

УДК 621.3.082

*И. Ш. НЕВЛЮДОВ*, д-р техн. наук, проф., зав. каф., ХНУРЭ, Харьков;  
*А. А. АНДРУСЕВИЧ*, д-р техн. наук, проф., зав. каф., ХНУРЭ, Харьков;  
*И. В. ЖАРИКОВА*, ст. препод., ХНУРЭ, Харьков;  
*А. Г. РЕЗНИЧЕНКО*, ассистент, ХНУРЭ, Харьков;

## **СИНТЕЗ МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ ПОЛОСЫ ПОВЕРХНОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОДЛОЖЕК ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ**

В статье рассмотрены вопросы обработки изображений в автоматизированной системе контроля шероховатости поверхности подложек для изделий электронной техники. Сформированы требования к разрабатываемой технологии контроля, выполнены обзор и анализ методов идентификации полутоновых изображений. Синтезирован метод идентификации видеоизображения интерференционной полосы поверхности на основе методов поэлементных преобразований, линейного контрастирования, пороговой обработки и порогового разделения.

**Ключевые слова:** функциональная подложка, шероховатость поверхности, контроль, автоматизированная система, интерференционный метод, обработка изображения, идентификация.

**Введение.** Функциональная подложка предназначена для создания на ее поверхности ряда различных по назначению электронных структур, которые определенным способом могут быть заданы в соответствии с электрической схемой функционального устройства. Контроль шероховатости поверхности функциональных подложек является ответственным этапом при производстве изделий электронной техники, поскольку данный геометрический параметр качества поверхности, наряду с волнистостью и микронеровностями, в значительной степени влияет как на процесс изготовления электронного устройства, так и на стабильность работы готового изделия [1 – 2].

Автоматизация процесса контроля шероховатости поверхности – актуальная задача в условиях повсеместного внедрения информационных технологий в приборостроительных производственных процессах [3 – 4]. Контролируемые величины лежат в субмикронной области, а операция контроля технологического процесса изготовления подложек на сегодняшний день достаточно трудоемка. Решение данной задачи позволит повысить достоверность и снизить трудоемкость контроля, а также увеличить скорость обработки результатов измерений.

**Постановка задачи.** Существует множество методов контроля качества поверхности функциональных подложек, однако анализ ряда публикаций последних лет показывает, что у ведущих производителей электронных устройств в ряде государств мира не был сформирован единый подход к

© И. Ш. НЕВЛЮДОВ, А. А. АНДРУСЕВИЧ, И. В. ЖАРИКОВА, А. Г. РЕЗНИЧЕНКО, 2014

вопросам оценки шероховатости [5]. При этом постоянно ужесточаются требования как к качеству поверхности подложек, так и к приборам для измерения шероховатости, и к методам распознавания изображений.

При автоматизации процесса контроля шероховатости поверхности функциональной подложки необходимо решить ряд вопросов, связанных с выбором метода идентификации видеоизображения интерференционной полосы поверхности функциональных подложек, если речь идет об использовании оптических методов контроля шероховатости.

Как известно, оптические методы интерферометрии широко применяются в технологических процессах контроля материалов, деталей и изделий в различных отраслях науки и техники. Анализ получаемых интерферограмм позволяет количественно определять геометрические параметры и, в частности, восстанавливать форму сложных объектов [6].

Разрабатываемая технология автоматизированного контроля шероховатости поверхности подложек основана на интерференционном методе с применением современных методов восприятия и обработки информации, а именно твердотельных фотоприемников и микропроцессорной техники. Следуя сформированной укрупненной схеме технологии контроля геометрических параметров, необходимо:

- получить матрицу цифрового кода амплитуд яркости контролируемой поверхности;
- распознать интерференционные полосы;
  - восстановить полезный сигнал;
- сформулировать заключение о качестве поверхности подложки и ее пригодности для дальнейшего использования в ходе производственного процесса, а также вычислить значение восстановленного сигнала с выдачей численного значения шероховатости [7].

Требования к разрабатываемой технологии автоматизированного контроля. Для получения матрицы цифрового кода амплитуд яркости контролируемой поверхности предпочтительным является использование электронных сканирующих устройств, а именно линейных фоточувствительных приборов с зарядовой связью. Однако у таких типов приборов расстояние между центрами фоточувствительных элементов составляет 12-15 мкм. Поэтому для точного измерения интерференционной картины необходимо использовать оптическую систему, создающую увеличенное изображение поверхности подложки с интерференционными полосами, искривленных в местах некачественной обработки. Введение объектива в измерительный тракт выдвигает требование решения задачи восстановления неизвестного входного распределения в плоскости изображения.

Для решения задачи распознавания интерференционных полос необходимо провести обзор и анализ существующих методов идентификации полутоновых изображений.

Матричное представление амплитуды яркости поверхности подложки методом поэлементных преобразований. В общем случае под исследуемой поверхностью понимается двумерная функция  $g(x, y)$ , задающая для каждой точки  $(x, y)$  выбранной картинной плоскости значение  $(g)$  яркости (освещенности)

соответствующей точки сцены. Будем считать рассматриваемый участок картинной плоскости (выбранной плоской проекции рабочей сцены) прямоугольником размером  $(X \times Y)$  и поместим начало системы координат  $(O_{xy})$  в его левый нижний угол. Тогда  $x \in [0, X]$ ,  $y \in [0, Y]$ . Обычно вместо исходного изображения  $g(x, y)$  в память компьютера вводится массив значений  $G(i, j)$ , задаваемый на целочисленной решетке  $i = 0, N_x, j = 0, N_y$ , покрывающей всю область  $(X \times Y)$  или ее некоторую подобласть. Значение  $G$  в узловой точке представляет усредненную яркость ( $g$ ) элемента изображения в окрестности этой точки. Чаще всего считают, что элементы изображения (пиксели) имеют прямоугольную форму, хотя не исключены и иные виды разбиения картинной плоскости. Максимальный шаг  $h$  пространственной решетки при оцифровке – вводе исходного изображения в память компьютера в виде функции  $G(i, j)$  – должен выбираться из условия  $h < 1/(2f_m)$ , где  $f_m$  – максимальная пространственная частота изображения.

Кроме пространственной дискретизации, оцифровка изображения предусматривает квантование уровней яркости [8]. Обычно для этого используются аналого-цифровые преобразователи или компараторы, причем чаще применяют алгоритмы с оперативным управлением порогами сравнения. После квантования функция  $G(i, j)$  принимает целочисленные значения:

$$G(i, j) = k, \text{ при } T_{k-1} \leq G(i, j) < T_k, k \in [0, k_{MAX}], \quad (1)$$

где  $T_k$  – значение  $k$ -го порогового уровня.

В случае  $k_{MAX} = 1$  оцифрованное изображение называется бинарным (двуградационным), в случае  $k_{MAX} > 1$  – полутоновым (многоградационным).

Далее следует описание алгоритма разметки, который лучше приспособлен к последовательному сканированию изображения и не нуждается в рекурсивных вызовах. Допустим, что сканирование ведется строка за строкой, сверху вниз и слева направо (рис. 1).

Тогда при обработке элемента (А) будет известно, что левый элемент (В), так же как и верхний (С), уже помечен. Далее, элемент (D), расположенный над (В), считается связанным с (А) и потому также должен быть принят во внимание.

Для простоты предположим, что размечаются лишь компоненты объекта. Тогда если (А) содержит нуль, то можно идти дальше. Если (А) содержит единицу, а (D) уже помечен, то достаточно просто скопировать эту метку и продолжить работу. То же самое необходимо сделать, если помечен один из элементов (В) или (С). Если же ни (В), ни (С) не помечены, то мы должны выбрать новую метку для (А). Таким образом, здесь впервые вводится в рассмотрение новая компонента.

Оставшаяся возможность: как (В), так и (С) имеют метки.

Проблем не возникает, когда эти метки одинаковые; но поскольку по нашей схеме они не являются соседями, их метки могут быть различными. В этом случае как раз обнаружилось, что две различные метки использовались для различных частей одной компоненты

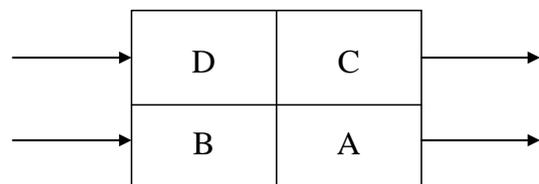


Рис. 1 – Алгоритм идентификации элементов видеоизображения интерференционной полосы

изображения. Они соединяются через точку (A). В этот момент необходимо указать, что две метки эквивалентны, и использовать одну из них для (A). Таким образом удастся обеспечить последовательный характер алгоритма.

В конце просмотра данные, относящиеся ко всем частям с эквивалентными метками, необходимо объединить. Если же лишь накапливаются суммы для расчета нулевого, первого и второго моментов, можно избежать и этого шага. Достаточно сложить суммы, до сих пор относившиеся к двум различным компонентам, и продолжать накопления в этих объединенных суммах.

Если мы хотим обозначить области едиными метками, необходимо сделать второй просмотр изображения, присваивая каждой области метку – представителя того класса эквивалентности, которому принадлежит ее исходная метка.

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что обработка изображения в общем случае заключается в выполнении какого-либо преобразования указанной матрицы, в результате которого формируется набор ее числовых характеристик или новое, обработанное изображение. Преобразование может касаться значений элементов или их координат (индексов), выполняться над матрицей в целом, группой элементов или над каждым элементом в отдельности.

Такая обработка получила название поэлементного преобразования изображений [9]. Она переводит значение каждого элемента ( $f$ ) в новое значение ( $g$ ) в соответствии с заданной функциональной зависимостью

$$g = g(f). \quad (2)$$

При практической реализации поэлементных преобразований можно непосредственно вычислять каждое значение преобразованного элемента в соответствии с конкретным видом функции. Очевидными преимуществами такого подхода являются высокое быстродействие и гибкость процедуры обработки, недостатком же является приближенность результатов из-за ограниченного числа строк таблицы.

Несмотря на простоту, метод поэлементных преобразований позволяет решить довольно много прикладных задач улучшения качества и анализа изображений. Рассмотрим некоторые из них.

Вариация яркости изображения поверхности подложек методом линейного контрастирования. Чтобы использовать методы оптимальной фильтрации, необходимо оценить энергетические спектры обрабатываемых изображений, т. к. основная часть энергии приходится на низкие частоты. Наблюдаемое уменьшение энергии с ростом частоты частично обусловлено тем фактом, что многие объекты или их части непроницаемы и обладают почти равномерной яркостью. Соответствующие участки изображения отделяются перепадами яркости.

Рассмотрим пример простого прямоугольного участка:

$$F(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{при } |x| \leq W \text{ и } |y| \leq H; \\ 0 & \text{при } |x| > W \text{ или } |y| > H. \end{cases} \quad (3)$$

Преобразование Фурье такой функции имеет вид:

$$F(u, v) = WH \sin(uW) \sin(vH) / (uWvH). \quad (4)$$

Сдвиг участка приводит к изменению лишь фазы, а не амплитуды преобразования (что особенно важно в нашем случае, поскольку в нашем случае информативной является именно амплитуда). Без учета колебаний, видно, что преобразование затухает как  $1/(uv)$ .

Таким образом, в зависимости от выбора направления в частной области, затухание будет пропорционально либо  $(1/p)$ , либо  $(1/p^2)$ , где  $p$  – расстояние от начала координат.

Другой полезной составной частью модели изображения мог бы стать круговой участок:

$$F(r) = \begin{cases} 1 & \text{при } r \leq R; \\ 0 & \text{при } r > R; \end{cases} \quad (5)$$

В этом случае преобразование описывается функцией  $F(p) = 2R^2 J_1(pR)/(pR)$ . При больших значениях аргумента функция  $J_1(z)$  изменяется по закону  $\sqrt{2/(\pi z)} \sin(z - \pi/4)$ , поэтому если пренебречь колебаниями, то  $F(p)$  с ростом  $(p)$  убывает как  $1/p^{3/2}$ .

Энергетические спектры моделей изображений, содержащих многоугольные или круговые участки, как правило, затухают пропорционально некоторой степени частоты. На высоких частотах реальные изображения затухают еще сильнее, что обусловлено ограничением разрешающей способности системы [9].

Другое приложение того обстоятельства, что основная часть энергии изображений приходится на низкие частоты, можно найти в сфере воспроизведения изображений. При воспроизведении изображений важна различимость небольших перепадов яркости. Если говорить о качестве воспроизведения, то прежде всего нас интересует отношение самого яркого уровня к самому темному. Даже значительные перепады яркости между соседними областями могут оказаться незаметными, если сами области очень ярки. Важна относительная величина перепада, т. е. отношение разности яркостей к меньшей из них. Именно поэтому динамический диапазон измеряется отношением самого яркого уровня к самому темному, а не их разностью.

**Чтобы из-за насыщения не утратить деталей на сильно освещенных и затененных участках, динамический диапазон необходимо сжать.** Подобное сжатие можно осуществить с помощью показательной функции. Если яркость исследуемой поверхности описывается функцией:  $b'(x, y)$ , а оригинала – функцией:  $b(x, y)$ , то  $b'(x, y) = [b(x, y)]^y$ , где  $0 < y < 1$ .

Другой подход состоит в использовании того обстоятельства, что изображения, вводимые в компьютер, часто являются малоконтрастными, то есть у них вариации функции яркости малы по сравнению с ее средним значением. Реальный динамический диапазон яркостей  $[f_{min}, f_{max}]$  для таких изображений оказывается намного меньше допустимого диапазона (шкалы яркости). Задача контрастирования заключается в «растягивании» реального динамического диапазона на всю шкалу. Контрастирование можно осуществить при помощи линейного поэлементного преобразования:

$$g = af + b. \quad (6)$$

Параметры этого преобразования ( $a$ ,  $b$ ) нетрудно определить, исходя из требуемого изменения динамического диапазона. Если в результате обработки нужно получить шкалу  $[g_{min}, g_{max}]$ , то, как следует:

$$g_{min} = af_{min} = b, \quad (7)$$

$$g_{max} = af_{max} = b. \quad (8)$$

При диалоговой обработке изображений иногда проще не определять параметры преобразования, а непосредственно строить его в табличной форме, ориентируясь на границы распределения вероятностей функции яркости [9].

**Преобразование полутонового изображения поверхности подложки методом пороговой обработки.** Некоторые задачи обработки изображения связаны с преобразованием полутонового изображения (то есть такого, которое имеет много градаций яркости) в бинарное (двухградационное). Такое преобразование осуществляется в первую очередь для того, чтобы сократить информационную избыточность изображения, оставить в нем только ту информацию, которая нужна для решения конкретной задачи. В бинарном изображении должны быть сохранены интересующие нас детали (например, очертания изображенных объектов) и исключены несущественные особенности (фон) [10].

Трудно точно измерить яркость изображения, вызванного шумом. Для этого введем понятие случайной величины и плотности распределения вероятности. На результаты измерений влияют флуктуации в измеряемом сигнале. При повторном измерении результаты могут оказаться несколько другими. Обычно они располагаются около «истинного» значения. Можно говорить о вероятности попадания результата измерения в определенный интервал. Иными словами, она соответствует пределу отношения числа измерений, попадающих в этот интервал, к общему числу испытаний при стремлении последнего к бесконечности. По мере возрастания плотности отсчетов эти интервалы можно сделать все меньше и меньше при условии сохранения точности каждого из индивидуальных измерений.

Теперь мы можем определить плотность распределения вероятности, обозначаемую через  $p(x)$ . Вероятность того, что случайная величина будет больше или равна  $(x)$ , но меньше  $(x + \delta x)$ , стремится к  $p(x)\delta x$ , при стремлении  $(\delta x)$ , к нулю. Здесь имеется трудность, заключающаяся в том, что для фиксированного числа испытаний число результатов, попавших в интервал, будет стремиться к нулю при стремлении интервала к нулю. Ее можно обойти путем рассмотрения функции распределения вероятности. Плотность распределения можно приближенно найти на основе гистограммы, полученной на основе конечного числа испытаний. Из нашего определения следуют два важных свойства для любой плотности распределения вероятности  $p(x)$ :

$$p(x) > 0 \text{ для всех } (x) \text{ и } \int_{-\infty}^{+\infty} p(x)dx = 1. \quad (9)$$

Часто плотность распределения вероятности имеет ярко выраженный пик вблизи «истинного» или «ожидаемого» значения. Соответственно мы можем определить среднее как центр площади ( $\mu$ ) этого пика согласно соотношению:

$$\mu \int_{-\infty}^{\infty} p(x)dx = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x)dx, \quad (10)$$

В случае непрерывного изображения мы можем определить плотность распределения яркости  $p(x)$ .

При малых величина  $p(x) \delta x$  – доля той части изображения, в которой яркость больше или равна  $(x)$ , но меньше  $x+\delta x$ . Интегрирование дает интегральную функцию расмпределения яркости  $P(x)$ . Для заданного значения  $(x)$  величина  $P(x)$  – доля той части изображения, в которой яркость меньше или равна  $(x)$ :

$$P(x) = \int_0^x p(t)dt. \quad (11)$$

Поскольку трудно измерить освещенность с большой точностью, для представления уровней освещенности разумно использовать небольшой набор градаций. Часто используется диапазон 0-255, требующий лишь 8 бит для представления любого уровня. В нашем случае он равно 64.

**Обработка полутоновых изображений методом порогового разделения.** Пороговая обработка полутонового изображения заключается в разделении всех элементов изображения на два класса по признаку яркости, то есть в выполнении поэлементного преобразования.

При выполнении пороговой обработки основной вопрос состоит в выборе порога. Пусть полутоновое изображение содержит интересующие нас объекты одной яркости на фоне другой яркости (типичные примеры: машинописный текст, чертежи, медицинские пробы под микроскопом и т. д.). Тогда в идеале плотность распределения яркостей должна выглядеть как две дельта-функции). В данном случае задача установления порога тривиальна: в качестве порога можно взять любое значение между «пиками». На практике, однако, встречаются определенные трудности, связанные с тем, что, во-первых, изображение искажено шумом и, во-вторых, как для объектов, так и для фона характерен некоторый разброс яркостей. В результате пики функции плотности распределения «расплываются», хотя обычно ее бимодальность сохраняется.

В рассматриваемом методе вместо яркости сегментацию изображения производят на основе текстуры. Чтобы сделать это, необходимо каждому пикселю сопоставить величину текстуры.

Обычно вычисление величины текстуры для данного пикселя основывается на рассмотрении соседних с ним элементов изображения. Так, в качестве простой оценки подобного рода можно использовать стандартное отклонение яркости соседних пикселей [10]:

$$A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^N x_i \right)^2}{N-1}}, \quad (12)$$

где  $N$  – число пикселей;  $x_i$  – множество значений яркости в них.

Из рассмотренных методов данный метод является наиболее подходящим для идентификации интерференционной полосы.

**Выводы.** В ходе проведенного исследования выполнен обзор и анализ существующих методов обработки изображений для разработки метода

автоматизированного контроля шероховатости поверхности функциональных подложек для изделий электронной техники.

Разрабатываемая авторами технология автоматизированного контроля шероховатости поверхности подложек основана на применении интерференционного метода.

Из рассмотренных методов обработки видеоизображений интерференционной полосы поверхности подложки наиболее подходящей для решения поставленных задач и соблюдения сформированных требований к системе контроля является обработка полутоновых изображений методом порогового разделения.

**Список литературы:** 1. Дудин-Барковский, И. В. Измерение и анализ шероховатости поверхности и некруглости поверхности [Текст] / И. В. Дудин-Барковский, А. И. Карташева. – М. : Машиностроение, 1978. – 320 с. 2. Табенкин, А. Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт [Текст] / А. Н. Табенкин, С. Б. Тарасов, С. Н. Степанов. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 136 с. 3. Невлюдов, И. Ш. Технология автоматизированного контроля качества поверхности [Текст] / И. Ш. Невлюдов, Е. П. Второв, В. В. Токарев // Вестник Харьковского экономического университета. – 1998. – Вып. 1. – С. 86–88. 4. Васильков, Д. В. Программная реализация комплекса контактно-щупового контроля микрогеометрии функциональных поверхностей [Текст] / Д. В. Васильков, А. В. Платонов // Инструмент и технологии. – 2006. – № 23. – С. 58 – 71. 5. Ковязин, Р. Р. Двумерное восстановление фазы интерферограмм [Текст] / Р. Р. Ковязин // Проблемы когерентной и нелинейной оптики. – СПб. – 2000. – С. 267 – 275. 6. Невлюдов, И. Ш. Анализ методов контроля шероховатости подложек для изделий электронной техники [Текст] / И. Ш. Невлюдов, И. В. Жарикова, И. Д. Перепелица, А. Г. Резниченко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 2, № 5 (68). – С. 25–30. 7. Невлюдов, И. Ш. Методика автоматизированного контроля шероховатости функциональной поверхности подложек для приборов электронной техники [Текст] / И. Ш. Невлюдов, Е. П. Второв, С. П. Новоселов, А. Г. Резниченко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – 2008. – Вып. 4 (55). – С. 62–68. 8. Мошкин, В. И. Техническое зрение роботов [Текст] / В. И. Мошкин, А. А. Петров, В. С. Титов, Ю. Г. Якушенков. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с. 9. Сойфер, В. А. Компьютерная обработка изображений. Часть 2. Методы и алгоритмы [Текст] / В. А. Сойфер // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 3. – С. 110–121. 10. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений [Текст] / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Dudin-Barkovskiy, I. V. (1978). Measurement and Analysis of a Surface Roughness and not roundness. Moscow, USSR: Mashinostroenie, 320. 2. Tabenkin, A. N., Tarasov, S. B., Stepanov, S. N. (2007). Roughness, Sinuosity, Profile. International Experience. St. Petersburg: Publishing House of Polytechnic University, 136. 3. Nevliudov, I. Sh., Vtorov, E. P., Tokarev, V. V. (1998). Technology of the Automated Surface Quality Testing. Messenger of the Kharkov economic university, № 1, 86 – 88. 4. Vasil'kov, D. V., Platonov, A. V. (2006). Program realization of a contact probe complex for functional surfaces microgeometry testing. Instrument i tehnologii, № 23, 58 – 71. 5. Nevliudov, I. Sh., Zharikova, I. V., Perepelitsa, I. D., Reznichenko, A. G. (2014). The analysis of the electronic devices substrates roughness testing methods. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, № 2/5 (68), 25 – 30. 6. Koviazin, R. R. (2000). Two-dimensional restoration of a interferograms phase. Problems of coherent and nonlinear optics. St. Petersburg, Russia. 267 – 275. 7. Moshkin, V. I., Petrov, A. A., Titov, V. S., Jakushenkov, Ju. G. (1990). Technical vision of robots. Moscow, USSR: Mashinostroenie, 272. 8. Sojfer, V. A. (1996). Computer processing of images. Part 2. Methods and algorithms. Soros Educational Journal, №3, 110 – 121. 9. Gonsales, R., Vuds, R. (2005). Digital processing of images. Moscow: Technosphere, 1072.

*Поступила (received) 12.05.2014*