

УДК 621.317:621.383.82

Геометрическая калибровка телевизионных измерительных систем с твердотельными ФПУ

В. Г. Матюшенко, В. В. Страхов, А. О. Жирков

Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, Москва, Россия

В настоящее время широкое распространение в различных отраслях — машиностроении, медицине, искусстве, криминалистике — получают оптические дистанционные методы определения размеров и формы объектов. Одним из направлений развития оптических бесконтактных измерительных устройств являются цифровые телевизионные системы. Развитию этого направления способствует появление на рынке разнообразных по типу и стоимости малогабаритных телевизионных камер и устройств ввода телевизионного сигнала в ЭВМ (фреймграбберов). В литературе приведено описание телевизионных измерительных систем [1] с дорогостоящими телекамерами, но для разработчиков систем представляют интерес достижимые точностные характеристики при относительно невысокой стоимости элементной базы. С этой целью в экспериментах были использованы недорогие бескорпусные телекамеры SK1004CP формата 1/3" (стоимостью до 40 дол.) и устройство ввода телевизионного сигнала фирмы ADDA TECHNOLOGIES — Aver 2000.

В цифровых измерительных телевизионных системах информацию о размерах и форме объектов получают при обработке оцифрованных изображений, создаваемых приемной системой. Изображение при оцифровке разделяется на элементарные фрагменты — пиксели, которыми оперируют при

дальнейшей обработке. Размеры пиксела являются одной из основных характеристик систем данного класса. Каждый пиксел оцифрованного изображения соответствует элементу плоскости изображения, совпадающей в телевизионных системах с плоскостью фотоприемного устройства (ФПУ) телевизионной камеры. Постановка задачи определения размеров пиксела объясняется тем, что выходной сигнал ТВ-камеры является аналоговым и связан со структурой ФПУ неявным образом. Размеры пиксела оцифрованного изображения зависят как от топологии фотоприемного устройства телекамеры, так и от типа используемого фреймграббера. В статье рассмотрены методика, аппаратура и результаты геометрической калибровки телевизионных измерительных систем — определение размеров пиксела оцифрованного изображения.

Необходимо отметить, что сложность определения размеров пиксела при использовании указанных телекамер связана с тем, что плоскость ФПУ произвольным образом ориентирована в пространстве, и телекамера не имеет каких-либо технологических поверхностей, которые можно было бы принять в качестве базовых.

Технологический комплекс

Идея измерения размеров пиксела состоит в том, что на поверхности ФПУ исследуемой телевизионной камеры создается изображение эталонной структуры с известными геометрическими характеристиками (в дальнейшем — трафарет). Зафиксировав это изображение в памяти ЭВМ, определяет расстояние между марками трафарета в пикселах оцифрованного изображения и, зная геометрические характеристики трафарета, определяют размеры пиксела.

Вследствие конструктивных особенностей расстояние между плоскостью ФПУ и защитным стеклом составляет порядка 2 мм. Для повышения точности проекцию трафарета на плоскость ФПУ целесообразно выполнять в параллельных лучах. Для создания изображения трафарета в плоскости ФПУ был использован метод теневой проекции. Оптическая схема установки представлена на рис. 1.

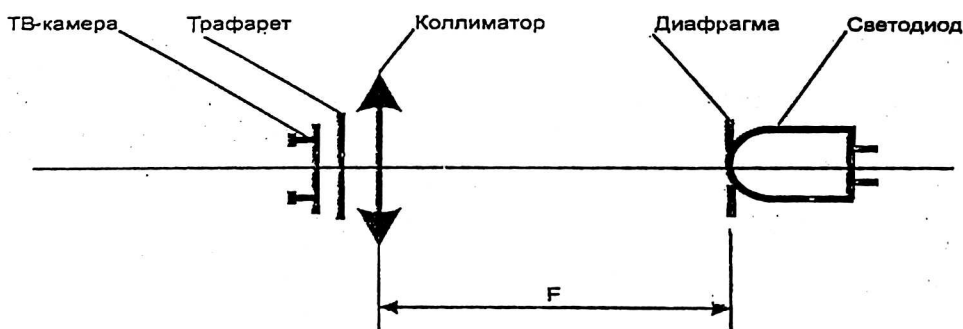


Рис. 1. Оптическая схема установки

Установка представляет собой коллиматор, в фокальной плоскости которого размещена диафрагма, освещаемая светодиодом. Использование последнего исключает хроматические aberrации коллимационной системы. В целях упрощения конструкции излучающую поверхность светодиода делают диффузной и устанавливают непосредственно в плоскости диафрагмы. Фокусное расстояние коллиматора составляет 240 мм, диаметр диафрагмы равен 0,1 мм.

Таким образом, линейная погрешность проекции трафарета на плоскость ФПУ не превышает 0,42 мкм. Размеры элемента ФПУ исследуемой телевизионной камеры составляют 9,6х6,3 мкм.

Телекамера совместно с трафаретом располагаются после коллиматора. Проекция трафарета на ФПУ телекамеры происходит в параллельном пучке лучей без использования объектива, так как это может внести дополнительные погрешности.

В состав установки для определения размеров пиксела входит также подвижная платформа, на которую устанавливают исследуемую камеру. Платформа позволяет выставлять ФПУ телекамеры параллельно плоскости трафарета. Конструкция установки обеспечивает исследования телекамер формата 1/3", 1/2" и 3/4". Общий вид установки для определения размеров пиксела представлен на рис. 2.

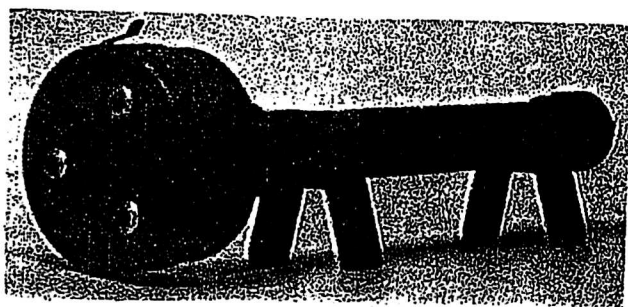


Рис. 2. Общий вид установки для определения размеров пиксела

Трафарет представляет собой набор из 64 одинаковых квадратов, расположенных определенным образом: 46 квадратов образуют наружную рамку, содержащую 10 строк и 15 столбцов; 18 квадратов составляют центральную зону, которая служит для оценки полученных результатов.

Квадраты в пределах каждой зоны расположены на одинаковом расстоянии друг от друга. Расстояние между квадратами в центральной зоне некратно расстоянию между квадратами в пределах внешней рамки. Это сделано для того, чтобы они занимали различные положения относительно структуры ФПУ. Квадраты центральной зоны не используются при вычислении размеров пиксела. Топология трафарета представлена на рис. 3.

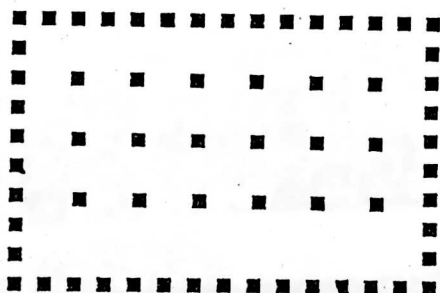


Рис. 3. Топология трафарета

Макет трафарета предварительно изготавливается на листе формата А1, а затем фотографическим способом с соответствующим уменьшением переносится на стеклянную пластинку. Полученный трафарет тестируют на измерительном микроскопе: определяют размеры квадратов и расстояния между ними. Результаты измерений показали, что средняя величина стороны квад-

рата составляет 119,3 мкм. Расположение квадратов, образующих нижнюю и левую стороны рамки, характеризуется минимальным разбросом, не превышающим с.к.о. измерений, составляющее 0,64 мкм. Центр квадрата, расположенного в правом верхнем углу трафарета, смещен на 3 мкм вверх (относительно квадрата, расположенного в левом верхнем углу) и на 2 мкм влево (относительно квадрата, расположенного в правом нижнем углу). Соответствующий пропорциональный сдвиг наблюдается у всех квадратов, расположенных на верхней и правой сторонах рамки.

Размер чувствительной площадки ФПУ составляет 4,8x3,6 мм. При проведении экспериментов изображение рамки трафарета должно отстоять от края чувствительной площадки примерно на 0,2 мм. Таким образом, учитывая размеры формата А1, целесообразно установить внешние размеры рамки макета трафарета в пределах 792x576 мм, коэффициент изменения масштаба при этом будет равен 180.

Для повышения точности измерений необходимо обеспечить параллельность трафарета и плоскости ФПУ телекамеры. Для этого, как указывалось выше, исследуемую телекамеру устанавливают на подвижную платформу, обеспечивающую разворот телекамеры относительно трафарета. Первоначально выполняют согласование телекамеры и трафарета по крену. Устранение взаимного крена важно, так как размеры пиксела неодинаковы по обеим координатам и это может внести дополнительную ошибку. Согласование заключается в выставке центров квадратов, составляющих левую и нижнюю горизонтальные стороны рамки, параллельно строкам и столбцам ФПУ. Вращением трафарета добиваются, чтобы разброс соответствующих координат центров изображений квадратов, выраженный в пикселах, был минимальным.

После согласования по крену изменением пространственного положения плоскости ФПУ добиваются, чтобы она была установлена параллельно трафарету. Для этого определяют среднюю величину площади квадрата, используя пять квадратов, симметрично расположенных в углах внешней рамки — собственно угловой и по два примыкающих к нему вертикальных и горизонтальных. Сопоставление “левых” и “правых” квадратов дает информацию о развороте ФПУ относительно вертикальной оси, “верхних” и “нижних” — относительно горизонтальной. Погрешность углового рассогласования во всех случаях составляет величину порядка 30 угл. с.

После завершения процедуры согласования трафарета и ФПУ подсчитывают количество пикселей между реперными точками. Соотнося их с паспортными данными трафарета, определяют размеры пиксела оцифрованного изображения при данной настройке фреймграббера.

Алгоритм обработки изображений

Вычисление размеров пиксела производится в автоматическом режиме без вмешательства оператора. Алгоритм обработки изображения устойчив к неравномерности распределения яркости и различного рода нелинейным искажениям, например дифракции. Образец изображения, используемый при определении размеров пиксела, представлен на рис. 4.

В связи с особенностями формирования видеосигнала в твердотельных ФПУ перед началом обработки выполняется преобразование исходного изображения. Для этого формируется изображение, состоящее только из четных строк [2]. Для первоначального определения расположения тест-объектов (квадратов) используется процедура итерационной бинаризации. Из-за того, что изображения различаются по яркости, а отдельные участки изображения

могут быть затемнены (осветлены), процесс бинаризации проводится для нескольких уровней яркости и все распознанные объекты заносятся в базу данных. После этого проводится отбор объектов: из всех зарегистрированных выбираются объекты, близкие к шаблонам-квадратам. Термин "близкие" означает, что среднеквадратическое отклонение от шаблона не превышает заданной величины. Наилучший процент распознавания был получен при следующих параметрах: шаблон для квадрата — объект размером 20×10 (несимметричность объясняется увеличением интервала дискретизации по вертикали в 2 раза) и площадью 200 ед. После выбора объектов на исходном изображении формируется структура фрагментов для последующей обработки субпиксельными методами. Из всех отобранных выбираются 4 квадрата, координаты центров которых наиболее близки к углам изображения трафарета, и далее линейной интерполяцией генерируются все координаты фрагментов. Размер фрагмента состоит из размера ограничивающего прямоугольника бинарного изображения тестового квадрата и размера ограничивающего бордюра шириной 3—4 пиксела.

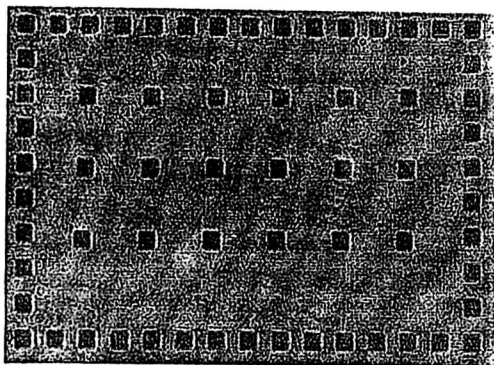


Рис. 4. Образец изображения, используемый при определении размеров пиксела

Использованный алгоритм определения координат центра квадрата обеспечивает инвариантность к расположению квадрата в поле фрагмента, локальной яркости и контрасту объекта и фона. Для этого в рассматриваемом фрагменте выделяется часть фона (окаймляющий бордюр шириной в 2—3 пиксела) и часть тестового объекта (квадрат со стороной в 15—20 пикселей). Размер этих частей, с одной стороны, должен точно принадлежать выбираемой области (соответственно, фону и трафарету), а с другой стороны — количество пикселей в вырезаемой области должно быть достаточным для получения репрезентативной выборки. У полученных таким образом выборок вычисляются дисперсия и математическое ожидание, которые используются для нормировки и вычисления площади и координат центра масс полученной фигуры.

Результаты

В процессе проведения экспериментов была определена цена деления пикселей оцифрованного изображения по двум координатам, а также получены оценки погрешности измерения линейных размеров в плоскости ФПУ. Цена деления пиксела определялась по квадратам, расположенным в пределах внешней рамки, а погрешность измерений — по квадратам, расположенным в центральной зоне. Размер регистрируемых изображений, в соот-

ветствии с параметрами фреймграббера, составлял 680x512 пикселей. Результаты измерений представлены в таблице.

$\mu_x, \mu\text{m}$	$\mu_y, \mu\text{m}$	$\sigma_x, \mu\text{m}$	$\sigma_y, \mu\text{m}$	$\sigma_x^m, \mu\text{m}$	$\sigma_y^m, \mu\text{m}$	σ_x^p, pix	σ_y^p, pix
6,8728	12,597	0,00134	0,00463	1,0763	0,6628	0,1353	0,1055

Примечание:

- μ_x — математическое ожидание размера пиксела по горизонтали;
- μ_y — математическое ожидание размера пиксела по вертикали;
- σ_x — с.к.о. размера пиксела по горизонтали;
- σ_y — с.к.о. размера пиксела по вертикали;
- σ_x^m — с.к.о. горизонтальных расстояний между квадратами, расположенными в центральной зоне трафарета;
- σ_y^m — с.к.о. вертикальных расстояний между квадратами, расположенными в центральной зоне трафарета;
- σ_x^p — с.к.о. горизонтальных расстояний между изображениями квадратов;
- σ_y^p — с.к.о. вертикальных расстояний между изображениями квадратов.

Различия горизонтального и вертикального размеров пиксела определяются спецификой формирования телевизионного сигнала в твердотельных ФПУ.

Учитывая, что дисперсия расстояния между двумя точками является суммой дисперсий положения каждой точки, погрешность определения положения точки находится в диапазоне от 1/10 до 1/15 размеров пиксела.

Сопоставление четырех последних колонок таблицы показывает, что результаты, полученные с помощью разработанного алгоритма определения размеров изображения, согласуются с данными измерений, выполненными на измерительном микроскопе.

Заключение

Полученные результаты показали возможность создания телевизионных измерительных систем с использованием недорогих бескорпусных телевизионных камер. Применение таких телекамер обеспечивает не только достаточно высокую точность измерений, но и позволяет минимизировать создаваемую аппаратуру, создавать конкурентоспособную аппаратуру. Снижение точности определения местоположения объекта, по сравнению с приведенными в работе [1] данными, связано с повышенным уровнем шума и меньшим числом элементов разложения телевизионного сигнала.

Литература

1. Beyer H. A., Kersten T., Streilein A. 1992. Metric Accuracy Performance of Solid-State Camera Systems// SPIE Vol. 1820 Videometrics. 1992. P. 103—110.
2. Shortis M. R., Snow W. L. Calibration of CCD cameras for field and frame capture modes. Proceedings, Digital Photogrammetry and Remote Sensing'95.// Ibid. V. 2646. P. 2—13.

Geometric calibration television measuring systems with solid-state photo detectors

V. G. Matiouchenko, V. V. Strakhov, A. O. Zhirkov
State Research Institute of Aviation Systems (GosNIIAS), Moscow, Russia

The various measuring methods for deriving information about the form of objects are now used. Information about sizes and forms of objects in contactless television systems is received from digital images created by a receiving system. The major performance of this systems is intercommunication of the pixel coordinates with image coordinates of a photo detector. In the paper a technique, equipment and results of geometrical calibration of television measuring systems — definition of the pixel sizes are considered. The opportunity of creation the television measuring systems using inexpensive mountingless television cameras have shown. The application of such cameras provides not only sufficient accuracy of measurements, but also allows minimization the size and price of created equipment.