

Метрологические основы дистанционных методов измерения геометрических параметров объектов

И.Ю. Жиганов

В статье рассматриваются метрологические основы дистанционных телевизионных методов измерения геометрических параметров объектов. Анализируются основные источники погрешностей, возникающих при формировании измерительной информации. Определены требования к оптической системе к телекамере как к пространственному дискретизатору изображений. Приведены результаты экспериментальных исследований.

Дистанционные измерения геометрических параметров объектов (ГПО) всегда актуальны, так как позволяют оценивать размеры изделий без механического контакта с ними, в том числе в труднодоступных местах, а также в процессе их производства. Широко известны оптические методы, связанные с проецированием изделий на шаблоны и применением дорогостоящей оптики с метрологическими штрихами. В статье рассматриваются дистанционные телевизионные методы и устройства измерения ГПО [1-3], которые, имеют очевидные преимущества и в связи с развитием видео-компьютерной техники в настоящее время становятся достаточно дешевыми и доступными.

Основными источниками погрешностей в телевизионных устройствах измерения ГПО являются искажения оптической системы, связанные с дифракцией света, аберрациями объектива, дисторсией, а также дискретизация изображения и шумы фотоприемной матрицы. Погрешности, вызванные искажением оптической системы, подробно рассмотрены в различной литературе и связаны с нечеткостью границ и искажением геометрической формы объекта. Количественный анализ различных видов искажений показал, что все виды искажений увеличиваются с ростом угла поля зрения β , уменьшаются с уменьшением относительного отверстия объектива D / f' . В целом оптические искажения минимизируются на уровне выбора объектива телекамеры, который чем больше по размерам и дороже по цене, тем точнее передает изображение. Суммарная

погрешность изменения размеров объекта от всех видов аберраций для объективов с параметрами $D / f' \geq 0,2$, $\beta \leq 15^\circ$ не превышает 0,08 %, что на фоне других видов погрешностей можно признать незначительным. Применение оптики с малым углом зрения приводит к необходимости удалять телекамеру от объекта измерения, чтобы захватить его изображение.

Другое дело, дисторсия, которая заключается в том, что линии, не проходящие через центр поля зрения, изображаются кривыми. Это значит, что на изображении искажается форма объекта. Это вызывает методическую погрешность при измерении геометрического параметра и тем более при анализе его формы. В большинстве телеобъективов, изготавливаемых различными фирмами, дисторсия для угла обзора $\beta = 15^\circ$ составляет от 3 до 6 %, причем резко возрастает с ростом угла β . Если все другие виды искажений связаны с волновой природой света и компенсируются специальными приемами конструирования и технологии изготовления оптических систем, то дисторсия определяется в основном геометрическими законами оптики, связанными с кривизной линз. Чем тоньше линзы и дальше фокусные расстояния, тем меньше искажения от дисторсии. Эффективными способами борьбы с дисторсией является центрирование объектива телекамеры относительно объекта измерения, калибровка прибора, если известно, что объект измерения будет находиться вне центра поля зрения с последующим учетом искажения формы при математической обработке изображения.

Другим важным фактором возникновения погрешности является то, что линия измеряемого

И.Ю. Жиганов

г. Самара, Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королёва

размера не параллельна главной плоскости объектива (не перпендикулярна главной оптической оси системы), то есть имеет место перекося камеры. В работе [1] подробно рассмотрены искажения размеров и формы фигуры при перекосях, даны формулы и графики для вычисления погрешностей.

Из основных значительный вес имеет погрешность, обусловленная *дискретизацией изображения*. В качестве составляющих здесь имеет место пространственная дискретизация фотоприемной матрицы и импульсное сканирование ее элементов (развертка). Сформулируем требования к телевизионной камере как пространственному дискретизатору изображения. Для этого рассмотрим частотно-контрастную характеристику (ЧКХ) телевизионной камеры и оценим ее влияние на передачу входного оптического сигнала. Существуют три фактора, формирующие вид ЧКХ телекамеры: пространственная дискретизация изображения фотоматрицей, процесс переноса зарядовых пакетов и амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) видеоусилителя.

Важной характеристикой фотоприемника является его пространственная разрешающая способность. Структура матричного ПЗС-фотоприемника является дискретной в обоих направлениях. В этом случае теорема Найквиста утверждает, что наивысшая пространственная частота, которая может быть передана приемником, равна половине пространственной частоты, задаваемой периодичностью расположения чувствительных элементов. На разрешающую способность большое влияние оказывает распределение чувствительности по площади элемента. На практике распределение чувствительности аппроксимируется прямоугольной функцией, и ЧКХ фотоприемника, обусловленная геометрической структурой матрицы, в обоих направлениях имеет вид

$$H_z(f_n) = \frac{\sin(f_n \pi a_z / p)}{f_n \pi a_z / p}, \quad (1)$$

где $f_n = f/f_{\max}$ - нормированная пространственная частота, $f_{\max} = 1/p$; p , a_z - шаг структуры и размер элемента соответственно.

Если коэффициент использования площади матрицы 100% и размер элемента равен расстоянию между элементами, значение ЧКХ на частоте Найквиста упадет до 64%. Если размер фоточувствительного элемента равен половине величины шага, значение ЧКХ на той же частоте составит 90%. Другой важнейшей особеннос-

тью, влияющей на вид ЧКХ фотоприемников на ПЗС, является их способность поддерживать целостность зарядовых пакетов при переносе их к выходному усилителю приемника. Перенос заряда из одной потенциальной ямы в другую не является ни мгновенным, ни полным. Это приводит к тому, что при каждом переносе некоторое количество заряда отстает от зарядового пакета. Эффект отставания заряда накапливается, и после многих переносов наблюдается существенное перемешивание зарядовых пакетов. Качество переноса оценивается коэффициентом неэффективности переноса ϵ , показывающим, какая часть заряда отстает от пакета за один перенос. Умножив значение неэффективности на число переносов в данном направлении, получим результирующую неэффективность переноса $n\epsilon$ ПЗС-фотоприемника. Если представить схему переноса как отдельный узел электронного тракта, то ее ЧКХ будет иметь следующий вид:

$$H_n(f_n) = \exp[-n\epsilon(1 - \cos(2\pi f_n))]. \quad (2)$$

Из (2) видно, что если результирующая неэффективность переноса имеет значение менее 0,01, то падение ЧКХ на высоких частотах становится незначительным. В ПЗС-матрицах значение ϵ не превышает 10^{-5} , и для приемника с трехфазным переносом с числом элементов по горизонтали равным 320 суммарная неэффективность вдоль строки составит 0,0096, а значение ЧКХ узла переноса на частоте Найквиста 0,98.

АЧХ электронного тракта камеры является еще одним фактором, который может привести к искажению ее ЧКХ. Особенностью этого фактора является действие только в горизонтальном направлении, т. е. в направлении временной развертки. Вид АЧХ видеоусилителя обычно априори неизвестен. В общем случае АЧХ тракта выбирается такой, чтобы в области пространственных частот от нуля до частоты Найквиста ЧКХ камеры не уменьшалась. На частотах выше частоты Найквиста следует спад АЧХ для повышения соотношения сигнал/шум. Видеоусилитель камеры представляет собой фильтр нижних частот (ФНЧ), АЧХ которого в пределах частоты Найквиста можно считать горизонтальной и не учитывать при рассмотрении пространственной частотно-контрастной характеристики. С учетом вышесказанного, суммарную ЧКХ телевизионной камеры в заданном направлении можно представить в виде произведения:

$$H(f_n) = H_z(f_n)H_n(f_n) = \frac{\sin(f_n \pi a_s / p)}{f_n \pi a_s / p} \exp[-n\varepsilon(1 - \cos(2\pi f_n))]. \quad (3)$$

Анализ суммарной ЧКХ современных камер показывает, что коэффициент передачи контраста на частоте Найквиста снижается не более чем до 0,6 от максимума. Это означает, что наивысшая частота, передаваемая матрицей, будет уверенно и с большой долей запаса различима в выходном сигнале. Поэтому можно считать, что ЧКХ камеры не приведет к существенному снижению разрешающей способности всего прибора, которая в данном случае будет определяться только качеством оптической системы.

Дискретизация двумерного изображения должна выполняться таким образом, чтобы на период наивысшей пространственной частоты в горизонтальном и вертикальном направлениях приходилось не менее двух выборок сигнала, что следует из теоремы Найквиста. Применительно к дискретной структуре фотоматрицы это условие означает, что пространственный шаг дискретизации должен быть меньше или равен шагу расположения фоточувствительных элементов, т. е. быть согласован с параметрами матрицы, которая также является пространственным дискретизатором.

Реально дискретизации подвергается одномерный временной сигнал, формируемый при развертке исходного двумерного изображения, при этом автоматически выполняется дискретизация изображения в вертикальном направлении. Шаг дискретизации по вертикали в этом случае определяется числом активных строк в телевизионном изображении и составляет 1/576 часть высоты раstra. Шаг дискретизации в горизонтальном направлении должен составлять величину $1/N_x$, где N_x - число фоточувствительных элементов в строке матрицы. Для временного сигнала частота дискретизации будет определяться следующим образом:

$$F_{\partial} = \frac{1}{T_c} N_x, \quad (4)$$

где T_c - время развертки строки.

Для определения интервала квантования амплитуды сигнала воспользуемся понятием порога чувствительности, равного тому наименьшему значению амплитуды полезного сигнала, который обнаруживается на фоне шумов. Эта величина показывает, что поток излучения, воздействуя на приемник, вызывает появление

на выходе электронного тракта сигнала $U_{пор}$, превышающего значение среднеквадратической амплитуды шума в заданное число раз и обеспечивающего уверенное обнаружение сигнала. Сигнал будет уверенно обнаружен, если величина порога чувствительности будет больше максимального значения размаха шумового сигнала. Если шум имеет нормальное распределение, максимальное значение его амплитуды вычисляется так: $N_{ш\max} = 3N_{ш}$, где $N_{ш}$ - среднеквадратическая амплитуда шума, выраженная в числе электронов. Тогда порог обнаружения сигнала - $N_{пор} = 2 \cdot 3N_{ш} = 6N_{ш}$, то есть для уверенного обнаружения сигнал должен превышать среднеквадратическую амплитуду шума в 6 раз. Для определения порога чувствительности применяют другой критерий, из которого следует, что порог чувствительности равен среднеквадратической амплитуде шума: $N_{пор} = N_{ш}$. Зная $N_{пор}$, можно определить число уровней квантования:

$$n = \frac{N_{\max}}{N_{пор}}, \quad (5)$$

где N_{\max} - максимальное число электронов, приводимая в паспортных данных телевизионной камеры. Видно, что если порог чувствительности выбран равным среднеквадратической амплитуде шума, число уровней квантования численно соответствует соотношению сигнал/шум.

В самом простом случае при идеально четкой границе изображения абсолютная погрешность измерения размера изображения равна размеру элементарной ячейки (шагу) фотоприемной матрицы. Если шаг фотоприемной матрицы составляет a (мкм), то абсолютная погрешность Δ измерения реального размера

$$\Delta = \frac{a}{K},$$

где K - коэффициент преобразования оптической системы.

Наиболее распространенный формат фотоприемных матриц среднего класса 512x512 ячеек при общем размере 1/3 дюйма (8,3 мм), что определяет шаг матрицы $a = 0,0162$ мм. При широко распространенном для телекамер коэффициенте преобразования оптической системы $K = 0,01$ абсолютная погрешность измерения $\Delta = 1,62$ мм, что в основном соответствует требованиям по точности измерения размеров. Отметим, что коэффициент преобразования оптической системы телекамер всегда меньше единицы. При измерении размеров крупных объектов расстояние M увеличивается, так как объект должен попасть

в поле захвата оптической системы, а коэффициент преобразования уменьшается, абсолютная погрешность измерения увеличивается, относительная погрешность практически не изменяется. В рассмотренном примере коэффициент преобразования $K = 0,01$ соответствует тому, что линейный размер 1,0 м преобразуется в размер 10 мм на плоскости матрицы. При измерении малых размеров (диаметров или толщины стенки) объект приближается к телекамере, коэффициент преобразования уменьшается, абсолютная погрешность снижается. Уменьшения погрешности можно достигнуть также применением матриц с большим разрешением, например, с числом ячеек 1024×1024 и габаритным размером $1/3$ дюйма. Чем больше фокусное расстояние объектива f , тем больше коэффициент преобразования, тем точнее система. Отметим, что разрешение матрицы (размер ячейки) не имеет смысла делать большим, чем разрешение объектива, которое определяет число достоверно различимых линий на одном миллиметре длины. Разрешающая способность наиболее распространенных объективов составляет $50 \div 100 \text{ мм}^{-1}$ (см. табл. 4.2), что соответствует толщине разрешаемой линии изображения $0,01 \div 0,02 \text{ мм}$ и согласуется с размером ячейки ранее рассмотренной фотоприемной матрицы с числом элементов 512×512 . Отметим, что применение матрицы с шагом, меньшим $0,0162 \text{ мм}$, требует применения оптики с разрешением, большим 100 мм^{-1} .

Среди дополнительных погрешностей, основные причины возникновения которых перечислены выше, важнейшими являются погрешности, вызванные колебаниями питающих напряжений и электромагнитными наводками. Климатическую погрешность, вызванную изменением температуры и влажности окружающей среды, можно считать незначительными, так как они мало влияют на процесс формирования изображения в телекамере.

Колебания напряжения питания датчика и электронных узлов приводят к ошибкам в определении значений сигналов, поступающих в устройство обработки. "Быстрые" изменения в питающем напряжении, вызванные остаточными пульсациями выпрямителей, приводят к появлению на телевизионном изображении широких горизонтальных светлых и темных полос, медленно перемещающихся в вертикальном направлении. Соответственно, в отсчетах напряжений опорного и рабочего каналов будут появляться

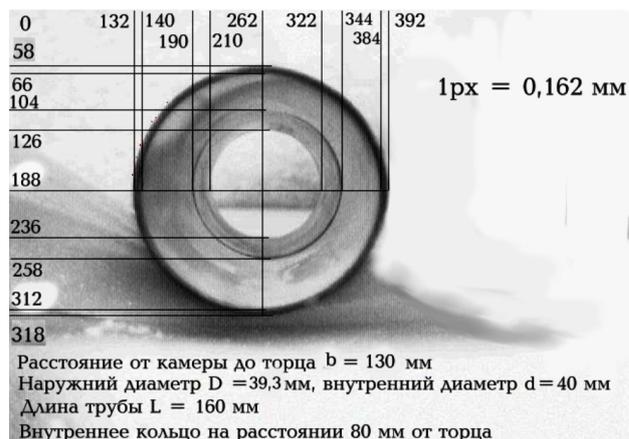


Рис. 1. Иллюстрация к возможности комплексного измерения ГПО

ошибки. "Медленные" колебания напряжения питания, связанные с изменением температуры кристаллов стабилизаторов и старением, постоянная времени которых многократно превышает период развертки кадра, не приведут к ошибкам измерения, так как будут взаимно скомпенсированы при вычислениях и калибровках. Аналогичное действие на выходные сигналы аналогового тракта приборов будут оказывать наводки от сети переменного тока и других источников электромагнитных помех. Избавиться от этих наводок можно при помощи тщательного экранирования электронных узлов и уменьшения длины соединительных электрических кабелей. Простым, но радикальным средством борьбы с помехами от сети переменного тока, в том числе вызванными пульсациями напряжений питания, является синхронизация кадровой развертки телевизионной камеры с частотой питающей сети. В этом случае упомянутые горизонтальные полосы на изображении будут неподвижны и могут быть легко скомпенсированы вычитанием.

Для экспериментального исследования телевизионных методов измерений ГПО создана установка, состоящая из телекамеры Video Blaster WebCam Plus со встроенной платой ввода изображения, собственным программным обеспечением и компьютером класса P-III. Целью экспериментальных исследований было изучение особенностей формирования изображения профиля трубы в зависимости от расстояния до объекта, перекосов камеры в различных плоскостях, изучение искажений изображений на соответствие их математическому описанию, проведенному в [1]. В результате экспериментально показано, что при перекосах камеры в пределах $\gamma = \pm 5^\circ$ погрешность измерения разме-

ра не превышает 1%. Удельное изменение размера при смещении объекта от оптической оси составляет $\varepsilon_x = 0,00047$ 1/мм, $\varepsilon_y = 0,00022$ 1/мм, при этом эллипсность, вычисленная как отношение размеров по осям, составляет $\varepsilon_\rho = 0,975$. Удельная погрешность при изменении расстояния до трубы: $\varepsilon = 0,003$ 1/мм. На рис. 1 показана возможность измерения внешнего, внутреннего диаметра, толщины стенки и длины трубы по размеру изображения противоположного отверстия. Цена одного пиксела для данного расстояния определена предварительной калибровкой установки.

Результаты измерений, полученные после обработки изображения: $D = 42,1$ мм, $d = 39,6$ мм, толщина стенки 1,26 мм, длина трубы $L = 156$ мм, что удовлетворяет требованиям ГОСТа к системам измерения ГПО.

Результаты экспериментальных исследований телевизионных методов измерений ГПО показали их достаточную точность, эффективность,

широкие возможности получения измерительной информации. Отметим, что данные результаты получены при использовании средней по разрешающей способности оптики, телекамеры, компьютера. Современный уровень указанного оборудования позволяет достичь значительно большей точности.

Литература

1. Жиганов И.Ю. Бесконтактные устройства измерения геометрических параметров труб. Самара, 2004. 220 с.
2. Патент на полезную модель № 31441 РФ. Телевизионное устройство измерения геометрических параметров объектов / Жиганов И.Ю., Скворцов Б.В. // Бюл. № 22 от 10.08.2003.
3. Патент на полезную модель РФ № 32261. Двухканальное телевизионное устройство измерения геометрических параметров объектов / Жиганов И.Ю., Скворцов Б.В. // Бюл. № 25 от 10.09.2003.

Metrological bases of remote methods of measurement of geometrical parameters of objects

I.Y. Jiganov

In clause metrological bases of remote television methods of measurement of geometrical parameters of objects are considered. The basic sources of the errors arising at formation of the measuring information are analyzed. Requirements to optical system to a television camera as to spatial quantizer images are certain. Results of experimental researches are resulted.

Жиганов Игорь Юрьевич, 1965 года рождения. Кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники Самарского государственного аэрокосмического университета им. С.П. Королева