

16. Kogan M.M. Optimal estimation and filtration under unknown covariances of random factors, *Automation and remote control*, 2014, Vol. 75, No. 11, pp. 86-109.
17. Stechkina I.B., Kirsh V.A. Optimization of Parameters of Filters in a Multistage System of Fine Gas Filtration, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2003, Vol. 13, No. 3, pp. 218-225.
18. Tovkach I.O., Zhuk S.Ya. Adaptive filtration of radio source movement parameters with complex use of sensor network data based on TDOA and RSS methods, *Radioelectronics and Communications Systems*, 2017, Vol. 60, No. 12, pp. 528-537.
19. Bors Dorota, Walczak Stanislaw. Application of 2D systems to investigation of a process of gas filtration, *Multidim Syst Sign Process*, 2012, Vol. 23, Issues 1–2, pp. 119-130.
20. Lapshin A.L. Filtration and prediction of random solutions of a system of linear differential equations with coefficients depending on a finite-valued Markov process, *Ukrainian Mathematical Journal*, 1998, Vol. 50, Issue 7, pp. 1135-1140.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Гуреев.

**Шалимов Андрей Сергеевич** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»; e-mail: 85e@mail.ru; 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1; тел.: +74997208584; к.т.н.; доцент; научный сотрудник Института нано- и микросистемной техники НИУ МИЭТ.

**Тимошенко Сергей Петрович** – e-mail: spt@miee.ru; д.т.н.; профессор; директор Института нано- и микросистемной техники НИУ МИЭТ.

**Shalimov Andrey Sergeevich** – National Research University of Electronic Technology – MIET; e-mail: 85e@mail.ru; Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, Russia; phone: +74997208584; cand. of eng. sc.; associate professor; science researcher of Institute of nano- and microsystem techniques MIET.

**Timoshenkov Sergey Petrovich** – e-mail: spt@miee.ru; phone: +74997208768; dr. of eng. sc.; professor; CEO of Institute of nano- and microsystem techniques MIET.

УДК 681.23: 681.787.7

DOI 10.23683/2311-3103-2018-2-221-233

**Е.Е Майоров, А.Ч. Машек, Г.А. Цыганкова, В.К Абрамян, Г.Г. Хайдаров,  
А.Г. Хайдаров, А.А. Константинова**

#### **АНАЛИЗ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО СИГНАЛА КОГЕРЕНТНО- ОГРАНИЧЕННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ НЕГЛАДКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

*Рассмотрено наклонное падение освещающего пучка на поверхность объекта и определен критерий выбора длины отдельной зоны по всей глубине сцены анализа выходного интерференционного сигнала. Проведено моделирование процесса формирования огибающей интерференционного сигнала, а также предложена модель гипотетических источников индивидуальных спектров для устранения декорреляции спекл-полей. Проанализировано уравнение интерференции и предложено два подхода к анализу огибающей интерференционного выходного сигнала: метод площадей и метод дифференцирования огибающей. Рассмотрено графическое изображение огибающей в зависимости от смещения опорного зеркала и получена формульная зависимость погрешности измерений негладкой поверхности от глубины сцены при обработке сигнала по критерию равенства площадей, ограниченных огибающей сигнала. Решена задача оценки ошибки измерения по методу дифференцирования огибающей сигнала, которая заключалась в привязке к конкретному максимуму деформируемой огибающей интерференционного сигнала. Получены зависимости среднеквадратической ошибки измерений от глубины сцены по методу площадей и методу дифференцирования огибающей интерференционного выходного сигнала. Показано, что при деформации огибающей сигнала возникает неоднозначность в определении момента нулевой разности хода. Для этого случая предложены два критерия принятия реше-*

ния и соответствующие методы обработки выходного сигнала: метод площадей и метод дифференцирования огибающей. Для каждого из методов определены погрешности измерения, и рассчитаны соответствующие зависимости.

*Интерференция; спекл; фокусирующая линза; дифракционный предел; метод площадей; метод дифференцирования.*

**E.E. Maiorov, A.C. Mashek, G.A. Tsygankova, V.K. Abramyan, G.G. Khaidarov, A.G. Khaidarov, A.A. Konstantinova**

### **THE ANALYSIS OF THE INTERFERENCE SIGNAL COHERENT-LIMITED CONTROL SYSTEMS NONSMOOTH SURFACES**

*In the paper, the sloping drop of the illuminating beam on the surface of the object and the determined selection criterion the length of the individual zones throughout the depth of the scene analysis output interference signal is considered. The simulation process of the formation of the envelope of the interference signal, and a hypothetical model of the sources of individual speckles to eliminate the decorrelation of speckle-fields are proposed. The interference equation, and two approaches to the analysis of the envelope of the interference output signal: the method of areas and the method of differentiation of the envelope are analyzed. A graphic image of the envelope depending on the displacement of the reference mirror and the resulting formula the dependence of the measurement error of the nonsmooth surface from the depths of the scene when the signal processing by the criterion of equality of the areas bounded signal envelope are discussed. The problem of estimating measurement errors by the method of differentiation of the envelope signal, which was tied to a specific maximum deformable envelope of the interference signal is solved. The dependences of the mean square error of measurements of the scene depth by the method of squares and the method of differentiation of the envelope of the interference output signal are received. The deformation of the envelope signal occurs the ambiguity in determining the point of zero path difference is shown. For this case two criteria of decision-making and appropriate methods of processing the output signal: the method of areas and the method of differentiation of the envelope are proposed. For each of the methods specified measurement errors and the appropriate dependencies are calculated.*

*Interference; speckle; focusing lens; diffraction limit; method of squares; method of differentiation.*

**Введение.** Развитие высокотехнологичных способов производства с необходимостью обуславливает совершенствование методов и средств научной базы экспериментальных исследований. Важное место в решении указанной задачи занимают методы оптического контроля. Эти методы отличает, прежде всего, отсутствие материальных контактов с предметом исследования, а, следовательно – возможность достижения наиболее достоверных результатов эксперимента [1–4].

В этой области наиболее универсальными методами исследований являются методы когерентной оптики, а именно, методы интерферометрии использующие когерентно-ограниченные во времени источники излучения. Эти методы позволяют решать такую задачу как исследование напряженно-деформированного состояния объектов с негладкой поверхностью [2, 5–9, 13]. Это направление интерферометрии является высокоинформативным и высокоточным инструментом получения данных. Уникальность этого метода обусловлена ее возможностями. Этот метод позволяют проводить исследования: статических и динамических процессов; не предъявляют требований к качеству поверхности контролируемых объектов; позволяют производить сравнение волновых полей, существовавших в различные моменты времени; позволяют получать информацию об исследуемом процессе как в количественном, так и качественном аспектах; позволяют воспроизводить трехмерную видеокопию изучаемого объекта [10–15].

Метод контроля негладких поверхностей с использованием когерентно-ограниченного излучения основан на явлении двухлучевой интерференции. В работе, в качестве когерентно-ограниченной системы рассматривался интерферометр Май-

кельсона, в который вместо одного из зеркал помещен исследуемый объект. В качестве источника излучения использовался суперлюминесцентный диод с длиной волны  $\lambda = 0,83$  мкм, длиной когерентности  $l_c = 30$  мкм, мощностью излучения 3 мВт. Микрообъектив ( $10\times$ ,  $f = 15,5$  мм,  $A = 0,3$ ) фокусировал излучение источника на контролируруемую поверхность объекта и на опорную поверхность (зеркало).

Задачей исследования являлось выявление источников погрешности измерений и рассмотрение способов обработки интерференционного сигнала, где предлагалась модель априорной оценки точности измерений.

**Модель гипотетических источников индивидуальных спеклов.** Рассмотрим наклонное падение освещающего пучка на поверхность объекта (рис. 1). Всю глубину сцены  $h$  разобьем на  $n$  равных зон. Критерий выбора длины отдельной зоны заключается в следующем. Поставим условие, чтобы излучение, рассеянное поверхностью в пределах одной зоны, содержало лишь полностью коррелированные компоненты. С вероятностью, равной единице, этого можно добиться, когда рассеянное одной зоной излучение будет содержать один спекл. На практике на выходе интерферометра перед фотоприемником помещается фокусирующая линза. Поэтому поставленное выше условие будет выполнено, если размер отдельной зоны будет меньше (или равен) дифракционного предела разрешения линзы.

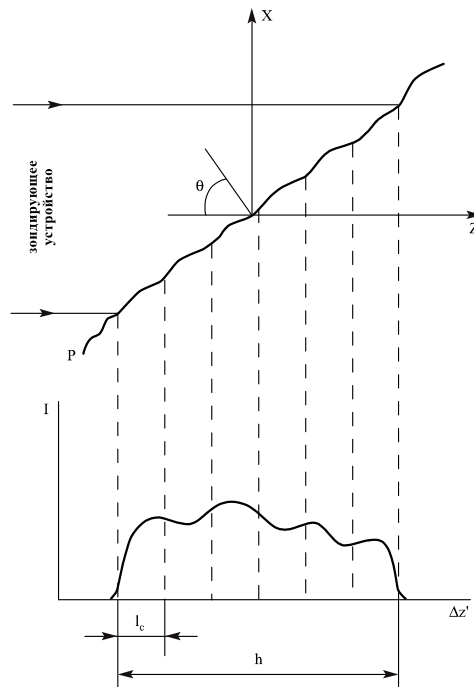


Рис. 1. Моделирование процесса формирования огибающей интерференционного сигнала:  $P$  – поверхность объекта;  $\theta$  – угол падения;  $I$  – распределение интенсивности отраженного светового потока по зонам

Практически угловая апертура фокусирующей линзы близка к апертуре объекта, формирующего световое пятно на поверхности объекта. Поэтому окончательно поставленная цель будет достигнута, если размер отдельной зоны взять равным длине когерентности освещающего излучения. Таким образом, предлагаемая модель анализа интерференционного сигнала предполагает следующее. Глубина сцены освещенного участка поверхности разбивается на  $n$  зон. Длина каждой зоны

равна длине когерентности источника  $l_c$ . Излучение, отраженное от поверхности одной зоны, в плоскости регистрации представлено одним спеклом. Световые сигналы от каждой зоны независимы.

При анализе уравнения интерференции (1) показано [15–18], что момент нулевой разности хода может быть определен по максимальному значению выходного сигнала. Однако при искажении формы огибающей перемещение опорного зеркала может сопровождаться появлением нескольких максимумов. Поэтому при наличии неоднозначности необходимо прежде всего сформулировать критерий принятия решения по определению момента времени, максимально соответствующего нулевой разности хода интерферирующих пучков. Ниже рассматриваются два подхода к анализу огибающей выходного сигнала: метод площадей, метод дифференцирования огибающей. Анализ методов будет проводиться с использованием предложенной выше модели.

Уравнение интерференции имеет следующий вид:

$$R_I(x, y) = \langle I \rangle^2 \left[ 1 + \sin^2 \frac{dx}{\lambda L} \sin^2 \frac{dy}{\lambda L} \right], \quad (1)$$

где  $R_I(x, y)$  – функция автокорреляции интенсивности  $I$  спекл-картины в плоскости наблюдения  $x, y$ ;  $L$  – расстояние от рассеивающей поверхности до плоскости наблюдения;  $\lambda$  – длина волны излучения.

**Метод площадей.** Рассмотрим графическое изображение огибающей выходного сигнала в зависимости от смещения опорного зеркала  $\Delta z'$  (рис. 2.). Пусть  $S$  – площадь, ограниченная огибающей и осью  $\Delta z'$ . Сущность метода площадей заключается в следующем. В качестве искомой величины смещения опорного зеркала будем считать точку  $\Delta z'_s$ , которая делит площадь  $S$  на две равные части, т.е.  $S_1 = S_2$ .

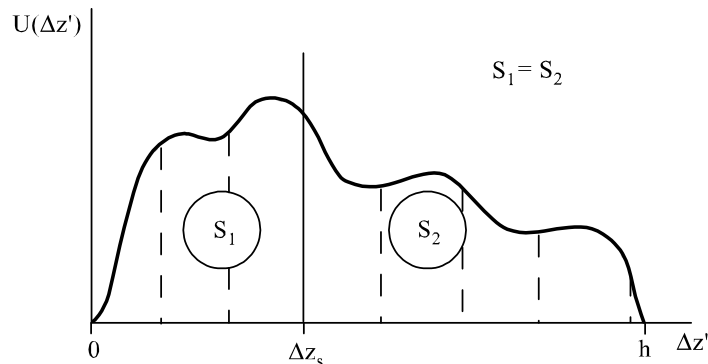


Рис. 2. Анализ огибающей выходного сигнала по методу площадей:  $h$  – глубина сцены освещенного участка поверхности

Разобьем глубину сцены  $h$  на  $n$  зон, как показано на рис. 2. Тогда аналитическое выражение предлагаемого критерия будет иметь следующий вид:

$$\int_0^{\Delta z'_s} U(\Delta z') d(\Delta z') = \int_{\Delta z'_s}^h U(\Delta z') d(\Delta z'), \quad (2)$$

где  $U(\Delta z)$  – огибающая выходного сигнала.

Найдем среднеквадратическую ошибку измерения при обработке сигнала с использованием рассматриваемого метода.

Пусть  $U_o$  – среднее значение амплитуды сигнала. Тогда средняя величина сигнала, соответствующего одной зоне равна

$$U_s = \frac{U_o}{n}, \quad (3)$$

где  $n$  – число зон.

Воспользуемся следующим свойством распределением интенсивности спекл-картины: квадратный корень из среднего квадрата флуктуаций интенсивности равен среднему значению интенсивности [1, 9, 18]. В этом случае дисперсия сигнала, соответствующего одной зоне, будет равна средней амплитуде сигнала одной зоны:

$$\sqrt{\langle (U - U_s)^2 \rangle} = \frac{U_o}{n}. \quad (4)$$

С учетом (4) найдем среднеквадратическое отклонение амплитуды сигнала от среднего значения на участках  $(0 - \Delta z_s)$  и  $(\Delta z_s - h)$ . Для этого воспользуемся еще одним свойством спекл-структуры [2, 9, 15, 18]: дисперсия суперпозиции интенсивностей  $n$  спеклов увеличивается в  $\sqrt{n}$  раз по сравнению с одним спеклом. Следовательно,

$$\sigma(U_1) = \frac{U_o}{n} \sqrt{\frac{n - \sigma_z}{2} \frac{\sigma_z}{l_c}}, \quad (5)$$

$$\sigma(U_2) = \frac{U_o}{n} \sqrt{\frac{n + \sigma_z}{2} \frac{\sigma_z}{l_c}}, \quad (6)$$

где  $\sigma(U_1)$ ,  $\sigma(U_2)$  – среднеквадратическое отклонение амплитуды сигнала на участках  $(0 - \Delta z_s)$  и  $(\Delta z_s - h)$ , соответственно;  $\sigma_z$  – среднеквадратическая величина флуктуаций положения точки  $\Delta z_s$ ;  $l_c$  – длина когерентности.

Далее обратимся к выражению (2). Условие равенства составляющих площадей, справедливое для одной из реализаций огибающей выходного сигнала, должно также выполняться для ее средних значений.

А именно,

$$\int_0^{\Delta z'_s} [U_o + \sigma(U_1)] d(\Delta z') = \int_{\Delta z'_s}^h [U_o - \sigma(U_1)] d(\Delta z'). \quad (7)$$

Подставляя в (7) выражение для  $\sigma(U_1)$  и  $\sigma(U_2)$ , получим

$$\int_0^{\Delta z'_s} \left[ U_o + \frac{U_o}{n} \sqrt{\frac{n - \sigma_z}{2} \frac{\sigma_z}{l_c}} \right] d(\Delta z') = \int_{\Delta z'_s}^h \left[ U_o - \frac{U_o}{n} \sqrt{\frac{n - \sigma_z}{2} \frac{\sigma_z}{l_c}} \right] d(\Delta z'). \quad (8)$$

После проведения преобразований и интегрирования условие (8) перепишем в виде

$$2\Delta z'_s U_o + \frac{U_o \sigma_z}{n^2 l_c} \sqrt{\frac{n}{2}} (2\Delta z'_s - h) = U_o h \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{2n}} \right). \quad (9)$$

Очевидно, что среднее значение точки равенства площадей  $S_1$  и  $S_2$  равно  $h/2$ , и

$$\Delta z'_s = \frac{h}{2} + \sigma_z. \quad (10)$$

Окончательно, подставляя (10) в (9) и решая уравнение относительно  $\sigma_z$ , получим следующую формулу для ошибки измерения:

$$\sigma_z = \frac{nl_c}{2\sqrt{2n}} = \frac{\sqrt{hl_c}}{2\sqrt{2}}. \quad (11)$$

Полученная формула выражает зависимость погрешности измерений негладкой поверхности от глубины сцены  $h$  при обработке сигнала по критерию равенства площадей, ограниченных огибающей. Поскольку глубина сцены при фиксированной величине светового пятна определяется углом падения зондирующего излучения [9, 15, 18], то формулу (11) можно переписать в виде

$$\sigma_z = \frac{\sqrt{d l_c \operatorname{tg} \theta}}{2\sqrt{2}}, \quad (11, a)$$

где  $d$  – диаметр зондирующего пятна.

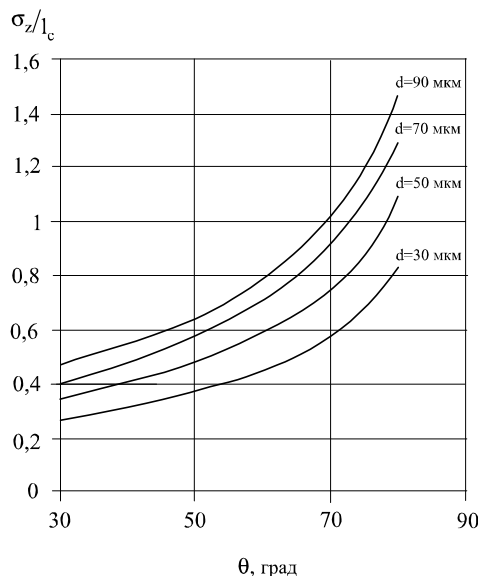


Рис. 3. Зависимость погрешности измерения от угла падения излучения для различных размеров зондирующего пятна  $d$

Результаты расчета погрешности измерения в зависимости от угла падения зондирующего пучка для различных размеров пятна  $d$  представлены на рис. 3.

**Метод дифференцирования огибающей.** Наклонное падение освещающего пучка приводит к декорреляции спекл-полей, формирующих объектный сигнал. Огибающая выходного сигнала принимает сложную форму с несколькими максимумами [15–18, 19]. Случайный характер распределения локальных максимумов по длительности сигнала делает невозможным безошибочное принятие решения по какому-либо максимуму. Поэтому задача заключается в привязке к конкретному максимуму и оценке ошибки, обусловленной этим выбором. В качестве критерия принятия решения предлагается следующий: искомым смещением опорного зеркала  $\Delta z'$  будем считать такое, которое соответствует первому нулю производной огибающей выходного сигнала. На рис. 4 такая точка обозначена  $\Delta z_d$ .

Для оценки ошибки, возникающей при применении предложенного критерия, будем использовать рассмотренную ранее модель источников индивидуальных спеклов. Поскольку на практике глубина сцены  $h$  не превышает, как правило,  $5l_c$ , ограничим анализ погрешности измерений моделью, не превышающей 5 зон. Суть расчета погрешности заключается в определении вероятностей распределения локальных максимумов огибающей выходного сигнала. Расчет проведем для конкретных вариантов распределения интенсивности.

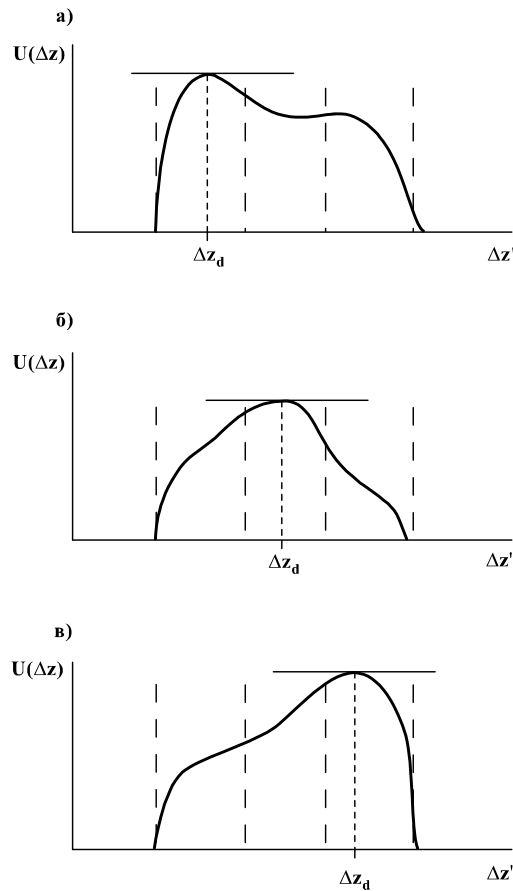


Рис. 4. Метод дифференцирования огибающей выходного сигнала. Зонная модель анализа, число зон  $n = 3$

В соответствии с предложенным критерием принятия решения – определение первого нуля производной огибающей – будем считать, что ошибка в принятии решения  $\delta_{zo}$  равна нулю, если первый максимум огибающей находится в центральной зоне (рис. 4,б). Будем считать, что ошибка при нахождении максимума в  $i$ -й зоне равна

$$\delta_{zi} = l_c (i_m - i_o),$$

где  $l_c$  – длина когерентности;  $i_m$  – номер зоны, в которой находится первый максимум;  $i_o$  – номер центральной зоны.

Найдем вероятности отклонений положений максимумов от центральной зоны. Для расчета воспользуемся функцией плотности вероятности распределения интенсивности в спекл-структуре [2, 9, 15, 18–20]:

$$p(I_i) = \frac{1}{I_o} \exp\left(-\frac{I_i}{I_o}\right), \quad (12)$$

где  $I_i$  – интенсивность  $i$ -ой зоны,  $I_o$  – средняя величина интенсивности.

Пусть угол падения зондирующего излучения такой, что глубина сцены  $h$  разбивается на три зоны.

1. Найдем вероятность того, что первый ноль производной огибающей находится в первой зоне (рис. 4, а), т.е.  $I_1 > I_2, I_3$ :

$$P_1 = \int_0^{I_m} \int_0^{I_1} [p(I)dI] p(I_1) dI_1,$$

где  $I_m$  – максимальная величина интенсивности спекла,

$\int_0^{I_1} p(I)dI$  – вероятность того, что интенсивность 2-ой зоны меньше 1-ой.

Произведение интегралов есть вероятность того, что  $I_1 > I_2, I_3$ .

Выполним интегрирование, используя (12), а также свойство распределения интенсивности спекл-структуры, согласно которому  $I_m/I_0 \gg 1$ :

$$P_1 = \lim_{I_m/I_0 \rightarrow \infty} \left[ \frac{1}{2} \left( \exp \frac{-I_m}{I_0} \right)^2 - \exp \frac{-I_m}{I_0} + \frac{1}{2} \right].$$

Произведя вычисления, найдем

$$P_1 = \frac{1}{2}.$$

Полученный результат интерпретируется следующим образом: для рассмотренного варианта реализации огибающей ошибка получения информации о негладкой поверхности равна  $\delta_1 = -l_c$  при вероятности  $P_1 = 1/2$ .

2. Вычислим вероятность того, что  $I_2 > I_3, I_1$  (рис. 4,б):

$$\begin{aligned} P_2 &= \int_0^{I_m} \int_{I_1}^{I_2} \int_{I_1}^{I_2} p(I)dI \int_0^{I_2} p(I)dI \left[ p(I_2)p(I_1)dI_2dI_1 = \right. \\ &= -\frac{1}{6} \left( \exp \frac{-I_m}{I_0} \right)^3 + \frac{1}{24} \left( \exp \frac{-I_m}{I_0} \right)^4 + \frac{1}{4} \left( \exp \frac{-I_m}{I_0} \right)^2 - \frac{1}{6} \exp \frac{-I_m}{I_0} + \frac{1}{24} \end{aligned}$$

где  $\int_{I_1}^{I_2} p(I)dI$  – вероятность того, что  $I_2 > I_1$ ,  $\int_0^{I_2} p(I)dI$  – вероятность того, что  $I_2 > I_1, I_3$ .

После проведения вычислений получим: ошибка  $\delta_2 = 0$  при вероятности  $P_2 = 1/24$ .

3. Найдем вероятность того, что  $I_3 > I_2 > I_1$  (рис. 4,в):

$$\begin{aligned} &\int_0^{I_m} \int_{I_2}^{I_3} \int_{I_1}^{I_2} p(I)dI \int_{I_2}^{I_3} p(I)dI p(I_3)p(I_2)p(I_1)dI_3dI_2dI_1 = \\ &= \frac{1}{24} \left( \exp \frac{-I_m}{I_0} \right)^4 - \frac{1}{120} \left( \exp \frac{-I_m}{I_0} \right)^5 - \frac{1}{12} \left( \exp \frac{-I_m}{I_0} \right)^3 + \frac{1}{12} \left( \exp \frac{-I_m}{I_0} \right)^2 - \frac{1}{24} \exp \frac{-I_m}{I_0} + \frac{1}{120} \end{aligned}$$

где  $\int_{I_1}^{I_2} p(I)dI$  – вероятность того, что  $I_2 > I_1$ ,  $\int_{I_2}^{I_3} p(I)dI$  – вероятность того, что  $I_3 > I_2$ .

Произведя вычисления, получим:

ошибка  $\delta_3 = l_c$  при вероятности  $P_3 = 1/120$ .



Аналогичным образом вычисляются вероятности нахождения максимумов огибающей для  $2^x$ ,  $4^x$  и  $5^x$  – зонной модели. Результаты расчетов вероятностей  $P_i$  отклонений максимумов от зоны с нулевой ошибкой и соответствующих ошибок измерения  $\delta_i$  приведены в табл. 1, 2, 3, 4. Для удобства оценки ошибок начало отсчета номеров зон в таблицах смещено: нулевой номер присвоен центральной зоне – зоне с нулевой ошибкой. Графическое изображение функции распределения плотности вероятности по зонам показано на рис. 5. В таблицах приведены также расчеты среднеквадратических ошибок измерений  $\sigma_{zn}$ , где  $n = 2, 3, 4, 5$  – общее число зон модели.

Таблица 1

**Ошибки измерений для двузонной модели**

2 ЗОНЫ ( $n = 2$ )			
$i$	$P_i$	$\delta_i$	$\sigma_{z2}$
- 2	0	$- l_c$	0,5 $l_c$
- 1	0,5	$- 0,5 l_c$	
0	-	-	
1	0,5	$0,5 l_c$	
2	0	$l_c$	

Таблица 2

**Ошибки измерений для трехзонной модели**

3 ЗОНЫ ( $n = 3$ )			
$i$	$P_i$	$\delta_i$	$\sigma_{z3}$
- 2	0	$- 2 l_c$	0,96 $l_c$
- 1	0,5	$- l_c$	
0	0,042	0	
1	0,008	$l_c$	
2	0	$2 l_c$	

Таблица 3

**Ошибки измерений для четырехзонной модели**

4 ЗОНЫ ( $n = 4$ )			
$i$	$P_i$	$\delta_i$	$\sigma_{z4}$
- 3	0	$- 2,5 l_c$	1,43 $l_c$
- 2	0,5	$- 1,5 l_c$	
- 1	0,042	$- 0,5 l_c$	
0	-	-	
1	0,008	$0,5 l_c$	
2	0,002	$1,5 l_c$	
3	0	$2,5 l_c$	

Таблица 4

**Ошибки измерений для пятизонной модели**

5 ЗОН ( $n = 5$ )			
$i$	$P_i$	$\delta_i$	$\sigma_{z5}$
- 3	0	$- 3 l_c$	1,93 $l_c$
- 2	0,5	$- 2 l_c$	
- 1	0,042	$- l_c$	
0	0,008	0	
1	0,002	$l_c$	
2	0	$2 l_c$	
3	0	$3 l_c$	

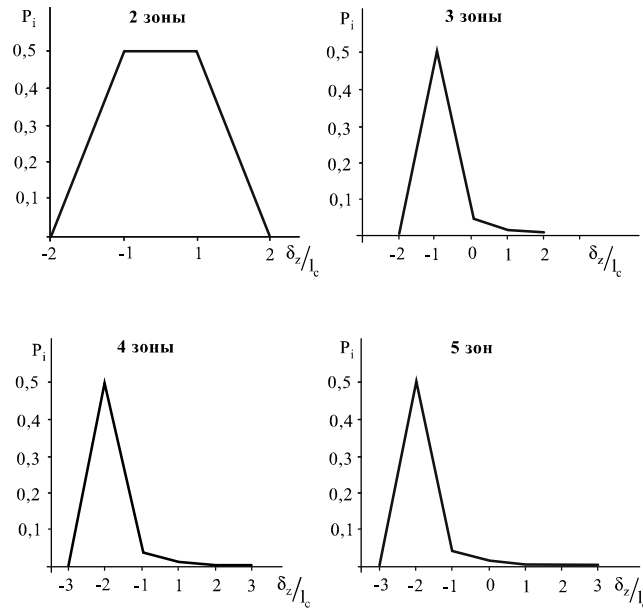


Рис. 5. Функция плотности вероятности распределения ошибки измерения  $\delta_z$  при обработке выходного сигнала по методу дифференцирования огибающей

На рис. 6 показана рассчитанная зависимость среднеквадратической ошибки измерения от количества зон, укладываемых по глубине сцены  $h$ , т.е. – от угла падения зондирующего излучения.

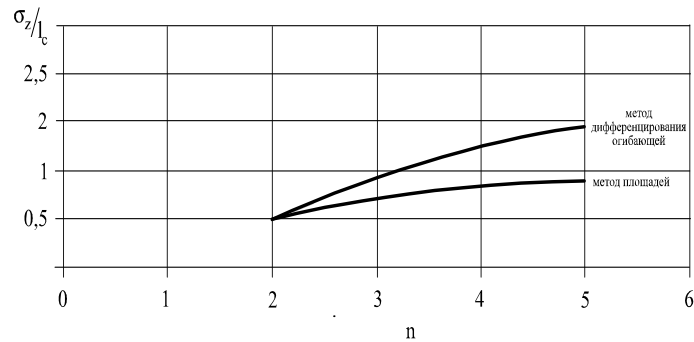


Рис. 6. Зависимость среднеквадратической ошибки измерения от глубины сцены

Там же для сравнения приведены результаты расчета среднеквадратической ошибки измерения при обработке выходного сигнала по методу площадей.

**Заключение.** Проведенное исследование показало, что наклонное падение зондирующего излучения приводит к декорреляции спекл-полей и к деформированию формы огибающей выходного сигнала. Для анализа интерференционного сигнала в этом случае предложена модель источников индивидуальных спеклов. Предложенная модель позволяет объяснить механизм формирования огибающей сигнала при декорреляции спекл-полей. при деформации огибающей сигнала возникает неоднозначность в определении момента нулевой разности хода. Для этого случая предложены два критерия принятия решения и соответствующие методы обработки выходного сигнала: метод площадей и метод дифференцирования огибающей. Для каждого из методов определены погрешности измерения, и рассчитаны соответствующие зависимости.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л.* Оптическая голография: пер. с англ. / под ред. Ю.И. Островского. – М.: Мир, 1973. – 686 с.
2. *Goodman F.W.* Laser speckle and related phenomena. – Berlin: Springer-Verlag, 1975. – P. 9-75.
3. *Франсон М.* Оптика спеклов: пер. с франц. / под ред. проф. Ю.И. Островского. – М.: Мир, 1980. – 171 с.
4. *Клименко Н.С.* Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. – М.: Наука, 1985. – 224 с.
5. *Takeda M., Yamamoto H.* Fourier-transform speckle profilometry: three-dimensional shape measurements of diffuse objects with large height steps and/or spatially isolated surfaces // *Appl. Optics.* – 1994. – Vol. 33, No. 34. – P. 7829-7837.
6. *Chebbour A., Gorecki C., Tribillon G.* Range Sinding and velocimetry with directional discrimination using a modulated laser diode Michelson interferometer // *Opt. Commun.* – 1994. – Vol. 111, No. 1-2. – P. 1-5.
7. *Hasler G., Herrmann F.* Range sensing by shearing interferometry: influence of speckle // *Appl. Optics.* – 1988. – Vol. 27, No. 22. – P. 4631-4637.
8. *Hausler G., Lindner M.W.* Coherence radar and spectral radar – new tools for dermatological diagnosis // *F. Biomed. Opt.* – 1998. – Vol. 3, No. 1. – P. 21-31.
9. *Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т.* Интерферометрия диффузно отражающих объектов. – СПб.: НИУ ИТМО, 2014. – 195 с.
10. *Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т., Шерстобитова А.С.* Исследование оптико-электронной системы расшифровки голографических интерферограмм // *Оптический журнал.* – 2013. – Т. 80, № 3. – С. 47-51.
11. *Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т.* Исследование напряженно-деформированной поверхности объектов методом голографической интерферометрии // *Научное обозрение.* – 2013. – № 1. – С. 43-46.
12. *Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т.* Исследование влияния спекл-структуры на формирование интерференционного сигнала и погрешность измерений // *Научное приборостроение.* – 2013. – Т. 23, No. 2. – С. 38-46.
13. *Майоров Е.Е.* Метод устранения влияния декорреляции спекл-полей на точность измерений и динамический диапазон интерференционного сигнала // *Научное обозрение.* – 2013. – № 9. – С. 329-332.
14. *Майоров Е.Е.* Измерение смещений диффузно отражающих поверхностей вне плоскости системой обработки голографических интерферограмм // *Научное обозрение.* – 2013. – № 12. – С. 190-195.
15. *Майоров Е.Е., Машек А.Ч., Удахина С.В., Цыганкова Г.А., Хайдаров Г.Г., Черняк Т.А.* Разработка компьютерной интерференционной системы контроля негладких поверхностей // *Приборы.* – 2015. – № 11 (185). – С. 26-31.
16. *Прокопенко В.Т., Майоров Е.Е., Машек А.Ч., Удахина С.В., Цыганкова Г.А., Хайдаров А.Г., Черняк Т.А.* Оптико-электронный прибор для контроля геометрических параметров диффузно отражающих объектов // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение.* – 2016. – Т. 59, № 5. – С. 388-394.
17. *Прокопенко В.Т., Майоров Е.Е., Машек А.Ч., Цыганкова Г.А., Абрамян В.К., Зайцев Ю.Е., Хайдаров А.Г., Хайдаров Г.Г.* Применение поперечно-сдвиговой интерферометрии в голографии для контроля геометрических параметров диффузно отражающих поверхностей // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение.* – 2017. – Т. 60, № 4. – С. 331-339.
18. *Майоров Е.Е., Дагаев А.В., Пономарев С.В., Черняк Т.А.* Исследование интерферометра сдвига в фазоизмерительных приборах и системах расшифровки голографических интерферограмм // *Научное приборостроение.* – 2017. – Т. 27, № 2. – С. 32-40.
19. *Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т., Удахина С.В., Цыганкова Г.А., Черняк Т.А.* Оптико-электронная компьютерная система для обнаружения внешних агентов в подповерхностных слоях кожного покрова // *Медицинская техника.* – 2016. – № 2. – С. 7-10.
20. *Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т., Машек А.Ч., Цыганкова Г.А., Курлов А.В., Хохлова М.В., Кирик Д.И., Капралов Д.Д.* Экспериментальное исследование метрологических характеристик автоматизированной интерферометрической системы измерения формы поверхности диффузно отражающих объектов // *Измерительная техника.* – 2017. – № 10. – С. 33-37.

## REFERENCES

1. *Kol'er R., Berkhart K., Lin L.* Opticheskaya golografiya [Optical holography]: from english., under the edit. of professor Yu.I. Ostrovskogo. Moscow: Mir, 1973, 686 p.
2. *Goodman F.W.* Laser speckle and related phenomena. Berlin: Spring-Verlag, 1975, pp. 9-75.
3. *Franson M.* Optika spekvov. [Optics speckles]: transl. from the french., under the edit. of professor Yu.I. Ostrovskogo. Moscow: Mir, 1980, 171 p.
4. *Klimenko N.S.* Golografiya sfokusirovannykh izobrazheniy i spekl-interferometriya [Holography of focused images and speckle interferometry]. Moscow: Nauka, 1985, 224 p.
5. *Takeda M., Yamamoto H.* Fourier-transform speckle profilometry: three-dimensional shape measurements of diffuse objects with large height steps and/or spatially isolated surfaces, *Appl. Optics.*, 1994, Vol. 33, No. 34, pp. 7829-7837.
6. *Chebbour A., Gorecki C., Tribillon G.* Range Sinding and velocimetry with directional discrimination using a modulated laser diode Michelson interferometer, *Opt. Commun.*, 1994, Vol. 111, No. 1-2, P. 1-5.
7. *Hasier G., Herrmann F.* Range sensing by shearing interferometry: influence of speckle, *Appl. Optics.*, 1988, Vol. 27, No. 22, pp. 4631-4637.
8. *Hausler G., Lindner M.W.* Coherence radar and spectral radar – new tools for dermatological diagnosis, *F. Biomed. Opt.*, 1998, Vol. 3, No. 1, pp. 21-31.
9. *Maiorov E.E., Prokopenko V.T.* Interferometriya diffuzno otrazhayushhikh ob"ektov [Interferometry of diffusely reflecting objects]. Saint Petersburg: NIU ITMO, 2014, 195 p.
10. *Mayorov E.E., Prokopenko V.T., Sherstobitova A.S.* Issledovanie optiko-elektronnoy sistemy rasshifrovki golograficheskikh interferogramm [Study of optical-electronic system of decoding holographic interferograms], *Opticheskii zhurnal* [Optical journal], 2013, Vol. 80, No. 3, pp. 47-51.
11. *Maiorov E.E., Prokopenko V.T.* Issledovanie napryazhenno-deformirovannoy poverkhnosti ob"ektov metodom golograficheskoy interferometrii [Investigation of the stress-deformed surfaces of the objects by holographic interferometry], *Nauchnoe obozrenie* [Scientific review], 2013, No. 1, pp. 43-46.
12. *Maiorov E.E., Prokopenko V.T.* Issledovanie vliyaniya spekl-struktury na formirovanie interferentsionnogo signala i pogreshnost' izmereniy [Study of the influence of the speckle structure on the formation of the interference signal and the measurement error], *Nauchnoe priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2013, Vol. 23, No. 2, pp. 38-46.
13. *Maiorov E.E.* Metod ustraneniya vliyaniya dekorrelyatsii spekl-poley na tochnost' izmereniy i dinamicheskii diapazon interferentsionnogo signala [Method for eliminating the influence of decorrelation of speckle fields for measurement accuracy and dynamic range of the interference signal], *Nauchnoe obozrenie* [Scientific review], 2013, No. 9, pp. 329-332.
14. *Maiorov E.E.* Izmerenie smeshheniy diffuzno otrazhayushhikh poverkhnostey vne ploskosti sistem obrabotki golograficheskikh interferogramm [Measurement of the displacements of diffusely reflecting surfaces outside the plane of the system for processing holographic interferograms], *Nauchnoe obozrenie* [Scientific review], 2013, No. 12, pp. 190-195.
15. *Mayorov E.E., Mashek A.C.H., Udakhina S.V., Tsygankova G.A., Khaidarov G.G., Cpernyak T.A.* Razrabotka kompyuternoy interferentsionnoy sistemy kontrolya nekladkikh poverkhnostey [Development of a computer interference of the control system of non-smooth surfaces], *Pribory* [Instruments], 2015, No. 11 (185), pp. 26-31.
16. *Prokopenko V.T., Maiorov E.E., Mashek A.Ch., Udakhina S.V., Tsygankova G.A., Khaidarov A.G., Chernyak T.A.* Optiko-elektronnyy pribor dlya kontrolya geometricheskikh parametrov diffuzno otrazhayushhikh ob"ektov [Opto-electronic device to control the geometric parameters of the diffusely reflecting object], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2016, Vol. 59, No. 5, pp. 388-394.
17. *Prokopenko V.T., Maiorov E.E., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Abramyan V.K., Zaitsev Yu.E., Khaidarov A.G., Khaidarov G.G.* Primenenie poperechno-sdvigovoy interferometrii v golografii dlya kontrolya geometricheskikh parametrov diffuzno otrazhayushhikh poverkhnostey [Application of cross-shear interferometry to holography for inspection of geometrical parameters of diffusely reflecting surfaces], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2017, Vol. 60, No. 4, pp. 331-339.
18. *Maiorov E.E., Dagaev A.V., Ponomarev S.V., Chernyak T.A.* Issledovanie interferometra sdviga v fazoizmeritel'nykh priborakh i sistemakh rasshifrovki golograficheskikh interferogramm [Analysis of the shearing interferometer in gazoizmeritelnye devices and systems of decoding holographic interferograms], *Nauchnoe priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2017, Vol. 27, No. 2, pp. 32-40.

19. *Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Udakhina S.V., Tsygankova G.A., Chernyak T.A.* Optiko-ehlektronnaya komp'yuternaya sistema dlya obnaruzheniya vneshnikh agentov v podpoverkhnostnykh sloyakh kozhnogo pokrova [Optical-electronic computer system for the detection of external agents at sub-surface layers of the skin], *Meditsinskaya tekhnika* [Bio-medical Engineering], 2016, No. 2, pp. 7-10.
20. *Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Kurlov A.V., Khokhlova M.V., Kirik D.I., Kapralov D.D.* Eksperimental'noe issledovanie metrologicheskikh kharakteristik avtomatizirovannoy interferometricheskoy sistemy izmereniya formy poverkhnosti diffuzno otrazhayushhikh ob"ektov [An Experimental study of metrological characteristics of automated interferometric measurement of surface shape of diffusely reflecting objects], *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement techniques], 2017, No. 10, pp. 33-37.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. Куликов.

**Майоров Евгений Евгеньевич** – Университет при Межпарламентской Ассамблее ЕврАзЭС; e-mail: majorov\_ee@mail.ru; 194044, г. Санкт-Петербург, ул. Смольячкова, д. 14, к. 1, Лит. Б.; тел.: 89112174733; к.т.н.; доцент.

**Машек Александр Чеславович** – Военно-морской политехнический институт; e-mail: mashek50@mail.ru; 196604, г. Пушкин, Кадетский б-р, д. 1; тел.: 89046325077; преподаватель.

**Цыганкова Галина Александровна** – e-mail: galusinka@mail.ru; тел.: 89046325077; к.ф.-м.н.; доцент.

**Абрамян Володя Казаросович** – Военная академия связи им. С.М. Буденного; e-mail: Vilik1940@gmail.com; 194064, г. Санкт-Петербург, К-64, Тихорецкий проспект, д. 3; тел.: 89119950908; д.т.н.; профессор.

**Константинова Анна Алексеевна** – e-mail: konstantinova.a.a@mail.ru; тел.: 88123656802; к.т.н.; доцент.

**Хайдаров Геннадий Гасимович** – Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет); e-mail: haidarovg@gmail.ru; 190013, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 26; тел.: 89500453315; к.т.н.; доцент.

**Хайдаров Андрей Геннадьевич** – e-mail: andreychaidarov@gmail.ru; тел.: 89213816141; к.т.н.; доцент.

**Maiorov Evgeny Evgenievich** – University at the inter-parliamentary Assembly of EurAsEC; e-mail: majorov\_ee@mail.ru; 14-1, B, Smolyachkova street, Saint-Petersburg, 194044, Russia; phone: +79112174733; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Mashek Alexander Cheslavovich** – Naval Polytechnic Institute; e-mail: mashek50@mail.ru; 1, Kadetskiy ave., Pushkin, 196604, Russia; phone: +79046325077; teacher.

**Tsygankova Galina Aleksandrovna** – e-mail: mashek50@mail.ru; phone: +79046325077; cand. of ph.-math. sc.; associate professor.

**Abramyan Volodya Kazarovovich** – Military Academy of telecommunications named S.M. Budyonny; e-mail: Vilik1940@gmail.com; 3, Tikhoretsky ave., Saint-Petersburg, 194064, Russia; phone: +79119950908; dr. of eng. sc.; professor.

**Konstantinova Anna Alexeevna** – e-mail: konstantinova.a.a@mail.ru; phone: +78123656802; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Khaidarov Gennady Gasimovich** – Saint-Petersburg state technological institute (technical university); e-mail: haidarovg@gmail.ru; 26, Moscow ave., Saint-Petersburg, 190013, Russia; phone: +79500453315; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Khaidarov Andrey Gennadievich** – e-mail: andreychaidarov@gmail.ru; phone: +79500453315; cand. of eng. sc.; associate professor.