
УДК 621.517:681.142.36

АНАЛИЗ И УСТРАНЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ФАКТОРА НА ПАРАМЕТРИЧЕСКУЮ ОЦЕНКУ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ, ПРОИЗВОДИМУЮ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫМ КОМПЛЕКСОМ

© 2010 А.Д. Абрамов, А.И. Никонов¹

В статье рассматривается метод компенсации дополнительной погрешности измерения опτικο-электронными средствами параметров микрорельефа поверхности, которая возникает вследствие отклонения уровня светового потока от его номинального значения. Метод основывается на определении автокорреляционных функций по изображениям анализируемых поверхностей.

Ключевые слова: метод, опτικο-электронный комплекс, измерение, преобразователь, поверхность, световой поток, изображение, погрешность, компенсация, автокорреляция.

Применение опτικο-электронных измерительных преобразователей совместно со средствами компьютерной обработки сигналов имеет большие технические перспективы в области оценки параметров микрорельефа поверхностей деталей машин и механизмов. В настоящей работе рассматриваются исследования, позволяющие выявить количественное влияние фактора оптической природы на результаты этой оценки, а также возможность его существенного снижения.

Для проведения этих исследований авторами был создан и применен измерительный комплекс [1], который включает в себя оптическую систему, видеокамеру, персональный компьютер и специально разработанное программное обеспечение. Данный комплекс образует информационно-измерительную систему (ИИС), которая предполагает определение таких параметров интегрального характера, как среднее арифметическое отклонение профиля исследуемой поверхности от средней линии Ra , высоту неровностей профиля по конечному числу точек Rz и т. п. [2; 3].

Общая структура ИИС оценки параметров микрорельефа поверхности, отражающая состав рассматриваемого опτικο-электронного комплекса, приведена на рис. 1. Она состоит из выделенной площади (ВП) исследуемой части поверхности, источника опорного светового потока (ИСП), видеокамеры (ВК) и блока цифровой обработки сигналов (БЦОС). Система состоящая из ИСП и ВК может рассматриваться как опτικο-электронный измерительный преобразователь (ИП). Со-

¹Абрамов Алексей Дмитриевич (esib@samgtu.ru), Никонов Александр Иванович (nikonovai@mail.ru), кафедра электронных систем и информационной безопасности Самарского государственного технического университета, 443100, Российская Федерация, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

вокупность ИСП и ВП образует канал первичного рельефно-оптического преобразования.

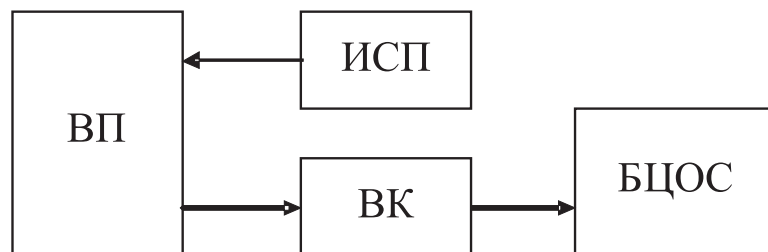


Рис. 1. Структура ИИС оценки параметров микрорельефа

С помощью рассматриваемой ИИС участок анализируемой поверхности размером $L_1 \times L_2$ считывают по строкам и столбцам строчно-кадровым растром телевизионной передающей камеры с ПЗС-матрицей. ТВ-камера матричного типа преобразует оптические сигналы с поля зрения в электрические видеосигналы. С помощью аналогово-цифрового преобразователя видеосигналы переводятся в цифровые дискретные значения и записываются в память БЦОС. Таким образом, в памяти БЦОС формируется кадр исходного полутонового изображения анализируемой поверхности формата $K_1 \times K_2$ точек дискретизации — пикселей.

Для материально-предметного обеспечения исследований были изготовлены методом бесцентрового шлифования три образца из стали ШХ15 с различной шероховатостью поверхности. Шероховатость определялась на профилографе модели SJ-201P [3]: образец № 1 имел $Ra = 0,56$ мкм, образец № 2 — $Ra = 0,13$ мкм и образец № 3 — $Ra = 0,084$ мкм.

Оптико-электронная система комплекса была настроена таким образом, что анализируемая поверхность эталонных образцов имела размер $3 \times 2,5$ мм. Световой поток падал на исследуемую поверхность под углом 45° . Формат видеокadra, записываемого в память компьютера, составлял $K_1 \times K_2 = 320 \times 240$ пикселей.

В качестве примера на рис. 2 приведено характерное изменение уровня яркости видеосигнала по строке видеокadra для поверхности образца № 2.

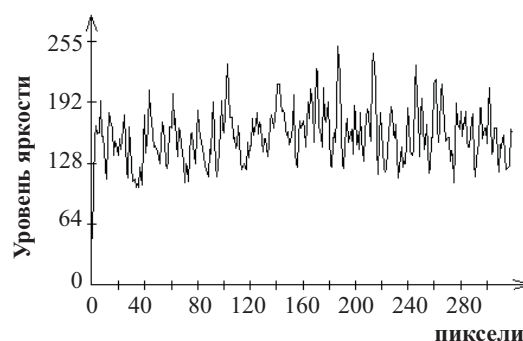


Рис. 2. Уровень яркости видеосигнала для поверхности образца № 2

Отметим, что при использовании черно-белой видеокамеры на каждый пиксель изображения поверхности в памяти компьютера отводится один байт. Следовательно, сигнал яркости может принимать значения, лежащие в диапазоне 0-255

относительных единиц. Анализ полученных видеосигналов показал, что с уменьшением шероховатости поверхности наблюдаются существенное уменьшение амплитуды переменной составляющей сигнала и, кроме того, ее сильная зависимость от освещенности исследуемой поверхности.

Ниже приводятся результаты анализа ИИС оценки параметров микрорельефа в части проявления и компенсации ее дополнительной погрешности, возникающей из-за нестабильности величины светового потока Φ_o , который играет здесь роль опорной величины. Входную величину, воздействующую на вход оптико-электронного ИП и формируемую на исследуемой ВП, в которую входят r -типов элементарных площадок с различным микрорельефом, можно представить как среднее арифметическое

$$P_\mu = \sum_{i=1}^r \alpha_{Pi} \cdot P_{\mu i}, \quad (1)$$

где $P_{\mu i}$ — i -й компонент входной величины преобразуемого параметра микрорельефа, например, среднего арифметического отклонения профиля от средней линии Ra [2; 3]; α_{Pi} — весовой коэффициент, соответствующий доле элементарных площадок ВП с микрорельефом i -го типового уровня (при общем числе типовых уровней r). Каждый i -тип содержит l_i -элементарных площадок и поэтому

$$\alpha_{Pi} = l_i/l_s, \quad l_s = \sum_{i=1}^r l_i.$$

Тогда входная величина ИП — интегральный параметр микрорельефа (1) — может быть выражена еще и следующим образом:

$$P_\mu = \left(\sum_{i=1}^r l_i \cdot P_{\mu i} \right) / l_s = \left(\sum_{j=1}^{l_s} P_{\mu j} \right) / l_s.$$

Набор значений $\{l_i; i = 1, \dots, r\}$ определяется конкретным характером механической обработки ВП, интегральную числовую оценку которого и призвана обеспечить рассматриваемая ИИС.

Выходом ИСП, входящего в состав аппаратуры ИИС (см. рис. 1), является величина опорного светового потока Φ_o . Ее действие на j -ю элементарную площадку ВП вызывает появление соответствующего светового потока величины Φ_{Bj} , отраженного от данной площадки. Каждой j -й элементарной площадке ВП соответствует, во-первых, один из выходов канала первичного рельефно-оптического преобразования — величина Φ_{Bj} , воздействующая, в свою очередь, на один из фоточувствительных входов ПЗС-матрицы, и, во-вторых, определенный электрический выход $U_{\Delta j}$ ПЗС-матрицы. Величины типа Φ_{Bi} , $U_{\Delta i}$ выделяются i -ми группами соответственно для элементарных площадок ВП и выводов ПЗС-матрицы. Каждая такая группа составляется из одинаковых значений соответственно $\Phi_{Bj} = \Phi_{Bi}$ и $U_{\Delta j} = U_{\Delta i}$.

Цифровое представление очередного измерительного результата на выходе ВК выполняется путем подачи сигнала $U_{\Delta j} = U_{\Delta i}$ на вход АЦП, подключенного к выходу ПЗС-матрицы.

Согласно результатам проведенных авторами экспериментальных исследований, номинальная функция преобразования i -го компонента входной величины P_μ для ИП указанного типа с выходными величинами ПЗС матрицы, соответствующими i -му подмножеству одинаково обработанных элементов ВП, может быть представлена как

$$U_{\text{эin}} = U_{\text{эjn}} = K_{\text{фэ}} \cdot \Phi_{\text{вin}} = (K_{\text{фэ}} \cdot \Phi_{\text{он}}) Y_{\text{вin}},$$

$$Y_{\text{вin}} = (\Phi_{\text{вin}}/\Phi_{\text{он}}) = f(\Pi_{\mu i}), \quad \Pi_{\mu i \text{ min}} \leq \Pi_{\mu i} \leq \Pi_{\mu i \text{ max}}, \quad (2)$$

где $K_{\text{фэ}}$ — коэффициент физического преобразования светового потока в электрический сигнал ПЗС-матрицы, который в используемых диапазонах изменений измеряемой величины Π_{μ} и опорного светового потока Φ_o от них не зависит; $\Phi_{\text{он}}$ — номинальное значение величины Φ_o ; $\Phi_{\text{вin}}$ — номинальное значение светового потока $\Phi_{\text{вi}}$, поступающего от любого элемента из i -го подмножества площадок ВП, то есть $\Phi_{\text{вin}} = \Phi_{\text{вi}}(\Phi_{\text{он}}, \Pi_{\mu i})$; $\Pi_{\mu i \text{ min}}, \Pi_{\mu i \text{ max}}$ — границы используемого диапазона изменений Π_{μ} ; $f(\Pi_{\mu i})$ — функциональная зависимость номинальных значений нормированного выхода канала первичного рельефно-оптического преобразования $Y_{\text{вin}}$ от i -го компонента измеряемой величины Π_{μ} . Другими словами, $Y_{\text{вin}}$ из (2) характеризует отражательную способность i -го компонента ВП при воздействии на ВП номинального опорного светового потока $\Phi_{\text{он}}$. Для трех используемых образцов $\Pi_{\mu i \text{ min}} = Ra = 0,084$ мкм, $\Pi_{\mu i \text{ max}} = Ra = 0,56$ мкм. Функция $f(\Pi_{\mu i})$ практически с любой заданной степенью точности аппроксимируется полиномом некоторой степени m :

$$f_{\text{ап}}(\Pi_{\mu i}) = \sum_{p=0}^m a_p \cdot \Pi_{\mu i}^p, \quad (3)$$

где a_p — степенной коэффициент аппроксимации. Далее, без ущерба для точности количественного представления $f(\Pi_{\mu i})$ будем полагать, что за счет выбора подходящего порядка m ее значения практически совпадают с соответствующими значениями (3).

Для выбранных образцов с заданным микрорельефом были выполнены исследования о влиянии изменения интенсивности опорного светового потока Φ_o на традиционные характеристики видеосигнала, такие как его среднее значение $V_{\text{ср}}$ по всему кадру изображения ВП, средняя амплитуда переменной составляющей видеосигнала $U_{\text{ср}}$ и средний период его колебания $T_{\text{ср}}$ на уровне $V_{\text{ср}}$. Анализ полученных результатов показал, что наиболее информативной характеристикой из них, по которой можно идентифицировать (распознавать) микрорельефы с различными параметрами шероховатости, является средняя амплитуда переменной составляющей видеосигнала

$$U_{\text{ср}} = \frac{\sum_{j=1}^{K_1 \times K_2} U_{\text{эj}}}{K_1 \times K_2} = \frac{\sum_{i=1}^r \alpha_{\text{Pi}} \cdot U_{\text{эi}}}{r}, \quad (4)$$

где индексом j обозначен текущий элемент ПЗС-матрицы.

График зависимости $U_{\text{ср}} = f(\Phi_o)$ представлен на рис. 3. Примем за номинальное значение опорного светового потока величину $\Phi_{\text{он}} = 600 \cdot 10^{-3}$ лм, а для величин $\Phi_{o \text{ min}}, \Phi_{o \text{ max}}$ — значения $200 \cdot 10^{-3}$ лм и $1000 \cdot 10^{-3}$ лм соответственно.

Выбранный диапазон значений вполне соответствует рабочим значениям светового потока, встречающимся в практике применения рассматриваемых ИИС в производственных условиях. Отмеченные изменения светового потока могут происходить по разным причинам, например, вследствие колебаний напряжения питания источников света, изменения прозрачности атмосферы на рабочем месте при выполнении технологического процесса изготовления изделия, неконтролируемых бликов на исследуемой поверхности от посторонних источников света и т. п. Эти непредусмотренные воздействия на освещенность исследуемой по-

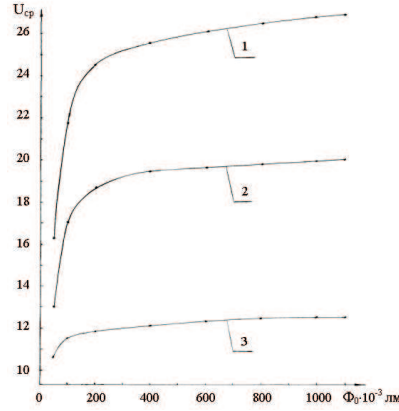


Рис. 3. Влияние изменения интенсивности опорного светового потока на среднюю амплитуду переменной составляющей видеосигнала U_{cp} :
1 – $Ra = 0,56$ мкм; 2 – $Ra = 0,13$ мкм; 3 – $Ra = 0,084$ мкм

верхности можно охарактеризовать с помощью функции влияния, для определения доминирующего характера которой были вычислены отношения величин U_{cp} для разных значений Ra при значениях светового потока $\Phi_{o\min}$, $\Phi_{oн}$, $\Phi_{o\max}$. Обозначив эти отношения как $K_{1,2} = U_{CP(Ra=0,56 \text{ мкм})} / U_{CP(Ra=0,13 \text{ мкм})}$, $K_{1,3} = U_{CP(Ra=0,56 \text{ мкм})} / U_{CP(Ra=0,084 \text{ мкм})}$ и $K_{2,3} = U_{CP(Ra=0,13 \text{ мкм})} / U_{CP(Ra=0,084 \text{ мкм})}$, получим их соответствующие значения: при световом потоке $\Phi_{o\min}$ $K_{1,2} = 1,31$, $K_{1,3} = 2,09$, $K_{2,3} = 1,59$; при световом потоке $\Phi_{oн}$ $K_{1,2} = 1,32$, $K_{1,3} = 2,10$, $K_{2,3} = 1,60$ и при световом потоке $\Phi_{o\max}$ $K_{1,2} = 1,33$, $K_{1,3} = 2,19$ и $K_{2,3} = 1,60$. Полученные значения указанных отношений позволяют обоснованно утверждать, что функция влияния неустойчивости опорного светового потока и соответственно дополнительная погрешность, вызываемая действием данного оптического фактора, имеют мультипликативный характер.

Обозначим через $\Delta\Phi$ отклонение опорного светового потока от своих номинальных значений как $\Delta\Phi = \Phi_o - \Phi_{oн}$, а через $f_{вл}(\Delta\Phi)$ – мультипликативную функцию влияния отклонений типа $\Delta\Phi$ на результаты измерительных преобразований Y_{vi} , $U_{эi}$ ($i = 1, \dots, r$). Тогда реальную функцию оптико-электронного преобразования i -го компонента измеряемой величины можно выразить следующим образом:

$$U_{эi} = (K_{фэ} \cdot \Phi_{oн}) Y_{vi}, \quad Y_{vi} = (\Phi_{vi} / \Phi_{oн}) = f_{вл}(\Delta\Phi) f(\Pi_{\mu i}),$$

$$\Pi_{\mu i \min} \leq \Pi_{\mu i} \leq \Pi_{\mu i \max}, \quad \Phi_{o \min} \leq \Phi_o \leq \Phi_{o \max}. \quad (5)$$

С любой практически требуемой точностью введенная выше функция влияния может быть аппроксимирована полиномом соответствующей степени n :

$$f_{вл}(\Delta\Phi) = 1 + \sum_{k=1}^n v_k (\Delta\Phi)^k, \quad (6)$$

где v_k – коэффициент при степени $(\Delta\Phi)^k$, определяемый согласно экспериментальным данным.

Введение нормирующих делителей Π_{μ}^H , $V_{э}^H$ соответственно для любого i -го компонента входной величины и для любого i -го уровня электрического напряжения позволяет дать следующее нормированное представление выходных величин ПЗС-матрицы и канала первичного рельефно-оптического преобразования и функции

влияния, описываемых выражениями (5) и (6):

$$Y_{\varepsilon i} = (U_{\varepsilon i}/V_{\varepsilon}^H) = K_{\text{МФЭ}} \cdot Y_{\text{ФВ}i}, Y_{\text{ФВ}i} = f_{\text{ВЛ}}(\eta_{\Phi}) \cdot f(X_{\mu i}), i = 1, \dots, r,$$

где $K_{\text{МФЭ}} = K_{\text{ФЭ}} \cdot \Phi_{\text{ОН}}/V_{\varepsilon}^H$; $\eta_{\Phi} = \Delta\Phi/\Phi_{\text{ОН}}$; $X_{\mu i} = \Pi_{\mu i}/\Pi_{\mu}^H$; $f_{\text{ВЛ}}(\eta_{\Phi}) = 1 + \sum_{k=1}^n B_{\text{МК}} \cdot \eta_{\Phi}^k$;
 $B_{\text{МК}} = B_k \cdot \Phi_{\text{ОН}}^k$; $f(X_{\mu i}) = \sum_{p=0}^m a_{\text{МР}} \cdot X_{\mu i}^p$, $a_{\text{МР}} = a_p(\Pi_{\mu}^H)^p$.

Дополнительная погрешность оптико-электронного ИП, вызываемая нестабильностью уровня опорного светового потока, в абсолютной форме выражения имеет вид:

$$\begin{aligned} \Delta Y_{\varepsilon i}(\eta_{\Phi}) &= Y_{\varepsilon i}^m - Y_{\varepsilon i\text{н}} = K_{\text{МФЭ}} \left(1 + \sum_{k=1}^n B_{\text{МК}} \cdot \eta_{\Phi}^k \right) f(X_{\mu i})_m - K_{\text{МФЭ}} \cdot f(X_{\mu i})_m = \\ &= K_{\text{МФЭ}} \cdot f(X_{\mu i})_m \sum_{k=1}^n B_{\text{МК}} \cdot \eta_{\Phi}^k, \end{aligned} \quad (7)$$

причем $Y_{\varepsilon i}^m$, $f(X_{\mu i})_m$ есть значение функции $f(X_{\mu i})$, соответствующее максимальному уровню аргумента $X_{\mu i}$, то есть уровню

$$X_{\mu i} = X_{\mu i \text{ max}} = \Pi_{\mu i \text{ max}}/\Pi_{\mu}^H; Y_{\varepsilon i\text{н}} = K_{\text{МФЭ}} \cdot f_{\text{ВЛ}}(0) f(X_{\mu i})_m = K_{\text{МФЭ}} \cdot f(X_{\mu i})_m. \quad (8)$$

Данная дополнительная погрешность в приведенной форме выражается как

$$\eta_{\varepsilon i}(\eta_{\Phi}) = \Delta Y_{\varepsilon i}(\eta_{\Phi})/Y_{\varepsilon i\text{н}} = \sum_{k=1}^n B_{\text{МК}} \cdot \eta_{\Phi}^k, \quad (9)$$

что в случае линейной интерпретации $f_{\text{ВЛ}}(\eta_{\Phi})$ принимает вид пропорции $\eta_{\varepsilon i} = \eta_{\varepsilon i\text{л}} = B_{\text{М1}} \cdot \eta_{\Phi}$. В частности, используя полученные экспериментальные данные (см. рис. 3), можно интерпретировать функцию влияния на интервале рабочих значений Φ_o как линейную зависимость вида $f_{\text{ВЛ}}(\eta_{\Phi}) = 1 + \eta_{\Phi}$, а дополнительную погрешность — как $\eta_{\varepsilon i} = \eta_{\Phi}$. Например, при $\eta_{\Phi} = \pm 0,15$ значение приведенной дополнительной погрешности составляет 15 %.

Задавая нормирующий делитель U_{ε}^H , получаем соответствующее нормированное представление функции (4) измерительного преобразования, область значений которой определяется уровнями средней амплитуды переменной компоненты исследуемого видеосигнала:

$$Y_{\text{СР}} = U_{\text{СР}}/U_{\varepsilon}^H = \left(\sum_{i=1}^r \alpha_{\text{П}i} \cdot Y_{\varepsilon i} \right) / r = K_{\text{МФЭ}} \cdot f_{\text{ВЛ}}(\eta_{\Phi}) f_{\Sigma}(X_{\mu}); f_{\Sigma}(X_{\mu}) = \sum_{i=1}^r \alpha_{\text{П}i} \cdot f(X_{\mu i}).$$

Анализ экспериментальных данных показывает: величины $U_{\text{СР}}$, $Y_{\text{СР}}$ содержат ту же мультипликативную компоненту $f_{\text{ВЛ}}$, что и функция $Y_{\varepsilon i}(X_{\mu i})$. Поэтому их вполне можно использовать для определения этой компоненты. Более того, заменяя в выражениях (7)–(9) величины $Y_{\varepsilon i}$, $Y_{\varepsilon i\text{н}}$, $f(X_{\mu i})$, $\eta_{\varepsilon i}$ соответственно на $Y_{\text{СР}}$, $Y_{\text{СРн}} = Y_{\text{СР}}(\eta_{\Phi} = 0)$, $f(X_{\mu})$, $\eta_{\text{СР}}$ (обозначим так приведенную погрешность), легко убедиться, что погрешности измерительных оценок для величин $Y_{\varepsilon i}$ и $Y_{\text{СР}}$ совпадают друг с другом, то есть $\eta_{\varepsilon i} = \eta_{\text{СР}} = \eta_{\Phi}$.

Наличие мультипликативного характера функции $f_{\text{ВЛ}}(\Delta\Phi)$, содержащейся в выражении выходной электрической величины оптико-электронного ИП, диктует выбор логометрического способа устранения рассматриваемой дополнительной

погрешности [4]. Однако традиционное применение логометрического способа оказывается здесь практически неприемлемым ввиду необходимости соблюдения исходного требования, связанного с обеспечением портативности блочно-выносной аппаратуры (БВА).

Действительно, традиционное применение логометрирования предусматривает введение в состав БВА дополнительного осветительного канала и второй ПЗС-матрицы, содержащих компенсационные величины типа $U_{эjзн}$, которые реализуются в знаменателях формируемых отношений $U_{эj}/U_{эjзн}$; $\max j = l_s$. Требуемое введение дополнительной аппаратуры существенно увеличивает габариты выносной части ИИС.

Поэтому применительно к используемой разновидности измерительного преобразования целесообразно выдвинуть иной принцип коррекции дополнительной погрешности, вызываемый нестабильностью опорного светового потока. Такой принцип может быть сформулирован в форме требования соблюдения однозначных соответствий между набором величин $(Y_{эi}(X_{\mu i}), i = 1, \dots, r)$ и двумя функционалами $G_x(Y_{эi}(X_{\mu i}), i = 1, \dots, r)$, $x = 1, 2$, множества значений которых связываются с измеряемыми и влияющими величинами произведениями вида $q_x(X_\mu) \cdot f_{вЛ}(\eta_\Phi)$, где $q_x(X_\mu)$ — функциональная зависимость, отвечающая неравенству $q_1(X_\mu) \neq q_0 \cdot q_2(X_\mu)$; $q_0 = const$.

При реализации частного

$$G_1(Y_{эi}(X_{\mu i}), i = 1, \dots, r)/G_2(Y_{эi}(X_{\mu i}), i = 1, \dots, r) \quad (10)$$

одинаковые мультипликативные компоненты числителя и знаменателя $f_{вЛ}(\eta_\Phi)$ сокращаются. Следовательно, реализация отношения (10) не ведет к увеличению габаритов создаваемой ИИС, поскольку в формировании каждого функционала G_x ($x = 1, 2$) будет использован один и тот же набор величин типа $Y_{эi}$.

Реализация предлагаемого принципа коррекции дополнительной погрешности осуществлена с привлечением теории оптимальной линейной фильтрации сигналов известной формы [5; 6]. Известно, что если на входе приемника-фильтра действует двумерная величина $x(n_1, n_2)$, по отношению к которой этот фильтр согласован, то выходной сигнал $y(n_1, n_2)$ будет пропорционален автокорреляционной функции двумерного входного сигнала и, кроме того, будет достигнуто максимальное отношение сигнала к помехе на выходе фильтра.

Нахождение двумерной автокорреляционной функции в рамках рассматриваемой задачи осуществлялось согласно известному выражению [5]

$$r_{xu}(k_1, k_2) = \frac{\sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} (u(n_1, n_2) - m_u)(x(n_1 - k_1, n_2 - k_2) - m_x)}{\sigma_1 \sigma_2}, \quad (11)$$

где через $u(n_1, n_2)$ обозначен фрагмент изображения (эталон), который расположен внутри зоны поиска $x(n_1, n_2)$, а σ_1 и σ_2 — средние квадратические отклонения величин $u(n_1, n_2)$ и $x(n_1, n_2)$ от их математических ожиданий m_u и m_x соответственно, определяемые по формулам

$$\sigma_1 = \left[\sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} (u(n_1, n_2) - m_u)^2 / M \right]^{\frac{1}{2}} \text{ и } \sigma_2 = \left[\sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} (x(n_1, n_2) - m_x)^2 / M \right]^{\frac{1}{2}},$$

в которых $M = N_1 \times N_2 - 1$ — количество точек дискретизации в сравниваемых изображениях минус единица для получения несмещенной оценки. Анализируя выражение (11), можно отметить, что его числитель и знаменатель представляют

собой суммы произведений сигналов текущего фрагмента изображения $x(n_1, n_2)$ и эталона $u(n_1, n_2)$. Следовательно, эти сигналы будут подвержены, как было показано выше, мультипликативному воздействию функции влияния $f_{\text{вл}}(\Delta\Phi)$. Тогда выражение для нормированного коэффициента корреляции (11) с учетом воздействия функции влияния примет вид

$$r_{xu}(k_1, k_2) = \frac{\sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} (u(n_1, n_2) - m_u) f_{\text{вл}}(\Delta\Phi) (x(n_1 - k_1, n_2 - k_2) - m_x) f_{\text{вл}}(\Delta\Phi)}{\sigma_1 \cdot f_{\text{вл}}(\Delta\Phi) \sigma_2 \cdot f_{\text{вл}}(\Delta\Phi)}.$$

Как видно из приведенного выражения для $r_{xu}(k_1, k_2)$, его структура соответствует структуре выражения (10), и функции влияния $f_{\text{вл}}(\Delta\Phi)$, стоящие в числителе и знаменателе, сокращаются. Таким образом, используемую автокорреляционную функцию можно рассматривать как частный случай отношения (10) и утверждать, что она обладает искомым компенсационным свойством, не требуя при этом введения дополнительной аппаратуры.

Для вычисления двумерной автокорреляционной функции в кадре формата $K_1 \times K_2$ точек дискретизации по специально разработанной программе, начиная с первой строки, выделялась полоса шириной N_2 пикселя. По центру этой полосы задавался эталон размером $N_1 \times N_2$ пикселей. Затем эталон, начиная с крайней левой позиции исходного изображения ВП, перемещался по выделенной полосе с шагом в 1 пиксель. При каждом совмещении эталона $u(n_1, n_2)$ и текущего фрагмента полутонового изображения $x(n_1, n_2)$ подсчитывался коэффициент корреляции по формуле (11). В связи с тем, что сравниваемые фрагменты $x(n_1, n_2)$ и $u(n_1, n_2)$ берутся из одного и того же изображения поверхности, то $r_{xu}(k_1, k_2)$ является коэффициентом автокорреляции. Закончив вычисление коэффициентов автокорреляции в первой полосе, задавалась следующая полоса того же формата в исходном изображении, но смещенная вниз на один пиксель. В этой полосе по центру задавался новый эталон, но с теми же размерами, что и предыдущий, и выполнялись те же самые действия для вычисления коэффициента автокорреляции и т. д. Обработав весь кадр исходного изображения по отмеченной методике, в запоминающем устройстве БЦОС формировалась матрица размерностью $M_1 \times M_2$ коэффициентов автокорреляции, то есть двумерная автокорреляционная функция. Для этой функции определялось среднее значение переменной составляющей.

Сам принцип определения неизвестной шероховатости базируется на сравнении средних значений переменных составляющих автокорреляционных функций исследуемой и образцовых поверхностей, для которых заранее определены параметры шероховатости по известным методикам [2; 3]. В результате сравнения определяется, какой образцовой поверхности с заданной вероятностью распознавания соответствует найденное среднее значение переменной составляющей автокорреляционной функции. На основе совпадения делается вывод, что исследуемая поверхность имеет такие же гостовские параметры шероховатости, как и образцовая поверхность.

Экспериментальная проверка предложенного метода коррекции дополнительной погрешности показала, что средний уровень переменной составляющей двумерной автокорреляционной функции остается постоянным для поверхности с $Ra = const$ при изменении светового потока от $\Phi_{o \min}$ до $\Phi_{o \max}$. Следовательно, по этому критерию можно достаточно надежно идентифицировать поверхности с различными микрорельефами. Практическая реализация корреляционного метода при оценке шероховатости цилиндрической поверхности бомбинированного ролика подшипника ступицы колеса автомобиля ВАЗ приведена в [1].

Литература

- [1] Абрамов А.Д. Определение микрогеометрии поверхности деталей машин и механизмов на основе компьютерной обработки их видеоизображений // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2008. № 11. С. 18–25.
- [2] Дунин-Барковский И.В., Карташова А.Н. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. М.: Машиностроение, 1987. 232 с.
- [3] ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения. М.: Изд-во стандартов, 1987. 10 с.
- [4] Измерение электрических и неэлектрических величин: учеб. пособие для вузов / Н.Н. Евтихеев [и др.]. М.: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.
- [5] Прэйт У. Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982. Т. 2. 790 с.
- [6] Даджион Д., Мерсеро Р. Цифровая обработка многомерных сигналов. М.: Мир, 1988. 486 с.

Поступила в редакцию 22/III/2010;
в окончательном варианте — 22/III/2010.

ANALYSIS AND ELIMINATION OF INFLUENCE OF THE OPTICAL EXTENT ON THE PARAMETRIC ESTIMATOR OF THE SURFACE MICRORELIEF WHICH IS PRODUCED BY THE OPTICAL AND ELECTRONIC COMPLEX

© 2010 A.D. Abramov, A.I. Nikonov²

In this article the method of compensation of auxillary measurement error by means of optical and electronic complex of the parameters of surface microrelief which appears as a result of the deflection of the light flux level from its nominal meaning is viewed. The method is based on the determination of autocorrelative functions by the image of analyzed surface.

Key words: method, optical and electronic complex, measurement, converter, surface, light flux, image, error, compensation, autocorrelation.

Paper received 22/III/2010.
Paper accepted 22/III/2010.

²Abramov Alexey Dmitrievich (esib@samgtu.ru), Nikonov Alexandr Ivanovich (nikonovai@mail.ru), the Dept. of Electronic Systems and Information Security, Samara State Technical University, Samara, 443100, Russian Federation.