Сплошные кривые показывают проигрыш в точности квазиоптимальной оценки при априори известных значениях α и φ $(h=2)$, штрихпунктирные кривые соответствуют случаю, когда неизвестно либо α, либо $\varphi(h=3)$, и штриховые кривые, когда неизвестно ни α, ни $\varphi(h=4)$. Кривые рис. 2 позволяют определить проигрыш в точности оценки за счет незнания интенсивности отдельных фрагментов и упрощения технической реализации алгоритма оценки при использовании вместо прямого метода (14) его квазиоптимального варианта (18).

Выигрыш в точности оценки при использовании квазиоптимального варианта прямого метода (18) по сравнению с косвенным (10) иллюстрируют кривые рис. 3. Здесь приведены зависимости отношения $h(\mu)=\tilde{V}_1/\tilde{V}_h$ рассеяний соответствующих оценок. Обозначения кривых рис. 3 и параметры, при которых они рассчитаны, такие же, как для рис. 2. Кривые рис. 3 показывают выигрыш в точности оценки за счет использования априорной информации о пространственной структуре сложного изображения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Федосеев В. И., Широков Ф. В.** Обнаружение и оценка положения источника сигнала, модулирующего пуассоновское случайное поле // Изв. вузов. Сер. Радиофизика.— 1975.— Т. 18, № 2.
2. **Галун С. А., Зюльков А. В., Трифонов А. П.** Оценка площади оптических изображений на фоне шумов // Автометрия.— 1983.— № 1.
3. **Заворуев Ю. В., Троицкий И. Н.** Об оптимальном числе коэффициентов обобщенного ряда Фурье при распознавании маломощных оптических изображений // Автометрия.— 1977.— № 4.
4. **Трифонов А. П., Зюльков А. В.** Характеристики обнаружения и оценки положения источника сигнала, модулирующего пуассоновское случайное поле // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника.— 1981.— Т. 24, № 12.
5. **Розенфельд Л., Дейвис Л. С.** Сегментация и модели изображений // ТИИЭР.— 1979.— Т. 67, № 5.
6. **Куликов Е. И., Трифонов А. П.** Оценка параметров сигналов на фоне помех.— М.: Сов. радио, 1978.

Поступила в редакцию 19 октября 1984 г.

УДК 621.391

Е. П. НЕЧАЕВ, А. П. ТРИФОНОВ

(Воронеж)

ОЦЕНКА ПЛОЩАДИ ПРОПАДАЮЩЕГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ФОНЕ ШУМОВ

При обработке изображения, зарегистрированного в картинной плоскости оптической системы, часто бывает необходимо измерить его площадь. В [1] рассмотрена оценка максимального правдоподобия площади и предложен простой вариант практической реализации оптимального измерителя, когда априори известно о наличии изображения на фоне шумов. Однако из-за ошибок наведения, случайности объектов наблюдения, отклонений луча, вызванных флуктуациями атмосферы, и ряда других причин полезный сигнал на входе устройства, формирующего изображение, может присутствовать с вероятностью, меньшей 1 [2, 3]. Представляет интерес найти потери в точности оценки площади за счет имеющейся в реальных условиях возможности пропадания полезного сигнала и определить пути повышения точности оценивания.

Оптическое черно-белое изображение будем описывать пуассоновским полем случайных точек [1, 3]. Пусть в области G наблюдается реализация $N(\xi)$, $\xi=(\xi_1, \xi_2)$, пуассоновского поля случайных точек с интенсивностью $\lambda(\xi)=\theta_0\lambda_s(\xi/\sqrt{\chi_0})+\lambda_N$,

где
$$\lambda_s(\xi)=\begin{cases}\lambda_0, & \xi\in\Omega;\\ 0, & \xi\overline{\in}\Omega.\end{cases} \qquad (1)$$

Здесь θ_0 — несущественный параметр, отражающий возможность пропадания полезного изображения, причем $\theta_0=0$ с вероятностью p_0 и $\theta_0=1$ с вероятностью $p_1=1-p_0$; $\lambda_s(\xi/\sqrt{\chi_0})$ — интенсивность полезного сигнала, которая зависит от параметра $\chi_0\in[\chi_{\min}, \chi_{\max}]$, характеризующего площадь изображения; λ_N — интенсивность фона; Ω — область, ограниченная контуром изображения, площадь которой равна E_s. Если в выбранной системе координат ξ_1, ξ_2 $E_s=1$, то параметр χ_0 численно равен площади изображения. В [1] предложен простой способ технической реализации приемника максимального правдоподобия, который формирует логарифм функционала отношения правдоподобия

$$M(\chi)=\ln(1+\lambda_0/\lambda_N)N_\chi-\chi\lambda_0E_s \qquad (2)$$

для $\chi\in[\chi_{\min}, \chi_{\max}]$. Здесь N_χ — число точек реализации поля $N(\xi)$ в области, имеющей форму полезного изображения (1) с площадью χE_s. В качестве оценки максимального правдоподобия χ_m неизвестной площади χ_0 принимается положение абсолютного максимума процесса (2).

С ростом среднего числа зарегистрированных точек фона $\mu=\lambda_NE_s\chi_{\max}$ и полезного изображения $\mu_s=\lambda_0E_s$ логарифм функционала отношения правдоподобия (2) сходится к марковскому гауссовому случайному процессу [1, 4]. Полагая $\mu\gg1$, $\mu_s\gg1$ и решая аналогично [1, 5] соответствующие уравнения Фоккера — Планка — Колмогорова, найдем вместе с распределением оценки χ_m ее смещение (систематическую ошибку) и рассеяние (средний квадрат ошибки):

$$d_p(\chi_m\,|\,\chi_0)=p_0\chi_{\max}(\nu_1+\mu^{-1}\Gamma_3^{-2}/2)+p_1d(\chi_m\,|\,\chi_0); \qquad (3)$$

$$V_p(\chi_m\,|\,\chi_0)=p_0\chi^2_{\max}(\nu_1^2+\nu_1\mu^{-1}\Gamma_3^{-2}+\mu^{-2}\Gamma_3^{-4})+p_1V(\chi_m\,|\,\chi_0). \qquad (4)$$

Здесь $d(\chi_m|\chi_0)$, $V(\chi_m|\chi_0)$ — смещение и рассеяние оценки площади при наличии полезного изображения с вероятностью 1, найденные в [1], $q=\lambda_0/\lambda_N$, $\nu_1=\chi_{\min}/\chi_{\max}$, $\Gamma_3=q\ln^{-1}(1+q)-1$. Точность формул (3), (4) возрастает с увеличением μ и μ_s. При $p_1\to1\,(p_0\to0)$ (3), (4) совпадают с характеристиками оценки максимального правдоподобия площади [1]. Проигрыш в точности оценивания за счет пропадания изображения будем характеризовать отношением $\rho_1=V_p(\chi_m|\chi_0)/V(\chi_m|\chi_0)$. На рис. 1 приведены зависимости ρ_1 от величины q для $\mu=10^3$. Сплошные линии соответствуют $\nu_1=0{,}1$, а штриховые — $\nu_1=0{,}3$. Кривые *1* построены при $p_1=0{,}1$, кривые *2* — $p_1=0{,}5$, кривые *3* — $p_1=0{,}9$. Из рис. 1 видно, что возможность пропадания полезного изображения существенно ухудшает точность оценивания.

Для повышения точности одновременно с площадью χ_0 будем оценивать несущественный параметр θ_0. Логарифм функционала отношения правдоподобия неизвестных параметров θ и χ равен

$$M(\theta,\ \chi)=\ln(1+\theta\lambda_0/\lambda_N)N_\chi-\theta\chi\lambda_0E_s. \qquad (5)$$

Максимизируя (5) по θ, получаем, что устройство для измерения площади должно по-прежнему формировать процесс (2), а затем определять величину M_m и положение χ_m его абсолютного максимума. Оценка площади находится следующим образом:

$$\hat\chi=\begin{cases}\chi_m, & M_m>0;\\ 0, & M_m\leqslant0.\end{cases} \qquad (6)$$

Синтезированный измеритель площади пропадающего изображения может быть достаточно просто реализован с помощью устройства, пред-

2*

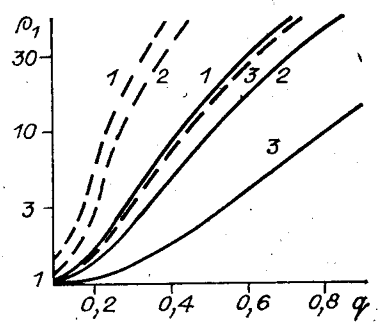

Рис. 1

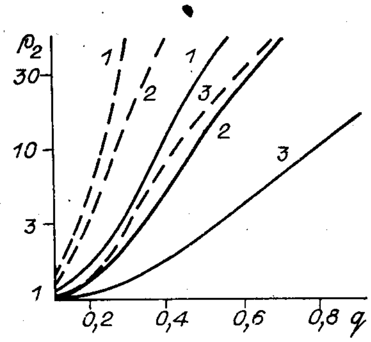

Рис. 2

ложенного в [1]. Для этого необходимо дополнить измеритель [1] устройством определения величины абсолютного максимума выходного сигнала и пороговым устройством, которое согласно (6) запирает выход измерителя, когда $M_m \leqslant 0$. Снова решая аналогично [1, 5, 6] соответствующие уравнения Фоккера — Планка — Колмогорова, найдем вместе с плотностью вероятности оценки (6) ее смещение и рассеяние:

$$d(\hat{\chi}|\chi_0) = p_0\chi_{\max}\left[(\nu_1 + \mu^{-1}\Gamma_3^{-2})\Phi(-\sqrt{\mu\nu_1}\,\Gamma_3) + \sqrt{\nu_1/2\pi\mu}\,\times\right.$$
$$\left.\times \exp(-\mu\nu_1\Gamma_3^2/2)/\Gamma_3\right] + p_1[\Phi(\sqrt{\mu(1+q)}\,\nu_0\Gamma_1\ln(1+q))d(\chi_m|\chi_0) - \chi_0\beta(\chi_0)];$$
$$V(\hat{\chi}|\chi_0) = p_0\chi_{\max}^2\left[(\nu_1\mu^{-1}\Gamma_3^{-2} + 2\mu^{-2}\Gamma_3^{-4} + \nu_1^2)\Phi(-\sqrt{\mu\nu_1}\,\Gamma_3) +\right.$$
$$\left.+ \sqrt{\nu_1/2\pi}\,(\nu_1\mu^{-1/2}\Gamma_3^{-1} + 2\mu^{-3/2}\Gamma_3^{-3})\exp(-\mu\nu_1\Gamma_3^2/2)\right] +$$
$$+ p_1\left[\Phi(\sqrt{\mu(1+q)\nu_0}\,\Gamma_1\ln(1+q))V(\chi_m|\chi_0) + \chi_0^2\beta(\chi_0)\right]. \qquad (7)$$

Здесь $\nu_0 = \chi_0/\chi_{\max}$, $\Gamma_1 = \ln^{-1}(1+q) - q(1+q)^{-1}\ln^{-2}(1+q)$; $\Phi(\cdot)$ — интеграл вероятности [4], а величина $\beta(\chi_0)$ равна [7]

$$\beta(\chi_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\nu_0(1+q)}}\int_0^\infty \exp\left\{-\frac{[\xi + (q-\Gamma_3)\nu_0\sqrt{\mu}]^2}{2\nu_0(1+q)}\right\}\times$$
$$\times\left[2\Phi\left(\xi\sqrt{\frac{\nu_1}{(1+q)\nu_0(\nu_0-\nu_1)}}\right) - 1\right]\left[\Phi\left(\Gamma_3\sqrt{\mu(1-\nu_0)} + \frac{\xi}{\sqrt{1-\nu_0}}\right) -\right.$$
$$\left.- \exp(-2\Gamma_3\sqrt{\mu}\,\xi)\,\Phi\left(\Gamma_3\sqrt{\mu(1-\nu_0)} - \frac{\xi}{\sqrt{1-\nu_0}}\right)\right]d\xi;$$

Выигрыш в точности оценки площади при использовании алгоритма (6) вместо алгоритма [1] можно охарактеризовать отношением $\rho_2 = V_p(\chi_m|\chi_0)/V(\hat{\chi}|\chi_0)$, где $V_p(\chi_m|\chi_0)$ определяется из (4), а $V(\hat{\chi}|\chi_0)$ — из (7). На рис. 2 приведены зависимости $\rho_2(q)$ для $\nu_0 = 0{,}5$; $\mu = 10^3$. Остальные обозначения на рис. 2 соответствуют рис. 1. Согласно рис. 2 предложенная модификация (6) измерителя [1] позволяет существенно повысить точность оценки площади при неуверенности в наличии полезного изображения. Например, при $\nu_1 = 0{,}3$; $q = 0{,}4$; $p_1 = 0{,}9$ использование алгоритма [1] приводит к оценке, рассеяние которой превышает рассеяние оценки (6) на порядок.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Галун С. А., Зюльков А. В., Трифонов А. П.** Оценка площади оптических изображений на фоне шумов // Автометрия.— 1983.— № 1.
2. **Шереметьев А. Г.** Статистическая теория лазерной связи.— М.: Связь, 1971.
3. **Гальярди Р. М., Карп Ш.** Оптическая связь: Пер. с англ./Под ред. А. Г. Шереметьева.— М.: Связь, 1978.
4. **Тихонов В. И.** Статистическая радиотехника.— М.: Радио и связь, 1982.
5. **Трифонов А. П.** Прием сигнала с неизвестной длительностью на фоне белого шума // Радиотехника и электроника.— 1977.— Т. 22, № 1.

6. **Трифонов А. П., Бутейко В. К.** Прием сигнала с неизвестной амплитудой и длительностью на фоне белого шума // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника.— 1984.— Т. 27, № 8.
7. **Галун С. А., Зюльков А. В.** Характеристики обнаружения оптического изображения с неизвестным масштабом // Прием пространственно-временных сигналов на фоне помех.— Воронеж: ВГУ, 1981.

Поступила в редакцию 14 мая 1985 г.

УДК 621.384.3.(088.8)

**В. И. БРИТИК, С. Л. ГОРЕЛИК, С. В. КОРОТКОВ,
А. И. КРИВОПУСТОВ, Л. С. ПОГОСТКИН, С. В. ФЕОФАНОВ**

(Ленинград)

ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕИНВАРИАНТНЫЕ ФИЛЬТРЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Электронно-оптические преобразования давно используются при обработке изображений с целью повышения их качества, представления в форме, удобной для восприятия оператора, выделения признаков для распознавания образов и т. п. [1, 2]. Преимущества электронно-оптического метода перед оптическими состоят в более гибком управлении параметрами преобразований и в удобной стыковке с электронными, в том числе цифровыми, методами обработки изображений. В то же время сохраняются достоинства, присущие оптическим и другим параллельным методам преобразований, в быстродействии и возможности осуществления операций над изображением на более ранней стадии, что уменьшает влияние различных шумов. Особенно эффективен электронно-оптический метод в реализации пространственно-неинвариантных пространственных фильтров, в том числе локально-адаптивных, анализу которых и посвящена настоящая работа.

Алгоритм формирования электронно-оптического фильтра. Будем исходить из утверждения, что в общем виде выходной сигнал пространственного фильтра в точке входного изображения $g_{вх}$ с координатами $x_k = k_x h_x$, $y_k = k_y h_y$, где h_x, h_y — шаг дискретизации развертки изображения по осям X и Y; k_x, k_y — номер элемента разложения по соответствующим осям, можно описать выражением

$$g_{вых}(k_x, k_y) = \mathscr{P}\{f_j(u_j)\},\ j = 1, 2, \ldots, n, \tag{1}$$

где $\mathscr{P}$ — оператор, являющийся функцией n переменных (задает тип фильтра); f_j — функция одной переменной; j — порядковый номер элементарных апертур, из которых синтезируется пространственный фильтр; $u_j = u_j(x_k, y_k)$ — отклик j-й элементарной апертуры (элементарного фильтра). В случае электронно-оптической фильтрации отклик u_j представляет свертку входного сигнала $g_{вх}(x, y)$ с распределением энергии $\rho_j(x, y)$ в j-й апертуре. Последнее определяется совместным действием функций рассеяния электронно-лучевой трубки $\varepsilon_j(x, y)$ и оптической системы $O(x, y)$ (рис. 1), с помощью которых формируется элементарная апертура, осуществляется управление ее параметрами и сканирование плоскости обрабатываемого изображения. Функция распределения энергии в j-й апертуре параметрически обусловливается яркостью ρ_0 пятна

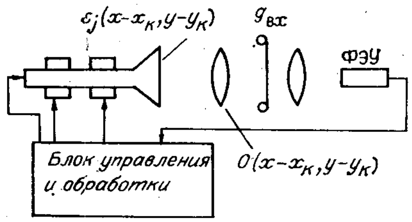

Рис. 1