

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЦИФРОВОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ АНОМАЛИЙ С НЕИЗВЕСТНЫМИ УРОВНЯМИ НА ФОНЕ МЕШАЮЩИХ ПОМЕХ

Васильев К.К., зав. кафедрой Ульяновского государственного технического университета, e-mail: vkk@ulstu.ru
Лучков Н.В., e-mail: nik-lnv@mail.ru

Ключевые слова: алгоритм обнаружения, протяженные аномалии, многозональные изображения, случайное поле, квазиоптимальный приём.

Введение

Задачи обнаружения и оценивания параметров аномалий на многомерных изображениях представляют интерес для целого ряда приложений. Среди них можно выделить радио- и гидролокационные комплексы с пространственными антенными решетками, аэрокосмические системы глобального мониторинга Земли, системы технического зрения и др. [1-12]. В последнее время задачи обработки многомерных данных приобретают особую актуальность в связи с широким распространением методов мультиспектральной (до 10 спектральных диапазонов) и гиперспектральной (до 300 диапазонов) регистрации участков земной поверхности. Это обуславливает необходимость разработки новых методов качественного и количественного анализа аэрокосмических наблюдений как единой многомерной совокупности. Для ряда приложений особый интерес представляют задачи обнаружения и оценивания параметров аномалий на многозональных изображениях. Общее решение задачи обнаружения основано на построении модифицированного отношения правдоподобия и сравнении с пороговым значением. По результатам этого сравнения принимается решение в пользу гипотезы о наличии полезного сигнала или гипотезы о его отсутствии. Несмотря на большое число публикаций [1-12] по проблемам обнаружения сигналов, в настоящее время отсутствуют удовлетворительные решения задач синтеза, анализа и сравнения соответствующих алгоритмов, особенно для протяженных сигналов с неизвестными уровнями на отдельных кадрах изображения.

Анализ большого числа экспериментальных данных показывает, что полезный сигнал на реальных многозональных изображениях, как правило, сохраняет свою форму и структуру, но меняет интенсивность в зависимости от спектрального диапазона. В подобных задачах важную роль играют алгоритмы, работающие в режиме реального времени и обеспечивающие быструю реакцию на предъявляемое изображение наблюдаемой сцены при минимальных вычислительных затратах. В данной работе предложена новая структура квазиоптимального правила обнаружения протяженных сигналов с неизвестными уровнями на фоне коррелированных помех, а также дана сравнительная оценка эффективности процедур обнаружения протяженных сигналов с известными и неизвестными уровнями.

Выполнен синтез оптимальных алгоритмов обнаружения протяженных сигналов с неизвестными уровнями на произвольном числе кадров многозонального изображения. Дана новая структура квазиоптимального правила обнаружения протяженных сигналов с неизвестными уровнями на фоне коррелированных помех. Определена область решений параметров СП, для которых возможно применение алгоритма обнаружения с предварительной оценкой уровня полезного сигнала с заданным выигрышем в сравнении с алгоритмом обнаружения с известными значениями уровней полезного сигнала.

Синтез алгоритмов обнаружения сигналов

Представим многозональное изображение как совокупность массивов данных, состоящих из k кадров изображения, $\{z_{ijk}\}$, $k=1...N$, $i=1...M_1$, $j=1...M_2$, которые получены в результате пространственной дискретизации сигналов, поступивших от различных систем датчиков, рис. 1. При этом элементами СП являются яркости изображения в заданных точках ij,k .

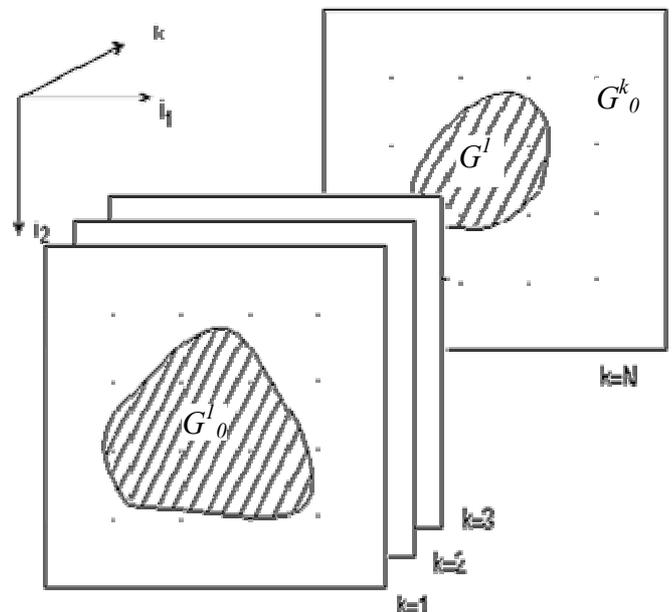


Рис. 1 Кадр многозонального изображения

При отсутствии полезного сигнала (гипотеза H_0) модель наблюдений можно представить аддитивной смесью:

$$z_{ijk} = x_{ijk} + \theta_{ijk}, \quad (i, j) \in G^k, \quad k = 1...N,$$

однородного случайного поля x_{ijk} с нулевым средним и заданной корреляционной функцией (КФ)

$B_{(ml)}^{kt} = M \{x_{ij}^k, x_{i+m, j+l}^t\}$ и пространственного белого шума θ_{ijk} с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_θ^2 .

При наличии полезного сигнала (гипотеза H_1) модель наблюдений запишется в виде:

$$z_{ijk} = x_{ijk} + s_{ijk} + \theta_{ijk}, \quad (i, j) \in G_0^k, \quad k = 1 \dots N,$$

$$z_{ijk} = x_{ijk} + \theta_{ijk}, \quad (i, j) \notin G_0^k, \quad k = 1 \dots N,$$

где G_0^k – область на k -м кадре, для которого возможно появление полезного сигнала с известными уровнями $s_{ijk}, (i, j) \in G_0^k$. Для упрощения выкладок будем считать, что на каждом из кадров эта область одинакова $G_0^k = G_0$. Если это не так, то можно расширить каждую из областей до размеров наибольшей, а полезный сигнал в добавленных точках считать нулевым.

Протяженный в пространстве полезный сигнал можно записать в виде $s_{ijk} = s_k f_{ijk}$, где s_k – неизвестные уровни сигнала на отдельных кадрах изображения; f_{ijk} – известные значения размеров сигнала, расположенно на k -м кадре [2].

Оптимальный алгоритм обнаружения аномалий получен на основе модифицированного отношения правдоподобия [3-5]:

$$L = \frac{w(\{z_{ijk}\} / H_1, \tilde{s}_1 \dots \tilde{s}_N)}{w(\{z_{ijk}\} / H_0)}, \quad \text{где } \tilde{s}_k, \quad k = 1 \dots N, \quad \text{оценки}$$

неизвестных уровней полезного сигнала, полученные с помощью метода максимального правдоподобия.

Аппроксимируя условные вероятности $w(\{z_{ij}^k\} / H_1, s^1 \dots s^N)$ и $w(\{z_{ij}^k\} / H_0)$ гауссовскими, решающее правило оптимального обнаружения протяженных сигналов по совокупности наблюдений на N кадрах может быть получено в виде [3]:

$$L = \tilde{s}_k f_{ijk} V_{vtijk}^{-1} (z_{ijk} - \tilde{x}_{ijk}) \begin{cases} > L_0 - \text{сигнал есть,} \\ < L_0 - \text{сигнала нет,} \end{cases} \quad (1)$$

где \tilde{x}_{ijk} – оптимальный (в смысле минимума дисперсии ошибки) прогноз случайного поля, сделанный на основе всех наблюдений Z_0 , в которых полезный сигнал заведомо отсутствует; $V = P_\Sigma + V_\theta$; P_Σ – ковариационная матрица ошибок при оптимальном прогнозировании. Отметим, что в соответствии с правилами тензорного исчисления запись вида $a_k b_k$ эквивалентна $\sum_{k=1}^N a_k b_k$, т.е. предполагается суммирование по одинаковым нижним индексам.

Неизвестные оценки $\tilde{s}_k, k = 1 \dots N$, можно определить из условия максимума

$w(\{z_{ijk}, (i, j, k) \in \Omega_0\} / Z_0, H_1)$, или минимума выражения $(z_{lvt} - m_{lvt}) V_{lvtijk}^{-1} (z_{ijk} - m_{ijk})$. После дифференцирования квадратичной формы может быть получена следующая система линейных уравнений:

$$\sum_{k=1}^N (f_{lv}^t V_{lvij}^{-1} f_{ij}^k) s^k = \sum_{k=1}^N f_{lv}^t V_{lvij}^{-1} (z_{ij}^k - \tilde{x}_{ij}^k), \quad t = 1 \dots N \quad (2)$$

Существенным недостатком всех рассмотренных алгоритмов является достаточно сложный анализ эффективности обнаружения сигналов. В процессе поиска путей упрощения такого анализа удалось получить еще одну процедуру обнаружения протяженных сигналов. Для этого достаточно в (1) и (2) подставить известную связь между тензорами оценок

$$\tilde{x}_{ijk} = \tilde{x}_{\Sigma ij} + P_{lvijk} V_\theta^{-1} (z_{lvt} - \tilde{x}_{\Sigma lvt}), \quad (i, j) \in G_0^k, \quad k = 1 \dots N, \quad \text{где}$$

\tilde{x}_{ijk} – оптимальная оценка СП в области $(i, j) \in G_0^k, k = 1 \dots N$, сделанная на основе всех наблюдений $\{z_{lvt}\}, (l, v) \in G_0, t = 1 \dots N$; P – ковариационная матрица ошибок фильтрации. После элементарных преобразований с учетом того, что $P(E + V_\theta^{-1} P_\Sigma) = P_\Sigma$,

$z - \tilde{x}_\Sigma = (E + V_\theta^{-1} P_\Sigma)(z - \tilde{x})$, находим следующую формулу решающего правила:

$$L = \frac{\tilde{s}_k f_{ijk} (z_{ijk} - \tilde{x}_{ijk})}{\sigma_\theta^2} \begin{cases} > L_0 - \text{сигнал есть,} \\ < L_0 - \text{сигнала нет.} \end{cases} \quad (3)$$

При этом неизвестные оценки полезного сигнала $\tilde{s}_k, k = 1 \dots N$ получаем из следующей системы линейных уравнений:

$$\sum_{k=1}^N (f_{lv}^t (V_\theta - P)^{tk} f_{ij}^k) s^k = \sigma_\theta^2 \sum_{t=1}^N f_{ij}^t (z_{ij}^t - \tilde{x}_{ij}^t), \quad t = 1 \dots N.$$

Поскольку алгоритм (3), в отличие от известных обнаружителей, не требует трудоёмкого расчёта ковариационных матриц ошибок прогнозирования, то его удобно использовать не только при реализации систем обработки изображений, но и для анализа эффективности обнаружения.

Сравнительный анализ алгоритмов

Для определения области применения предложенного алгоритма (3) был проведён расчёт зависимости вероятности правильного обнаружения Pd от уровня полезного сигнала S , обеспечивающего заданные значения вероятности ложной тревоги $Pf = 0,001$. При этом на рис. 3 моделируемое СП содержит полезный сигнал, имеющий одинаковые уровни значений на всех кадрах изображения. На рис. 4 на моделируемом изображении полезный сигнал имеет различные уровни значений на всех кадрах изображения. Графики «1» на рис. 2 и рис. 3 построены с использованием оптимального алгоритма обнаружения (1), а графики «2» на рис. 2 и рис. 3 – алгоритма с предварительным оцениванием полезного сигнала (3). Использовались следующие статистические параметры моделируемого СП: $\sigma_X^2 = 1; \sigma_\theta^2 = 1; \rho = 0,9; \rho_k = 0,9$ размер полезного сигнала 7×7 . Для определения порогового уровня, обеспечивающего заданное значение вероятности ложной тревоги и вероятности правильного обнаружения, проведено статистическое моделирование объёмом 10 000 опытов.

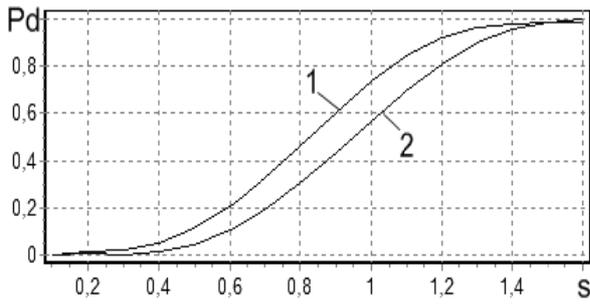


Рис. 2 Зависимость вероятности правильного обнаружения от уровня полезного сигнала

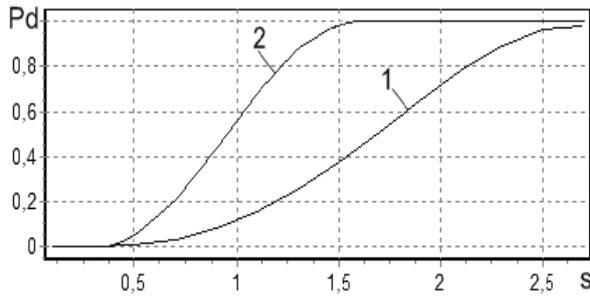


Рис. 3 Зависимость вероятности правильного обнаружения от уровня полезного сигнала

Анализ результатов моделирования алгоритмов обнаружения, представленных на рис. 2 и рис. 3, позволяет сделать вывод, что при одинаковых значениях полезного сигнала на различных кадрах многомерного изображения использование алгоритма (3) приводит к незначительному снижению вероятности правильного обнаружения в сравнении с использованием оптимального алгоритма обнаружения (1). Но при условии, что значения уровней сигнала различны на различных кадрах СП, алгоритм с предварительной оценкой уровней сигнала (3) имеет значительное преимущество по значениям вероятности правильного обнаружения в сравнении с оптимальным алгоритмом (1). С увеличением значений вероятности правильного обнаружения относительный выигрыш по уровню полезного сигнала увеличивается.

Учитывая, что условие различия значений сигнала для разных кадров СП является типичным случаем для реальных многозональных изображений, возникает задача определения области применения, предложенного алгоритма (3), в которой выигрыш обнаружения будет наибольшим в сравнении с оптимальным алгоритмом обнаружения (1). В связи с этим были проведены дополнительные исследования эффективности алгоритма (3) в сравнении с оптимальным алгоритмом обнаружения (1). На рис. 4 – рис. 7 представлены некоторые результаты расчетов при заданных значениях вероятности ложной тревоги $P_f=0,001$ и вероятности правильного обнаружения $P_d=0,9$, иллюстрирующие зависимости относительно-

го выигрыша $Q = 20 \log \frac{S}{\tilde{S}}$ от ряда статистических параметров наблюдаемой сцены обнаружения, где S – уровень полезного сигнала, обеспечивающий заданные вероятностные характеристики оптимального алгоритма (1); \tilde{S} – уровень полезного сигнала, обеспечивающий заданные вероятностные характе-

ристики алгоритма с предварительным оцениванием значения уровня сигнала (3). При этом проведено моделирование СП, состоящего из двух кадров изображения, на одном из которых полезный сигнал присутствует, а на другом отсутствует.

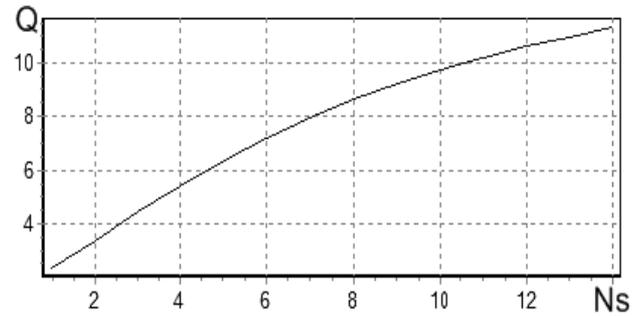


Рис. 4 Зависимость относительного выигрыша от размера полезного сигнала

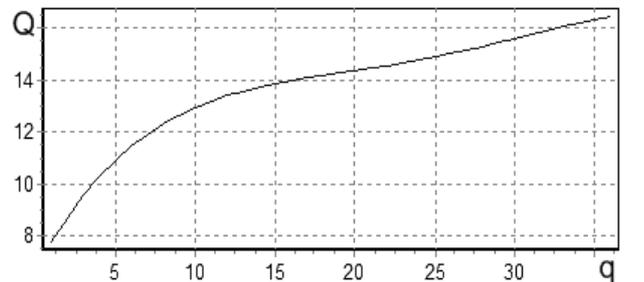


Рис. 5 Зависимость относительного выигрыша от уровня фона

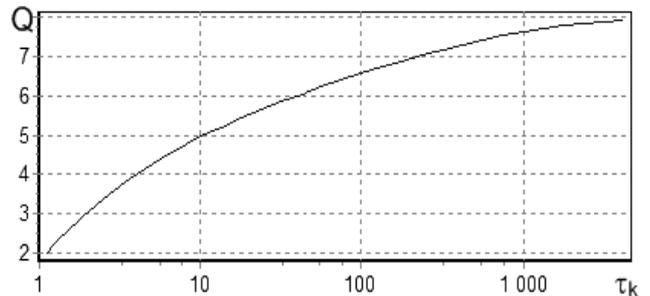


Рис. 6 Зависимость относительного выигрыша от межкадрового интервала корреляции

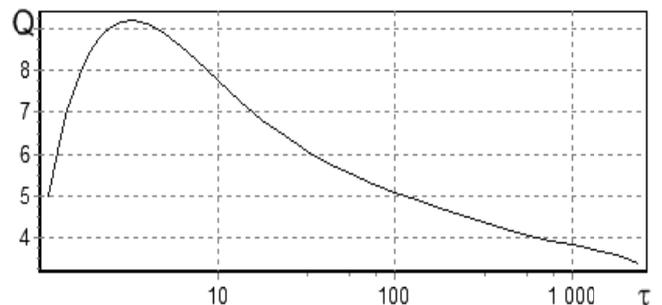


Рис. 7 Зависимость относительного выигрыша от внутрикадрового интервала корреляции, $N_s=7$

Анализ приведенных графиков показывает, что с увеличением размера полезного сигнала выигрыш Q , при использовании алгоритма обнаружения с предварительным оцениванием в сравнении с оптимальным алгоритмом, увеличивается. Так, при уровне полезного сигнала

равного 14, выигрыш составляет 11,5 дБ. Выигрыш Q растёт с увеличением значений уровня фона наблюдаемой сцены $q = \frac{\sigma_X^2}{\sigma_\theta^2}$, достигая 16,2 дБ при $q=35$. Увеличе-

ние уровня дисперсии аддитивного шума σ_θ^2 приводит к уменьшению относительного выигрыша Q , что объясняется значительным увеличением дисперсии ошибки предварительного оценивания полезного сигнала. Также выигрыш Q растёт с увеличением межкадрового интервала корреляции $\tau_k = \frac{1}{1 - \rho_k}$ и стремится к уровню 9 дБ,

где ρ_k – межкадровый коэффициент корреляции.

Проанализировав зависимость относительного выигрыша от внутрикадрового интервала корреляции, рис. 7, можно сделать вывод, что величина относительного выигрыша Q стремится к уровню 3дБ и имеет максимум при определенных соотношениях значений внутрикадрового интервала корреляции $\tau = \frac{1}{1 - \rho}$ и протяженности

полезного сигнала N_s , где ρ – внутрикадровый коэффициент корреляции. Дополнительные исследования показали, что при небольшой протяженности полезного сигнала N_s значения относительного выигрыша Q принимают максимальное значение при $\tau \approx \alpha N_s$, $\alpha \approx 0,5$. При увеличении значения N_s коэффициент α уменьшается и стремится к значению $\alpha \approx 0,2$.

Заключение

Синтез алгоритмов обнаружения протяженных сигналов с неизвестными уровнями на произвольном числе кадров многозонального изображения позволил получить новую структуру квазиоптимального правила обнаружения протяженных сигналов с неизвестными уровнями на фоне коррелированных помех. В её основе лежат оптимальный алгоритм обнаружения аномалий на основе модифицированного отношения правдоподобия и предварительная оценка уровня полезного сигнала методом максимального правдоподобия. Найдены необходимые аналитические соотношения и дана сравнительная оценка эффективности процедур обнаружения протяженных сигналов с известными и неизвестными уровнями. Выигрыш при вероятности правильного обнаружения уровня 0.9 может составлять до 8 дБ. Полученные результаты позволяют определить область решений параметров СП, для которых возможно применение алгоритма обнаружения с предварительной оценкой уровня значений полезного сигнала с заданными значениями вероятности ложной тревоги и вероятности правильного обнаружения, обеспечивая максимально возможный относительный выигрыш в сравнении с применением оптимального алгоритма обнаружения. При увеличении внутрикадрового интервала корреляции выигрыш стремится к 3 дБ, а при увеличении межкадрового интервала корреляции выигрыш стремится к 9 дБ. Разработан пакет программ, позволяющий обрабатывать реальные многозональные изображения, имеющий важное прикладное значение для создания наукоемких технологий обработки многозональных аэрокосмических изображений.

Литература

1. Аникин И.В. Методы нечеткой обработки, распознавания и анализа предметов / И.В. Аникин, М.Р. Шагиахметов // Распознавание образов и анализ сцен: труды 5 межд. конф. – С.-Петербург, 2002. – т. 1. – С. 16-20.
2. Васильев К. К. Прикладная теория случайных процессов и полей / К. К.Васильев, В.А. Омельченко – Ульяновск: УГТУ, 1995.– С. 255.
3. Васильев К.К. Четыре типа оптимальных алгоритмов обнаружения аномалий на многомерных изображениях / К.К. Васильев // Радиолокация, навигация, связь: Труды 13-ой Международной научно-технической конференции – Воронеж, 2007.- том. 1 – С. 171-176.
4. Васильев К.К., Дементьев В.Е. Алгоритмы оптимального обнаружения сигналов с неизвестными уровнями на многозональных изображениях. – Труды VIII МНК «Цифровая обработка сигналов и её применение»: – 2006, т. 2, С. 433-436.
5. Васильев К.К., Крашенинников В.Р. Статистический анализ многомерных изображений / К.К. Васильев, В.Р. Крашенинников. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – С. 170.
6. Грузман И.С., Киричук В.С., Косых В.П., Перетягин Г.И., Спектор А.А. «Цифровая обработка изображений в информационных системах». – Новосибирск, НГТУ, 2002.
7. Прэтт, У. «Цифровая обработка изображений»: пер. с англ. / У. Прэтт; под ред. Д.С. Лебедева. – М., 1982. – Кн. 1. – 312.; Кн. 2 – С. 480.
8. Dikshit S.S. A Recursive Kalman Window Approach to Image Restoration // IEEE Trans., 1984, Vol. com – 32, Jan., 125-139 pp.
9. Luchkov N., Dementiev V. Detection effectiveness analysis for elongated signals on multidimensional grids // PRIA 2010.
10. Soifer V.A., Kotlyar V.V., Khonina S.N., and Khramov A.G. Pattern Recognition and Image Analysis 6(4) 710 (1996).
11. Vasil'ev K.K. Digital Processing of Multizone Images. – Pattern Recognition and Image Analysis, 2008, vol.18, №3, 376-380 pp.
12. Woods J.W. Two-dimensional Kalman filtering //Topics in Applied Physics, Berlin, 1981, v.42, 155-208 pp.

DETECTION DIGITAL EFFECTIVENESS FOR ELONGATED SIGNALS OF UNKNOWN VALUES AGAINST A NUISANCE BACKGROUND

K. Vasil'ev, N. Luchkov

There are accomplished syntheses of optimal detection algorithms for elongated signals of unknown values on a multizone image for an arbitrary frame count in present article. The quasioptimal decision rule for elongated signals of unknown values on a field of correlated nuisances has been offered. Analytical results enabling to define the conditions of using the detection algorithms for elongated signals of unknown values instead of detection algorithms for elongated signals of the well-known values have been obtained with the given profit.