

И. А. ИВАНЧЕНКО, В. И. САНТОНИЙ, Л. М. БУДИАНСКАЯ

Украина, Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова
E-mail: deep_night@rambler.ru

Дата поступления в редакцию
24.10 2004 г. — 10.02 2005 г.

Оппонент д. т. н. В. В. ДАНИЛОВ
(ДонНУ, г. Донецк)

ДИСТАНЦИОННЫЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ДАТЧИК С РАСТРОВОЙ РЕШЕТКОЙ

Координатный метод в дистанционном оптико-электронном датчике увеличил точность измерения расстояния, а растровая решетка добавила функцию измерения скорости движения.

Точность измерений дальности дистанционным оптико-электронным датчиком по амплитуде отраженного сигнала определяется статистическим диапазоном нескольких параметров — таких как коэффициент отражения поверхности объекта, нестабильность состояния среды распространения излучения и пр. Если диапазон изменений не описан, то погрешность измерения, определяемая только разбросом коэффициента отражения (0,04...0,89 для естественных и искусственных поверхностей) может быть значительной [1, с. 52]. Поэтому амплитудный метод дальнометрии применяется в системах, не требующих высокой точности измерений (охранных, слежения и т. п.). Априорная неопределенность условий работы такого дистанционного датчика делает весьма актуальной проблему повышения точности дистанционной дальнометрии.

Во многих случаях важно измерение скорости движения. Оценку скорости можно производить по измерениям дальности путем дифференцирования координат положения. Однако предпочтительно выявить возможности прямого измерения скорости, поскольку при определении скорости через дифференцирование во многих случаях увеличиваются погрешности от помех [2].

Целью настоящей работы является исследование применимости в дистанционных оптико-электронных датчиках координатных методов для решения задач уменьшения погрешности измерения дистанции и растровых методов анализа движущегося изображения для расширения функциональных возможностей датчика путем добавления функции измерения скорости сближения с отражателем.

Дистанционный оптико-электронный датчик (ОЭД) представляет собой отражательный оптрон с открытым оптическим каналом. Принцип измерения дальности в нем основан на проекционно-геометрических соотношениях в системе "излучатель-отражатель-приемник". Предлагаемый датчик относится к числу устройств, использующих базовый метод измерения расстояния до объекта по положению светового пятна на поверхности фотоприемного элемента [3, с. 139].

Световой поток на входе фотоприемника Φ подчиняется закону обратных квадратов расстояний l [4, с. 90]:

$$\Phi = \tau_c^{2l} \tau_o \rho L A_{\text{вх}} A_2 / l^2, \quad (1)$$

где τ_c и τ_o — коэффициент пропускания среды и оптических систем, соответственно;

ρ — коэффициент отражения поверхности;

L — яркость излучателя;

$A_{\text{вх}}$ — площадь входной апертуры приемника;

A_2 — площадь светового пятна на отражательной поверхности.

При амплитудном методе регистрации дальности относительная погрешность ее измерения, связанная с разбросом ρ , определяется как [1, с. 49]

$$\Delta l = \frac{l_{\phi} \left[(\rho_{\text{max}} / \rho_{\text{min}})^{1/2} - 1 \right]}{2}, \quad (2)$$

где l_{ϕ} — фиксированная дальность;

$\rho_{\text{max}}, \rho_{\text{min}}$ — максимальное и минимальные значения коэффициента отражения поверхности.

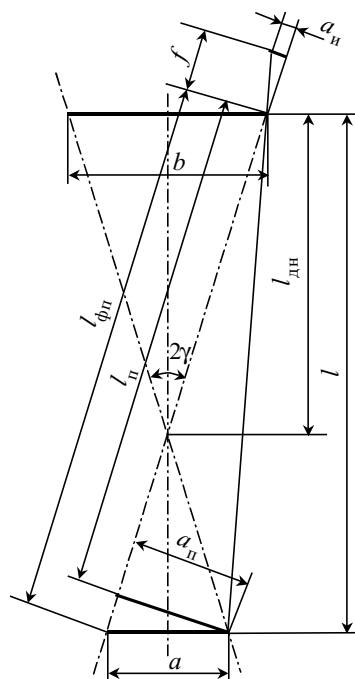


Рис. 1. Оптико-геометрическая модель базового датчика:

b — измерительная база; $l_{\text{дн}}$ — дальность настройки; $l_{\text{фп}}$ — удаленность фотоприемника; l_n — удаленность проекции светового пятна; 2γ — угол пересечения оптических осей излучателя и фотоприемника; f — фокусное расстояние приемного объектива; a —

расстояние между осями излучателя и фотоприемника на отражательной поверхности; a_n — проекция светового пятна в пространстве предметов; a_n — координата центра светового пятна в фокальной плоскости приемного объектива

В характерном для естественных и искусственных поверхностей диапазоне $\Delta\rho=0,04\dots0,89$ относительная погрешность достигает величины $\Delta l=1,858 l_{\phi}$.

Оптико-геометрическая модель ОЭД приведена на рис. 1. Основой ее является базовый метод, при котором с изменением дистанции происходит линейное смещение сфокусированного светового пятна по поверхности приемника. При этом траектория перемещения фокального пятна лежит в одной плоскости и практически параллельна базовой линии при малых ($<5^\circ$) углах пересечения оптических осей излучателя и приемника, а направление его смещения радиальное (при сближении — от центральной оси датчика).

Перемещение изображения исследуемой поверхности имеет место при ее сканировании, а в отсутствие сканирующих устройств объясняется процессом самосканирования [5], характерным, например, для радиолокационных станций бокового обзора, применяемых в движущихся летательных аппаратах [2]. Анализ перемещения изображения, связанного с движением ОЭД относительно поверхности, позволит ввести в алгоритм его работы дополнительную функцию измерения скорости.

Зависимость координаты центра $a_{\text{и}}$ светового пятна на фоточувствительной площадке приемника от дистанции l до объекта и других оптико-геометрических параметров ОЭД, обозначенных на рис. 1, имеет вид [6]

$$a_{\text{и}} = \frac{bf(l-l_{\text{дн}})}{l \cdot l_{\text{дн}} - b \cdot \text{tg}\gamma(l-l_{\text{дн}})} \quad (3)$$

Поскольку в соответствии с выражением (3) измеряемая дальность l определяется координатой центра $a_{\text{и}}$ фокального светового пятна на чувствительной поверхности фотоприемника, то, в отличие от амплитудного метода, здесь абсолютная погрешность измерений дальности Δl приблизительно равна $\Delta a_{\text{и}}$ — размерам фокального пятна, зависящим от абберационных свойств оптической системы фотоприемника. В системах с высокой степенью коллимации световых потоков размеры кружка рассеяния не превышают 10^{-3} мм [7], что можно считать пределом точности координатного метода. Это значит, что при измерении даже малых дистанций (0...10 м) достижима относительная погрешность менее 1%. То есть в координатном методе точность регистрации дальности обеспечивается за счет выбора оптической схемы датчика, а к амплитуде сигнала предъявляется лишь требование обеспечения уровня обнаружения сигнала.

Расчетная зависимость координаты изображения $a_{\text{и}}$ от дальности l для макета датчика с $b=75$ мм, $l_{\text{дн}}=70$ см, $f=50$ мм приведена на рис. 2 (кривая 1). Изменение графика $a_{\text{и}}(l)$ с изменением одного из расчетных параметров показано на кривых 2 ($l_{\text{дн}}=60$ см), 3 ($b=85$ мм) и 4 ($f=40$ мм).

Из уравнения (1) и данных рис. 2 следует, что при величине $l=l_{\text{дн}}$ значение $a_{\text{и}}=0$, что соответствует совмещению центра изображения с фокусом объектива. Длина траектории сканирования фокального пятна в диапазоне дистанций 20...100 см составляет от 13 до 16 мм для расчетных значений оптико-геометрических параметров макета ОЭД. С данным значе-

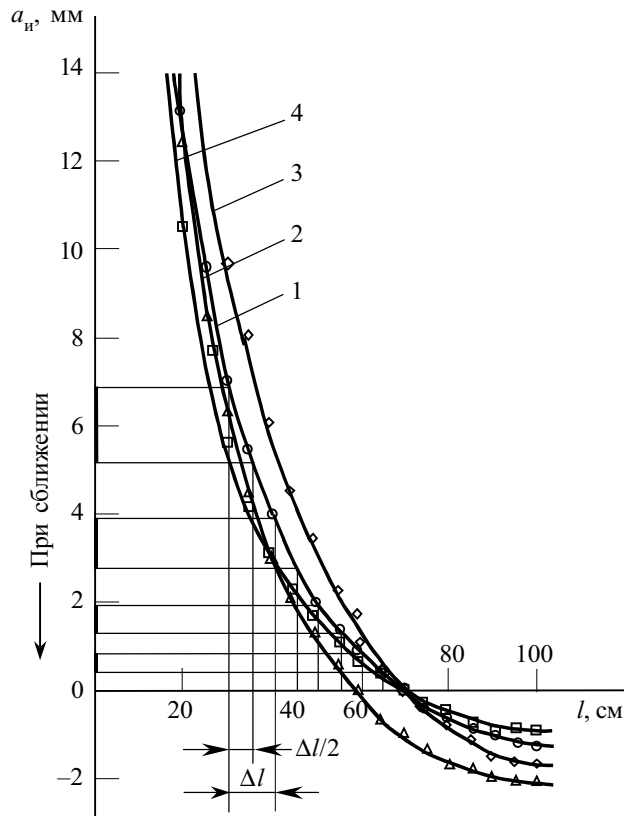


Рис. 2. Дистанционная зависимость координаты $a_{\text{и}}$ центра светового пятна на площадке фотоприемника

нием соизмеримы линейные размеры фоточувствительных площадок фотодиодов типа ФД-7К, ФД-155К и фотоприемных линеек и матриц.

Очевидно, что скорость сканирования изображения нелинейна и увеличивается с уменьшением дистанции. При этом траектория сканирования несимметрична относительно оптической оси объектива приемника и смещена в радиальном направлении от оси симметрии ОЭД. Последнее необходимо учитывать при определении положения площадки фотоприемника, которое обеспечивало бы попадание на нее фокального пятна во всем диапазоне дистанций.

Аналогично системам со сканированием [8] в самосканирующей системе для модуляции сигнала пригоден модулирующий растр. Наложенный на площадку приемника растр, в зависимости от положения изображения, пропускает или задерживает отраженный световой поток, чему соответствует значение сигнала 1 или 0. Таким образом, производится импульсная модуляция сигнала.

Учитывая прямолинейность сканирования изображения в базовом ОЭД, импульсную модуляцию производит растровая решетка щелевого типа, расположенная в фокальной плоскости объектива приемника. Длительность импульса и частота производимой решеткой модуляции определяется ее строением и скоростью движения ОЭД.

Расчет структуры решетки может производиться аналитически в соответствии с уравнением (1) или графически по зависимости $a_{\text{и}}(l)$ (рис. 2).

Методика графического расчета такова.

Если скорость движения ОЭД постоянна, то импульсную модуляцию с постоянной частотой реализует растровая решетка, производящая цикл "пропускание-затенение" за равные интервалы дистанции Δl . Разбив диапазон дистанций 30...70 см на интервалы $\Delta l=10$ см и $\Delta l/2=5$ см, а также выбрав положение щели от начала отсчета, определяем интервалы a_n , соответствующие интервалам дистанций 30...35 см, ..., 60...65 см. Для кривой 1 (рис. 2), например, интервалы a_n , определяющие ширину щели, составляют 1,7; 1,0; 0,7; 0,5 мм, соответственно. Щелевая решетка с данной переменной шириной щели характеризуется переменным периодом 3,0; 1,8; 1,3; 1,1 мм.

Очевидно, что решетка с постоянным периодом и шириной щели осуществит неравномерную импульсную модуляцию.

Импульсный сигнал, сформированный при помощи растровой решетки, характеризуется периодом $T=\Delta l/v$ и частотой $\tau=v/\Delta l$, где v — скорость движения ОЭД. Из этого следует, что априорные данные о соотношении между структурой решетки и дистанцией в совокупности с измеренной частотой модуляции позволяют определить скорость движения датчика. В частности, для нашего примера при $\Delta l=10$ см и измеренной частоте модуляции $\tau=1...50$ Гц скорость движения составляет от 0,1 до 5,0 м/с.

Дистанционная характеристика $\Phi(l)$ ОЭД, имеющая вид уравнения (1), дополняется функцией коэффициента пропускания τ_0 приемного объектива, изменяемого растровой решеткой следующим образом [8, с. 205]:

$$\Phi_0 = \begin{cases} \Phi_0 (\text{при } l \leq \Delta l/2) \\ 0 (\text{при } \Delta l/2 \leq l \leq \Delta l) \end{cases} \quad (4)$$

Создан макет ОЭД на основе оптопары "лазер ЛГ-78—фотодиод ФД-7К", способный измерять как расстояние до объекта, так и относительную скорость в диапазоне дальностей 30—70 см. Дистанционные характеристики макета ОЭД с растровой решеткой расчетной структуры приведены на рис. 3.

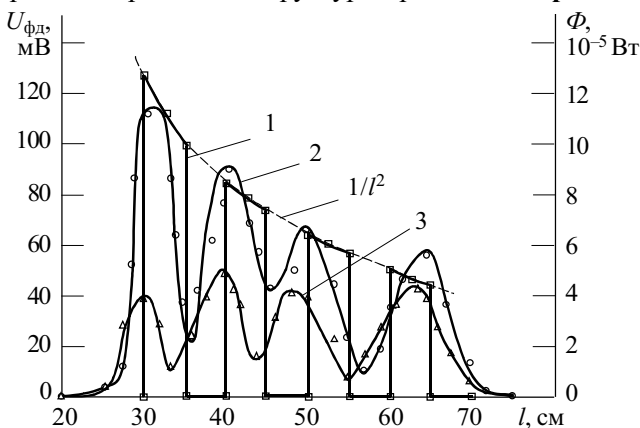


Рис. 3. Дистанционные характеристики ОЭД с растровой решеткой

Расчетная дистанционная характеристика $\Phi(l)$ ОЭД (рис. 3, кривая 1) получена при оптико-геометрических параметрах макета и структуре растровой решетки, соответствующих тому же варианту, что и для кривой 1 на рис. 2. Для расчета принимались: $\rho=0,85$; мощность излучателя $P=2 \cdot 10^{-3}$ Вт; угол расходимости лазерного пучка $2\alpha=3 \cdot 10^{-3}$ рад при диаметре $d_{\text{вх}}=2,5 \cdot 10^{-3}$ м. Значения Φ в диапазоне дистанций $l=30...70$ см получены по формуле (1) с учетом значений τ_0 из уравнения (4) и приведены в таблице.

Экспериментальная дистанционная зависимость сигнала фотоприемника $U_{\text{фд}}(l)$ (рис. 3, кривая 2), измеренная для данного макета ОЭД, как и расчетная, ограничивается функцией вида $1/l^2$, характерной для устройств данного типа. Очевидно, что применение растровой решетки преобразует непрерывную функцию $f(1/l^2)$ в последовательность импульсов, количество, периодичность и дистанционное расположение которых определяются структурой решетки.

Однако импульсы расчетной и экспериментальной характеристик ОЭД значительно отличаются по форме и глубине модуляции. Причина расхождения кроется в зависимости точности метода от соотношения между размерами и формой изображения и щели растровой решетки [9].

В нашем случае использования сферических оптических элементов изображение имеет форму круга, диаметр которого d_n изменяется в зависимости от l [1, с. 54] следующим образом:

$$d_n = (d_{\text{вх}} + 2l \cdot \text{tg} \alpha) \frac{f}{l}, \quad (5)$$

где $d_{\text{вх}}$ — диаметр входного зрачка фотоприемника.

При прохождении через щелевой растр круглого изображения форма прямоугольных импульсов на экспериментальной кривой 2 рис. 2 искажается до треугольной, а амплитуда импульсов возрастает с уменьшением расстояния.

Путем изменения строения решетки получен пакет импульсов постоянной амплитуды. В соответствии с уравнением (1) постоянство амплитуды импульса обеспечивается при условии

$$A_{\text{вх}} / l^2 = \text{const}, \quad (6)$$

где $A_{\text{вх}}$ — в общем случае площадь входного зрачка фотоприемника, а в частности — площадь фотоприемника, ограниченная щелью раstra.

Поскольку ширина щели определяет длительность импульса и, следовательно, частоту модуляции, то выполнение условия (6) обеспечивается подбором длины щели. На рис. 3 (кривая 3) показана экспериментальная дистанционная характеристика макета ОЭД с растровой решеткой, нормированной по длине щели. Она представляет собой пакет импульсов с разбросом максимума амплитуды не более 20%.

L , мм	300	300	325	350	350	400	400	425	450	450	500	500	525	550	550	600	600	625	650	650	700
τ	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0
Φ , 10^{-5} Вт	0	12,8	11,4	10,3	0	0	8,56	7,89	7,32	0	0	6,40	6,02	5,69	0	0	5,14	4,90	5,69	0	0

По аналогии может быть создан растр, формирующий пакет с опорным импульсом, что открывает возможности импульсно-кодовой модуляции сигнала.

Таким образом, переход в дистанционном оптико-электронном датчике к координатному методу измерения позволил уменьшить погрешность измерения расстояния, а введение растровой решетки — дополнить функциональные возможности ОЭД измерением скорости движения.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Мусьяков М. П., Миценко И. Д. Оптико-электронные системы ближней дальнометрии. — М.: Радио и связь, 1991.
2. Пестряков В. Б., Кузнецов В. Д. Радиотехнические системы. — М.: Радио и связь, 1985.
3. Ишанин Г. Г., Панков Э. Д., Андреев А. Л., Польщиков Г. В. Источники и приемники излучения. — СПб: Политехника, 1991.
4. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. — М.: Сов. радио, 1980.
5. Будиянская Л. М., Сантоний В. И., Иванченко И. А. Метод самосканирования для измерения диаграммы направленности оптико-электронных устройств // Тр. Одес. политехн. ун-та. — 2000. — Вып. 2. — С. 168—172.
6. Черешанский В. А., Иванченко И. А., Будиянская Л. М. и др. Оптико-электронный дальномер для робототехники / Тез. докл. VIII Всесоюз. н.-т. конф. «Измерительные информационные системы». — Ташкент. — 1987. — Ч. III, с. 10.
7. Сакин И. Л. Инженерная оптика. — Л.: Машиностроение, 1976.
8. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. — Л.: Машиностроение, 1983.
9. Куджури М. Устройство измерения расстояния и высоты в реальном времени // ТИИЭР. — 1984. — Т. 72, вып. 12. — С. 178—179.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ



6-я специализированная выставка ИЗДЕЛИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ. КОНВЕРСИЯ ОПК

18–21 октября 2005 г. Москва, ВВЦ







- Высокие технологии оборонного комплекса и гражданского сектора экономики
- Изделия и технологии оборонного комплекса, предназначенные для использования в гражданском секторе экономики
- Конверсионная продукция
- Коммерциализация технологий
- Инвестиционные проекты

ДЕЛОВАЯ ПРОГРАММА:

- конференции по актуальным вопросам использования технологий двойного назначения
- семинары и круглые столы для специалистов
- конкурс на лучшее инновационное изделие
- презентации участников выставки

ДИРЕКЦИЯ ВЫСТАВКИ:
 Тел.: (495) 811-4803, (495) 811-4804, (495) 811-4805
 E-mail: info@expoconexpo.ru, expocon@yandex.ru
 Web: www.expoconexpo.ru