

Н. В. Смирнов, М. С. Лопатина, С. С. Митрофанов

СЧИТЫВАЮЩАЯ СИСТЕМА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Рассматривается алгоритм снятия отчетов устройством считывающей системы инкрементного оптико-электронного преобразователя линейных перемещений, предназначенного для комплектации многокоординатного механообрабатывающего оборудования. Приведены результаты экспериментальных исследований.

Ключевые слова: линейные перемещения, оптико-электронный преобразователь перемещений, инкрементный преобразователь линейных перемещений, штриховая мера длины.

Ускорение темпа развития новых технологий обуславливает постоянное повышение сложности и точности выполнения операций механической обработки деталей на промышленном оборудовании. При этом точность обработки зависит, главным образом, от точности позиционирования исполнительного элемента обрабатывающего комплекса относительно обрабатываемого узла. В свою очередь, задача повышения точности позиционирования рабочего элемента и детали неразрывно связана с задачей контроля их взаимного положения. Обеспечение высокой точности преобразователей линейных перемещений при сохранении уровня надежности и работоспособности систем при высоких скоростях движения контролируемых объектов (обрабатываемых деталей) позволяет повысить экономическую эффективность производства. Таким образом, разработка линейных преобразователей для контроля исполнительных механизмов промышленных станков является крайне важной задачей.

С учетом приведенных факторов в Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики разрабатывается преобразователь линейных перемещений, принцип функционирования которого базируется на методе оптоэлектронного сканирования штриховых растров при работе в отраженных пучках лучей. Преобразователь состоит из прецизионной штриховой меры длины, устанавливаемой на подвижной части контролируемого объекта, и считывающей системы, устанавливаемой на неподвижной части объекта. При этом считывающая система содержит канал точного отсчета для анализа положения штрихов меры и канал грубого отсчета для порядковой нумерации штрихов.

Канал (устройство) точного отсчета обеспечивает высокую дискретность измерений порядка 0,05 мкм при диапазоне измерений 1 мм и имеет при этом малые габариты. Функциональная схема канала точного отсчета представлена на рис. 1. Параллельный пучок лучей источника оптического излучения 1, расположенного в фокусе коллимирующего объектива 2, падает на измерительный растр 3 с периодом штриховой меры 1 мм. Отраженные от растра пучки лучей регистрируются фотоприемной камерой, состоящей из объектива 4 с увеличением $1\times$, зеркала 5, служащего для уменьшения размеров системы, и КМОП-матрицы 6 с HD-разрешением.

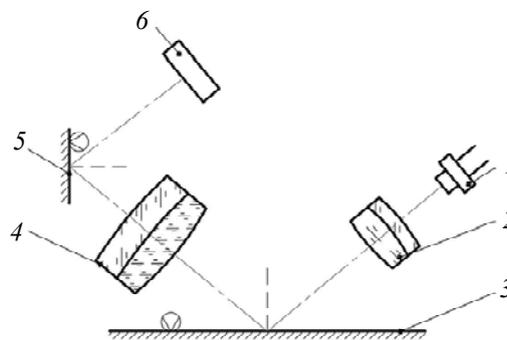


Рис. 1

При высокой скорости перемещения шкалы постоянная подсветка неизбежно вызовет эффект „смаза“ изображения, что пагубно скажется на точностных характеристиках системы. Во избежание этого необходимо использовать осветитель на основе импульсного лазера, так

чтобы длительность освещения штрихов была меньше временного интервала, за который шкала смещается более чем на один пиксел.

Использование фотокамеры, в поле зрения которой находится небольшой участок растра, порядка 3 мм (три штриха), в совокупности с высокой частотой опроса, позволяет определять положения штрихов с точностью до 0,1 мкм.

Все это обуславливает жесткие требования к алгоритму обработки как по точности получаемой информации, так и по времени выполнения алгоритма. Для решения данной проблемы был разработан алгоритм, предназначенный для выделения в кадре изображений штрихов прецизионной меры и определения координат центров изображений на основе вычисления их энергетических центров тяжести. Алгоритм реализуется в электронном блоке линейного преобразователя.

Исходной информацией для расчета является цифровое изображение, регистрируемое фотоприемной камерой в видимом диапазоне длин волн.

Алгоритм включает в себя четыре основные процедуры:

- регистрацию изображения;
- предварительную обработку;
- морфологическую обработку;
- определение координат.

Процедура регистрации изображения (рис. 2, а) заключается в преобразовании значения непрерывной энергетической облученности, фиксируемого на поверхности матричного фотоприемника, в двумерный массив дискретных чисел.

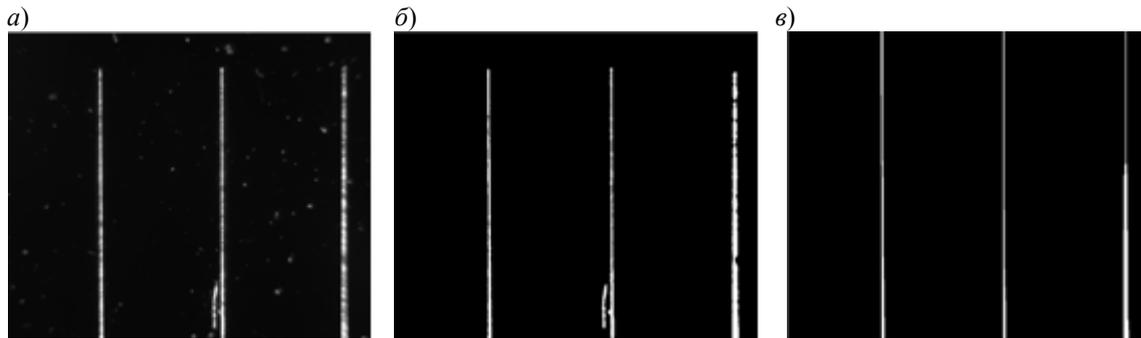


Рис. 2

Процедура предварительной обработки предназначена для исключения или частичного уменьшения зашумленности изображения, вызываемой шумом записи, ошибками в передаче данных или загрязнением поверхности штриховой меры. Эта процедура основана на выполнении двух операций:

- адаптивной пороговой фильтрации по методу Отсу;
- медианной фильтрации.

Адаптивная пороговая фильтрация по методу Отсу [1] базируется на анализе гистограммы распределения значений яркости пикселей. Результатом операции является бинарное изображение [2].

Медианная фильтрация предназначена для устранения на изображении точечных и импульсных шумов (см. рис. 2, б). Медианный фильтр представляет собой скользящее окно, охватывающее нечетное число элементов изображения [3].

Процедура морфологической обработки предназначена для выделения объекта заданной формы. Эта процедура заключается в выполнении двух операций:

- эрозии;
- замыкания.

Эрозия представляет собой операцию сужения бинарного изображения по заданной маске [4]. В качестве маски был выбран плоский линейный элемент с углом наклона 90° относительно горизонтальной оси и длиной $l = y/2$, где y — высота кадра.

Операция замыкания состоит в устранении разрывов в изображении и „заливке“ изображений штрихов по всей ширине (рис. 2, в). [5]. В качестве маски для выполнения операции замыкания применяется та же маска, что и на этапе операции эрозии.

По результатам суммарной обработки светлые области изображения принимаются за изображения штриха. Далее производится сегментация и маркировка отдельных изображений и для каждого найденного штриха вычисляется значение координаты его центра по горизонтальной оси на основе алгоритма определения координаты $X_{ц}$ его энергетического центра:

$$X_{ц} = \frac{\sum_{i=1}^M Q_s(x_i)x_i}{\sum_{i=1}^M Q_s(x_i)},$$

где $Q_s(x_i)$ — суммарный заряд, полученный в результате сложения элементарных зарядов, формируемых всеми пикселями i -го столбца матрицы изображения; M — число строк матрицы; x_i — дискретные значения пикселей по строкам.

Данный алгоритм позволяет вычислить координату центра изображения с погрешностью, не превышающей десятых или сотых долей размера пиксела [5]. При этом неоспоримым преимуществом алгоритма является возможность реализации посредством выполнения небольшого количества операций за отведенное для измерений время. Следует отметить, что применение процедуры морфологической обработки позволяет обнаружить и распознать штрихи с высокой вероятностью.

Для оценки погрешности разрабатываемого преобразователя необходимо определить погрешности канала точного отсчета как устройства, ограничивающего предельное разрешение и дискретность. С этой целью был разработан и изготовлен макет канала точного отсчета преобразователя, который размещался на испытательном стенде [6], построенном на базе лазерного интерферометра XD-1 фирмы API (США).

Исследование случайной составляющей погрешности преобразований в статике (без перемещений штриховой меры) является основополагающим экспериментом, позволяющим вычислить предельную погрешность определения положения штриха. По значению этой погрешности можно судить о возможности получения требуемого разрешения и дискретности преобразователя.

В процессе экспериментов фотоприемной камерой проводилась многократная съемка изображений штриховой меры с частотой 7 кадров/с. Измерения координаты $X_{ц}$ и среднеквадратического отклонения $\sigma_{X_{ц}}$ проводились в несколько серий (см. таблицу), в каждой из которых фотоприемной камерой регистрировались различные участки штриховой меры.

Исследования, проведенные на макете канала точного отсчета преобразователя, показали хорошую повторяемость результата для разных участков штриховой меры. Таким образом, установлено, что предельная позиционная чувствительность регистрации изображения штриха при измерениях в статике составляет порядка 0,05 пкс. При пересчете в пространство предметов эта величина, с учетом размера пиксела 2 мкм, будет составлять 0,1 мкм. Данные значения получены для макета канала точного отсчета, параметры которого указаны выше, — это позволяет утверждать, что погрешность определения положения штриха не будет превышать 0,1 мкм.

Цель исследования статической характеристики макета канала — определение функциональной зависимости между задаваемым смещением (L) штриховой меры и рассчитанными значениями $X_{ц}$, а также определение систематической составляющей погрешности макета.

Номер серии	Номер штриха	$X_{ц}$, пкс	$\sigma_{X_{ц}}$, пкс
1	1	441,32	0,05
	2	981,73	0,03
	3	1524,41	0,03
2	1	398,61	0,04
	2	938,71	0,04
	3	1481,20	0,05
3	1	343,65	0,03
	2	883,71	0,05
	3	1425,88	0,04
4	1	289,87	0,03
	2	830,05	0,04
	3	1371,85	0,03
5	1	235,94	0,02
	2	776,12	0,01
	3	1317,68	0,04

Подвижная часть объекта с закрепленной на ней штриховой мерой смещалась на минимально возможный шаг, средняя величина которого 10 мкм при диапазоне измерений 0,5 мм. На каждом шаге фотоприемной камерой осуществлялась съемка кадра с изображением трех соседних штрихов меры, при этом пространственное положение определялось только для центрального штриха. На каждом шаге величина смещения штриховой меры контролировалась интерферометром. На основе полученных данных была построена регрессионная зависимость

$$L(X_{ц}) = 543,490362 \cdot \bar{L} + 1052,019976,$$

где \bar{L} — результат измерений интерферометром величины смещения штриховой меры, мм.

Измеренное отклонение (ΔX) показаний канала точного отсчета преобразователя (рис. 3) от соответствующих значений, принятых в приведенном уравнении, в каждой точке составило не более $\pm 0,45$ пкс. При этом следует отметить, что данная величина может быть уменьшена на последующем этапе калибровки преобразователя.

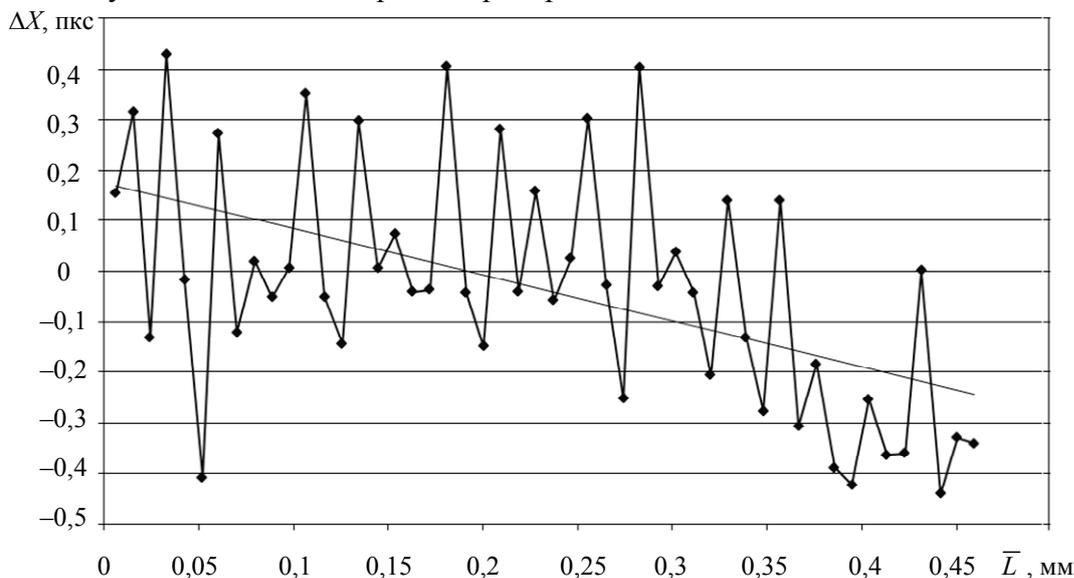


Рис. 3

Несомненный интерес представляют также исследования точностных характеристик преобразователя в динамическом режиме. Для этой цели был собран рабочий макет разрабатываемого преобразователя с диапазоном перемещения 1340 мм. Со схемой установки, методикой проведения исследований и алгоритмом обработки полученных данных можно ознакомиться в работе [6].

Результаты измерений погрешности $\Delta L = L - \bar{L}$ исследуемого преобразователя для прямого и обратного хода приведены на рис. 4.

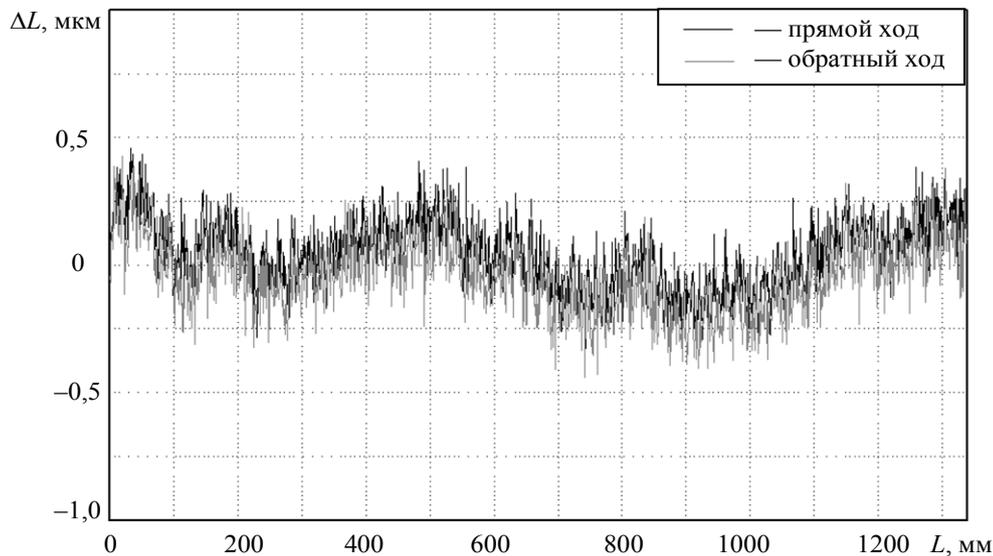


Рис. 4

Как показали результаты многократных измерений, погрешность опытного образца оптико-электронного преобразователя линейных перемещений не превышает $\pm 0,5$ мкм на всем диапазоне измерений, что отвечает современным требованиям проведения высокоточных операций на механообрабатывающем оборудовании. На этом основании можно сделать вывод о правильности выбора принципа функционирования считывающей системы и схемы ее построения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Transact. on Systems, Man, and Cybernetics. 1979. Vol. 9, N 1. P. 62—66.
2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
3. Яне Б. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2007. 584 с.
4. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддингс С. Цифровая обработка изображений в среде MatLab. М.: Техносфера, 2006. 616 с.
5. Андреев А. Л., Ярышев С. Н. Методы моделирования ОЭС с многоэлементными анализаторами изображения: Методические указания к лабораторным работам. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 52 с.
6. Смирнов Н. В., Прокофьев А. В. Оптико-электронный преобразователь линейных перемещений субмикронной точности // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 7. С. 27—31.

Сведения об авторах

Николай Викторович Смирнов

— студент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики;
E-mail: pirate.kolyan@gmail.com

Мария Сергеевна Лопатина

— ОАО «НПЦ „Завод Ленинец“», Санкт-Петербург; инженер-конструктор; E-mail: gulf_of_me_90@mail.ru

Сергей Сергеевич Митрофанов

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики; E-mail: m1990s@mail.ru

Рекомендована кафедрой
компьютерной фотоники
и видеоинформатики НИУ ИТМО

Поступила в редакцию
17.11.13 г.

УДК 535.317.2

М. Е. ЗАЦЕПИНА, В. К. КИРИЛЛОВСКИЙ

ТЕНЕГРАММА ЛИНЕЙНОЙ РЕШЕТКИ КАК ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНТЕРФЕРОГРАММЫ СДВИГА

Исследованы и разъяснены принципы, на основании которых система изофот теневой картины ножа Фуко, сформированная при реализации разработанного количественного теневого метода в виде ряда параллельных полос, близких к прямым, может быть интерпретирована как геометрическая модель интерференционной картины поперечного сдвига.

Ключевые слова: теневой метод, нож Фуко, геометрическая модель интерферограммы поперечного сдвига, изофотометрия, деформации волнового фронта.

Введение. Теневой метод ножа Фуко, разработанный в 1856 г. и повсеместно применяемый в наши дни в оптическом производстве, определяет функцию искажений волнового фронта как полутоновую картину, позволяющую лишь качественно отображать деформации исследуемой оптической поверхности или волновые аберрации в выходном зрачке исследуемой оптической системы. Способ же количественной расшифровки теневых картин не был развит в метод измерения и соответственно не нашел практического применения [1].

Поэтому главной задачей, стоящей перед исследователями, является создание количественного теневого метода, базирующегося на традиционном качественном теневом методе, но имеющего ряд принципиальных отличий как по структуре, так и по новым непревзойденным возможностям, создаваемым благодаря современным достижениям высоких технологий, в том числе компьютерных.

Постановка задачи. Предметом исследования в данной статье является последовательное обстоятельное рассмотрение операций, инструментов и средств, использованных в процессе разработки количественного теневого метода, теоретическое обоснование метода и создание алгоритма его практической реализации. Основой построения такого алгоритма являются следующие этапы:

— подробный анализ теоретических и методических основ разрабатываемого метода на базе построения глубоких логических аналогий между создаваемым количественным теневым методом и традиционным методом двухлучевой интерферометрии;

— исследование и количественный анализ связи между деталями полутоновой теневой картины как двумерной функции неравномерности освещенности и деформациями волнового фронта, возникающими при неровностях полированной поверхности или при наличии поперечных аберраций в выходном зрачке исследуемой оптической системы;