

Сканирование изображения объекта в фотоэлектрических датчиках перемещений с многоэлементными приемниками излучения

В. П. СОЛДАТОВ

Московский государственный университет геодезии и картографии,
Москва, Россия, e-mail: soldatov.v.p.@bk.ru

Рассмотрены основные точностные параметры нового способа определения перемещений объекта путем сканирования его изображения относительно компонентов многоэлементного приемника излучения.

Ключевые слова: сканирование, изображение объекта, датчик перемещений, многоэлементный приемник излучения.

The basic accuracy parameters of new method for measurement of object displacements during of scanning of object image in regard to the element of multielement radiation receiver have been considered.

Key words: scanning, objects image, displacements sensor, focal plane arrays.

В настоящее время в фотоэлектрических датчиках с многоэлементными приемниками излучения (МЭПИ) для измерений небольших линейных и угловых перемещений объектов, выравнивания узлов аппаратуры и приборов, определения несоосности узлов станков, агрегатов и установок используют способ анализа изображений, т. е. способ преобразования сигналов, основанный на определении центроиды (центра тяжести) изображения [1, 2]. Этот метод имеет несколько недостатков. Дискретная структура МЭПИ в соответствии с теоремой Котельникова (критерием Найквиста) приводит к ограничению разрешающей способности, которая равна удвоенному шагу расположения элементов приемника. Указанную разрешающую способность нельзя компенсировать при изменяющихся в процессе измерений распределениях освещенности изображения объектов [3]. Другой недостаток использования центроиды для определения координат объектов — существование систематических погрешностей, обусловленных неравномерным распределением освещенности в изображении и изменением этого распределения при визировании объектов. Кроме того, при

использовании алгоритма центроиды разрешающая способность аппаратуры и точность измерений могут быть снижены, если размеры изображения объекта меньше размеров одного элемента приемника излучения. Расфокусировка изображения, выполняемая для повышения разрешения, приводит к потере необходимой информации из-за уменьшения соотношения сигнал—шум и возможной при этом асимметрии распределения освещенности.

Повысить разрешающую способность и точность измерений оптических приборов с МЭПИ можно с помощью принудительного сканирования изображения объекта в плоскости приемника относительно его среднего положения на ней, характеризующего перемещение изображения вдоль координатных осей МЭПИ [3, 4]. Такое сканирование, например, осуществляет человеческий глаз при наблюдении объектов.

Способ микросканирования точечного объекта относительно одного элемента МЭПИ был теоретически обоснован в [3], также проведено его сравнение по чувствительности и точности со способом анализа изображения на основе алгоритма центроиды.

Рассмотрим некоторые аспекты, не затронутые в [3], и расширяющие представления о свойствах и возможностях способа микросканирования изображения объекта вдоль строк или столбцов МЭПИ, необходимые для его практической реализации. Упрощенная структурная схема реализации этого способа показана на рис. 1.

Излучение от объекта фокусируется объективом 1 на чувствительной площадке МЭПИ 3, перед которым установлен сканатор в виде отклоняющейся на определенный угол i плоскопараллельной пластины 2, управляемой высокостабильным микродвигателем 4. Сигнал U_c на выходе засвечиваемого элемента усиливается резонансным усилителем 5, настроенным на частоту сканирования изображения, и через интерфейс подается в микропроцессор 6, подключенный к блоку индикации 7. Специальный блок управления 8 присоединен к микродвигателю, микропроцессору и блоку индикации.

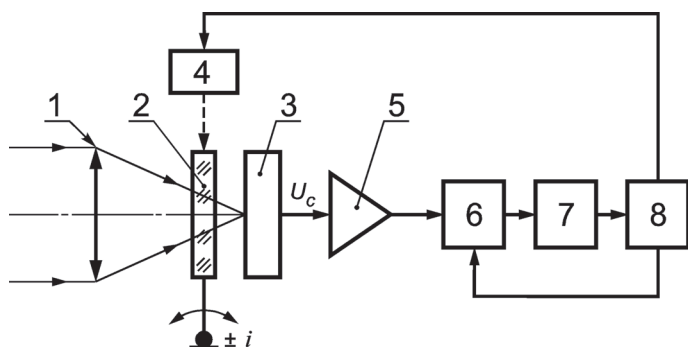


Рис. 1. Структурная схема фотоэлектрического датчика перемещений со сканированием изображения:

1 — объектив; 2 — плоскопараллельная пластина; 3 — многоэлементный приемник излучения; 4 — микродвигатель; 5 — резонансный усилитель; 6 — микропроцессор; 7 — блок индикации; 8 — блок управления

Вместо плоскопараллельной пластинки можно использовать и другой высокоточный сканатор с линейным микродвигателем, обеспечивающим возвратно-поступательное движение изображения.

Возможны различные соотношения между амплитудой сканирования, шагом расположения элементов, диаметром или другими размерами изображения объекта, зависящие от конкретного функционального назначения прибора. Сканирование можно осуществлять, не только перемещая изображение объекта относительно неподвижного приемника излучения с помощью оптического компенсатора, но и при микроколебаниях самого приемника вдоль неподвижного изображения. В астрономических телескопах сканирование изображения иногда осуществляют колебаниями объектива [5].

Выходной сигнал при сканировании изображения объекта относительно его среднего положения непрерывно меняется. По этим изменениям можно оценить смещение изображения или получить распределение его освещенности даже при размерах изображения меньших, чем размеры элементов.

Для оценки технических возможностей способа анализа изображения при его сканировании относительно чувствительной площадки МЭПИ предположим, что изображение объекта — точечное, скорость сканирования постоянна, амплитуда A равна половине ширины b элемента, а чувствительность элемента равномерна по площади. В этом случае при отсутствии смещения изображения объекта относительно середины засвечиваемого элемента, т. е. при $x = 0$, сигнал с элемента будет постоянным, а на выходе усилителя, настроенного на частоту сканирования, он равен нулю.

При смещении изображения объекта относительно элемента (рис. 2), т. е. при $x_0 \neq 0$, и выключенных соседних элементах при микросканировании возникают сигналы $\Phi(x)$ прямоугольной формы шириной $2A - x_0$. Если за начало отсчета x принять левое крайнее положение изображения, то эти сигналы будут симметричны относительно координат движущегося изображения $x = nA$ (см. рис. 2), где $n = 2, 4, 6, 8$, и т. д. Причем между постоянными потоками излучения соседних периодов модуляции возникают разрывы шириной $2x_0$. Их положения вдоль оси x зависят от направления перемещения изображения x_0 . При изменении направления x_0 положения центров разрывов меняются на $2A$, а фаза первой гармоники модулированного потока излучения $\Phi(x)$ — на 180° .

Как показано в [3], амплитуда первой гармоники сигнала с выхода засвечиваемого элемента $U_1(x_0)$ изменяется в зависимости от x_0 в соответствии с формулой

$$U_1(x_0) = (2\Phi_0 St_s / \pi) \sin [\pi x_0 / (2A)], \quad (1)$$

где Φ_0 — полный поток излучения от объекта, попадающий на элемент МЭПИ; S — чувствительность (коэффициент преобразования) элемента по экспозиции; t_s — время экспозиции.

Из (1) следует, что при небольших смещениях x_0 среднего положения изображения точечного объекта относительно середины элемента приемника излучения с точностью до

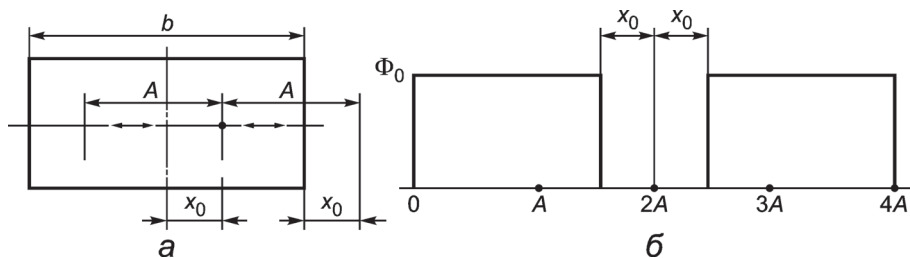


Рис. 2. Элемент приемника излучения и траектория сканирования изображения при $x_0 \neq 0$ (а) и диаграмма изменений потока излучения $\Phi(x)$ при сканировании изображения для $x_0 \neq 0$ (б)

величин второго порядка малости по отношению к x_0/A справедливо равенство

$$U_1(x_0) \approx \Phi_0 St_s x_0 / A.$$

Так как максимальное значение сигнала $U_{\max} = \Phi_0 St_s$, запишем соотношение

$$U_1(x_0) / U_{\max} \approx x_0 / A.$$

Аналогично можно показать, что при изменении направления среднего смещения изображения x_0 знак амплитуды выходного сигнала меняется на противоположный. Если перемещение изображения объекта больше полуширины элемента приемника излучения, то фактическое значение x_Φ вычисляется с учетом предварительно определенного номера N облучаемого элемента по формуле

$$x_\Phi = Nb + x_0,$$

где b — ширина элемента.

Значение x_0 определяется из (1):

$$x_0 = (2A/\pi) \arcsin [\pi U_1(x_0) / (2U_{\max})].$$

При других соотношениях между размерами изображения объекта и шагом расположения элементов МЭПИ и различных законах сканирования $x(t)$ во времени t функция преобразования будет отличаться от (1) из-за уменьшения освещенности в изображении, вследствие чего чувствительность преобразования тоже уменьшится [3], но это уменьшение при выключенных соседних элементах МЭПИ незначительно. Чувствительность увеличивается с уменьшением размеров изображения объекта, т. е. зависит от качества применяемого объектива.

В случае использования алгоритма центроиды для обеспечения необходимой точности, наоборот, приходится увеличивать кружок рассеяния путем расфокусировки объектива, а это нередко приводит к погрешности, так как возможна несимметрия распределения освещенности в изображении, причина которой — несоосность компонентов объектива.

Результирующая погрешность для рассматриваемого способа микросканирования изображения зависит, в основном, от флуктуаций (нестабильности) скорости сканирования Δv , которые вызывают флуктуации временных интервалов δt между постоянными потоками излучения Φ_0 , характеризующими искомое смещение x_0 . Вследствие этого возникают флуктуации амплитуд первых гармоник модулированных

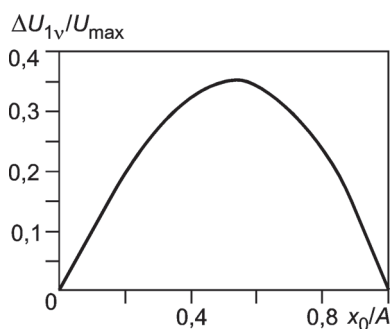


Рис. 3. Нормированная зависимость $\Delta U_{1v}/U_{\max}$ от x_0/A при $\Delta v/v = 1$

измерения положения объекта Δx_{0v} из-за флуктуаций скорости Δv зависит от этого закона.

При использовании равномерной скорости сканирования $v(t) = \text{const}$ временной интервал δt между электрическими сигналами, возникающими при сканировании изображения объекта, смещенного относительно середины облучаемого элемента на x_0 , определяется из соотношения

$$\delta t = 2x_0/v. \quad (2)$$

Продифференцировав это соотношение по v , получим $\Delta x_{0v} = \delta t \Delta v/2$. С учетом (2), найдем следующую формулу для определения частной относительной погрешности измерения положения изображения объекта Δx_{0v} при его микро-сканировании с постоянной скоростью вследствие ее нестабильности Δv :

$$\Delta x_{0v}/x_0 = \Delta v/v. \quad (3)$$

Для нахождения флуктуаций амплитуды первой гармоники сигнала $\Delta U_1(x_0)$ с выхода элемента МЭПИ, вызванных нестабильностью положения изображения объекта из-за отклонений от номинала скорости сканирующего устройства, продифференцируем (1) по x_0 . В результате получим

$$\Delta U_{1v}/U_{\max} = (\Delta x_0/A) \cos [\pi x_0/(2A)].$$

Подставив вместо Δx_0 его значение из (3), найдем соотношение, описывающее зависимость предельных относительных флуктуаций сигнала на выходе элемента МЭПИ от предельной относительной нестабильности скорости $\Delta v/v$ сканирования:

$$\Delta U_{1v}/U_{\max} = (x_0/A) \cos [\pi x_0/(2A)] (\Delta v/v), \quad (4)$$

где ΔU_{1v} — предельное отклонение от номинала сигнала с элемента из-за нестабильности v .

Из исследования функции (4) следует, что при постоянном значении $\Delta v/v$ ее максимум возникает при условии $\text{tg} [\pi x_0/(2A)] = 2A/(\pi x_0)$. Решив это трансцендентное уравнение приближенно, найдем $x_0/A \approx 0,55$, при котором функция (4) максимальна:

$$\Delta U_{1v}/U_{\max} \approx 0,36 \Delta v/v. \quad (5)$$

потоков излучения $\Phi(x)$, а следовательно, и сигналов $U_1(x_0)$ на выходе облучаемого элемента МЭПИ. Относительная нестабильность Δv функционально зависит от абсолютных мгновенных значений скорости, которые изменяются в соответствии с используемым законом сканирования $x(t)$ во времени, поэтому можно считать, что погрешность

При увеличении или уменьшении перемещения x_0/A изображения объекта относительно этого положения максимальное значение $\Delta U_{1v}/U_{\max}$ при любой нестабильности скорости сканирования постепенно уменьшится до нуля (рис. 3). Поскольку относительная допустимая нестабильность полезного сигнала должна быть меньше заданной относительной погрешности измерений $(\Delta x_{0v}/A)_3$, т. е. $(\Delta U_{1v}/U_{\max})_d \leq (\Delta x_{0v}/A)_3$, то из (5) следует, что допустимая относительная нестабильность скорости сканирования не должна превышать значения $(\Delta v/v)_d \leq 2,8(\Delta x_{0v}/A)_3 = (5,6 \Delta x_{0v}/b)_3$.

При использовании данного способа определения положения изображения объекта практически исключаются частные погрешности из-за геометрических шумов отдельных элементов. Это объясняется тем, что сканирование проводится относительно одного и того же элемента. Для уменьшения погрешности, вызванной нестабильностью скорости сканирования, в приводах следует применять современные высокоточные линейные микродвигатели, например пьезоэлектрические, у которых отклонение от линейности характеристик $x = f(t)$ не превышает доли микрометра.

Недостатком описанного способа является заметное падение чувствительности при x_0 , близких к амплитуде сканирования A , но этот недостаток можно устранить компенсацией среднего смещения x_0 изображения объекта относительно середины засвечиваемого элемента с помощью привода сканирующего устройства, подавая в него в противофазе сигнал, пропорциональный смещению x_0 .

Таким образом, предложенный и описанный выше способ позволяет повысить чувствительность и точность измерений положений малоразмерных объектов по сравнению со способом, использующим алгоритм центроиды. Его можно использовать и в качестве дополнительного для уточнения положения объекта, произведенного другим способом.

Л и т е р а т у р а

1. Парвулюсов Ю. Б., Родионов С. А., Солдатов В. П., Шехонин А. А., Якушенков Ю. Г. Проектирование оптико-электронных приборов. М.: Логос, 2000.
2. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Логос, 1999.
3. Солдатов В. П. Сравнение двух способов локации цели в приборах с многоэлементными приемниками излучения // Измерительная техника. 2005. № 12. С. 31—33; Soldatov V. P. Comparison of two methods of location of a target in devices with multi-element radiation detectors // Measurement Techniques. 2005. V. 48. N. 12. P. 1191—1195.
4. Mc. Vey E. S., Chen P. F. Improvement of position and velocity detecting accuracy by signal perturbation // IEEE Trans. 1969. V. IECI-16. P. 94—98.
5. Holtzman I. A. The performance and calibration WEPS 2 telescope // Astron. Soc. Pac. 1995. N. 107(708). P. 156—178.

Дата принятия 02.10.2014 г.