

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ЛОКАЛЬНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ НАНОМЕТРОВОГО УРОВНЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Д.Г. Денисов¹

¹Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация

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. Представлены теоретические и экспериментальные исследования, посвящённые определению среднего квадратического отклонения локальных отклонений поверхностей оптических деталей диаметром до 100 мм и до 1000 мм, с учётом неисклѳочѳенной систематической и случайной составляющих погрешностей определения целевой функции.

Ключевые слова: оптический контроль, интерферометрия, измерения поверхности, спектральная плотность мощности, методические погрешности, краевой эффект, эффект «утечки» частоты.

Цитирование: Денисов, Д.Г. Анализ погрешностей при цифровой обработке результатов интерферометрического контроля локальных отклонений нанометрового уровня поверхностей оптических деталей / Д.Г. Денисов // Компьютерная оптика. – 2017. – Т.41, № 6. – С. 820-830. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-820-830.

Введение

Современные оптические технологии, ориентированные на создание перспективных высокотехнологических изделий, обладающих высокими показателями качества [1–3], на сегодняшний день невозможны 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), «Мегаджоуль» (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 направления 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 [4–11].

1. Постановка научно-технической задачи

С целью отработки схемотехнических и конструктивных решений стендовой аппаратуры полноапертурного (до 1000 мм) контроля локальных отклоне-

ний поверхностей крупногабаритных оптических изделий, а также оценки точностных возможностей разрабатываемого алгоритма расчёта величины среднего квадратического отклонения (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, 12–14] 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 [1–8]. 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 съѳеме 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 [7–9] лазерного пучка, обусловленные ошибками формы исследуемых оптиче-

ских 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) [1–8], RMS_{grad} (*root mean square gradient* – СКО градиента искажений) [4, 5], а в диапазонах II и III – параметром RMS [4–11], ха-

рактеризующим 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 тот же вид, что и величина RMS, но определяется на малой базовой площади [3–6].

Табл. 1. Технологические требования к оптическим деталям при пространственно-частотном анализе неоднородностей 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 табл. 1 показатели качества являются оптимизационными параметрами целевой функции аттестационного контроля профиля оптической детали, в качестве которой предлагается использовать спектральную плотность мощности сигнала (СПМ от англ. PSD (Power Spectral Density)). Дословный перевод используемой целевой функции в большинстве случаев применяется при преобразовании «электрических» сигналов [12, 13]. В данной работе при обработке оптического сигнала целесообразнее говорить о спектральной плотности одномерной корреляционной функции профиля поверхности (СПКФ1) или $\overline{S1D(v)}$, нм²·мм (где v – пространственная частота, 1/мм). В качестве критериев оптимизации данной функции используются допустимые (максимальные) значения погрешностей определения приведённых в табл. 1 показателей качества.

Традиционный метод аттестационного контроля [4–5, 15] основан на сравнении построенной функции $\overline{S1D(v)}$ с функцией $S1D_{iso}(v)$, нм²·мм, определяемой согласно стандарту ISO 10110-6:2015 [15].

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

где $S1D_{iso}(v)$ – СПКФ1, построенная в соответствии со стандартом ISO 10110-6:2015; A – константа (1 для стекла [4–6, 15], 15 для кристаллических сред [4–6, 15]); $1 < B < 3$ – константа [15]; C – предел разрешения прибора (мкм) [15]; D – длина, на которой производится измерение (мкм) [15]; v – пространственная частота, мкм⁻¹ [15].

При превышении функции $\overline{S1D(v)}$ в указанном пространственно-частотном диапазоне функции

$S1D_{iso}(v)$ можно судить о наличии недопустимых локальных отклонений поверхности от заданного профиля и говорить о непригодности оптической детали для её последующего функционирования (рис. 1а, б). Детально данная методика приведена в [45, 15].

Следует отметить, что возможные пространственные неоднородности в промежуточных сечениях исходной функции $S2D_{iso}(v_x, v_y)$, нм²·мм², обусловленные наличием локальных отклонений поверхности (рис. 1а), могут внести существенный вклад в структуру погрешности определения результирующего 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 $\overline{S1D(v)}$ 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 теореме Винера–Хинчина [4, 5, 14] и теории статистических измерений и позволяет определить искомую функцию как преобразование Фурье [4, 5, 12–14] от автокорреляционной функции распределения высот исследуемой карты профиля в зависимости от координат $h(x, y)$ [3–5, 8]:

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

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 высот профиля $[h(x, y)]$; x, y – разность координат высот профиля.

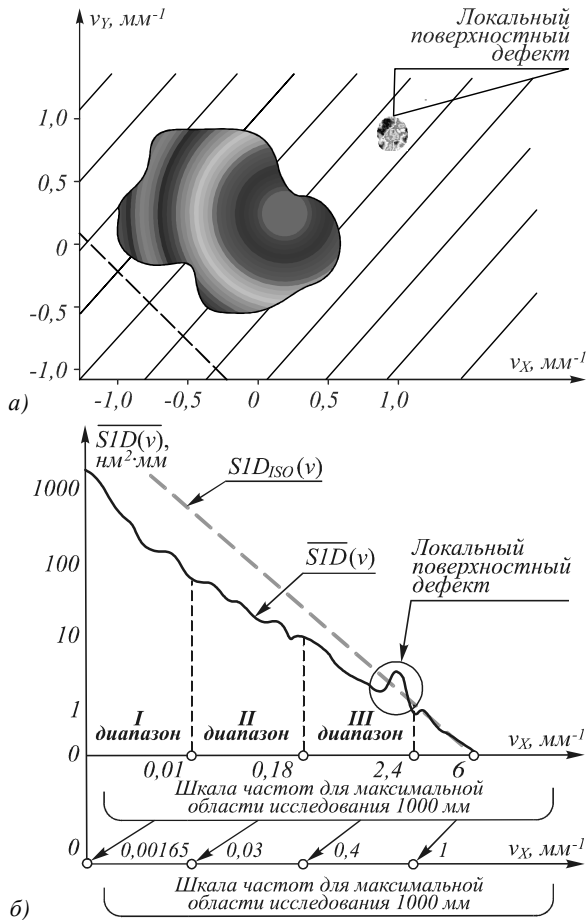


Рис. 1. Иллюстрация методики аттестационного контроля локальных отклонений поверхности оптического элемента технологического комплекса NIF: вид исходной функции $S2Diso(v_x, v_y)$ и её сечение а) под углом 60° ; б) соответствующая сечению усреднённая функция $\overline{SID}(v)$ и построенная согласно стандарту ISO 10110-6:2015 функция $SID_{iso}(v)$

Реализация второго метода расчёта функции $S2D(v_x, v_y)$, как частный случай первого (2), предполагает нахождение искомой двумерной функции стационарного в широком смысле случайного процесса как квадрат модуля преобразования Фурье высот карты профиля оптической поверхности в зависимости от координат $h(x, y)$, приведённой к единичной площади $a \times b$ (области исследований)

$$S2D(v_x, v_y) = |\mathfrak{F}\{h(x, y)\}|^2 / (ab), \quad (3)$$

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 от карты профиля оптической поверхности в зависимости от координат $h(x, y)$.

Для дальнейших исследований будем использовать второй метод, поскольку его применение обеспечивает более высокую точность вычислений. Приведённый ал-

горитм позволяет проанализировать пространственные частоты и количественно рассчитать СКО соответствующих им неоднородностей поверхности (табл. 1) на основе теоремы Парсевяля [4, 5, 14]:

$$RMS_{SID}(v) = \left(2\pi \int_{v_{min}}^{v_{max}} \overline{SID}(v) dv \right)^{1/2}, \quad (4)$$

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

Стоит отметить, что значения границ диапазонов ($v_{max} - v_{min}$) указанной частотной шкалы (4) определяются, с одной стороны, линейной величиной элемента пикселя матрицы приёмника излучения, а с другой стороны, размером световой апертуры контролируемой оптической детали. Указанные в табл. 1 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 $\Delta v_I = 0,01 \dots 0,18 \text{ мм}^{-1}$; $\Delta v_{II} = 0,18 \dots 2,4 \text{ мм}^{-1}$; $\Delta v_{III} = 2,4 \dots 6 \text{ мм}^{-1}$. 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. 1б. В первом случае для проведения экспериментальных исследований качества оптической поверхности используется лабораторный измерительный стенд на базе динамического интерферометра с выходной апертурой 100 мм [5], а во втором случае для расширения световой апертуры совместно с последним применяется зеркально-линзовый коллиматор (рис. 2), имеющий диаметр выходного зрачка порядка 1000 мм.

Анализируя представленную выше связь пространственных частот, в работе предлагается на первом этапе проведения 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. 1б, 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.

2. Принцип работы лабораторного измерительного стенда

С целью отработки алгоритма полноапертурного (до 1000 мм) аттестационного контроля неоднород-

ностей искажений волновых фронтов при контроле крупногабаритных оптических деталей в I и II диапазонах соответствующих пространственных частот (табл. 1) в результате расчёта одномерной целевой функции – $\overline{SID}(v)$ была разработана методика и измерительный стенд на базе динамического интерферометра «IntelliumH2000» (ESDI, США). Данный интерферометр построен по оптической схеме Физо и имеет выходную апертуру диаметром 100 мм. Подробное описание функциональной схемы и принципа работы прибора представлены в [5]. 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° . 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. Стоит отметить, что в используемом приборе реализуется поляризационная калибровка [5], позволяющая учитывать инструментальную погрешность измерительного стенда. 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. В этой связи особое внимание в экспериментальной части работы было уделено разработке функциональной схемы стенда полноапертурного контроля совместно с сотрудниками АО «Лыткаринский завод оптического стекла».

3. 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. 2.

В представленной схеме полноапертурного аттестационного контроля, аналогично функциональной схеме лабораторного стенда [5] излучение на выходе из прибора, после прохождения фокусирующего объектива 1, попадет в измерительный канал, представляющий собой зеркально-линзовый коллиматор.

В состав последнего входят плоские поворотные зеркала 2, 3, предназначенные для уменьшения габаритных характеристик стенда, коллимирующий объектив 4, фокус которого сопряжён с фокусом объектива 1, после

которого плоский волновой фронт лазерного пучка проходит оптический клин с эталонной поверхностью сравнения 5, падая на исследуемую поверхность крупногабаритной плоской контролируемой детали 6. Реализуя в схеме поляризационную калибровку [5], можно последовательно регистрировать результат суперпозиции составляющих двух пар электромагнитных волн: $(\vec{s}_3; \vec{p}_d)$ или $(\vec{p}_3; \vec{s}_d)$ соответственно. Вычитая полученные результаты в виде интерферограмм, в схеме измерительного стенда минимизируется инструментальная погрешность, обусловленная погрешностями изготовления элементов зеркально-линзового коллиматора.

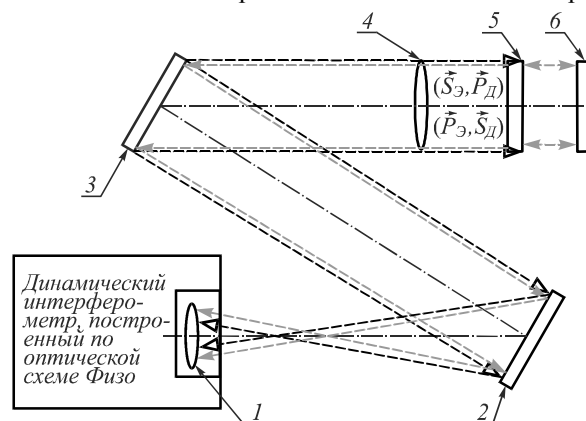


Рис. 2. Функциональная схема измерительного стенда на базе динамического интерферометра «IntelliumH2000» и зеркально-линзового коллиматора: 1 – фокусирующий объектив; 2, 3 – плоские поворотные зеркала коллиматора, 4 – коллимирующий объектив, 5 – оптический клин с эталонной поверхностью сравнения, 6 – крупногабаритная плоская контролируемая деталь

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

4. 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 преобразования Фурье (БПФ), преобразования двумерного стационарного сигнала в одномерный, краевых эффектов БПФ, эффекта спектральной «утечки» частоты [4–6, 12–14]. Анализируемый с точки зрения погрешностей метод основан на реализации следующих этапов:

- 1) регистрация исходной топографической карты профиля контролируемой оптической поверхности в зависимости от координат $h(x, y)$;
- 2) расчёт информативной матрицы исходной функции $S2D(v_x, v_y)$ (рис. 1а), приведённой к еди-

ничной области (площади) исследования в соответствии с (4);

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 10110-6:2015 [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:

$$\tilde{h}_{mn} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} h_{mn} \exp\left(\frac{-2\pi i n}{N}\right) \exp\left(\frac{-2\pi i m}{M}\right), \quad (5)$$

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.

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

$$h_{mn}^H = \tilde{h}_{mn} (A/M) \cdot (A/N), \quad (6)$$

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 (3):

$$S2D_{mn} = S^{-1} \left| h_{mn}^H \right|^2, \quad (7)$$

где $S = (dx \cdot dy) \cdot C$ – 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 – 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

$$v_{pmm} = \sqrt{(u_m)^2 + (v_n)^2}, \quad (8)$$

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 (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_{pmm} и соответствующие им среднеквадратические значения векторов $\overline{SID}(v)$, которые представляют искомую целевую функцию, приведённую к одномерному виду.

На заключительном этапе в соответствии с (4) находят СКО искажений волновых фронтов при контроле локальных отклонений изотропной поверхности [3, 6] в заданном частотном диапазоне исследования $v_{p \min} - v_{p \max}$, проводя сравнительную оценку с данными, представленными в табл. 1:

$$RMS_{SID}(v_p) = \left[2\pi \int_{v_{p \min}=0}^{v_{p \max}} \overline{SID}(v_p) dv_p \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (9)$$

где $v_{p \min}, v_{p \max}$ – 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 составила величину порядка 10^{-16} . Полученная величина свидетельствует о незначительном вкладе влияния математического аппарата дискретного БПФ при обработке изотропных полированных поверхностей. Тем не менее, в задачах диагностики сложнопольных 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 $\overline{SID}(v_p)$, является эффект спектральной «утечки» частоты (рис. 3а, б).

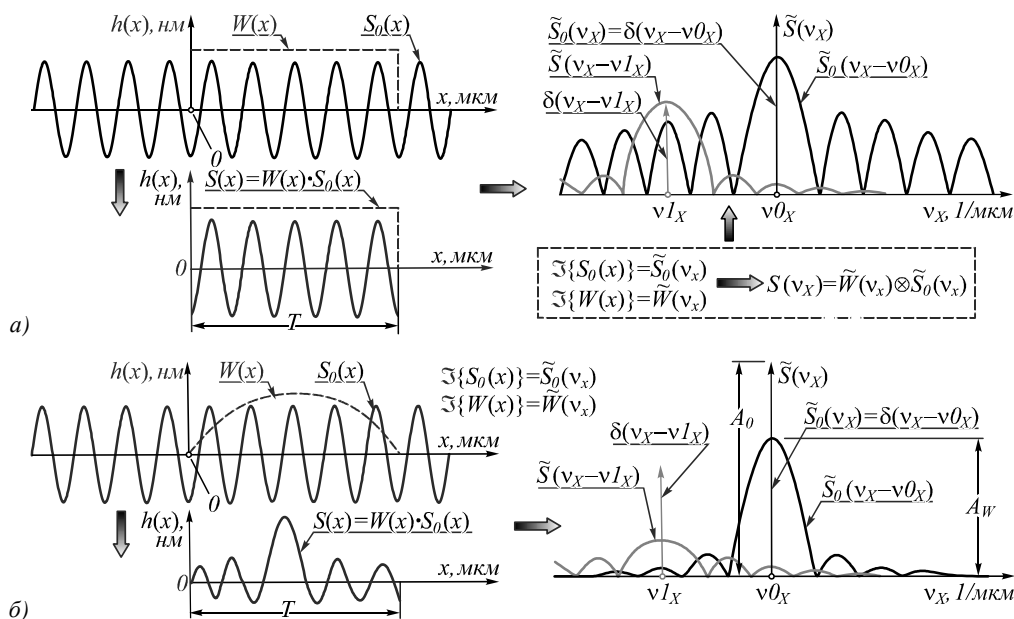


Рис. 3. Иллюстрация анализа влияния эффекта спектральной «утечки» частоты на значение одномерной целевой функции $SID(v_p)$ в заданном пространственно-частотном диапазоне: а) при использовании прямоугольной (оконой) функции выборки; б) при использовании оптимальных оконных функций с «гладкой» огибающей

Как можно видеть из рис. 3а, 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 $SID(v_p)$ и, как следствие, измерения величины СКО (10). Данный эффект проанализирован в работе при обработке центральных сечений модельных карт $h(x) = S_0(x)$ (рис. 3а). 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 (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 заданном пространственно-частотном диапазоне $v_{min} < v_x < v_{max}$ (табл. 1); $\tilde{S}_0(v_x)$ – спектр исходного распределения в широком пространственно-частотном диапазоне $-\infty < v_x < +\infty$; $\tilde{W}(v_x)$ – прямоугольная (оконая) функция выборки, в общем случае определяемая как $rect(x)$ исследуемого масштаба неоднородностей эквивалентного соответствующему пространственно-частотному диапазону (табл. 1).

В результате вместо ожидаемой δ -функции Дирака $\tilde{S}_0(v_x) = \delta(v_x - v_{0x})$ результирующий спектр представляется в виде функции (рис. 3а)

$$\sin c(v_x - v_{0x}) = \tilde{S}_0(v_x - v_{0x}). \quad (10)$$

При этом амплитудные значения гармоники низкой пространственной частоты v_{0x} первого частотно-

го диапазона в значительной степени превышают амплитудные значения гармоник высокой пространственной частоты v_{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 локальных отклонений, отнесённых ко второму пространственно-частотному диапазону (табл. 2).

Табл. 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 (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 (рис. 3б).

5. 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» (рис. 4), позволяющее проводить аттестационный контроль качества оптических деталей на базе измерений, полученных на измерительных

стендах [5] (рис. 2). Разработанное программное обеспечение было протестировано на модельных топографических картах (рис. 5а, б, з), созданных в среде «Matlab» с заданным СКО неоднородностей искажений волновых фронтов, а также на результатах экспериментальных измерений, полученных в лабораторных (рис. 6) и производственных (рис. 5в, з) условиях на АО «Лыткаринский завод оптического стекла» на базе измерительных стендов [5] (рис. 2) соответственно.

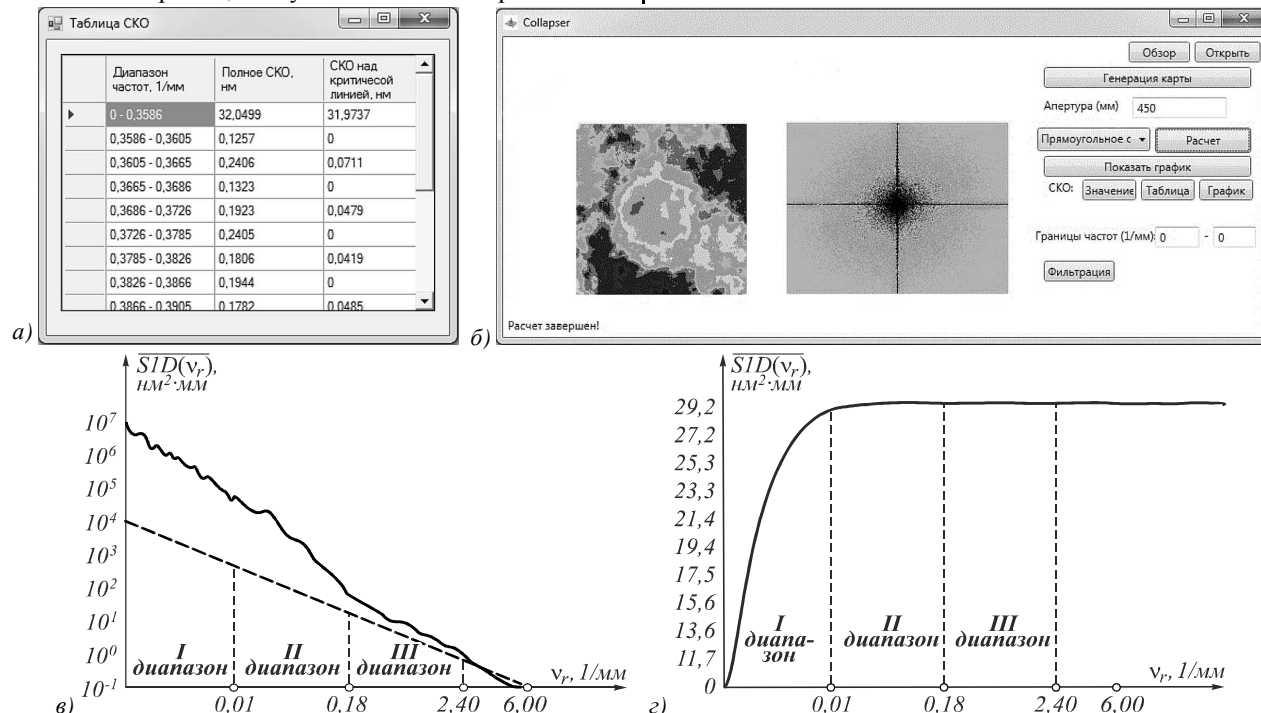


Рис. 4. Внешний вид разработанного программного обеспечения «Collapser»: а) таблица СКО, б) обрабатываемая карта профиля оптической поверхности и расчётная функция $S2D(v_x, v_y)$; в) целевая функция $SID(v_r)$; г) графическое представление разброса оптимизационного параметра – СКО в пространственно-частотных диапазонах

Для минимизации краевых эффектов, обусловленных спецификой математического аппарата дискретного БПФ, были использованы непрямоугольные оконные фильтры Ханна и Уолша [5, 12, 13]. По результатам обработки построенных графических зависимостей одномерных целевых функций $SID(v_r)$ для пространственных частот остаточных неоднородностей (рис. 5з, б) 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 (10).

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.

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.

Табл. 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	$\Delta_m, \%$
1	15,454	15,452	1,6087
2	15,476	15,479	1,9690
3	14,346	14,349	2

В табл. 4 представлены значения СКО экспериментальных данных, полученных с помощью лабораторного [5] и производственного (рис. 2) измерительных стендов, а также разработанного алгоритма – соответственно RMS_e , RMS^*_e , а также относительные среднеквадратические погрешности

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

Из табл. 4 можно видеть, что максимальная относительная погрешность определения величины СКО не-

однородностей искажений волновых фронтов при контроле оптических деталей со световой апертурой 100 мм составила величину не более 8 %, а при контроле крупногабаритных оптических изделий диамет-

ром до 1000 мм – не более 13 %. Различие между полученными результатами обусловлено спецификой методики и аппаратуры контроля, в частности особенно-стью юстировки зеркально-линзового коллиматора.

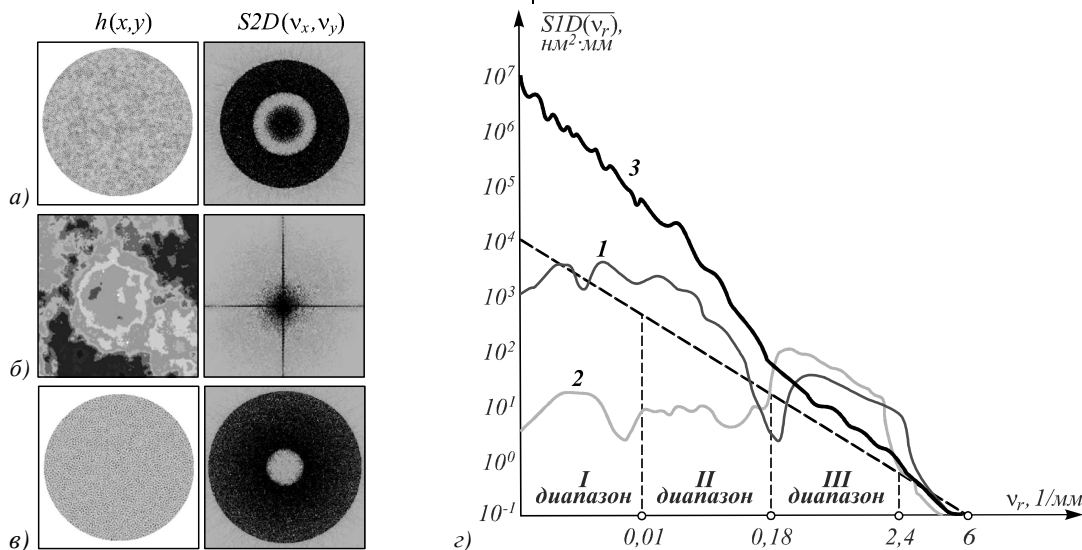


Рис. 5. Результаты апробации разработанного алгоритма расчёта СКО неоднородностей искажений волновых фронтов для топографических карт $h(x, y)$ крупногабаритных оптических деталей диаметром до 1000 мм в I и II спектральных диапазонах: модельные топографические карты $h(x, y)$, построенные по степенному закону и закону Лоренца, распределения неоднородностей искажений волновых фронтов и соответствующие им целевые функции $S2D(v_x, v_y)$ (а, б); экспериментально зарегистрированная топографическая карта $h(x, y)$ и соответствующая ей двумерная целевая функция $S2D(v_x, v_y)$ (в); численные результаты построения и расчёта одномерных целевых функций $\overline{S1D}(v_p)$ для модельных (1, 2) и экспериментальной (3) топографических карт (г)

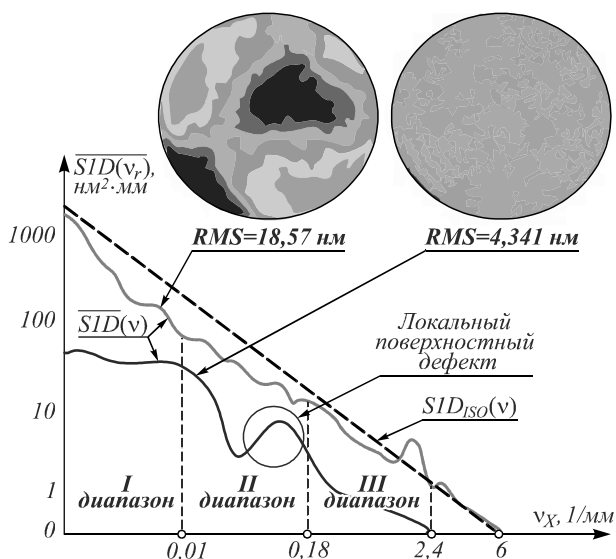


Рис. 6. Результаты расчёта разработанного алгоритма определения СКО искажений волновых фронтов при контроле локальных отклонений профиля плоской эталонной поверхности диаметром 100 мм в двух пространственно-частотных диапазонах

С использованием табл. 3, 4 можно оценить как численное значение СКО пространственных неоднородностей волновых фронтов (10) в результате оптимизации целевой функции $\overline{S1D}(v_{p\text{mm}})$, так и определённый тип локального отклонения поверхности от заданного профиля с соответствующей простран-

ственной частотой $v_{p\text{mm}}$ в пределах заданной области (апертуры) исследования оптического элемента детали по виду характерного пика на расчётной кривой $\overline{S1D}(v_{p\text{mm}})$ (рис. 5г, 6).

Табл. 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

Приведённые в табл. 4 данные были получены при помощи измерительных стендов диагностики неоднородностей искажений волновых фронтов для контроля плоских оптических элементов диаметром 100 мм и до 1000 мм. Фотография полноапертурного измерительного стенда представлена на рис. 7.

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.

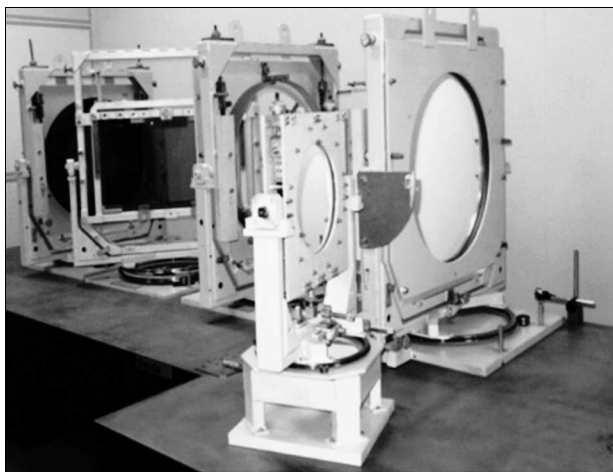


Рис. 7. Фотография производственного измерительного стенда на базе динамического интерферометра «IntelliumH2000» и зеркально-линзового коллиматора для апробации разработанного алгоритма определения СКО искажений волновых фронтов при контроле локальных отклонений профиля плоской эталонной поверхности диаметром до 1000 мм

Достигнутая при оптимизации целевой функции величина максимальной неисклѳенной систематической погрешности алгоритма для первого и второго частотных диапазонов, в соответствии с установленными требованиями, составила величину порядка 2%, что вполне удовлетворяет указанным точностным требованиям. Разработанный метод в перспективе позволит проводить оперативный аттестационный контроль локальных отклонений субнанометрового уровня профилей крупногабаритных оптических изделий в условиях производственных вибраций.

Благодарности

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.

Отдельные параграфы работы выполнены в рамках финансирования, осуществляемого согласно назначению стипендии Президента Российской Федерации молодым учёным и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики на 2013–2015 годы. При-

каз № 136 Министерства образования и науки Российской Федерации от 28 февраля 2013 года.

Литература

1. **Абдулкадыров, М.А.** Технология изготовления высокоточных крупногабаритных облеѳенных асферических зеркал с высокой стабильностью формы поверхности / М.А. Абдулкадыров, Н.С. Добриков, А.П. Патрикеев, В.Е. Патрикеев, А.П. Семѳнов // Оптический журнал. – 2014. – Т. 81, № 12. – С. 6-15.
2. **Абдулкадыров, М.А.** Современные способы изготовления астрономических и космических зеркал / М. Абдулкадыров, А. Семѳнов // Фотоника. – 2015. – № 3. – С. 62-79.
3. **Денисов, Д.Г.** Разработка методов и аппаратуры лазерного интерференционного контроля формы и качества оптических поверхностей крупногабаритных зеркал на стадиях шлифования: дис. ... канд. техн. наук / Денисов Дмитрий Геннадьевич. – МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2010.
4. **Campbell, J.H.** NIF optical materials and fabrication technologies: an overview / J.H. Campbell, R.A. Hawley-Fedder, Ch.J. Stolz, J.A. Menapace, M.R. Borden, P.K. Whitman, J. Yu, M.J. Runkel, M.O. Riley, M.D. Feit, R.P. Hackel // Proceedings of SPIE. – 2004. – Vol. 5341. – DOI: 10.1117/12.538462.
5. **Denisov, D.G.** Method for certification monitoring of surface inhomogeneities of optics based on frequency analysis of the surface profile / D.G. Denisov, N.V. Baryshnikov, Ya.V. Gladysheva, V.E. Karasik, A.B. Morozov, V.E. Patrikeev // Measurement Techniques. – 2017. – Vol. 60, Issue 2. – P. 121-127. – DOI: 10.1007/s11018-017-1160-0.
6. **Денисов, Д.Г.** Измерение параметров микронеровностей крупногабаритных шлифованных поверхностей оптических деталей при помощи лазерной интерферометрии / Д.Г. Денисов, В.Е. Карасик, В.М. Орлов // Метрология. – 2009. – № 9. – С. 15-24.
7. **Nikitin, A.** A device based on the Shack-Hartmann wave front sensor for testing wide aperture optics / A. Nikitin, J. Sheldakova, A. Kudryashov, G. Borsoni, D. Denisov, V. Karasik, A. Sakharov // Proceedings of SPIE. – 2016. – Vol. 9754. – 97540K. – DOI: 10.1117/12.2219282.
8. **Nikitin, A.** Hartmannometer versus Fizeau interferometer: advantages and drawbacks / A. Nikitin, J. Sheldakova, A. Kudryashov, D. Denisov, V. Karasik, A. Sakharov // Proceedings of SPIE. – 2015. – Vol. 9369. – 936905. – DOI: 10.1117/12.2085263.
9. **Барышников, Н.В.** Метод и аппаратура аттестационного контроля радиусов кривизны сферических поверхностей оптических изделий при помощи датчика волнового фронта / Н.В. Барышников, Д.Г. Денисов, В.Е. Карасик, А.А. Сахаров // V Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. – 2016. – С. 416-417.
10. **Полещук, А.Г.** Лазерные интерферометры для контроля формы оптических поверхностей / А.Г. Полещук, В.Н. Хомутов, А.Е. Маточкин, Р.К. Насыров, В.В. Черкашин // Фотоника. – 2016. – № 4. – С. 38-51. – DOI: 10.22184/1993-7296.2016.58.4.38.50.
11. **Полещук, А.Г.** Методы оперативного контроля характеристик дифракционных оптических элементов в процессе изготовления / А.Г. Полещук, В.П. Корольков, Р.К. Насыров, В.Н. Хомутов, А.С. Конченко // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 6. – С. 818-829. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-818-829.

12. **Sidick, E.** Power spectral density specification and analysis of large optical surfaces / E. Sidick // Proceedings of SPIE. – 2009. – Vol. 7390. – 73900L. – DOI: 10.1117/12.823844.
13. **Alcock, S.G.** Using the power spectral density method to characterise the surface topography of optical surfaces / S.G. Alcock, G.D. Ludbrook, T. Owen, R. Dockree // Proceedings of SPIE. – 2010. – Vol. 7801. – 780108 (8 p.). – DOI: 10.1117/12.861539.
14. Методы компьютерной оптики / А.В. Волков, Д.Л. Головашкин, Л.Д. Досколович, Н.Л. Казанский, В.В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Соيفер, В.С. Соловьев, Г.В. Успенев, С.И. Харитонов, С.Н. Хонина; под ред. В.А. Соифера. – Изд. 2-е, испр. – М.: Физматлит, 2003. – 688 с. – ISBN: 5-9221-0434-9.
15. ISO 10110-6:2015. Optics and photonics – Preparation of drawings for optical elements and systems – Part 6: Centring tolerances. – 2nd Ed. – Vernier, Geneva, Switzerland: ISO, 2015.

Сведения об авторе

Денисов Дмитрий Геннадьевич, 1981 г. рождения, окончил с отличием Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана по специальности «Инженер-разработчик лазерной техники и лазерных технологий» в 2006 г., защитил кандидатскую диссертацию на тему «Разработка методов и аппаратуры лазерного интерференционного контроля формы и качества оптических поверхностей крупногабаритных зеркал на стадиях шлифования» в 2010 г., защитил диплом по специальности «Преподаватель высшей школы» в 2013 г. Работает доцентом на кафедре лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: интерференционные методы и приборы высокоточного контроля оптических поверхностей, современные разделы оптического материаловедения, оптические материалы и технологии, методы и устройства адаптивной оптики в лазерных технологиях, системы управления параметрами лазерного излучения.

ГРПТИ 59.45.37.

Поступила в редакцию 18 июля 2017 г. Окончательный вариант – 7 ноября 2017 г.

ERROR ANALYSIS IN DIGITAL PROCESSING OF THE RESULTS OF INTERFEROMETRIC CONTROL OF NANO-SCALE LOCAL DEVIATIONS OF OPTICAL SURFACES

D.G. Denisov¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract

A dynamic interferometry method for controlling nano-scale local deviations of optical surfaces from a prescribed profile is developed, theoretically substantiated, and experimentally verified on the basis of an algorithm for calculating an objective function, defined as the spectral density of a one-dimensional correlation function. Theoretical and experimental approaches to determining the root-mean-square error when finding local deviations of the optical surfaces for the element diameters ranging from 100 mm to 1,000 mm are presented, while taking into account the non-excluded systematic and random error components in determining the objective function.

Keywords: optical control, interferometry, surface measurements, power spectral density, method errors, edge effect, the effect of "leakage" of frequency.

Citation: Denisov DG. Error analysis in digital processing of the results of interferometric control of nano-scale local deviations of optical surfaces. Computer Optics 2017; 41(6): 820-830. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-820-830.

Acknowledgments: The author expresses his deep gratitude to the employees of the Scientific and Production Complex "Astronomical and Space Optic" of "JSC Lytkarino Factory of Optical Glass" for their assistance in conducting the experiments and competent consultations.

Separate sections of the work were carried out under the scholarship of the President of the Russian Federation, awarded to young scientists and graduate students doing research in advanced areas of modernization of the Russian economy in 2013-2015.

References

- [1] Abdulkadyrov MA, Dobrikov NS, Patrikeev AP, Patrikeev VE, Semenov AP. Technology for fabricating large, high-accuracy, lightened aspheric mirrors with high stability of the surface shape. J Opt Techn 2014; 81(12): 706-713. DOI: 10.1364/JOT.81.000706.
- [2] Abdulkadyrov MA. Modern ways of production of astronomical and space mirrors [In Russian]. Photonics 2015; 3: 62-79.
- [3] Denisov DG. Development of laser interferometric methods and equipment to control the profile and smoothness of the surfaces of large-size optical mirrors at a polishing stage. Thesis for the Candidate degree in Technical Sciences. Moscow, 2010.
- [4] Campbell JH, Hawley-Fedder RA, Stolz ChJ, Menapace JA, Borden MR, Whitman PK, Yu J, Runkel MJ, Riley MO, Feit MD, Hackel RP. NIF optical materials and fabrication technologies: an overview. Proc SPIE 2004; 5341. DOI: 10.1117/12.538462.
- [5] Denisov DG, Baryshnikov NV, Gladysheva YaV, Karasik VE, Morozov AB, Patrikeev VE. Method for certification monitoring of surface inhomogeneities of optics based on frequency analysis of the surface profile. Meas Tech 2017; 60(2): 121-127. DOI: 10.1007/s11018-017-1160-0.

- [6] Denisov DG, Karasik VE, Orlov VM. Measurement of the microroughness parameters of large-size polished optics surfaces using laser interferometry [In Russian.] *Metrology* 2009; 9: 15-24.
- [7] Nikitin A, Sheldakova J, Kudryashov A, Borsoni G, Denisov D, Karasik V, Sakharov A. A device based on the Shack-Hartmann wave front sensor for testing wide aperture optics. *Proc SPIE* 2016; 9754: 97540K. DOI: 10.1117/12.2219282.
- [8] Nikitin A, Sheldakova J, Kudryashov A, Denisov D, Karasik V, Sakharov A. Hartmannometer versus Fizeau interferometer: advantages and drawbacks. *Proc SPIE* 2015; 9369: 936905. DOI: 10.1117/12.2085263.
- [9] Baryshnikov NV, Denisov DG, Karasik VE, Sakharov AA. Method and equipment for attestation for control of the radius curvature of spherical surfaces of optical details by using a wave front sensor. *Proc V International Conference on Photonics and Information optics* 2016: 416-417.
- [10] Poleshchuk AG, Khomutov VN, Matochkin AE, Nasyrov RK, Cherkashin VV. Laser interferometers for optical surfaces testing [In Russian]. *Photonics* 2016; 4: 38-51. DOI: 10.22184/1993-7296.2016.58.4.38.50.
- [11] Poleshchuk AG, Korolkov VP, Nasyrov RK, Khomutov VN, Konchenko AS. Methods for on-line testing of characteristics of diffractive and conformal optical elements during the manufacturing process [In Russian]. *Computer Optics* 2016; 40(6): 818-829. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-818-829.
- [12] Sidick E. Power spectral density specification and analysis of large optical surfaces. *Proc SPIE* 2009; 7390: 73900L. DOI: 10.1117/12.823844.
- [13] Alcock SG, Ludbrook GD, Owen T, Dockree R. Using the power spectral density method to characterise the surface topography of optical surfaces. *Proc SPIE* 2010; 7801: 780108. DOI: 10.1117/12.861539.
- [14] Soifer VA, ed. *Methods for computer design of diffractive optical elements*. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 2002. ISBN: 978-0-471-09533-0.
- [15] ISO 10110-6:2015. *Optics and photonics – Preparation of drawings for optical elements and systems – Part 6: Centring tolerances*. 2nd Ed. Vernier, Geneva, Switzerland: ISO; 2015.

Author's information

Dmitry Gennadievich Denisov, 1981, graduated with honors from the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman in the field of engineer-developer of laser technology and laser technologies in 2006, defended his thesis on "Development of methods and equipment for laser interference control of the shape and quality of optical surfaces of large-sized mirrors at grinding stages" in 2010, defended a diploma in the specialty "Teacher of higher education" in 2013. Works as an assistant professor of Laser and Optoelectronic Systems department at the Bauman Moscow State Technical University. Scientific interests: interference methods and devices for high-precision control of optical surfaces, modern sections of optical material science, optical materials and technologies, methods and devices of adaptive optics in laser technologies, control systems for laser radiation parameters.

Received July 18, 2017. The final version – November 7, 2017.
