

## Высокоточный метод аттестации параметров формы крупногабаритных полированных плоских оптических изделий на основе расчёта и анализа спектральной плотности корреляционной функции

Д. Г. Денисов, А. А. Патрикеева, А. Б. Морозов

*В работе рассматривается возможность описания средне- и мелкоструктурных неоднородностей профилей поверхностей крупногабаритных оптических изделий, используя двумерную спектральную плотность корреляционной функции (СПКФ). Предложен метод измерения амплитудных значений пространственных неоднородностей в широком спектральном диапазоне, на основе теоремы Парсеваля и Винера-Хинчина, используя алгоритм приведения двумерной функции СПКФ к одномерному виду. Данный метод позволяет сравнивать измеренную функцию СПКФ с теоретически рассчитанной и указанной в техническом задании на изготовление оптической детали, а также выдвигать требования на аппаратуру контроля. В статье представлено математическое описание метода приведения двумерной функции СПКФ к одномерному виду функции и предложен алгоритм программного обеспечения, разработанного для реализации данного метода приведения функции СПКФ, и его апробация как на математических моделях поверхностей, так и на результатах экспериментальных измерений.*

*Ключевые слова:* динамическая интерферометрия (dynamic interferometry), параметры шероховатости поверхности (surface roughness parameters), спектральная плотность корреляционной функции (Power Spectral Density), алгоритм обработки (processing algorithm).

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-4-411-418

### 1. Введение

В настоящее время существует технологическая задача не только изготовления крупногабаритных оптических деталей с нанометровым уровнем значений параметров профилей оптических поверхностей (*Peak-to-Valley* – максимальное расстояние между высотой наибольшего выступа и глубиной наибольшей впадины относительно среднего уровня профиля поверхности; *Root-Mean-Square* – среднеквадратическое отклонение формы профиля оптической поверхности от ближайшей эталонной поверхности; *Rq* – среднеквадратическое значение отклонений точек профиля относительно базовой линии в пределах базовой длины), но и оперативного контроля данных деталей. Яркими примерами оптических систем, в ко-

торых существует необходимость в подобных оптических деталях, являются лазерная система NIF, установка «Луч» и телескоп E-ELT.

Система NIF имеет суммарную мощность лазеров 500 ТВт. Любая пространственная неоднородность на поверхности активных элементов, выходящая за пределы допуска, приведёт к потере мощности, а так же создаст вероятность разрушения материала при проходе столь мощного излучения.

Главное зеркало телескопа E-ELT, диаметром более 39 м, состоит почти из 1000 сегментов. Возникает необходимость точного изготовления и контроля поверхностей подложек сегментов, с целью минимизации светорассеяния на неоднородностях и, как следствие, улучшения качества изображения.

Критерием качества изготовления профилей поверхностей оптических деталей является двумерная функция СПКФ, однако, в настоящее время в стандарте ISO имеется описание лишь одномерной функции СПКФ. Требования к поверхности детали по функции СПКФ в техническом задании задаются в соответствии со стандартом ISO, то есть тоже в одномерном виде. Очевидно, что невозможно напрямую сравнить

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

E-mail: denisov\_dg@mail.ru

Патрикеева Анастасия Андреевна, аспирант.

Морозов Алексей Борисович, аспирант.

МГТУ им. Н. Э. Баумана.

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

Статья поступила в редакцию 26 августа 2022 г.

© Денисов Д. Г., Патрикеева А. А., Морозов А. Б., 2022

измеренную двумерную функцию СПКФ с заданной одномерной в техническом задании. Программное обеспечение современных интерферометрических приборов контроля позволяет получить одномерную функцию СПКФ лишь по одному из сечений, что не даёт полного представления о качества всей поверхности детали. В связи с этим предложен метод приведения двумерной функции СПКФ к одномерному виду СПКФ усреднением по азимуту. Такой подход позволит получить более полное представление о качестве поверхности в широком спектральном диапазоне неоднородностей и провести их оперативный контроль поверхности оптической детали согласно требованиям технического задания.

## 2. Методы приведения СПКФ к одномерному виду

В данной работе рассматриваются два метода приведения СПКФ к одномерному виду. Первый метод, использованный при разработке комплекса NIF, заключается в том, что выбирается некое сечение, и значения СПКФ в перпендикулярных направлениях к данному сечению интегрируются. Данный алгоритм повторяется шесть раз для различных углов сечения – от 0 до 150 град. После чего, на график выводятся шесть различных кривых одномерной функции СПКФ. Данный метод показывает влияние спектральных составляющих по различным направлениям, однако возникает сложность оценки суммарного влияния каждой спектральной составляющей по всем направлениям, а именно интегральное влияние имеет решающее значение.

Второй метод позволяет решить данную задачу. Значения двумерной функции СПКФ интегрируются по азимуту, соответственно получаем одномерную функцию, зависящую от радиуса. В данном случае кривая функции только одна, отражающая общее влияние всех спектральных направлений для каждой гармоники, что и является определяющим критерием годности исследуемой детали. Исходя из преимуществ данного метода для решения поставленной задачи, именно он был взят за основу для разработки алгоритма.

Все расчёты естественно проводятся в дискретном виде. Из-за этого возможно возникновение некоторых ошибок. Можно выделить две основные возможные ошибки – во-первых, полученный спектр изображения при использовании дискретного преобразования Фурье будет некорректным, если в выборке исходной функции нулевых, не сигнальных, отсчётов будет меньше, чем отсчётов исследуемой функции. Во-вторых, возникают ошибки при интегрировании по некой прямоугольной области, потому что интеграл

заменяется суммой дискретных отсчётов и интегрирование происходит немного по другой области.

## 3. Программное обеспечение

На основе теоретических исследований был разработан алгоритм и программное обеспечение приведения СПКФ к одномерному виду. Рассмотрим алгоритм его работы:

1) На вход поступает матрица  $h_{mn}$  значений высот поверхности в виде файла .csv и значение апертуры  $A$  в миллиметрах (вводится с клавиатуры).

$$\Delta x = \frac{A}{M} \text{ [мм]} - \text{ шаг дискретизации с учётом}$$

линейного увеличения приёмного объектива по горизонтали;  $M$  – максимальное число значимых точек по горизонтали.

$$\Delta y = \frac{A}{N} \text{ [мм]} - \text{ шаг дискретизации с учётом}$$

линейного увеличения приёмного объектива по вертикали;  $N$  – максимальное число значимых точек по вертикали.

2) Применяется дискретное преобразование Фурье к матрице  $h_{mn}$  (в программе реализован алгоритм быстрого преобразования Фурье), получая двумерный спектр сигнала:

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

$H_{mn} = H \times \Delta x \times \Delta y$  – нормируется спектр на размеры измеряемой области.

3) Вычисляется матрица значений СПКФ $_{mn}$ :

$$PSD_{mn} = \frac{1}{S} |\tilde{H}_{mn}|^2$$

где  $S$  – площадь контролируемых детали;  $S = dx \times dy \times \text{count}$ ; count – число элементов матрицы, содержащие информацию о высотах профиля детали.

4) В соответствии матрице СПКФ записываются вектора частот:

$$u_m = \left(m - \frac{M+1}{2}\right) / (\Delta x \cdot M),$$

$$v_n = \left(n - \frac{N+1}{2}\right) / (\Delta y \cdot N)$$

где  $M$  и  $N$  – количество столбцов и строк.

Осуществляется перевод в сферическую систему координат:

$$\rho_{mn} = \sqrt{u_m^2 + v_n^2}.$$

В полученной матрице начинаем последовательно рассматривать каждый радиус от меньшего к большему до частоты Найквиста, которая соответствует радиусу максимальной окружности, вписанной в матрицу. Для каждого радиуса находим значения координат всех точек этого радиуса, по этим координатам выбираем элементы из матрицы СПКФ и усредняем их, получая, таким образом, пару: частота (значение радиуса) – усреднённое (по данному радиусу) значение СПКФ. В итоге имеем вектор частот и соответствующий ему вектор значений СПКФ. Это и есть СПКФ.

5) Графически выводятся функции СПКФ в логарифмическом масштабе: красным – результат приведения СПКФ к одномерному виду, и зелёным – теоретическая критическая линия СПКФ, заданная по стандарту ISO.

6) В соответствии с теоремой Виннера-Хинчина по построенным графикам СПКФ и СПКФ определяется величина СКО формы волнового фронта (профиля оптической поверхности):

$$\sigma_{2D}^2 = \int_{v_{x\min}}^{v_{x\max}} \int_{v_{y\min}}^{v_{y\max}} PSD(v_x, v_y) dv_x dv_y$$

где  $v_{\max}$  – максимальная частота, обусловленная теоремой Найквиста;  $v_{\min}$  – минимально пропускаемая частота, обусловленная параметрами оптической системы.

#### 4. Апробация алгоритма

Для проверки правильности работы программного обеспечения была проведена серия экспериментальных измерений на Лыткаринском Заводе Оптического Стекла. Стенд контроля представлен на рисунке 1.

Стенд состоит из коллимирующего объектива (1), эталонного плоского клина (2), контролируемой детали (3), а так же возвратного зеркала (4) для возможности контроля деталей на просвет.

В качестве прибора контроля использовался динамический интерферометр Intellium H2000 компании ESDI. Данный интерферометр работает

по схеме Физо, а его главным преимуществом перед подобными интерферометрами других компании является то, что сдвиг фазы реализуется с помощью поляризаторов. Интерферометр имеет три независимые камеры с поляризаторами для одновременной регистрации трёх интерферограмм сдвинутых по фазе. Такой метод позволяет полностью устранить влияние вибраций на одиночное измерение. Минимальное время экспозиции составляет 10 мкс, благодаря чему, посредством усреднения большого числа кадров, можно максимально снизить ошибки, вызванные турбулентными потоками воздуха. Разрешение каждой камеры – 1040×1040 пикселей. Точность измерений составляет  $\lambda/15$ , а стабильность измерений –  $\lambda/100$  при рабочей длине волны 633 нм.

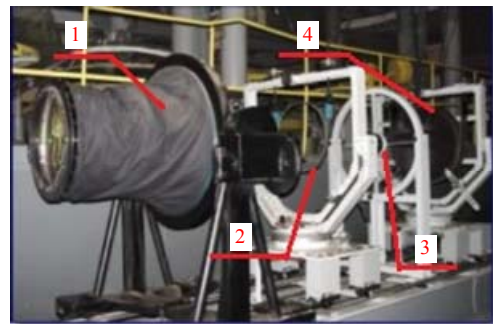


Рис. 1. Стенд контроля на ОАО ЛЗОС

Внешний вид прибора и схема одновременной регистрации трёх интерферограмм показаны на рисунках 2 и 3.



Рис. 2. Интерферометр ESDI Intellium H2000

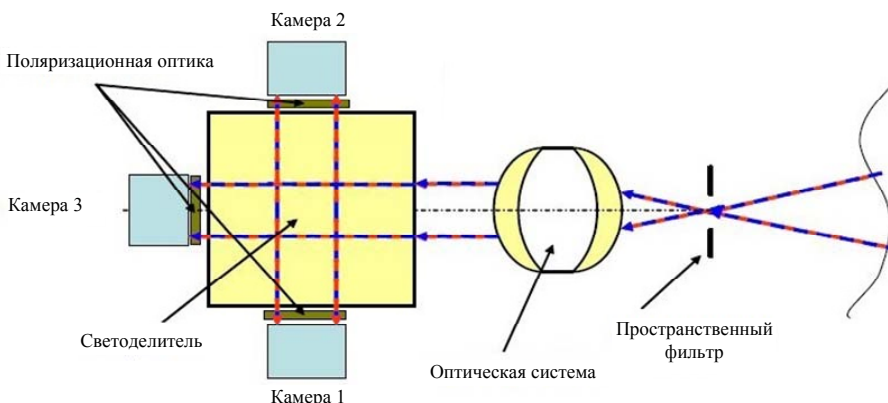


Рис. 3. Принципиальная схема интерферометра ESDI Intellium H2000

При эксперименте каждая реализация состояла из 150 усреднённых отдельных измерений. Для апробации алгоритма и программного обеспечения были выбраны две реализации.

1) *Экспериментальная апробация.* На рисунке 4 представлен результат эксперимента: топограмма поверхности и значение среднеквадратического отклонения (RMS) формы поверхности (программное обеспечение интерферометра ESDI).

Видно, что значение СКО составляет 16,1786 нм.

На следующих рисунках 5 и 6 представлен результат, полученный в разработанном программном обеспечении.

Представлена топограмма поверхности, двумерная функция СПКФ и значение СКО, рассчитанное по теореме Винера-Хинчина с использованием одномерной СПКФ. Это значение составляет 16,203 нм.

На рисунке 6 представлен конечный график. На графике красным – результат приведения СПКФ к одномерному виду.

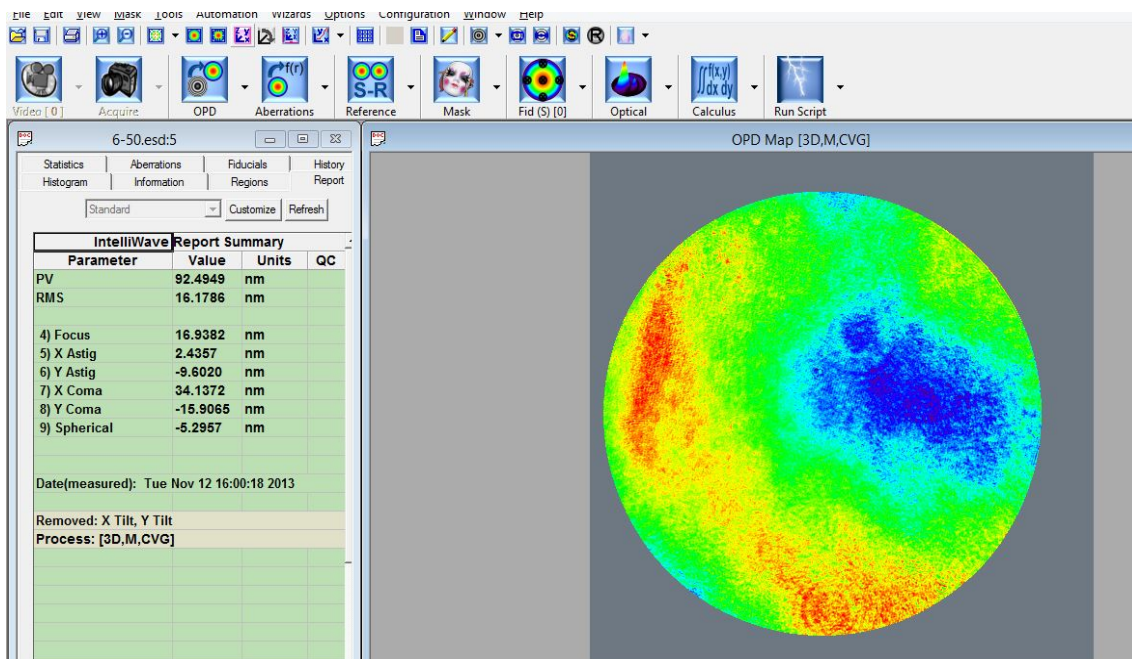


Рис. 4. Результат экспериментальных измерений

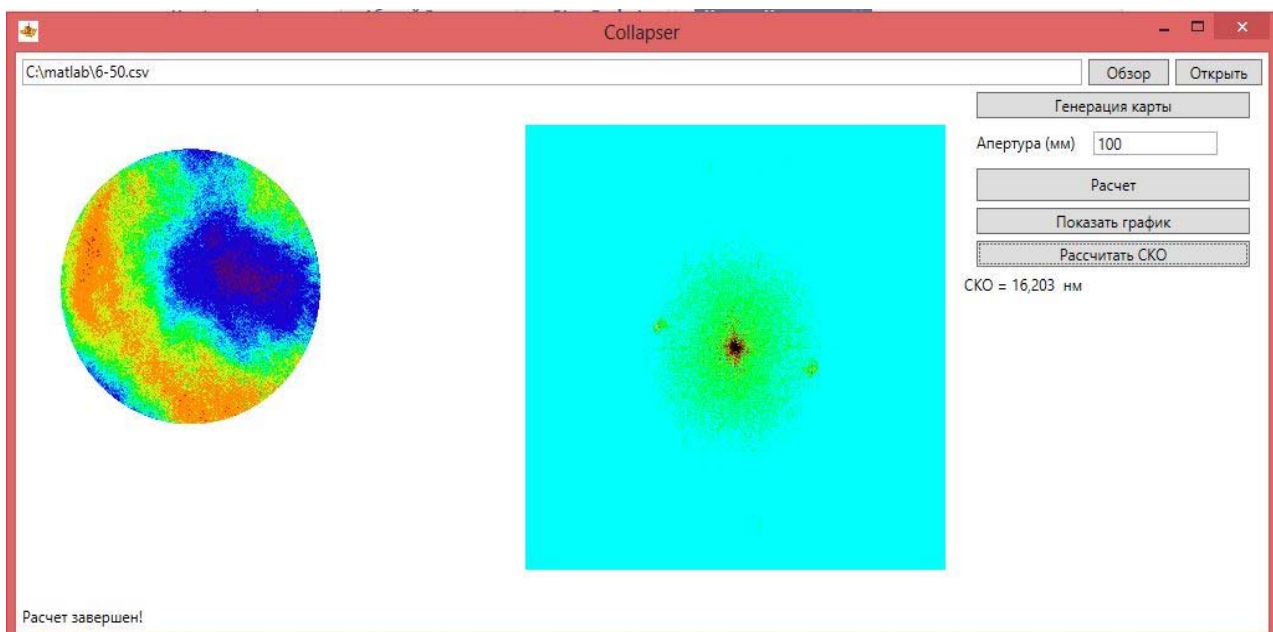


Рис. 5. Результат работы разработанного программного обеспечения: топограмма поверхности, двумерная функция СПКФ и СКО, рассчитанное по СПКФ

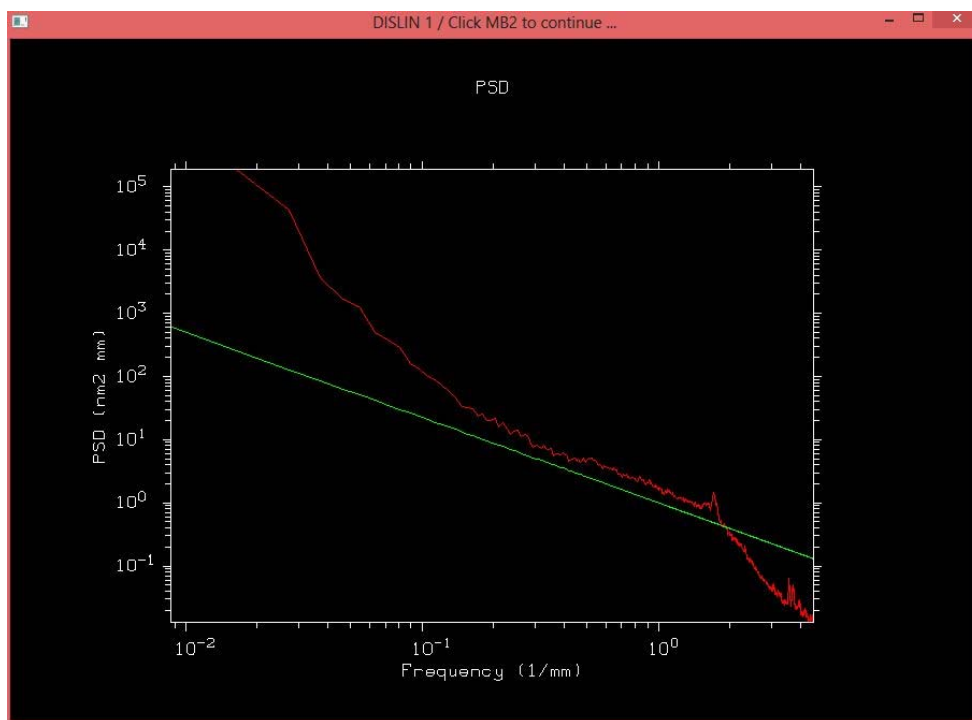


Рис. 6. Конечный результат: приведённая функция СПКФ и СКО, рассчитанное с её помощью

Как видно, значение СКО близко к тому, что было получено при эксперименте. Погрешность относительно эксперимента составляет 2,44 %.

2) Апробация с использованием математической модели. На рисунке 7 представлен результат

моделирования: в среде Matlab математически задана модель поверхности. Значение её СКО рассчитано непосредственно с использованием карты поверхности и показано под рисунком.

Видно, что значение СКО составляет 14,2963 нм.

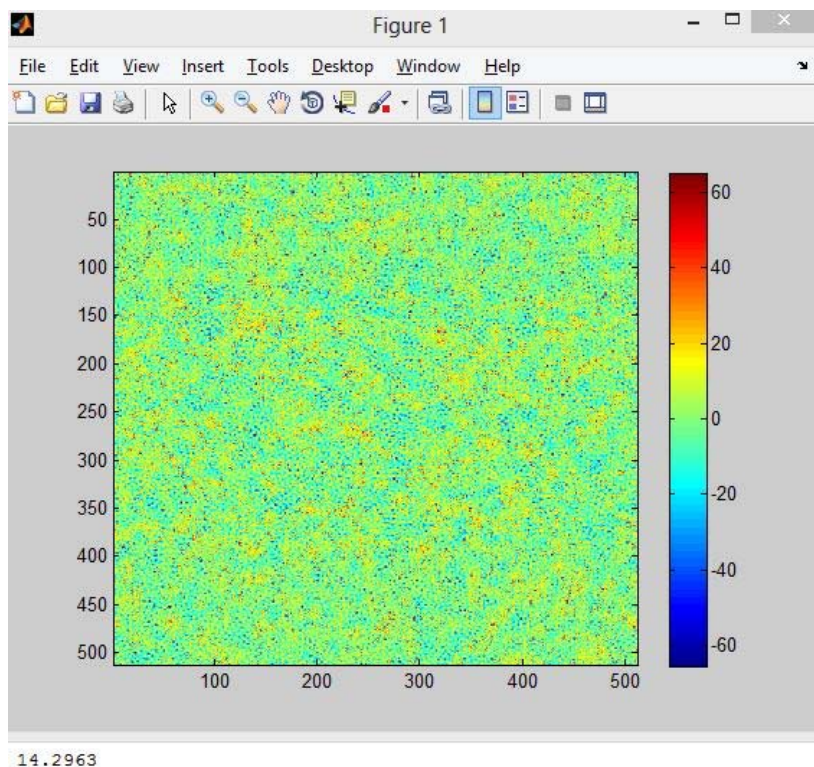


Рис. 7. Результат экспериментальных измерений

На следующих рисунках 8–9 представлен результат, полученный в разработанном программном обеспечении.

Представлена топограмма поверхности, двумерная функция СПКФ и значение СКО, рассчитанное по теореме Винера-Хинчина с использованием одномерной СПКФ. Это значение составляет 14,296 нм.

На рисунке 9 представлен конечный график. На графике красным – результат приведения СПКФ к одномерному виду.

Как видно, значение СКО близко к тому, что было получено при эксперименте. Погрешность относительно эксперимента составляет 0,03 %.

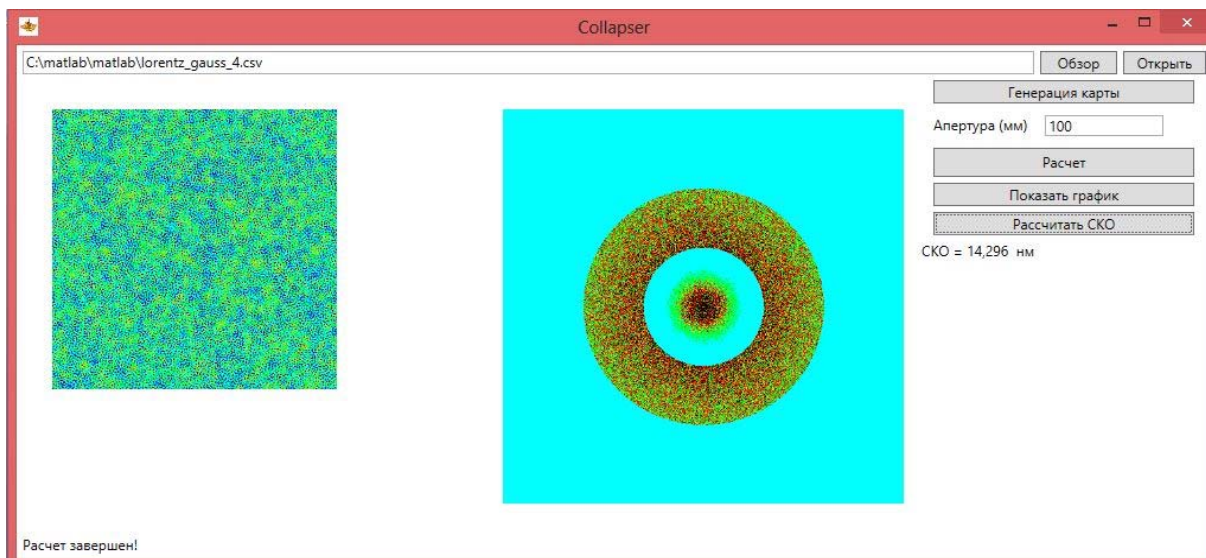


Рис. 8. Результат работы разработанного программного обеспечения: топограмма поверхности, двумерная функция СПКФ и СКО, рассчитанное по СПКФ

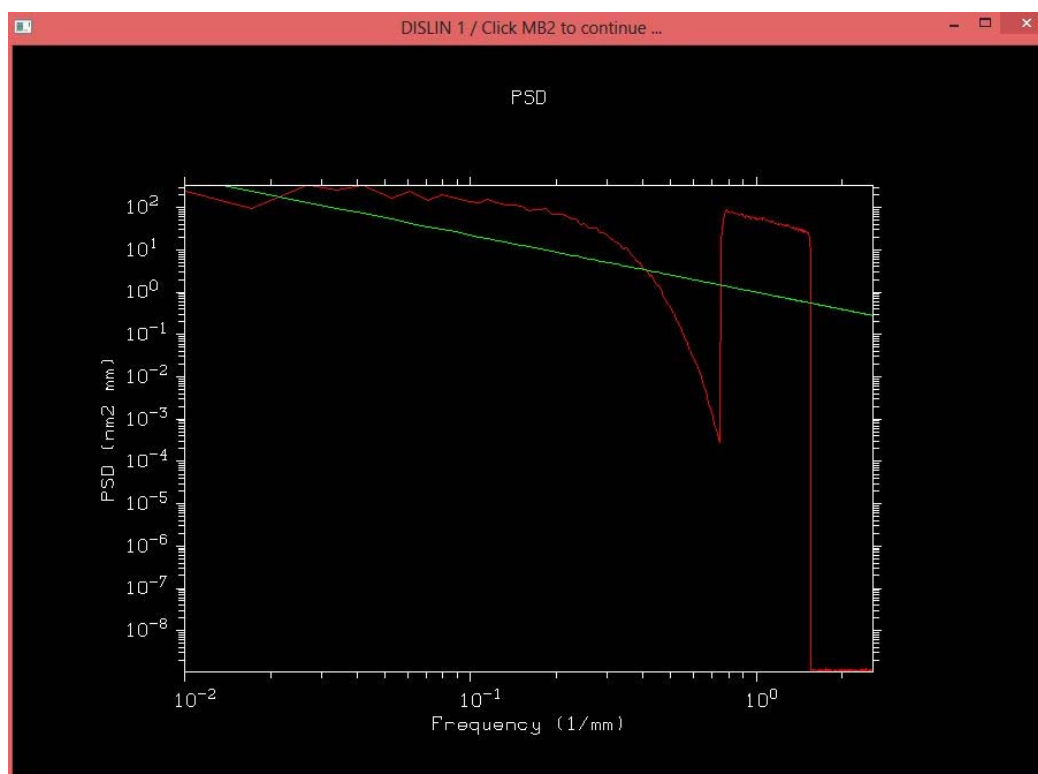


Рис. 9. Конечный результат: приведённая функция СПКФ и СКО, рассчитанное с её помощью

## 5. Оценка цехового контрольно-измерительного стенда

Проведённые исследования позволили выдвинуть критерии аттестации крупногабаритных полированных изделий и определения систематической погрешности цехового контрольно-измерительного стенда.

При задании требований к однородности элементов в первом и втором спектральных диапазонах используется критическая линия, заданная по гост ISO, и СКО набега фазы в рассматриваемом диапазоне пространственных частот. Все ампли-

тудные значения гармоник лежащих ниже критической прямой удовлетворяют критериям годности профиля изделия, а величина всех гармоник вносящих фазовые искажения расположенных выше аттестационной прямой определяет негодность изделия.

В случае контроля аттестованной эталонной оптической поверхности, площадь – определяет величину систематической ошибки стенда контроля, а значит, можно выдвинуть требования к средствам и аппаратуре измерения и выявить необходимость юстировки.

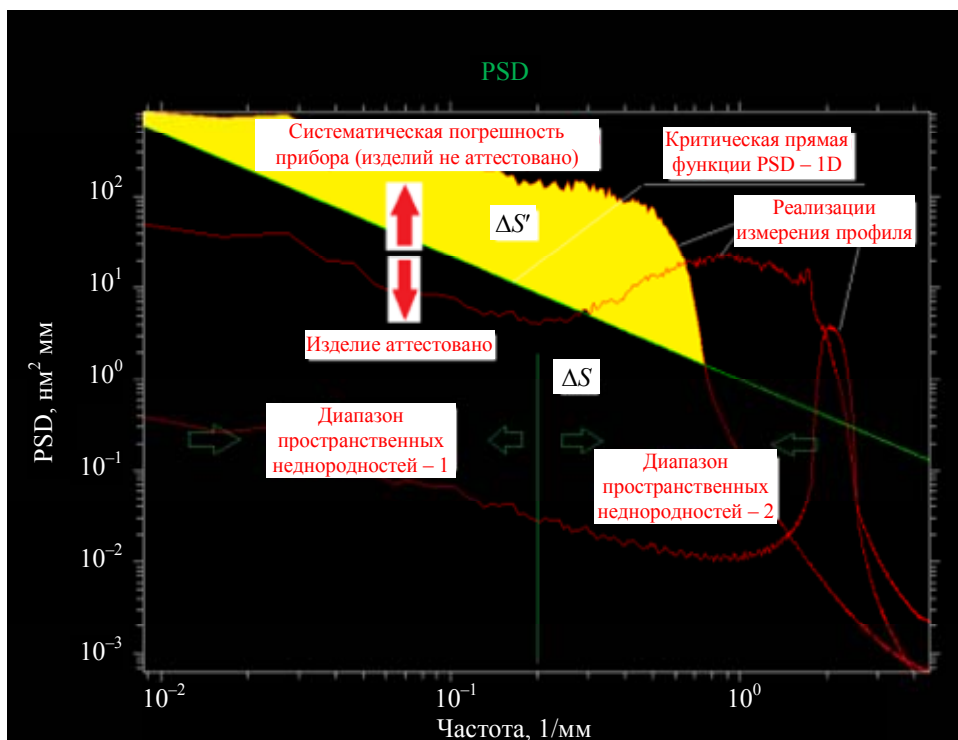


Рис. 10. График аттестации оптических изделий по данным построения одномерной функции СПКФ

## 6. Заключение

Разработаны предложения по созданию единой спецификации поверхностных неоднородностей полированных оптических поверхностей в четырёх пространственно-частотных диапазонах. Предложен алгоритм и программное обеспечение оценки пространственных неоднородностей по данным одномерной функции СПКФ. Данное программное обеспечение было апробировано на результатах экспериментальных измерений, проведённых в цеховых условиях, и показало хорошие результаты. Исследованы методические и алгоритмические погрешности метода аттестации. Разработка данного решения сделала возможным оперативный контроль крупногабаритных оптических изделий, критерием качества которых по тех-

ническому заданию является расчётная одномерная функция СПКФ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Erkin Sidick // Proc. of SPIE. 2009. Vol. 7390. DOI: 10.1117/12.823844.
2. Harvey James E., Choi Narak, Krywonos Andrey // Proc. of SPIE. 2010. Vol. 7426. DOI: 10.1117/12.831302.
3. Alcocka Simon G., Ludbrooka Geoff D., Owenb Tommy, Dockreec Richard // Proc. of SPIE. 2010. Vol. 7801. P. 102. DOI: 10.1117/12.861539.
4. Абдулкадыров М. А., Барышиников Н. В., Денисов Д. Г., Животовский И. В., Карасик В. Е., Семенов А. П., Шаров Ю. А. // Оптический журнал. 2010. № 10. С. 40.
5. Денисов Д. Г., Устюгова М. Н., Фролова В. Е., Мамошин Д. А., Гафаров И. И. // Успехи прикладной физики. 2022. Т. 10. № 1. С. 71.

## A high-precision method for attesting the shape parameters of large-sized polished flat optical products based on the calculation and analysis of the spectral density of the correlation function

*D. G. Denisov, A. A. Patrikeeva, and A. B. Morozov*

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

*Received August 26, 2022*

*The paper considers the possibility of describing medium- and fine-structured inhomogeneities of the surface profiles of large-sized optical products using the two-dimensional spectral density of the correlation function (SPCF). A method for measuring the amplitude values of spatial inhomogeneities in a wide spectral range is proposed, based on the Parseval and Wiener-Khinchin theorem, using the algorithm of reducing the two-dimensional SPCF function to a one-dimensional form. This method makes it possible to compare the measured SPCF function with the theoretically calculated one and specified in the technical specification for the manufacture of an optical part, as well as to put forward requirements for control equipment. The article presents a mathematical description of the method of reducing a two-dimensional SPKF function to a one-dimensional form of the function and proposes an algorithm of software developed for the implementation of this method of reducing the SPKF function, and its application both on mathematical models of surfaces and on the results of experimental measurements.*

*Keywords:* dynamic interferometry, surface roughness parameters, spectral density of the correlation function (Power Spectral Density), processing algorithm.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-4-411-418

### REFERENCE

1. Erkin Sidick, Proc. of SPIE **7390**, (2009). DOI: 10.1117/12.823844.
2. James E. Harvey, Narak Choi, and Andrey Krywonos, Proc. of SPIE **7426**, (2010). DOI: 10.1117/12.831302.
3. Simon G. Alcocka, Geoff D. Ludbrooka, Tommy Owenb, and Richard Dockreec, Proc. of SPIE **7801**, 102 (2010). DOI: 10.1117/12.861539.
4. M. A. Abdulkadyrov, N. V. Baryshnikov, D. G. Denisov, I. V. Zhivotovsky, V. E. Karasik, A. P. Semenov, and Yu. A. Sharov, Optical magazine, No. 10, 40 (2010).
5. D. G. Denisov, M. N. Ustyugova, V. E. Frolova, D. A. Mashoshin, and I. I. Gafarov, Usp. Prikl. Fiz. **10** (1), 71 (2022).