

В. Е. МАХОВ, А. И. ПОТАПОВ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМА НЕПРЕРЫВНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Рассматривается вопрос использования алгоритма непрерывного вейвлет-преобразования в измерительной системе технического зрения. Исследуются возможности применения различных алгоритмов измерения в условиях неравномерности освещения и расфокусировки изображения. Представлен способ повышения точности определения линейных размеров изображения, базирующийся на использовании метода непрерывного вейвлет-преобразования для детектирования границ изображения.

Ключевые слова: системы технического зрения, измерение линейных размеров, вейвлет-преобразование, виртуальный прибор.

Важным вопросом при создании измерительных систем технического зрения остается выбор алгоритма измерения [1]. В реальных условиях трудно получить идеальное изображение контролируемого изделия. На результаты измерений влияют неравномерность освещения, неточность позиционирования объекта контроля, дифракция, дефекты оптики и приемника изображения. В задачах с изменяемыми параметрами качества получаемого изображения подбор и настройки функций алгоритма не всегда обеспечивают предсказуемый результат. Кроме того, использование цифровых камер сравнительно невысокого разрешения (640×480 , 1280×1024) совместно с известными алгоритмами измерения не позволяет обеспечить требуемую точность определения размеров изображения контролируемого изделия. Поэтому наибольший интерес представляет разработка помехоустойчивого алгоритма измерений, обладающего высокой точностью, с возможностью определения метрологических характеристик системы технического зрения.

В настоящей статье исследуются возможности системы технического зрения для определения линейных размеров изделий на базе промышленной смарт-камеры NI 1722 фирмы "National Instruments" (NI — США) с использованием алгоритма детектирования границ изображения методом непрерывного вейвлет-преобразования.

Методы вейвлет-анализа [2], в отличие от методов фурье-анализа (частотно-временного анализа), обладают более широкими возможностями исследования неперiodичных функций и детектирования их границ (с выделением областей скачкообразных изменений функции) путем динамического сравнения их с короткими масштабируемыми функциями (вейвлетами). Это дает основания полагать о новых возможностях использования вейвлетов для детектирования границ изображения при построении измерительных систем технического зрения.

Исследования проводились на экспериментальной установке, разработанной на кафедре приборов контроля и систем экологической безопасности Северо-Западного государственного заочного технического университета (СЗТУ — Санкт-Петербург). Внешний вид установки представлен на рис. 1.

Для освещения объекта контроля использовалась осветительная система на базе либо лазерного источника света 1, либо лампы накаливания. Дополнительно для ослабления светового пучка применялся светофильтр 2, а для формирования освещающего пучка лучей — конденсор 3 и линза 4. В качестве контролируемого объекта использовалась регулируемая щель монохроматора 5 ($d = 0 \dots 0,4$ мм, $\delta d = 0,001$ мм). В состав оптической проецирующей системы входит микробиообъектив 6, закрепленный в тубусе 7. В качестве тубуса микроскопа использо-

вался осветитель ОИ-21 отраженного света, который применяется при наблюдении непрозрачных и полупрозрачных объектов в отраженном свете в светлом и темном поле. В схеме использовался эпиобъектив $9\times 0,20$ (длина тубуса 190 мм) с рабочим расстоянием 5,25 мм, что позволяло реализовать подсветку объекта контроля через объектив с помощью дополнительного тубуса 8. В качестве фотоприемника использовалась цифровая смарт-камера 9 (NI 1722). Система освещения и контролируемый объект (щель монохроматора) жестко закреплялись на двухкоординатном столике 10 в рейтере 11 для обеспечения фокусировки микроскопа (наводки на резкость). Оптическая система микроскопа и цифровая камера 9 крепились на отдельном (юстировочном) рейтере 12, что позволяло осуществлять продольную и поперечную подвижку (регулировку по высоте) смарт-камеры, изменяя поле зрения микроскопа.

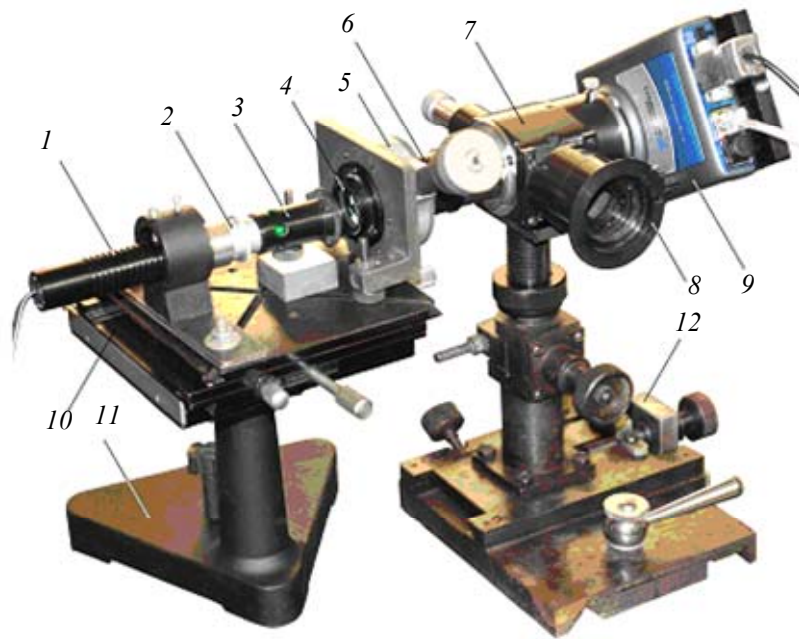


Рис. 1

В ходе эксперимента использовалась операционная система Windows 7, установленная на ноутбук (MacBook Pro 15", 2,4 Гц, 4 Гбайт ОЗУ), среда разработки виртуального прибора — NI LabVIEW 2009, модуль IMAQ Vision, NI Vision Development Module 2009.

Для определения размеров теневого изображения в СЗТУ был разработан исследовательский виртуальный прибор (ВП), структурная схема которого представлена на рис. 2. В виртуальном приборе реализованы следующие измерительные алгоритмы:

— дифференцирование интегрального распределения освещенности (рис. 2, б, блоки 2—10);

— непрерывное вейвлет-преобразование (НВП — CWT — Continuous Wavelet Transform) интегрального распределения освещенности (рис. 2, в, блоки 11—17);

— определение координат прямой края изображения (рис. 2, г, блоки 18—21) — функция модуля IMAQ Vision (Adv. Straight Edge).

Реализация всех алгоритмов предполагает предварительное усредняющее интегрирование (блок 4) распределения освещенности в изображении $\{I(x_i, y_j)\}$ по высоте в заданной области 3:

$$g_i = g(x_i) = \int_c^{c+h} I(x_i, y_j) dy,$$

где c — положение области (по координате Y), h — высота области.

ВП осуществляет измерения одновременно по всем указанным алгоритмам (рис. 2, б—з), кроме того, в приборе предусмотрена дополнительная возможность ввода данных с ранее сохраненных файлов изображений (рис. 2, а), что обеспечивает идентичность условий для последующего анализа и определения размеров теневого изображения различными методами при изменении настроек параметров алгоритмов.

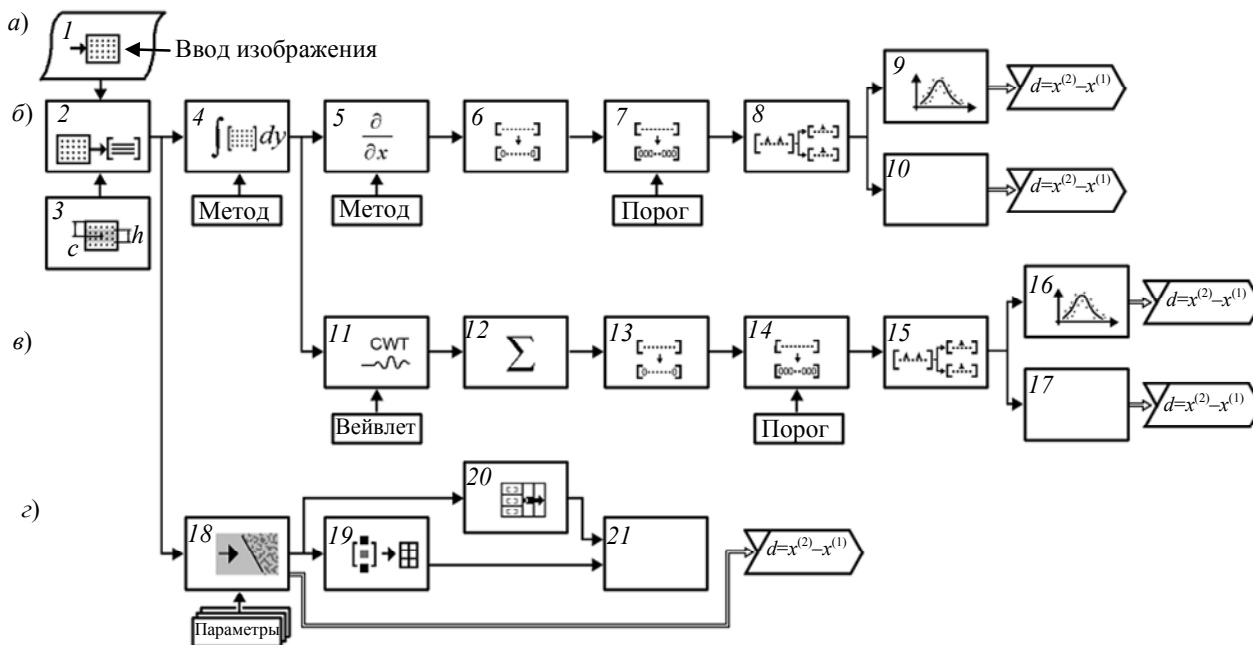


Рис. 2

Для определения координат границ изображения функция $\{g_i\}_{i=1}^N$ разбивается на две кусочные функции (блоки 8, 15), которые соответствуют правому и левому краям теневого изображения: $\{g_i^{(1)}\}_{i=1}^{N_1}$, $\{g_i^{(2)}\}_{i=1}^{N_2}$ ($N = N_1 + N_2$): $\{g_i\}_{i=1}^N = \{g_i^{(1)}\}_{i=1}^{N_1} \cup \{g_i^{(2)}\}_{i=1}^{N_2}$. Для каждой функции g_i^k определяются координаты центра тяжести функций (блоки 10, 17) и координаты максимума μ_k лучшей аппроксимирующей гауссианы [3] (блоки 9, 16):

$$\bar{x}_k = \left(\int x g^k(x) dx \right) / \left(\int g^k(x) dx \right); \quad g^k[i] = a_k \exp \left(- \frac{(x_k[i] - \mu_k)^2}{2\sigma_k^2} \right) + c_k,$$

здесь a_k, σ_k, c_k — параметры гауссианы.

Линейный размер теневого изображения $d(q_i)$ при заданных настройках q_i алгоритма (см. рис 2, б) определяется как для центра тяжести функций: $d_{\text{average}} = \bar{x}^{(2)} + x(N_1) - \bar{x}^{(1)}$, так и для координат гауссианы: $d_{\text{gauss}} = \mu^{(2)} + x(N_1) - \mu^{(1)}$.

На результат определения координат влияют такие факторы, как методы интегрирования и дифференцирование табличной функции, что вызывает скачки детектирующей функции (шум). Удаление шума достигается компарированием и экстраполяцией (блоки 7, 14).

На рис. 3 представлен пример аппроксимации гауссианой табличных детектирующих функций, полученных методом дифференцирования интегрального распределения освещенности (рис. 3, а, б) и методом НВП (рис. 3, в, г).

Измерения проводились для каждой установленной ширины щели монохроматора при выборе порога отсеки шума (блоки 7, 14 на рис. 2), а также исходя из условия временной устойчивости результата измерения относительно заданного уровня освещения (экспозиции).

Для каждого измерения задавалось положение и высота зоны измерения изображения (область усреднения): $c + \Delta c$ и h соответственно ($\Delta c = 20$ пкс, $h = 20$ пкс). Характерные зависимости результатов измерения ширины щели $d(c)$ представлены на графиках (рис. 4): кривые 1—3 соответствуют измерениям, проведенным с использованием стандартного алгоритма модуля технического зрения IMAQ Vision — Adv. Straight Edge для сфокусированного и двух расфокусированных изображений ($\Delta z = +0,5$ мм, $\Delta z = 0$, $\Delta z = -0,5$ мм соответственно); кривые 4, 5 — измерениям с использованием алгоритма дифференцирования интегрального распределения освещенности (математическое ожидание и максимум аппроксимирующей гауссианы соответственно); кривые 6, 7 — измерениям с использованием алгоритма НВП (математическое ожидание и максимум аппроксимирующей гауссианы соответственно).

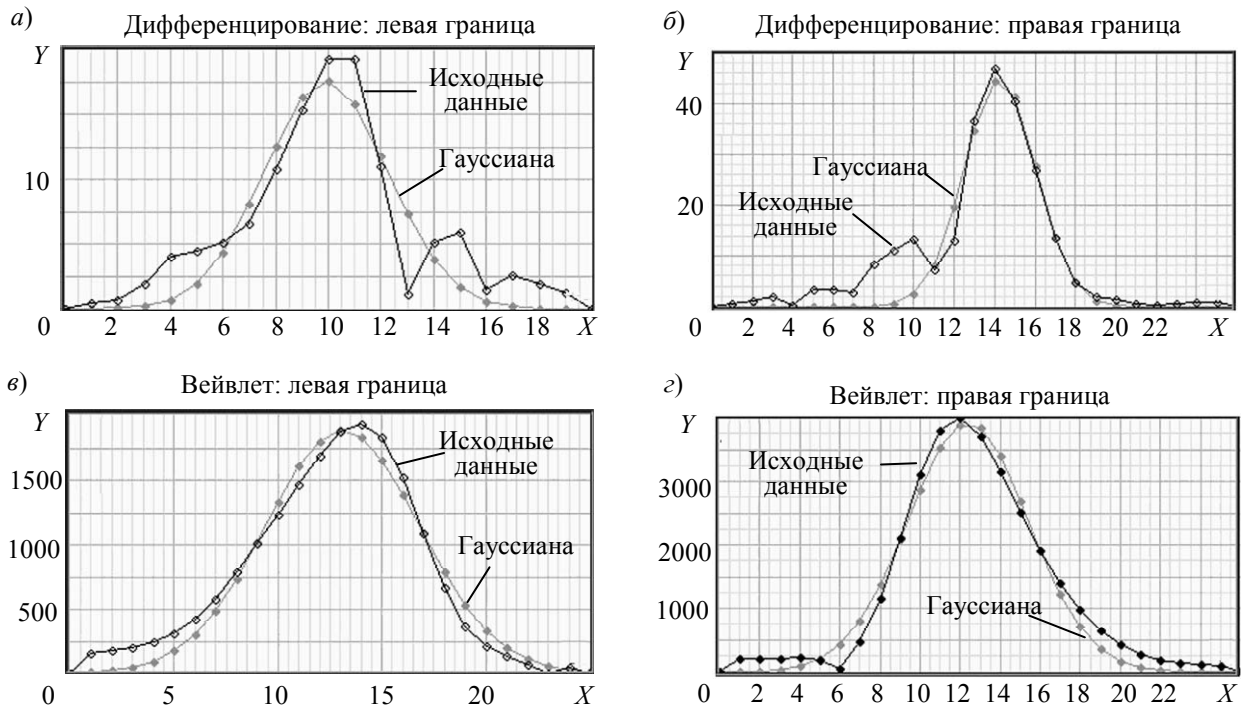


Рис. 3

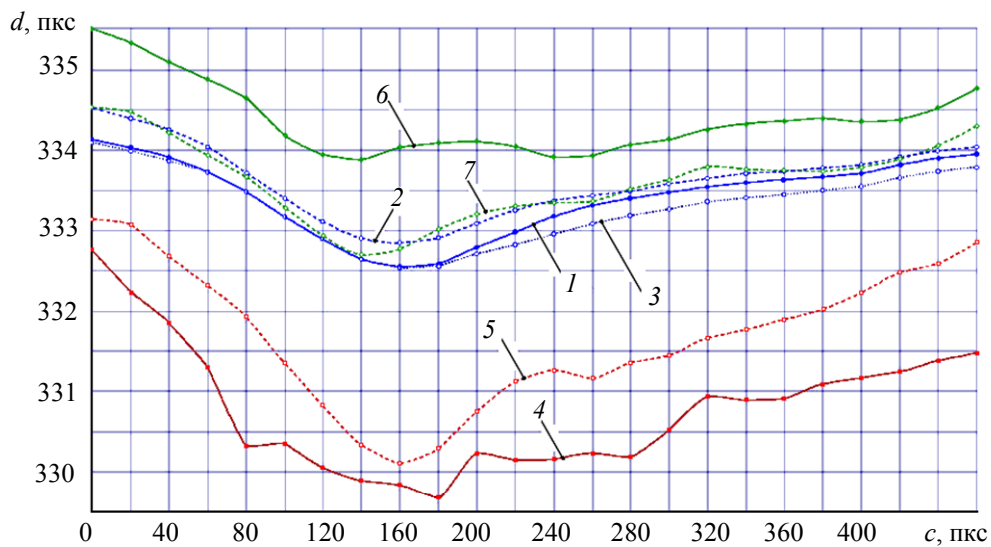


Рис. 4

Как видно из графиков, характер изменения всех кривых достоверно отражает дисторсию оптической системы микроскопа. Кроме того, результат, полученный путем определения

максимума аппроксимирующей гауссианы коэффициентов НВП, почти совпадает со стандартным алгоритмом Adv. Straight Edge.

Исследования точности определения размеров изображения проводились также посредством изменения его освещенности: изменением экспозиции (E) и коэффициента усиления (G). При использовании методов дифференцирования и НВП результат был стабилен во всем диапазоне изменения параметров, тогда как при использовании стандартного алгоритма наблюдалась существенная разница (0,05 пкс) результатов в зависимости от освещенности изображения. На трехмерном графике (рис. 5, а) представлена зависимость результата измерения (σ) от координат области усреднения (OX) и освещенности (OY); двухмерный график (рис. 5, б) позволяет оценить точность измерения в диапазоне изменения освещенности изображения объекта контроля.

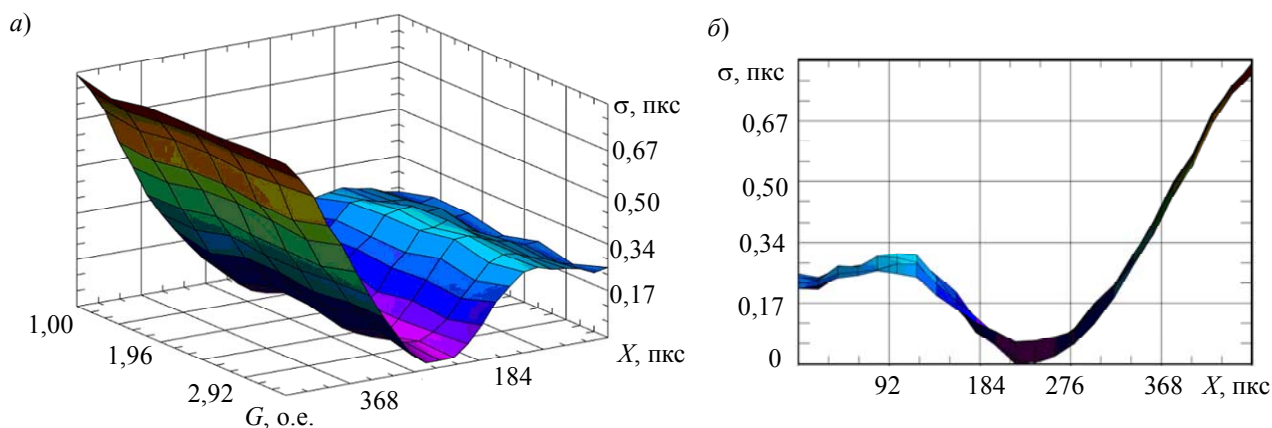


Рис. 5

Таким образом, применение НВП позволяет осуществлять более качественное детектирование краевой границы изображения. Функция SWT-коэффициентов более гладкая, чем функция, полученная дифференцированием. Ширина пиков (всплесков) детектирующей функции, полученной посредством НВП, может быть в несколько раз шире зоны перехода светлого поля в темное. Это обеспечивает более высокую точность определения координат ее максимумов. Дополнительное использование методов регрессионного анализа позволяет в несколько раз повысить точность определения максимумов (границ изображения). Координаты максимумов менее зависимы от значения порога компарирования фонового шума, явления дифракции на границе, изменения уровня подсветки, а также от однородности изображения. Величина максимумов функции SWT-коэффициентов связана с расфокусировкой оптической системы. В широком диапазоне изменения освещенности объекта контроля (при наличии различных дефектов изображения) при различных значениях порога компарирования шума гарантированная точность измерения составляет 0,2 пкс. Метод НВП менее чувствителен к настройкам параметров алгоритма, что позволяет сократить их количество и сделать процесс настройки более прозрачным: это, как следствие, упрощает методику калибровки измерительного прибора.

Метод дифференцирования границ совместно с регрессионным анализом аппроксимирующей функции также позволяет повысить точность определения линейного размера (0,5 пкс), что в два раза выше, чем при использовании стандартных алгоритмов измерений.

Комплексный алгоритм, реализованный в виртуальном приборе контроля и измерения, иллюстрирует работу стандартных алгоритмов детектирования границ изображения, а также возможность применения различных математических методов для обработки изображения. Виртуальный прибор можно использовать с различными цифровыми камерами (USB), например с цифровыми лупами.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при построении контрольно-измерительных систем технического зрения для длительных технологических процессов, например формирования силикатных покрытий [4]. Кроме того, представляется целесообразным использовать результаты исследований для создания лабораторных практикумов, например, по дисциплине „Компьютерные технологии в приборостроении“.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю., Князь В. А. и др. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW IMAQ Vision. М.: ДМК Пресс, 2007. 464 с.
2. Дьяконов В. П. Вайвлеты. От теории к практике. М.: СОЛОН-Р, 2002. 448 с.
3. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами: Пер. с англ. М.: Мир, 1973. 957 с.
4. Махов В. Е. Использование алгоритмов вейвлет-анализа в исследовании кинетики формирования порошково-обжиговых покрытий // Конструкции из композиционных материалов. 2010. № 3. С. 28—36.

Сведения об авторах

- Владимир Евгеньевич Махов** — канд. техн. наук, доцент; Северо-Западный государственный заочный технический университет, кафедра приборов контроля и систем экологической безопасности, Санкт-Петербург; E-mail: wmahov@rambler.ru
- Анатолий Иванович Потапов** — д-р техн. наук, профессор; Северо-Западный государственный заочный технический университет, кафедра приборов контроля и систем экологической безопасности, Санкт-Петербург; E-mail: potapov@nwpi.ru

Рекомендована кафедрой
приборов контроля и систем
экологической безопасности

Поступила в редакцию
03.11.10 г.