

В. Я. ОБОДАН, Ю. М. ПУТИЛОВ  
(Днепропетровск)

## ОПТИМАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ВИДЕОСИГНАЛА ДИССЕКТОРА С УЧЕТОМ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ЕГО ШУМА

Для повышения точности телевизионных измерительных систем, использующих диссектор, представляет интерес отыскание алгоритма оптимального определения временного положения его видеосигнала на фоне фотозлектрических шумов трубки. Отличительными особенностями шумов диссектора являются их слабая коррелированность (шум белый) и нестационарность, заключающаяся в линейной зависимости спектральной плотности шума  $N(t)$  от тока  $i(t)$  сигнала на выходе трубки [1].

Наблюдаемый в интервале  $(0, T)$  ток трубки  $i_r(t)$  равен сумме токов сигнала  $i_c(t)$  и шума  $i_m(t)$ . Ток сигнала представляет собой сумму токов фона  $i_\phi$  и полезного сигнала  $s(t)$  конечной длительности  $\tau_n \ll T$ :

$$i_c(t) = i_\phi \pm \Delta i s(t - \tau) = i_\phi [1 + ms(t - \tau)], \quad (1)$$

где  $\Delta i$  — амплитуда полезного сигнала,  $\tau$  — его временное положение, а коэффициент  $m = \pm \Delta i / i_\phi$  в случае положительного и отрицательного контрастов соответственно. Спектральную плотность шума, если она равна  $0,5N_\phi$  на уровне фона, можно представить в виде

$$N(t) = 0,5N_\phi [1 + ms(t - \tau)]. \quad (2)$$

Под принятой реализацией в дальнейшем понимается разность  $y(t) = i_r(t) - i_\phi$ .

Для решения поставленной задачи вычислим отношение правдоподобия искомого временного положения видеосигнала  $\tau$ , полагая его априорное распределение равномерным. Поскольку с учетом (2) шум диссектора может быть формально приведен к стационарному

$$i_m(t) = \sqrt{1 + ms(t - \tau)} n(t), \quad (3)$$

где  $n(t)$  — нормальный стационарный белый шум со спектральной плотностью  $0,5N_\phi$ , то, выражая  $n(t)$  через принятую реализацию  $y(t)$  и применяя к нему рассуждения, аналогичные используемым в [2], получим после соответствующих вычислений искомое отношение правдоподобия:

$$l(\tau | y) = \exp \left\{ -\frac{1}{N_\phi} \int_0^T \frac{[y(t) - m i_\phi s(t - \tau)]^2 dt}{1 + ms(t - \tau)} \right\} \exp \left\{ -\frac{1}{N_\phi} \int_0^T y^2(t) dt \right\}. \quad (4)$$

Преобразуя выражение (4) с учетом того, что  $s(t) = 0$  вне промежутка  $(0, \tau_n)$ , и исключая из рассмотрения члены, не зависящие от  $\tau$ , найдем, что положение максимума  $l(\tau | y)$  совпадает с положением максимума интеграла:

$$q(\tau) = \int_0^{\tau_n} \frac{ms(t)}{1 + ms(t)} \left[ y(t + \tau) + \frac{1}{2i_\phi} y^2(t + \tau) \right] dt. \quad (5)$$

Таким образом, алгоритм оптимального определения временного положения импульсного сигнала заключается в вычислении для всех  $0 \leq \tau \leq T$  интеграла (5) и в определении значения  $\tau$ , при котором достигается его максимум. Это значение  $\tau$  является оптимальной (в смысле максимума апостериорной вероятности) оценкой искомого параметра. Следует заметить, что структура корреляционного интеграла (5) аналогична структуре корреляционного интеграла, полученного в [3] для задачи оптимального обнаружения.

Для оценки потенциальной точности определения временного положения видеосигнала найдем значение дисперсии оптимального алгоритма. Из (4) видно, что положение максимума  $l(\tau|y)$  совпадает с положением максимума интеграла

$$Q(\tau) = -\frac{1}{N_{\Phi_0}} \int_0^T \frac{[y(t) - m i_{\Phi} s(t - \tau)]^2 dt}{1 + m s(t - \tau)}. \quad (6)$$

Представляя  $y(t)$  в виде суммы полезного сигнала с неизвестным временным положением  $\tau_0$  и шума, преобразуем (6) с точностью до членов, не зависящих от  $\tau$ , к виду

$$Q(\tau) = Q_s(\tau) + Q_n(\tau),$$

где

$$Q_s(\tau) = -\frac{\Delta i^2}{N_{\Phi_0}} \int_0^T \frac{[s(t - \tau_0) - s(t - \tau)]^2}{1 + m s(t - \tau)} dt, \quad (7)$$

$$Q_n(\tau) = -\frac{2\Delta i}{N_{\Phi_0}} \int_0^T \frac{\sqrt{1 + m s(t - \tau_0)}}{1 + m s(t - \tau)} [s(t - \tau_0) - s(t - \tau)] n(t) dt \quad (8)$$

— соответственно сигнальная и шумовая составляющие выходного сигнала. Для вычисления ошибки  $\Delta\tau = \tau - \tau_0$  определения  $\tau_0$  воспользуемся выражением [2]

$$\Delta\tau = -\left( \frac{dQ_n(\tau)}{d\tau} \left| \frac{d^2 Q_s(\tau)}{ds^2} \right| \right) \Big|_{\tau=\tau_0}, \quad (9)$$

справедливым при достаточно большом отношении сигнал/шум. Подставляя (7) и (8) в (9), с учетом конечной длительности полезного сигнала получим

$$\Delta\tau = -\frac{m i_{\Phi}}{\Delta i^2} \left\{ \int_0^{\tau_n} \frac{[s'(t)]^2 dt}{1 + m s(t)} \right\}^{-1} \int_0^{\tau_n} \frac{s'(t) n(t)}{\sqrt{1 + m s(t)}} dt.$$

Дисперсия этой ошибки равна

$$\sigma_{\text{опт}}^2 = \langle \Delta\tau^2 \rangle = \frac{N_{\Phi_0}}{2\Delta i^2} \left\{ \int_0^{\tau_n} \frac{[s'(t)]^2 dt}{1 + m s(t)} \right\}^{-1}. \quad (10)$$

Для сравнения вычислим аналогичным образом дисперсию ошибки определения временного положения видеосигнала с нестационарным шумом вида (2) посредством линейного согласованного фильтра (корреляционного приемника), оптимального для стационарного шума. В итоге

$$\sigma_0^2 = \frac{N_{\Phi_0}}{2\Delta i^2} \left\{ \int_0^{\tau_n} [s'(t)]^2 dt \right\}^{-2} \int_0^{\tau_n} [s'(t)]^2 [1 + m s(t)] dt. \quad (11)$$

Для оценки выигрыша в точности, достигаемого при использовании оптимального алгоритма (5), рассмотрим относительное уменьшение дисперсии ошибки

$$R = (\sigma_0^2 - \sigma_{\text{опт}}^2) / \sigma_0^2 = 1 - \sigma_{\text{опт}}^2 / \sigma_0^2 \quad (12)$$

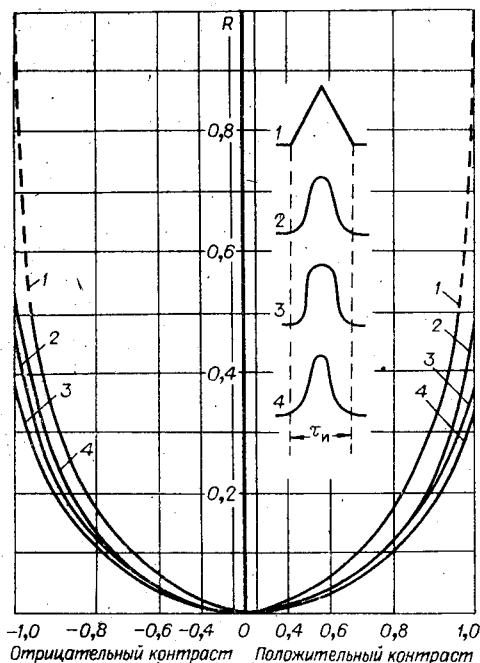
и выразим коэффициент  $m$  через контраст изображения:  $m = k/(1 - k)$

		1	2	3	4
$R_{\text{пр}}$	$k=1$	1	0,465	0,372	0,325
	$k_1=-1$	1	0,465	0,372	0,543

при положительном контрасте и  $m = -k_1$  — при отрицательном, где  $k$  и  $k_1$  — соответствующие коэффициенты электрического контраста [1]. В таблице для случая идеально контрастного изображения приведены

предельные значения  $R = R_{пр}$  четырех наиболее употребительных типов видеопульсов, описываемых функциями: 1 — линейной, 2 — квадратичной, 3 — интегралом вероятностей, 4 — Гаусса (рисунок). Кроме того, на рисунке даны графики зависимостей  $R$  от коэффициента электрического контраста, из которых видно, что заметного выигрыша в точности при оптимальной обработке можно достигнуть только для высококонтрастного изображения.

Заметим, что значение  $R_{пр} = 1$  ( $\sigma_{онт} = 0$ ) для сигнала с линейными фронтами получено вследствие чрезмерной идеализации. Действительно, в случае  $k = 1$  фоновая составляющая тока равна нулю, и вне промежутка, занимаемого сигналом, шумы также отсутствуют. Так как для линейного фронта его производная на концах импульса изменяется скачком, временное положение сигнала теоретически можно было бы определить абсолютно точно, например, по моменту первого отклонения выходного тока от нуля. Поэтому соответствующие участки кривой 1 на рисунке показаны штрихами.



#### ЛИТЕРАТУРА

1. Михалков К. В. Основы телевизионной автоматики. — Л.: Энергия, 1967.
2. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. — М.: Сов. радио, 1966.
3. Ильин А. Г., Казанцев Г. Д., Пустынский И. Н. Об обнаружении сигналов известной формы на фоне нестационарного шума телевизионных датчиков. — Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения, 1972, вып. 3.

Поступила в редакцию 6 мая 1980 г.;  
окончательный вариант — 11 мая 1982 г.

УДК 519.21

А. Н. ЕФИМОВ, Е. В. КРИВОРУКОВ

(Москва — Харьков)

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЦЕНОК И «ПСЕВДООЦЕНОК» СРЕДНЕГО ПРИ МАЛОМ ЧИСЛЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Обработка результатов косвенных наблюдений в системах автоматизации эксперимента и переработки данных зачастую сводится к функциональным преобразованиям и статистическим операциям над ними (например, детектирование и фильтрация). При этом возможны два способа получения конечных результатов:

а) предварительное проведение статистических операций над результатами наблюдений с последующим функциональным преобразованием оценок;