

## МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫБОР ФОРМЫ ОПТИЧЕСКОЙ МАРКИ В ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

© 2010 г. А. Н. Королев\*, доктор техн. наук; А. И. Гарцуев\*; Г. С. Полищук\*\*;  
В. П. Трегуб\*\*, канд. техн. наук

\* ООО “Оптротех”, Санкт-Петербург

\*\* ОАО “ЛОМО”, Санкт-Петербург

E-mail: a.korolev@optrotech.ru, vptreg@rambler.ru

В статье приведены результаты исследований, выполненных с целью определения оптимальной формы оптической марки в цифровых измерительных системах с использованием вычисления центра тяжести изображения.

**Ключевые слова:** ПЗС-матрица, измерение координат изображения, погрешность измерения центра тяжести изображения, детерминированная погрешность, критерий оптимизации, цифровой автоколлиматор.

Коды OCIS: 120.3930, 230.5160.

Поступила в редакцию 21.12.2009.

В работе [1] показано, что на стандартной ПЗС-матрице реально измерение центра тяжести (ЦТ) изображения марки с погрешностью на уровне тысячных долей пиксела. Именно этот уровень точности реализуется, например, в цифровом автоколлиматоре [2].

Речь идет об определении координат изображения марки на матрице отсчетов, например на светочувствительной матрице ПЗС-камеры или линейки, в различных измерительных задачах. Проблема выбора оптимальной формы оптической марки связана с погрешностью определения ЦТ изображения, обусловленной, в частности, влиянием дискретизации и квантования изображения при малых сдвигах. Оптимальной маркой будем считать марку, форма которой позволяет минимизировать погрешность определения ЦТ.

Известно, что при сдвиге изображения на матрице отсчетов, например по оси  $x$ , на величину  $\Delta_x$  при размере матрицы  $N_x$  спектр Фурье изображения умножается на фазовый член  $\exp\left(2\pi \frac{\Delta_x}{N_x}\right)$ .

Это свойство преобразования Фурье использовалось для синтеза цифровых массивов изображений с заданным сдвигом.

Для проведения исследований были выбраны три объекта, фрагменты которых представлены на рис. 1. Это наиболее простые объекты, которые могут быть выполнены в форме диафрагм и

масок. Для вычислений использовалась матрица отсчетов  $512 \times 512$ , размер фрагментов, приведенных на рис. 1, –  $70 \times 100$  пикс.

Объект (а) – прозрачный штрих шириной 7 и длиной 240 пикс на темном фоне. Это типовой объект, используемый при визуальных измерениях.

Объект (б) – штрих с переменным пропусканием треугольной формы  $14 \times 240$  пикс, интегральное пропускание которого равно пропусканию объекта (а). Использование такой марки в некоторых приборах связано с представлением об улучшении чувствительности к сдвигу за счет получения отклика для большего числа элементов с разным уровнем яркости.

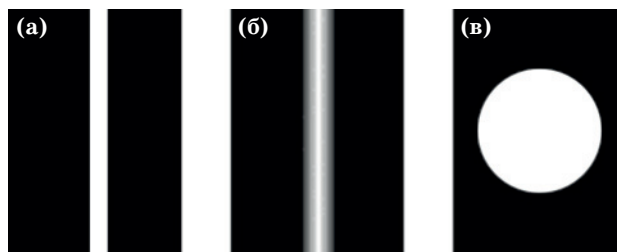


Рис. 1. Набор марок для исследований точности определения центра тяжести изображения (фрагменты  $70 \times 100$  пикселов). Пояснения в тексте.

Объект в – прозрачный круг на темном фоне (с равномерным распределением пропускания) диаметром 50 пикс.

Для всех трех объектов были синтезированы цифровые массивы изображений со сдвигами от 0 до 0,5 пикс с шагом 0,01 пикс при 8-битовом квантовании, что соответствует 256 уровням яркости. Очевидно, что сдвиги от 0,5 до 1 пикс можно рассматривать как сдвиги от –0,5 до 0 пикс, поскольку они являются зеркальными по отношению к сдвигам в интервале от 0 до 0,5 пикс и не представляют самостоятельного интереса. Процедура синтеза состояла из следующих операций:

- 1) вычисление спектра Фурье объекта

$$F(\omega_x, \omega_y) = \Phi[f(x, y)], \quad (1)$$

где  $\Phi$  означает прямое преобразование Фурье;

- 2) вычисление спектра размытого объективом изображения, смещенного в соответствии с выражением

$$F_{\Delta}(\omega_x, \omega_y) = F(\omega_x, \omega_y)H(\omega_x, \omega_y)\exp\left(2\pi\frac{\Delta_x}{N_x}\right), \quad (2)$$

где  $H(\omega_x, \omega_y)$  – оптическая передаточная функция (ОПФ) объектива (в расчетах использовалась ОПФ дифракционно ограниченного объектива с предельной пространственной частотой  $65 \text{ мм}^{-1}$ ), экспоненциальный множитель – фазовый сдвиг, обеспечивающий смещение объекта на величину  $\Delta_x$ ;

- 3) вычисление цифрового массива, соответствующего изображению объекта, смещенного относительно решетки отсчетов на заданную величину  $\Delta$ ,

$$f_{\Delta}(x, y) = \bar{\Phi}[F_{\Delta}(\omega_x, \omega_y)], \quad (3)$$

где  $\bar{\Phi}$  означает обратное преобразование Фурье.

Исследования проводились путем определения погрешности измерения координаты ЦТ изображения марки при различной величине сдвига для перечисленных выше типов марок.

Погрешность измерения есть разность между измеренным значением и истинным значением измеряемой величины. В данном исследовании измеренными значениями являются координаты ЦТ изображения марки по оси  $x$ , вычисленные для цифровых массивов, формируемых в соответствии с выражением (3). Для получения истинного значения вычислялись координаты ЦТ изображения марок по оси  $x$  в исходном состоянии (с нулевым сдвигом), а затем к этим координатам добавлялись значения сдвигов  $\Delta_x$ , используемые при синтезе изображений со сдвигом.

На рис. 2 представлены графики зависимости погрешности измерения положения ЦТ изображения для различных марок. Следует отметить, что это детерминированная, а не случайная погрешность, и ее причиной являются процессы дискретизации и квантования уровней яркости в изображении марки.

Как следует из графиков, для марки (а) размах погрешности составляет  $\pm 0,005$  пикс, для марки (б)  $\pm 0,012$  пикс, для марки (в)  $\pm 0,0013$  пикс.

По результатам исследования можно сделать вывод, что для минимизации погрешности измерения должны быть выполнены два условия:

- 1) резкий край границы марки (высокое значение угла наклона первой производной на границе марки);

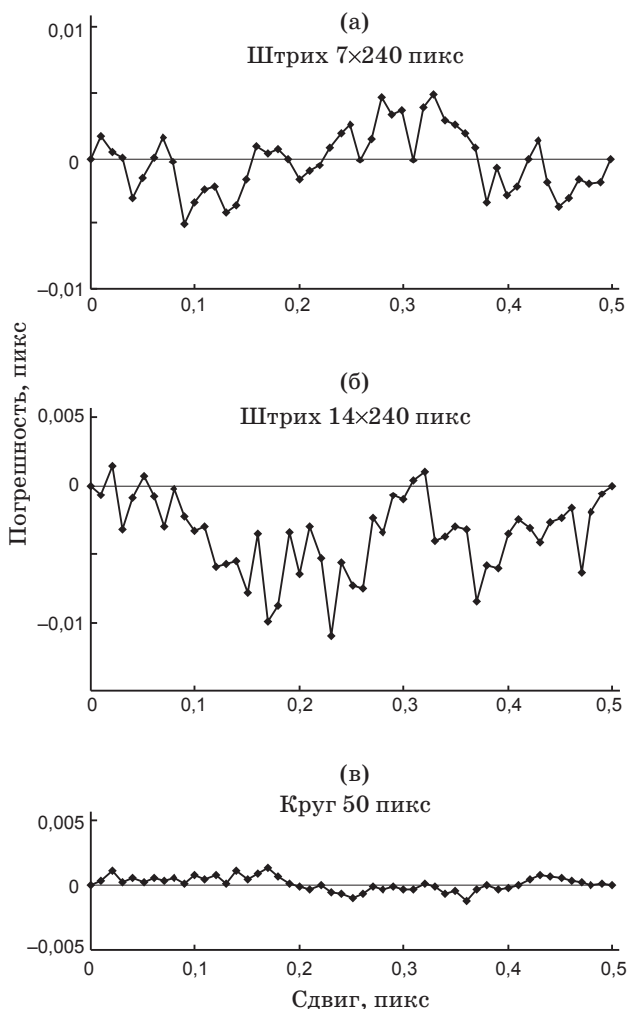


Рис. 2. Зависимости погрешности измерения положения центра тяжести изображения различных марок, приведенных на рис. 1, от величины сдвига.

2) большое число различных значений уровней яркости (широко заполненная гистограмма).

Очевидно, что для марки (а) выполняется условие 1, для марки (б) – условие 2, а для марки (в) – оба условия одновременно.

С целью увеличения значений уровней яркости для марки (в) при выполнении преобразования Фурье вводился дополнительно фазовый сдвиг по оси  $y$  на некоторую случайную величину 0,33 пикс. Это позволяет устранить симметрию отсчетов в изображении круга относительно оси  $x$ .

Следует признать, что оптимальной маркой по результатам расчетов и в соответствии с приведенным выше критерием является марка (в) – круг диаметром 50 пикс.

При увеличении числа уровней квантования погрешность уменьшается. Дополнительные расчеты для марки (в) показали, что 9-битовое квантование (512 уровней) снижает погрешность вдвое; 10-битовое квантование (1024 уровня) и выше не дает заметного снижения погрешности.

Очевидно, что вышеприведенные метрологические оценки имеют существенное значение для точных измерений на уровне сотых и тысячных долей пиксела.

Важным является вопрос о влиянии шума при выполнении подобных измерений. При единичных измерениях описанные погрешности будут размыты влиянием шума. Однако при достаточной статистике эти погрешности будут отображаться в результатах измерений.

Было проведено моделирование расчета ЦТ для марки (в) с учетом влияния аддитивного шума при двух значениях сдвигов – 0,0 и 0,17 пикс. На рис. 2 на нижнем графике для этой марки (в) точке сдвига 0,17 пикс соответствует максимальное значение погрешности 0,0013 пикс. При наложении аддитивного белого шума с нормальным распределением при среднеквадратическом отклонении, равном 1–2 уровням квантования, при условии усреднения результатов измерения для 100 и более кадров, была получена погрешность определения ЦТ изображения марки в диапазоне  $0,001 \pm 0,0005$  пикс, что соответствует приведенным расчетам. При увеличении уровня шума погрешность начинает значительно отклоняться от расчетной. Эти результаты подтверждают необходимость использования малошумящих камер для вышеописанных прецизионных измерений.

Отдельный интерес представляет сопоставление результатов измерений для ПЗС-матрицы и

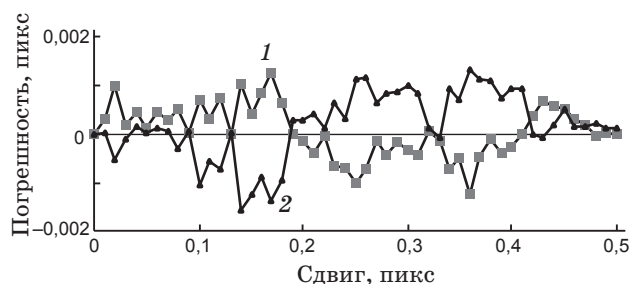


Рис. 3. Зависимости погрешности измерения положения центра тяжести изображения марки (в) для матрицы с 8-битовым квантованием (1) и для линейки с 12-битовым квантованием (2).

ПЗС-линейки. На рис. 3 представлены графики погрешности измерения положения ЦТ изображения марки (в) для матрицы с 8-битовым квантованием (256 уровней) и для линейки, высота пиксела которой превышает размер марки, с 12-битовым квантованием (4096 уровней).

Результаты расчетов, представленные на рис. 3, показывают, что погрешность измерений для обоих типов приемников в этом случае практически одинакова. Конечно, линейка обеспечивает более высокое быстродействие, но, в данном случае, не имеет метрологических преимуществ.

## Выводы

Выполнены аналитические и расчетные исследования для оптико-цифровых систем по сопоставлению точности измерения смещения координаты изображения центра тяжести оптической марки при малых сдвигах самой марки в зависимости от формы марки. Результаты исследований показывают, что имеет место детерминированная погрешность определения смещения центра тяжести, связанная с эффектами дискретизации и квантования видеосигнала. Показано, что для круглой марки указанная погрешность в разы меньше, чем для марки в форме штриха. Приводятся аргументы, объясняющие полученный результат.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Королев А.Н., Гарцуев А.И. Исследование точности позиционирования изображения на ПЗС-матрице // Измерит. техн. 2004. № 5. С. 20–22.
2. Королев А.Н., Гарцуев А.И., Полищук Г.С., Трегуб В.Л. Цифровой автоколлиматор // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 10. С. 42–47.