

tion force and energy in frequency modulation force spectroscopy // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84. No.10. P. 1801–1803. doi:10.1063/1.1667267.

9. Гоголинский К. В., Решетов В. Н., Усеинов А. С. Измерение твердости в субмикронном и нанометровом диапазонах линейных размеров // Мир измерений. 2010. № 8. С. 41–47.

10. Meshtcheryakov V. V., Meshtcheryakov A. V. Scan speed control for tapping mode SPM // Nanoscale Res. Lett. 2012. V. 7. No. 1. P. 121–125.

11. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Учеб. пособие: для вузов. В 5 т. Т. I. Механика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.

12. Крылов Н. М., Боголюбов Н. Н. Введение в нели-

нейную механику. Москва, Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004.

13. Бесекерский В. А., Попов Е. И. Теория систем автоматического управления. СПб.: Изд-во «Профессия», 2003.

14. Масленников В. В., Мещеряков В. В., Довгополая Е. А. Метод анализа САР, описываемых математической моделью с кубическим характеристическим уравнением // Автоматика и Телемеханика. 2016. № 12. С. 59–69.

15. Pal Jen Wei, Jen Fin Lin. Modified method for continuous stiffness measurement // J. Mater. Res. 2009. V. 24. No. 3. P. 599–606.

Дата принятия: 23.03.2017.

ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

531.717.8

Исследование погрешности фильтрации текстуры поверхности пространственным фильтром Гаусса

В. В. ПОРОШИН¹, Д. Ю. БОГОМОЛОВ¹, В. Г. ЛЫСЕНКО²

¹Московский политехнический университет, Москва, Россия, e-mail: bogom-ov@mail.ru

²Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, Москва, Россия, e-mail: Lysenko@vniims.ru

Проанализированы погрешности пространственной фильтрации текстуры поверхности с помощью фильтра Гаусса. Использована композиционная модель при математическом описании текстуры поверхности. Получена аналитическая зависимость погрешности фильтра Гаусса. Исследованы погрешности при фильтрации синусоидальной волны и наклона поверхности.

Ключевые слова: текстура поверхности, трёхмерная оценка, пространственный фильтр Гаусса, погрешность фильтрации.

The errors of areal filtering of surface texture using Gaussian filter were analyzed. Surface texture was defined by the composition mathematical model. The analytic expression for dependence of filtering error of areal Gaussian filter has been derived. The filtering errors obtained during the sinusoidal wave suppression and the linear surface inclination suppression were investigated.

Key words: surface texture, 3D-measurement assesment, areal Gaussian filter, filtering error.

Непрерывно возрастающие требования к точности измерений текстуры поверхности, а также развитие возможностей современного измерительного оборудования обуславливает постепенную замену двухмерного профильного подхода к оценке текстуры поверхности на трёхмерный [1, 2]. Толчком к стремительной активизации данного перехода послужила публикация в 2012 г. международного стандарта в области 3D-метрии текстуры поверхности [3]. Поскольку данный стандарт предусматривает трёхмерную пространственную фильтрацию текстуры поверхности, в комитете ISO началась разработка серии новых стан-

дартов. В настоящее время приняты стандарты [4–7]. В связи с появлением новых стандартов становится актуальным изучение метрологических свойств трёхмерных параметров текстуры поверхности и методов пространственной фильтрации.

Настоящее исследование направлено на внедрение новых средств 3D-метрии текстуры поверхности в части пространственной фильтрации высокоточных составляющих обнаруженных неровностей.

Оценка погрешности линейного цифрового фильтра. Текстура поверхности S в соответствии с композиционной моделью представляет алгебраиче-

скую сумму фильтруемой детерминированной компоненты M , соответствующей волнистости или отклонению формы, и случайной компоненты ξ , идентичной искомой шероховатости поверхности [8]:

$$S(x, y) = \xi(x, y) + M(x, y).$$

Результатом применения к общей текстуре поверхности S цифрового фильтра является фильтруемая компонента M^* , приблизительно равная детерминированной компоненте. Наиболее распространённый вариант цифрового фильтра – линейный цифровой фильтр, построенный по принципу скользящего осреднения с весовой функцией w . В общем виде его можно записать в виде двойного интеграла:

$$M^*(x, y) = \int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} [\xi(x+r, y+l) + M(x+r, y+l)] w(r, l) dr dl,$$

где T_x, T_y – размеры окна осреднения; r, l – вспомогательные подынтегральные переменные.

Погрешность фильтрации можно вычислить как разность M и M^* :

$$\begin{aligned} U(x, y) &= M^*(x, y) - M(x, y) = \\ &= \int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} [\xi(x+r, y+l) + M(x+r, y+l)] w(r, l) dr dl - M(x, y). \end{aligned}$$

Регулярную компоненту поверхности M в области усреднения можно аппроксимировать рядом Тейлора. Если в разложении отбросить все слагаемые выше второго порядка, то получим следующее выражение [9]:

$$\begin{aligned} M(x+r, y+l) &\approx M(x, y) + \frac{\partial M(x, y)}{\partial x} r + \frac{\partial M(x, y)}{\partial y} l + \frac{\partial^2 M(x, y)}{\partial x^2} \frac{r^2}{2} + \\ &+ \frac{\partial^2 M(x, y)}{\partial x \partial y} rl + \frac{\partial^2 M(x, y)}{\partial y^2} \frac{l^2}{2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Преобразуем линейный фильтр с учётом аппроксимации (1):

$$\begin{aligned} M^*(x, y) &= \int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} \left[\xi(x+r, y+l) + M(x, y) + \frac{\partial M(x, y)}{\partial x} r + \right. \\ &+ \frac{\partial M(x, y)}{\partial y} l + \frac{\partial^2 M(x, y)}{\partial x \partial y} rl + \frac{\partial^2 M(x, y)}{\partial x^2} \frac{r^2}{2} + \left. \frac{\partial^2 M(x, y)}{\partial y^2} \frac{l^2}{2} \right] w(r, l) dr dl. \end{aligned} \quad (2)$$

Если в выражении (2) раскрыть скобки, то фильтр будет представлен в виде алгебраической суммы составляющих, соответствующих компонентам Тейлоровского разложения M :

$$\begin{aligned} M^*(x, y) &= \int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} \xi(x+r, y+l) w(r, l) dr dl + M(x, y) \int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} w(r, l) dr dl + \\ &+ \frac{\partial M(x, y)}{\partial x} \int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} r w(r, l) dr dl + \frac{\partial M(x, y)}{\partial y} \int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} l w(r, l) dr dl + \\ &+ \frac{\partial^2 M(x, y)}{\partial x^2} \int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} \frac{r^2}{2} w(r, l) dr dl + \frac{\partial^2 M(x, y)}{\partial y^2} \int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} \frac{l^2}{2} w(r, l) dr dl + \\ &+ \frac{\partial^2 M(x, y)}{\partial x \partial y} \int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} rl w(r, l) dr dl. \end{aligned}$$

На практике все фильтры обладают симметричной (не-

чётной по координатам x, y) весовой функцией. В таком случае слагаемые, соответствующие

$$\frac{\partial M(x, y)}{\partial x}, \frac{\partial M(x, y)}{\partial y}, \frac{\partial^2 M(x, y)}{\partial x \partial y}, \text{ обращаются в нуль:}$$

$$\begin{aligned} M^*(x, y) &= \int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} \xi(x+r, y+l) w(r, l) dr dl + M(x, y) \int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} w(r, l) dr dl + \\ &+ \frac{\partial^2 M(x, y)}{\partial x^2} \int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} \frac{r^2}{2} w(r, l) dr dl + \frac{\partial^2 M(x, y)}{\partial y^2} \int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} \frac{l^2}{2} w(r, l) dr dl. \end{aligned} \quad (3)$$

С учётом полученного разложения (3), запишем погрешность фильтрации в виде суммы четырёх основных компонент:

$$\begin{aligned} U(x, y) &= M(x, y) \left(\int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} w(r, l) dr dl - 1 \right) + \int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} \xi(x+r, y+l) w(r, l) dr dl + \\ &+ \frac{\partial^2 M(x, y)}{\partial x^2} \int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} \frac{r^2}{2} w(r, l) dr dl + \frac{\partial^2 M(x, y)}{\partial y^2} \int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} \frac{l^2}{2} w(r, l) dr dl. \end{aligned} \quad (4)$$

Первое слагаемое в выражении (4) представляет собой погрешность, вызванную конечностью окна фильтрации, так как для бесконечного окна она обращается в нуль. Второе слагаемое связано с искажением, порождаемым случайной компонентой поверхности, и зависит от корреляционных свойств случайной компоненты. Третье слагаемое порождается регулярной компонентой поверхности и определяется крутизной её формы.

Погрешность, вызванная случайной компонентой поверхности, является свёрткой эргодического стационарного случайного процесса:

$$z(x, y) = \int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} \xi(x+r, y+l) w(r, l) dr dl. \quad (5)$$

Свойства свёртки (5) можно оценить количественно с помощью математического ожидания и дисперсии. Математическое ожидание равно нулю, так как ξ – центрированный эргодический процесс, имеющий нулевое математическое ожидание:

$$M_z = \int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} M[\xi(x+r, y+l)] w(r, l) dr dl = M_\xi \int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} w(r, l) dr dl = 0.$$

Дисперсия случайного процесса $z(x, y)$ сводится к интегралу от автокорреляционной функции процесса ξ :

$$\sigma_z^2 = 4 \int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} K_\xi(r, l) w(r, l) dr dl = 4 \sigma_\xi^2 \int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} \rho_\xi(r, l) w(r, l) dr dl.$$

Поскольку весовая функция не превышает единицы, в общем случае интеграл можно ограничить сверху длиной корреляции:

$$\sigma_z^2 \leq 4 \sigma_\xi^2 \int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} \rho_\xi(r, l) dr dl = 4 \sigma_\xi^2 S_k.$$

Данную грубую оценку можно скорректировать, если известен максимум $w_{\max}$ весовой функции:

$$\sigma_z^2 \leq 4 \sigma_\xi^2 S_k w_{\max}.$$

После суммирования полученных результатов, итоговая погрешность линейного фильтра может быть оце-

нена сверху с помощью следующего выражения:

$$\sigma_n^2(x, y) \leq M^2(x, y) \left(\int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} w(r, l) dr dl - 1 \right)^2 + 4\sigma_\xi^2 S_k w_{\max} + \left[\frac{\partial^2 M(x, y)}{\partial x^2} \int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} \frac{r^2}{2} w(r, l) dr dl + \frac{\partial^2 M(x, y)}{\partial y^2} \int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} \frac{l^2}{2} w(r, l) dr dl \right]^2.$$

Оценка погрешности фильтра Гаусса. Для наиболее распространённого фильтра Гаусса с отсечками шага λ_{cx} , λ_{cy} по осям x , y весовая функция имеет вид

$$w(x, y) = \frac{1}{a^2 \lambda_{cx} \lambda_{cy}} \exp \left[-\pi \left(\frac{x}{a \lambda_{cx}} \right)^2 \right] \exp \left[-\pi \left(\frac{y}{a \lambda_{cy}} \right)^2 \right], \quad (6)$$

где $a = \sqrt{\ln 2 / \pi}$.

Максимальное значение весовая функция (6) принимает в нуле, следовательно оценкой для погрешности случайной компоненты при фильтрации с помощью фильтра Гаусса будет выражение

$$\sigma_z^2 \leq 4\sigma_\xi^2 S_k / (a^2 \lambda_{cx} \lambda_{cy}).$$

Для оценки погрешности регулярной компоненты при фильтрации с помощью фильтра Гаусса можно воспользоваться следующими аналитическими зависимостями:

$$\left. \begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-kx^2} dx &= \sqrt{\pi/k}; \\ \int_{-\infty}^{\infty} x^2 e^{-kx^2} dx &= \frac{1}{2k} \sqrt{\pi/k}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

С учётом зависимостей (7) можно вычислить интеграл, аналогичный двум последним слагаемым в выражении погрешности, но взятый по бесконечной области:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{r^2}{2} w(r, l) dr dl &= \frac{1}{a^2 \lambda_{cx} \lambda_{cy}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[-\pi (y / (a \lambda_{cy}))^2 \right] dy \times \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} \frac{r^2}{2} \exp \left[-\pi (x / (a \lambda_{cx}))^2 \right] dx = \frac{1}{a^2 \lambda_{cx} \lambda_{cy}} \sqrt{\pi (a \lambda_{cy})^2 / \pi} \times \\ &\times \frac{(a \lambda_{cx})^2}{4\pi} \sqrt{\pi (a \lambda_{cx})^2 / \pi} = \frac{(a \lambda_{cx})^2}{4\pi}. \end{aligned}$$

Поскольку подынтегральная функция неотрицательна, то интеграл по конечной области не превышает интеграла по бесконечной. Коэффициенты при вторых частных производных регулярной компоненты можно оценить сверху:

$$\int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} \frac{r^2}{2} w(r, l) dr dl \leq \frac{(a \lambda_{cx})^2}{4\pi}; \quad \int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} \frac{l^2}{2} w(r, l) dr dl \leq \frac{(a \lambda_{cy})^2}{4\pi}.$$

Весовая функция фильтра Гаусса соответствует нормальному распределению с параметрами:

$$m_x = m_y = 0; \quad \sigma_x = a \lambda_{cx} / \sqrt{2\pi}; \quad \sigma_y = a \lambda_{cy} / \sqrt{2\pi}.$$

В таком случае погрешность, вызванную конечностью

окна фильтрации, можно оценить через функцию Лапласа:

$$\begin{aligned} M(x, y) \left(\int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} w(r, l) dr dl - 1 \right) &= M(x, y) [4\Phi(\sqrt{2\pi} T_x / (a \lambda_{cx})) \times \\ &\times \Phi(\sqrt{2\pi} T_y / (a \lambda_{cy})) - 1] = \\ &= M(x, y) [\operatorname{erf}(\sqrt{\pi} T_x / (a \lambda_{cx})) \operatorname{erf}(\sqrt{\pi} T_y / (a \lambda_{cy})) - 1]. \end{aligned}$$

Таким образом, суммарную погрешность фильтра Гаусса можно оценить сверху с помощью следующего выражения:

$$\begin{aligned} \sigma_n^2(x, y) &\leq [1 - \operatorname{erf}(\sqrt{\pi} T_x / (a \lambda_{cx})) \operatorname{erf}(\sqrt{\pi} T_y / (a \lambda_{cy}))]^2 M^2(x, y) + \\ &+ 4\sigma_\xi^2 S_k / (a^2 \lambda_{cx} \lambda_{cy}) + \frac{a^4}{16\pi^2} \left(\lambda_{cx}^2 \frac{\partial^2 M(x, y)}{\partial x^2} + \lambda_{cy}^2 \frac{\partial^2 M(x, y)}{\partial y^2} \right)^2. \end{aligned} \quad (8)$$

Анализ погрешности фильтрации для характерных типов детерминированных составляющих. Характерная амплитуда шероховатости $R_{\max}$ находится в диапазоне 1–10 мкм, а соответствующие базовые длины $L_c = 0,25 \dots 2,5$ мм. Для большинства методов обработки поверхности (в особенности для абразивных методов) высотное распределение неровностей близко к нормальному, а амплитуда шероховатости A_ξ приблизительно в шесть раз больше σ_ξ .

В дальнейшем анализе за единицу отсчёта примем шероховатую поверхность с $\sigma_\xi = 1/6$ мкм, что совпадает с амплитудой шероховатости. Такой поверхности соответствует базовая длина в 0,8 мм [10]. Значение длины корреляции S_k принято за 0,1. Ширина окна фильтрации T_x не должна превышать базовой длины L_c . Характерные размеры фильтруемой детерминированной составляющей неровностей поверхности заданы относительно принятой единицы отсчёта.

На практике наиболее распространёнными случаями детерминированной составляющей текстуры поверхности являются синусоидальная волнистость и наклон поверхности. При фильтрации наклона детерминированная составляющая представляет собой линейную функцию:

$$M(x, y) = Ax + By + C. \quad (9)$$

Вторые производные от линейной функции (9) обращаются в нуль, поэтому от координат (x, y) зависит только погрешность конечности окна фильтрации. Она максимальна на краях поверхности и пропорциональна $M_{\max}^2$. Итоговая формула для погрешности в этом случае упрощается до выражения

$$\begin{aligned} \sigma_n^2(x, y) &\leq [1 - \operatorname{erf}(\sqrt{\pi} T_x / (a \lambda_{cx})) \operatorname{erf}(\sqrt{\pi} T_y / (a \lambda_{cy}))]^2 M_{\max}^2 + \\ &+ 4\sigma_\xi^2 S_k / (a^2 \lambda_{cx} \lambda_{cy}). \end{aligned}$$

Погрешность случайной компоненты можно минимизировать при увеличении параметров фильтра λ_{cx} , λ_{cy} . Для минимизации погрешности конечности окна фильтрации ширина окна T должна быть достаточной по сравнению с λ_c . Значения погрешности σ_n^2 конечности окна фильтрации фильтра Гаусса при $M_{\max} = 1$ для характерных соотношений T / λ_c , равных 1, 1/2, 1/3, 1/4, 1/5 составляют,

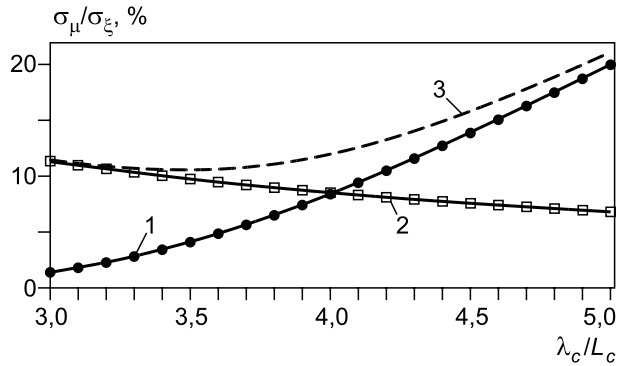


Рис. 1. Погрешность фильтра Гаусса при фильтрации наклона поверхности:
1 – погрешность конечности окна фильтрации; 2 – погрешность случайной компоненты; 3 – суммарная погрешность

Т а б л и ц а 1

Погрешность фильтрации наклона фильтром Гаусса

Параметр	$M_{\max}/R_{\max}$				
	0,5	1	2	5	10
$\sigma_{\mu}/R_{\max}, \%$	9,48	10,56	11,56	12,75	13,6
$\sigma_{\mu}/M_{\max}, \%$	18,98	10,56	5,78	2,55	1,36
λ_c/L	3,9	3,5	3,1	2,8	2,6

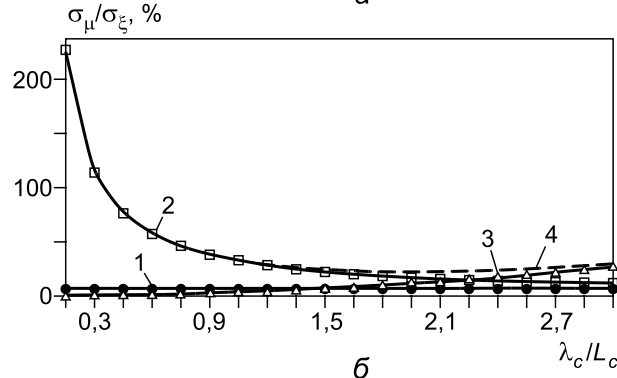
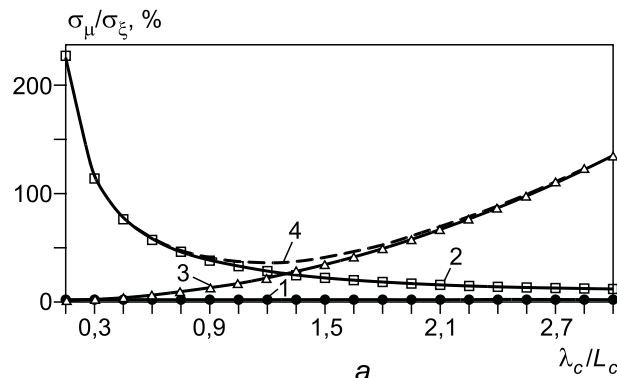


Рис. 2. Погрешность фильтра Гаусса при фильтрации волны с шагом, равным базовой длине шероховатости, для $w_{\max}=R_{\max}$, $\omega=1$ (а) и $w_{\max}=5R_{\max}$, $\omega=5$ (б):
1 – погрешность конечности окна фильтрации; 2 – погрешность случайной компоненты; 3 – погрешность регулярной компоненты; 4 – суммарная погрешность

соответственно 10^{-28} ; 10^{-6} ; 0,019; 0,705; 3,98.

Из-за изотропности регулярной и нормальной составляющих поверхности в расчётах предполагалось, что $\lambda_{cx}=\lambda_{cy}$. Оптимальные значения погрешности достигаются при максимальной ширине окна $T=L_c=100\%$. На рис. 1 представлена итоговая погрешность и обе её составляющие для $M_{\max}=1$, при этом высота наклона поверхности равна амплитуде шероховатости. Оптимальное значение параметра $\lambda_c=3,5L_c$, при этом погрешность фильтрации составляет 10,56 %. В табл. 1 представлены значения погрешности и оптимальные параметры фильтрации для различных соотношений $M_{\max}/R_{\max}$.

Погрешность фильтрации наклона поверхности приблизительно пропорциональна амплитуде её шероховатости и в меньшей степени зависит от абсолютного наклона. Максимальная погрешность наблюдается вблизи края этой поверхности.

Синусоидальная волнистость в трёхмерном случае описывается произведением двух синусоид:

$$M(x,y)=w_{\max}\sin\left(\frac{x}{\omega_x}+\varphi_x\right)\sin\left(\frac{y}{\omega_y}+\varphi_y\right).$$

Вторые частные производные от регулярной составляющей текстуры поверхности в таком случае примут вид:

$$\frac{\partial^2 M(x,y)}{\partial x^2}=\frac{w_{\max}}{\omega_x^2}\sin\left(\frac{x}{\omega_x}+\varphi_x\right)\sin\left(\frac{y}{\omega_y}+\varphi_y\right);$$

$$\frac{\partial^2 M(x,y)}{\partial y^2}=\frac{w_{\max}}{\omega_y^2}\sin\left(\frac{x}{\omega_x}+\varphi_x\right)\sin\left(\frac{y}{\omega_y}+\varphi_y\right).$$

Оценивая погрешность по предельным значениям, можно считать, что

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2}\approx\frac{w_{\max}}{\omega_x^2}; \quad \frac{\partial^2 M}{\partial y^2}\approx\frac{w_{\max}}{\omega_y^2}. \quad (10)$$

При подстановке оценки для частных производных второго порядка (10) в выражение (8) получается выражение

$$\sigma_u^2(x,y)\leq\left[1-\operatorname{erf}\left(\sqrt{\pi}T_x/(a\lambda_{cx})\right)\operatorname{erf}\left(\sqrt{\pi}T_y/(a\lambda_{cy})\right)\right]^2w_{\max}^2+4\sigma_{\xi}^2S_k/(a^2\lambda_{cx}\lambda_{cy})+a^4w_{\max}^2/(16\pi^2)(\lambda_{cx}^2/\omega_x^2+\lambda_{cy}^2/\omega_y^2)^2.$$

Принимая амплитуды волны и шероховатости сопоставимыми, можно полагать, что $w_{\max}=1$. Характерный шаг волнистости составляет 1–5 мм, что в относительных величинах соответствует 1...5 L_c .

В расчётах авторы исследовали изотропный случай, когда $\omega_x=\omega_y$, $\lambda_{cx}=\lambda_{cy}$. Соотношение T/L_c было принято 1/3, что обеспечило малую погрешность конечности окна фильтрации без существенного увеличения прочих погрешностей, при этом допустимый параметр λ_c мог достигать значения 3.

В табл. 2 представлены оптимальные значения параметра фильтрации и погрешности для различных ω при сохранении соотношения $w_{\max}/\omega=1$. На рис. 2, а показаны все составляющие погрешности и итоговая погрешность при $\omega=1$, $w_{\max}=1$, а на рис. 2, б – при $\omega=5$, $w_{\max}=5$.

Т а б л и ц а 2

Погрешность фильтрации наклона фильтром Гаусса при $w_{\max}/\omega = 1$

Параметры	ω				
	1	2	3	4	5
$\sigma_i/R_{\max}, \%$	35,7	28,5	25,1	23,2	22
λ_c/L	1,20	1,50	1,65	1,80	1,95

Из анализа полученных для результатов выявлено, что при сохранении соотношения A/ω фиксированным суммарная погрешность фильтрации варьируется в умеренных масштабах. При изменении соотношения $w_{\max}/\omega$ вариация суммарной погрешности гораздо значительнее. В табл. 3 представлено уменьшение суммарной погрешности при увеличении шага волны при фиксированном значении высоты волны $w_{\max} = 2$.

Т а б л и ц а 3

Погрешность фильтрации наклона фильтром Гаусса при $w_{\max} = 2$

Параметры	ω				
	1	2	3	4	5
$\sigma_i/R_{\max}, \%$	45,1	28,5	21,8	18,1	15,6
λ_c/L	0,90	1,50	1,95	2,40	2,70

Закключение. Проведённый с помощью линейного цифрового фильтра Гаусса анализ погрешности цифровой пространственной фильтрации текстуры поверхности позволил выявить основные влияющие факторы, и получить расчётные аналитические зависимости для общего и частных случаев фильтрации наклона и волнистости. Вычисления показали, что данный фильтр применим для фильтрации рассмотренных видов регулярной составляющей поверхности. Наименьшая погрешность фильтра наблюдается при подавлении волн с большим шагом и малой амплитудой.

Полученные результаты можно применить при импле-

ментации международных стандартов [3, 5], а также при внедрении новых средств 3D-метрии текстуры поверхности в отечественной промышленности.

Исследование проведено при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания (№ 114030440026) на оказание услуг (выполнение работ) за 2014–2016 гг.

Л и т е р а т у р а

1. Уайтхауз Д. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы. М.: Интеллект, 2009.
2. Muralikrishnan B, Raja J. Computational Surface and Roundness Metrology. London: Springer, 2009.
3. ISO 25178-2:2012. Geometric Product Specification (GPS). Surface texture: areal. Pt. 2: Terms, definitions and surface texture parameters. International Standard.
4. ISO 16610-60:2015. International Organization for Standardization Geometrical Product Specification (GPS). Filtration. Pt. 60: Linear areal filters: Basic concepts.
5. ISO 16610-61:2015. International Organization for Standardization, Geometrical Product Specifications (GPS). Filtration. Pt. 61: Linear areal filters. Gaussian filters.
6. ISO 16610-71:2014. International Organization for Standardization, Geometrical Product Specification (GPS). Filtration. Pt. 71: Robust areal filters: Gaussian regression filters.
7. ISO 16610-85:2013. International Organization for Standardization, Geometrical Product Specification (GPS). Filtration. Pt. 85: Morphological areal filters. Segmentation.
8. Loukjanov V. S., Lisenko V. G. The Measurement of surface topography parameters described by the composition of the random and deterministic components // Wear. 1982. V. 83. No. 1. P. 79–89.
9. Лукьянов В. С., Лысенко В. Г. Влияние аппроксимации на погрешность цифровых измерений параметров шероховатости // Измерительная техника. 1982. № 2. С. 106–110.
10. ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.

Дата принятия: 16.11.2016.