

Метод частичного подавления спекл-структуры при интерферометрическом контроле микронеровностей шлифованных оптических поверхностей

Д. Г. Денисов

Исследуются статистические характеристики электромагнитного поля, рассеянного контролируемыми шероховатыми (на стадиях шлифования) оптическими поверхностями, имеющими различный уровень среднего квадратичного отклонения (СКО) – σ от заданного (эталонного) профиля на различных стадиях технологической обработки. Получены и проанализированы аналитические выражения для контраста регистрируемых интерферограмм и спекл-структуры от характерного отношения контролируемой величины σ в соотношении с длиной волны интерферометрического контроля – λ . Предлагается метод частичного подавления спекл-структуры в регистрируемых изображениях, основанный на использовании пространственной фильтрации и операции усреднения по ансамблю сечений, проходящих через энергетический центр тяжести отфильтрованных изображений. Приводятся результаты экспериментальных исследований макетного образца лазерного инфракрасного (ИК) интерферометра, построенного по модифицированной функциональной схеме Тваймана–Грина, с рабочей длиной волны излучения $\lambda = 10,6$ мкм и формулируются рекомендации по выбору его элементной базы.

Ключевые слова: шероховатая оптическая поверхность, неравноплечий интерферометр Тваймана–Грина, модель фазового экрана, статистические характеристики спекл-структуры, контраст интерференционной картины, контраст спекл-структуры, цифровая фильтрация изображения.

Введение

Одним из основных методов оценки качества оптических поверхностей в процессе шлифования является интерферометрический контроль, осуществляемый с помощью интерферометров с различной конфигурацией оптических схем [1–10]. Качество изображений интерферограмм, регистрируемых на стадиях грубого и среднего шлифования [2–4, 11] оптических поверхностей, в большинстве случаев значительно ухудшается из-за присутствия различных артефактов, к которым можно отнести флуктуации потока воздушных масс, вибрации, а также наличие спекл-структуры, формируемой при интерференции дифрагированных электромагнитных волн вследствие значительной степени микрошероховатости [4, 11].

Целью данной работы является исследование возможности повышения качества интерференционных картин за счёт подавления контраста спекл-структуры [2–4, 12–16].

Постановка работы

Большинство оптических шлифованных поверхностей при интерферометрическом контроле являются сильно шероховатыми по сравнению с длиной волны подсветки. При когерентном освещении шероховатой поверхности поле отражённого излучения оказывается состоящим из вкладов от большого числа различных рассеивающих точек (или площадок), совокупность которых представляет собой нормально развитую спекл-картину [2–4, 12–16] (см. рис. 1). Изображение отражающей оптической шероховатой поверхности, освещённой когерентным излучением, представляет собой сложную гранулярную структуру, не имеющую явной связи с микроскопическими свойствами освещаемой оптической поверхности. Можно считать [4, 9, 10], что основной вклад в рассеяние вносят малые участки поверхности с

Денисов Дмитрий Геннадьевич, доцент, к.т.н.
МГТУ им. Н. Э. Баумана.
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.
E-mail: denisov_dg@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18 июля 2017 г.

© Денисов Д. Г., 2017

центрами в зеркально отражающих точках. С увеличением радиусов кривизны [4, 9, 10] микронеровностей шероховатой оптической поверхности и величины освещаемой области, число вторичных излучателей возрастает. Волна, отражённая от такой оптической шероховатой поверхности, может быть представлена в виде суперпозиции большого числа элементарных волн, отражённых от малых участков поверхности, которые можно считать независимыми рассеивающими центрами. Распространение отражённого излучения до области наблюдения приводит к тому, что в заданной точке наблюдения складываются рассеянные компоненты, причем каждая со своей фазовой задержкой. Интерференция некоторых сфазированных и когерентных волн приводит к гранулированной спекл-картине [4, 12–16] (см. рис. 1, б).

Таким образом, спеклы – это интерференционная картина нерегулярных волновых фронтов, образующаяся при падении когерентного излучения на сильно шероховатую поверхность [4, 11, 12].

Свойства лазерной пятнистой или спекл-картины зависят от способа её образования. В соответствии с введённой в [12–16] терминологией, спекл-картину, наблюдаемую или регистрируемую

на некотором расстоянии (обычно во френелевской зоне [1, 4, 12–16]) от диффузно рассеивающей оптической поверхности, называют объективной [4, 12–16], а формируемую в плоскости изображения оптической системы – субъективной [4, 12–16].

На рисунке 1, а показан процесс формирования субъективной спекл-структуры при рассеянии когерентного излучения от оптической шероховатой поверхности при её интерферометрическом контроле [1–8, 11–16]. Видно, что между лучами 1 и 2, один из которых отражается в области выступа, а другой – в области впадины микрорельефа, существует некоторая разность пройденных расстояний $\Delta r = 2h(x)\sin\gamma n$, где $h(x)$ – высота микронеровности, мкм; n – показатель преломления окружающей среды; γ – угол падения электромагнитной волны или разность хода двух соответствующих волн. В результате эти волны в точке встречи приобретут разность фаз $\Delta\varphi = 2\pi\Delta r/\lambda$, от которой зависит степень усиления или ослабления интенсивности колебаний в точке, расположенной в фокальной плоскости приёмной оптической системы интерферометра (см. рис. 1, б, в).

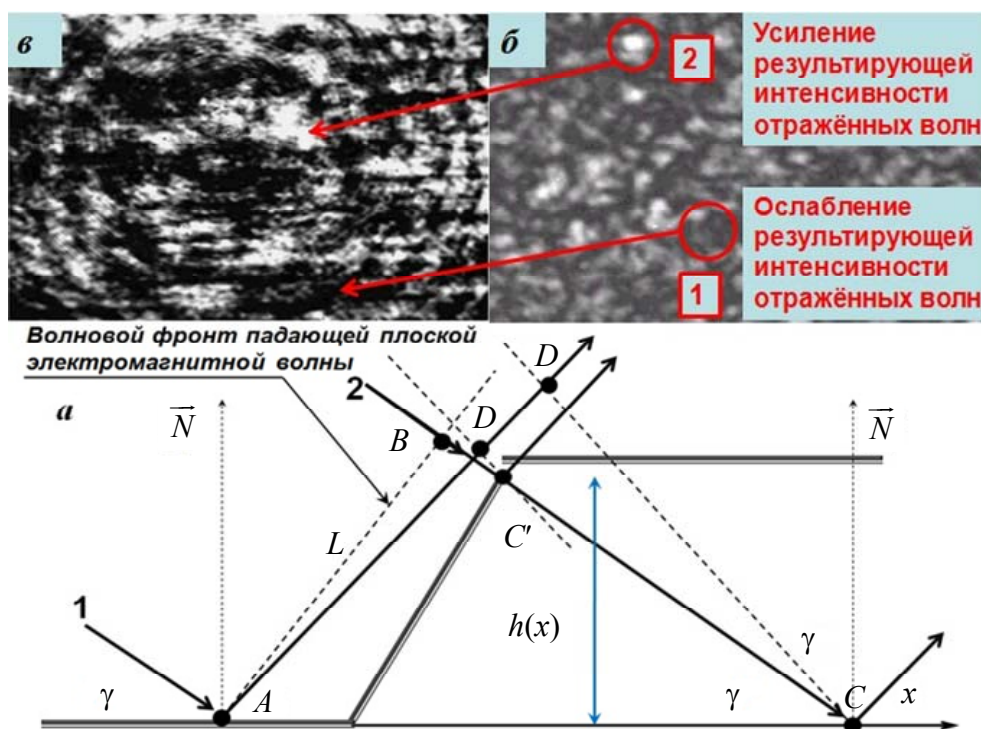


Рис. 1. Процесс образования субъективной спекл-структуры в плоскости изображения приёмного канала интерференционной системы контроля профиля шероховатой оптической поверхности: а – формирование оптической разности хода Δr между двумя лучами 1 и 2 для модели равно высотной шероховатой поверхности; б – усиления или ослабления интенсивности колебаний в точке, расположенной в фокальной плоскости приёмной оптической системы интерферометра; в – фотография видеозаписи интерференционной картины, зашумлённой спекл-структурой.

Чтобы определить вид результирующей дифракционной картины в плоскости изображения, нужно суммировать амплитудные функции рассеяния с учётом фаз. В результате суперпозиции дифракционных картин возникает очень сложная система отдельных пятен, размер наименьшего из которых равен диаметру дифракционного пятна [4, 12–16], формируемого оптической системой при освещении её точечным источником излучения. Поскольку детальная микроскопическая структура носит случайный характер, то и поле, отражённое от такой фасеточной структуры, также будет иметь случайную сложную пространственную структуру.

Интерференционная картина, формируемая при контроле шероховатой оптической поверхности, имеет также специфику, связанную с рассеянием когерентного лазерного излучения на шлифованной поверхности с определённым уровнем средних квадратичных отклонений (СКО) высот микронеровностей – σ и. как следствие, возникновением спекл-структуры, в результате чего качество интерференционного изображения ухудшается. Стоит отметить, что главным критерием степени шероховатости рассеивающей поверхности является соотношение σ/λ [4, 11, 16], которое определяет степень шероховатости поверхности и, как следствие, наличие спекл-структуры. Из рис. 1, в видно, что в изображении интерференционной картины проявляются флуктуации интенсивности в той или иной степени, обусловленные перекрытием множества сфазированных функций рассеяния. Математический анализ поля рассеянного шероховатой поверхностью проводится по ансамблю поверхностей, в результате чего к процессу формирования спекл-структуры необходимо подходить с позиции статистического анализа.

Важной характеристикой спекл-структуры, позволяющей оценивать качество интерференционного изображения, является её контраст [4, 12–16]. Под контрастом спекл-структуры, согласно [13, 15], принято понимать отношение среднеквадратичного значения флуктуаций интенсивности в спекл-структуре к среднему значению интенсивности [4, 12–16]:

$$C_S = \frac{\sigma_I}{\langle I \rangle}, \quad (1)$$

где σ_I – среднеквадратичное значение флуктуаций интенсивности; $\langle I \rangle$ – среднее значение интенсивности.

Для нахождения контраста спекл-структуры необходимо определить моменты высшего порядка поля, рассеянного шероховатой поверхностью, а именно, получить выражения для таких статистических характеристик поля, как среднеквадратичного отклонения флуктуаций интенсивности и среднего значения интенсивности. С этой целью рассмотрим процесс нахождения основных статистических характеристик спекл-структуры в изображении интерференционной картины, а также возможность уменьшения влияния спеклов на требуемый уровень контраста интерферограмм, регистрируемого при помощи ИК-интерферометра на длине волны 10,6 мкм, с учетом критерия Рэля [4, 12–16], достаточного для их последующей обработки и расшифровки [1–8, 11, 12].

Анализ статистических характеристик спекл-структуры

В большинстве практически реализуемых ситуаций микронеровности оптических шероховатых поверхностей имеют сравнительно небольшой абсолютный размер. Поэтому при рассеянии плоской монохроматической волны такой поверхностью модулируется только фаза волны, а амплитуда остаётся практически неизменной [4, 9–11]. В этом случае задача образования спекл-структуры математически может быть сведена к анализу процесса дифракции плоской монохроматической волны на безграничном фазовом экране [4, 9–11], т. е. путем введения исходного выражения для плоской волны

$$U_0(x, y, z) = \exp(-ikz), \quad (2)$$

где k – волновой вектор; z – расстояние.

Ранее было показано (1), что в качестве оценочной характеристики влияния спекл-структуры на качество интерференционного изображения целесообразно использовать контраст спекл-структуры. Для нахождения контраста спекл-структуры необходимо определить флуктуации интенсивностей (числитель выражения (1)), возникающие при отражении от случайного хаотического фазового экрана с нулевым средним, т. е. необходимо знание моментов поля высших порядков. А для нахождения среднего значения интенсивности (знаменатель выражения (1)) необходимо определить момент поля первого порядка (среднее значение) на некотором удалении Z от фазового экрана.

Запишем выражение для среднего значения интенсивности в пределах интерференционных колец (полос) $\langle I \rangle$:

$$\langle I(\bar{\rho}) \rangle = \langle U(\bar{\rho})U^*(\bar{\rho}) \rangle, \quad (3)$$

где $\bar{\rho} = x - y$ – радиус-вектор (радиус корреляции [4, 9]) между координатами точек x, y на поверх-

ности фазового экрана; $U(\bar{\rho})$ и $U^*(\bar{\rho})$ – комплексная амплитуда нормально падающей плоской электромагнитной волны, прошедшей фазовый экран, и её комплексно сопряжённая величина [4, 9–11], определены следующими соотношениями:

$$U(\bar{\rho}) = \frac{ke^{ikz}}{2\pi iz} \int U(\bar{\rho}_1) \exp\left[ik \frac{((\bar{\rho}) - (\bar{\rho}_1))^2}{2z} \right] \exp[2ikh(x, y)] d\bar{\rho}_1$$

$$U^*(\bar{\rho}) = -\frac{ke^{ikz}}{2\pi iz} \int U^*(\bar{\rho}_2) \exp\left[ik \frac{((\bar{\rho}) - (\bar{\rho}_2))^2}{2z} \right] \exp[2ikh^*(x, y)] d\bar{\rho}_2. \quad (4)$$

В итоге выражение для среднего значения интенсивности (3) имеет вид:

$$\langle I(\bar{\rho}) \rangle = \langle U(\bar{\rho})U^*(\bar{\rho}) \rangle = \frac{k^2}{(2\pi z)^2} \iint U(\bar{\rho}'_1)U^*(\bar{\rho}'_2) \exp\left\{ \frac{ik}{2z} \left[2\bar{\rho}(\bar{\rho}'_2 - \bar{\rho}'_1) + ((\bar{\rho}'_1)^2 - (\bar{\rho}'_2)^2) \right] \right\} \times$$

$$\times \exp\left[2ik(h(x, y) + h^*(x, y)) \right] d\bar{\rho}'_1 d\bar{\rho}'_2. \quad (5)$$

Следует подчеркнуть, что среднее значение интенсивности $\langle I(\bar{\rho}) \rangle$, так же как и функция когерентности, остаются неизменными при удалении от плоскости $Z = 0$ для статистически однородного фазового экрана и плоской падающей волны [4, 9–11].

Для нахождения среднеквадратичного значения флуктуаций интенсивности σ_I (числителя (1)) в спекл-структуре необходимо перейти от анализа момента поля первого порядка (5) (т. е. среднего поля) к рассмотрению моментов поля четвёртого порядка, точнее говоря, к рассмотрению корреляционной функции четвёртого порядка [4, 9–11].

По определению корреляционная (автокорреляционная) функция комплексного поля $h(r) = X(r) + iY(r)$ записывается в виде:

$$\psi_h(r_1, r_2) \equiv \langle h(r_1)h^*(r_2) \rangle =$$

$$= \langle h(r_1)h^*(r_2) \rangle - \langle h(r_1) \rangle \langle h^*(r_2) \rangle. \quad (6)$$

Положив $r_1 = r_2 = r$, получим дисперсию в точке r :

$$\sigma_h^2(r) \equiv \langle |h(r)|^2 \rangle = \sigma_X^2 + \sigma_Y^2. \quad (7)$$

Запишем выражение для корреляционной функции флуктуаций интенсивности при дифракции плоской волны на бесконечном плоском хаотическом фазовом экране. Этот случай полностью аналогичен картине дифракции плоской волны на плоском (в среднем плоском) объекте при её нормальном падении на объект (поверхность, контролируемой оптической детали). В этом случае фазовая модуляция падающей волны хаотичным фазовым экраном эквивалентна модуляции излучения за счёт вариации набегов фаз при прохождении излучения в углубления микронеровностей профиля контролируемой оптической детали.

Тогда для корреляционной функции флуктуаций интенсивности можно записать согласно [4, 9–11]

$$\psi_I(\bar{\rho}) = \langle I(\bar{\rho}_1)I(\bar{\rho}_2) \rangle =$$

$$= \langle U(\bar{\rho}_1)U^*(\bar{\rho}_1)U(\bar{\rho}_2)U^*(\bar{\rho}_2) \rangle, \quad (8)$$

где $U(\bar{\rho})$ – поле, рассеянное шероховатой поверхностью, при нормальном падении на неё плоской электромагнитной волны, причем в приближении Френеля [1, 4, 9–11] совпадающее с выражением для поля волны, прошедшей случайный фазовый экран.

Используя (8), запишем выражения для комплексно сопряжённых полей:

$$\left\{ \begin{aligned} U(\bar{\rho}_1) &= \frac{k \exp(ikz)}{2\pi iz} \int_{-\infty}^{\infty} U(\bar{\rho}'_1) \exp \left[\frac{ik(\bar{\rho}_1 - \bar{\rho}'_1)^2}{2z} + ih(\bar{\rho}_1, \bar{\rho}'_1) \right] d\bar{\rho}'_1 \\ U^*(\bar{\rho}_1) &= \frac{k \exp(-ikz)}{-2\pi iz} \int_{-\infty}^{\infty} U(\bar{\rho}'_2) \exp \left[\frac{-ik(\bar{\rho}_1 - \bar{\rho}'_2)^2}{2z} + ih^*(\bar{\rho}_1, \bar{\rho}'_2) \right] d\bar{\rho}'_2 \\ U(\bar{\rho}_2) &= \frac{k \exp(ikz)}{2\pi iz} \int_{-\infty}^{\infty} U(\bar{\rho}'_3) \exp \left[\frac{ik(\bar{\rho}_2 - \bar{\rho}'_3)^2}{2z} + ih(\bar{\rho}_2, \bar{\rho}'_3) \right] d\bar{\rho}'_3 \\ U^*(\bar{\rho}_2) &= \frac{k \exp(-ikz)}{-2\pi iz} \int_{-\infty}^{\infty} U(\bar{\rho}'_4) \exp \left[\frac{-ik(\bar{\rho}_2 - \bar{\rho}'_4)^2}{2z} + ih^*(\bar{\rho}_2, \bar{\rho}'_4) \right] d\bar{\rho}'_4 \end{aligned} \right. \quad (9)$$

Тогда, подставив (9) в (8), получим

$$\begin{aligned} \psi_I(\bar{\rho}) &= \langle I(\bar{\rho}_1)I(\bar{\rho}_2) \rangle = \left(\frac{k}{2\pi z} \right)^4 \int_{-\infty}^{\infty} \int \int \int \langle U(\bar{\rho}'_1)U^*(\bar{\rho}'_2)U(\bar{\rho}'_3)U^*(\bar{\rho}'_4) \rangle \times \\ &\times \exp \left\{ \frac{ik}{2z} \left[2\bar{\rho}_1(\bar{\rho}'_2 - \bar{\rho}'_1) + 2\bar{\rho}_2(\bar{\rho}'_4 - \bar{\rho}'_3) + (\bar{\rho}'_1{}^2 - \bar{\rho}'_2{}^2) + (\bar{\rho}'_3{}^2 - \bar{\rho}'_4{}^2) \right] \right\} \times \\ &\times \left[\exp i \left\{ h(\bar{\rho}_1, \bar{\rho}'_1) + h^*(\bar{\rho}_1, \bar{\rho}'_2) + h(\bar{\rho}_2, \bar{\rho}'_3) + h^*(\bar{\rho}_2, \bar{\rho}'_4) \right\} \right] d\bar{\rho}'_1 d\bar{\rho}'_2 d\bar{\rho}'_3 d\bar{\rho}'_4. \end{aligned} \quad (10)$$

Для стационарного процесса ($\bar{\rho}_1 = \bar{\rho}_2 = 0$ в (10)), дисперсия флуктуаций интенсивности, будет определяться следующим выражением [4, 9–11]

$$\begin{aligned} \sigma_I^2 &= \left(\frac{k}{2\pi z} \right)^4 \int_{-\infty}^{\infty} \int \int \int \langle U(\bar{\rho}'_1)U^*(\bar{\rho}'_2)U(\bar{\rho}'_3)U^*(\bar{\rho}'_4) \rangle \times \exp \left\{ \frac{ik}{2z} \left[(\bar{\rho}'_1{}^2 - \bar{\rho}'_2{}^2) + (\bar{\rho}'_3{}^2 - \bar{\rho}'_4{}^2) \right] \right\} \times \\ &\times \left[\exp i \left\{ h(\bar{\rho}_1, \bar{\rho}'_1) + h^*(\bar{\rho}_1, \bar{\rho}'_2) + h(\bar{\rho}_2, \bar{\rho}'_3) + h^*(\bar{\rho}_2, \bar{\rho}'_4) \right\} \right] d\bar{\rho}'_1 d\bar{\rho}'_2 d\bar{\rho}'_3 d\bar{\rho}'_4. \end{aligned} \quad (11)$$

Выражение для контраста спекл-структуры (1) с учётом полученных выражений для среднего значения интенсивности в пределах интерференционных колец (полос) (5) и дисперсии флуктуаций интенсивности (11), принимает следующий вид

$$\begin{aligned} C_S = \frac{\sigma_I}{\langle I \rangle} &= \frac{\sqrt{\left(\frac{k}{2\pi z} \right)^4 \int_{-\infty}^{\infty} \int \int \int \langle U(\bar{\rho}'_1)U^*(\bar{\rho}'_2)U(\bar{\rho}'_3)U^*(\bar{\rho}'_4) \rangle \times \exp \left\{ \frac{ik}{2z} \left[(\bar{\rho}'_1{}^2 - \bar{\rho}'_2{}^2) + (\bar{\rho}'_3{}^2 - \bar{\rho}'_4{}^2) \right] \right\} \times}}{\frac{k^2}{(2\pi z)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int U(\bar{\rho}'_1)U^*(\bar{\rho}'_2) \exp \left\{ \frac{ik}{2z} \left[2\bar{\rho}'_2(\bar{\rho}'_2 - \bar{\rho}'_1) + \left((\bar{\rho}'_1)^2 - (\bar{\rho}'_2)^2 \right) \right] \right\}} \times \\ &\times \frac{\sqrt{\left[\exp i \left\{ h(\bar{\rho}_1, \bar{\rho}'_1) + h^*(\bar{\rho}_1, \bar{\rho}'_2) + h(\bar{\rho}_2, \bar{\rho}'_3) + h^*(\bar{\rho}_2, \bar{\rho}'_4) \right\} \right] d\bar{\rho}'_1 d\bar{\rho}'_2 d\bar{\rho}'_3 d\bar{\rho}'_4}}{\exp \left[2ik \left(h(x, y) + h^*(x, y) \right) \right] d\bar{\rho}'_1 d\bar{\rho}'_2}. \end{aligned} \quad (12)$$

Для вычисления контраста по (12) заметим, что согласно [4, 9–11] в случае падения плоской монохроматической волны единичной амплитуды на неоднородную среду, функцию когерентности четвёртого порядка можно записать в виде:

$$\Gamma_4 = \langle U(\bar{\rho}'_1)U^*(\bar{\rho}'_2)U(\bar{\rho}'_3)U^*(\bar{\rho}'_4) \rangle = 1. \quad (13)$$

Тогда выражение для дисперсии флуктуаций интенсивности (11) несколько упрощается

$$\sigma_I^2 = \left(\frac{k}{2\pi z}\right)^4 \int_{-\infty}^{\infty} \int \int \int \exp\left\{\frac{ik}{2z}\left[(\bar{\rho}_1^2 - \bar{\rho}_2^2) + (\bar{\rho}_3^2 - \bar{\rho}_4^2)\right]\right\} \times \\ \times \left[\exp i\left\{h(\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_1') + h^*(\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_2') + h(\bar{\rho}_2, \bar{\rho}_3') + h^*(\bar{\rho}_2, \bar{\rho}_4')\right\}\right] d\bar{\rho}_1' d\bar{\rho}_2' d\bar{\rho}_3' d\bar{\rho}_4'. \quad (14)$$

Аналогично условию (13) можно записать выражение для среднего значения интенсивности поля на фазовом экране $z = 0$ (в среднем плоском фазовом экране) [4, 9–11]:

$$\langle I(\bar{\rho}) \rangle = \langle U(\bar{\rho})U^*(\bar{\rho}) \rangle = |\exp(ikz)|^2 = 1. \quad (15)$$

Условие (15) соответствует непоглощающим экранам. Согласно [4, 9–11] падающая волна $U_0(x, y, z) = \exp(-ikz)$ единичной интенсивности (15) порождает за экраном волну с той же средней интенсивностью.

Тогда, выражение для среднего значения интенсивности поля, отражённого от случайного фазового экрана, при падении плоской монохроматической волны единичной амплитуды, примет вид

$$\langle I(\bar{\rho}) \rangle = \langle U(\bar{\rho})U^*(\bar{\rho}) \rangle = \frac{k^2}{(2\pi z)^2} \int \int U(\bar{\rho}_1')U^*(\bar{\rho}_2') \exp\left\{\frac{ik}{2z}\left[2\bar{\rho}\left(\bar{\rho}_2' - \bar{\rho}_1'\right) + \left(\left(\bar{\rho}_1'\right)^2 - \left(\bar{\rho}_2'\right)^2\right)\right]\right\} \times \\ \times \exp\left[2ik\left(h(x, y) + h^*(x, y)\right)\right] d\bar{\rho}_1' d\bar{\rho}_2' = 1. \quad (16)$$

Выражение для контраста спекл-структуры, с учётом введённых допущений (13), (16), запишется в виде

$$C_S = \frac{\sigma_I}{\langle I \rangle} = \sigma_I = \left(\frac{k}{2\pi z}\right)^2 \sqrt{\int \int \int \int \exp\left\{\frac{ik}{2z}\left[(\bar{\rho}_1^2 - \bar{\rho}_2^2) + (\bar{\rho}_3^2 - \bar{\rho}_4^2)\right]\right\} \times \\ \times \sqrt{\left[\exp i\left\{h(\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_1') + h^*(\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_2') + h(\bar{\rho}_2, \bar{\rho}_3') + h^*(\bar{\rho}_2, \bar{\rho}_4')\right\}\right]} d\bar{\rho}_1' d\bar{\rho}_2' d\bar{\rho}_3' d\bar{\rho}_4'}. \quad (17)$$

Тем не менее, в общем случае получить аналитическое решение для вычисления контраста спекл-структуры (17) не удаётся, поскольку необходимо знание вероятностного распределения неоднородностей (параметров шероховатости) на поверхности случайного фазового экрана. Поэтому необходимо заранее принять определённую статистику распределения флуктуаций фазы.

На основании центральной предельной теоремы, статистика рассеянного поля будет гауссовой, если поле есть результат когерентного сложения многих компонент с независимыми случайными фазами [4, 9–11, 13–16]. Данное утверждение справедливо для исследуемых оптических шероховатых поверхностей. Для дополнительного обоснования этого утверждения был проведён статический анализ распределений плотностей вероятностей высот микронеровностей на оптических шероховатых поверхностях, обра-

ботанных абразивными порошками различной фракции [2–4, 11] (см. рис. 2).

Указанные на рисунках 2, а, б распределения графически хорошо согласуются с известным нормальным (гауссовым) распределением [9, 10, 13–16]. В этом случае, корреляционная функция интенсивности определится выражением из [4, 9–11]:

$$\psi_I(\bar{\rho}) = \exp(-2\sigma_\Phi^2) \left\{ \exp[2\psi_\Phi(\bar{\rho}) - 1] \right\}, \quad (18)$$

где $\psi_I(\bar{\rho})$ – корреляционная функция интенсивности; $\psi_\Phi(\bar{\rho})$ – корреляционная функция фазовых флуктуаций; σ_Φ^2 – дисперсия флуктуаций фазы.

Тогда контраст спекл-структуры (17) имеет вид

$$C_s = \sqrt{1 - \exp(-2\sigma_\Phi^2)}, \quad (19)$$

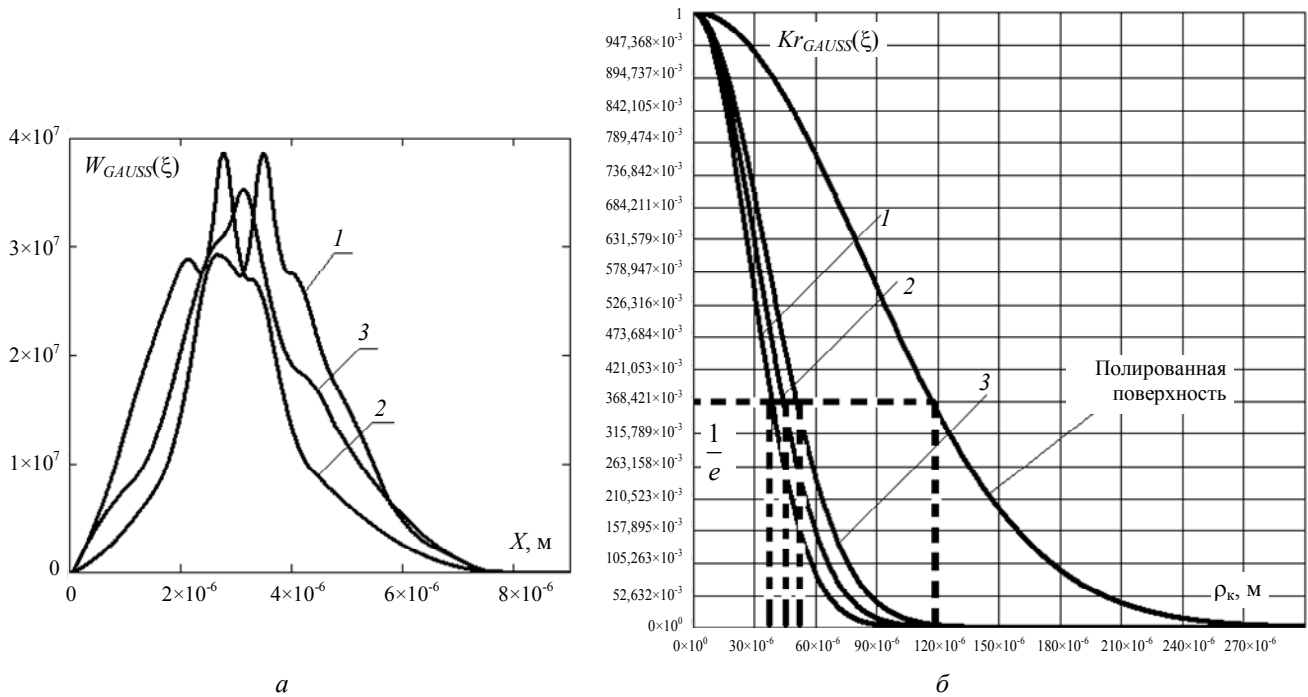


Рис. 2. Результаты статистического анализа. а) – распределения высот микронеровностей контролируемых шероховатых поверхностей: кривая 1 – обработанная абразивным микропорошком М40, 2 – обработанная абразивным микропорошком М28, 3 – обработанная абразивным шлиф. порошком № 4; б) – корреляционных функций с соответствующими индексами.

Принимая во внимание связь [4, 9–11] между дисперсиями флуктуаций фазы σ_ϕ^2 и дисперсии флуктуаций высот микронеровностей σ_h^2 , выра-

жение для контраста спекл-структуры (19) при условии монохроматичности излучения преобразуется к виду:

$$C_S = \frac{\sigma_I}{\langle I \rangle} = \sqrt{1 - \exp\left(-2\left(\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2 \sigma_h^2\right)\right)} = \sqrt{1 - \exp\left\{-\frac{32\pi^2}{\lambda^2} \sigma_h^2\right\}}. \quad (20)$$

На рис. 3 показана графическая зависимость величины контраста спекл-структуры от отношения СКО величин высот микронеровностей к длине волны лазерного излучения, построенная в соответствии с формулой (20).

Данные о СКО рассмотренные при дальнейшем анализе (см. табл. 1) были получены в результате проведенных экспериментальных измерений при помощи разработанного лазерного ИК-интерферометра [4, 11], успешно апробированного в производственных условиях как для контроля формы оптических шлифованных поверхностей [1–3], так и для определения величины их микрошероховатостей [4, 11].

Анализ графика, представленного на рис. 3, показывает, что с увеличением характерного отношения σ_h / λ (на стадиях средне-грубого (абразивный шлифпорошок М40, $\sigma_h / \lambda = 0,08$) и грубого (абразивный шлифпорошок № 4, $\sigma_h / \lambda = 0,14$) шлифований) при фиксированной длине волны рабочего излучения $\lambda = 10,6$ мкм, происходит разрушение пространственной когерентности рассеянного излучения, что, в свою очередь, приводит к резкому возрастанию контраста спекл-структуры.

Несмотря на это, контраст интерференционной картины, рассчитанный в соответствии с [4, 11],

$$C = \frac{\langle I(x, y)_{\max} \rangle - \langle I(x, y)_{\min} \rangle}{\langle I(x, y)_{\max} \rangle + \langle I(x, y)_{\min} \rangle} = \exp\left(-8\pi^2 \left(\frac{\sigma_h}{\lambda}\right)^2\right), \quad (21)$$

достигает уровня 0,3–0,5. В приведенном выражении использованы следующие величины: $\langle I(x, y)_{\max} \rangle$ и $\langle I(x, y)_{\min} \rangle$ – максимальное и минимальное средние значения распределения интенсивности в интерференционных кольцах в

плоскости наблюдения; σ_h – СКО высотного параметра на оптической шероховатой поверхности; λ – длина волны лазерного излучения; $\langle \rangle$ – статистическое усреднение по ансамблю поверхностей одного класса.

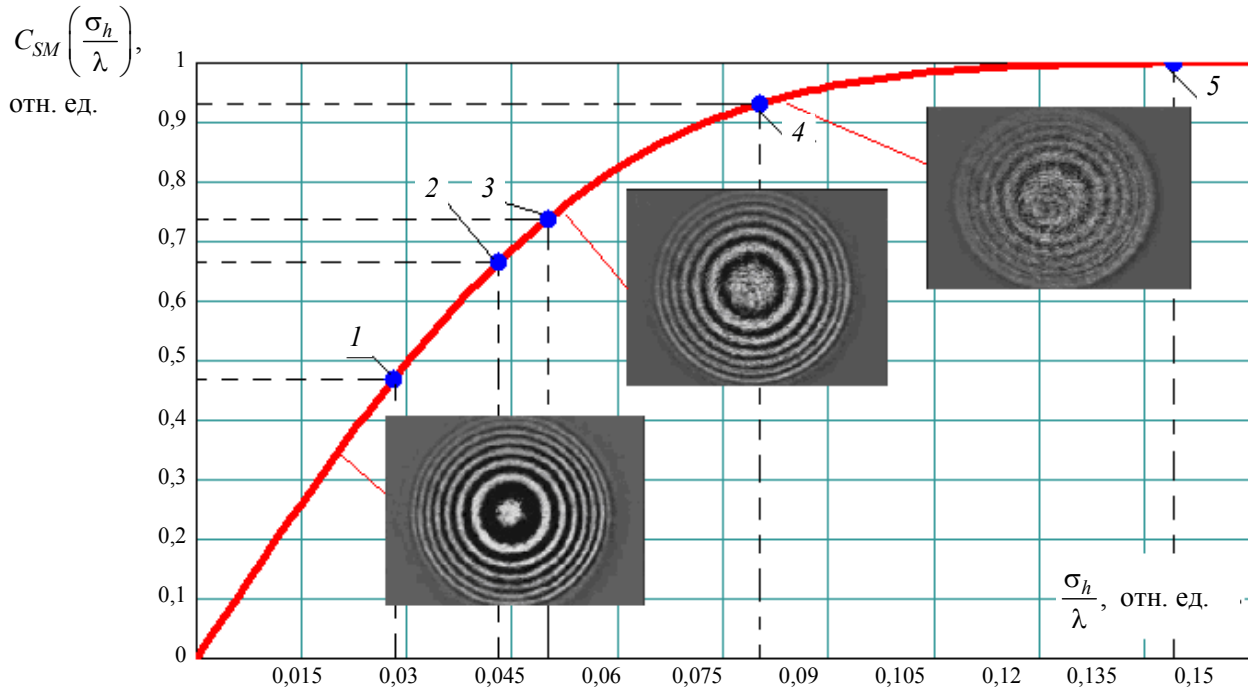


Рис. 3. График зависимости контраста спекл-структуры в интерференционной картине от параметра σ_h/λ (для нормального распределения СКО высот микронеровности шероховатой поверхности, обработанной: 1) полиритом; 2) абразивным порошком M10; 3) абразивным порошком M28 ($\sigma_h/\lambda \approx 0,05$; $C_S(\sigma_h/\lambda) \approx 0,7$); 4) абразивным порошком M40 ($\sigma_h/\lambda \approx 0,08$; $C_S(\sigma_h/\lambda) \approx 0,9$); 5) абразивным порошком № 4 ($\sigma_h/\lambda \approx 0,14$; $C_S(\sigma_h/\lambda) \approx 0,999$).

Обработка и расшифровка интерферограмм

Достигнутый уровень контраста интерференционной картины 0,3–0,5 уже достаточен для обработки и расшифровки интерферограмм (см. рис. 4). Это означает, что уже на стадии средне-грубого шлифования можно начинать процесс интерференционного контроля.

Анализ графиков, представленных на рис. 3 и 4, показывает, что с увеличением характерного отношения σ_h/λ (при фиксированной длине волны интерферометрического контроля $\lambda = 10,6$ мкм)

происходит разрушение пространственной когерентности рассеянного излучения, что, в свою очередь, приводит к резкому возрастанию контраста спекл-структуры. При уменьшении размера абразивного шлифующего порошка, т. е. при переходе от стадии грубого к стадии тонкого шлифования, контраст спекл-структуры уменьшается, а качество интерференционного изображения улучшается. В табл. 1 показано влияние СКО высот микронеровностей контролируемых оптических шлифованных поверхностей, определяемых размерами средней фракции абразивных порошков, на контраст спекл-структуры.

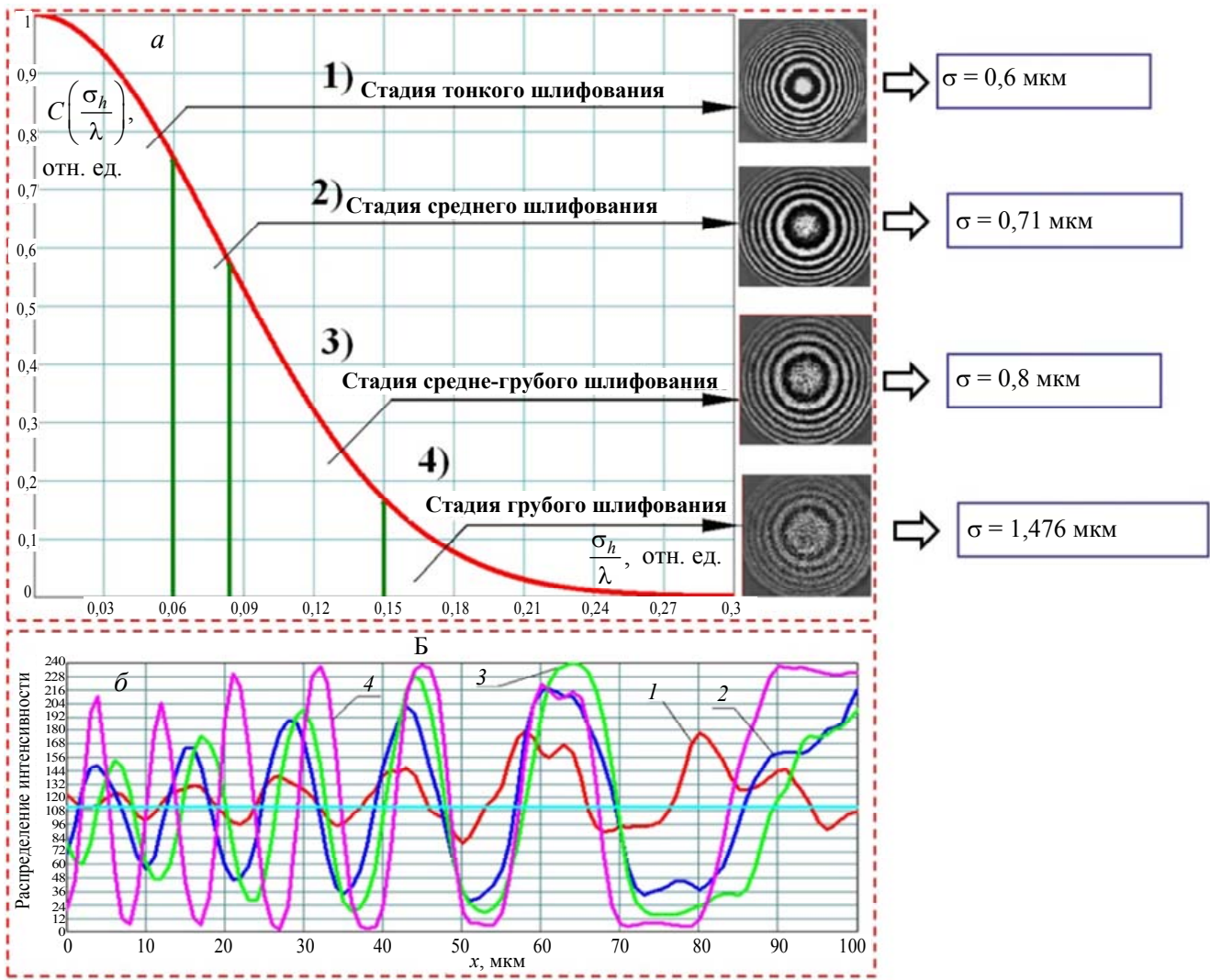


Рис. 4. Результаты анализа. а) – контраст видеоизображения интерференционных колец (для нормального распределения СКО высот микронеровностей); б) – экспериментальные распределения интенсивностей в интерференционной картине в зависимости от влияния среднеквадратичных отклонений высот микронеровностей шлифованных поверхностей: кривая 1 – абразивный шлиф. порошок № 4, 2 – абразивный микропорошок М40, 3 – абразивный микропорошок М28, 4 – полирит.

Таблица 1

Влияние среднего размера зерна шлифующего абразивного порошка на контраст спекл-структуры и видность интерференционного изображения

№	Группа шлиф. порошков (микропорошков)	Средний размер зерна, мкм	R_a , мкм	$\sigma_h = Ra$, мкм	$C_S\left(\frac{\sigma_{h=Ra}}{\lambda}\right)$, отн. ед.	$C\left(\frac{\sigma_{h=Ra}}{\lambda}\right)$, отн. ед.
Стадия грубого шлифования						
1	№ 4	47	1,664	1,49	0,999	0,216
Стадия средне-грубого шлифования						
2	M40	32	1,106	0,9	0,9	0,634
Стадия среднего шлифования						
3	M28	18	1,077	0,8	0,7	0,8
Стадия полирования						
4	Полирит	≈ 0,5	0,004	< 0,1	0,4	0,93

Здесь $C_S\left(\frac{\sigma_{h=Ra}}{\lambda}\right)$ – контраст спекл-структуры в интерференционной картине; $C\left(\frac{\sigma_{h=Ra}}{\lambda}\right)$ – контраст интерференционного изображения.

Представленные в табл. 1 результаты на основе построенных графических зависимостей (см. рис. 3, 4), позволяют сделать вывод о том, что качество получаемых изображений интерференционных картин на стадиях грубого и среднего шлифований ухудшается в результате разрушения пространственной когерентности рассеянного электромагнитного излучения и, как следствие, образования спекл-структуры в изображениях. Таким образом, качество изображений интерферограмм, получаемых при контроле оптических поверхностей на этих стадиях шлифования, требует специальных мер обеспечивающих уменьшение контраста спекл-структур и повышения отношения сигнал/шум [4, 13] в регистрируемом изображении.

Полученные результаты позволяют перейти к задаче исследования возможностей уменьшения влияния спекл-структуры (спекл-шума) [4, 13, 16] на качество формируемого изображения в интерферометрической системе контроля шлифованных оптических поверхностей.

Исследование возможности повышения качества изображения интерференционных картин за счёт частичного подавления спекл-шума

Повышение качества интерференционных изображений может быть достигнуто с помощью методов и программных средств подавления спекл-шумов в интерферограммах на этапе их предварительно обработки [4, 13]. Одно из возможных решений данной проблемы рассматривается далее в данной работе. Для повышения качества изображений интерферограмм предложен метод, основанный на частичном подавлении спекл-структуры в изображении и реализующий 4-этапный алгоритм цифровой обработки изображений, а именно: формирование спектра изображения, его пространственно-частотная фильтрация, восстановление отфильтрованного изображения, усреднение по ансамблю сечений, проходящих через энергетический центр тяжести отфильтрованного изображения. Данный алгоритм подавления спекл-структуры схематически отображен на рис. 5.

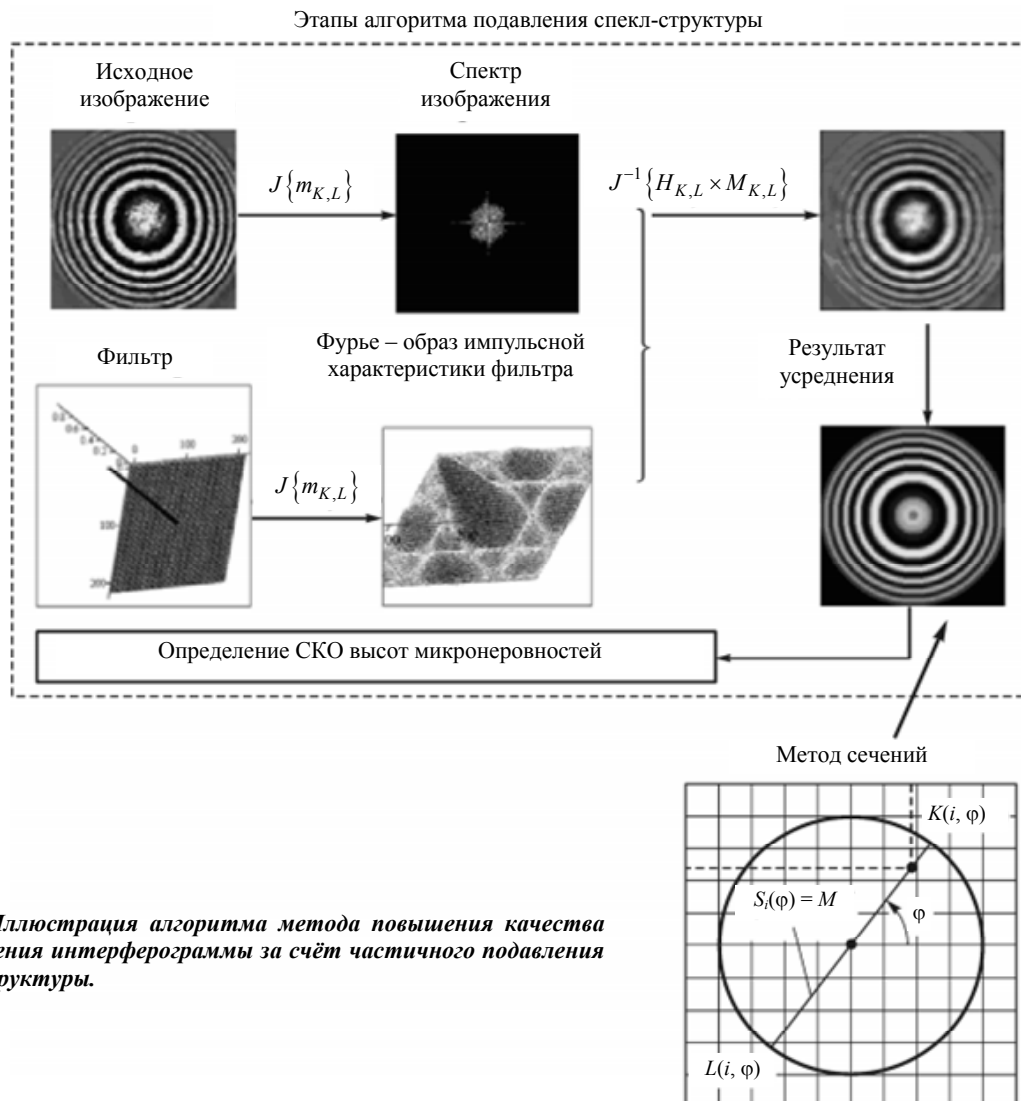


Рис. 5. Иллюстрация алгоритма метода повышения качества изображения интерферограммы за счёт частичного подавления спекл-структуры.

На первом этапе предложенного метода после регистрации изображения интерференционной картины осуществляется дискретное Фурье-преобразование центрированного изображения интерферограммы. Далее следует операция дискретизации импульсной функции (функции оконного фильтра) и перемножение Фурье-образов изображения интерферограммы и фильтрующего окна, после чего осуществляется операция обратного Фурье-преобразования и выделение вещественной части в сформированной матрице изображения.

Фильтрация в пространственно-частотной области приводит к сглаживанию спекл-структуры в изображении интерференционной картины (см. рис. 5), однако её контраст заметно понижается. Для повышения контраста осуществляется усреднение интенсивности отфильтрованной интерференционной картины по сечениям, проходящим через её энергетический центр тяжести.

Выполнение условия эргодичности [4, 9–11] позволяет заменить статистическое усреднение интерференционных картин, полученных от шероховатых (шлифованных) поверхностей одного класса, статистическим усреднением по сечениям в интерференционной картине, полученной от одной шероховатой поверхности.

Применение алгоритма

В нашем случае усреднение средних значений интенсивностей в пределах интерференционных колец каждой интерферограммы проводилось по 50 центральным сечениям, проходящим через их

энергетический центр тяжести (см. рис. 5). В результате контраст полученных интерферограмм повышался с 0,3 до 0,5, а контраст спекл-структуры уменьшался до 0,3.

Результаты данного метода усреднения последовательно показаны в табл. 2, 3 и 4 для трёх интерференционных картин, полученных на трёх характерных поверхностях, соответствующих стадиям грубого, средне-грубого и среднего шлифования. Вид зарегистрированных интерферограмм представлен в левой части каждой таблицы, на изображениях которых отчётливо виден спекл-шум, обусловленный случайным характером распределения микронеровностей оптической поверхности. В правой части каждой таблицы показан вид тех же интерферограмм после цифровой обработки.

Экспериментальная проверка основных результатов предложенного алгоритма проводилась на разработанном на кафедре «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н. Э. Баумана опытном образце неравноплечного лазерного ИК-интерферометре Тваймана–Грина, работающем на длине волны 10,6 мкм и испытанном в цеховых условиях.

В табл. 5 показан результат проведённого анализа сглаживания пространственной спекл-структуры в изображениях интерференционных картин, представленных в табл. 2–4 для оптических поверхностей, обработанных на трёх характерных стадиях шлифования. Отражено также влияние размеров симметричного фильтра размером a_x на изменение контраста интерферограмм.

Таблица 2

Результаты метода сечений для стадии грубого шлифования

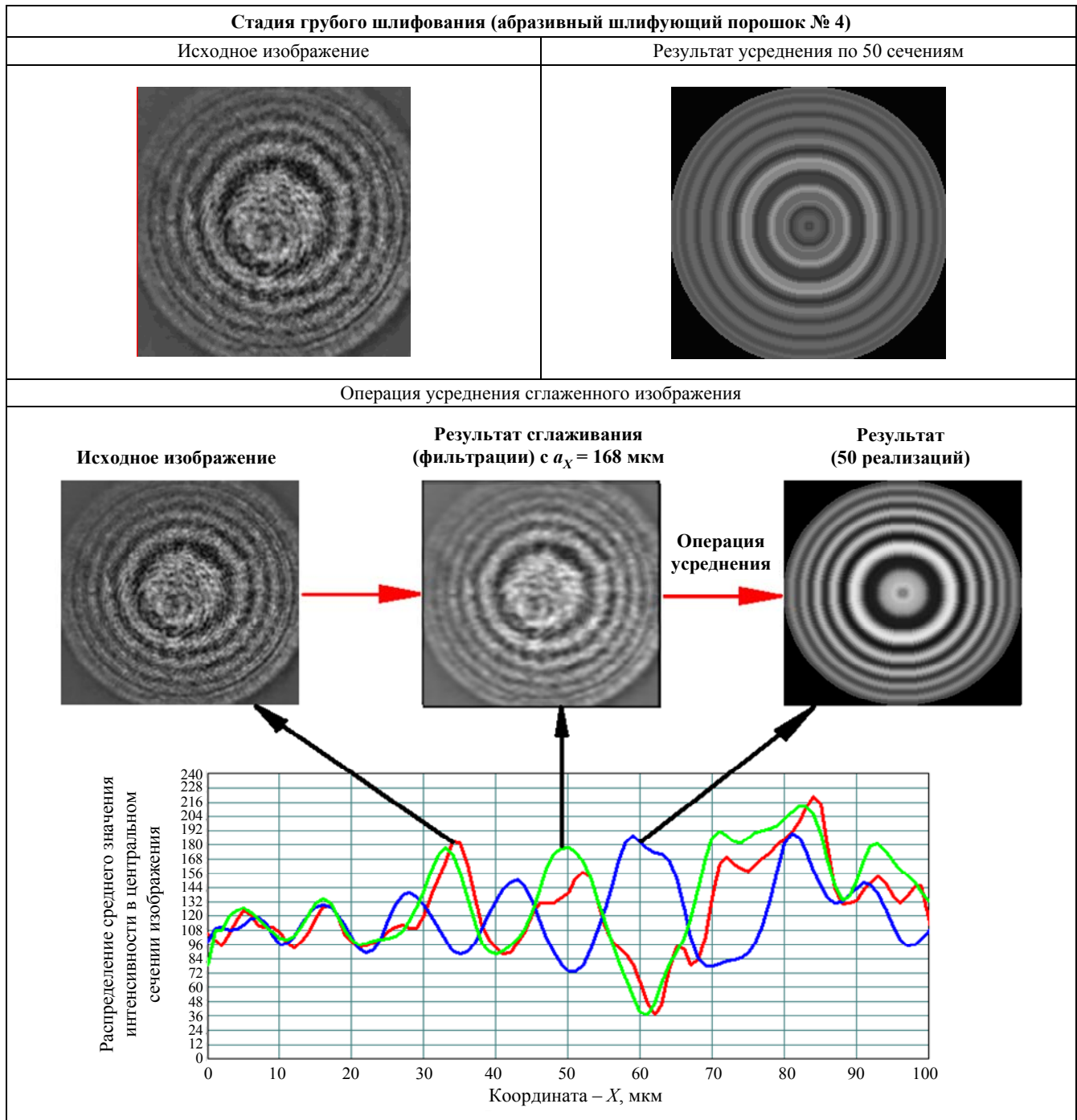


Таблица 3

Результаты метода сечений для стадии средне-грубого шлифования

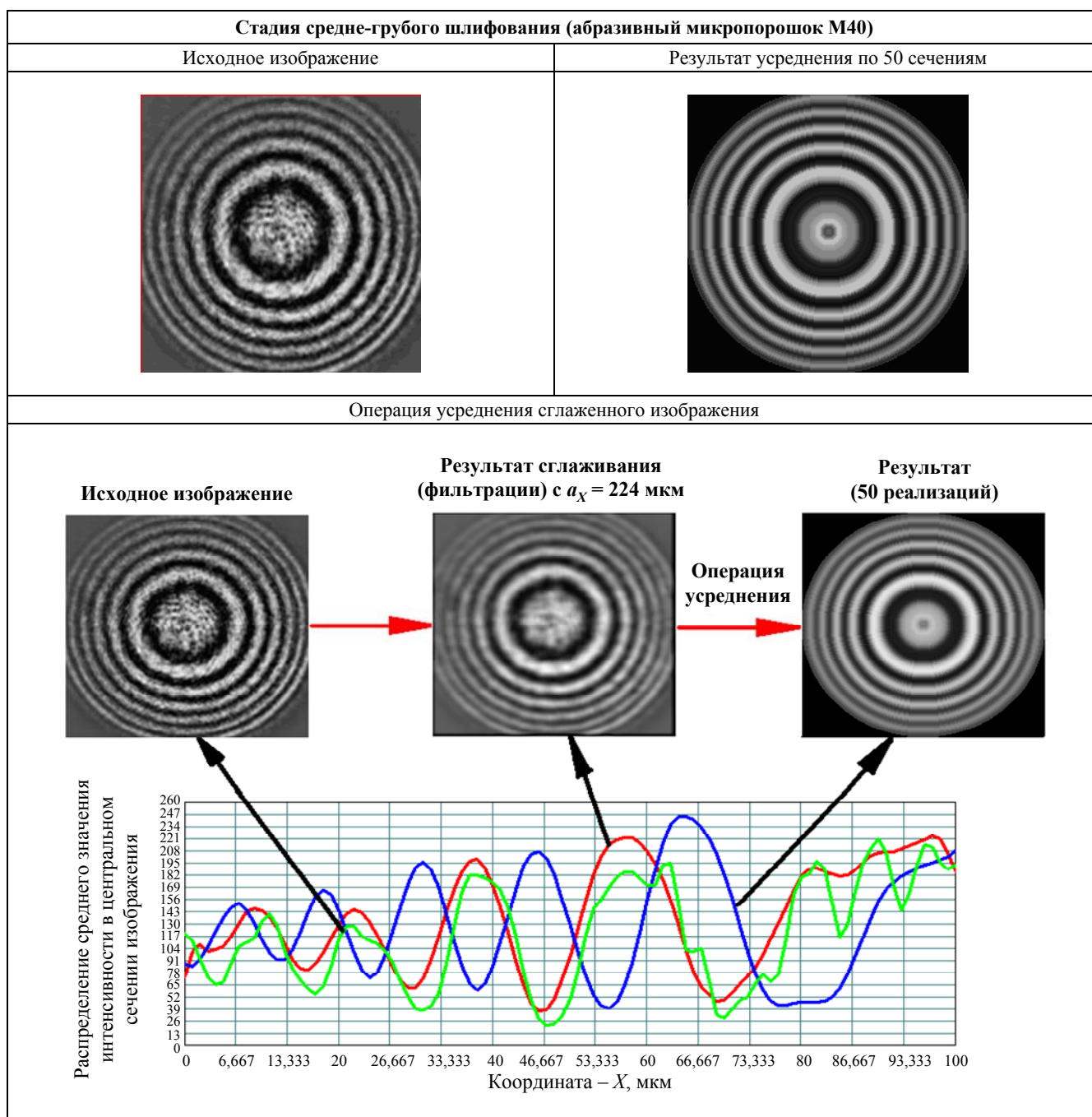
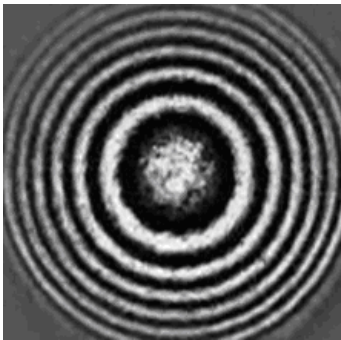
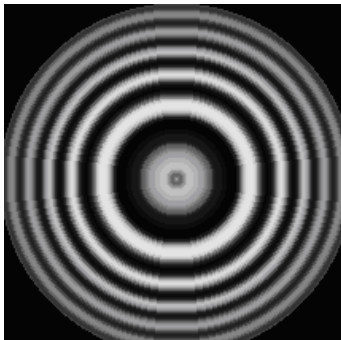


Таблица 4

Результаты метода сечений для стадии среднего шлифования

Стадия среднего шлифования (абразивный микропорошок М28)	
Исходное изображение	Результат усреднения по 50 сечениям
	

Операция усреднения сглаженного изображения

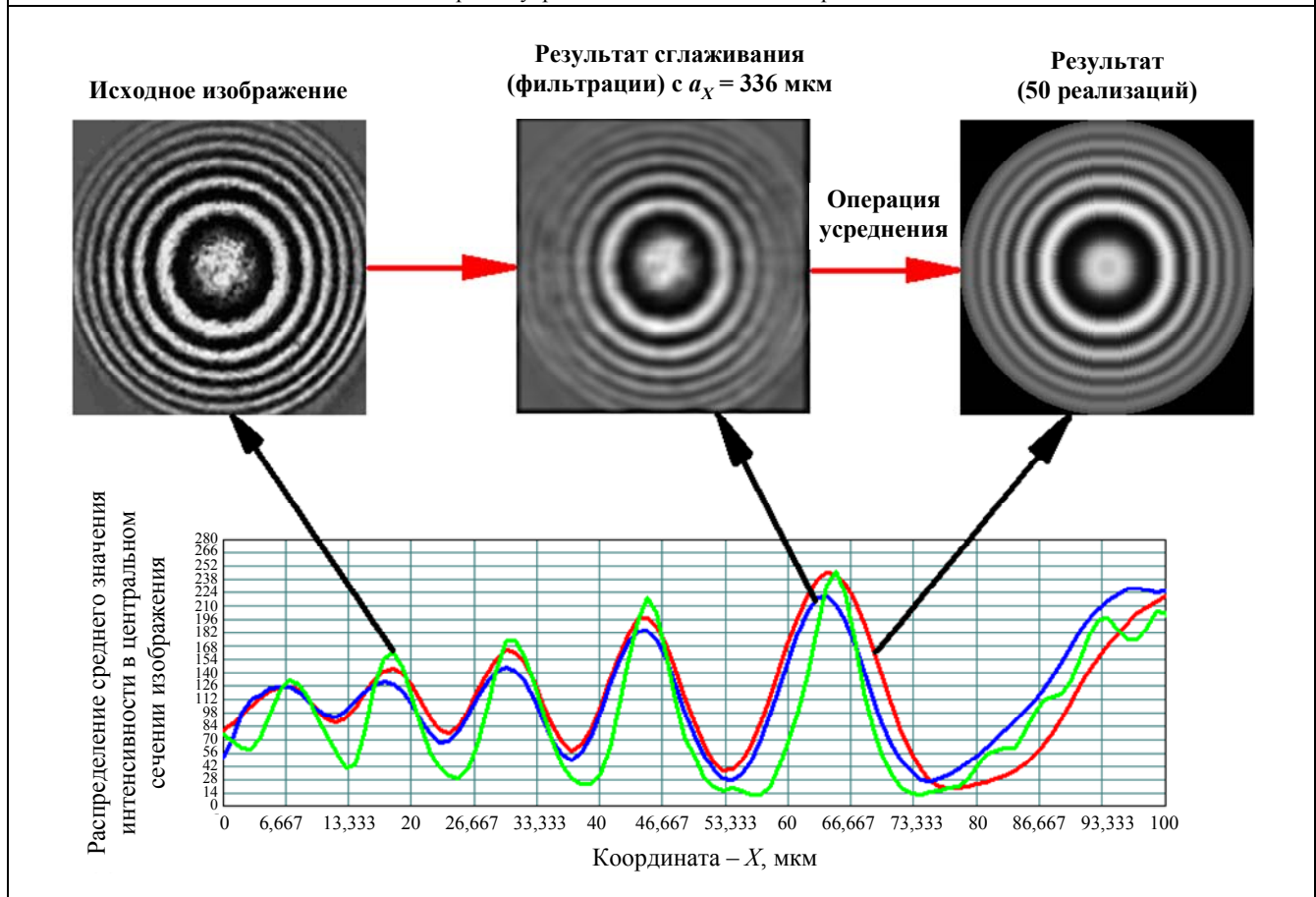


Таблица 5

Влияние размеров симметричного фильтра на контраст интерференционных изображений на трёх характерных стадиях шлифования

Стадии технологической обработки шлифованной поверхности	Величина контраста в исходном изображении интерференционной картины, отн. ед.	Величина допустимого контраста в сглаженном изображении интерференционной картины, отн. ед.
Стадия грубого шлифования	0,216 ($a_x = 30$ мкм)	0,19 ($a_x = 168$ мкм)
Стадия средне – грубого шлифования	0,64 ($a_x = 30$ мкм)	0,5 ($a_x = 224$ мкм)
Стадия среднего шлифования	0,8 ($a_x = 30$ мкм)	0,65 ($a_x = 224$ мкм)

Заключение

В результате проведённых научных исследований, посвящённых определению и анализу влияния статистических характеристик спекл-структуры на контраст интерференционной картины при интерферометрическом контроле микронеровностей шлифованных оптических поверхностей можно сделать следующие выводы:

- полученные аналитические выражения для определения статистических характеристик спекл-структуры в видеоизображениях интерференционных картин регистрируемых на стадиях шлифования оптических поверхностей позволили исследовать перейти к разработке метода частичного подавления спеклов с целью контроля величин СКО исследуемых микрошероховатостей профилей оптических деталей;

- результаты экспериментальных исследований, проведённых с помощью разработанного и изготовленного макетного образца лазерного ИК-интерферометра (см. табл. 1) подтвердили возможность и перспективность методов интерференционного контроля оптических поверхностей крупногабаритных зеркал на стадиях шлифования;

- на основе проведённых исследований (см. рис. 3, 4), можно сделать вывод о том, что предложенный метод частичного подавления спекл-структуры обеспечивает формирование интерференционной картины с контрастом спекл-структуры не выше 0,3 при видности выше 0,5;

- приведён рекомендуемый интервал при выборе элемента матричного фотоприёмного устройства при контроле оптических поверхностей на трёх характерных стадиях шлифования (см. табл. 3);

- предложенный алгоритм усреднения регистрируемых интерференционных изображений является основой методики определения СКО высот микронеровностей шлифованных и полированных оптических поверхностей, который подробно описан в [4].

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 разделы 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. Приказ № 136 Министерства Образования и Науки Российской Федерации от 28 февраля 2013 года.

ЛИТЕРАТУРА

1. Malacara D., Servin M., Malacara Z. Interferogram analysis for optical testing. – New York: Marcel Dekker Inc., 1998.
2. Абдулкадыров М. А., Белоусов С. П., Игнатов А. Н., Патрикеев В. Е., Придня В. В., Поляничков А. В., Румянцев В. В., Самуйлов А. В., Семенов А. П. Производство заготовок, формообразование, полировка и контроль астрономических зеркал [Электронный ресурс]: ОАО «ЛЗОС». Режим доступа: <http://lzos.ru/stati/formation-polishing-and-the-control-of-astronomical-mirrors>.
3. Абдулкадыров М. А., Белоусов С. П., Игнатов А. Н., Патрикеев В. Е., Придня В. В., Поляничков А. В., Румянцев В. В., Самуйлов А. В., Семенов А. П., Шаров Ю. А. Интерференционные методы производственного контроля оптических поверхностей зеркал телескопов [Электронный ресурс]: ОАО «ЛЗОС». Режим доступа: <http://lzos.ru/stati/methods-of-industrial-inspection-of-optical-surfaces-of-mirrors-of-telescopes>.
4. 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.
5. Денисов Д. Г., Карасик В. Е., Сахаров А. А. Система контроля формы оптических деталей с использованием датчиков волнового фронта. / В сборнике: Лазеры в науке, технике, медицине. XXV Международная конференция, сборник научных трудов. МГТУ им. Н. Э. Баумана, Московское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова, Международная академия связи, Российский онкологический научный центр им. Н. Н. Блохина, НИЯУ «МИФИ», Преображенский научный центр. 2014. С. 64–69.
6. Барышников Н. В., Денисов Д. Г., Карасик В. Е., Кудряшов А. В., Никитин А. Н., Сахаров А. А. Оптико-электронная система на основе датчика волнового фронта для диагностики параметров формы оптических изделий / В сборнике: Лазеры в науке, технике, медицине. 2015. С. 86–90.
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 / V Международная конференция по фотонике и информационной оптике. Сборник научных трудов. 2016. С. 416–417.
8. Denisov D. G., Baryshnikov N. V., Gladysheva Ya. V., Karasik V. E., Morozov A. B., Patrikeev V. E. // Measurement Techniques. 2017. Vol. 60. Issue 2. P. 121.
9. Басс Ф. Г., Фукс И. И. Рассеяние волн на статистической неровной поверхности. – М.: Наука, 1972.
10. Рытов С. М. Введение в статистическую радиофизику. – М.: Наука. Часть II. Случайные поля. 1966.
11. Денисов Д. Г., Карасик В. Е., Орлов В. М. // Метрология. 2009. № 9. С. 15.
12. Денисов Д. Г., Карасик В. Е. // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2011. № 2. С. 36.
13. Goodman J. W. Speckle phenomena in optics: theory and applications. – Colorado: Roberts and Company, 2006.
14. Франсон М. Оптика спеклов. – М.: МИР, 1980.
15. Гудмен Дж. Статистическая оптика. – М.: Мир, 1988.
16. Beckmann P., Spizzichino A. The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surface. – Norwood: Pergamon Press, ARTECH HOUSE, 1987.

Method of partial suppression of a speckle-pattern at the interferometric control of polished optical surfaces microroughness

D. G. Denisov

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

Received July 18, 2017

Consideration is given to the statistical characteristics of the electromagnetic field scattered by controlled rough surfaces (at grinding stages) by optical surfaces having different levels of the standard root-mean square (RMS) – σ from the given (reference) profile at different stages of technological processing. Analytic expressions for the contrast of the recorded interferograms and speckle-pattern from the characteristic ratio of the controlled quantity in relation to the wavelength λ of the interferometric control are obtained and analyzed analytically. A method of partial suppression of the speckle-pattern in the recorded images is proposed. The method is based on the use of spatial filtration and the operation of averaging over the ensemble of sections passing through the energy center of gravity of the filtered images. The results of experimental studies of a model sample of a laser infrared (IR) interferometer constructed using the modified Twyman–Green functional scheme with a working radiation wavelength of $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ are presented. The recommendations on the choice of its element base are formulated.

Keywords: rough optical surface, non-equable Twyman–Green interferometer, phase screen model, statistical characteristics of speckle-pattern, contrast of interference pattern, contrast of speckles-structures, digital image filtration.

REFERENCES

1. D. Malacara, M. Servin, and Z. Malacara. *Interferogram analysis for optical testing*, (New York: Marcel Dekker Inc., 1998).
2. M. A. Abdulkadyrov, S. P. Belousov, A. N. Ignatov, V. E. Patrikeev, V. V. Pridnya, A. V. Polyanshikov, V. V. Rumyantsev, A. V. Samuylov, and A. P. Semenov, *Production of blanks, shaping, polishing and control of astronomical mirrors* [Electronic resource]: JSC "LZOS". Access mode: <http://lzos.ru/stati/formation-polishing-and-the-control-of-astronomical-mirrors>. [in Russian].
3. M. A. Abdulkadyrov, S. P. Belousov, A. N. Ignatov, V. E. Patrikeev, V. V. Pridnya, A. V. Polyanshikov, V. V. Rumyantsev, A. V. Samuylov, A. P. Semenov, and Yu. A. Sharov, *Interference methods of production control of optical surfaces of mirrors of telescopes* [Electronic resource]: JSC "LZOS". Access mode: <http://lzos.ru/stati/methods-of-industrial-inspection-of-optical-surfaces-of-mirrors-of-telescopes>. [in Russian].
4. D. G. Denisov, *Development of methods and equipment for laser interference control of the shape and quality of optical surfaces of large-sized mirrors at grinding stages* (Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences. Moscow State Technical University. N. E. Bauman. Moscow, 2010) [in Russian].
5. D. G. Denisov, V. E. Karasik, and A. A. Sakharov, in *Proc. XXV International conference: Lasers in science, technology, medicine*. (Bauman MSTU, Moscow State Scientific-Technical Society of Radio Engineering, Electronics and Telecommunications, International Communication Academy, Russian Cancer Research Center. NIAS "MEPhi", et al., 2014). P. 64–69.
6. N. V. Baryshnikov, D. G. Denisov, V. E. Karasik, A. V. Kudryashov, A. N. Nikitin, and A. A. Sakharov, in *Proc. Conf.: Lasers in science, engineering, medicine, 2015*. P. 86–90.
7. N. V. Baryshnikov, D. G. Denisov, V. E. Karasik, and A. A. Sakharov, in *Proc. V International Conference on Photonics and Information Optics., 2016*. P. 416–417.
8. 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).
9. F. G. Bass and I. I. Fuks, *Scattering of waves on a statistical uneven surface* (Nauka, Moscow, 1972) [in Russian].
10. S. M. Rytov, *Introduction to statistical radiophysics*. (Nauka, Moscow, 1966) [in Russian].
11. D. G. Denisov, V. E. Karasik, and V. M. Orlov, *Metrology*, No. 9. 15 (2009).
12. D. G. Denisov and V. E. Karasik, *Bulletin of the Moscow State Technical University. Series: Instrument making*, No. 2, 36 (2011).
13. J. W. Goodman, *Speckle phenomena in optics: theory and applications* (Colorado: Roberts and Company, 2006).
14. M. Franson, *Optics of speckles* (MIR, Moscow, 1980) [in Russian].
15. J. Goodman, *Statistical optics* (Mir, Moscow, 1988) [in Russian].
16. P. Beckmann and A. Spizzichino, *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surface*. (Norwood: Pergamon Press, ARTECH HOUSE, 1987).