

КОНТРОЛЬ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ НА БАЗЕ СМАРТ-КАМЕРЫ

© 2019 г. А.И. Потапов¹, В.Е. Махов^{2,*}, Я.Г. Смородинский^{3,4,**}, Е.Я. Маневич^{5,***}

¹Санкт-Петербургский горный университет, Россия 199106 Санкт-Петербург,
Васильевский остров, 21 линия, 2

²Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Россия 197198
Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

³ИФМ УрО РАН, Россия 620108 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

⁴Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина,
Россия 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19

⁵ЗАО «Эскомстроймонтаж-сервис», Россия 199178 Санкт-Петербург,
Васильевский остров, 17 линия, 54, корп. 4, литер А

E-mail: *vmahov@gmail.ru; **sm@imp.uran.ru; ***manevich@es-servis.com

Поступила в редакцию 11.03.2019; после доработки 07.05.2019

Принята к публикации 17.05.2019

Рассмотрены вопросы построения промышленных систем контроля линейных размеров оптико-электронной системой (ОЭС) на базе смарт-камер фирмы National Instruments (NI). Разработан макет экспериментальной установки по измерению калиброванной перестраиваемой ширины щели монохроматора. Проведено исследование алгоритмов измерения линейных размеров в изображении щели методами дифференцирования распределения освещенности, определения лучших линий границ изображения, определения максимумов кривых коэффициентов непрерывного вейвлет-преобразования (НВП). Проведены сравнения результатов измерения линейных размеров различными алгоритмами при воздействии влияющих факторов на качество изображения. Показано, что точность результатов определения линейных размеров в смарт-камере достигает 0,2 пикселя (1 мкм в диапазоне 3 мм).

Ключевые слова: контроль линейных размеров, оптико-электронная система, ОЭС, смарт-камера, National Instruments, NI, непрерывное вейвлет-преобразование, НВП, кривые коэффициентов НВП.

DOI: 10.1134/S0130308219070054

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

В настоящее время фирма National Instruments (NI — НИ) является ведущим разработчиком и производителем оборудования и программного обеспечения, позволяющего превратить компьютерную систему в мощную систему для проведения измерений и промышленной автоматизации контроля качества изделий [1]. При максимальном использовании возможностей самых современных компьютерных и информационных технологий виртуальные приборы (ВП) позволили значительно увеличить производительность и снизить стоимость решений за счет применения простого в разработке и многофункционального программного обеспечения, такого как среда разработки ВП — NI LabVIEW [2]. Решения фирмы НИ предназначено для решения широкого круга задач измерений и управления технологическими процессами и позиционирования объектов контроля относительно измерительной оптико-электронной системы. Фирма НИ предлагает целый ряд технических решений для сбора и анализа видеоинформации с помощью различных цифровых и аналоговых камер. Поэтому оптико-электронные системы, реализующие промышленную систему технического зрения, могут быть тесно интегрированы с другим технологическим оборудованием [3].

Приложение программного модуля NI Vision Development Module [4] предназначено для разработки измерительных приборов, использующих технологии оптико-электронной системы в промышленных и научных задачах. Модуль включает в себя интерактивное приложение NI Vision Assistant, предназначенное для разработки прототипов приложений в среде графического программирования, и мощную библиотеку более чем 200 готовых функций обработки изображений драйвера модуля NI IMAQ Vision. Возможность совместного использования приложения NI Vision Assistant и функций драйвера NI IMAQ Vision позволяет сократить сроки создания и масштабирования оптико-электронной системы. Это достигается за счет того, что NI Vision Assistant может осуществлять автоматическую генерацию кодов в NI LabVIEW, C/C++ и Visual Basic для последовательности операций по обработки изображений, разработанной в приложении NI Vision Assistant. Диаграмму сбора и обработки видеоинформации можно в дальнейшем интегрировать в промышленную систему измерений и автоматизации (приложение NI Vision Builder for Automated

Inspection — VBA), которая помимо этого может включать в себя управление движением объектами, измерительными приборами или устройствами ввода/вывода сигналов.

В отличие от традиционных цифровых камер, имеющих интерфейс IEEE 1394, Gigabit Ethernet, USB и модулей цифровых камер высокого разрешения [5], смарт-камеры серии NI 1722/1742 [6] представляют собой недорогие встраиваемые системы, сочетающие в себе функциональные возможности промышленного контроллера с возможностями цифровой видеокамеры. Камеры NI 1722/1742, оснащенные процессорами PowerPC 400 и 533 МГц соответственно, являются целевыми платформами реального времени для задач технического зрения. В камерах NI 1722 и NI 1742 используется монохромная ПЗС-матрица Sony ICX424AL с форматом оптики для матрицы 1/3 дюйма с разрешением 640×480 пикселей. Пиксель матрицы имеет размер $7,4 \times 7,4$ мкм. Размеры светочувствительной части датчика составляют 4,736 мм в горизонтальном направлении и 3,552 мм в вертикальном направлении. Высококачественная ПЗС-матрица Sony цифровых камер NI 1722/1742 позволяет проводить захват изображений с разрешением VGA (640×480) на частоте 60 кадров в секунду. На сегодняшний день НИ расширило линейку смарт-камер выпуском новых моделей смарт-камер — NI 1744, NI 1762 и NI 1764. Эти камеры обладают повышенной скоростью цифровой обработки и повышенным разрешением, что позволяет использовать их в более широком круге измерительных задач. Камера NI 1744/1764 имеет более высокое разрешение матрицы, которое позволяет получать изображения с разрешением до 1,3 мегапикселя (1280×1024). Камера NI 1764 сочетает в себе матрицу на 1,3 мегапикселя и упомянутый DSP-сопроцессор с частотой 720 МГц, которые могут быть использованы для детектирования более мелких дефектов изделий и делать измерения в четыре раза быстрее, чем это позволяли делать предыдущих версии смарт-камер.

Дополнительно смарт-камеры оснащены двумя цифровыми входами и двумя цифровыми выходами с оптической изоляцией, одним последовательным портом (RS232) и двумя портами Ethernet стандарта 1 Гб/с, обеспечивая возможности построения распределенных контрольно-измерительных систем контроля [7]. Камера NI-1742 также позволяет подключить квадратурный датчик и оборудована встроенным контроллером освещения для регулировки тока в системах освещения — до 500 мА в режиме непрерывного тока и до 1 А в режиме стробирования.

Смарт-камеры НИ позволяют создавать готовые измерительные решения с помощью модулей NI LabVIEW Real-Time и NI Vision благодаря тому, что обработка полученных ими изображений может быть проведена непосредственно на самой камере. Это делает их идеальным решением для промышленных задач технического зрения. Конфигурирование и настройка самой камеры осуществляется в приложении NI Vision Builder for Automated Inspection (VBA).

Одним из самых важных вопросов в измерительных системах технического зрения остается выбор алгоритмов обработки изображения и измерения [8], обеспечивающих автоматизированный контроль качества различных изделий и объектов [9]. Аппаратная реализация систем технического зрения в части позиционирования и настройки ОЭС по отношению к объекту контроля в большинстве случаев не позволяет получить близкое к идеальному качеству изображение контролируемого изделия. Однако на результаты измерений линейных размеров оказывают влияние такие факторы, как неравномерность и нестабильность освещения, расфокусировка ОЭС, дифракция, дефекты оптики и приемника изображения.

Следует отметить, что использование цифровых камер сравнительно невысокого разрешения (640×480, 1280×1024) совместно с имеющимися алгоритмами измерения (NI Vision Assistant) в практических случаях не обеспечивают требуемой гарантируемой точности измерения параметров контролируемого изделия. Для улучшения качества изображения, полученного с внешнего датчика, можно использовать различные функции предварительной обработки изображения (яркость, контраст, фильтрация). Однако всякая обработка получаемых изображений может носить деструктивный характер для измерительных целей. Поэтому в задачах с изменяемыми параметрами качества получаемого изображения чаще всего требуется работа по подбору и настройке функций алгоритма, которые не всегда дают полностью предсказуемый результат в диапазоне изменяемых параметров изображения.

В связи с этим наибольший практический интерес представляет разработка помехоустойчивого алгоритма измерений, обладающего высокой точностью, с одной стороны, с другой — возможность определения метрологических характеристик оптико-электронной системы для измерения геометрических параметров изделия. Представленные в модуле NI IMAQ Vision алгоритмы измерения построены по принципу нахождения границ контролируемого объекта в его изображении. Большинство алгоритмов используют при нахождении границ принцип компарирования функции освещенности в заданных линиях профиля изображения. Очевидно, что при изменении освещен-

ности объекта контроля, расфокусировке или при наличии дефектов в изображении они могут давать значительную погрешность измерения. Усреднение границ изображения по длине их протяженности или по времени не решает принципиально задачу повышения точности и помехозащищенности измерения.

В то же время известно, что методы, построенные на базе вейвлет-функций [10], обладают более широкими возможностями анализа поведения функций и детектирования их границ (выделяя значимые изменения функции градиента яркости) путем динамического сравнения функции распределения яркости в линиях профиля изображения с короткими масштабируемыми функциями (вейвлетами). Это дает основания полагать о новых возможностях использования вейвлет-преобразований при построении измерительной системы технического зрения [11]. Особо ценным является то, что основные алгоритмы вейвлет-преобразования и анализа на их основе реализованы в технологии виртуальных приборов НИ (модуль NI Advanced Signal Processing Toolkit [12]) и имеют достаточно высокую вычислительную эффективность [13].

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

В работе ставилась цель исследовать возможности системы технического зрения для измерения линейных размеров на базе промышленной смарт-камеры NI 1722 с использованием различных алгоритмов, в том числе на базе непрерывного вейвлет-преобразования функции распределения освещенности в линиях профиля полученных изображений.

ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили на макете экспериментальной установки, внешний вид которой показан на рис. 1.

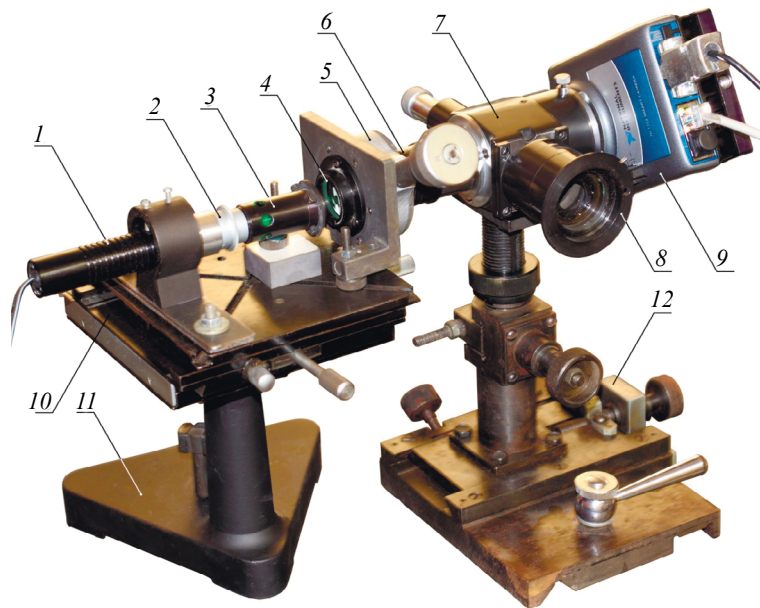


Рис. 1. Экспериментальная установка системы технического зрения.

Для освещения объекта контроля использовали осветительную систему с источником света 1 на базе лазерного модуля, светодиода или лампы накаливания, для ослабления освещающего пучка света — светофильтр 2, для формирования равномерного освещающего пучка лучей — конденсор 3 и линзу 4. В качестве контролируемого объекта для измерения линейных размеров применяли регулируемую щель монохроматора 5 ($d = 0—0,4$ мм, $\delta d = 0,01$ мм). Оптическая проектирующая схема включала в себя микрообъекты 6, закрепленные в тубусе 7. В качестве тубуса микроскопа использовали часть осветителя отраженного света ОИ-21, который применяется при наблюдении непрозрачных и полупрозрачных объектов в отраженном свете в светлом и темном поле. В схеме использовался эпиобъектив 8 ($9\times 0,20$, длина тубуса:

190 мм) с рабочим расстоянием 5,25 мм. В связи с этим тубус имел возможность реализовать подсветку объекта контроля через объектив 8. В качестве фотоприемника использовалась цифровая смарт-камера 9 (NI 1722) фирмы National Instruments.

Система освещения и контролируемый объект 5 (щель монохроматора) жестко крепились на двухкоординатном столике 10 в рейтере 11, который позволял реализовать фокусировку микроскопа (наводку на резкость), а оптическая система микроскопа и цифровой камеры 9 — на отдельном рейтере 12, с которого осуществляли продольную и поперечную подвижку (регулировку по высоте) смарт-камеры, изменяя поле зрения микроскопа.

Работа камеры NI 1722 полностью интегрируется с технологией построения виртуальных приборов (ВП) в среде разработки приложений LabVIEW. Драйвер камеры поддерживает возможность программной установки времени экспозиции (E) и усиления сигнала (G). Минимальное устанавливаемое время экспозиции $E_{\min} = 36,28$ мкс, шаг приращения времени экспозиции $\Delta E = 31,2$ мкс в верхнем пределе — кадровая частота. Это позволяет подстраиваться под уровень освещенности, программно имитировать различный уровень освещенности щели.

Теневые изображения щели для ширины раскрытия $d = 0,450$ мм, полученные с камеры при различных настройках (E , G), показаны на рис. 2.

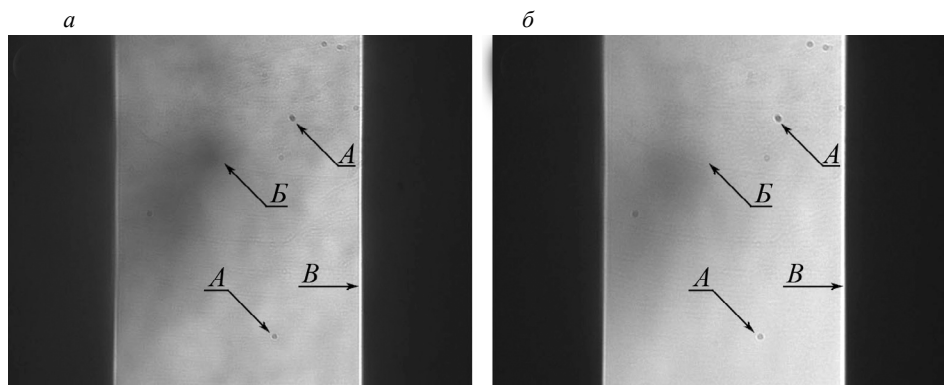


Рис. 2. Изображение щели $d = 0,450$ мм при подсветке источником с лампой накаливания:
а — E , $G = 80$; б — E , $G = 160$.

Из рис. 2 видно, что освещение в поле зрения камеры имеет неравномерность освещенности в поле зрения (слева направо). Также видны мелкие загрязнения (A) поверхности сенсора камеры. Кроме общего линейного градиента неравномерности имеется дефект осветительной системы, выраженный в несимметричном затемнении (B) в центральной части изображения. Краевая дифракция (B) имеет ярко выраженные светлые полосы на границе щели. Несоосность оптической системы щели дает различный контраст и резкость левой и правой границ изображения щели. Из изображения видно, что проектирующая оптическая система имеет характерную подушкообразную дисторсию.

Для проведения измерений ширины щели теневого изображения был разработан комплексный исследовательский ВП, где параллельно реализованы несколько алгоритмов измерения расстояния между границами теневого изображения объектов с протяженными линейными границами. Блок-схема измерения ВП представлена на рис. 3. Для получения результата измерения ширины щели в ВП использован алгоритм дифференцирования интегрального распределения вдоль заданной длины границы освещенности (рис. 3б), алгоритм непрерывного вейвлет-преобразования (НВП — SWT) распределения освещенности (рис. 3в), стандартный алгоритм NI IMAQ Vision нахождения прямых границ левого и правого краев изображения (рис. 3г) — Adv. Straight Edge. Все алгоритмы предполагали некоторую интегральную оценку ширины щели по высоте границы в кадре изображения.

Сравнение результатов контроля обеспечивалось тем, что ВП проводил измерения одновременно всеми алгоритмами, реализующими указанные методы измерения. Кроме того, имел возможность вводить данные с ранее сохраненных файлов изображений, заранее полученных с цифровой камеры, что обеспечивало идентичность условий для последующего анализа и измерений различными методами с изменением настроек параметров алгоритма.

Согласно представленной блок-схеме ВП, предварительно введенное изображение 1 с цифровой камеры или из файла (рис. 3а), преобразуется в двумерный массив освещенностей 2 в заданной прямоугольной области 3:

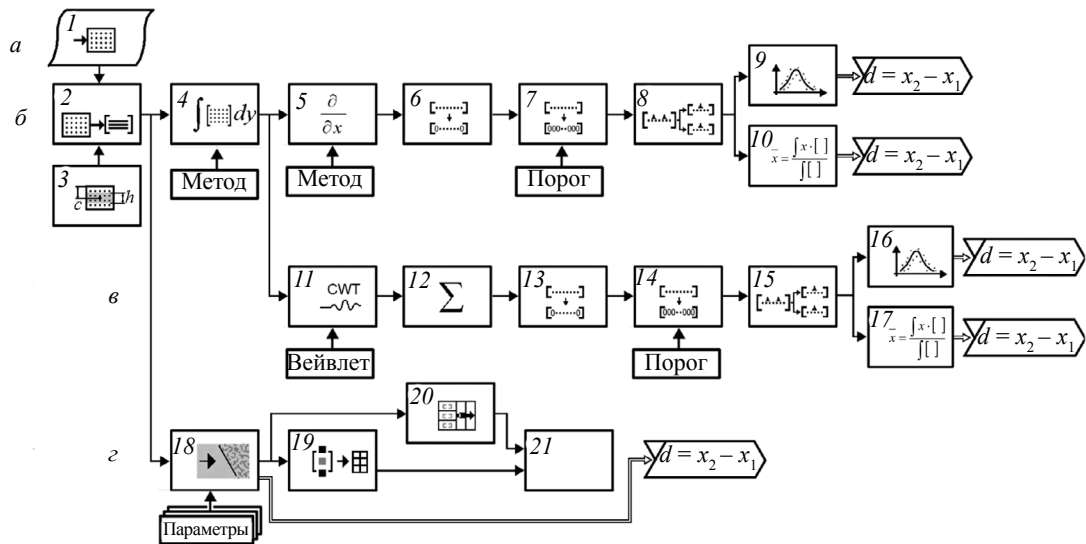


Рис. 3. Блок-схема измерительного виртуального прибора:

а — ввод изображения; б — метод дифференцирования интегрального распределения освещенности; в — метод нахождения лучшей прямой через границу в изображении (Adv. Straight Edge); г — метод НВП.

$$I(x, y) \Rightarrow \{S_{i,j}\}_{i=1, j=c}^{N, c+h}. \quad (1)$$

Для реализации метода дифференцирования (рис. 3б) и метода НВП (рис. 3в) находится табличная функция $\{G_i\}$ интегрального распределения интенсивностей $4 g(x)$ по заданной области (смещение c , высота h):

$$g(x) = \int_c^{c+h} I(x, y) dy, \quad \{G_i\}_{i=1}^N = \sum_{j=0}^K S_{i,j}. \quad (2)$$

В методе дифференцирования границ интегральная табличная функция $\{G_i\}_{i=1}^N$ дифференцируется 5, отсекаются краевые зоны справа и слева 6, фильтруется шум с заданным порогом по освещенности 7. Далее функция $g(x)$ разбивается на две кусочные функции $g_1(x)$ и $g_2(x)$ 8, содержащие правый и левый край изображения (скачок освещенности), соответствующих границам в изображении. Для каждой кусочной функции $g_1(x)$ и $g_2(x)$ находятся координаты лучшего Гауссиана 9 и математическое ожидание (координаты центра тяжести) функции 10.

Метод измерения по кривым коэффициентов НВП (рис. 4в) использует ранее полученную интегральную функцию интегрированного по высоте распределения освещенности $g(x)$ для получения двумерной вейвлет-шкалограммы НВП 11. Интегрирование шкалограммы 12 дает функцию кривых коэффициентов НВП. Аналогично отсекаются краевые зоны 13, фильтруется шум 14, функция разбивается на две функции 15, производится измерение по аппроксимирующему Гауссиану 16 и нахождению максимумов кривых коэффициентов НВП 17.

На рис. 4а представлены характерные графики интегрального распределения

Рис. 4. Обработка изображения щели:
а — функция интегрального распределения освещенности и ее производная; б — шкалограмма НВП (Heat); в — кривые коэффициентов НВП (Heat).



освещенности в изображении (кривая 1) и результат ее численного дифференцирования (кривая 2), на рис. 4б — шкалограмма НВП для вейвлета типа Heat интегрального распределения освещенности, рис. 4в — кривые коэффициентов НВП.

Кривая интегрального распределения освещенности изображения $g(x)$ (1) отражает общую неравномерность освещенности в изображении и локальные дефекты изображения (например, на матрице камеры). Сама кривая $g(x)$ является более гладкой, чем распределение освещенности в каждой отдельной строке изображения (так как мелкие локальные дефекты вносят меньший вклад). Однако результат непосредственного дифференцирования табличной функции с небольшим количеством точек в зоне перепада освещенности, при наличии даже незначительных шумов, не дает гладкой функции при любом методе дифференцирования. Кроме того производная функции зависит от контраста границ изображения.

Как видно из графиков шкалограммы НВП (рис. 4б) и кривых коэффициентов НВП (рис. 4в), метод анализа НВП лучше детектирует границы в изображении, чем производная функции $g'_x(x)$, осуществляет высокочастотную и низкочастотную фильтрацию сигнала согласно спектральным образам выбранного типа вейвлета, не внося собственных шумов. Поэтому отношение амплитуды пиков кривых коэффициентов НВП в области границ изображения и дефектов имеет в несколько раз большее значение, чем для обычной производной. Амплитуда кривых коэффициентов НВП пропорциональна уровням перепадов освещенности и обратно пропорциональна ширине перехода темного поля в светлое поле, а величина амплитуды кривых коэффициентов отражает резкость границ в изображении. Одновременно НВП детектирует также неравномерность освещенности и дифракционные пики освещенности. Однако амплитуда всплесков кривых коэффициентов НВП, вызванные этими фактами, будет достаточно мала. Характер кривых коэффициентов НВП зависит от типа используемого вейвлета. Например, вейвлет типа `biog 3_1` дает большую амплитуду и ширину пиков коэффициентов НВП по сравнению вейвлетом типа `Heat`. При этом практически исчезают пики, вызванные дифракционными явлениями.

Координата границы изображения определяются особенностями функции, полученной дифференцированием или НВП. Можно считать, что максимум функции $g'_x(x)$ является характерной особенностью, связанной с границей изображения. Ввиду того, что количество точек табличной функции в зоне границы ограничено и имеют значительную погрешность, следует сделать предположение, что она симметрична относительно своего максимума. Это согласуется с физическим представлением идеального расфокусированного изображения. Поэтому для табличной функции предлагается ассоциировать максимум с координатами математического ожидания кривых коэффициентов НВП.

В то же время, форма кривых коэффициентов НВП заведомо несимметрична относительно своих максимумов и определяется с точностью дискретности элементов массива. Поэтому реальные максимумы кривых коэффициентов НВП не совпадают с их математическим ожиданием.

Для повышения точности определения координат максимума функции целесообразно более полно использовать информацию в зоне возмущения функции. Для достижения этого рассмотрим метод определения центра тяжести (математического ожидания) фрагментов функции, содержащей максимум и метод регрессионного анализа — нахождения аппроксимирующего Гауссиана [14] в зоне всплеска функции (рис. 5)

$$y[i] = a \cdot \exp\left(\frac{(x[i] - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) + c. \quad (3)$$

Из представленного примера видно, что кривая коэффициентов НВП `biog 3_1` более несимметрична, чем кривая дифференцирования и гораздо хуже аппроксимируется Гауссианом.

Измерения линейного размера проводились для каждой установленной ширины щели при изменении порога отсечки шума b , $1l$, а также устойчивости результата измерения по отношению к уровню освещения (экспозиции). Для каждого измерения задавалось положение « $c + \Delta c$ » и высота « h » зоны измерения (область усреднения), что соответствовало ($\Delta c = 20$ пикс, $h = 20$ пикс). Результаты проведенных измерений $d(c)$ представлены на графиках (рис. 5).

Кривые 1, 2, 3 соответствуют измерениям, полученным при помощи алгоритма «Adv. Straight Edge» для сфокусированного ($z = 0$ пикс) и максимально расфокусированного изображения ($z = 0,5$ пикс и $z = +0,5$ пикс); кривые 4, 5 — алгоритму измерения по методу дифференцирования интегрального распределения освещенности (математическое ожидание и максимум аппроксимирующего Гауссиана соответственно); кривые 6, 7 — алгоритму измерения по методу анализа экстремумов НВП (математическое ожидание кривых в зоне экстремумов и максимумов аппроксимирующего Гауссиана соответственно).

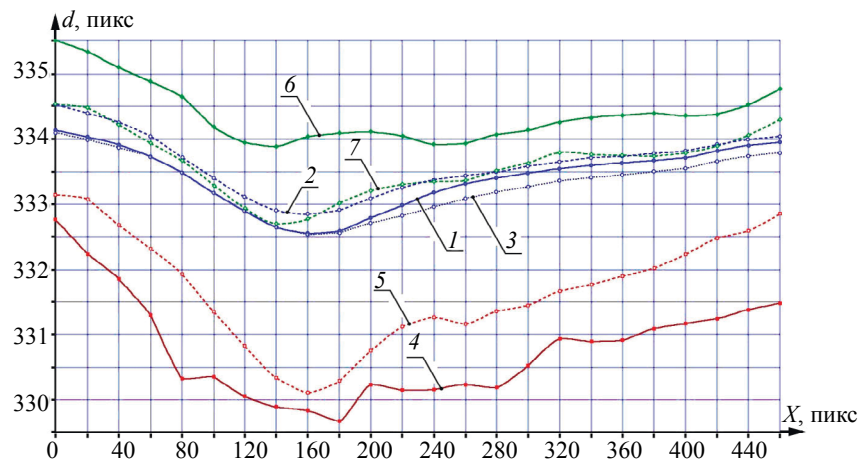


Рис. 5. Зависимость результата измерения от положения зоны интегрирования.

Как видно из рис. 5, характер поведения всех кривых правильно отражают дисторсию оптической системы микроскопа. Кроме того, результаты, полученные методом определения максимума, аппроксимирующего Гауссиана коэффициентов НВП, практически совпадают с результатами по методу определения прямых границ, реализованного в модуле NI IMAQ Vision — «Adv. Straight Edge».

Исследования точности измерения ширины щели проводили также путем изменения освещенности изображения: на камере изменялась экспозиция (E) и усиление (G). В методе дифференцирования и НВП результат был стабилен во всем диапазоне изменения параметров, в то время как стандартный алгоритм давал существенную разницу (0,05 пикс) в зависимости от освещенности изображения (рис.6).

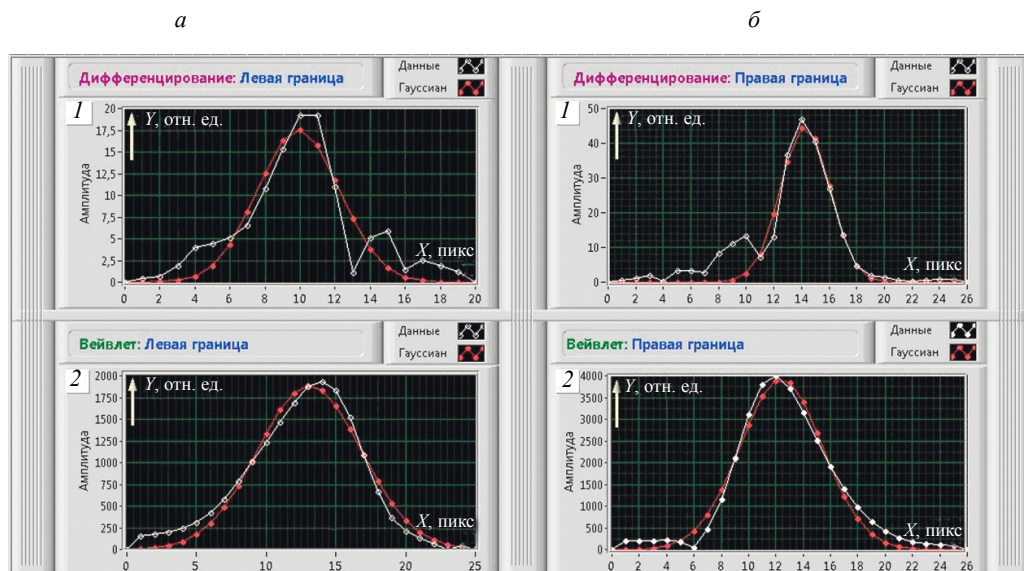


Рис. 6. Пример регрессионного анализа интегрального распределения освещенности: 1 — метод дифференцирования; 2 — метод НВП (а — фрагмент левой границы; б — фрагмент правой границы).

Проведенные экспериментальные исследования позволяют сделать вывод, что метод НВП лучше детектирует краевую границу изображения, функция кривых коэффициентов НВП более гладкая, ширина всплеска может быть в несколько раз шире зоны перехода светлого поля в темное поле. Это, в свою очередь, обеспечивает более высокую точность определения координат максимумов,

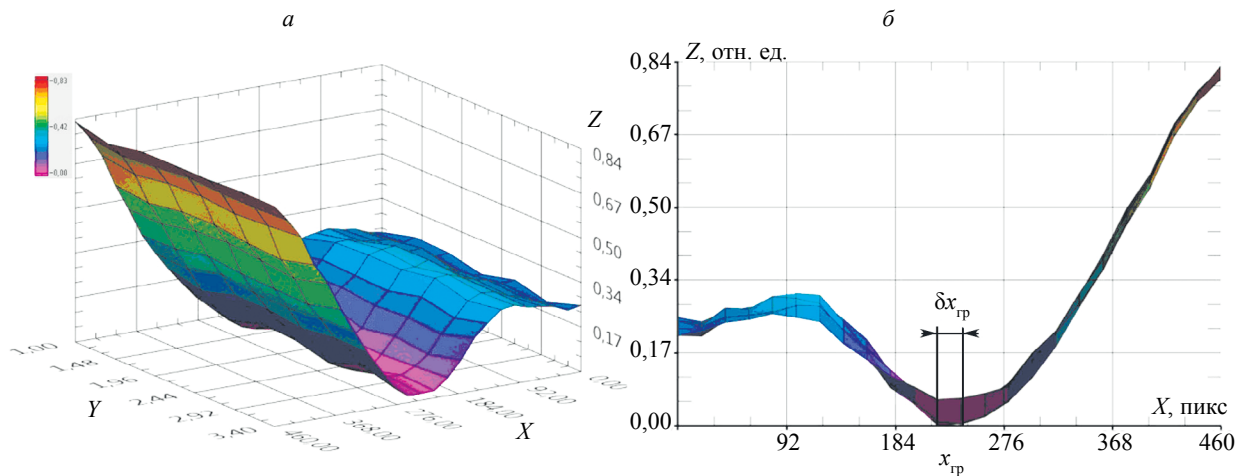


Рис. 7. Зависимость результата измерения ширины щели от освещенности:

a — трехмерный график отклонения результатов измерения (ось Z) при различной освещенности (ось Y) по высоте изображения (ось X); *б* — проекция измерений при различной освещенности на плоскость ZOX .

связанных с координатами границ изображения. Положение максимумов более устойчиво к установке порога компарирования фонового шума, явлению дифракции на границе, изменению уровня подсветки, а также ее однородности.

На рис. 7*а* показана трехмерная шкалограмма НВП освещенности, в выделенной зоне градиента контраста, которая представлена поверхностью $z = f(x, y)$. На рис. 7*б* приведена плоская проекция поверхности НВП, которая показывает коридор кривых масштабов (Y) при НВП, определяющих точность измерения (неопределенность) $\delta x_{гр}$ границы теневого изображения $x_{гр}$.

ВЫВОДЫ

Из проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод, что в широком диапазоне настроек порога компарирования шума гарантированная точность измерения линейных размеров составляет 0,2 пикс. Метод дифференцирования границ совместно с регрессионным анализом аппроксимирующей функции также обеспечивает достаточно высокую точность измерения — 0,4 пикс, что в два раза выше стандартных алгоритмов измерений, представленных фирмой National Instruments, которые основаны на компарировании распределения освещенности в линиях профиля изображения.

Использование метода НВП распределения освещенности сокращает количество настроек алгоритма, делает процесс настройки функции НВП физически более прозрачным в широком диапазоне изменения неконтролируемых параметров измерительной системы. Как следствие этого, использование алгоритма на базе метода НВП упрощает методологию калибровки измерительного прибора.

Все рассмотренные алгоритмы могут быть реализованы в смарт-камере фирмы НИ, что позволяет использовать их в задачах мониторинга линейных размеров изделий в процессе их изготовления и эксплуатации [15].

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баран Е.Д. LabVIEW FPGA. Реконфигурируемые измерительные и управляющие системы. М.: ДМК Пресс, 2009. 448 с.
2. Трэвис Дж., Кринг Дж. LabVIEW для всех / 4-е изд. М.: ДМК Пресс, 2011. 880 с.
3. Махов В.Е., Репин О.С. Исследование возможностей систем видеоконтроля на базе решений фирмы National Instruments на станках рулонной печати. Современное Машиностроение. Наука и образование / Материалы 2-й Международной научно-практической конференции. Под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С. 500—510.
4. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Князь В.А., Ходарев А.Н., Моржис А.В. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW IMAQ Vision. М.: ДМК Пресс, 2007. 464 с.

5. *Махов В.Е., Орлов Д.В., Ретин О.С., Потапов А.И.* Построение оптических систем технического зрения с цифровыми камерами высокого разрешения // Вестник компьютерных и цифровых технологий. 2014. № 9. С. 15—22.
6. NI Vision. Интеллектуальная камера NI 17xx. Руководство пользователя, 372429A-01 / Перевод на русский язык: учебный центр «Центр технологий National Instruments», Новосибирский государственный технический университет. © National Instruments Corporation, Ноябрь 2007. 73 p.
7. *Патракеев Н.В., Потапов А.И., Махов В.Е.* LabVIEW 8 — новые возможности автоматизации проектирования контрольно-измерительных систем // Компоненты и технологии. 2007. № 2(67). С. 138—141.
8. *Махов В., Ширококов В., Закутаев А.* Построение систем технического зрения на базе компьютерных технологий National Instruments // Control Engineering Россия. 2018. № 4 (76). С. 62—69.
9. *Махов В., Борисов С.В., Ширококов В.В., Закутаев А.А.* Макет для разработки программно-алгоритмического комплекса контроля объектов космического пространства // Вестник Российского нового университета. Серия Сложные системы: модели, анализ и управление. 2019. № 1. С. 75—87.
10. *Смоленцев Н.К.* Введение в теорию вейвлетов. Ижевск: РХД, 2010. 292 с.
11. *Махов В.Е., Потапов А.И.* Использование алгоритмов вейвлет-анализа для построения оптических измерительных систем // Контроль. Диагностика. 2013. № 1. С. 12—21.
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.
13. *Махов В.Е.* Использование алгоритмов вейвлет-анализа в исследовании кинетики формирования порошково-обжиговых покрытий // Конструкции из композиционных материалов. 2010. № 3. С. 28—36.
14. *Химмельблау Д.* Анализ процессов статистическими методами / Пер. с англ. М.: Изд-во Мир, 1973. 957 с.
15. *Maksarov V.V., Olt J.* Improving the precision of manufacturing power hydraulic cylinders of powered roof supports based on a vibration-damping tooling system // Journal of Mining Institute. 2015. V. 214. P. 71—84.