

УДК 531.74 : 745

А. К. Поташников, Л. В. Финогенов

(Новосибирск)

ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МНОГОЭЛЕМЕНТНОГО ФОТОПРИЕМНИКА

Предложен метод измерения угловых перемещений, основанный на применении многоэлементного линейного фотоприемника. Рассмотрены ограничения и погрешность метода, обоснованы требования к элементам устройства, реализующего данный метод измерений, приведены результаты экспериментов.

При модернизации и разработке различного оборудования часто встают задачи прецизионного измерения угловых перемещений механизмов. При этом не всегда целесообразно применять существующие угловые датчики, которые технологически сложны в изготовлении и поэтому имеют высокую стоимость.

В данной работе приведен метод измерения угловых перемещений, основанный на использовании линейных позиционно-чувствительных приборов (линейного многоэлементного фотоприемника — ЛМФ) в качестве шкалы точного отсчета позиции светового штриха, формируемого посредством вращающейся щелевой маски, которая механически соединена с объектом контроля.

Принцип измерения угловых перемещений по предлагаемому методу поясняется рис. 1. На вращающемся вокруг оси O объекте 1 установлена периодическая щелевая маска 2 . Маска освещается параллельным пучком света от осветителя, состоящего из импульсного источника света 3 и конденсора 4 . За маской располагается ЛМФ 5 , с помощью которого периодически регистрируется свет, прошедший через щели маски, имеющие ширину больше пространственного шага расположения фоточувствительных элементов. Угловой период щелей φ_T должен быть меньше угла охвата фотоприемника. В этом случае в любом положении объекта 1 на фотоприемник будет проецироваться,

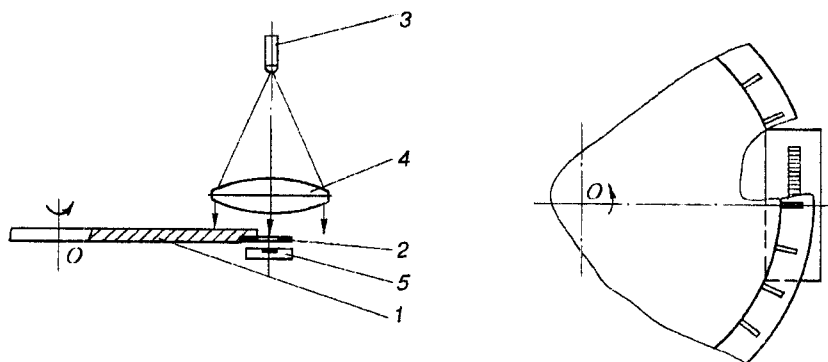


Рис. 1

по крайней мере, одна щель маски и в процессе измерения угла поворота не произойдет потери измерительной информации. Полное угловое перемещение φ_{Σ} объекта можно представить в виде

$$\varphi_{\Sigma} = \varphi_{\Delta} + n\varphi_T, \quad (1)$$

где φ_{Δ} — перемещение, соответствующее части углового периода маски; n — целое число периодов маски. Особенностью данного метода является использование одного фотоприемника для отсчета числа n и измерения дробной части периода маски φ_{Δ} . Так как регистрация положения световых штрихов в пределах ЛМФ осуществляется в линейных координатах, то для перехода к угловым координатам необходимо выполнить преобразование

$$\varphi = \text{arctg} \frac{C}{X}, \quad (2)$$

где X — координата центра светового штриха на ЛМФ; C — расстояние между средней точкой ЛМФ и центром вращения объекта (рис. 2).

Для исключения пропуска штрихов в процессе перемещения маски во время считывания сигнала с фотоприемника необходимо наложить ограничение на скорость вращения объекта и ввести операцию идентификации штрихов по результатам анализа сигналов последовательных циклов считывания. С этой целью зададим допустимый интервал углового перемещения $\varphi_1 = \varphi_T/2$ за время одного цикла считывания ЛМФ t_1 . Тогда угловая скорость объекта

$$\omega \leq \frac{\varphi_T}{2t_1}. \quad (3)$$

В силу того, что используется линейный фоточувствительный приемник, более удобно определять положение штрихов в координатах ЛМФ. Поэтому введем допустимый интервал перемещения ϵ в линейных координатах. С учетом неравномерности движения светового штриха по ЛМФ значение линейного интервала ϵ при заданном φ_1 должно удовлетворять условию

$$\epsilon \leq 2C \text{tg} \frac{\varphi_T}{4}.$$

Если в i -м цикле считывания штрих занимал положение с координатой X_i ($i = 1, 2, \dots, n - 1$; $n = t_n/t_1$; t_n — общее время измерения перемещения), то в следующем цикле в соответствии с введенным ограничением на скорость штрих должен сместиться в пределах окрестности $\pm \epsilon$ в позицию с координатой

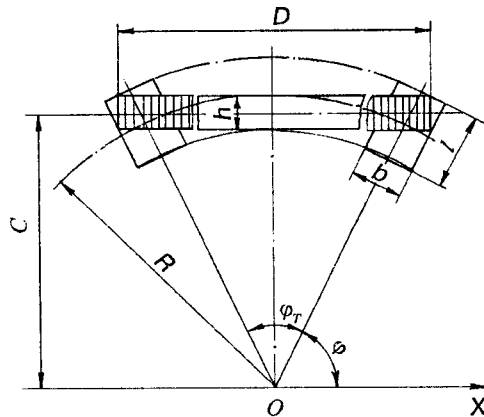


Рис. 2

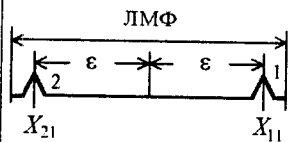
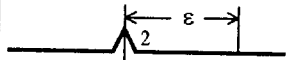
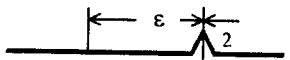
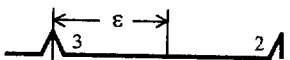

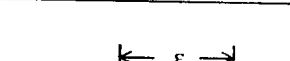

X_{i+1} . Таким образом, процесс непрерывного отслеживания положения штрихов подчиняется условию

$$X_{i+1} \in (X_i - \varepsilon, X_i + \varepsilon).$$

Если в некотором цикле считывания координата идентифицируемого штриха окажется за пределами ЛМФ, то должен появиться новый штрих, не входящий в окрестность точки X_i . Далее процесс отслеживания продолжается относительно нового штриха. В результате общее угловое перемещение маски, согласно (1), (2), будет определяться выражением

$$\varphi_{\Sigma} = \arctg \frac{C}{X_n} - \arctg \frac{C}{X_1} + \varphi_T(n^+ - n^-), \quad (4)$$

где X_1 — линейная координата штриха в первом цикле считывания (начальное положение); X_n — координата штриха в последнем цикле считывания; n^+ , n^- — целое число интервалов φ_T , пройденных соответственно в прямом и обратном направлениях. Пример идентификации штрихов приведен в таблице.

Цикл	Вид сигнала	Направление	Событие	Перемещение
1			Обнаружено два штриха	0
2		→	Обнаружен один штрих 2	$\varphi_{22} - \varphi_{21}$
3		→	Обнаружен один штрих 2	$\varphi_{23} - \varphi_{21}$
4		→	Появился штрих 3	$\varphi_{34} - \varphi_{21} + \varphi_T$
5		←	Штрих 3 вышел за пределы ЛМФ	$\varphi_{25} - \varphi_{21}$
6		→	Обнаружен штрих 2	$\varphi_{26} - \varphi_{21}$
7		→	Штрих 2 вышел за пределы ЛМФ	$\varphi_{37} - \varphi_{21} + \varphi_T$

Используя выражение (4), определим методическую погрешность измерения угловых перемещений

$$\Delta\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial X} \Delta X = 2 \frac{C\Delta X}{C^2 + X^2}, \quad (5)$$

где ΔX — погрешность измерения линейных координат световых меток. Подставляя в (5) значение $X = 0$, получаем выражение для максимальной погрешности

$$\Delta\varphi_{\max} = 2 \frac{\Delta X}{C}. \quad (6)$$

Из (6) видно, что точность измерений угловых перемещений увеличивается с удалением фотоприемника от центра вращения и зависит от погрешности измерения линейных координат штрихов. В свою очередь, ΔX будет зависеть от выбранного алгоритма определения координат центра штриха, вида распределения света в штрихе, разброса значений темнового тока и чувствительности элементов ЛМФ, различия геометрических размеров и апертурных характеристик фоточувствительных ячеек.

Известен ряд способов определения координат центра изображения с помощью многоэлементных фотоприемников с точностью до десятых и сотых долей размера элемента [1—4]. Часть из них требует большого объема вычислений, для реализации других требуется постоянный вид светового распределения. Наибольшее распространение получил способ, при котором положение изображения определяется координатами его энергетического центра тяжести в соответствии с выражением

$$X_c = \left[\sum_1^k (X_j U_j) \right] \left(\sum_1^k U_j \right)^{-1}, \quad (7)$$

где $X_j = dj$; d — размер элемента вдоль оси X ; $j = 1, 2, \dots, k$ — номер элемента; U_j — сигнал с j -го элемента ЛМФ. Данный алгоритм [5] несложно реализовать на программном или аппаратном уровне. Погрешность определения координаты штриха имеет две составляющие: Δ_d , обусловленную различием размеров элементов ЛМФ по оси X , и Δ_f , вызванную нарушением симметрии формы сигнала с выхода ЛМФ по отмеченным выше причинам. В [5] среднеквадратическая погрешность из-за отклонений размера d определена выражением

$$\sigma_d = \frac{\sigma_1}{\sqrt{K}},$$

где σ_1 — среднеквадратическое отклонение в расположении центров элементов ЛМФ (типичное значение $\sigma_1 = 0,32$ мкм); K — число засвеченных элементов, учитываемых при расчете. Применяя метод минимума-максимума [6], получаем суммарную предельную погрешность определения положения штриха

$$\Delta X_m = \Delta_{fm} + 3\sigma_d, \quad (8)$$

здесь Δ_{fm} — предельная погрешность Δ_f .

На рис. 3 приведены зависимости Δ_{fm} от величины искажения сигнала δ для различных значений K : $K = 3$ (кривая 1), $K = 5$ (2), $K = 7$ (3). При расчете зависимостей был принят треугольный закон распределения освещенности в штрихе. Искажения формы имитировали крайний случай суммарного воздействия влияющих на сигнал факторов. Искажения задавались в виде процентного уменьшения значений сигнала центрального и боковых (с одной стороны от максимума) засвеченных элементов ЛМФ. Начало координат совмещено с серединой центрального засвеченного элемента.

В качестве примера оценим погрешность измерения угловых перемещений по предлагаемому методу при $C = 100$ мм, $K = 7$, $\delta = 20\%$, $d = 25$ мкм. Из

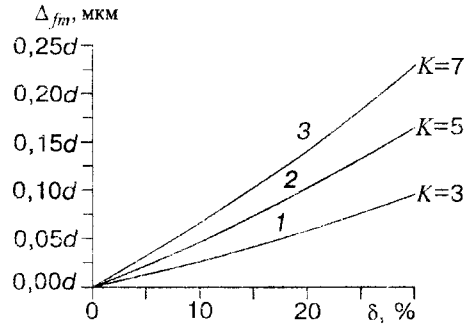


Рис. 3

зависимости 3 (см. рис. 3) определяем $\Delta_{fm} \approx 0,14d$. Используя (8) и (6), вычисляем $\Delta X_m \approx 3,86$ мкм и $\Delta\varphi_{\max} \approx 16''$.

Для повышения точности измерений необходимо произвести коррекцию искажений сигнала ЛМФ, вызванных неравномерностью светового поля осветителя и различием темновых токов и чувствительности элементов фотоприемника, например, как это описано в [7].

Определим требования, предъявляемые к геометрическим размерам щелевой маски. Ширина щелей маски b должна выбираться из условия формирования заданного числа K засвеченных элементов ЛМФ, необходимого для определения координат светового штриха по формуле (7). Учитывая рекомендации [1, 4], можно выбрать $b \geq 4d$. Длина щелей маски определяется (см. рис. 2) выражением

$$l = \left[\left(C + \frac{h}{2} \right)^2 + \frac{D^2}{4} \right]^{1/2} - \left[\left(C - \frac{h}{2} \right)^2 - \frac{b^2}{4} \right]^{1/2},$$

здесь D — длина фоточувствительной области ЛМФ; h — размер элемента в поперечном направлении. При заданных параметрах C и h размеры щели не должны ограничивать освещения, по крайней мере, одного элемента фотоприемника во всем диапазоне перемещения щели над ЛМФ. Радиус маски R определяется из выражения

$$R = \left[\left(C - \frac{h}{2} \right)^2 - \frac{b^2}{4} \right]^{1/2} + \frac{1}{2}.$$

Верхнее значение углового периода щелей маски φ_T ограничивается условием обязательного наличия на ЛМФ в любой момент времени, по крайней мере, одного светового штриха. Минимальное значение φ_T обусловлено значениями ω и t_1 . С учетом (3)

$$2t_1\omega + \varphi_a \leq \varphi_T \leq 2\arctg \frac{D - Kd}{2C},$$

где φ_a — добавочный угол, учитывающий погрешности измерений в конкретном устройстве.

Большинство ЛМФ работают в режиме накопления сигнала. Поэтому для уменьшения смаза сигнала необходимо производить импульсную подсветку маски перед каждым циклом считывания ЛМФ. Длительность импульса подсветки τ из условий смаза сигнала в пределах одного элемента и ограничения по ω должна удовлетворять условию

$$\tau \leq \frac{l}{\omega C}.$$

Экспериментальная проверка метода проводилась с использованием масок с шириной щелей 80—200 мкм. Осветитель состоял из светодиода АЛ107Б и конденсора диаметром 50 мм с фокусным расстоянием 60 мм. Фотоприемное устройство включало фотодиодную линейку ФУК1Л1 (1024 элемента размерами 20 × 20 мкм и периодом 25 мкм) с устройством управления, АЦП (8 разрядов) и последовательный интерфейс связи с компьютером. Расстояние между маской и ЛМФ составляло 1,5 мм. Количество элементов K , используемых для определения центра тяжести светового штриха, изменялось от 3 до 21. При фиксированном положении штриха в диапазоне изменения K 7 ÷ 21 отклонение значений X_c от среднего значения не превышало $\pm 0,6$ мкм. В процессе измерений производилась коррекция разброса темновых токов ЛМФ. Коррекция неравномерности освещения и чувствительности элементов фотоприемника не выполнялась. Среднеквадратическая погрешность измерения линейных перемещений при этих условиях составила 2,7 мкм, что соответствует среднеквадратической угловой погрешности 5,6" при $C = 100$ мм. Полученное значение погрешности обусловлено инструментальной погрешностью перемещений маски, неравномерностью освещения ЛМФ и разбросом чувствительности ее элементов.

В заключение отметим, что рассмотренный метод измерения угловых перемещений несложен в реализации и может быть применен в системах, в которых затруднено использование серийных датчиков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пашков В. С., Тидеман Н. А. Исследование алгоритмов оценки координат изображений точечных излучателей в оптико-электронных приборах с многоэлементными фотоприемниками // Изв. вузов. Приборостроение. 1988. 31, № 4.
2. Вилесов Л. Д. Оптимальное измерение координат изображения источника оптического излучения при наличии априорной неопределенности // Техника средств связи. Сер. Техника телевидения. 1985. Вып. 1.
3. Пашков В. С., Кузнецов В. И. Использование метода конечных разностей при обработке сигнала в телевизионном измерителе координат на ПЗС // Техника средств связи. Сер. Техника телевидения. 1984. Вып. 6.
4. Соломатин В. А., Якушенков Ю. Г. Сравнение некоторых способов определения координат изображений, осуществляемых с помощью многоэлементных приемников излучения // Изв. вузов. Приборостроение. 1986. 29, № 9.
5. Черемухин Г. С., Ракчеев Д. П. Погрешность определения координаты энергетического центра светового штриха из-за неидентичности чувствительности элементов линейки ПЗС // Изв. вузов. Приборостроение. 1991. 34, № 9.
6. Артемьев Б. Г., Голубев С. М. Справочное пособие для работников метрологических служб. М.: Изд-во стандартов, 1986.
7. Воробьев В. В., Мамаев М. А. О коррекции разброса темновых токов ячеек фотодиодной линейки с помощью ЦАП // Автометрия. 1996. № 3. С. 106.

Поступила в редакцию 11 июня 1997 г.