

И.И. ГОРБАНЬ, И.Ю. ЦЕЛИЩЕВ

ОБНАРУЖЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ХОДА МОРСКИХ СУДЕН ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ ИХ СПУТНОГО СЛЕДА

***Анотація.** На основі дослідження зображень рухомих морських суден, що отримані за допомогою аерокосмічних систем спостереження, розроблені математичні моделі їх спутних слідів. Для різних моделей спутних слідів та завад синтезовано оптимальні за критерієм максимуму функції вірогідності алгоритми виявлення морських суден та вимірювання напрямку і швидкості їх ходу. Запропоновано квазіоптимальний алгоритм адаптивної багатоканальної обробки зображень, що забезпечує виявлення суден та вимірювання параметрів їх руху. Показано, що завадостійкість системи квазіоптимальної обробки зображень зростає з підвищенням швидкості руху судна.*

***Ключові слова:** обробка зображень, обробка оптимальна, швидкість ходу.*

***Аннотация.** На основе анализа изображений движущихся морских судов, полученных с помощью аэрокосмических систем наблюдения, разработаны математические модели их спутных следов. Для разных моделей спутных следов и помех синтезированы оптимальные по критерию максимума функции правдоподобия алгоритмы обнаружения морских судов и измерения направления и скорости их хода. Предложен квазиоптимальный алгоритм адаптивной многоканальной обработки изображений, обеспечивающей обнаружение судов и измерение параметров их движения. Показано, что помехоустойчивость системы квазиоптимальной обработки изображений возрастает с увеличением скорости хода судна.*

***Ключевые слова:** обработка изображения, обработка оптимальная, скорость хода.*

***Abstract.** Based on analysis of moving sea ship images obtained by aerospace observation systems, mathematical models of their tracks are developed. For different models of tracks and noises, algorithms of detection and measurement of direction and velocity of sea ships, optimal by the criteria of maximum likelihood function, are synthesized. Near-optimum algorithm of adaptive multichannel image processing is proposed. It is shown that the noise stability of the system of near-optimum image processing is increasing with the growth of ship's velocity.*

***Key words:** image processing, optimal processing, speed ship.*

1. Введение

Современные авиационные и космические системы дистанционного зондирования Земли предоставляют уникальные возможности для решения народнохозяйственных задач. Одной из них является обнаружение и измерение параметров движения морских судов на основе обработки аэрокосмических снимков.

Известные методы и системы обработки изображений, предлагаемые для решения этой задачи, далеки от совершенства.

Целью настоящей статьи является разработка эффективных алгоритмов обнаружения и измерения скорости хода суден по изображению их спутных следов.

2. Спутные следы и их модели

Анализ изображений движущихся морских судов, полученных путем дистанционного зондирования акваторий (примеры которых приведены на рис. 1), показывает, что за судном образуется спутный след, хорошо различимый на фоне взволнованной морской поверхности. Размеры этого следа во много раз превосходят размеры судна. Спутный след достаточно индивидуален и зависит от скорости движения и размеров судна.

В спутном следе можно выделить две волны, расходящиеся в разные стороны примерно под одним и тем же углом к направлению движения.

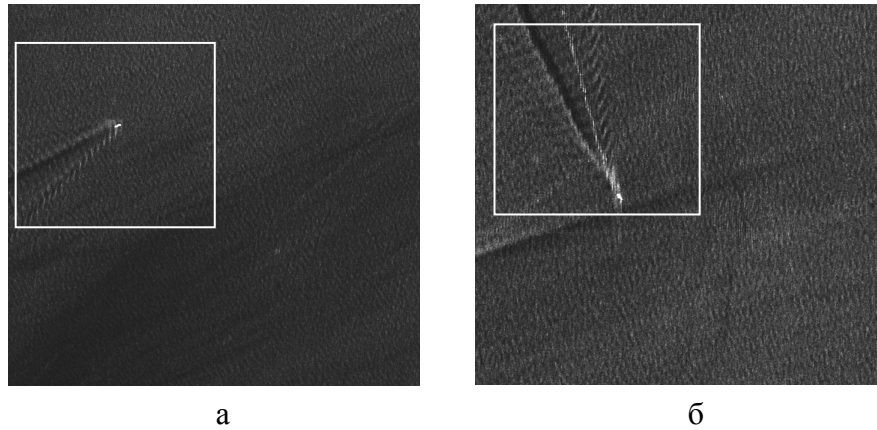


Рис. 1. Спутные следы двух разных судов (а, б) на фоне взволнованной морской поверхности при разных скоростях и направлениях их движения

Двумерные пространственные спектры спутных следов (рис. 2) содержат выраженные области, симметричные относительно начала координат и почти симметричные относительно направления движения.

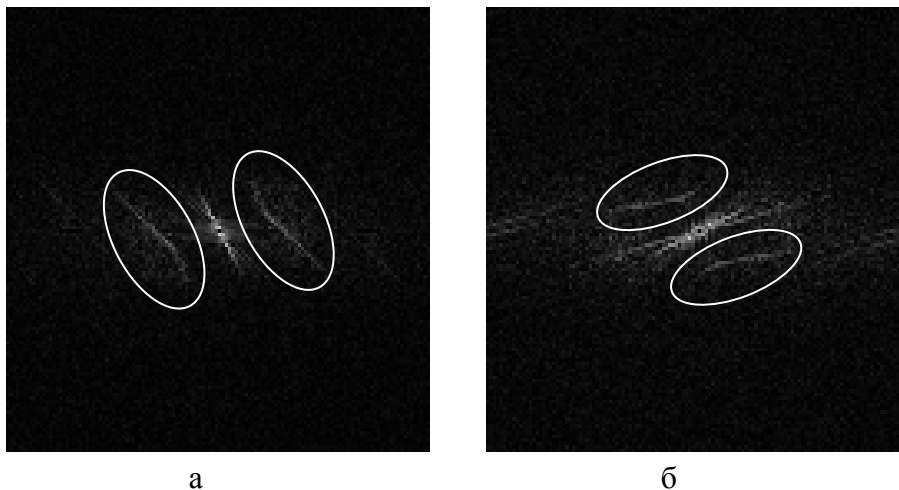


Рис. 2. Пространственные спектры двух изображений поверхности моря, ограниченные квадратами, выделенными на рис. 1 а, б

Аналитическая модель спутного следа, соответствующая притопленной сфере, движущейся с постоянной скоростью, описывается выражением [1]:

$$s(x, y) = \frac{2r^3 g^2}{V_0^4} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \exp\left(-\frac{gh_0}{V_0^2 \cos^2 \theta}\right) \times \quad (1)$$

$$\times \sin\left(\frac{g}{V_0^2 \cos^2 \theta} [(x - x_0) \cos \theta + (y - y_0) \sin \theta]\right) \frac{d\theta}{\cos^4(\theta)},$$

где $s(x, y)$ – сигнал (вертикальное смещение свободной поверхности за движущейся сферой), $g \approx 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, r – радиус сферы, V_0 – скорость равномерного движения сферы, h_0 – глубина погружения центра сферы относительно уровня свободной поверхности, x_0, y_0 – координаты центра сферы в горизонтальной плоскости (x, y) , θ – угол, отсчитываемый от направления движения.

Сравнение расчетов по этой формуле со спутными следами, соответствующими реальным суднам, демонстрирует их качественное совпадение (рис. 1, 3). Похожими оказываются и двумерные спектры (рис. 2, 4).

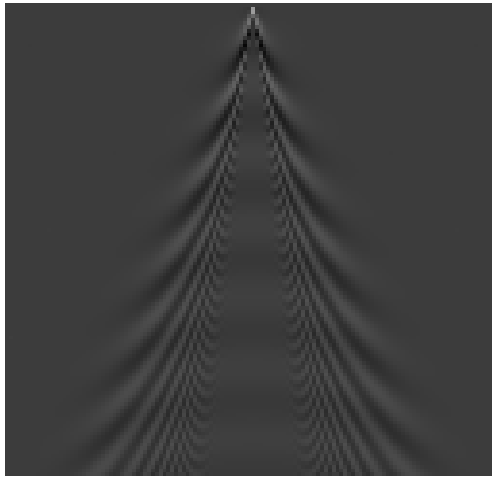


Рис. 3. Спутный след, рассчитанный по формуле (1) для скорости хода 15 узлов

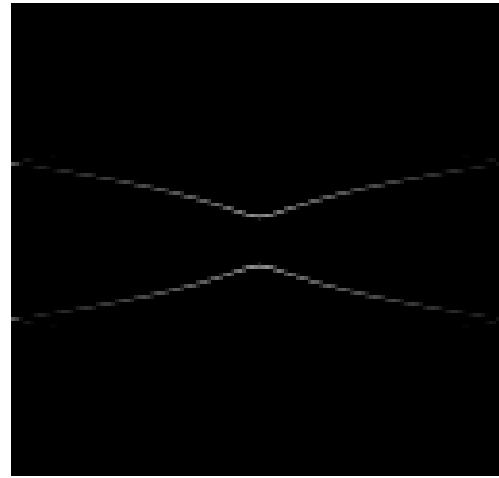


Рис. 4. Пространственный спектр, соответствующий спутному следу, приведенному на рис. 3

Спутный след можно описать аналитическим сигналом $\dot{s}(x, y, \vec{\lambda}, \vec{\beta})$, зависящим от пространственных координат x, y , вектора существенных параметров $\vec{\lambda}$ и вектора несущественных параметров $\vec{\beta}$.

В ряде случаев этот сигнал может быть разложен в ряд по R ортогональным волнам, характеризуемым векторами существенных параметров $\vec{\lambda}_r$ и несущественных параметров $\vec{\beta}_r$ ($r = \overline{1, R}$):

$$\dot{s}(x, y, \vec{\lambda}, \vec{\beta}) = \sum_{r=1}^R \dot{\alpha}(\vec{\beta}_r) \dot{s}_r(x, y, \vec{\lambda}_r), \quad (2)$$

где $\dot{\alpha}(\vec{\beta}_r)$ – функция, учитывающая зависимость r -й волны от параметров $\vec{\beta}_r$; $\dot{s}_r(x, y, \vec{\lambda}_r)$ – детерминированный аналитический сигнал, соответствующий r -й волне. В общем случае составляющие волны не обязательно плоские. В частном случае плоской волны

$$\dot{s}_r(x, y, \vec{\lambda}_r) = A_r \exp[-j2\pi(u_r x + v_r y)], \quad (3)$$

где u_r, v_r – пространственные частоты, характеризующие направление и частоту r -й волны, A_r – амплитуда волны.

Будем считать, что компоненты вектора $\vec{\beta}_r$ носят случайный характер и описываются определенными законами распределения.

Конкретизируя вектор $\vec{\beta}_r$, будем рассматривать два его типа:

1) $\vec{\beta}_r$ – вектор, представляющий собой равномерно распределенную на интервале $[0, 2\pi]$ начальную фазу φ_r . При этом

$$\dot{\alpha}(\vec{\beta}_r) = \exp(j\varphi_r); \quad (4)$$

2) $\vec{\beta}_r$ – вектор, состоящий из случайного амплитудного множителя ε_r , распределенного по релеевскому закону, и равномерно распределенной случайной начальной фазы φ_r ($\vec{\beta}_r = (\varepsilon_r, \varphi_r)$). В этом случае

$$\dot{\alpha}(\vec{\beta}_r) = \varepsilon_r \exp(j\varphi_r). \quad (5)$$

Для вектора $\vec{\beta}_r$ первого типа сигнал, соответствующий аналитическому сигналу (2), имеет вид

$$s(x, y, \vec{\lambda}, \vec{\beta}) = \sum_{r=1}^R \left[s_r(x, y, \vec{\lambda}_r) \cos \varphi_r - s_{r\perp}(x, y, \vec{\lambda}_r) \sin \varphi_r \right], \quad (6)$$

а для вектора $\vec{\beta}_r$ второго типа –

$$s(x, y, \vec{\lambda}, \vec{\beta}) = \sum_{r=1}^R \varepsilon_r \cdot \left[s_r(x, y, \vec{\lambda}_r) \cos \varphi_r - s_{r\perp}(x, y, \vec{\lambda}_r) \sin \varphi_r \right], \quad (7)$$

где $s_r(x, y, \vec{\lambda}_r)$ – детерминированный сигнал, описывающий r -ю волну, $s_{r\perp}(x, y, \vec{\lambda}_r)$ – сопряженный по Гильберту детерминированный сигнал, описывающий r -ю волну.

3. Оптимальная обработка изображения на фоне гауссовской помехи

Для синтеза алгоритма оптимальной обработки изображений воспользуемся критерием максимума функции правдоподобия. При синтезе будем следовать классической методике, изложенной в различных вариациях в ряде источников [2–4].

Пусть принимаемое колебание $u(x, y)$ состоит из сигнала и гауссовской помехи, описываемой корреляционной функцией $K_N(x_1, y_1, x_2, y_2)$. Тогда условная функция правдоподобия для совокупности параметров $(\vec{\lambda}, \vec{\beta})$ может быть записана как

$$L(u / \vec{\lambda}, \vec{\beta}) = K \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \iint_{X Y} \iint_{X Y} \left[u(x_1, y_1) - s(x_1, y_1, \vec{\lambda}, \vec{\beta}) \right] \times \right. \\ \left. \times \Theta_N(x_1, y_1, x_2, y_2) \left[u(x_2, y_2) - s(x_2, y_2, \vec{\lambda}, \vec{\beta}) \right] dx_1 dy_1 dx_2 dy_2 \right\}, \quad (8)$$

где K – коэффициент, определяемый корреляционной функцией помехи, X, Y – область наблюдения вдоль осей x, y , $\Theta_N(x_1, y_1, x_2, y_2)$ – решение интегрального уравнения

$$\iint_{X Y} K_N(x_1, y_1, x_2, y_2) \Theta_N(x_2, y_2, x_3, y_3) dx_2 dy_2 = \delta(x_1 - x_3, y_1 - y_3),$$

где $\delta(x_1 - x_3, y_1 - y_3)$ – дельта-функция Дирака.

Для сигнала (6) выражение (8) может быть записано как

$$L(u / \vec{\lambda}, \vec{\beta}) = K_1 \exp \left\{ \sum_{r=1}^R \left[-\mu_r(\vec{\lambda}_r) + Q_r(\vec{\lambda}_r) \cos(\Phi_r(\vec{\lambda}_r) + \varphi_r) \right] \right\}, \quad (9)$$

где K_1 – коэффициент, определяемый корреляционной функцией помехи и принимаемым колебанием $u(x, y)$, $\mu_r(\vec{\lambda}_r)$ – энергетическое отношение сигнал-помеха для r -й волны:

$$\mu_r(\vec{\lambda}_r) = \frac{1}{2} \iint_{X Y} \dot{s}_r(x, y, \vec{\lambda}_r) b_r^*(x, y, \vec{\lambda}_r) dx dy, \quad (10)$$

$Q_r(\vec{\lambda}_r)$ и $\Phi_r(\vec{\lambda}_r)$ – соответственно модуль и фаза комплексного корреляционного интеграла r -й волны:

$$\dot{Q}_r(\vec{\lambda}_r) = \iint_{X Y} u(x, y) b_r^*(x, y, \vec{\lambda}_r) dx dy, \quad (11)$$

где $\dot{b}_r(x, y, \vec{\lambda}_r)$ – решение интегрального уравнения

$$\iint_{X Y} K_N(x_1, y_1, x_2, y_2) \dot{b}_r(x_2, y_2, \vec{\lambda}_r) dx_2 dy_2 = \dot{s}_r(x_1, y_1, \vec{\lambda}_r).$$

Функционал правдоподобия $L(u / \vec{\lambda})$ для существенного векторного параметра $\vec{\lambda}$ можно вычислить путем усреднения функции правдоподобия $L(u / \vec{\lambda}, \vec{\beta})$ по Φ_r ($r = \overline{1, R}$):

$$L(u / \vec{\lambda}) = \frac{1}{(2\pi)^R} \int_0^{2\pi} \dots \int_0^{2\pi} L(u / \vec{\lambda}, \vec{\beta}) d\varphi_1 \dots d\varphi_R.$$

Подстановка в это выражение равенства (9) и интегрирование приводят к следующему выражению:

$$L(u / \vec{\lambda}) = K_1 \exp[-\mu(\vec{\lambda}) + Q(\vec{\lambda})], \quad (12)$$

где

$$\mu(\vec{\lambda}) = \sum_{r=1}^R \mu_r(\vec{\lambda}_r), \quad (13)$$

$$Q(\vec{\lambda}) = \sum_{r=1}^R \ln I_0[Q_r(\vec{\lambda}_r)],$$

$I_0[x]$ – функция Бесселя 1-го рода нулевого порядка от мнимого аргумента.

Величина

$$Q(\vec{\lambda}) = \begin{cases} \sum_{r=1}^R |\dot{Q}_r(\vec{\lambda}_r)|^2 & \text{при } \mu_r(\vec{\lambda}_r) \ll 1 \forall r = \overline{1, R}, \\ \sum_{r=1}^R |\dot{Q}_r(\vec{\lambda}_r)| & \text{при } \mu_r(\vec{\lambda}_r) \gg 1 \forall r = \overline{1, R}. \end{cases} \quad (14)$$

Поэтому, согласно выражению (12), при неэнергетическом параметре $\vec{\lambda}$ алгоритм оптимальной обработки сводится при слабом сигнале к вычислению суммы квадратов модулей корреляционных интегралов $\dot{Q}_r(\vec{\lambda}_r)$, а при сильном сигнале – к сумме их модулей.

Следуя приведенной схеме расчета, можно показать, что для сигнала (7) оптимальная обработка предусматривает расчет $\dot{Q}_r(\vec{\lambda}_r)$ для каждой r -й волны, а затем нахождение выходного эффекта по формуле

$$Q(\vec{\lambda}) = \sum_{r=1}^R \frac{|\dot{Q}_r(\vec{\lambda}_r)|^2}{\mu_r(\vec{\lambda}_r) + 1}. \quad (15)$$

В спектральной области выражения (10) и (11) можно представить в виде

$$\mu_r(\vec{\lambda}_r) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{S}_r(u, v, \vec{\lambda}_r) B_r^*(u, v, \vec{\lambda}_r) du dv, \quad (16)$$

$$\dot{Q}_r(\vec{\lambda}_r) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{U}(u, v) B_r^*(u, v, \vec{\lambda}_r) du dv, \quad (17)$$

где $\dot{S}_r(u, v, \vec{\lambda}_r)$ – спектр r -й волны сигнала, $\dot{B}_r(u, v, \vec{\lambda}_r)$ – спектр функции $\dot{b}_r(x, y, \vec{\lambda}_r)$, определяющей структуру обработки r -й волны, $\dot{U}(u, v)$ – спектр принимаемого колебания.

Заметим, что все перечисленные спектры вычисляются в ограниченной пространственной области наблюдения (X, Y) .

В случае некоррелированной помехи $\dot{b}_r(x, y, \vec{\lambda}_r) = \frac{1}{\sigma_0^2} \dot{s}_r(x, y, \vec{\lambda}_r)$, где σ_0^2 – дисперсия помехи. При этом выражения (10), (11) приобретают вид

$$\mu_r(\vec{\lambda}_r) = \frac{1}{2\sigma_0^2} \int_X \int_Y \dot{s}_r(x, y, \vec{\lambda}_r) \dot{s}_r^*(x, y, \vec{\lambda}_r) dx dy,$$

$$\dot{Q}_r(\vec{\lambda}_r) = \frac{1}{\sigma_0^2} \int_X \int_Y u(x, y) \dot{s}_r^*(x, y, \vec{\lambda}_r) dx dy,$$

а выражения (16), (17) – вид

$$\mu_r(\vec{\lambda}_r) = \frac{1}{2\sigma_0^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} S_r^2(u, v, \vec{\lambda}_r) du dv, \quad (18)$$

$$\dot{Q}_r(\vec{\lambda}_r) = \frac{1}{\sigma_0^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{U}(u, v) S_r^*(u, v, \vec{\lambda}_r) du dv. \quad (19)$$

При этом оптимальная обработка изображения сводится к расчету двумерного спектра принятых колебаний, многоканальной обработке, согласованной со спектрами отдельных волн, и, затем, некогерентному накоплению (с весом или без веса) полученных результатов.

Если имеет место разложение ожидаемого сигнала по плоским волнам, то с учетом равенства (3) спектр r -й волны представляет собой функцию режекторного типа с максимумом в точке (u_r, v_r) . Тогда выражения (18), (19) приобретают вид

$$\mu_r(\vec{\lambda}_r) \approx \frac{A_r^2}{2\sigma_0^2} XY, \quad (20)$$

$$\dot{Q}_r(\vec{\lambda}_r) \approx \frac{A_r}{\sigma_0^2} \dot{U}(u_r, v_r). \quad (21)$$

Тогда оптимальная обработка изображения предполагает расчет спектра принятых колебаний и некогерентное спектральное накопление полученных спектральных составляющих с учетом амплитуд спектра волн ожидаемого сигнала.

4. Квазиоптимальная обработка изображения

Основными задачами системы обработки изображения являются обнаружение спутного следа, измерение направления движения и скорости хода. Эти задачи могут быть решены путем классического многоальтернативного обнаружения сигнала, предполагающего формирование K пространственных каналов, настроенных на обнаружение спутного следа в области изображений, L каналов по направлению движения и M каналов по скорости (т.е. всего $K \times L \times M$ каналов), и сравнение откликов каждого канала с некоторым порогом.

Превышение над порогом должно фиксировать наличие спутного следа с параметрами, согласованными с параметрами канала, а не превышение над порогом – отсутствие соответствующего спутного следа.

Параметры каналов должны выбираться таким образом, чтобы был перекрыт весь диапазон возможных вариантов местоположения судна, направления и скорости его движения.

Практическая реализация оптимальной обработки в данном случае не представляется возможной по целому ряду причин, главными из которых являются изменчивость спутного следа, отсутствие достоверных данных о параметрах помехи и непомерно большое число требуемых каналов обработки, превосходящее возможности даже современной вычислительной техники.

Отход от оптимального алгоритма обработки приводит к понижению точности измерения, однако повышает ее устойчивость к вариациям параметров. При этом иногда оказывается возможным существенно снизить требования к вычислительной технике.

Значительное уменьшение количества пространственных каналов обработки возможно при отказе от локализации спутного следа с высоким разрешением. Как правило, точность локализации можно ограничить размерами, сопоставимыми с размерами спутного следа.

Такая точность может быть обеспечена путем разбиения области изображения на отдельные окна и формирования для каждого окна лишь одного пространственного канала, обеспечивающего обработку, инвариантную к местоположению спутного следа в пределах окна. Размеры и положения окон должны быть таковыми, чтобы при любом местоположении спутного следа он полностью располагался в одном из окон. Это требование может быть реализовано, если размеры окна в два раза превосходят размеры спутного следа и окна перекрываются вдоль осей x , y наполовину.

Требование инвариантности обработки принимаемого колебания к местоположению спутного следа в окне может быть обеспечено при некогерентной спектральной обработке в соответствии с формулами (15), (20) и (21). Основанием для этого служит тот факт, что информация о местоположении следа в пределах окна сосредоточена полностью в фазовой части комплексного спектра. Поэтому при вычислении модуля спектра эта информация теряется и обработка оказывается инвариантной к местоположению следа в окне.

Спектр сигнала, приходящего под углом α к оси x повернут относительно спектра сигнала, приходящего вдоль оси x , на угол α к оси u (рис. 5 а – г).

Поэтому при использовании алгоритмов некогерентной спектральной обработки формирование множества спектров копий ожидаемого сигнала, соответствующих разным направлениям прихода, сводится к простому повороту на требуемые углы спектра, соответствующего одному направлению прихода.

Скорость хода судна влияет на спектр сигнала. По мере ее увеличения спектр смещается по радиусу в сторону нулевого значения, растет по уровню и искажается (рис. 6).

В ряде случаев искажения оказываются несущественными. Тогда формирование множества копий сигнала для множества каналов обработки по направлению и скорости хода сводится к размножению спектра одной единственной копии сигнала, полученной экспериментально, путем поворота спектра на разные углы в диапазоне от 0^0 до 180^0 и радиальным сдвигам спектра на величины, соответствующие возможным скоростям хода, с последующей коррекцией уровня.

Расчеты показывают, что спектры ожидаемых сигналов сосредоточены в относительно небольшой области (см. выделенные области на рис. 2) вне зоны действия помехи от взволнованной морской поверхности. Поэтому спектральные отсчеты принимаемого колебания, находящиеся вне выделенных областей, могут быть проигнорированы без потери качества обработки.

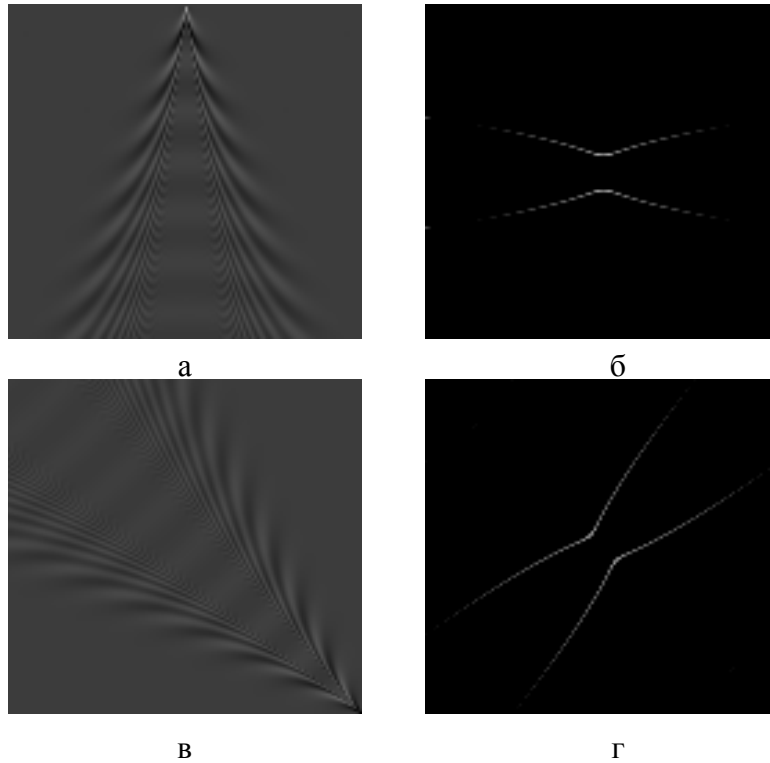


Рис. 5. Спутные следы (а, в) и пространственные спектры (б, г), соответствующие судну, движущемуся вдоль пространственной оси x (а, б) и под углом $\alpha = 135^{\circ}$ (в, г) к ней, рассчитанные для модели (1)

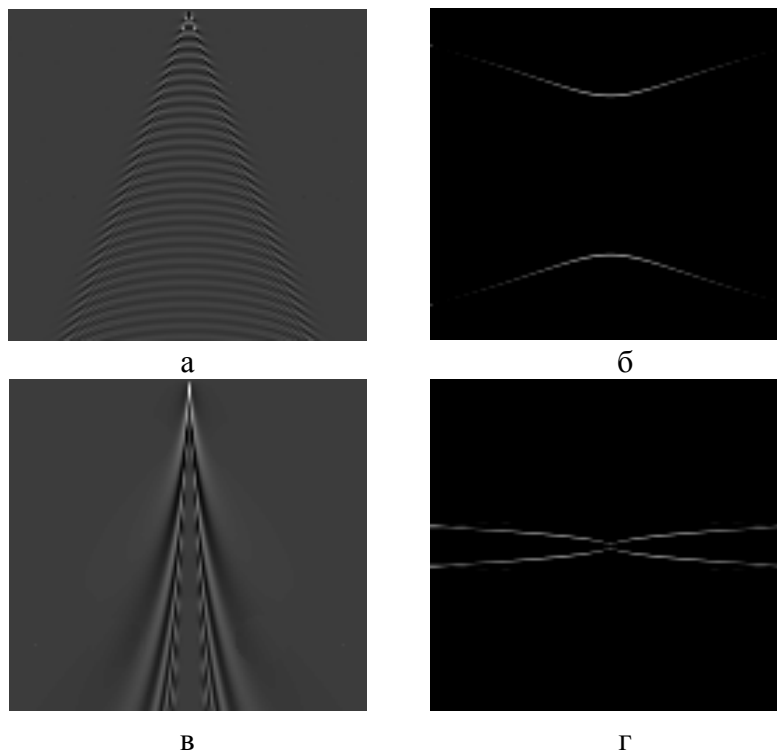


Рис. 6. Спутные следы и соответствующие пространственные спектры судов, движущихся в одном и том же направлении с малой (а, б) и большой (в, г) скоростями, рассчитанные для модели (1)

Пороги, необходимые для принятия решения о наличии судна в окне и параметрах его движения, могут быть рассчитаны адаптивно путем использования результатов обработки $Q_p(\vec{\lambda})$ из нескольких (P) соседних окон ($p = \overline{1, P}$).

Из результатов, соответствующих выбранным окнам и рассматриваемому каналу обработки, пригодными для формирования порогов могут быть те результаты, которые не содержат спутный след. Поэтому из P результатов надо изъять несколько наиболее мощных и по оставшимся сформировать оценки математического ожидания \tilde{m} и среднеквадратичного отклонения $\tilde{\sigma}$. Порог Π для рассматриваемого окна и канала обработки в нем может быть рассчитан в виде $\Pi = \tilde{m} + k_0 \tilde{\sigma}$, где k_0 – коэффициент, зависящий от уровня вероятности ложной тревоги.

Обобщенная функциональная схема системы обнаружения и измерения вектора скорости хода судов по изображению их спутного следа приведена на рис. 7.

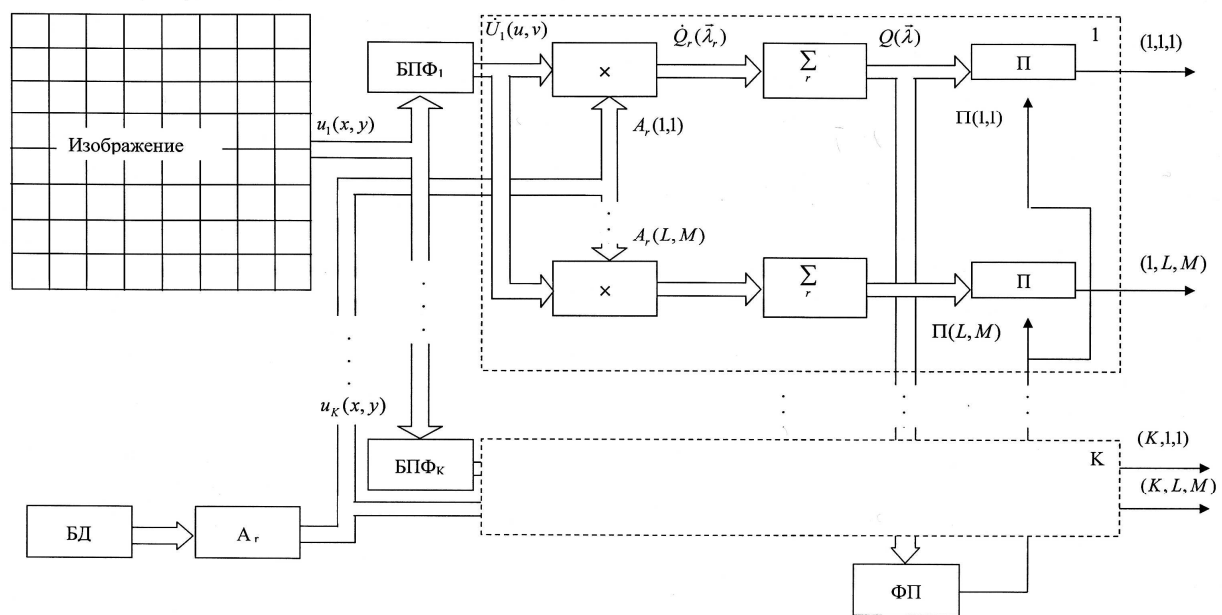


Рис. 7. Функциональная схема системы обнаружения и измерения скорости хода морских судов по изображению их спутного следа: БПФ – подсистема вычисления модуля двумерного пространственного спектра, \times – подсистема умножения спектральных отсчетов на весовые множители A_r , Σ – подсистема накопления результатов умножения, Π – подсистема сравнения с порогом, БД – база данных спектров спутных следов различных судов, A_r – подсистема расчета спектров ожидаемых сигналов для различных направлений движения и скоростей хода, ФП – подсистема формирования порогов

5. Помехоустойчивость квазиоптимальной системы обнаружения

Помехоустойчивость системы обнаружения исчерпывающе характеризуют, как известно, два вероятностных параметра: вероятность правильного обнаружения D и вероятность ложной тревоги F .

Предпороговый этап квазиоптимальной обработки, реализуемый в соответствии с формулой (15), состоит в накоплении промежуточных результатов обработки $|\dot{Q}_r(\vec{\lambda})|^2$.

Процедура накопления нормализует выходной эффект (отклик) $Q_r(\vec{\lambda})$. Поэтому величину $Q_r(\vec{\lambda})$ можно считать гауссовской.

При гауссовском законе распределения вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги описываются следующими выражениями [4]:

$$D = 1 - \Phi\left(\frac{\Pi - m_{H0}}{\sigma_{H0}}\right), \quad F = 1 - \Phi\left(\frac{\Pi - m_{H1}}{\sigma_{H1}}\right), \quad (22)$$

где $\Phi(x)$ – интеграл вероятности:

$$\Phi(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^x \exp(-t^2/2) dt,$$

m_{H0} и σ_{H0}^2 – соответственно математическое ожидание и дисперсия отклика при гипотезе H_0 – наличие сигнала, m_{H1} и σ_{H1}^2 – соответственно математическое ожидание и дисперсия отклика при гипотезе H_1 – отсутствие сигнала.

При малом уровне сигнала $\sigma_{H0}^2 \approx \sigma_{H1}^2$. Тогда качество работы системы обработки может быть охарактеризовано с помощью отношения сигнал-помеха, определяемого как отношение приращения математического ожидания отклика при наличии и отсутствии сигнала:

$$\gamma = \frac{m_{H0} - m_{H1}}{\sigma_{H1}}. \quad (23)$$

Из выражения (22) следует, что это отношение определяется вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги:

$$\gamma = \Phi^{-1}(1 - F) - \Phi^{-1}(1 - D), \quad (24)$$

где Φ^{-1} – функция, обратная функции Φ .

Выражение (24) может быть использовано для расчета требуемого отношения сигнал-помеха по заданным вероятностям правильного обнаружения и ложной тревоги.

В результате расчета величин m_{H0} , m_{H1} и σ_{H1}^2 были получены следующие соотношения:

$$m_{H1} = \sum_{r=1}^R \frac{2A_r^2 XY}{XYA_r^2 + 2\sigma_0^2}, \quad (25)$$

$$m_{H0} = \sum_{r=1}^R \frac{2A_r^2 XY}{XYA_r^2 + 2\sigma_0^2} \left(1 + \frac{A_r^2 XY}{4\sigma_0^2}\right), \quad (26)$$

$$\sigma_{H1}^2 \approx \sum_{r=1}^R \frac{4A_r^4 (XY)^2}{(XYA_r^2 + 2\sigma_0^2)^2}. \quad (27)$$

Подстановка выражений (25) – (27) в формулу (23) дает следующее выражение для расчета отношения сигнал-помеха:

$$\gamma = \frac{\sum_{r=1}^R A_r^2 \sqrt{XY}}{4\sigma_0^2}. \quad (28)$$

Результаты расчетов отношения сигнал-помеха по формуле (28) с использованием выражения (1) приведены на рис. 8 для различных скоростей хода судна и уровня помехи.

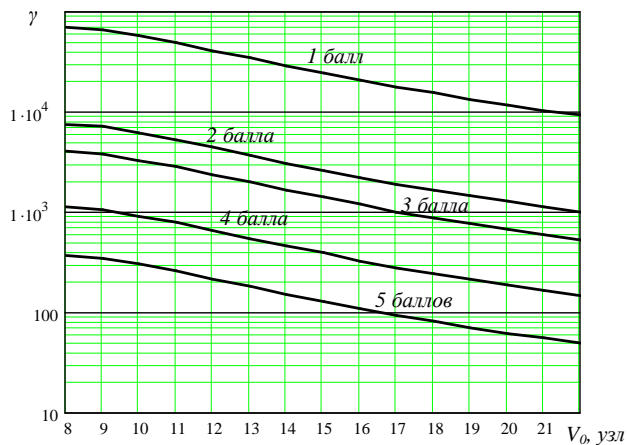


Рис. 8. Результаты расчета отношения сигнал-помеха

Из рисунка видно, что
 1) помехоустойчивость зависит от скорости хода судна; наибольшая помехоустойчивость наблюдается при скорости движения судна от 5 до 10 узлов;

2) с возрастанием уровня помех помехоустойчивость падает;

3) уверенное обнаружение судна по спутному следу оказывается возможным при помехах, соответствующих волнению моря даже при 5 баллах.

6. Выводы

1. На основе анализа изображений движущихся морских судов, полученных с помощью аэрокосмических систем наблюдения, разработаны математические модели их спутных следов.
2. Для разных моделей спутных следов и помех синтезированы оптимальные по критерию максимума функции правдоподобия алгоритмы обнаружения морских судов и измерения направления и скорости их хода.
3. Предложен квазиоптимальный алгоритм адаптивной многоканальной обработки изображений, обеспечивающей обнаружение судов и измерение параметров их движения.
4. Показано, что уверенное обнаружение судна по спутному следу оказывается возможным при помехах, соответствующих волнению моря даже при 5 баллах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костюков А.А. Взаимодействие тел, движущихся в жидкости / Костюков А.А. – Л.: Судостроение, 1972. – 310 с.
2. Фалькович С.Е. Оценка параметров сигналов / Фалькович С.Е. – М.: Сов. радио, 1970. – 336 с.
3. Вайнштейн Л.А. Выделение сигналов на фоне случайных помех / Л.А. Вайнштейн, В.Д. Зубаков. – М.: Сов. радио, 1960. – 378 с.
4. Горбань И.И. Обработка гидроакустических сигналов в сложных динамических условиях / Горбань И.И. – Киев: Наукова думка, 2008. – 272 с.

Стаття надійшла до редакції 27.01.2011