ мкм), афокальную оптическую систему 2, плоское поворотное зеркало 3, поляризационные элементы 4, 5, микрообъектив 6 и полупрозрачную пластину 7. Источник излучения осветительной ветви, формирует линейно по-

ляризованное излучение, которое на выходе трансформируется в две ортогонально поляризованные составляющие (\vec{s} и \vec{p} -типов поляризации). Обе составляющих распространяются по своим направлениям с различными фазовыми скоростями. В осветительной ветви интерферометра они образуют два пространственно разнесённых источника излучения, расположенные под небольшим углом, составляющим величину порядка трёх миллирадиан относительно оптической оси прибора.

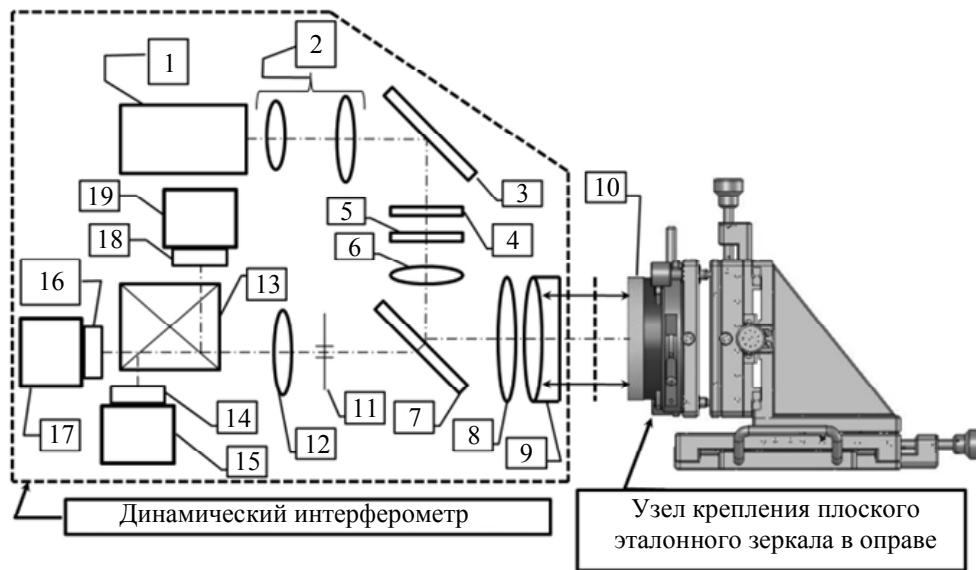


Рис. 3. Функциональная схема лабораторного измерительного стенда на базе динамического интерферометра «IntelliumH2000»: 1 – источник излучения; 2 – афокальная оптическая система; 3 – плоское зеркало; 4, 14, 16, 18 – поляризаторы; 5, 11 – поляризационный и пространственный фильтры; 6 – микрообъектив; 7 – полупрозрачная пластина; 8 – объектив-коллиматор; 9 – объектив (с плоской эталонной поверхностью); 10 – плоское контролируемое зеркало; 12 – объектив сопряжения; 13 – светоделительный куб; 15, 17, 19 – матрицы фоточувствительных приборов с зарядовой связью (ФПЗС-матрицы)

Таким образом, в измерительный канал прибора, состоящий из объектива-коллиматора 8, объектива с плоской эталонной поверхностью 9 и плоского контролируемого зеркала 10, одновременно попадают \vec{s} и \vec{p} ортогонально поляризованные составляющие, каждая из которых в дальнейшем образует две плоские волны, отражённые от эталонной и контролируемой поверхностей, соответственно. В результате в приёмный канал прибора, включающий пространственный фильтр 11, приёмную оптическую систему 12, светоделительный куб 13, три матрицы фоточувствительных приборов с зарядовой связью (ФПЗС-

матрицы) 15, 17, 19, поступает две пары ортогонально поляризованных составляющих исходной плоской линейно поляризованной волны: $(\vec{s}_s; \vec{p}_d)$ и $(\vec{p}_s; \vec{s}_d)$ (индексы «э», «д» относятся к эталону и контролируемой поверхности плоского оптического элемента – оптической детали). Эти составляющие попарно интерферируют в плоскости поляризаторов 14, 16, 18, установленных перед тремя ФПЗС-матрицами приёмного канала. При наклоне контролируемой поверхности плоского оптического элемента на угол, соответствующий ориентации двух исходных источников (\vec{s} и \vec{p} -типов поляризации) осветительной

ветви интерферометра относительно его оптической оси, можно последовательно регистрировать результат суперпозиции составляющих двух пар: $(\bar{s}_3; \bar{p}_d)$ или $(\bar{p}_3; \bar{s}_d)$, соответственно. С целью исключения паразитной засветки и минимизации пространственных шумов в приёмный канал динамического интерферометра встроен фильтр пространственных частот в виде точечной диафрагмы (поз. 11 на рис. 3). Для проведения первичных юстировочных работ измерительного и осветительного каналов в составе интерферометра предусмотрен блок наведения, позволяющий ориентировать автоколлимационные блики от эталонной и контролируемой поверхностей. Таким образом, в приборе реализуется поляризационная калибровка [5], позволяющая учитывать инструментальную погрешность

измерительного стенда. В значительной степени данная составляющая общей структуры системной инструментальной погрешности влияет на результат измерения СКО точек профиля крупногабаритной контролируемой поверхности оптической детали в пределах области исследования до 1000 мм.

Принцип работы и состав аппаратуры полноапертурного измерительного стенда

Для реализации полноапертурного аттестационного контроля СКО искажений волнового фронта лазерного пучка, отражённого от поверхности крупногабаритной оптической детали в работе предложена функциональная схема измерительного стенда представленного на рис. 4.

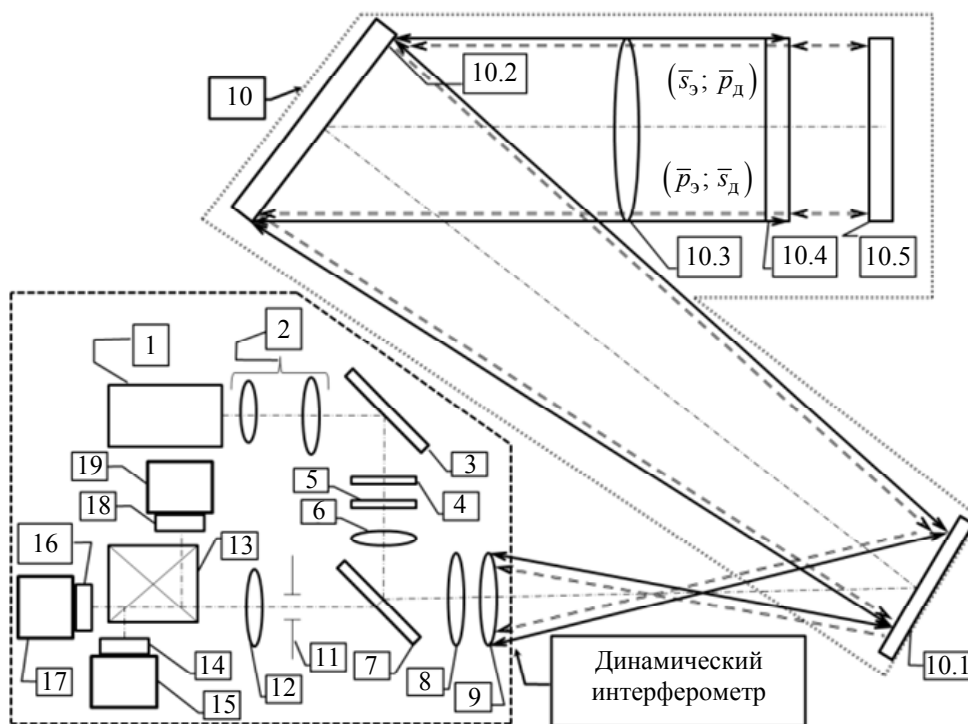


Рис. 4. Функциональная схема измерительного стенда на базе динамического интерферометра «IntelliumH2000» и зеркально-линзового коллиматора: 1 – источник излучения; 2 – афокальная оптическая система; 3 – плоское зеркало; 4, 14, 16, 18 – поляризаторы; 5, 11 – поляризационный и пространственный фильтры; 6 – микрообъектив; 7 – полупрозрачная пластина; 8 – объектив-коллиматор; 9 – фокусирующий объектив; 10 – зеркально-линзовый коллиматор (10.1, 10.2 – плоские поворотные зеркала коллиматора, 10.3 – коллимирующий объектив, 10.4 – оптический клин с эталонной поверхностью сравнения, 10.5 – крупногабаритная плоская контролируемая деталь); 12 – объектив сопряжения; 13 – светоделительный куб; 15, 17, 19 – ФПЗС-матрицы

В представленной схеме полноапертурного аттестационного контроля, аналогично функциональной схеме лабораторного стенда (см. рис. 3) излучение на выходе из прибора, после прохождения фокусирующего объектива 9, попадет в измерительный канал, представляющий собой зеркально-линзовый коллиматор 10. В состав последнего входят плоские поворотные зеркала 10.1, 10.2, предназначенные для уменьшения габаритных характеристик стенда, коллимирующий объектив 10.3, фокус которого сопряжён с фокусом объектива 9, после которого плоский волновой фронт лазерного пучка проходит оптический клин с эталонной поверхностью сравнения 10.4 падая на исследуемую поверхность крупногабаритной плоской контролируемой детали 10.5. Реализуя в схеме поляризационную калибровку [5], можно последовательно регистрировать результат суперпозиции составляющих двух пар электромагнитных волн: $(\bar{s}_3; \bar{p}_d)$ или $(\bar{p}_3; \bar{s}_d)$, соответственно. Вычитая полученные результаты в виде интерферограмм, в схеме измерительного стенда минимизируется инструментальная погрешность, обусловленная погрешностями изготовления элементов зеркально-линзового коллиматора.

Для отработки экспериментальных данных, полученных на основе двух модификаций измерительных стендов (см. рис. 3, 4) в лабораторных и цеховых условиях в работе рассмотрен алгоритм расчёта статистических показателей, характеризующих искажения волнового фронта лазерного пучка (см. табл. 1), возникающие при контроле плоских оптических элементов.

Метод определения СКО локальных отклонений в пространственно-частотных диапазонах I, II

Разработанный метод определения локальных отклонений исследуемых профилей оптических деталей, основан на алгоритме расчёта целевой функции – СПКФ1 ($\overline{SID}(v)$), с учётом следующих неисключённых систематических погрешностей: дискретизации, математического аппарата быстрого преоб-

зования Фурье (БПФ), преобразования двумерного стационарного сигнала в одномерный, краевых эффектов БПФ, эффекта спектральной «утечки» частоты [9–14]. Анализируемый, с точки зрения погрешностей, метод основан на реализации следующих этапов (см. рис. 5): 1) регистрация исходной топографической карты профиля контролируемой оптической поверхности $h(x, y)$; 2) расчёт в информативной матрице исходной функции $S2D(v_x, v_y)$ (см. рис. 1, а) приведённой к единичной области (площади) исследования в соответствии с (1); 3) расчёт матрицы суммарных пространственных частот; 4) расчёт целевой функции $\overline{SID}(v)$; 5) расчёт оптимизационных параметров целевой функции в заданных пространственно-частотных диапазонах I и II, в соответствии с табл. 1: 5.1) анализ влияния краевых эффектов дискретного БПФ на определение СКО исследуемого профиля; 5.2) анализ влияния эффекта спектральной «утечки» пространственных частот на определение СКО исследуемого профиля; 6) сравнение рассчитанной функции $\overline{SID}(v)$ в заданных пространственно-частотных диапазонах с функцией $S1D_{ISO}(v)$, определяемой согласно стандарту ISO 10110 [15].

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

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

где M, N, m, n – максимальное количество значимых точек по горизонтальной и вертикальной осям соответственно и их координаты; \tilde{h}_{mn} – дискретное представление карты профиля оптической поверхности.

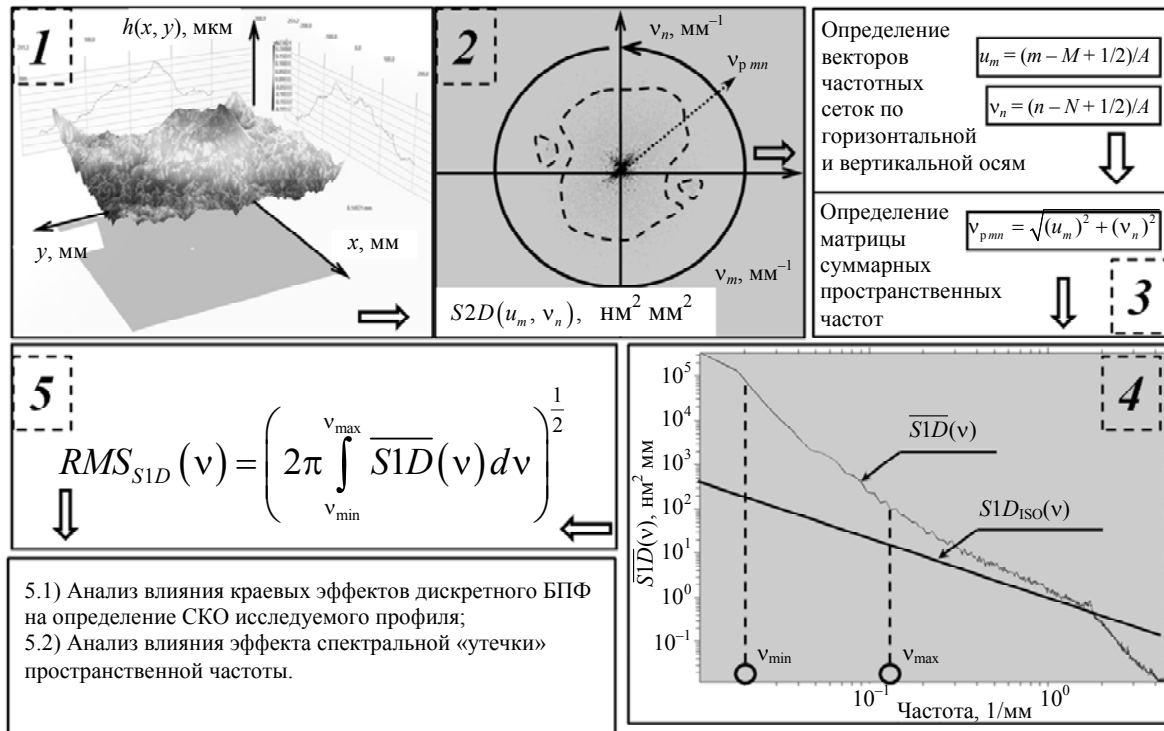


Рис. 5. Иллюстрация основных этапов алгоритма определения оптимизационных параметров целевой функции СПКФ1 ($\overline{SID}(v)$) в заданных пространственно-частотных диапазонах: 1) регистрация исходной топографической карты профиля контролируемой оптической поверхности $h(x, y)$; 2) расчёт в информативной матрице исходной функции $S2D(v_x, v_y)$ (см. рис. 1, а) приведённой к единичной области (площади) исследования в соответствии с (2); 3) расчёт матрицы суммарных пространственных частот; 4) расчёт целевой функции $\overline{SID}(v)$; 5) расчёт оптимизационных параметров целевой функции в заданных пространственно-частотных диапазонах I и II, в соответствии с табл. 1

Полученный спектр \tilde{h}_{mn} регистрируемой карты профиля формируется с учётом линейных размеров исследуемой области детали, так что нормированный спектр имеет вид:

$$h_{mn}^n = \tilde{h}_{mn} (A/M) \times (A/N),$$

где $A/M, A/N$ – шаги дискретизации с учётом линейного увеличения приёмного объектива по горизонтальной и вертикальной осям, соответственно.

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

$$S2D_{mn} = S^{-1} |h_{mn}^n|^2,$$

где $S = (dx \times dy) \times C$ – 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}^n ; C – число элементов матрицы, содержащей информацию о профиле волнового фронта, отражённого от поверхности плоского оптического элемента (информативная матрица).

При этом матрица суммарных пространственных частот, определяется выражением

$$v_{pmn} = \sqrt{(u_m)^2 + (v_n)^2}, \tag{3}$$

где $u_m = (m - M + 1/2)/A$, $v_n = (n - N + 1/2)/A$ – векторы частотных сеток по горизонтальной и вертикальной осям, соответственно.

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 фотоприёмного устройства. В итоге определяются значения векторов суммарных пространственных частот по различным направлениям $v_{\rho mn}$ и соответствующие им средне-квадратические значения векторов $\overline{SID}(v)$, которые представляют искомую целевую функцию, приведённую к одномерному виду.

На заключительном этапе в соответствии с (2) находят СКО искажений волновых фронтов при контроле локальных отклонений изотропной поверхности [3, 6] в заданном частотном диапазоне исследования $v_{\rho \min} - v_{\rho \max}$, проводя сравнительную оценку с данными, представленными в табл. 1:

$$RMS_{SID}(v_{\rho}) = \left[2\pi \int_{v_{\rho \min}=0}^{v_{\rho \max}} \overline{SID}(v_{\rho}) dv_{\rho} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

где $v_{\rho \min}$, $v_{\rho \max}$ – радиальные значения минимальной и максимальной пространственных частот диапазона исследования искажений волнового фронта, при контроле оптической детали плоской формы.

В рамках пятого этапа, представленного выше алгоритма определения оптимизационных параметров целевой функции СПКФ1, проводится оценка влияния математического аппарата дискретного БПФ на искомую величину СКО. В результате проведённых исследований, показано, что функция невязки, построенная на основе сравнения математической модели исходной карты профиля оптической поверхности h_{mn} с восстановленной картой h'_{mn} в результате применения операторов прямого и обратного БПФ составило величину порядка 10^{-16} . Полученная величина свидетельствует о незначительном вкладе влияния математического аппарата дискретного БПФ при обработке изотропных полированных по-

верхностей. Тем не менее, в задачах диагностики сложнопрофильных изделий данный эффект может быть учтён, как одна из составляющих систематических видов погрешностей.

Существенным фактором, влияющим на методическую погрешность определения величины СКО во втором спектральном диапазоне, при построении одномерной целевой функции $\overline{SID}(v_{\rho})$, является эффект спектральной «утечки» частоты (см. рис. 6, а, б).

Как можно видеть из рис. 6, а он проявляется в переналожении пространственных частот первого и второго диапазонов, в результате чего амплитудные значения гармоник низких пространственных частот в значительной степени превышают амплитудные значения гармоник высоких пространственных частот, что приводит к значительной погрешности вычисления одномерной целевой функции $\overline{SID}(v_{\rho})$ и, как следствие, – измерения величины СКО (4). Данный эффект проанализирован в работе при обработке центральных сечений модельных карт $h(x) = S_0(x)$ (см. рис. 6, а). Как известно преобразование Фурье определено для бесконечной функции $S_0(x)$, однако, при использовании реальной реализации как ограниченной (финитной) функции $S(x)$ вследствие заданных пространственно-частотных диапазонов (см. табл. 1) анализируемый спектр будет равен «свёртке» спектров исходной функции с функцией выборки: $\tilde{S}(v_x) = \tilde{W}(v_x) \otimes \tilde{S}_0(v_x)$, где $\tilde{S}(v_x)$ – спектр исследуемого распределения центрального сечения модельной карты в заданного пространственно-частотном диапазоне $v_{\min} < v_x < v_{\max}$ (см. табл. 1); $\tilde{S}_0(v_x)$ – спектр исходного распределения в широком пространственно-частотном диапазоне $-\infty < v_x < +\infty$; $\tilde{W}(v_x)$ – прямоугольная (оконная) функция выборки, в общем случае определяемая как $rect(x)$ исследуемого масштаба неоднородностей эквивалентного соответствующему пространственно-частотному диапазону (см. табл. 1).

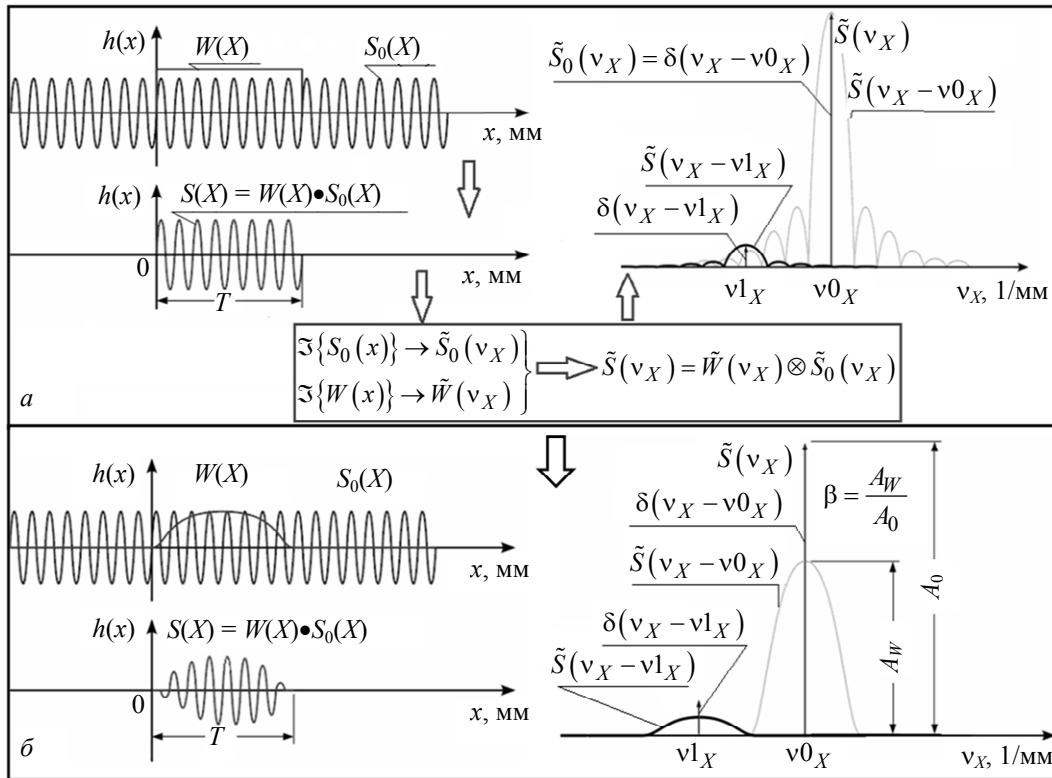


Рис. 6. Иллюстрация анализа влияния эффекта спектральной «утечки» частоты на значение одномерной целевой функции $SID(v_p)$ в заданном пространственно-частотном диапазоне: а – при использовании прямоугольной (оконой) функции выборки; б – при использовании оптимальных оконных функций с «гладкой» огибающей

В результате вместо ожидаемой δ -функции Дирака $\tilde{S}_0(v_x) = \delta(v_x - \nu_{0x})$ результирующий спектр представляется в виде функции (см. рис. 6, а)

$$\text{sinc}(v_x - \nu_{0x}) = \tilde{S}_0(v_x - \nu_{0x}).$$

При этом амплитудные значения гармоники низкой пространственной частоты ν_{0x} первого частотного диапазона в значительной

степени превышают амплитудные значения гармоник высокой пространственной частоты ν_{1x} второго частотного диапазона.

Для оценки влияния данного эффекта на результирующую погрешность измерений была проведена серия расчётов СКО по 4 реализациям топографических карт искажений волнового фронта для пространственных неоднородностей, отнесённых ко второму пространственно-частотному диапазону (см. табл. 2).

Таблица 2

Анализ влияния низких пространственных частот на определение СКО высокочастотных неоднородностей

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

Анализ представленных в табл. 2 результатов позволяет сделать вывод о необходимости предварительной пространственно-частотной фильтрации гармоник первого диапазона с целью минимизации погрешности измерения величины СКО высокочастотных пространственных неоднородностей второго диапазона (см. табл. 1). Проведённые в работе исследования свидетельствуют также о том, что минимизация влияния эффекта спектральной «утечки» частоты на результирующую погрешность определения величины СКО может быть устранена путём подбора оптимальных оконных фильтров, имеющих более гладкую огибающую функцию [4–6, 12–14], например оконных фильтров Ханна или

Уолша [5, 12, 13], использованных в данной работе (см. рис. 6, б).

Анализ результатов аттестационного контроля СКО неоднородностей искажений волнового фронта в лабораторных и производственных условиях в пространственно-частотных диапазонах I, II

С целью апробации представленного алгоритма было разработано авторское программное обеспечение «Collapser» (см. рис. 7), позволяющее проводить аттестационный контроль качества оптических деталей, на базе измерений, полученных на измерительных стендах (см. рис. 3, 4).

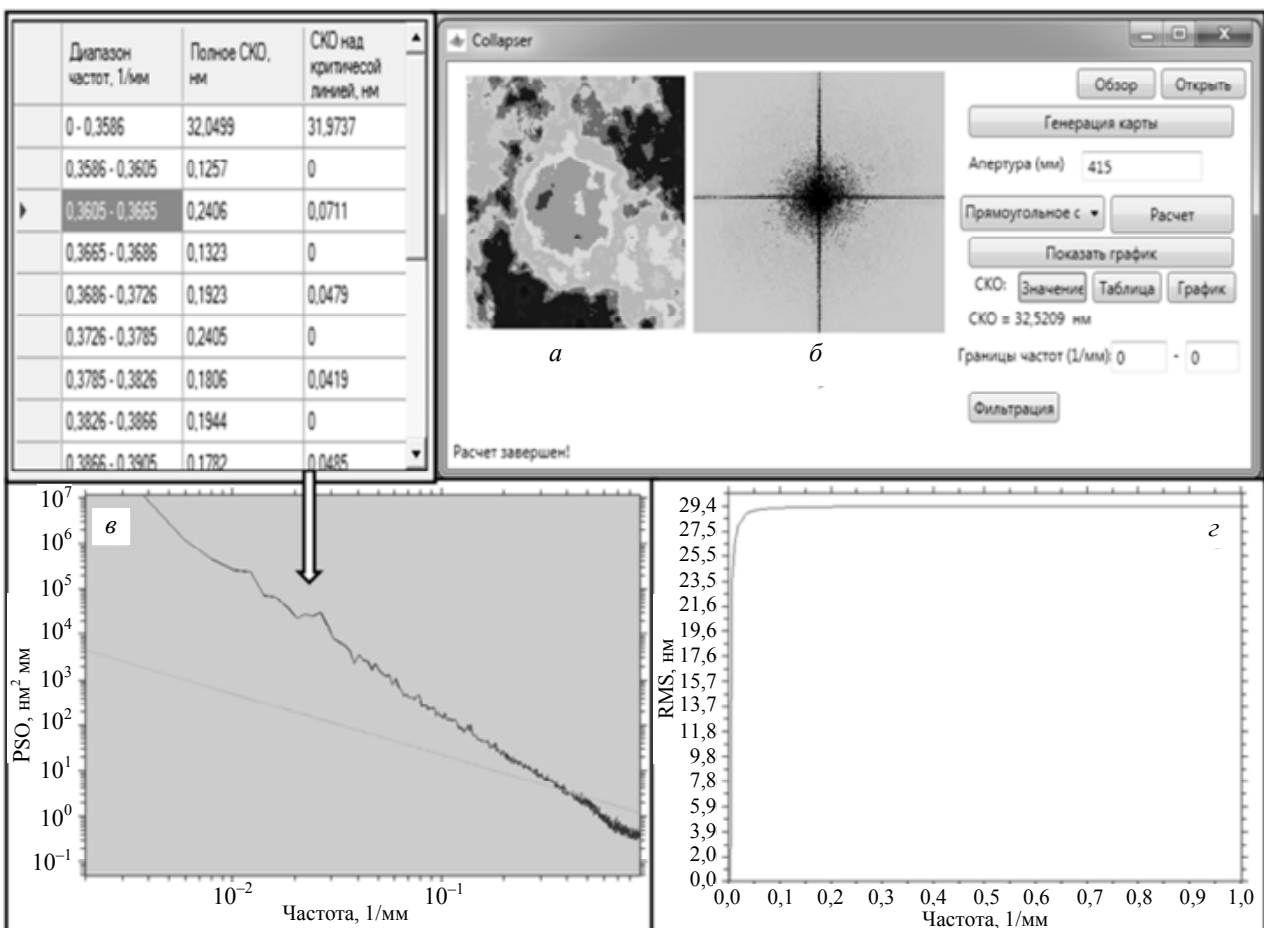


Рис. 7. Внешний вид разработанного программного обеспечения «Collapser»: а – обрабатываемая карта профиля оптической поверхности; б – расчётная функция $S2D(v_x, v_y)$; в – целевая функция $SID(v)$; г – графическое представление разброса оптимизационного параметра – СКО в пространственно-частотных диапазонах

Разработанное программное обеспечение было протестировано на модельных топографических картах (см. рис. 8, а, б, г), созданных

в среде «Matlab» с заданным СКО неоднородностей искажений волновых фронтов, а так же на результатах экспериментальных измере-

ний, полученных в лабораторных (см. рис. 9) и производственных (см. рис. 8, в, з) условиях на АО «Лыткаринский завод оптического

стекла» на базе измерительных стандов (см. рис. 3, 4) соответственно.

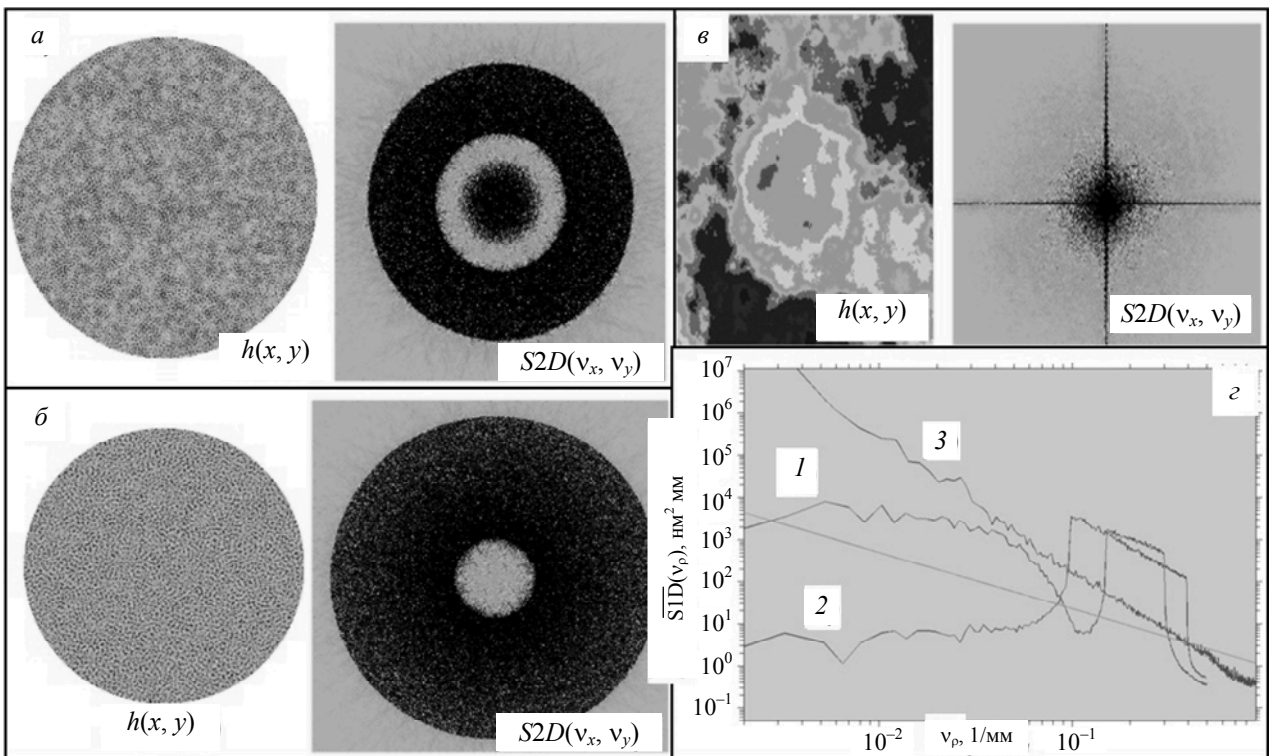


Рис. 8. Результаты апробации разработанного алгоритма расчёта СКО неоднородностей искажений волновых фронтов для топографических карт $h(x, y)$ крупногабаритных оптических деталей диаметром до 1000 мм в I и II спектральных диапазонах: а, б – модельные топографические карты $h(x, y)$, построенные по степенному закону и закону Лоренца, распределения неоднородностей искажений волновых фронтов и соответствующие им целевые функции $S2D(v_x, v_y)$; в) экспериментально зарегистрированная топографическая карта $h(x, y)$ и соответствующая ей двумерная целевая функция $S2D(v_x, v_y)$; з) численные результаты построения и расчёта одномерных целевых функций $\overline{S1D}(v_\rho)$ для модельных (1, 2) и экспериментальной (3) топографических карт

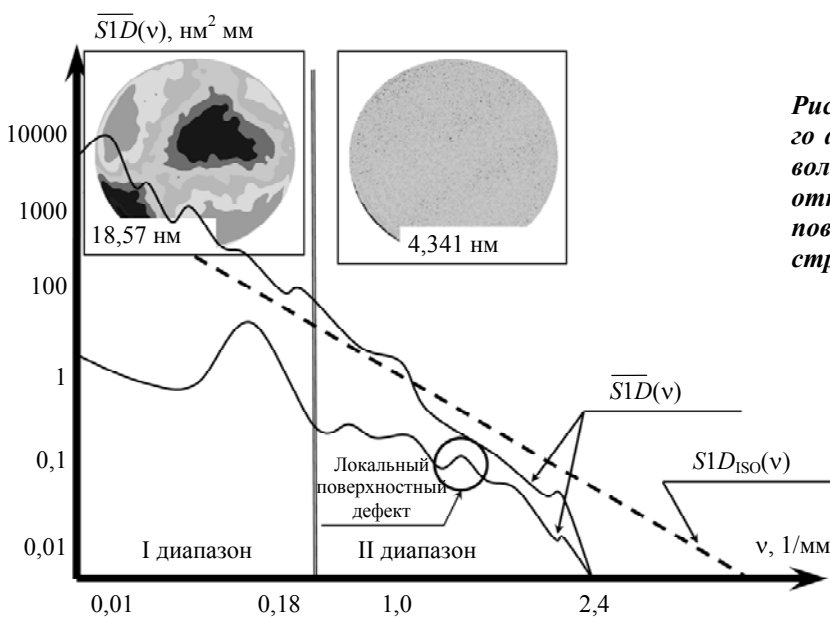


Рис. 9. Результаты расчёта разработанного алгоритма определения СКО искажений волновых фронтов при контроле локальных отклонений профиля плоской эталонной поверхности диаметром 100 мм в двух пространственно-частотных диапазонах

Для минимизации краевых эффектов, обусловленных спецификой математического аппарата дискретного БПФ, были использованы прямоугольные оконные фильтры Ханна и Уолша [5, 12, 13]. По результатам обработки построенных графических зависимостей одномерных целевых функций $\overline{SID}(v_p)$ для пространственных частот остаточных неоднородностей (см. рис. 8, з, рис. 9) можно определить величину их СКО в диапазонах I, II как для деталей в диаметре менее 100 мм, так и для изделий со световой апертурой до 1000 мм, в соответствии с (4).

В табл. 3 приведены сравнительные значения СКО модельных топографических карт RMS_m , рассчитанные в среде «Matlab» и полученные в результате расчёта по разработанному алгоритму RMS^*_m . Расхождение между расчётными значениями, представленное в виде относительной среднеквадратической погрешности

$\Delta_m = \sqrt{(RMS_m)^2 - (RMS^*_m)^2} / RMS_m$, не превышает 2 %, как следует из табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчёта СКО неоднородностей для модельных топографических карт профилей оптической поверхности в пространственно-частотном диапазоне I–II

Модель	RMS_m , нм	RMS^*_m , нм	Δ_m , %
1	15,454	15,452	1,6087
2	15,476	15,479	1,9690
3	14,346	14,349	2

Полученные и приведённые в табл. 3 результаты позволяют, судить о корректности рассмотренных в работе научных положений по разработке алгоритма обработки экспериментальных результатов, полученных при контроле искажений волновых фронтов для плоских оптических элементов.

В табл. 4 представлены значения СКО экспериментальных данных, полученных с помощью лабораторного (см. рис. 3) и производственного (см. рис. 4) измерительных стендов, а так же разработанного алгоритма – соответственно RMS_e , RMS^*_e , а также относительные среднеквадратические погрешности

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

Таблица 4

Результаты расчёта СКО искажений волновых фронтов неоднородностей экспериментальных топографических карт контролируемых плоских оптических элементов диаметрами 100 мм и 1000 мм в соответствующих пространственно-частотных диапазонах I–II

Реализация	RMS_e , нм	RMS^*_e , нм	Δ_e , %
Световая апертура исследуемой поверхности плоской оптической детали 100 мм			
I диапазон (0,01–0,18), мм ⁻¹	18,53	18,57	6,5
II диапазон (0,18–2,4), мм ⁻¹	4,345	4,341	7,9
Световая апертура исследуемой поверхности плоской оптической детали 1000 мм			
I диапазон (0,001–0,03), мм ⁻¹	31,76	31,77	2,5
II диапазон (0,03–0,4), мм ⁻¹	5,21	5,26	13

Из табл. 4 можно видеть, что максимальная относительная погрешность определения величины СКО неоднородностей искажений волновых фронтов при контроле оптических деталей со световой апертурой 100 мм составила величину не более 8 %, а при контроле крупногабаритных оптических изделий диаметром до 1000 мм не более 13 %. Различие между полученными результатами обусловлено спецификой методики и аппаратуры контроля, в частности спецификой юстировки зеркально-линзового коллиматора, вибрациями и флуктуациями воздушных потоков, в значительной степени влияющими на конечный результат в производственных условиях.

С использованием табл. 3, 4 можно оценить как численное значение СКО пространственных неоднородностей волновых фронтов (4) в результате оптимизации целевой функции $\overline{SID}(v_{p_{mn}})$, так и определённый тип локального отклонения поверхности от заданного профиля с соответствующей пространственной частотой $v_{p_{mn}}$ в пределах заданной области (апертуры) исследования оптического элемента детали по виду характерного пика на расчётной кривой $\overline{SID}(v_{p_{mn}})$ (см. рис. 8, з, рис. 9).

Приведённые в табл. 4 данные были получены при помощи измерительных стендов диагностики неоднородностей искажений волновых фронтов для контроля плоских оп-

тических элементов диаметром 100 мм и до 1000 мм, фотографии которых представлены на рис. 10 и 11, соответственно.

Для адекватной оценки измеряемых величин во втором частотном диапазоне ($33\text{--}2,5$) мм^{-1} необходимо отфильтровывать первый пространственно-частотный диапазон

($603\text{--}33$) мм^{-1} поскольку вклад в погрешность измерения последнего является существенным. Это обусловлено в первую очередь низкими частотами неоднородностей контролируемых изделий, а так же систематической погрешностью средства измерения (рис. 12, 13).



Рис. 10. Фотография лабораторного измерительного стенда на базе динамического интерферометра «IntelliumH2000» для апробации разработанного алгоритма определения СКО искажений волновых фронтов при контроле локальных отклонений профиля плоской эталонной поверхности диаметром 100 мм

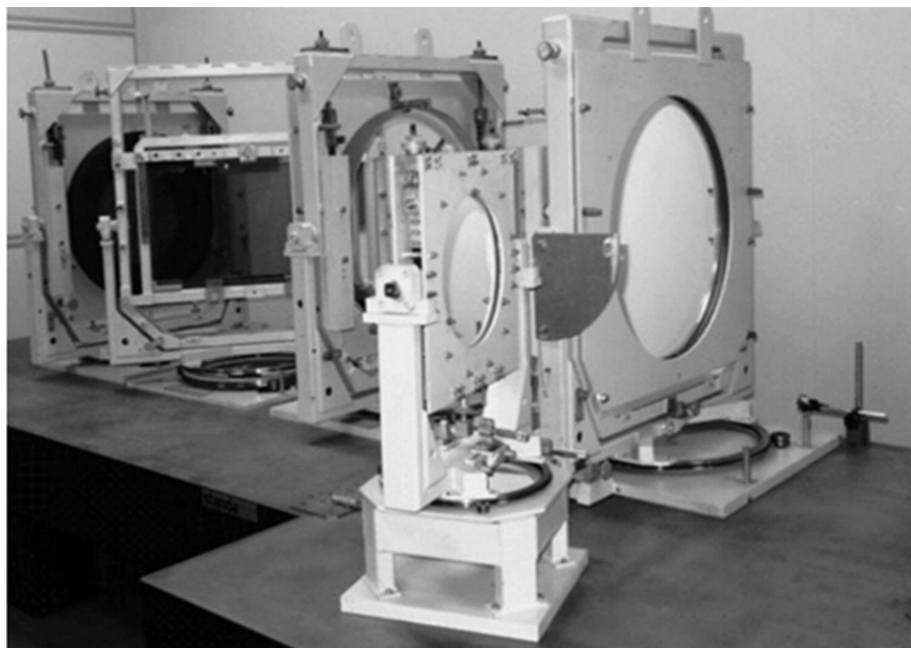


Рис. 11. Фотография производственного измерительного стенда на базе динамического интерферометра «IntelliumH2000» и зеркально-линзового коллиматора для апробации разработанного алгоритма определения СКО искажений волновых фронтов при контроле локальных отклонений профиля плоской эталонной поверхности диаметром до 1000 мм

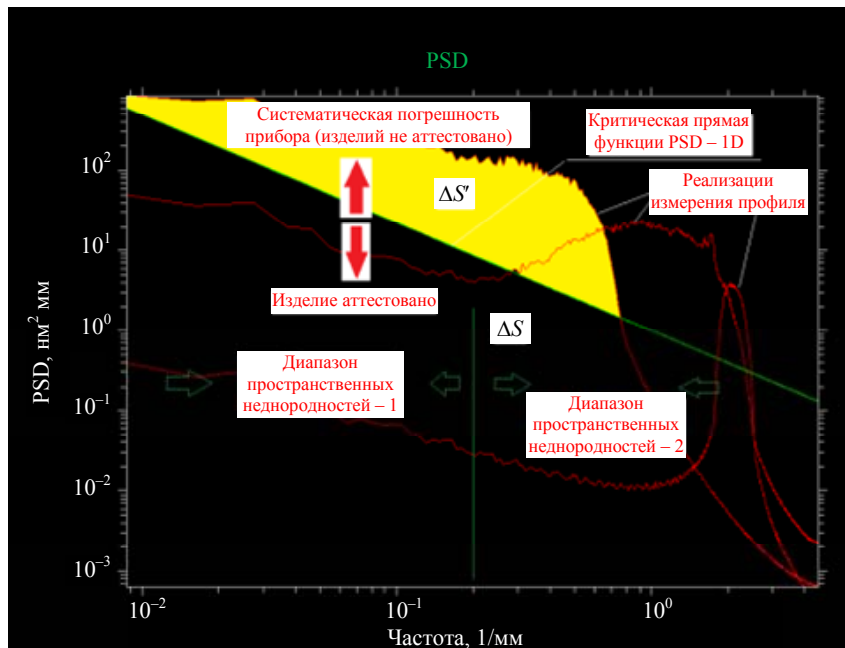


Рис. 12. К разработке методики аттестации поверхностных неоднородностей нанометрового уровня: график аттестации оптических изделий по данным построения одномерной функции PSD-1D

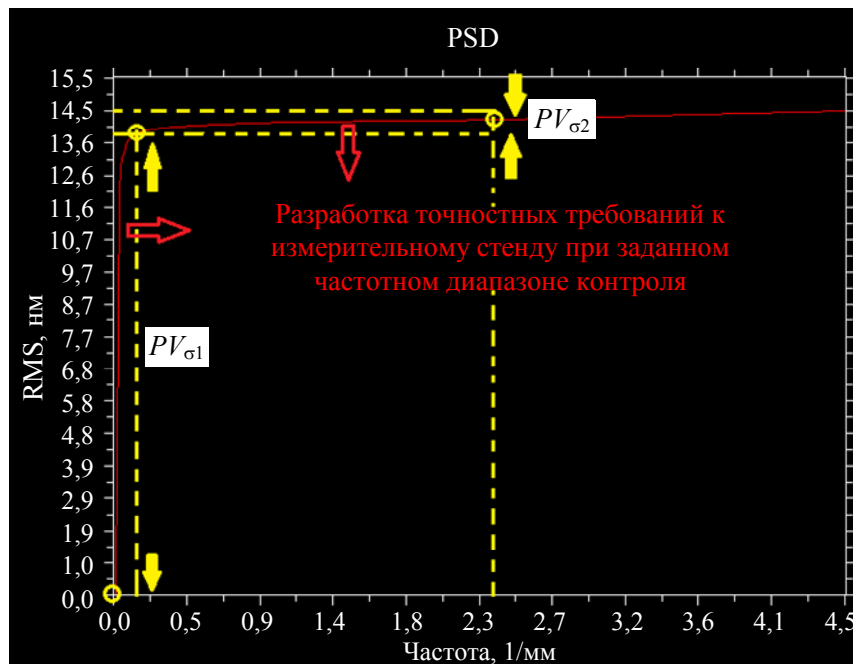


Рис. 13. К разработке методики аттестации поверхностных неоднородностей нанометрового уровня: к определению систематической погрешности интерференционного стенда и качественных показателей профилей контролируемых изделий

Представленные на рис. 12, 13 графики функциональных зависимостей СПКФ1 от пространственных частот, выдвигают требования к аппаратуре и алгоритму контроля пространственных неоднородностей, измеряемых в пределах частотных диапазонов. В соответствии с выражением (2) площадь $\Delta S'$ –

определяет значение измеряемого параметра неоднородности в пределах указанного диапазона частот.

Площадь $\Delta S'$ – определяет величину систематической ошибки прибора (в случае контроля аттестованной эталонной оптической поверхности).

На основе приведённых данных в качестве требования к средствам и аппаратуре измерения предъявляется критерий

$$\begin{aligned} \Delta^2_{\text{сист.пр.}} &< \Delta S/10 \\ \Delta^2_{\text{сист.пр.}} &\leq \Delta S', \end{aligned} \quad (5)$$

где $\Delta^2_{\text{сист.пр.}}$ – среднеквадратическая систематическая приборная погрешность (дисперсия систематической ошибки измерения).

Заключение

Таким образом, разработанный метод динамической интерферометрии контроля неоднородностей искажений волновых фронтов для плоских оптических элементов, позволил в лабораторных и производственных условиях с высокой точностью определить наличие и размер неоднородностей в частотных диапазонах I, II, для которых значения СКО составили: для диаметра 100 мм – 18,570; 4,341 нм, соответственно, а для диаметра 1000 мм – 31,77; 5,26 нм, соответственно. Достигнутая при оптимизации целевой функции величина максимальной неисключённой систематической погрешности алгоритма для первого и второго частотных диапазонов (см. табл. 1) составила величину порядка 2 %, что вполне удовлетворяет указанным в табл. 1 точностным требованиям. Разработанный алгоритм приведения к одномерному виду спектральной плотности корреляционной функции и её цифровой обработки позволил выдвинуть критерии, определяющие как систематическую погрешность интерференционного стенда, так и статистических показателей профилей контролируемых изделий.

Автор выражает глубокую благодарность сотрудникам научно-производственного комплекса «Астрономическая и космическая оптика» АО «Лыткаринский завод оптического стекла» за помощь в проведении экспериментов и компетентных консультациях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдулкадыров М. А., Добриков Н. С., Патрикеев А. П., Патрикеев В. Е., Семенов А. П. // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 12. С. 6.
2. Абдулкадыров М. А., Семенов А. // Фотоника. 2015. № 3. С. 62.
3. Денисов Д. Г. Разработка методов и аппаратуры лазерного интерференционного контроля формы и качества оптических поверхностей крупногабаритных зеркал на стадиях шлифования. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана. Москва, 2010.
4. Campbell J. H., Hawley-Fedder R. A., Menapace J. A. // Proc. of SPIE. 2004. Vol. 5341. DOI: 10.1117/12.538462.
5. Denisov D. G., Baryshnikov N. V., Gladysheva Ya. V., Karasik V. E., Morozov A. B., Patrikееv V. E. // Measurement Techniques. 2017. Vol. 60. Iss. 2. P. 121.
6. Денисов Д. Г., Карасик В. Е., Орлов В. М. // Метрология. 2009. № 9. С. 15.
7. Барышников Н. В., Денисов Д. Г., Карасик В. Е., Сахаров А. А. Метод и аппаратура аттестационного контроля радиусов кривизны сферических поверхностей оптических изделий при помощи датчика волнового фронта: В сб. V Международная конференция по фотонике и информационной оптике. Сборник научных трудов. 2016. С. 416–417.
8. Полещук А. Г., Хомутов В. Н., Маточкин А. Е., Насыров Р. К., Черкашин В. В. // Фотоника. 2016. № 4. С. 38.
9. Полещук А. Г., Корольков В. П., Насыров Р. К., Хомутов В. Н., Конченко А. С. // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. № 6. С. 818. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-818-829.
10. Nikitin A., Sheldakova J., Kudryashov A., Borsoni G., Denisov D., Karasik V., Sakharov A. // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering 3. Сер. "Photonic Instrumentation Engineering III" 2016. P. 97540K.
11. Nikitin A., Sheldakova J., Kudryashov A., Denisov D., Karasik V., Sakharov A. // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering 2. 2015. P. 936905.
12. Sidick Erkin // Proc. of SPIE. 2009. Vol. 7390. DOI: 10.1117/12.823844.
13. Alcocka Simon G., Ludbrooka Geoff D., Owenb Tommy, Dockreec Richard // Proc. of SPIE. 2010. Vol. 7801. P. 102. DOI: 10.1117/12.861539.
14. Волков А. В., Головашкин Д. Л., Досколович Л. Д., Казанский Н. Л., Котляр В. В., Павельев В. С., Скиданов Р. В., Сойфер В. А., Соловьев В. С., Успенев Г. В., Харитонов С. И., Хонина С. Н. Методы компьютерной оптики. Изд. 2-е, испр. – М.: Физматлит, 2003.
15. ISO 10110–1996. Optics drawing standarts for the national ignition facility.

The analysis of the errors of the dynamic interferometry method in the control of local surface inhomogeneities of the nanometer level of the profiles of optical parts

*D. G. Denisov, M. N. Ustyugova, V. E. Frolova, D. A. Mashoshin,
and I. I. Gafarov*

Bauman Moscow Technical University
5 2-nd Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russia
E-mail: denisov_dg@mail.ru

Received February 10, 2022

The method of dynamic interferometry for monitoring local deviations of the nanometer level of the surfaces of optical parts from a given profile has been developed, scientifically substantiated and experimentally confirmed, based on the algorithm for calculating the objective function - the spectral density of one-dimensional correlation function (PSCF1 from English. PSD (Power Spectral Density One Dimension)). Theoretical and experimental studies are presented on the determination of the standard deviation (RMSD) of local deviations of the surfaces of optical parts with a diameter of up to 100 mm and up to 1000 mm, taking into account the non-excluded systematic and random components of the errors in determining the objective function.

Keywords: optical control, interferometry, surface measurements, spectral density of the correlation function, analysis of systematic methodological and random errors, edge effect, frequency "leakage" effect.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-1-71-89

REFERENCES

1. M. A. Abdulkadyrov, N. S. Dobrikov, A. P. Patrikeev, V. E. Patrikeev, and A. P. Semenov, *Optical magazine* **81** (12), 6 (2014).
2. M. A. Abdulkadyrov, *Photonics*, No. 3, 62 (2015).
3. D. G. Denisov, Development of methods and equipment for laser interference control of the shape and quality of optical surfaces of large mirrors at the stages of grinding / Thesis for the degree of candidate of technical sciences / Moscow State Technical University. N. E. Bauman. Moscow, 2010.
4. J. H. Campbell, R. A. Hawley-Fedder, and J. A. Menapace, *Proc. of SPIE* **5341** (2004).
DOI: 10.1117/12.538462.
5. D. G. Denisov, N. V. Baryshnikov, Ya. V. Gladysheva, V. E. Karasik, A. B. Morozov, and V. E. Patrikeev, *Measurement Techniques* **60** (2), 121 (2017).
6. D. G. Denisov, V. E. Karasik, and V. M. Orlov, *Metrology*, No. 9, 15 (2009).
7. N. V. Baryshnikov, D. G. Denisov, V. E. Karasik, and A. A. Sakharov, Method and equipment for certification control of radii of curvature of spherical surfaces optical products using a wavefront sensor / In the collection: V International Conference on Photonics and Information Optics Collection of scientific papers. 2016. p. 416–417.
8. A. G. Poleshchuk, V. N. Khomutov, A. E. Matochkin, R. K. Nasyrov, and V. V. Cherkashin, *Photonics*, No. 4, 38 (2016).
9. A. G. Poleshchuk, V. P. Korolkov, R. K. Nasyrov, V. N. Khomutov, and A. S. Konchenko, *Computer optics* **40** (6), 818 (2016).
DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-818-829.
10. A. Nikitin, J. Sheldakova, A. Kudryashov, G. Borsoni, D. Denisov, V. Karasik, and A. Sakharov, A device based on the shack-hartmann wave front sensor for testing wide aperture optics / In the collection: Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering 3.

Ser. "Photonic Instrumentation Engineering III" 2016. P. 97540K.

11. A. Nikitin, J. Sheldakova, A. Kudryashov, D. Denisov, V. Karasik, and A. Sakharov, Hartmannometer versus Fizeau interferometer: advantages and disadvantages / In: Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering 2. 2015. S. 936905.

12. Erkin Sidick, Proc. of SPIE **7390** (2009). DOI: 10.1117/12.823844.

13. Simon G. Alcocka, Geoff D. Ludbrooka, Tommy Owenb, and Richard Dockreec, Proc. of SPIE **7801**, 102 (2010). DOI: 10.1117/12.861539.

14. A. V. Volkov, D. L. Golovashkin, L. D. Doskolovich, N. L. Kazansky, V. V. Kotlyar, V. S. Pavelyev, R. V. Skidanov, V. A. Soifer, V. S. Solovyov, G. V. Usplenev, S. I. Kharitonov, and S. N. Khonina, *Methods of computer optics*. Ed. 2nd, rev. (Fizmatlit, Moscow, 2003).

15. ISO 10110-1996. Optics drawing standards for the national ignition facility.