

фирмы Analog Devices ADSP-BF561 с частотой ядра до 600 МГц и частотой внешней шины 133 МГц.

Наличие в процессоре двух АЛУ общего назначения и четырех видео-АЛУ позволяет выполнять в одном ядре до трех операций за такт. В результате становится возможной достаточно простая реализация мультизадачности при помощи разработанного фирмой Analog Devices простейшего ядра VDK с переключением контекста.

Вышеперечисленные параметры матрицы и процессора позволяют рассчитать от 100 до 3000 (в режиме ROI) профилей, что ограничено, в основном, скоростью матрицы. Передача данных производится по интерфейсу Ethernet со скоростью от 100 Мбит/с до 8 Мб/с на микросхеме фирмы Davicom DM9000A.

Программа с интуитивно понятным интерфейсом пользователя (окно редактора изображено на рис. 5) позволяет снимать данные с 2D-сканера и управлять координатной системой. Таким образом проводятся измерения параметров объектов по координатам X , Y , Z в заданной области сканирования с заданным шагом в соответствующих полях, анализ и обработка результатов.

Описанные одно- и двухканальные оптические устройства, а также трехкоординатная система полу-

чения и обработки изображения световой линии, деформированной профильными элементами поверхности, могут применяться для измерения сложных профилей поверхности технических объектов, в частности, высоты гребней и глубины канавок, а также для обнаружения дефектов поверхности.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Александров В. К., Биенко Ю. Н., Ильин В. Н. Оптико-электронные средства размерного контроля технологических микрообъектов.— Минск: Наука и техника, 1988.
2. Ильин В. Н., Галушко Е. В. Оптико-электронные измерительные преобразователи.— Минск: ИПП Минэкономики РБ, 1996.
3. Михеевич Д. А., Дубешко А. В. Оптико-электронное устройство для двухкоординатных измерений // Сб. материалов IV МНТК «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств».— Новополоцк.— 2006.— Т 1.— С. 276—278.
4. Ильин В. Н., Дубешко А. В., Михеевич Д. А. Лазерное устройство для измерения трехмерных объектов // Сб. материалов VI МНТК «Лазерная физика и оптические технологии».— Гродно.— 2006.— Ч. 1.— С. 282—284.
5. Ильин В. Н., Дубешко А. В., Михеевич Д. А. Оптико-электронная система измерения высоты и линейных размеров микроструктур ПЗС // Тр. Х МНПК «Современные информационные и электронные технологии».— Одесса.— 2009.— Т. 2.— С. 46.

И. А. ИВАНЧЕНКО, В. И. САНТОНИЙ, д. ф.-м. н. В. А. СМЫНТЫНА

Украина, Одесский национальный ун-т им. И. И. Мечникова
E-mail: deer_night@mail.od.ua

Дата поступления в редакцию
03.09 2009 г. — 26.02 2010 г.

Оппонент В. Г. ЮРЬЕВ
(ЦКБ «Ритм», г. Черновцы)

ЦИФРОВОЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА НАПРАВЛЕННОГО ОТРАЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ

Применение в отражательной фотометрии многоэлементного фотоприемника позволило увеличить точность и упростить измерение спектрального коэффициента направленного отражения поверхности.

Различие в отражательной способности природных и искусственных объектов широко используется для их распознавания и классификации [1]. Качество материалов и разнообразных покрытий, используемых в светотехнической, лакокрасочной промышленности, в гальванотехнике и других областях, в первую очередь, определяется коэффициентами отражения и поглощения [2]. Поэтому определение коэффициента отражения различных объектов как одного из основных оптических параметров является актуальной задачей научных исследований и приборостроительной практики.

Требования к точности измерения коэффициента отражения высоки, поскольку диапазон возможных

значений коэффициента широк — от 0,04 до 0,89 [3, с. 49]. Большинство распространенных методов исследования отражательной способности поверхности основано на измерении амплитудных значений характеристик отраженного излучения, таких как интенсивность, яркость и пр. При этом точность измерения в значительной степени зависит от величины измеряемых параметров. Известно [4], что отражение излучения измеряется с наибольшей для аналоговых приборов точностью около 1% в диапазоне значений коэффициента отражения 0,2—0,6, а за пределами этого диапазона погрешность превышает 3%. Одним из путей повышения точности измерения отражения излучения может быть переход к цифровому представлению и обработке измерительной информации, что обеспечивает ряд безусловных преимуществ, в том числе по точности, для которой достижимым становится уровень до $10^{-3}\%$ [5, 6].

Это направление измерений реализуется в области фотометрии, в которой первичным измерительным преобразователем является фотоэлектрический приемник оптического излучения.

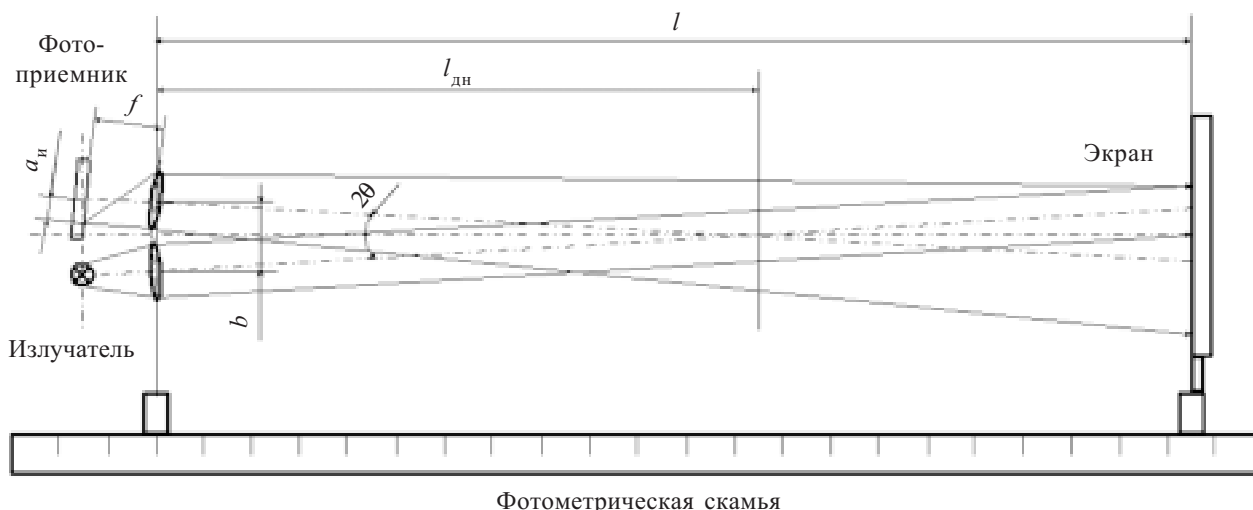


Рис. 1. Принципиальная схема измерений коэффициента отражения поверхности:

b — измерительная база; $l_{дн}$ — дальность настройки; 2θ — угол пересечения оптических осей излучателя и фотоприемника; f — фокусное расстояние приемного объектива; $a_{и}$ — координата изображения на площадке фотоприемника; l — дальность

В последние годы в фотометрии стали широко использоваться многоэлементные (одно- и двумерные) фотоприемники, выполняющие функции анализаторов сигнала, пространственных и временных фильтров [7]. Принципиальной особенностью многоэлементных приемников-анализаторов является дискретизация непрерывного оптического сигнала.

Многоэлементные фотоприемники, в частности линейки и матрицы фотоприемников, в сочетании с микропроцессорами открыли широкие возможности для детектирования информативных признаков, преобразования их в электрические сигналы и подготовки этих сигналов для дальнейшей обработки [8].

Цель данной работы — исследование возможности использования многоэлементного фотоприемника для реализации цифрового метода измерения коэффициента направленного отражения поверхности.

Измерение проводилось по схеме, показанной на рис. 1, содержащей излучатель, многоэлементный фотоприемник и отражательный экран, установленные на фотометрической скамье.

Соотношение между величинами b и $l_{дн}$ составляет примерно 1:10, что соответствует узкобазовому типу измерительной схемы, при котором обеспечиваются наилучшие условия отражения и минимальная мертвая зона.

Пучок лучей, генерированных излучателем, через оптический объектив падает на отражательный экран. Отраженный поверхностью пучок лучей через входной объектив поступает на фоточувствительную поверхность приемника. При этом отраженный пучок полностью перекрывается апертурой приемного объектива во избежание выхода из зоны чувствительности фотоприемника части измеряемого светового потока.

При амплитудном методе измерений сигнал фотоприемника U_{ϕ} связан с отражательными свойствами поверхности соотношением [3]

$$U_{\phi} = A\rho/l^2, \quad (1)$$

где A — коэффициент пропорциональности,

$$A = P_0 S_{\phi} \tau_{пр} f_c(\theta) A_{вх} / 2\pi;$$

P_0 — мощность излучателя;

S_{ϕ} — вольтовая чувствительность фотоприемника;

$\tau_{пр}$ — коэффициент пропускания приемоизлучательной оптической системы;

$f_c(\theta)$ — функция направленного излучения, зависящая от угла θ ;

$A_{вх}$ — площадь входного зрачка приемной оптической системы;

ρ — коэффициент отражения поверхности.

При малой измерительной базе вид графика $U_{\phi} = f(l)$ меняется в зависимости от величины коэффициента отражения поверхности (рис. 2) [3].

Очевидно, что определенный уровень входного сигнала фотоприемника, например пороговый $U_{пор}$, для поверхностей с различными отражательными свойствами достигается при дальности l_{max} и l_{min} , соответственно. Следовательно, при пороговом режиме измерений в пределах диапазона дальности l_{min} — l_{max} имеет место зависимость пороговой дальности от коэффициента отражения исследуемой поверхности, которая, исходя из (1), имеет вид

$$l_{пор} = \sqrt{\frac{A}{U_{пор}}} \rho. \quad (2)$$

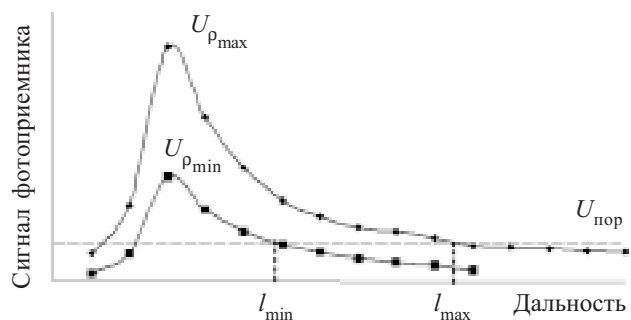


Рис. 2. Зависимость сигнала фотоприемника от дальности для поверхностей с различными коэффициентами отражения

ρ	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15	0,1
$a_{\text{и}}, \text{ мм}$	1,64	1,52	1,39	1,24	1,08	0,91	0,68	0,47	0,21	-0,1	-0,5	-0,9	-1,5	-2,3	-3,4	-5,2
$l_{\text{пор}}, \text{ см}$	100	97,1	94	90,8	87,5	84,1	80,1	76,7	72,8	68,7	64,2	59,5	54,3	48,5	42	34,4

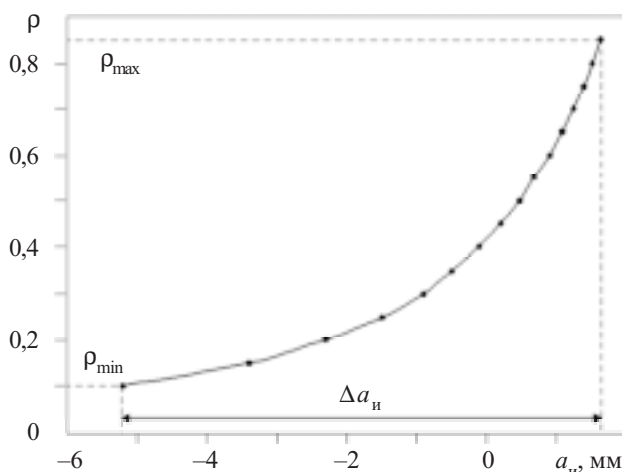


Рис. 3. Расчетная зависимость коэффициента отражения от координаты центра светового пятна

С другой стороны, изменение дальности (расстояния между отражающей поверхностью и приемопередаточным блоком измерительной схемы) сопровождается перемещением светового изображения в фокальной плоскости фотоприемника. При этом координата $a_{\text{и}}$ центра светового пятна на фоточувствительной площадке приемника определяется дальностью и оптико-геометрическими параметрами приемопередаточного блока (рис. 1) следующим образом [9]:

$$a_{\text{и}} = \frac{bf(l - l_{\text{дн}})}{ll_{\text{дн}} - btg\theta \cdot (l - l_{\text{дн}})}. \quad (3)$$

Соотношения (2) и (3) позволяют установить соответствие между коэффициентом отражения поверхности и координатой изображения в плоскости фотоприемника, которое выражается как

$$\rho = \frac{U_{\text{пор}}}{A} \left[-\frac{bl_{\text{дн}}(a_{\text{и}}tg\theta + f)}{a_{\text{и}}(l_{\text{дн}} - btg\theta) - bf} \right]^2. \quad (4)$$

Расчет зависимости $\rho(a_{\text{и}})$ проводился в диапазоне изменения коэффициента отражения от 0,85 до 0,10, характерном для реальных поверхностей, и в диапазоне дальности 100—25 см, ограниченном при максимальном коэффициенте отражения поверхности пороговой дальностью $l_{\text{пор}}=100$ см, определяемой значением $U_{\text{пор}}=0,1$ мВ, и шириной мертвой зоны $l_{\text{мз}}=25$ см. В уравнении (3) для расчета использованы следующие значения оптико-геометрических параметров приемопередаточного блока: $b=75$ мм, $f=50$ мм, $l_{\text{дн}}=70$ см, $2\theta=6,4^\circ$.

Результаты расчета ρ и $a_{\text{и}}$ представлены в таблице и на рис. 3.

Здесь положительные значения $a_{\text{и}}$ соответствуют координате изображения слева от оптической оси приемного объектива, а отрицательные — справа. Знак $a_{\text{и}}$ меняется относительно точки $l=l_{\text{дн}}$ в соответствии с уравнением (3). Очевидно, что зависимость $\rho(a_{\text{и}})$ является нелинейной, что создает определенные трудности ее использования в измерительной системе, преодолеть которые можно известными методами, позволяющими линеаризовать измерительную характеристику [10, с. 31].

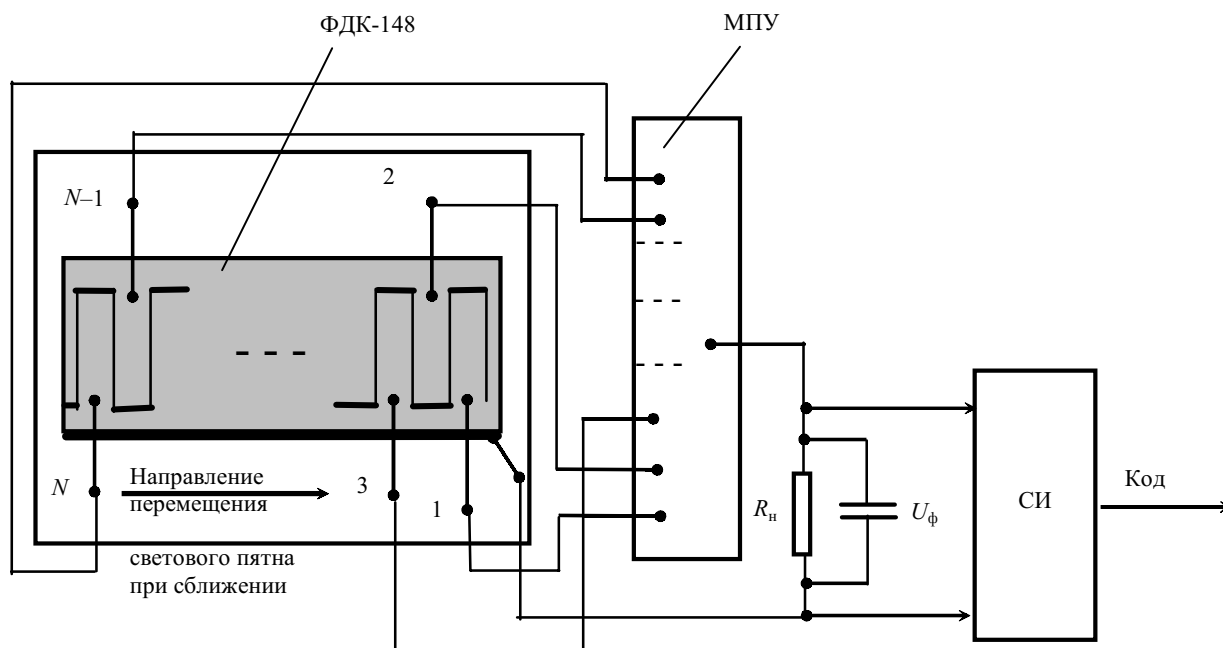


Рис. 4. Структурная схема дистанционного АЦП со счетом импульсов на базе линейки фотодиодов ФДК-148

По данным, приведенным в таблице и на рис. 3, рассматриваемому диапазону коэффициента отражения 0,85—0,10 соответствует изменение пороговой дальности от 100 до 34,4 см и смещение координаты центра фокального пятна между $a_{\text{и}}(l_{\text{п max}})=1,64$ мм и $a_{\text{и}}(l_{\text{п min}})=-5,2$ мм. При этом длина траектории смещения $\Delta a_{\text{и}}=6,84$ мм.

Принципиальная возможность использования аналоговой зависимости $\rho(a_{\text{и}})$ для измерения спектрального коэффициента отражения ρ_{λ} исследовалась (рис. 4) на основе излучателя ИЛПИ-103 ($\lambda_{\text{изл}}=0,63$ мкм) и многоэлементного фотоприемника ФДК-148 ($\Delta\lambda_{\text{фп}}=0,4\text{—}1,1$ мкм).

Фотоприемник ФДК-148, представляющий собой линейку кремниевых фотодиодов, осуществляет дискретизацию зависимости между отражательными свойствами поверхности и координатой изображения путем разбиения траектории смещения изображения на ряд участков, соответствующих определенным значениям коэффициента отражения.

Линейка фотодиодов ФДК-148 длиной 12,8 мм состоит из 11 включенных параллельно дискретных фоточувствительных элементов шириной 1 мм каждый с линейным непрозрачным интервалом 0,15 мм. В схеме метода линейка фотодиодов выполняет функции дистанционного АЦП, преобразующего в код линейное перемещение изображения [5]. Кроме многоэлементного фотоприемника в структуру простейшего дистанционного АЦП входят также многовходовое пороговое устройство (МПУ) и счетчик импульсов (СИ).

Рассмотрим алгоритм работы дистанционного АЦП. При уменьшении дистанции от светоизлучающего блока до отражательного экрана световое пятно линейно перемещается по поверхности фотоприемника в направлении, указанном на рис. 4. Проходя последовательно по площадкам фоточувствительных элементов, световое пятно вызывает появление фотоэдс $U_{\text{ф}}$ на выходах каждого из них, которые соединены со входами МПУ.

Разделенные во времени сигналы фотоответа отдельных элементов при превышении порогового уровня $U_{\text{ф}}$ вызывают появление на выходе МПУ последовательности импульсов положительной полярности, которые поступают на СИ. Числовой код, полученный на выходе СИ, равен количеству импульсов n на выходе МПУ и определяет значение ρ_{λ} в виде $\rho_{\lambda}=qn$, где q — квант АЦП, равный единичной координате и эквивалентному значению ρ_{λ} .

Таким образом, цифровой метод измерения спектрального коэффициента отражения исследуемой поверхности основан на последовательном счете импульсов, регистрируемых при изменении дальности. Связь числа импульсов фотоответа с величиной спектрального коэффициента отражения исследуемой поверхности позволяет использовать многоэлементный фотоприемник в качестве геометрической шкалы этого коэффициента отражения.

Результаты экспериментальной проверки принципиальной возможности технической реализации предлагаемого метода приведены на рис. 5, где показаны

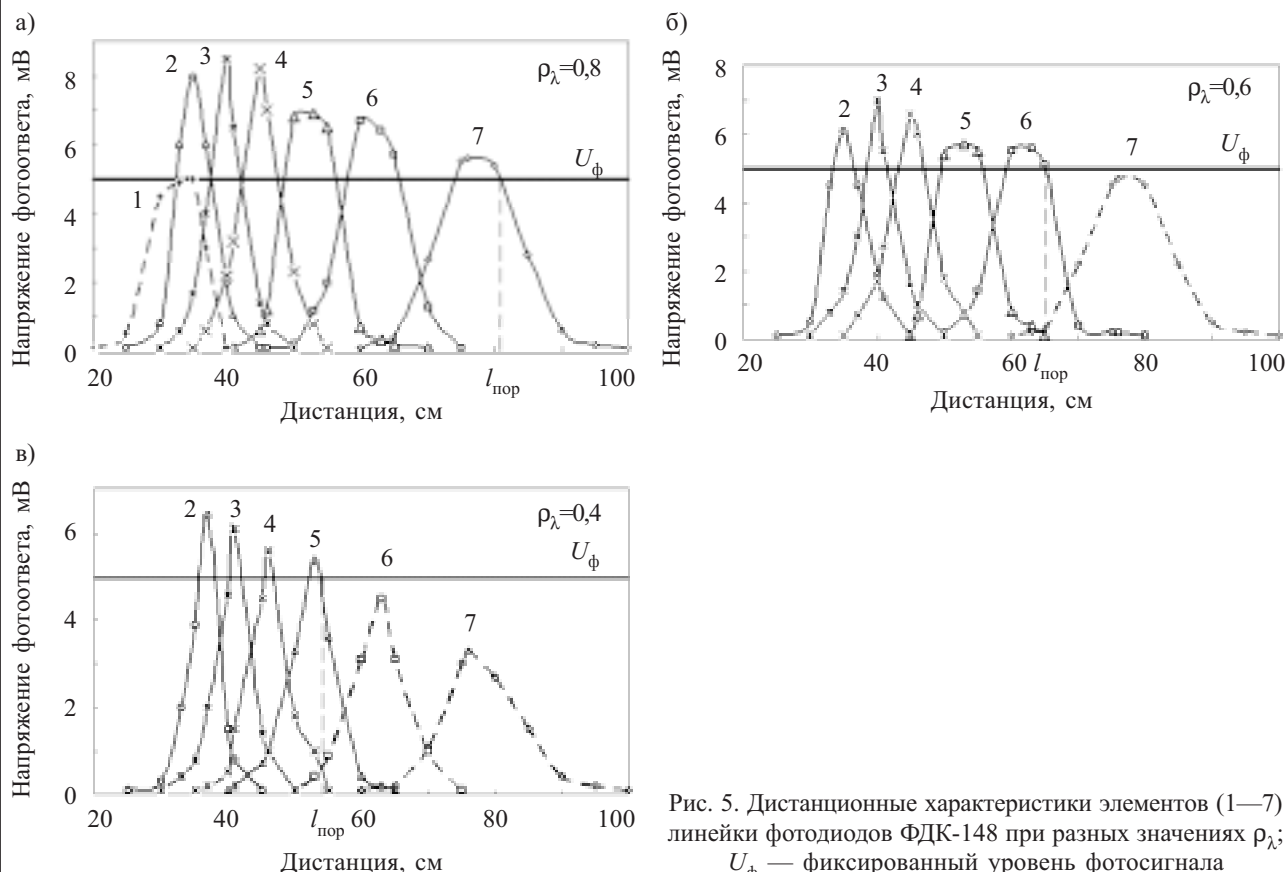


Рис. 5. Дистанционные характеристики элементов (1—7) линейки фотодиодов ФДК-148 при разных значениях ρ_{λ} ; $U_{\text{ф}}$ — фиксированный уровень фотосигнала

дистанционные характеристики (ДХ) элементов цифрового фотометра.

Исходя из расчетной длины траектории смещения изображения Δa_n , составляющей 6,84 мм (рис. 3), находим, что в данную траекторию вписываются шесть из одиннадцати элементов фотодиодной линейки, ширина которых с просветами достигает 6,75 мм. Элементы фотодиодной линейки с 8-го по 11-й являются нерабочими, поскольку расположены за пределами траектории перемещения светового пятна в фокальной плоскости фотоприемника. Это подтверждается рис. 5, а, на котором показаны дистанционные характеристики элементов с 1-го по 7-й линейки фотодиодов ФДК-148.

Каждому элементу соответствует пилообразный импульс, максимальная амплитуда и дистанционная привязка которого описываются соотношением (1). Отклонения от прямоугольной формы импульса возникают в результате перемещения кругового изображения по поверхности щелевого типа. Очевидно, что при малых значениях напряжения фотоответа соседние импульсы частично перекрываются. Разделение импульсов имеет место при некотором значении U_{ϕ} , определяющем нижнюю границу области их анализа. В данном случае $U_{\phi}=5$ мВ.

Как видно из рис. 5, а, в 1-ом элементе (пунктирная кривая) максимум фотоответа фотодиода, расположенный на расстоянии примерно 34 см от отражающего экрана, не достигает уровня U_{ϕ} . Это объясняется близостью мертвой зоны шириной 25 см, в которой сигнал фотоответа уменьшается пропорционально уменьшению площади пересечения полей зрения излучателя и фотоприемника. Таким образом, 1-й элемент выходит за пределы рабочего диапазона дальности (100—34,4 мм), в котором имеет место полное перекрытие отраженного пучка апертурой приемного объектива.

Из этого следует, что при сближении приемоизлучательного блока с поверхностью, имеющей $\rho_{\lambda} \approx 0,8$, фиксированный уровень сигнала $U_{\phi}=5$ мВ возникает сначала в 7-ом элементе фотоприемника на дистанции $l_{\text{пор}} \approx 83$ см, а затем, с уменьшением дистанции, в элементах с 6-го по 2-й. В итоге формируется пакет из шести импульсов. Для поверхности с $\rho_{\lambda} \approx 0,6$ (рис. 5, б) первый импульс возникает в 6-ом элементе на $l_{\text{пор}}=66$ см и полный пакет состоит только из пяти импульсов. Аналогично формируется пакет из четырех импульсов (рис. 5, в) для поверхности с $\rho_{\lambda} \approx 0,4$, у которой первый импульс зафиксирован в 5-ом элементе на $l_{\text{пор}}=55$ см.

Отсутствие корреляции между данными таблицы и рис. 5 предположительно связано с искажением формы импульсов и вынужденным повышением уровня U_{ϕ} , сдвигающим $l_{\text{пор}}$ в сторону уменьшения дальности.

Точность измерения цифровым методом определяется абсолютной погрешностью дискретности Δ_d ,

не выходящей за пределы $\pm 0,5q$ [5]. При этом относительная погрешность измерений описывается выражением

$$\Delta_n = \frac{\Delta_d \Delta p}{\Delta a_n} 100\%, \quad (5)$$

где Δp — диапазон коэффициента отражения, соответствующий длине траектории смещения, подвергавшей дискретизации.

Поскольку в соответствии со структурой линейки фотодиодов величина q составляет 1,15 мм, то $\Delta_d = \pm 0,575$ мм. По условиям эксперимента $\Delta a_n = 6,84$ мм и $\Delta p = 0,75$, откуда $\Delta_n = 6,3\%$. В соответствии с уравнением (5), точность измерений коэффициента отражения может быть увеличена до десятых долей процента в результате уменьшения q на порядок. Известно [11], что в современных многоэлементных фотодиодных устройствах размеры чувствительных элементов достигают микрометров, что подтверждает техническую возможность достижения данного уровня точности измерений.

Таким образом, путем подсчета числа импульсов фотоответа на выходе многоэлементного фотоприемника приемоизлучательного блока, сближающегося с исследуемой поверхностью, реализуется цифровое представление спектрального коэффициента отражения этой поверхности, предпочтительное для точных измерений.

Предлагаемый метод пригоден для создания как измерителей коэффициента отражения различных поверхностей, так и обнаружителей объектов с определенными отражательными свойствами.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Лазерные измерительные системы / Под ред. Д. П. Лукьянова. — М.: Радио и связь, 1981.
2. Пришивалко А. П. Отражение света от поглощающих сред. — Минск: Изд-во АН БССР, 1963.
3. Мусьяков М. П., Миценко И. Д. Оптико-электронные системы ближней дальнометрии. — М.: Радио и связь, 1991.
4. Зеленков И. А. Фотометрия. — К.: НАУ, 2003.
5. Кончаловский В. Ю. Цифровые измерительные устройства. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
6. Выскуб В. Г., Розов Б. С., Савельев В. И. Прецизионные цифровые системы автоматического управления. — М.: Машиностроение, 1984.
7. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы смотрящего типа. — М.: Феникс, 2004.
8. Шмидт Д., Шварц В. Оптоэлектронные сенсорные системы. — М.: Мир, 1991.
9. Иванченко И. А., Сантоний В. И., Будиянская Л. М. Оптико-электронный дистанционный сенсор с растровой решеткой // Тр. научн.-практ. конф. «СИЭТ-2004». — Украина, Одесса. — 2004. — С. 139.
10. Левин Л. С., Плоткин М. А. Цифровые системы передачи информации. — М.: Радио и связь, 1982.
11. Техническое зрение роботов / Под общ. ред. Ю. Г. Якушенкова. — М.: Машиностроение, 1990.