

УДК 621.384.326: 629.7.052: 620.179.13

**ОБНАРУЖЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ТРАССЕ
МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА В ТЕПЛОМ
ДИАПАЗОНЕ ОПТИЧЕСКИХ ИЗЛУЧЕНИЙ.
ЧАСТЬ 2. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ¹**

Епифанцев Б.Н.

*Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, г. Омск
e-mail: epifancev_bn@sibadi.org*

Аннотация. Обнаружение мест выхода вытекающего из трубопровода продукта на подстилающую поверхность, замаскированных врезок и др. в тепловом диапазоне волн недостаточно эффективно из-за невысокого отношения «сигнал/помеха» на исходных изображениях. Рассмотрены подходы, позволяющие снять это ограничение с помощью алгоритма пространственной фильтрации сигналов на фоне помех.

Ключевые слова: магистральный трубопровод, утечки продукта, врезки, обнаружение, тепловая разведка, алгоритмы обработки изображений, надежность обнаружения.

В [1] сформулированы угрозы безопасности работе магистральных трубопроводов. Все они сопровождаются появлением изменений тепловой картины на подстилающей поверхности и могут быть обнаружены существующей тепловизионной аппаратурой. Однако уровень сопутствующих помех на тепловизионных изображениях оказался значительным, что не позволяет получить высокие результаты по надежности обнаружения с помощью известных систем автоматического обнаружения целей. Есть ли возможности обойти указанное ограничение по пути создания эффективных средств воздушной разведки локальных изменений на трассе пролегания трубопровода, представляющих угрозу для его функционирования? В данной работе дается ответ на этот вопрос.

1. Общие соотношения

Под «локальным изменением» будем понимать локальный выброс на поле излучения подстилающей поверхности $q(x, y)$ в окрестности произвольной точки (x_0, y_0)

$$q(x-x_0, y-y_0) = \begin{cases} \bar{q}_\phi + \Delta q \left[1 - \frac{(x-x_0)^2}{r_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{r_y^2} \right]^\phi & \text{при } (\mathbf{x}, \mathbf{y}) \in D(x-x_0, y-y_0), \\ \bar{q}_\phi & \text{при } (\mathbf{x}, \mathbf{y}) \notin D(x-x_0, y-y_0) \end{cases}$$

¹ Работа выполнена в рамках реализации программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы», контракт № П215 от 22.07.09 г.

если выполняется условие

$$\begin{aligned} S_{\max} &\geq L_S \left[\left[q(x-x_0, y-y_0) - \bar{q}_\phi \right] \geq q_{np} \right] \geq S_{\min} \quad \& \\ \varphi_{\min} &\leq L_\varphi \left[\left[q(x-x_0, y-y_0) - \bar{q}_\phi \right] \geq q_{np} \right] \leq \varphi_{\max}, \end{aligned} \quad (1)$$

где Δq – приращение амплитуды от локального выброса по сравнению со средним значением излучения фона \bar{q}_ϕ ; r_x, r_y – параметры, характеризующие размеры области D выброса (при $\varphi=0$ $q(x, y) \in D$ – параллелепипед, при $\varphi=1$ – эллипсоид); L_S, L_φ – операторы определения параметров изображения объекта: площади S и коэффициента формы φ соответственно; $q_{np}, S_{\min}, S_{\max}, \varphi_{\min}, \varphi_{\max}$ – пороги принятия решений. Амплитудный порог q_{np} находится из решения интегрального уравнения

$$P_{n0} = \int_{q_{np}}^{\infty} \omega(\Delta q / D) d\Delta q, \quad (2)$$

отражающего условие «вероятность правильного обнаружения объекта P_{n0} должна быть не ниже допустимой», $\omega = (\Delta q / D)$ – плотность распределения приращений амплитуд от искомым объектов.

Ограничение форм объектов простым набором конфигураций ($\varphi \in [0; 1]$) не снижает общности в постановке задачи: любая сложная форма объектов может быть представлена суперпозицией простых.

При задании $P_{n0}(q_{np})$ плотность ложных решений определяется через известные выражения

$$K_{ЛВ} = \frac{\eta_{ЛВ} \cdot q_{np}}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_q} \exp \left[-0,5 (q_{np} / \sigma_q)^2 \right], \quad (3)$$

$$\eta_{ЛВ} = \left[\frac{d^2 \chi(x, y)}{dx^2} \cdot \frac{d^2 \chi(x, y)}{dy^2} \right] - \left(\frac{d^2 \chi(x, y)}{dx dy} \right)^2 \cdot (2\pi\sigma_q)^{-1} \Big|_{x=y=0}, \quad (4)$$

где $\chi(x, y)$ – корреляционная функция флуктуаций поля излучения фоновых образований, $\sigma_q^2 = \chi(0, 0)$ – дисперсия флуктуаций.

Для уменьшения числа ложных решений каждый выброс за уровень q_{np} анализируется (в соответствии с условием (1)) по форме φ и размером S . Пороги $S_{\min}, S_{\max}, \varphi_{\min}, \varphi_{\max}$ есть минимальные и максимальные значения параметров выявляемых объектов. Результат сортировки выбросов по пространственным признакам представим в виде

$$K'_{ЛВ} = S_u \cdot K_{ЛВ} \int_{S_{\min}}^{S_{\max}} \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} \omega(S, \varphi / \Delta q) dS \cdot d\varphi, \quad (5)$$

где S_u – площадь анализируемого изображения, $\omega(S, \varphi / \Delta q)$ – условная плотность вероятностей распределения параметров выбросов.

Выражение для плотности $\omega(S, \varphi / \Delta q)$ можно получить следующим образом.

Известно, что для однородных случайных полей, корреляционные функции которых имеют четвертые производные, выбросы за уровень $\sqrt{3\chi(0,0)}$ представляют собой сегменты эллиптических параболоидов. Объемы V_B и площади сечений S_B этих параболоидов описывается распределениями вида

$$\omega(V_B) = \sqrt{\eta_{ЛВ} \left(\frac{q_{np}}{\sigma_q}\right)^3 \cdot \frac{1}{2\sigma_q \cdot V_B} \cdot \exp\left\{-\left[2\eta_{ЛВ} \left(\frac{q_{np}}{\sigma_q}\right)^3 \cdot \sigma_q^{-1}\right]^{0,5}\right\}}, \quad (6)$$

$$\omega(S_B) = \eta_{ЛВ} \left(\frac{q_{np}}{\sigma_q}\right)^2 \cdot \exp\left(-\eta_{ЛВ} \cdot \frac{q_{np}}{\sigma_q} \cdot S_B\right). \quad (7)$$

Если снять указанное выше ограничение на корреляционные функции, разнообразие форм выбросов возрастает. Это разнообразие можно учесть, используя выражение

$$q^*(x, y) = \left(1 - \frac{x^2}{2\Delta q r_x} - \frac{y^2}{2\Delta q r_y}\right)^\varphi \text{ при } \forall (x, y): \frac{x^2}{r_x} + \frac{y^2}{r_y} \leq 2\Delta q. \quad (8)$$

При $\varphi = 0$ выражение (8) описывает эллиптический цилиндр, при $\varphi = 1$ – эллиптический параболоид, при $\varphi = \infty$ – дельта-функцию и т.д. Объем тела, ограниченного сверху поверхностью (8), а снизу поверхностью $q^*(x, y) = 0$:

$$V = 2\pi \Delta q_B \sqrt{r_x \cdot r_y} / \varphi + 1. \quad (9)$$

Сделав несильное допущение $\omega(V) \approx \omega(V_B)$, учитывая выражения (6), (9), а также известное соотношение $\sqrt{r_x \cdot r_y} = \sigma_q^2 / \eta_{ЛВ} \cdot q_{np}$, после несложных преобразований получаем

$$\omega(\varphi) = \left[\sqrt{2(\varphi+1)} \cdot (\sqrt{\varphi+1} + \sqrt{2})\right]^{-1}. \quad (10)$$

В большинстве известных приложений модификации форм выбросов укладывается в интервал $\in 0; 2$. Выполнив необходимые преобразования по приведению плотности (10) к усеченной для указанного интервала, получим

$$\omega(\varphi_B) = \begin{cases} (1 + \sqrt{2}) \cdot (\sqrt{3} + \sqrt{2}) / 2 \cdot (\sqrt{3} - 1) \cdot \sqrt{\varphi+1} \cdot (\sqrt{\varphi+1} + \sqrt{2})^2 \\ \text{при } \varphi \in 0; 2 \\ 0 \text{ в противном случае} \end{cases}. \quad (11)$$

В отличие от $\omega(S_B)$ плотность $\omega(\varphi_B)$ не зависит от вида корреляционной функции случайного поля. Следовательно

$$\omega(S, \varphi / \Delta q) = \omega(S_B) \cdot \omega(\varphi_B). \quad (12)$$

Выражения (2)-(5), (7), (11), (12) есть решение поставленной задачи по определению ложных решений автомата $K'_{ЛВ}$ в общем виде.

2. Оценка эффективности селективирующих преобразований

Использование критерия (5) требует знание корреляционной функции исследуемого изображения $\chi(x, y)$. Получение экспериментальных оценок этой функции не имеет каких-либо особенностей. Для иллюстрационных целей остановимся на двух видах таких функций

$$\chi_1(x, y) = \sigma_1^2 \exp\left(-\sqrt{\rho_{1x}^{-1} \cdot x^2 + \rho_{1y}^{-1} \cdot y^2}\right); \quad (13)$$

$$\chi_2(x, y) = \sigma_2^2 \exp\left(-\rho_{2x}^{-1} \cdot x^2 - \rho_{2y}^{-1} \cdot y^2\right). \quad (14)$$

Поле, описываемое $\chi_1(x, y)$, не дифференцируемо, а $\chi(x, y)$ – дифференцируемо бесконечное число раз.

Дифференцируемость однородного случайного поля (m_x, m_y) раз означает, что существует интеграл вида

$$\frac{\partial^{m_x+m_y} \chi(x, y)}{\partial x^{m_x} \partial y^{m_y}} \Big|_{x=0, y=0} = \frac{(-1)^{m_x+m_y}}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \omega_x^{m_x} \omega_y^{m_y} G(\omega_x, \omega_y) d\omega_x d\omega_y < \infty, \quad (15)$$

где $G(\omega_x, \omega_y)$ – пространственный спектр мощности поля, связанный с корреляционной функцией соотношением Винера-Хинчина

$$G(\omega_x, \omega_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \chi(x, y) \exp[-j(\omega_x x + \omega_y y)] dx dy. \quad (16)$$

Спектральная плотность мощности регистрируемых изображений ограничена некоторой частотой среза. Это обусловлено тем, что процесс формирования видеоизображения неизбежно сопряжен с подавлением верхних частот с помощью фильтра (апертуры) с передаточной характеристикой $h(\omega_x, \omega_y)$:

$$G_a(\omega_x, \omega_y) = G(\omega_x, \omega_y) |h^*(\omega_x, \omega_y)|^2, \quad (17)$$

где $h^*(\omega_x, \omega_y)$ – комплексно-сопряженная величина передаточной функции апертуры. Распространенный вид пространственного фильтра – гауссоидальный:

$$h(\omega_x, \omega_y) = \exp[-0,5(r_{ax}^2 \omega_x^2 + r_{ay}^2 \omega_y^2)].$$

Выполним преобразование Винера-Хинчина (16) для функций (13), (14) и, применив к полученным спектрам операцию (17), получим

$$G_{a1}(\omega_x, \omega_y) = \sigma_q^2 \pi \rho_x \rho_y \frac{\exp\left(-r_{ax}^2 \omega_x^2 - r_{ay}^2 \omega_y^2\right)}{\left[1 + 0,5 \cdot \left(\rho_x^2 \omega_x^2 + \rho_y^2 \omega_y^2\right)\right]^{3/2}}; \quad (18)$$

$$G_{a2}(\omega_x, \omega_y) = \sigma_q^2 \pi \rho_x \rho_y \cdot \exp\left[-\left(0,25 \rho_x^2 + r_{ax}^2\right) - \left(0,25 \rho_y^2 + r_{ay}^2\right)\right]. \quad (19)$$

При выводе (18) и (19) принято $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_q$, а также $\rho_{1x} = \rho_x / \sqrt{2}$, $\rho_{1y} = \rho_y / \sqrt{2}$, $\rho_{2x} = \rho_x$, $\rho_{2y} = \rho_y$. Последнее условие следует из выравнивания областей S_ϕ пространственной корреляции рассматриваемых случайных полей (13) и (14).

Подставим (18), (19) в (15) вместо $G(\omega_x, \omega_y)$ и, принимая для упрощения расчетов $\rho_x = \rho_y = \rho_\phi$, $r_{ax} = r_{ay} = r_a$, получим

$$\eta_1 = \frac{1}{\pi \rho_\phi^2} \left[\frac{0,25 r_a^{-1} \rho_\phi \sqrt{2\pi} F(r_a \sqrt{2} / \rho_\phi)}{1 - r_a^{-1} \rho_\phi \sqrt{2\pi} F(r_a \sqrt{2} / \rho_\phi)} - 1 \right]$$

$$\eta_2 = \pi \rho_\phi^2 \left[1 + (4r_a^2 / \rho_\phi^2) \right].$$

При вычислениях производных корреляционных функций использовалось известное соотношение из [4]:

$$\int_0^\infty \exp(-c_k z_k) z_k^{v-1} (1+z_k)^{\mu_k} dz_k = \Gamma(v) U(v, \mu_k + v + 1, z_k)$$

где $\Gamma(v)$ – гамма-функция, $U(\dots)$ – вырожденная гипергеометрическая функция Куммера, выражаемая через интеграл вероятностей, который, в свою очередь, с погрешностью $2,5 \cdot 10^{-5}$ можно представить в виде:

$$\operatorname{erf}(z_f) \approx 1 - F(z_f) \cdot \exp(-z_f^2);$$

$$F(z_f) = 0,348 \cdot (1 + 0,477 z_f)^{-1} - 0,09588 \cdot (1 + 0,47 z_f)^{-2} + 0,74785 \cdot (1 + 0,47 z_f)^{-3}.$$

Подставляя найденные выражения в (5) и выполнив интегрирование, получаем

$$K'_{ЛВ}(i) = \frac{N_D \cdot \mu \cdot v_i(\mu) \cdot q_{np}^*}{\sqrt{2\pi}} \exp[-q_{np}^* (0,5 + \gamma \mu v_i(\mu))] \times$$

$$\times \frac{(\sqrt{1 + \varphi_{\max}} - 1) \cdot (\sqrt{3} + \sqrt{2})}{(\sqrt{1 + \varphi_{\max}} + \sqrt{2}) \cdot (\sqrt{3} - 1)}, \quad i = 1, 2; \quad (20)$$

$$N_D = S_U / S_{\min}, \quad \mu = S_{\min} / S_\phi, \quad q_{np}^* = q_{np} / \sigma_q;$$

$$v_1(\mu) = \frac{4\sqrt{2\pi} \cdot F(0,1\sqrt{2\mu}) / \sqrt{\mu}}{1 - \sqrt{2\pi\mu} \cdot F(0,1\sqrt{2\mu})} - 1, \quad v_2(\mu) = [1 + (\mu/64)]^{-1},$$

где γ – идентификатор способа обработки: при $\gamma=0$ информация о геометрических параметрах изображения не используется, при $\gamma=1$ реализуется схема размерного селектора выбросов.

По изложенной методике определяется плотность ложных решений $K'_{ЛВ}$ для других типов функций корреляции помех.

Для проведения конкретных вычислений примем плотность вероятностей в (2) гауссовой с математическим ожиданием Δq_D и дисперсией σ_D^2 и приведем выражение (2) в виде:

$$P_{ПО} = \frac{1}{2\pi c} \int_c^\infty \exp(-z^2/2) dz, \quad (21)$$

где $c = (q_{np}^* - ОСП) \sigma_q / \sigma_D$; $ОСП$ – отношение сигнал/помеха. Результаты вычислений приведены на рис. 1 - 3.

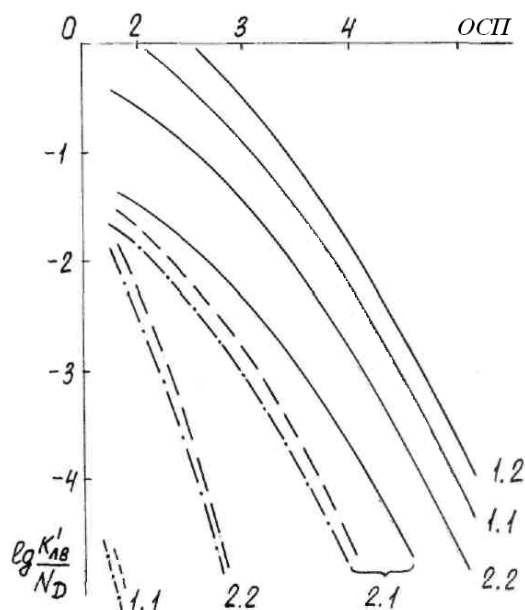


Рис. 1. Зависимости приведенной плотности ложных решений от $ОСП$ для различных схем обработки информации: амплитудной селекции (сплошные линии), размерной селекции (штриховые линии) и селекции по форме выбросов (штрих-пунктирные линии) – при выявлении объектов на фоне помех с экспоненциальной 1.п и гауссовой 2.п корреляционными функциями при различных значениях μ : $\mu=0,125$ ($n=1$); $\mu=1$ ($n=2$)

Анализируя выражения (20) и (21) можно сделать вывод, что основными параметрами, определяющими выбор способа обработки информации в проектируемой системе обнаружения (распознавания) образов, являются $ОСП$, обобщенный параметр $\mu \cdot \nu(\mu)$, характеризующий взвешенное отношение площади изображения минимального объекта к площади области корреляции флуктуаций фона, и верхняя граница интервала значений коэффициента формы изображения объекта. При заданном числе ложных решений и вероятности правильного обнаружения, используя (20) и (21) несложно оценить требуемое значение $ОСП$ для различных способов обработки информации.

На рис. 1 показаны зависимости логарифма отношения числа ложных решений к числу минимальных объектов, изображения которых покрыли бы всю поверхность фрагмента изображения, от $ОСП$ для различных способов обработки изображений фона с разными корреляционными функциями. Сопоставление кривых 1.2 и 2.2 показывает, что операция порогового ограничения сигналов на уровне q_{np} более эффективна для полей с гауссовой корреляционной функцией. Изменением характера пространственных помех можно на порядок изменять плотность ложных решений при заданной вероятности $P_{по}$.

Кривые 1.1 и 1.2 отражают известный на практике факт: чем ближе размер «пятнистости» поля помех соответствует размеру объекта, тем сложнее его обнаружить. Учитывая заметное расхождение функций 1.1 и 1.2, следует при подборе

корреляционной функции помех стремиться максимально увеличить (или уменьшить) отношение радиуса корреляции фона к радиусу объекта.

Эффект введения операции сортировки выбросов по площади сечений на уровне q_{np} значителен (штриховые кривые) особенно для фонов с экспоненциальной корреляционной функцией.

Если форма выбросов от объектов характеризуется большим разнообразием, например, $\varphi \in [0,1]$, то использование этого признака для минимизации ложных решений не оправдано (см. штрих-пунктирные кривые в сравнении со штриховыми на рис. 1). При однотипных по форме объектах с малым разбросом φ привлечение этого параметра для классификации может характеризоваться десятикратным сокращением ложных решений (рис. 2).

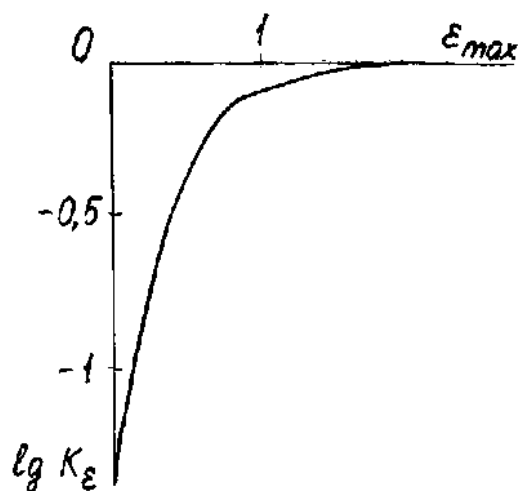


Рис. 2. Зависимость логарифма коэффициента помехоподавления ложных выбросов фона от коэффициента формы изображения объекта ($\varphi \in [0, \varphi_{\max}]$)

На рис. 3 приведены характеристические кривые, связывающие плотность ложных решений с вероятностью правильного обнаружения при различных ОСП (ОСП = 5, кривые m.1 и ОСП = 4, кривые m.2) для различных способов обработки изображений: амплитудной и размерной селекции. Зная K'_{LB}/N_D и $P_{ПО}$, по кривым можно оценить требуемое (при выбранном способе обработки данных) ОСП и характеристики помех. Например, при $K'_{LB}/N_D = 10^{-5}$ и $P_{ПО} = 0,999$ решающей схемой, обеспечивающей \min ОСП ($OСП_{\min} = 5$), является размерный селектор (кривая 1.1), при $K'_{LB}/N_D = 10^{-2}$ и $P_{ПО} = 0,99$ способ обработки выбирается, исходя из затрат, необходимых для реализации решающего правила.

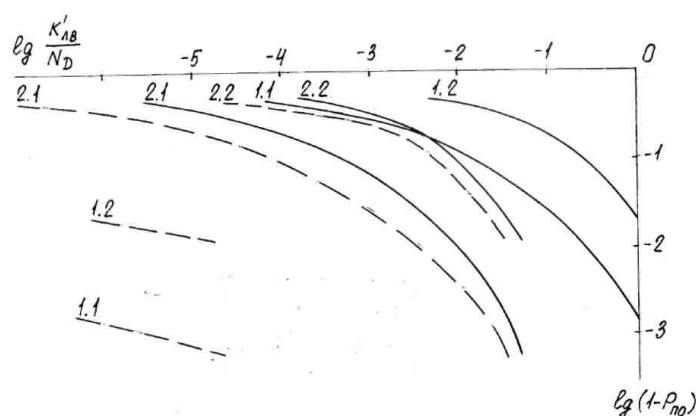


Рис. 3. Зависимость логарифма плотности ложных решений от логарифма вероятности пропуска объекта при его обнаружении на фоне помех с экспоненциальной $((m = 1) \cdot n)$ и гауссовой $((m = 2) \cdot n)$ корреляционными функциями методами амплитудной (сплошные линии) и размерной (штриховые линии) селекции при $\mu = 0,125$, ОСП = 5 ($n = 1$) и ОСП = 4 ($n = 2$)

Эффективность рассмотренных преобразований исследуемого поля излучений можно проиллюстрировать конкретным примером. Для получения плотности ложных $K'_{ЛВ} = 0,05 \text{ м}^{-2}$ без проведения селектирующих преобразований $(ОСП)_{\min}$ должно быть не менее пяти (при $\rho_k / \rho_{ц} = 0,25$, ρ_k – радиус корреляции фона, $\rho_{ц}$ – радиус обнаруживаемого объекта). То же число ложных выбросов при введении размерного селектора обеспечивается при $ОСП = 1,4$. Можно интерпретировать этот результат как увеличение $ОСП$ в 3,8 раза.

Таким образом, применение пространственной селекции тепловых изображений объектов на фоне типичных помех позволяет снять вопросы с неэффективности обнаружения мест несанкционированных подключений к трубопроводам и выхода вытекающего продукта на границу раздела «земля-атмосфера».

Что касается автоматизации процесса обнаружения, в концептуальном плане этот вопрос понятен и сводится к применению оптимальных пространственных фильтров. Однако, учитывая разнообразие полезных (искомых) сигналов по размерам (и частично формам), техническая реализация алгоритма пространственной фильтрации с учетом условия «в реальном масштабе времени» трансформируется в проблему, решение которой предстоит найти, опираясь на специфику сигналов. В следующем параграфе предлагается вариант возможного решения такой проблемы.

3. О технической реализации алгоритмов пространственной селекции изображений объектов простых форм

Типичная схема получения информации о подстилающей поверхности с использованием инфракрасных систем переднего обзора (так называемых FLIR), установленных на летательном аппарате, сводится к развертке изображения подстилающей поверхности перпендикулярно направлению полета растр-элементом размером $\rho_a \ll \rho_c$.

Существует большое число летательных аппаратов, разработанных для решения задач рассматриваемого класса. С точки зрения безопасности и экономичности предпочтение на практике отдается дистанционно пилотируемым аппаратам. На российском рынке представлены аппараты «Шмель», «Шмель-М», «Галка-1», «Галка-2» и др. О возможностях дистанционно пилотируемых летательных аппаратов можно судить по данным, представленным в таблице 1.

Таблица 1. Технические параметры ДПЛА «Галка-1»

Параметры	Значения
Взлетная масса	До 160 кг
Диапазон высот полет	100-1000 м
Диапазон скоростей полета	90-180 км/ч
Продолжительность полета	4,5 ч
Мощность двигателя	40 л.с. (29,4 кВт)
Старт	С разгонного устройства пневмокатапультой, по самолетному
Посадка	С помощью парашютно-амортизационной системы
Диапазон температур	$T \in -50; +50$ °С
Возможность установки целевых нагрузок	До 25 кг: <ul style="list-style-type: none"> • ТВ-камеры на гиросtabilизированной платформе; • строчной ИК-аппаратуры; • кадровой ИК-аппаратуры; • датчиков радиационной и химической разведки

О их внешнем виде дает представление рис. 4 [5].



Рис. 4. Беспилотные летательные аппараты
(реальные образцы и их 3D - модели):
а, б – ЯК-54; в, г – Ripmax; д, е – ENTR40

Выходной сигнал фотоприемника центрируется одномерным линейно-разностным фильтром (*ЛРФ*), связанным с пороговым устройством. Для исключения искажений при формировании бинарного поля решений поддерживается режим плотного прилегания развертывающих строк. Бинарное изображение подвергается пространственной обработке с помощью набора двумерных фильтров, учитывающих возможный диапазон размеров объектов, их форму и ориентацию. Его можно вывести на индикатор для представления оператору. В другом варианте предусматривается использование двумерного фильтра в плоскости изображения.

Представим весовую функцию сканирующего пятна в виде

$$h_{ск} = h_{ска} \cdot \exp \left[-\frac{(x-x_a)^2 + (y-y_a)^2}{\rho_a^2} \right], \quad (22)$$

где x_a , y_a – координаты центра апертуры.

При дальнейшем анализе ограничимся моделью сигнала, описываемого двумерной гауссоидой

$$q_u(x, y) = q_{um} \exp \left[\frac{-(x-x_m)^2 + (y-y_m)^2}{\rho_u^2} \right]. \quad (23)$$

Свертки (22) и (23) с использованием табличного интеграла выражаются в явном виде

$$U_u(x_a, x_m, y_a, y_m) = \frac{\pi}{\Gamma_a^2} \cdot q_{um} \cdot h_{cka} \exp \left[-\frac{(x_m-x_a)^2 + (y_m-y_a)^2}{\rho_a^2 + \rho_u^2} \right]; \quad (24)$$

$$\Gamma_a = \sqrt{(\rho_a^2 + \rho_u^2) / \rho_a^2 \rho_u^2}.$$

При построчной развертке изображения

$$y_a(t) = L_k \cdot t / \tau_k; \quad x_a(t) = (L_c \cdot t / \tau_c) - L_c \sum_{v=1}^{n_c-1} \sigma(t - v \cdot \tau_c), \quad (25)$$

где L_k – размер кадра; τ_k – время его преобразования; L_c – длина строки; τ_c – время ее преобразования; $\sigma(t - v \cdot \tau_c)$ – единичная функция; v – номер строки; n_c – количество строк.

Подставляя (25) в (24), получим описание сигнала на выходе приемника

$$U_u(t) = K_{\phi n} \frac{\pi q_{um} h_{cka}}{\Gamma_a^2} \exp \left\{ -\frac{\left[x_m - v_c t + L_c \sum_{v=1}^{n_c-1} \sigma(t - v \tau_c) \right]^2 + (y_m - v_k t)^2}{\rho_a^2 + \rho_u^2} \right\}, \quad (26)$$

где v_c и v_k – соответственно строчная и кадровая скорости перемещения апертуры; $K_{\phi n}$ – коэффициент преобразования фотоприемника.

Временной сигнал представляет собой последовательность импульсов вида (26), амплитуды которых модулированы функцией

$$\exp \left[-\frac{(y_m - v_k t)^2}{\rho_a^2 + \rho_u^2} \right],$$

а длительность изменяется по закону

$$\tau_u = 2 \sqrt{\rho_a^2 + \rho_u^2} / v_c; \quad -\sqrt{\rho_a^2 + \rho_u^2} < y_a < \sqrt{\rho_a^2 + \rho_u^2}$$

для объектов с круговой симметрией.

Спектральная плотность флуктуаций на выходе апертурного фильтра, отражающая стационарную составляющую строки случайного поля:

$$G_A(\omega) = \frac{2\pi^2 \sqrt{\pi} \rho_k^2 \rho_a^2 h_{cka} \sigma_{q\phi}^2}{v_c \sqrt{\rho_k^2 + \rho_a^2}} \cdot \exp \left(-\frac{\omega^2}{v_c^2} \frac{\rho_k^2 + \rho_a^2}{4} \right). \quad (27)$$

С учетом (24) и (27) выходное отношение «сигнал/помеха»

$$(C_A / \sigma_A) = (OCP)_{BX} \cdot \sqrt{M_{\Theta}}; \quad M_{\Theta} = \frac{4\pi \rho_a^2 \rho_u^4}{(\rho_a^2 + \rho_u^2)^2}.$$

Ход зависимости $M_{\varnothing} = f(\rho_a/\rho_u)$ нацеливает на использование апертур с $\rho_a = \rho_u$. Однако этот вариант предполагает создание многоапертурных систем развертки, его реализация ограничена техническими возможностями.

Дальнейшая обработка сигнала производится одномерным ЛРФ с импульсной характеристикой

$$\varphi(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } |t| < \tau_{\text{ЛРФ}}/4; \\ -1, & \text{если } (\tau_{\text{ЛРФ}}/4) \leq |t| < \tau_{\text{ЛРФ}}/2; \\ 0, & \text{если } |t| \geq \tau_{\text{ЛРФ}}/2, \end{cases}$$

где $\tau_{\text{ЛРФ}}$ – постоянная времени фильтра. Его амплитудно-частотная характеристика

$$H_{\text{ЛРФ}}(\omega) = \frac{4 \sin(\omega \tau_{\text{ЛРФ}}/4)}{\omega} - \frac{2 \sin(\omega \tau_{\text{ЛРФ}}/2)}{\omega} \quad (28)$$

в сравнении со спектрами встречающихся импульсов длительностью $\tau_u = \tau_{\text{ЛРФ}}/2$ приведена на рис. 5. Как и следовало ожидать, ЛРФ в наибольшей степени согласован со спектральной плотностью прямоугольного импульса. При $\rho_a \ll \rho_u$ форма полезных сигналов близка к прямоугольной. В случае косинусоидальных импульсов спектральную характеристику ЛРФ можно скорректировать.

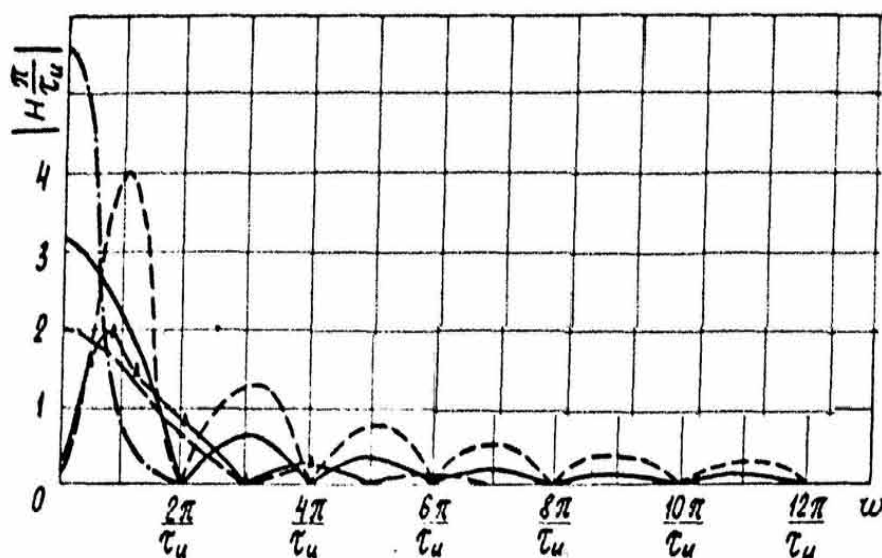


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики ЛРФ и спектральные плотности колокольного (1), прямоугольного (2) и косинусоидального (3) импульсов

Пусть на вход ЛРФ подается прямоугольный сигнал $f_{\text{п}}(t)$ на фоне шума $\zeta(t)$ и линейного тренда $l_{\text{Тр}}(t)$:

$$f_{\text{п}}(t) = \begin{cases} U_{\text{пр}}, & \text{если } |t| < \tau_u/2; \\ 0, & \text{если } |t| \geq \tau_u/2; \end{cases}$$

$$l_{\text{Тр}}(t) = \alpha_{\text{Тр}} t + \beta_{\text{Тр}} p.$$

При $\tau_u = \tau_{ЛРФ}/2$ реакция фильтра на $f_{П}(t) : U_{нр} \tau_{ЛРФ}/2$, а дисперсия выходного шума

$$D_{\xi} = \int_{-\tau_{ЛРФ}/2}^{\tau_{ЛРФ}/2} \varphi(t) dt \int_{-\tau_{ЛРФ}/2}^{\tau_{ЛРФ}/2} \varphi(t_1) \chi_{\xi\xi}(t-t_1) dt_1 = \sigma_A^2 \tau_{\xi} \tau_{ЛРФ},$$

где τ_{ξ} – интервал корреляции шума.

Что касается линейного тренда, он полностью подавляется ЛРФ.

Отношение «сигнал/шум» на выходе фильтра

$$(ОСШ)_{ЛРФ} = (C_A / \sigma_A) \cdot 0,25 \frac{\tau_{ЛРФ}}{\tau_{\xi}}, \quad (29)$$

где $(\tau_{ЛРФ} / \tau_{\xi})$ – число некоррелированных отсчетов шума на интервале $\tau_{ЛРФ}$. Сопоставление результата (29) с полученными для оптимального фильтра показывает, что выигрыш в ОСП значительно меньше (почти на половину) теоретически возможного.

При уменьшении длительности выходного сигнала (по сравнению с $\tau_u = \tau_{ЛРФ}/2$) пропорционально уменьшается $(ОСШ)_{ЛРФ}$. Тот же эффект наблюдается при увеличении τ_u . Если задаться допустимой величиной снижения $(ОСШ)_{ЛРФ}$, т.е. l_{ϕ} , то можно определить число фильтров d_{ϕ} , необходимое для выделения сигналов в заданном диапазоне длительностей $\tau_{u \min} - \tau_{u \max}$:

$$d_{\phi} \geq \log_a \frac{\tau_{u \max}}{\tau_{u \min}}; \quad a_{ЛРФ} = \frac{(4l_{\phi} + 1) - \sqrt{8l_{\phi} + 1}}{2}.$$

Первый из ЛРФ имеет постоянную времени $\tau_{ЛРФ1} = 2l_{\phi} \tau_{u \min}$, постоянные времени второго и каждого последующего в $a_{ЛРФ}$ раз больше предыдущего.

Можно показать, что при воздействии на ЛРФ синусоидального сигнала он практически полностью подавляется, если период синусоиды в три раза больше $\tau_{ЛРФ}$. При входном сигнале в виде «ступени» на выходе ЛРФ формируются два разнополярных импульса. Реакции фильтра рассмотренного типа на полезный сигнал и «ступенчатый фон» различаются. При необходимости указанную особенность можно использовать для устранения выбросов, соответствующих скачкообразному изменению излучения фона.

Главное достоинство фильтра (28) – простота реализации при одновременном подавлении квазипериодических составляющих и нестационарного тренда, неиспользованные возможности повышения ОСП реализуются на следующей ступени – в блоке анализа бинарного изображения, формируемого на выходе порогового устройства, преобразующего аналоговые сигналы на выходе ЛРФ в клиппированные.

Сформированное поле решений представляет собой прямоугольную матрицу, каждый из элементов которой может находиться в состоянии единица или нуль. Обозначим через $P(b_{ij})$ вероятность того, что элемент в ij -м узле решетки возбужден ($b_{ij} = 1$), а через g_{ij} – вероятность события $b_{ij} = 0$, $i = 1, 2, \dots, n; j = 1,$

2, ..., m . Совместная вероятность получения некоторой комбинации нулей и единиц на решетке

$$P(b_{ij}) = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m P_{ij} \cdot g_{ij}.$$

Функция правдоподобия гипотез H_1 – есть «сигнал», H_0 – «шум»:

$$L(b_{ij}/H_1) = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m P_{ij}^s \cdot g_{ij}^s; \quad L(b_{ij}/H_0) = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m P_{ij}^u \cdot g_{ij}^u, \quad (30)$$

где P_{ij}^s – вероятность получения единицы на ij выходе при условии нахождения в поле зрения системы объекта; $g_{ij}^s = 1 - P_{ij}^s$; P_{ij}^u , g_{ij}^u – те же вероятности для шума.

С учетом (30) правило решения, выраженное через отношение правдоподобия $L(b_{ij}/H_1)/L(b_{ij}/H_0)$, после несложных преобразований приводит к виду

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m b_{ij} \cdot c_{ij} \geq M_L; \quad c_j = \ln \frac{P_{ij}^s \cdot g_{ij}^u}{P_{ij}^u \cdot g_{ij}^s}; \quad M_L = \ln L_0 - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \ln \frac{g_{ij}^s}{g_{ij}^u}. \quad (31)$$

В соответствии с (31) алгоритм обнаружения бинарного изображения целей сводится к суммированию предварительно запрограммированной весовой функции на тех узлах решетки, на которых получена единица. Затем найденная сумма сравнивается с пороговым числом M_L . При $P_{ij}^s = P_s$; $P_{ij}^u = P_u$; $g_{ij}^s = g$; $g_{ij}^u = g_u$ процедура обнаружения сводится к подсчету единиц в поле зрения и сравнению полученного числа с порогом

$$M_L = \frac{\ln L_0 - mn \ln(g_s/g_u)}{\ln(P_s g_u / P_u g_s)}. \quad (32)$$

Примем вероятность появления единиц на всех узлах решетки одинаковой, а поле задания весовой функции согласованной с размером объекта. Вероятность того, что сумма единиц в поле зрения превысит порог M_0 в случае наличия объекта

$$P_{\text{ПО}} = \sum_{K=M_0}^{mn} c_{mn}^K \cdot P_s^K \cdot g_s^{mn-K}, \quad (33)$$

а вероятность ложного обнаружения

$$P_{\text{ЛО}} = \sum_{K=M_0}^{mn} c_{nm}^k \cdot P_u^k \cdot g_u^{nm-k}; \quad c_{mn}^k = \frac{(nm)!}{k!(nm-k)!}. \quad (34)$$

Формулы (33), (34) позволяют оценить эффективность алгоритма размерной селекции. Действительно, полагая, что величина $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m b_{ij}$ распределена по нормальному закону со средним $P_u mn$, дисперсией $P_u g_u mn$ для фона и $P_s mn$, $P_s g_s mn$ для комбинации «сигнал–фон», после несложных преобразований получим

$$P_{\text{по}} = \left[\frac{1}{2} - \Phi \left(\frac{M_0 - P_s mn}{\sqrt{P_s g_s mn}} \right) \right]; \quad P_{\text{ло}} = \left[\frac{1}{2} - \Phi \left(\frac{M_0 - P_u mn}{\sqrt{P_u g_u mn}} \right) \right]. \quad (35)$$

Выбор порога в общем случае сводится к нахождению минимума функции $P_{\text{ло}} = f(nm, M_0, P_u)$ по M_0 . Поскольку эта функция не является аналитической, задачу проще решить следующим образом.

По заданным $P_{\text{по}}$, nm , P_s по формуле (35) определяется требуемое значение M_0 (табл. 1). Затем для набора P_u и M_0 оценивается вероятность ложной тревоги $P_{\text{ло}}$ (табл. 1).

При определенных значениях P_s и P_u эффективность размерной селекции высока. Представляет интерес связать вероятности $P_{\text{по}}$ и $P_{\text{ло}}$ с характеристиками сигнала и помехи на входе пороговой схемы. Принимая закон распределения помех на выходе ЛРФ нормальным, по известным формулам

$$P_u = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_2}} \int_{-\infty}^{\Delta q_{\min}} \exp(-U^2/2\sigma_2^2) dU;$$

$$P_s = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_2}} \int_{\Delta q_{\min}}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{U-U_c}{2\sigma_2}\right)^2\right] dU$$

можно оценить отношение $(ОСШ)_{\text{ЛРФ}}$ через P_u и P_s (таблица 1).

Приведем пример пользования табл. 1 и 2. Задавая вероятность правильно-го обнаружения и ложных срабатываний $P_{\text{по}} = 0,975$ и $P_{\text{ло}} = 2 \cdot 10^{-6}$, размер рецепторного поля 7×7 , по табл. 4 найдём $P_s = 0,6$; $P_u = 0,2$. Этим цифрам соответствует $(ОСШ)_{\text{ЛРФ}} \approx 1,1$ (табл. 4).

Таблица 2. Оценка порогов принятия решений M_0

$P_{\text{по}}$		0,900			0,950			0,975		
		$m \times n$	5×5	7×7	10×10	5×5	7×7	10×10	5×5	7×7
P_s	0,50	9,3	20,0	43,6	8,3	18,7	41,8	7,6	17,6	41,2
	0,60	11,9	25,2	53,9	11,0	24,0	52,0	10,2	23,0	51,4
	0,70	14,5	30,2	65,0	13,7	29,0	63,4	13,0	28,0	61,0
	0,80	17,4	35,4	75,0	16,6	34,4	73,6	16,0	33,5	72,2
	0,90	20,6	41,5	86,6	20,0	40,7	85,1	19,6	40,1	84,1
	0,95	22,7	45,1	93,0	22,4	44,6	92,5	22,1	44,3	92,0

Таблица 3. Оценка вероятности ложных срабатываний

$P_{по}$		0,900			0,950			0,975		
		5×5	7×7	10×10	5×5	7×7	10×10	5×5	7×7	10×10
$P_{ш}$ при $P_s = 0,5$	0,4	0,66	0,46	0,24	0,75	0,62	0,35	0,83	0,73	0,40
	0,3	0,22	$0,5 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	0,63	0,11	$5,7 \cdot 10^{-3}$	0,51	0,18	$7,3 \cdot 10^{-3}$
	0,2	0,01	$1,6 \cdot 10^{-4}$	10^{-8}	0,03	$2 \cdot 10^{-4}$	10^{-8}	0,20	$3 \cdot 10^{-3}$	10^{-7}
$P_{ш}$ при $P_s = 0,6$	0,4	0,22	0,05	$2 \cdot 10^{-3}$	0,33	0,04	$7 \cdot 10^{-3}$	0,47	0,16	0,01
	0,3	0,03	$5 \cdot 10^{-4}$	10^{-8}	0,06	$2 \cdot 10^{-3}$	10^{-7}	0,12	$5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-7}$
	0,2	$2 \cdot 10^{-4}$	10^{-8}	10^{-10}	0,01	$5 \cdot 10^{-7}$	10^{-10}	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-6}$
$P_{ш}$ при $P_s = 0,7$	0,4	0,05	$7 \cdot 10^{-4}$	10^{-7}	0,06	$2 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-7}$	0,12	$6 \cdot 10^{-3}$	10^{-5}
	0,3	$13 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-7}$	10^{-9}	$36 \cdot 10^{-4}$	$43 \cdot 10^{-7}$	10^{-9}	$84 \cdot 10^{-4}$	$17 \cdot 10^{-6}$	10^{-8}
	0,2	10^{-6}	10^{-9}	10^{-13}	$7 \cdot 10^{-6}$	10^{-9}	10^{-13}	$32 \cdot 10^{-6}$	10^{-8}	10^{-12}
$P_{ш}$ при $P_s = 0,8$	0,4	$3 \cdot 10^{-2}$	10^{-3}	$32 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	10^{-6}	$85 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$34 \cdot 10^{-7}$
	0,3	$14 \cdot 10^{-4}$	$88 \cdot 10^{-8}$	10^{-9}	$31 \cdot 10^{-4}$	$52 \cdot 10^{-7}$	10^{-9}	$61 \cdot 10^{-4}$	$13 \cdot 10^{-6}$	10^{-9}
	0,2	$85 \cdot 10^{-7}$	10^{-8}	10^{-11}	$32 \cdot 10^{-6}$	10^{-8}	10^{-11}	10^{-4}	10^{-8}	10^{-11}
$P_{ш}$ при $P_s = 0,9$	0,4	10^{-5}	10^{-9}	10^{-12}	$2 \cdot 10^{-5}$	10^{-8}	10^{-12}	$85 \cdot 10^{-3}$	10^{-8}	10^{-11}
	0,3	10^{-7}	10^{-11}	0	10^{-7}	10^{-10}	0	$61 \cdot 10^{-4}$	10^{-10}	0
	0,2	10^{-9}	10^{-13}	0	10^{-9}	10^{-13}	0	10^{-4}	10^{-13}	0

Таблица 4. Требуемые значения $(ОСШ)_{ЛРФ}$ на входе пороговой схемы

$P_{ш}$ P_s	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,95	2,926	2,487	2,17	1,9	1,65
0,90	2,562	2,123	1,806	1,536	2,218
0,85	2,318	1,879	1,562	1,292	1,037
0,80	2,123	1,684	1,37	1,097	0,842
0,75	1,956	1,517	1,2	0,930	0,675
0,7	1,806	1,367	1,05	0,780	0,525
0,65	1,660	1,110	0,92	0,690	0,480
0,60	1,536	1,1	0,78	0,510	0,26
0,50	1,28	0,842	0,525	0,255	0

При столь малом отношении сигнала к среднеквадратическому отклонению белого шума удается получить высокие результаты по надежности обнаружения за счет пространственной фильтрации бинарного изображения фильтром, согласованным с размером объекта. Сигналы матрицы $n \cdot m = 7 \cdot 7$ суммируются с весами. Размер объекта переводится в амплитуду выброса до 49-ти единиц. Число выбросов помех данного пространственного размера мало, что и обеспечило получение высоких результатов по обнаружению.

Учет встречающихся размеров объектов приводит к необходимости построения многоканальной системы. Задача практически решается путем построения совокупности параллельных размерных фильтров. Рецепторное поле большой размерности разбивается на малые поля (рис. 6а). Для самого малого объекта суммирование ведется в круге диаметром D_0 , для самого большого – D_n . Алгоритм многоканальной фильтрации бинарных изображений различных размеров с учетом несущественных допущений может быть записан следующим образом.

Для обнаружения объекта размером D_0

$$\begin{aligned} \frac{4}{\pi \cdot D_0^2} \sum_{i,j \in D_0} b_{i,j} &\geq M_0; \\ \frac{4}{\pi \cdot D_1^2} \left(\sum_{i,j \in D_0} b_{i,j} + \sum_{i,j \in D_1 - D_0} b_{i,j} \right) &\geq M_1, \text{ если } D_u = D_1; \\ \frac{4}{\pi \cdot D_n^2} \left(\sum_{i,j \in D_0} b_{i,j} + \sum_{i,j \in D_1 - D_0} b_{i,j} + \dots + \sum_{i,j \in D_n - D_{n-1}} b_{i,j} \right) &\geq M_n, \text{ если } D_u = D_n. \end{aligned}$$

С целью исключения ошибок при селекции объекта промежуточных размеров необходимо ввести дополнительные условия – равенство суммы отсчетов вокруг кромки изображения цели некоторой заданной величине E_0 .

Алгоритм обнаружения объекта диаметром D_0 тогда запишется

$$\begin{aligned} \left(\frac{4}{\pi \cdot D_0^2} \sum_{i,j \in D_1} b_{i,j} \geq M_0 \right) \wedge \frac{4}{\pi (D_1^2 - D_0^2)} \sum_{i,j \in D_1 - D_0} b_{i,j} \leq E_0; \\ \left(\frac{4}{\pi \cdot D_1^2} \sum_{i,j \in D_1} b_{i,j} \geq M_1 \right) \wedge \frac{4}{\pi (D_2^2 - D_1^2)} \sum_{i,j \in D_2 - D_1} b_{i,j} \leq E_1, \text{ если } D_u = D_1 \text{ и т.д.} \end{aligned} \quad (36)$$

Возможность реализации размерной селекции с помощью описанной процедуры рассмотрим на примере обнаружения объектов с круговой симметрией. Разбиение рецепторного поля проведем в соответствии с рис. 6. Радиус внутренней окружности ρ_{0a} выбирается из условия равенства его $\rho_{u\min}$. Следующий параметр $\rho_{1a} = \sqrt{2} \rho_{0a}$. При этом условии площадь кольца $\pi \rho_{1a}^2 - \pi \rho_{0a}^2 = \pi \rho_{0a}^2$. Подбор значений остальных радиусов произведен на основе соотношения $\rho_{ia} = \sqrt{2} \rho_{i-1,a}$.

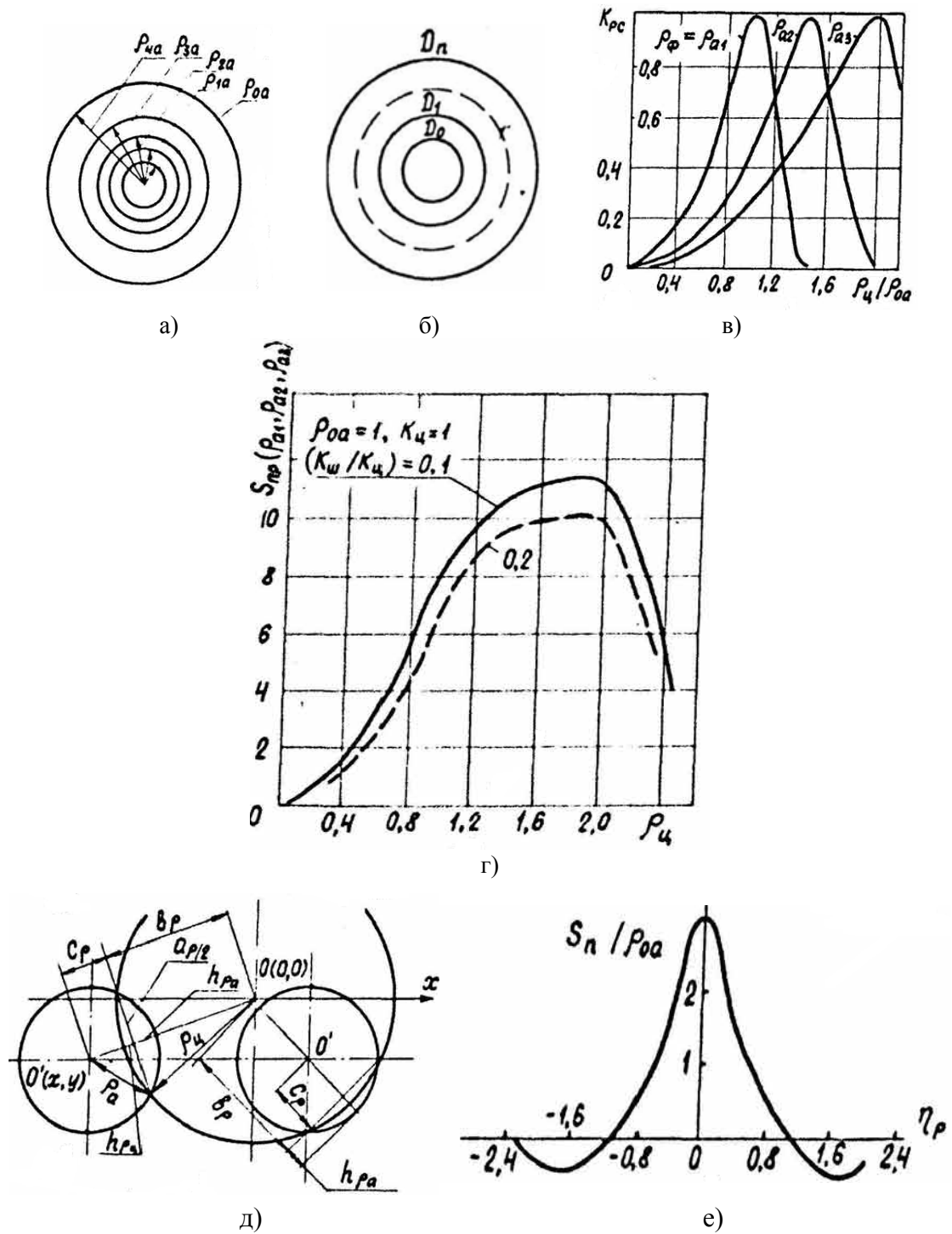


Рис. 6. «Кольцевой» фильтр и его характеристики

Обозначим через K_u плотность единиц рецепторного поля, соответствующей сигналу, через K_w – шуму. Тогда, придерживаясь логики преобразований (36), запишем выражение для сигнала при появлении в рецепторном поле бинарного изображения объекта.

Для первого фильтра

$$S_{np} = \pi \cdot \rho_u^2 \cdot K_u + [\pi \cdot \rho_{0a}^2 - \pi \cdot \rho_u^2] \cdot K_w - \pi \cdot \rho_{0a}^2 \cdot K_w = \pi \cdot \rho_u^2 \cdot (K_u - K_w), \quad (37)$$

если $\rho_u \leq \rho_{0a}$ и

$$\begin{aligned} S_{np} &= \pi \cdot \rho_{0a}^2 \cdot K_u - [\pi \cdot \rho_u^2 - \pi \cdot \rho_{0a}^2] \cdot K_u - [\pi \cdot \rho_{0a}^2 - \pi \cdot \rho_u^2] \cdot K_w = \\ &= \pi \cdot (2 \cdot \rho_{0a}^2 - \rho_u^2) \cdot (K_u - K_w) \end{aligned}$$

при $\rho_u > \rho_{0a}$.

Для второго фильтра

$$\begin{aligned} S_{np} &= \pi \cdot \rho_u^2 \cdot K_u - (\pi \cdot \rho_{0a}^2 - \pi \cdot \rho_u^2) \cdot K_w + \pi \cdot \rho_{0a}^2 \cdot K_w - (\pi \cdot 4 \cdot \rho_{0a}^2 - 2 \cdot \pi \cdot \rho_{0a}^2) \times \\ &\times K_w = \pi \cdot \rho_u^2 \cdot (K_u - K_w), \quad \text{если } \rho_u \leq \rho_{1a}, \text{ и} \\ S_{np} &= \pi \cdot (4 \cdot \rho_{0a}^2 - \rho_u^2) \cdot (K_u - K_w), \end{aligned} \quad (38)$$

когда $\rho_u > \rho_{1a}$ и т.д.

На рис. 6в приведены нормированные характеристики размерной селекции для трех фильтров, на рис. 6г – сигнал на выходе сумматора, объединяющего реакцию фильтров, представленных на рис. 6в. Полученная характеристика показывает, что с помощью предложенной процедуры выделяются те изображения, размеры которых попадают в диапазон размеров встречающихся объектов, а остальные стираются. Подобный селектор можно назвать «кольцевым» фильтром. Степень отличия $S_{np} = f(\rho_u)$ от прямоугольника характеризует технические ограничения, не позволяющие добиться идеальной сортировки выбросов по размерам, определяемой выражением (38) и проиллюстрированной на рис. 1.

Для определения вида выходной реакции фильтра обратимся к рис. 6д. Из простых геометрических построений несложно получить нужные соотношения:

1. $00' = \eta_p \rho_a = \sqrt{x^2 + y^2} \geq \rho_a + \rho_u$; $S_{np} = 0$;
2. $\rho_a \sqrt{\mu_p^2 - 1} < \eta_p \rho_a < \rho_a (\mu_p + 1)$; $\mu_p = \rho_u / \rho_a$;

$$\begin{aligned} S_{np} &= \rho_a^2 \left\{ \sqrt{1 - \Pi_p^2 + \frac{4}{3}(1 - \Pi_p^2)} - \Pi_p \sqrt{1 - \Pi_p^2} + \right. \\ &\left. + \mu_p \sqrt{1 - \Pi_p^2 + \frac{4}{3}(\mu_p - \eta_p + \Pi_p)^2} - (\eta_p - \Pi_p) \sqrt{1 - \Pi_p^2} \right\} \\ \Pi_p &= \left| \frac{\mu_p^2 - 1 - \eta_p^2}{2\eta_p} \right| ; \end{aligned}$$

3. $\rho_a (\mu_p - 1) < 00' < \rho_a \sqrt{\mu_p - 1}$;

(39)

$$S_{\text{ПР}} = \rho_a^2 \left[\sqrt{1 - \Pi_\rho^2 + \frac{4}{3}(1 - \Pi_\rho^2)} - \Pi_\rho \sqrt{1 - \Pi_\rho^2} - (\eta_\rho + \Pi_\rho) \sqrt{1 - \Pi_\rho^2} + \right. \\ \left. + \mu_\rho \sqrt{1 - \Pi_\rho^2 + \frac{4}{3}(\mu_\rho - \eta_\rho - \Pi_\rho)^2} \right]; \\ 4. 00' < \rho_a(\mu_\rho - 1); S_{\text{ПР}} = \pi \rho_a^2.$$

С помощью выражений (39) построена функция на рис. 6е при $\rho_u = \rho_{0a}$, т.е. на выходе первого фильтра.

С появлением фотоприемников в виде линейки или матрицы из отдельных элементов стало возможным операции по пространственной обработке сигналов перенести в плоскость изображений. По-видимому, наибольший эффект по снижению сложности технических решений при сохранении приемлемой помехоустойчивости регистрирующей схемы удастся обеспечить в случае одновременного использования сигналов от всех фотоприемников матриц. Ниже рассмотрен один из вариантов синтеза пространственного фильтра в плоскости изображений.

Известно, что двумерные линейно-разностные и «кольцевые» фильтры достаточно эффективны при обнаружении известных сигналов в условиях априорной неопределенности о характеристиках помех. Их передаточные характеристики

$$H_{\text{лрф}}(\omega_x, \omega_y) = \frac{\beta_{1x} \cdot \beta_{1y}}{(\beta_{1x} - 1)(\beta_{1y} - 1)} [H_{10}(\rho_{\text{иx}} \omega_x) - H_{11}(\beta_{1x} \cdot \rho_{\text{иx}} \omega_x)] \cdot [H_{10}(\rho_{\text{иe}} \omega_y) - H_{11}(\beta_{1y} \cdot \rho_{\text{иy}} \omega_y)]. \quad (41)$$

Фильтры (40) и (41) центрируют и стационаризуют изображения случайного поля. Мощность флуктуаций случайных колебаний на их выходе оценивается с использованием критерия максимального правдоподобия и выражается в виде $\sigma_{\text{фF}}^2 = \sigma_{\text{qф}}^2 K_{\text{сF}}$, $K_{\text{сF}}$ – коэффициент помехоподавления фильтра. Представим исходное изображение подстилающей поверхности в виде матрицы чисел $\{q_{ij}\}$ – результата измерений плотности потока излучения его элементов в узлах прямоугольной решетки с шагами Δx и Δy по соответствующим координатам. Тогда операцию пространственной селекции объектов с учетом (41) запишем в виде

$$\text{если } \sum_{i=-I}^I \left(\sum_{j=-J}^J q_{is} \cdot h_{yj} - j_0 \right) \cdot h_{xi} - i_0 \geq \text{ОСП}_{\text{min}}, \text{ то } \{q(i-i_0), j-j_0\} - \text{объект}, \quad (42)$$

где h_{yj} и h_{xi} – весовые функции фильтра:

$$h_{xi} = \begin{cases} N_{\rho x}^{-1}, & \text{если } |i \Delta x| \leq \rho_{\text{иx}}; \\ -(\beta_x - 1)^{-1}, & \text{если } \rho_{\text{иx}} < |i \Delta x| \leq \beta_x \rho_{\text{иx}}. \end{cases} \\ h_{yi} = \begin{cases} N_{\rho y}^{-1}, & \text{если } |j \Delta y| \leq \rho_{\text{иy}}; \\ -(\beta_y - 1)^{-1} N_{\rho y}^{-1}, & \text{если } \rho_{\text{иy}} < |j \Delta y| \leq \beta_y \rho_{\text{иy}}, \end{cases}$$

где $N_{\rho x}$, $N_{\rho y}$ – число отсчетов, приходящихся на соответствующий размер объекта

$$\beta_x N_{\rho x} = 2I + 1; \quad \beta_y N_{\rho y} = 2J + 1.$$

Интерес представляет задача синтеза одного фильтра, обеспечивающего в среднем максимальную реакцию на объекты с радиусом, укладываемым в заданный диапазон. Рассмотрим вариант такого фильтра с передаточной характеристикой

$$h_{xi} = \begin{cases} N_{\rho x}^{-1}, & \text{если } |i \Delta x| \leq (\rho_{\psi k})_{\min}; \\ -(2N_{\rho x})^{-1}, & \text{если } (\rho_{\psi k})_{\max} < |i \Delta x| \leq (\rho_{\psi k})_{\max} + 2(\rho_{\psi k})_{\min}. \end{cases} \quad (43)$$

$$h_{yi} = \begin{cases} N_{\rho y}^{-1}, & \text{если } |j \Delta y| \leq (\rho_{\psi y})_{\min}; \\ -(2N_{\rho y})^{-1}, & \text{если } (\rho_{\psi y})_{\max} < |j \Delta y| \leq (\rho_{\psi y})_{\max} + 2(\rho_{\psi y})_{\min}. \end{cases}$$

С использованием (41), (43), а также (2) - (12) были подсчитаны $(ОСП)_{\min}$, при которых обеспечивается заданное число ложных выбросов $K_{ЛВ}$ и вероятность правильного обнаружения $P_{ПО}$. В расчетах принималось $(\rho_{\max} / \rho_{\min}) = 2$; $(\sigma_{\Delta q\psi} / \sigma_{q\psi}) = 0,05$ и 1. Характеристики фона соответствовали

$$G_1(\omega_x, \omega_y) = C_{1M} (1 + \rho_{1x} \cdot \omega_x^2 + \rho_{1y} \cdot \omega_y^2)^{-3/2}.$$

Данные расчетов сведены в табл. 4.

Сопоставление данных табл. 4 с расчетными, представленными на рис. 1, показывают, что ухудшение результатов по сравнению с полученными при идеальной селекции незначительно. Если параметр $(\sigma_{\Delta q\psi} / \sigma_{q\psi})$ мал, проигрыш в $ОСП$ при замене оптимального селектора фильтром (43) составляет порядка 30 %.

Практическая проверка эффективности рассмотренного фильтра (43) осуществлялась путем обработки реальных изображений на ЭВМ. Преобразование тепловых изображений в электрический сигнал с последующим вводом его в память процессора выполнялось с помощью специально разработанного денситометра.

Таблица 4. Минимальное $(ОСП)_{\min}$, необходимое для обеспечения требуемых $K''_{ЛВ}$ и $P_{ПО}$ с помощью фильтра (42)

$\sigma_{\Delta q\psi} / \sigma_{q\psi}$	$P_{ПО}$	$K''_{ЛВ}$			
		0,05	0,01	0,005	0
0,05	0,9	3,35	3,59	3,69	3,9
	0,95	3,56	3,81	3,91	4,13
	0,975	3,74	3,98	4,09	4,31
	0,99	3,95	4,20	4,30	4,52
1	0,9	4,08	4,33	4,43	4,66
	0,95	4,50	4,75	4,85	5,08
	0,975	4,87	5,12	5,22	5,44
	0,99	5,23	5,64	5,86	5,94

Перед обработкой все снимки предварительно сортировались по группам, в каждой из которых диапазон разброса $ОСП$ составлял $(\overline{ОСП})_{гр} \pm 0,25$; $(\overline{ОСП})_{гр}$ – среднее значение $ОСП$ в группе. Два снимка, характеризующиеся $ОСП=(\overline{ОСП})_{гр} - 0,25$ и $ОСП=(\overline{ОСП})_{гр} + 0,25$, обрабатывались с помощью фильтра (43).

По результатам обработки определялись нижние и верхние пороги принятия решений. На следующем этапе пространственной фильтрации подвергались остальные снимки в группе и оценивалась вероятность правильного обнаружения как отношение числа обнаруженных объектов к числу предъявленных. Кроме того, подсчитывалась плотность ложных выбросов $(K_{ЛВ})_{гр}$, среднее ее значение по всем группам (а также найденные $P_{по}$) приведены в первой колонке табл. 5. Вторая и последующие колонки данных получены аналогично, но каждый раз верхний порог понижался, а нижний повышался на 10 % по сравнению с установленными на предыдущем этапе обработки. В последней строке для сравнения приведены теоретические оценки ожидаемых результатов по числу ложных решений.

Таблица 5. Результаты экспериментальной оценки эффективности пространственного фильтра (43)

$ОСП$	Вероятность правильного обнаружения			
0,75-1,25	0,57	0,50	0,30	0,10
1,25-1,75	0,767	0,60	0,50	0,20
1,75-2,25	0,80	0,650	0,60	0,40
2,25-2,75	0,77	0,63	0,57	0,37
2,75-3,25	0,87	0,80	0,70	0,60
3,25-3,75	1,00	1,00	1,00	0,97
3,75-4,25	1,00	1,00	1,00	1,00
4,25-4,75	1,00	1,00	1,00	1,00
Среднее $K''_{ЛВ}$ по группам, эксперим.	0,2	0,07	0,02	0
Среднее $K''_{ЛВ}$ по группам, теорет.	0,1	0,05	0,01	0,01

Сопоставление данных табл. 5 с приведенными на рис. 1 показывает, что проигрыш в $ОСП$ при переходе от идеального селектора к предложенному составляет ориентировочно 20 %.

Для сравнения помехоподавляющей способности фильтров (39) и (40) представим входное изображение в виде цилиндрических сигналов единичной амплитуды, закон распределения радиусов которых

$$P(\rho_B) = 2\tau_\rho \rho_B \exp(-m_\rho \rho_B^2).$$

Введем функцию $K_{pc}(\rho_B)$, представляющую собой отношение амплитуд выбросов на выходе фильтра при поступлении на его вход сигналов с радиусам ρ_B и ρ_c . Тогда величина

$$K_{pc} = \int_0^{\infty} k_{pc}(\rho_B) P(\rho_B) d \cdot \rho_B^2$$

будет отражать интегральный эффект подавления ложных выбросов фона. В табл. 6 приведены результаты расчетов K_{pc} для фильтров с характеристиками (40) и (41).

Таблица 6. Значения K_{pc} для «кольцевого» и линейно-разностного пространственных фильтров

m_p	0,031	0,125	0,5	2	8
$K\Phi$	0,102	0,132	0,207	0,197	0,309
$ЛР\Phi$	0,135	0,167	0,239	0,208	0,310

Нетрудно видеть, что «кольцевой» фильтр в среднем примерно на 15 % эффективнее $ЛР\Phi$. Особенно его преимущество заметно при $m_p < 1$.

По материалам подраздела можно сделать следующие выводы.

Эффективность пространственной размерной селекции определяется тем, в какой мере радиус корреляции помех фона отличается от радиуса цели. При их соизмеримости эффект пространственной фильтрации незначителен и эквивалентен увеличению $ОСП$ до 1,3 раза. В противном случае ее использование позволяет достичь требуемой помехоустойчивости регистрирующей схемы при $ОСП$, близком к единице.

Несмотря на многочисленные попытки создания пространственных размерных селекторов фигур произвольной формы, нет технических решений, удовлетворяющих критериям высокой селективности и простоты реализации в условиях невысокого $ОСП$.

Рассмотренный вариант системы в виде апертурного фильтра с $\rho_a \ll \rho_c$, параллельного набора одномерных $ЛР\Phi$, обеспечивающих совместно с пороговыми схемами формирование бинарного поля решений, и совокупности двумерных $ЛР\Phi$ можно считать приемлемым по сложности и обеспечиваемой помехоустойчивости.

К перспективным решениям следует отнести вариант пространственного селектора с передаточной характеристикой (42).

Результаты аналитической разведки, направленной на получение ответов на два ключевых вопроса: можно ли обнаружить места выхода на подстилающую поверхность подземной трубы продукта и несанкционированного отбора перекачиваемого продукта, позволяют сделать следующее заключение.

В тепловом диапазоне оптических излучений указанные «объекты» замаскировать невозможно, и нет технических проблем для их регистрации с помощью серийно выпускаемых приборов.

Наряду с сигналами от «объектов» регистрируются тепловые флуктуации подстилающей поверхности, обусловленные пространственной неоднородностью коэффициентов поглощения солнечной радиации и излучения земных покровов, а также изменением теплофизических параметров почво-грунтов в поле зрения регистрирующей аппаратуры.

Существуют в течение суток интервалы времени, когда дисперсия флуктуаций становится соизмеримой или превышает плотность потока излучения от места залегания «объекта».

Известны методы повышения отношения «сигнал/помеха» на входе схемы принятия решений, основанные на подавлении пространственных частот флуктуаций, слабо выраженных в спектре искомым изображений объектов, регулируемом подсвете пролетаемой мощности [2], прогнозировании уровней сигнала и помех с введением спектральной фильтрации [3], многоспектральном представлении вектора признаков сигнала и помех. Применение первого из них (пространственной селекции объектов) оказывается достаточным, чтобы обеспечить высокие параметры по обнаружению.

Не исключено, что в проведенных теоретических исследованиях были упущены факторы, которые повлияют на полученные оценки по вероятностям пропуска цели и ложной тревоги. Поэтому развитие «подстрахованного» метода для решения продекларированной задачи, например метода прогнозирования *ОСП*, следует считать целесообразным.

Литература

1. Епифанцев Б.Н., Шелупанов А.А. Концепция создания комплексированной системы защиты магистральных трубопроводов от преднамеренных угроз // Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело". 2011. №1. С. 4 - 19. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Epifantsev/Epifantsev_2.pdf
2. Епифанцев Б.Н. Особенности поведения отношения «сигнал/помеха» при тепловом контроле с использованием подсвечивающего излучения // Дефектоскопия. 1988. № 6. С. 93 - 94.
3. Мочалин В.Д. Прогнозирование радиационного контраста объектов в спектральных диапазонах 3,5...5 и 8...14 мкм // Оптико-механическая промышленность. 1991. № 6. С. 24 - 26.

4. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. М.: Наука, 1979. 830 с.

5. Телухин В.В., Распопов В.Я., Машнин М.Н. Определение аэродинамических коэффициентов планера беспилотного летательного аппарата методом виртуальной продувки // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2010. № 2. С. 17 - 22.

**DETECTION OF LOCAL CHANGES AT MAIN PIPELINE
IN THE THERMAL RANGE OPTICAL RADIATIONS.
PART 2. EFFICIENCY OF A SPATIAL FILTRATION**

B.N. Epifantsev

*Siberian State Automobile and Highway Academy, Omsk, Russia
e-mail: epifantsev_bn@sibadi.org*

Abstract. *Detection of places of an exit of a product following from the pipeline on the spreading surface, the disguised inserts, etc. in a thermal wave band not effectively enough because of the low relation "signal/noise" on initial images. The approaches are considered, allowing to remove this restriction, using algorithms of a spatial filtration of signals against noise.*

Keywords: *the main pipeline, leaks of a product, insert, detection, thermal investigation, algorithms of processing of images, reliability of detection*

References

1. Epifantsev B.N., Shelupanov A.A. Conception of interconnecting security system for trunk pipelines against intended threats. *Electronic scientific journal "Oil and Gas Business"*, 2011, Issue 1, pp. 20-34.
URL: http://www.ogbus.ru/eng/authors/Epifantsev/Epifantsev_2e.pdf
2. Epifantsev B.N. Osobennosti povedeniya otnosheniya «signal/pomekha» pri teplovom kontrole s ispol'zovaniem podsvechivayushchego izlucheniya (Features of behavior relationship "signal/noise" in the thermal control with the use illuminating emission), *Defektoskopiya*, 1988, Issue 6. pp. 93 - 94.
3. Mochalin V.D. Prognozirovaniye radiatsionnogo kontrasta ob"ektov v spektral'nykh diapazonakh 3,5...5 i 8...14 mkm (Forecasting of radiation contrast of objects in the spectral range 3.5...5 and 8...14 microns). *Optiko-mekhanicheskaya promyshlennost'*, 1991, Issue 6, pp. 24 - 26.
4. Spravochnik po spetsial'nym funktsiyam (Handbook of Special Functions). Under ed. M. Abramovits and I. Stigan. Moscow: Nauka, 1979. 830 p.
5. Telukhin V.V., Raspopov V.Ya., Mashnin M.N. Opredeleniye aerodinamicheskikh koeffitsientov planera bespilotnogo letatel'nogo apparata metodom virtual'noi produvki (Aerodynamical coefficients determination of unmanned aircraft vehicle using virtual wind tunnel test method). *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii*, 2010, Issue 2, pp. 17 - 22.