

А. К. ПОТАШНИКОВ, Г. Ф. СИТНИКОВ

(Новосибирск)

ФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО СИСТЕМЫ «СКАН-2»

В настоящее время находят широкое применение различные сканирующие устройства, предназначенные для ввода в ЭВМ полутоновой фотографической информации. В большинстве существующих фотометрических устройств в качестве преобразователя «свет — электрический сигнал» используются ФЭУ. Известно [1], что нестабильность усиления используемых ФЭУ влияет на точность измерения оптической плотности.

В данной работе описано двухлучевое фотометрическое устройство [2] системы «Скан-2», в котором нестабильность фотоприемников не приводит к появлению дополнительной погрешности.

На рис. 1 приведена структурная схема фотометрического устройства. Собственно измерение оптической плотности элементов фотографического изображения осуществляется общепринятым способом. Отличие состоит лишь в том, что перед каждым измерением проводится своеобразная калибровка измерительного канала с помощью дополнительного источника света (ДИ), оптически связанного с фотоприемниками. Причем к ДИ не предъявляется жестких требований по его стабильности. Важна лишь пропорциональность световых потоков, достигающих фотокатодов ФЭУ₀ и ФЭУ₁ в каждом такте калибровки. Поэтому в качестве дополнительного источника световых импульсов может быть использован, например, светоизлучающий диод.

Фотометрическое устройство работает в двухтактном режиме. В исходном состоянии луч ЭЛТ погашен, ДИ включен. Аналоговое запоминающее устройство (АЗУ), подключенное к выходу суммирующего усилителя А1, находится в режиме записи информации.

Пусть на фотокатоды фотоумножителей падают световые потоки F' и aF' ($a \approx 1$). Тогда выходные сигналы фотоприемников будут соответственно равны:

$$I_{a0} = \Theta_0 K'_0 F', \quad (1)$$

$$I_{a1} = \Theta_1 K'_1 aF',$$

где I_{a0} , I_{a1} — токи анодов; Θ_0 , Θ_1 — интегральные чувствительности фотокатодов; K'_0 , K'_1 — коэффициенты усиления в момент времени t_1 соответствующих фотоумножителей.

В момент окончания такта калибровки выходной сигнал АЗУ будет пропорционален разности логарифмов токов ФЭУ

$$u_0 = c [\ln (\Theta_0 K'_0 F') - \ln (a \Theta_1 K'_1 F')]. \quad (2)$$

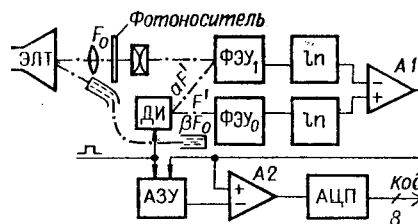


Рис. 1.

Здесь c — коэффициент пропорциональности, имеющий размерность напряжения.

Непосредственно за тактом калибровки проводится измерение оптической плотности. АЗУ переходит в режим хранения информации. ДИ выключается, а на экране ЭЛТ подсвечивается позиция электронного луча. При этом на фотоноситель падает световой поток F_0 , а на фотокатод ФЭУ₀ — βF_0 . Для сигнала на неинвертирующем входе усилителя А2 в этом случае можно записать следующее выражение:

$$u_1 = c [\ln (\Theta_0 K'_0 \beta F_0) - \ln (\tau \Theta_1 K'_1 F_0)], \quad (3)$$

где τ — коэффициент пропускания исследуемого участка фотографического изображения. Сигнал же на выходе А2 будет представлять собой разность

$$u_D = u_1 - u_0 = c [-\ln \tau + \ln (a\beta)], \quad (4)$$

пропорциональную оптической плотности. Составляющую сигнала u_D , пропорциональную $c \ln(a\beta)$, легко компенсировать при настройке фотометрического устройства подачей соответствующего смещения на вход суммирующего усилителя А2. Таким образом, можно считать, что

$$u_D = -c \ln \tau. \quad (5)$$

С помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) сигнал u_D преобразуется в 8-разрядный код оптической плотности, и фотометрическое устройство переходит в исходное состояние.

Результат измерения оптической плотности в реальной системе с некоторой точностью будет приближаться к значению, определяемому выражением (5). К основным причинам, вызывающим погрешности измерения двухлучевым устройством фотометрирования, представленным на рис. 1, можно отнести шумы ФЭУ, нелинейность преобразования «свет — ток», ошибки логарифмических преобразователей, погрешность квантования.

Составляющая погрешности измерения оптической плотности, обусловленная нелинейностью характеристики преобразования «свет — ток» используемых ФЭУ, может быть сведена к минимуму тщательным отбором фотоумножителей. Особенно жесткие требования предъявляются к линейности ФЭУ₁, работающего в измерительной ветви, так как световой поток, падающий на его фотокатод, может изменяться в широком диапазоне (практически от нуля до F_0), тогда как световой поток, падающий на фотокатод ФЭУ₀ опорной ветви, изменяется в сравнительно небольших пределах $\pm \Delta F_0$, определяемых нестабильностью яркости светового пятна на экране ЭЛТ.

Случайные колебания анодного тока ФЭУ, возникающие в результате шумов электронной эмиссии фотокатода, флуктуаций термотока диодов и некоторых других причин, приводят к появлению случайных ошибок в измерении оптической плотности. Представим выходной ток фотоумножителя в виде суммы детерминированного процесса (сигнала i) и стационарного нормального случайного процесса i_m с нулевым средним значением и дисперсией σ^2 :

$$I_a = i + i_m, \quad (6)$$

где $i = \Theta KF$, i_m — шумовой ток ФЭУ.

Найдем среднее значение и дисперсию процесса на выходе логарифмического преобразователя, если на его входе действует возмущение (6). Для этого разложим в ряд Маклорена по степеням i_m выражение $\ln(i + i_m)$, дающее аналитическое представление характеристики преобразователя, и ограничимся тремя членами, что при отношении сигнал/шум $q = 3$ приводит к ошибке $\sim 1\%$:

$$\ln I_a = \ln i + i_m/i - i_m^2/2i^2. \quad (7)$$

Согласно [3],

$$\begin{aligned} \bar{i}_m^2 &= 2e\alpha^2 (I_0 + I_\tau) K^2 \Delta f, \\ q &= I_0 / [2e\alpha^2 (I_0 + I_\tau) \Delta f]^{1/2}, \end{aligned} \quad (8)$$

где e — заряд электрона, α^2 — коэффициент увеличения уровня шумов, I_0 — фототок фотокатода, I_τ — термоэлектронный ток фотокатода, Δf — полоса частот фотоэлектрического тракта.

Проведя усреднение соотношения (7), получим выражение для среднего значения $\ln I_a$:

$$m_1 \{\ln I_a\} = \ln i - (\sigma^2/2i^2) = \ln i - (1/2q^2). \quad (9)$$

При вычислении дисперсии воспользуемся следующим соотношением:

$$M_2 \{\ln I_a\} = m_1 \{[\ln i + i_m/i - i_m^2/2i^2 - m_1]^2\}.$$

После несложных преобразований и вычислений получим выражение для дисперсии случайного процесса на выходе логарифмического преобразователя:

$$M_2 \{\ln I_a\} = \sigma^2/i^2 + \sigma^4/2i^4 = (2q^2 + 1)/2q^4. \quad (10)$$

С учетом полученных выше результатов можно записать следующие выражения для u_0 и u_1 :

$$\begin{aligned} u_0 &= [\ln i'_0 + i'_{m0}/i'_0 - (i'_{m0})^2/2(i'_0)^2 - \ln i'_1 - i'_{m1}/i'_1 + (i'_{m1})^2/2(i'_1)^2]c, \\ u_1 &= [\ln i_0 + i_{m0}/i_0 - i_{m0}^2/2i_0^2 - \ln i_1 - i_{m1}/i_1 + i_{m1}^2/2i_1^2]c. \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь $i'_0 = \Theta_0 K'_0 F'$, $i'_1 = \Theta_1 K'_1 a F'$, $i_0 = \Theta_0 K'_0 \beta F_0$, $i_1 = \Theta_1 K'_1 F_0 \tau$. Тогда среднее значение процесса на выходе суммирующего усилителя А2 примет вид

$$\bar{u}_D = [\ln \tau - 1/2q_0^2 + 1/2q_1^2 + 1/2q_{01}^2 - 1/2q_{11}^2]c, \quad (12)$$

где $q_0 = i_0/\sigma_0$, $q_1 = i_1/\sigma_1$, $q_{01} = i'_0/\sigma'_0$, $q_{11} = i'_1/\sigma'_1$. Учитывая, что $q_{01} \approx q_{11}$, получим

$$\bar{u}_D = -c \ln \tau + c(q_0^2 - q_1^2)/(2q_0^2 q_1^2). \quad (13)$$

Как видно из выражения (13), наличие шумов в каналах фотометрического устройства приводит к появлению систематической составляющей погрешности измерения оптической плотности, величина которой зависит от отношений сигнал/шум и колеблется при сканировании участков изображения с различными оптическими плотностями, так как $q_1 = q_1(\tau) \rightarrow 0$ при $\tau \rightarrow 0$, а q_0 не зависит от коэффициента пропускания фотонистителя.

Используя уравнения (8), выражение для систематической составляющей погрешности измерения оптической плотности, вызванной шумами, можно представить в следующем виде:

$$\Delta D_c \approx ((1 - \tau)/2\tau)(c/q_0^2). \quad (14)$$

Данное выражение получено в предположении, что $\beta \approx 1$, $I_\tau \approx 0$, а параметры фотоприемников очень близки, т. е. $\Theta_0 \approx \Theta_1$ и $\alpha_0^2 \approx \alpha_1^2$. Оно не учитывает динамики изменения характеристик ФЭУ, но позволяет с достаточной точностью оценить предельные ошибки.

Отношение сигнал/шум в опорном канале фотометрического устройства составляет $\sim 50-80$, а диапазон измеряемых плотностей не превышает $1,9D$. Чтобы дать представление о порядке ожидаемой погрешности ΔD_c , рассмотрим предельный случай: $D = 1,9$, $q_0 = 50$, что соответствует $\tau \approx 0,15$ и $\Delta D_c \approx 11,32 \cdot 10^{-4}$ или $\sim 0,052\%$. Следовательно, если весь диапазон разбит на 256 уровней, то нелинейность преобразования оптической плотности в код, вызванная наличием шумов в каналах фотометрического устройства, будет составлять $\sim 1,3$ кванта.

Поскольку случайные процессы в измерительном и опорном каналах статистически независимы, выражение для $\sigma_{u_0}^2$ и $\sigma_{u_1}^2$ можно представить в виде суммы дисперсий слагаемых процессов u_0 и u_1 . Используя выражения (10) и (11), получим

$$\begin{aligned}\sigma_{u_0}^2 &= (\sigma'_0)^2/(i'_0)^2 + (\sigma'_0)^4/2(i'_0)^4 + (\sigma'_1)^2/(i'_1)^2 + (\sigma'_1)^4/2(i'_1)^4, \\ \sigma_{u_1}^2 &= \sigma_0^2/i_0^2 + \sigma_0^4/2i_0^4 + \sigma_1^2/i_1^2 + \sigma_1^4/2i_1^4.\end{aligned}\quad (15)$$

Ввиду независимости световых потоков F' и F_0 значения случайного процесса, принадлежащие различным интервалам (калибровки или измерения), практически не коррелированы. Поэтому, представив АЗУ в виде неискажающей линии задержки, для дисперсии процесса u_D можно записать:

$$\sigma_{u_D}^2 = \sigma_{u_0}^2 + \sigma_{u_1}^2.$$

Используя (15) и учитывая, что $q_{01} \approx q_{11}$, находим

$$\sigma_{u_D}^2 = (c^2/q_{01}^2)(2 + 1/q_{01}^2) + (c^2/q_0^2)(1 + 1/2q_0^2) + (c^2/q_1^2)(1 + 1/2q_1^2). \quad (16)$$

Ясно, что в фотометрическом устройстве должно соблюдаться условие $F' \geq F_{\text{омакс}}$. В этом случае повышается достоверность результатов измерения.

Если световые потоки $F' \approx F_0$, то $q_0 \approx q_{01}$ и выражение (16) упрощается:

$$\sigma_{u_D}^2 = (3c^2/q_0^2)(1 + 1/2q_0^2) + (c^2/q_1^2)(1 + 1/2q_1^2). \quad (17)$$

При $q_0^2 \gg 100$ членом $1/2q_0^2$ в выражении (17) можно пренебречь. Следовательно,

$$\sigma_D = [3c^2/q_0^2 + (c^2/q_1^2)(1 + 1/2q_1^2)]^{1/2}. \quad (18)$$

Используя уравнения (8) и допущения $\beta \approx 1$, $I_\tau \approx 0$, $\Theta_0 \approx \Theta_1$, $\alpha_0^2 \approx \alpha_1^2$, выражение (18) приведем к виду

$$\sigma_D \approx (c/q_0^2)[3 + (2\tau q_0^2 + 1)/(2\tau^2 q_0^2)]^{1/2}. \quad (18')$$

Если вернуться к рассмотренному выше случаю $D = 1,9$, $q_0 = 50$, $N_{D\text{макс}} = 255$, то из соотношения (18') получим $\sigma_D \approx 6,22 \cdot 10^{-2}$, т. е. среднеквадратичная ошибка измерения оптической плотности составляет ≈ 8 квантов.

Среднеквадратичное значение погрешности измерения $\bar{\varepsilon}$ АЦП, работающего в условиях помех, можно оценить, воспользовавшись выражением [4]

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\sigma_{u_D}^2 + \eta^2/12},$$

где η — шаг квантования по уровню.

Снизить случайную составляющую погрешности измерения оптической плотности, вызванную шумами, можно статистической обработкой результатов многократных отсчетов D_i в каждой точке изображения. Усреднение результатов измерения D_i непосредственно в ЭВМ значительно снижает производительность измерительного комплекса, так как обмен одним словом в системе «Скан-2» — ЭВМ ЕС-1010 в лучшем случае занимает ~ 30 мкс, тогда как однократный цикл «калибровка — измерение» равен 10 мкс. Поэтому в АЦП фотометрического устройства предусмотрена возможность цифрового интегрирования. Из ЭВМ поступает 8-разрядный код n -числа отсчетов в точке, который хранится в регистре, управляющем последовательностью операций. После завершения цикла

измерений $\sum_{i=1}^n D_i$, представленная 16-рядным двоичным кодом, передается в ЭВМ, где выполняется лишь операция деления на n .

Обращаясь к вопросу о погрешности логарифмического преобразователя, рассмотрим ее источники. Выходное напряжение операционного усилителя с включенным в цепь обратной связи диодом [5]

$$U = -kT(\ln i_b - \ln i_{од})/e, \quad (19)$$

где k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, e — заряд электрона, i_b — входной ток, $i_{од}$ — обратный ток насыщения диода.

Как видно из выражения (19), имеются два температурозависимых члена.

Влияние членов, содержащих ток насыщения $i_{од}$, в данном устройстве устраняется, так как эти члены на выходе суммирующего усилителя A_4 (рис. 2) взаимно компенсируются (используются триоды в диодном включении, выполненные на одном кристалле). Для компенсации температурной чувствительности u_0 и u_1 , связанной с масштабным коэффициентом kT/e , применена стабилизация температуры подложки матрицы. В качестве термодатчика использован триод этой же матрицы.

Для аттестации фотометрического устройства были проведены измерения линейности шкалы и временной стабильности отсчетов оптической плотности. Линейность проверялась методом сканирования ступенчатого фотометрического клина спектрографа ФСР-41. Измерения проводились следующим образом. С помощью механической системы перемещения каждая ступень клина устанавливалась в поле зрения сканирующего устройства. В центре экрана ЭЛТ формировался световой растр 16×16 элементов. В каждой точке растра проводилось автоматическое измерение оптической плотности, а результаты поступали в ЭВМ, где они обрабатывались. Вычислялись среднее значение оптической плотности измеряемой ступени клина и дисперсия. Временная стабильность канала фотометрирования проверялась в течение 8 ч непрерывной работы методом сканирования пластинки НС-9 из набора цветных оптических стекол. Результаты калибровки показали, что нелинейность канала фотометрирования не превышает 1,5% в диапазоне измерения оптических плотностей от 0 до $1,9D$, дисперсия отсчетов σ_{2Dmax} не превышает 25 квантов, нестабильность составляет не более 2 квантов. Цикл «калибровка — измерение» занимает 10 мкс.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гришин М. П., Курбанов Ш. М., Маркелов В. П. Автоматический ввод и обработка фотографических изображений на ЭВМ. — М.: Энергия, 1976.
2. Мамонтов Г. М., Поташников А. К., Ситников Г. Ф., Ткач С. Е. Устройство для измерения оптической плотности. (Автор. свид-во № 596835). — БИ, 1978, № 9.
3. Гартманн Н. В., Бернгард Ф. Фотоэлектронные умножители. — М.: Госэнергоиздат, 1961.
4. Ефимов В. М. Квантование по времени при измерении и контроле. — М.: Энергия, 1969.
5. Справочник по нелинейным схемам/Под ред. Д. Шейнгольда. — М.: Мир, 1977.

Поступила в редакцию 5 июня 1980 г.

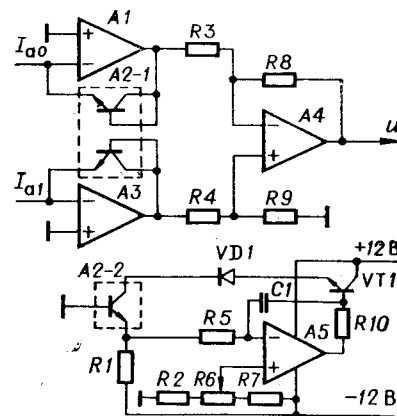


Рис. 2.