

**В.Е. Махов /д.т.н./, С.Е. Шалдаев /д.т.н./**

*Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского (Санкт-Петербург)*

## **ВЫСОКОТОЧНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ФОРМЫ ИЗДЕЛИЙ И ИНСТРУМЕНТА**

*Проведены исследования системы определения функции контрастной границы, в изображении контролируемого изделия методом его преобразования в изображение кривой. Исследованы факторы, влияющие на погрешность определения функции границ при использовании различных алгоритмов, в т.ч. алгоритма определения координат максимумов коэффициентов непрерывного вейвлет-преобразования (НВП). Показано, что при использовании метода коэффициентов НВП погрешность измерений функции координат границ в два раза ниже, чем при анализе распределения освещенности. Доказана возможность определения координаты резкого скачка и излома в границе изображения с точностью 0,1 пикс.*

**Ключевые слова:** *система технического зрения, непрерывное вейвлет-преобразование (НВП), фильтрация изображения, граница теневого изображения.*

### **Постановка проблемы**

Системы технического зрения находят широкое применение в автоматизированных системах контроля линейных размеров формы готовых изделий или технологического инструмента. На практике возникают задачи контроля геометрических параметров изделий в условиях воздействия мешающих факторов, например, в условиях механической нестабильности объекта контроля.

В ряде случаев, с целью получения измерительной информации используют специальные методы обработки получаемых изображений. При этом удается достичь высокой чувствительности к измеряемому параметру, однако возникают трудности в определении степени влияния мешающих факторов. Вследствие этого, трудно гарантировать метрологическую точность измерений. В настоящее время следует различать методы измерений для идеальных контрастных изображений и для изображений, с размытой информационной структурой. Часто трудно заранее классифицировать качество получаемых изображений, или в процессе применения измерительного средства параметры изображения могут в той или иной степени меняться. В этих случаях снижается точность измерения классическими методами, не в полной мере реализуются возможности для выделения информационной составляющей специальными методами информационной обработки изображения.

Актуальной задачей совершенствования измерительных систем технического зрения промышленного применения является разработка единой методики их применения в широком диапазоне изменения внешних условий, влияю-

щих на характер изображения. Решение этой задачи позволит повысить точность измерения измеряемых параметров объекта контроля, снизить требования к измерительной системе при воздействии на нее внешних факторов.

### **Анализ последних исследований и публикаций**

Широко известны специализированные промышленные оптические измерительные системы контроля геометрических параметров формы изделий и инструмента [1]. Однако, такие системы аппаратно детерминированы и не позволяют производить методических усовершенствований измерений. В то же время компьютерные технологии дают возможность проводить разработку сложных измерительных систем для широкого круга лабораторных и промышленных систем контроля [2], предоставляя широкие возможности использовать математические методы обработки сигналов.

Применения методы интегральных преобразований сигналов [3] максимально используется исходная информация, в т.ч. за определенный промежуток времени, что способствует эффективному выделению доминантной информационной составляющей сигнала на фоне различных мешающих факторов. В результате повышается точность измерения интересующих параметров сигнала. Например, использование метода непрерывного вейвлет-преобразования (НВП) распределения освещенности изображения [4] повышает точность измерения линейных размеров теневого изображения, в т.ч. полученного с разфокусировкой оптической системы [5], в условиях механической нестабильности объекта кон-

троля [6] и структурированного шума [7].

Вейвлет-преобразование локально определяет первую и вторую производную сигнала [5] в дискретной выборке. Это дает возможность определять параметры контура теневого изображения [8]. Однако в виду протяженности анализируемого фрагмента не обеспечивается точность измерения его формы. Аналогично вейвлет-анализ позволяет повысить точность измерений формы изделий на основе метода определения координат световых меток [9]. Измерительные алгоритмы НВП определения границы контраста теневого изображения и координат световых меток имеют общую природу.

Определение линейных размеров теневого изображения методом НВП содержит систематическую погрешность, вызванную особенностями градиента перепада освещенности в области границ, для компенсации которой нужна вторая граница изображения с обратным градиентом. Вдоль границы одного изображения функция градиента может меняться, что вызвано свойствами оптической системы, так и степенью контраста изображения. Для локализованных световых меток характер градиента границ во всех направлениях мало зависит от свойств оптической системы. Следует предположить, что для повышения точности измерения формы границы изображения, целесообразно преобразовать границу теневого изображения в графическую структуру (кривую линию) проходящую через границу изображения, обеспечив симметричный градиент освещенности границ кривой.

Приведенный анализ говорит о том, что необходимы модельные исследования процесса определения координат кривой с одной стороны, с другой – поиск алгоритмов, работающий в условиях структурно преобразованных изображений, не чувствительных к распределенным факторам шума и обеспечивающих локальную информативность.

### Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является исследование точности различных измерительных алгоритмов для геометрических размеров формы изделий в их оптическом изображении при использовании метода формирования изображения кривых границ его контраста.

### Основной материал исследования

Для преобразования границ изображения в кривую линию контраста можно использовать различные методы и алгоритмы. Можно использовать разницу двух масштабно преобразованных изображений  $Im_2 = \beta_1 \{Im_0\} - \beta_2 \{Im_0\}$  ( $\beta_1 > \beta_2$ ), или использовать функции фильтрации  $F\{Im_0\}$ .

В первом случае кривая границы в меньшей степени содержит систематическую погрешность преобразования изображения в изображение контура границ контраста. Однако такое преобразование, дает ошибку масштабирования и перепикселизацию границ изображения (псевдо случайная погрешность). Масштабные преобразования реализуются путем изменения разрешения изображения алгоритмом интерполяции. Для выделения линий контуров контраста изображения можно использовать функции фильтрации [10]: Лапласа (Laplacian), Diff., Превитта (Prewitt), Собеля (Sobel), Робертса (Roberts), Кэнни (Canny). Эти алгоритмы позволяют выделить локализованную структурную кривую контраста определенной ширины и контрастом, которая соответствует функции градиента контраста в изображении.

Для исследования точности определения функции кривой границы в изображении  $y(x)$  были разработаны тестовые теневые изображения максимального контраста, функция границы которого была заранее задана кусочно-непрерывными аналитическими функциями. По реперным точкам формировался пограничный контур теневого изображения. На рис. 1а представлено тестовое изображение (размер  $n_x \times n_y = 1280 \times 720$  пикс.), состоящий из последовательности протяженных фрагментов (100 пикс.) с границами различного наклона и скачками функции границ между фрагментами:

$$y^{model}(x) = \sum [f_i(x)]_{\Omega_i}, \quad (1)$$

где  $f_i(x) = k_i x + a_i$ ,  $x \in \Omega_i$ , наклон границы изображения  $k_i = \text{tg}(\alpha_i) = (dy/dx)_i$ .

Для построения функции указанных кривых границы изображения и проведения измерения ее координат различными алгоритмами был разработан исследовательский виртуальный прибор (ВП) в среде разработки приложений NI LabVIEW с модулем технического зрения NI IMAQ Vision [3], блок-схема которого представлен на рис. 1б.

Набор функций 1 модуля NI IMAQ Vision [2] реализует получение изображения из файла или с цифровой камеры. Функции 2 формирует и отображает изображения кривой границы изображения  $y_i = f(x_i)$  заданным методом. Цикл 3, реализованный циклической структурой (While Loop) и структурой объектно-ориентированного программирования (Event Structure), обеспечивает последовательность всех вычислений функции границы для координат  $x_i$ . Функция 4 выделяет распределение освещенности вдоль заданной прямой линии профиля изображения. Модуль 5 обеспечивает вычисление координаты  $y_i$

различными методами и их погрешностей  $\Delta y_i$  по отношению к заданной функции (1).

Лицевая панель ВП реализована в виде нескольких закладок, на которых сгруппированы элементы управления, позволяющие задать параметры функций обработки исходного изображения. Графические индикаторы отображают построенную кривую границы изображения, вычисленные графики функции границы и ошибок, полученные различными методами. На первой закладке ВП (рис. 2) на графическом индикаторе 1 отображается изображение выделенной границы теневого изображения, установки координат линии профиля изображения 2, графический индикатор распределение освещенностей в вы-

бранной линии профиля  $I(y)$  3.

Текущая линия профиля изображения  $L_i(x_i)$  задается начальными  $P_1(X_1, Y_1)$  и конечными  $P_2(X_2, Y_2)$  координатами прямой линии (для вертикально линии профиля координаты:  $X_1=X_2, Y_1=0, Y_2=Y_{lm}$ ). Линия профиля  $L_f(P_1P_2)$  может иметь произвольную ориентацию, например, перпендикулярно касательной контуру изображения в точке с координатой  $x_j$ . В этом случае координаты  $y_i$  определяются через вспомогательную систему координат  $X'O'Y'$  в наклонной линии профиля  $y'=y_j$ . Для вычисленной координаты  $y_i$  определяем координаты наклонной линии профиля  $P_1^\beta(x_{1i}, y_{1i})-P_2^\beta(x_{2i}, y_{2i})$ . Для простоты принимаем  $y_{1i}=0$ :

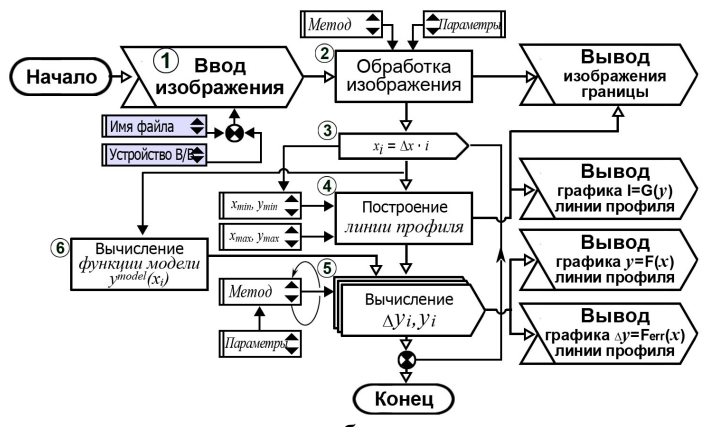
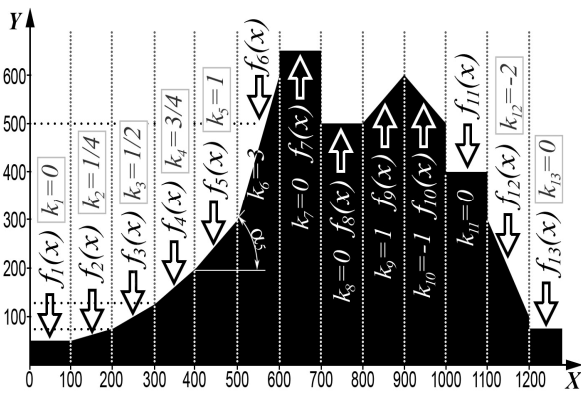


Рис. 1. Модельные исследования измерений: а – тестовое изображение; б – блок схема ВП

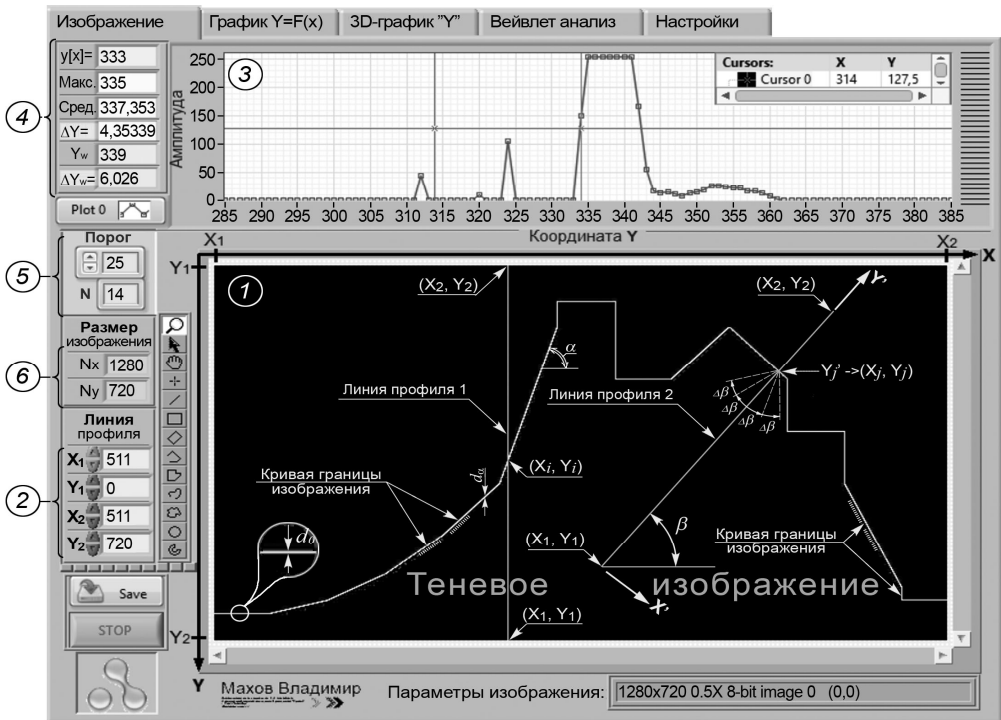


Рис. 2. Первая закладка лицевой панели ВП:

- 1 – индикатор границы теневого изображения; 2 – установка координат линии профиля;
- 3 – индикатор распределения освещенности в линии профиля; 4 – индикаторы вычисленных значений; 5 – установка порога; 6 – индикаторы размера исходного изображения

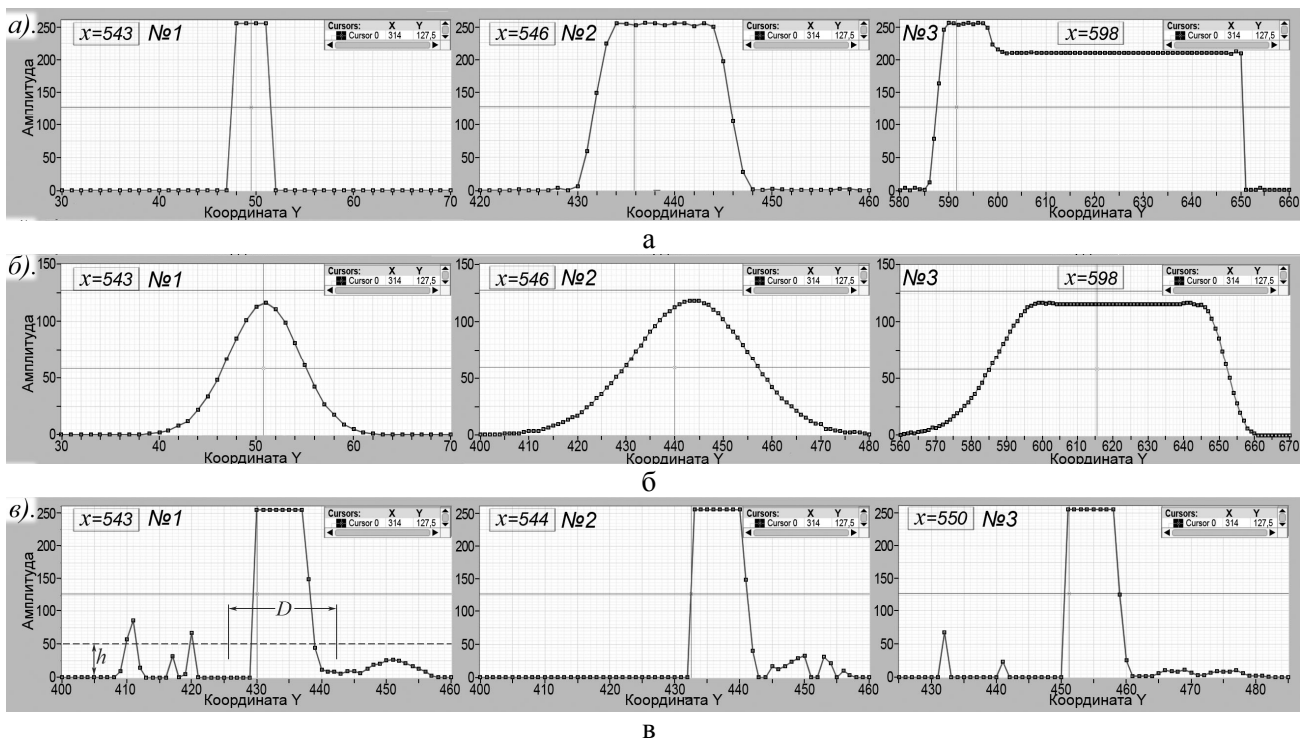


Рис. 3. Распределения интенсивностей вдоль линии профиля изображения по координате  $Y$ :  
 а – для резкого контура кривой разницы масштабных изображений;  
 б – для изображения контура кривой разницы масштабных размытых изображений ( $R=4$ );  
 в – для контура кривой фильтрации изображения

$$x_{1i} = x_i + y_i / \operatorname{tg} \beta_i, \quad x_{2i} = x_i + q_i, \quad y_{2i} = (x_{2i} - x_{1i}) \operatorname{tg} \beta_i, \quad (2)$$

где  $q_i < n_y$  – заданное смещение конечной точки.

Отсюда видно, что неопределенность определения координата  $x_i$ :

$$x_i = x_{1i}(\beta_i) + y_i / \operatorname{tg} \beta_i, \quad \delta x_i = \delta y_i / \operatorname{tg} \beta_i.$$

Для вертикальной линии сканирования ( $90^\circ$ ) координата  $x_i = x_{1i}(90^\circ)$ , для горизонтальной линии сканирования ( $0^\circ$ ) координата  $x_i$  не определена. С учетом разворота системы координат  $X'OY'$ , определение координаты  $y_i$  соответствует определению координаты  $x_i$ . Сканирование произвольно заданной линии профиля в заданной точке  $x_j$  изображения по углу ее наклона позволяет получить набор координат  $\{y_k\}$  для нахождения усредненного значения  $\langle y_i \rangle$  в заданной точке, которое устраняет влияние факторов шума и пикселизации в окрестности кривой границы изображения  $x_i$ .

При различном наклоне границы изображения ( $\alpha_i$ ) в зависимости от положения линии профиля меняется характер функции распределения интенсивностей  $I(y)$  (рис. 3). Характер распределение  $I(y)$  в различных линиях профиля изображения имеют особенности, которые влияют на результаты вычисления координаты  $y(x_i)$ , например, методом средневзвешенного значения. Число не нулевых элементов распределения  $I(y)$ ,

или число элементов (выше установленного порога), характеризует исходную информационно-измерительную емкость системы, что в свою очередь определяет потенциальные возможности вычисления координат, с точностью превышающей 1 пикс. изображения.

Ширина контура распределения освещенности  $I(y) = g(y_i)$  определяется шириной выделенной линии границы изображения ( $d_0$ ). С увеличением наклона кривой контура границы, ширина контура  $I(y)$  вдоль линии выделения уширяется (рис. 3а). Наиболее неблагоприятный случай возникает в месте скачков функции в области разрыва функции границы  $f(x_i)$ , ширина контура  $I(y)$  для координат находящихся в зоне разрыва ( $x_c + d_0/2 < x_i < x_c - d_0/2$ ) будет соответствовать разрыву функции в точке  $x_c$ :  $f(x_c + 0) - f(x_c - 0)$ . При размытии границы изображения кривой, функции распределения интенсивностей  $I(y)$  в линиях профиля приобретают плавный характер (рис. 3б). В случае применения для выделения кривой границы контраста алгоритмов фильтрации в большей степени имеют место возникновение боковых артефактов в распределении освещенности  $I(y)$  (рис. 3в), что связано с топологией используемого фильтра. Для повышения точности вычисления координаты  $y_i$  по средневзвешенному значению  $I(y)$ , в алгоритме предусмотрено установка порога ( $h$ ) 5 (рис. 1б), и диапазона области локализации распределения  $I(y) - (D)$ , вне которых

значения выборки распределения  $I(y)$  обнуляются.

Для каждого контраста и наклона границы изображения (полученных методом фильтрации) наблюдается периодическая повторяемость характерных особенностей формы кривых распределения интенсивности  $I(y)$  для координат идеального изображения равного наклона границ, которая определяется совокупным влиянием топологии фильтра. Для изображений, полученных с сенсора изображения, форма кривых будет также зависеть от топологии матричного приемника, внутри процессорной обработки цифрового устройства, локальных дефектов изображения формируемого оптической системой. Для размытых границ изображения – геометрическими и физическими свойствами оптической системы, степенью размытия [11].

Погрешность определения координаты границы  $y(x)$  для модельных изображений вычислительных экспериментов определяется разницей координаты полученной вычислением координаты и заданной аналитической зависимости модельной границы (1)  $y^{model}(x)$ :

$$\delta y_i(x_i) = \langle g(x_i) \rangle^{method} - y_i^{model}(x_i).$$

Для определения координаты границы  $y_i$  можно использовать различные алгоритмы, учитывающие особенности распределение  $I(y_i)$ . Наиболее простой метод определения является вычисление средневзвешенного значения выборки:

$$y_i^{av} = \sum i \cdot y_i^h / \sum y_i^h,$$

где  $y_i^h = \{y_i, y_i > h\}$  и  $\{0, y_i < h\}$ .

Другим методом определение координаты  $y_i$  является нахождения координат максимумов

коэффициентов НВП [4-6]. Вейвлет представление сигналов обладает локальностью и малой потерей информационной составляющей. Спектральные образы вейвлетов согласуется с природой фильтрации и реструктуризацией изображения, что обеспечивает устойчивость результатов к воздействующим факторам, обеспечивая стабильность измерительных результатов в широком диапазоне параметров обработки изображения. Детектирование локализованных кривых границы в большей степени уменьшает влияние информационных составляющих удаленных фрагментов изображения. Можно полагать, что использование вейвлет-анализа применительно к выделенным границам изображения повышает точность измерения профиля теневого изображения. Функции вейвлет-анализа сигналов реализованы в NI LabVIEW дополнительного пакета NI «Advanced Signal Processing Toolkit» [12]. В методе НВП выбирают тип вейвлета, метод определения координат максимумов коэффициентов НВП, параметры дополнительной фильтрации сигналов.

На этапе вейвлет-анализа стоит вопрос точного определения координат  $y_i$  по максимумам кривых коэффициентов НВП. В зависимости от типа вейвлета кривые коэффициентов НВП имеют различную форму с разным числом и взаимным расположением максимумов и минимумов [4]. Можно отметить, что координаты некоторых максимумов для ряда вейвлетов практически совпадают с детектируемой координатой, другие имеют смещение (рис. 4). Характерно, что сама шкалограмма (рис. 5б) имеет периодическую структуру по оси «Шкала». Методика определения относительных координат локализованных сигналов описана в работах [4,9].

Вычислительные эксперименты показали, что достаточную точность определения абсо-

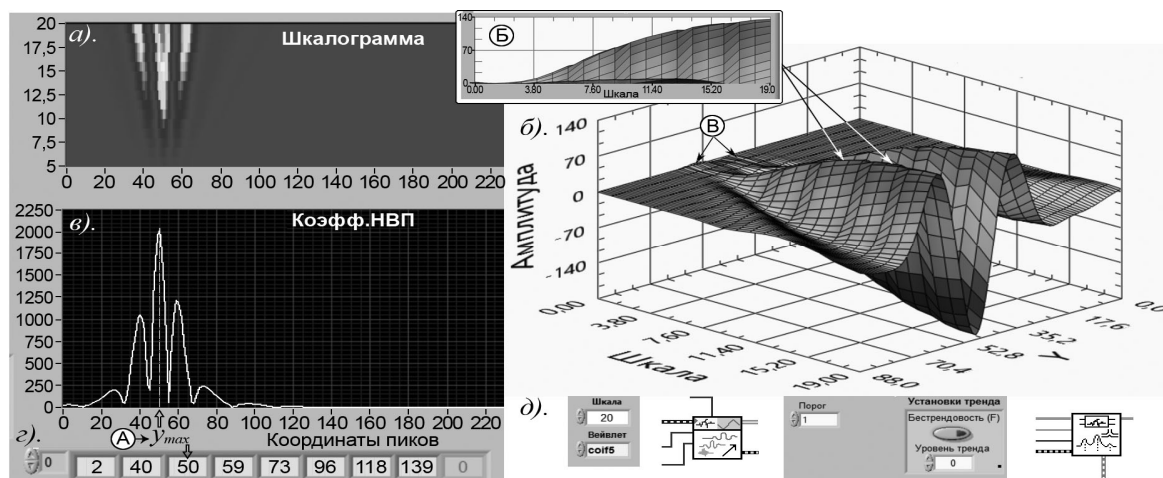


Рис. 4. НВП (coif5):

а и б – шкалограмма НВП – график интенсивностей и 3D-график; в – кривые коэффициентов НВП; г – массив координат пиков; д – установки параметров функций обработки

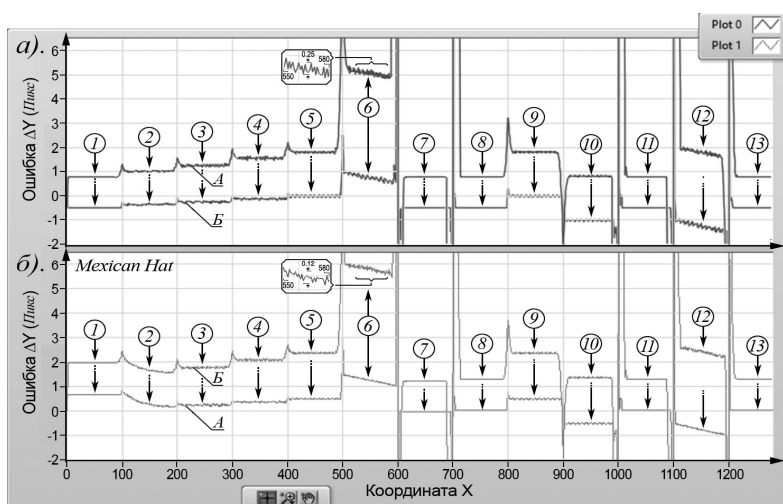


Рис. 5. Распределение погрешностей для фрагментов резкого (А) и размытого (Б) изображения: а и б – метод анализа распределения освещенностей и максимумов кривых коэффициентов НВП

лутных координат в широком диапазоне варьируемых параметров обеспечивает простейший способ вычисления средневзвешенного значения всей выборки кривых коэффициентов НВП. Однако для каждого типа сигнала и выбранного вейвлета можно использовать методику анализа совокупности взаимного положения максимумов, что эквивалентно фильтрации особенностей сигнала [4].

На рис. 5 представлены графики вычисленной погрешностей для тестового изображения резкого (А) и размытого (Б) изображения методом среднеквадратичной погрешности (рис. 5а) и методом нахождения максимумов кривых НВП для вейвлета «Mexican Hat». Характерной особенностью вейвлета «Mexican Hat» является то, что он симметричный, не имеющий компактного носителя.

Графики погрешностей во всех фрагментах изображений показывают наличие систематической погрешности (в зависимости от угла наклона границы) и «случайной» (осциллирующей). Характер поведения кривых погрешностей сохраняется для всех фрагментов изображения при любых методах информационного анализа координаты. В области границ фрагментов ( $i, i+1$ ), где происходит резкое изменение угла наклона границ, наблюдается всплеск погрешности, которая зависит от изменения угла наклона границ, область всплеска определяется шириной и наклоном кривой. Всплески погрешностей имеют максимальные значения в местах разрыва функции границ. Направление всплеска погрешностей совпадает с направлением изменения угла наклона границ. Характер поведения погрешностей объясняется процессом перепикселизации структуры наклонной границы изображения.

Совпадение особенностей осцилляции случайных погрешностей, в областях границ изо-

бражения сравниваемых методов указывает на то, что она вызвана исключительно дискретным характером структуры изображения. Погрешность метода кривых НВП более чем в два раза меньше метода прямого анализа распределения освещенностей. Интересно отметить, что для фрагмента изображения (2), имеющего постоянный небольшой наклон, метод НВП дает ниспадающую зависимость систематической погрешности, что определяется близостью границы к краю изображения и отсутствия компактного носителя для выбранного типа вейвлета. В то же время для других типов вейвлетов (имеющих компактный носитель) данный эффект отсутствует. Для классического вейвлета «Haar» систематическая погрешность для размытого изображения в некоторых фрагментах выше, а случайная – меньше, что связано с тем, что выборка не нулевого распределения освещенности размытого изображения больше.

Для вычисления координаты возможно использование других типов известных вейвлетов, применение которых имеют свои особенности, такие как увеличение или уменьшение систематической и случайной погрешностей во фрагментах изображения. Например, для серии вейвлетов Добеши («db 02»–«db 14») систематическая и случайная погрешность выше, и, как правило, имеют тенденцию к возрастанию с увеличением порядка данного типа вейвлета, при этом сильно зависит от угла наклона кривой. Применение вейвлета типа «coif1» имеет такую же систематическую и даже более низкую случайную погрешность для широкого диапазона наклона кривой профиля изображения, однако, при больших наклонах возникает сильно осциллирующая случайная погрешность. Систематическая и случайная погрешность в группе вейвлета типа «coif1»–«coif5» имеют так же тенденцию

возрастать.

Существует два подхода к повышению точности определения координаты  $y_i$ : непосредственный учет систематической погрешности для вычисленного наклона кривой изображения; построение линии профиля изображения, перпендикулярной касательной кривой профиля пересекающей ее в точке  $x_i$ . Второй подход в ряде случаев является более предпочтительным, т.к. в процессе сканирования линии профиля ширина сечения линии распределения освещенности кривой границы остается практически одинаковой, что снижает систематическую погрешность. Однако, при этом постоянно меняется пиксельная структура сечения изображения, кроме того координаты  $x_i$  определяются интерполяционным вычислением. В этом случае погрешность определения координат  $y_i$  достигает 0,1 пикс.

В обоих случаях встает вопрос повышения точности определения максимумов кривых НВП. В ряде случаев эффективным являются методы регрессионного анализа, аппроксимация кривой коэффициентов гауссианом. Более полный учет особенностей пиксельной структуры изображения можно произвести путем усреднения измерений по набору линий профиля с различными углами наклона.

Наиболее неблагоприятный случай является скачок измеряемой координаты  $y(x_f)$ . При увеличении ширины кривой границы изображении функция скачка распределяется на проекционную область ширины кривой вдоль координаты  $Ox$ , примерно соответствующую ширине формируемой кривой границы изображения, при этом погрешность в этой области резко возрастает. Для повышения точности определения координаты скачка  $x_f$  эффективно использовать сканирование горизонтальной линии профиля. В этом случае координату скачка функции можно определить с точностью долей пикселей. Однако этот способ трудно автоматизировать программно. Другим случаем, как уже говорилось, являются случаи резкого изменения функции (изломов), когда максимума или минимума производной ее не существует. Используя описанный выше исследовательский ВП нетрудно показать, что анализ распределения освещенности в линии профиля изображения дает возможность определить параметры такой функции с более высокой точностью, чем прямой анализ выборки.

#### Выводы

1. Использование методов построения изображения кривых границ теневого изображения реализует высокоточные методы вычисления функции профиля контрастной границы фрагментов изображения, имеющих различные углы

наклона, включая вертикальные скачки границы.

2. Применение методов анализа кривых коэффициентов НВП функции распределения освещенности профиля с различными типами вейвлетов более чем в 2 раза повышает точность определения координат профиля изображения при вертикальном сканировании линии профиля, при наклонном сканировании – в 5-10 раз.

3. Метод анализа кривых коэффициентов НВП распределения освещенности в вертикальной линии профиля детектирует скачки профиля поверхности (разрыв функций) и определять координату скачка с точностью 1 пикс.

4. Использование метода построения кривых границ контраста в изображении расширяет область применения систем технического зрения в измерительных задачах, т.к. появляется возможность проводить контроль геометрии изделий имеющих ступенчатый профиль или изломы профиля.

#### Список литературы

1. Мировой лидер высокоточных измерений. Оптические системы. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://mitutoyo.ru/ru\\_ru/products/optical-measuring/](http://mitutoyo.ru/ru_ru/products/optical-measuring/)
2. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW IMAQ Vision / Ю.В. Визильтер [и др.]. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 464 с.
3. Makhov V.E., Potapov A.I. Heterodyne-screen method of inspection of part quality (a review) / Russian Journal of Nondestructive Testing. – 1990. – Vol.25, Issue 10. – P. 756-770.
4. Махов В.Е., Потапов А.И. Использование алгоритмов вейвлет анализа для построения оптических измерительных систем / Контроль. Диагностика. – 2013. – №1. – С. 12-21.
5. Махов В.Е., Потапов А.И. Использование вейвлет-анализа для диагностики системы технического зрения / Контроль. Диагностика. – 2011. – №9. – С. 11-18.
6. Махов В.Е., Потапов А.И. Исследование измерительной оптической системы в условиях механической нестабильности объекта контроля / Контроль. Диагностика. – 2013. – №2. – С. 12-23.
7. Махов В.Е., Репин О.С., Потапов А.И. Измерение линейных размеров системами технического зрения в когерентном свете / Контроль. Диагностика. – 2014. – №4. – С. 12-19.
8. Махов В.Е. Использование алгоритмов вейвлет-анализа в исследовании кинетики формирования порошково-обжиговых покрытий / Конструкции из композиционных материалов. – 2010. – №3. – С. 28-36.
9. Махов В.Е. Исследование алгоритмов вейв-

- лет-преобразования для определения координат световых меток / Вопросы радиоэлектроники. Сер. «Техника телевидения», Вып.2. – СПб: ФГУП НИИТ, 2012. – С. 78-89.
10. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М: Техносфера, 2005. – 1007 с.
11. Махов Е.М., Потапов А.И., Махов В.Е. Прикладная оптика: учеб. пос. – СПб: СЗТУ, 2004. – 348 с.
12. Лиференко В., Закутаев А., Махов В. Компьютерная реализация методов вейвлет-анализа в среде разработки виртуальных приборов NI LabVIEW / Компоненты и технологии. – 2015. – Т.9, №170. – С. 132-139.

V.E. Makhov /Dr. Sci. (Eng.), S.E. Shaldaev /Dr. Sci. (Eng.)/  
Mozhaisky Military Space Academy (St. Petersburg)

### HIGH-PRECISION OPTICAL SYSTEMS FOR MEASURING FORMS OF PRODUCTS AND TOOLS

**Background.** Vision systems are widely applied in automated systems for industrial control of shape and linear dimensions of products and production equipment. It is not always possible to provide conditions for carrying out high-precision measurements, which reduces the performance of primary equipment. Therefore, the urgent task is to develop methods of application of measurement algorithms in a wide range of changes in external conditions affecting the nature of the image.


**Materials and/or methods.** To obtain an independent measurement of the product's fragments the method of the image of curved borders of its contrast is used. To build the surface shape of products the method of scanning the profile line of the optical image is used. When calculating the coordinates of borders functions the method of analysis of the maxima of the curves of ratios of continuous wavelet transform (CWT) is used. For model studies, the virtual appliance and the technology of the National Instruments Company are developed and used.

**Results.** The application of the method of analysis of the maxima of the curves of ratios of CWT allows more than two times increasing the accuracy of determining the coordinates of the image profile in the vertical scanning of the image profile line. At oblique scanning of the profile line, including scanning perpendicular to a tangent to the surface shape, the measurement accuracy increases by 5-10 times. Horizontal scans with an accuracy of 0.1 pixels allow determining a coordinate of the profile leap. When scanning the inclination angle of a profile line at each measurement point there is the elimination of the pixelization effect and the image defects.

**Conclusion.** Model experiments showed the possibility to reach the 0.1-pixel accuracy of measurements of images profile. The possibility of determining the coordinates of the leap and the kink within the boundary of the image with an accuracy of 0.1 pixels is proved. The main applications of high-precision measurement of geometric shapes of shadow images with one-sided or partial access to the measured object determined.

**Keywords:** vision system, continuous wavelet transform (CWT), image filtering, the border of the shadow image.

Статья поступила 23.09.2016 г.  
© В.Е. Махов, С.Е. Шалдаев, 2016  
Рецензент д.т.н., проф. С.П. Еронько



Видеожурнал "ДОНЕЦКИЙ ПОЛИТЕХНИК"  
смотрите каждую субботу  
на телеканале **ОПЛОТ 2**  
YouTube <https://goo.gl/d2kKr0>