

*В.В. ЖИРНОВ, канд. техн. наук, С.В. СОЛОНСКАЯ,  
С.Ю. ШАБАНОВ-КУШНАРЕНКО, д-р техн. наук*

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА ФУНКЦИОНАЛЬНО-СЕМАНТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

### **Введение**

В связи с увеличением чувствительности приемников существенно увеличилось влияние пассивных помех типа «ангел-эхо» на качество радиолокационного обнаружения маловысотных целей. Это обуславливает актуальность разработки новых методов обработки сигналов и оценки их эффективности. Настоящая работа посвящена сравнению эффективности новых методов функционально-семантической обработки (ФСО) радиолокационных изображений и известных энергетических методов обработки радиолокационных сигналов в обзорных РЛС.

ФСО – это совокупность операций, служащих для представления смысла функциональной знаковой системы (картины, виртуального изображения, явления, текста и д.т.) в виде записи на некотором формализованном семантическом (смысловом) языке [1, 2]. Обычно ФСО связана с операциями над детерминированными величинами. Однако в рассматриваемом случае она представляет собой смешанную логико-энергетическую обработку сигналов, где кроме основных логических операций имеется какая-то часть вероятностных энергетических операций, связанных с пороговым сравнением при переходах на логические уровни обработки. При выполнении энергетических операций перехода на логический уровень обработки возникает случайная составляющая ФСО, по величине которой имеется возможность сравнения эффективности интеллектуальных и энергетических методов.

При ФСО виртуальных спектральных изображений для обзорных РЛС неопределенность или случайные составляющие возникают также при переходе на семантический уровень описания изображений с помощью предикатов (функция, определенная на множестве  $A$  событий как семантическая составляющая). Случайные составляющие трансформируются в суммарную ошибку при формировании различительных предикатных признаков  $L_1, \dots, L_n$ , описывающих характер и поведение виртуальных изображений спектра флуктуаций пачки импульсов [1,2,3], принадлежащих классам  $S_1, \dots, S_m$  и связанных предикатным уравнением  $P(L_1, \dots, L_n; S_1, \dots, S_m) = 1$ .

В настоящей работе при оценке работоспособности и эффективности систем семантической обработки использовались два вида моделирования: математическое и смешанное. С их помощью формировались модели виртуальных спектральных изображений помех и сигналов – искусственная и реальная.

В первой модели для проведения каждого испытания с помощью датчика случайных чисел и данных корреляционных связей радиолокационных помех и характеристик сигналов формировалась пачка импульсов. Затем путем преобразования Фурье получали спектральное изображение флуктуаций огибающей пачки импульсов.

Во второй модели спектральные изображения формировались путем выбора числовых усредненных значений спектральных составляющих  $X_i$  спектров радиолокационных отметок сигналов, отраженных от объектов заданного класса  $S_1, \dots, S_m$ . Затем на них накладывались случайные составляющие с заданным законом распределения  $f_i(x_1, \dots, x_n)$  по одному из известных алгоритмов [6].

Сравнение эффективности семантической обработки виртуальных спектральных изображений радиолокационных отметок с эффективностью энергетических методов цифро-

вого оптимального и квазиоптимального обнаружения радиолокационных сигналов проводилось в условиях стационарных и нестационарных пассивных помех. Поэтому была выбрана такая модель пассивных помех, которая формировала бы поток, пригодный для обработки известными методами оптимального и квазиоптимального обнаружения радиолокационных сигналов и новыми методами семантической обработки радиолокационных изображений на фоне пассивных помех.

Физические и математические модели пассивных помех формировались на основе экспериментальных данных радиолокационных отражений от местных предметов, морской поверхности, гидрометеоров (дождя, облаков, тумана) и атмосферных турбулентностей (ангел-эхо) [5]. В этих моделях мешающие объекты представлены в виде совокупности большого числа независимых и случайно расположенных отражающих элементов, перемещающихся друг относительно друга и относительно РЛС. Считалось, что отраженный от такой совокупности "блестящих" точек сигнал представляет собой нормальный случайный процесс. В результате задача математического описания радиолокационных отражений сводилась к нахождению корреляционных функций соответствующих стационарных и нестационарных процессов. При этом корреляционная матрица или матрица дисперсий  $\Phi$  задавалась в виде суммы корреляционной матрицы шума  $I$  и корреляционной матрицы помехи  $\rho$ :

$$\Phi = I + \eta\rho,$$

где  $\eta$  – относительная мощность внешней (пассивной) помехи.

Корреляционные связи задаются корреляционной матрицей вида

$$\rho_{i,l} = \left\{ \rho_1^{(i-l)^2} \right\}_{l=1}^M,$$

где  $\rho_1$  – коэффициент корреляции отсчетов пассивной помехи, разделенных интервалом повторения импульсов в пачке.

Таким образом, удалось смоделировать прохождение одинаковых моделей сигналов через тракты энергетической и функционально-семантической обработки и выполнить сравнительную оценку их эффективности. При этом в качестве показателя эффективности использовались вероятность правильного обнаружения отметок целей и вероятность правильной идентификации спектральных изображений при фиксированной вероятности ложной тревоги.

### **1. Энергетический метод обработки радиолокационных сигналов и вероятность правильного обнаружения отметок подвижных объектов на фоне пассивных помех**

Для обнаружения отметок целей на фоне отмеченных моделей пассивных помех используются оптимальный и квазиоптимальные классические методы энергетической обработки радиолокационных сигналов [4, 8]. При этой обработке формируется  $M$ -мерный вектор пачки

$u_i = \left\{ u_1^{(i)} \right\}_{l=1}^M$  отраженных сигналов на входе амплитудного детектора (АД).

Считая текущий элемент обработки центральным элементом пачки, выполняются следующие операции:

Формируется набор из  $N$  пачек импульсов вектор-столбцов матрицы  $M \times N$  суммы комплексных амплитуд пассивной помехи, сигнала и шума. Здесь  $M$  – размер пачки  $i$ -го азимутального элемента по дальности.  $N$  – число элементов дальности. Каждый  $i$ -й вектор-столбец комплексных амплитуд помехи и шума  $Y_i = \left\{ y_1^{(i)} \right\}_{l=1}^M$  матрицы  $M \times N$  формируется как результат преобразования  $Y_i = T \xi_i$   $M_i$ -мерного вектора белого шума  $\xi = CN(0, \Phi)$  в фильтре с матричной импульсной характеристикой (МИХ)  $T$ , равной левому «корню» матрицы  $\Phi$ , удовлетворяющей равенству  $TT^* = \Phi$  [4, 8].

Далее определяются характеристики оптимального и квазиоптимального обнаружения для когерентной пачки при наличии внутреннего шума приемника и пассивной помехи.

Характеристики оптимального обнаружения для когерентной пачки при наличии внутреннего шума приемника и пассивной помехи определяются зависимостью вероятности правильного обнаружения  $D$  от величины сигнала при заданной вероятности ложной тревоги  $F$  согласно формуле [8]

$$D = F^{\frac{1}{1+\mu}}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – отношение сигнала к помехе плюс шума.

$$\mu = h^2 x^*(f_s) \Psi x(f_s), \quad (2)$$

где  $\Psi = \Phi^{-1}$  – матрица обратная корреляционной матрице помех;  $x(f_s)$  – сигнал с частотой Доплера  $f_s$ ;  $h$  – относительный (по отношению к шуму) уровень полезного сигнала.

При этом пассивная помеха может задаваться с различной степенью между периодных корреляционных связей (для местных предметов –  $\rho = 0.99$ , для метеообразований –  $\rho = 0.85-0.9$ , для помех типа «ангел-эхо» –  $\rho = 0.75-0.85$ ) [5].

Сравнение предельных возможностей моделей квазиоптимальных систем межпериодной обработки на основе некогерентного накопления (суммирование квадратов модулей) показывает, что связанные с этим потери определяются длительностью пачки импульсов и для пачек средней длительности порядка 100 в среднем составляют от 3 до 4.5 дБ [8,9].

## 2. Функционально-семантическая обработка спектральных изображений радиолокационных отметок

Для оценки эффективности семантического метода обработки спектральных изображений отметок при селекции подвижных объектов на фоне нестационарных пассивных помех выполняем следующие операции;

1. Формируем спектральные изображения флуктуаций огибающей для каждой пачки импульсов ( $M$ -мерный вектор – столбец в матрице  $M \times N$ ). При этом для каждой пачки сигнала можно менять частоту Доплера  $f$  или величину сигнала для заданной дальности. С помощью таких операций моделировали разные радиолокационные ситуации: полет одного летательного аппарата по всем элементам дальности на фоне помехи, полет  $N$  самолетов с разными скоростями, находящихся на разных дальностях. В соответствии с моделями реальных сигналов [3, 4] было смоделировано 6 типов реальных эталонных пачек радиолокационных сигналов целей и помех и их спектральные изображения  $S_j$ . Каждому типу спектрального изображения соответствовала определенная комбинация нулей и единиц.

2. Семантический или смысловой анализ (СА) полученных спектральных изображений будем проводить на логическом уровне обработки с помощью алгебры конечных предикатов (АКП). АКП – характеризуется алфавитом событий  $A$ , состоящим из  $k$  символов  $\alpha_1, \dots, \alpha_k$ , и алфавитом переменных  $B$ , состоящим из  $n$  символов  $x_1, \dots, x_n$ , с помощью которых может быть записан любой  $n$ -местный  $k$ -й предикат  $f(x_1, \dots, x_n)$ , заданный над алфавитом событий  $A$ . В данной работе для описания спектральных изображений выбран  $n$ -местный вторичный предикат  $f(x_1, \dots, x_n)$ .

Пусть  $M = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$  – фиксированное множество, состоящее из  $n$  элементов – значений спектральных составляющих (компонент) в  $n$  спектральных каналах,  $A$  – некоторое из его подмножеств  $A \subseteq M$ , спектральные составляющие  $q_i$  которого превышают некое пороговое значение  $|G_n| = |G_{\max}|/2$ . Для множества  $M$  составляем набор логических эле-

ментов  $(t_1, t_2, \dots, t_n)$  по следующему правилу: если  $q_i \in A$ , то  $t_i = 1$ ; если  $q_i \notin A$ , то  $t_i = 0$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Набор  $(t_1, t_2, \dots, t_n)$  является характеристикой множества  $A$  как спектральной картины.

Предикат  $f(x)$  на множестве спектральных каналов  $M$ , соответствующий множеству  $A$  спектральных каналов, превысивших порог, с характеристикой  $(t_1, t_2, \dots, t_n)$ , запишется формулой

$$f(x) = t_1 x(q_1) \vee t_2 x(q_2) \vee \dots \vee t_n x(q_n).$$

Для идентификации со спектральными типами была сформирована система предикатов-признаков  $L_i$  [1, 3, 7], «чувствительных» к количеству и разрывности нулей, единиц и групп сомкнутых единиц (спектральных пиков) в предикате  $f(x)$

Был введен еще один вид предиката –  $F(y)$ , построенный на множестве  $F$ , элементы  $f_1, f_2, \dots, f_{k-1}$  которого определены путем суммирования по модулю два каждого элемента  $t_i$  со смежным элементом. Для определения количества спектральных пиков использована

арифметическая сумма  $\Phi$  предиката  $F(t)$   $\Phi = \sum_i^{k-1} f_i = \sum_{i=1}^{k-1} [t_i + t_{i+1}] M_2$ , где индекс  $M_2$

означает суммирование по модулю два. Анализ возможных значений  $\Phi$  для различных типов спектральных картин показывает, что для одиночной группы сомкнутых единиц в множестве  $F$  результат суммирования всегда равен двум, независимо от ширины пика, т.е. от количества сомкнутых единиц. Для двух групп сомкнутых единиц результат такой операции равен четырем, для трех пиков – шести и т.д. В признаке  $L_i^{j_i}$ , верхний индекс  $j_i$  указывает на наличие в предикате  $f(x)$  на количество спектральных пиков и определяется по следующему правилу: если  $\Phi \geq 2$ , то  $j_i = \Phi/2$ , иначе  $j_i = 0$ . В модели  $j_i = P_i$ .

Введен признак  $L_2^{l_i}$ , верхний индекс которого или номер предиката  $l_i$  указывает на количество нулей между группами единиц в предикате  $A(x)$ . В модели  $l_i = L_i$ . Для учета отличий спектральных картин по энергетике принятого сигнала введен признак  $L_3^{s_i}$ , верхний индекс которого указывает на количество единиц в предикате  $A(x)$ . В модели  $s_i = E_i$ .

Алгоритм идентификации типов  $S_j$  спектральных изображений, описывается системой предикатных уравнений, составленной исходя из того, что каждому спектральному типу  $S_j$  (рис. 1, 2, 3, 4) соответствует определенная комбинация нулей и единиц в предикате  $A(x)$ . К примеру, тип  $S_1$  «проявляется» в  $A(x)$  в виде «одиночной» группы единиц среди всех остальных нулей. Для типа  $S_2$  характерны две группы единиц, количество нулей между которыми меньше или равно двум. Тип  $S_3$  представлен в виде одной или двух групп единиц и отстоящей от этой группы дополнительной «одиночной» двойки единиц и т.д.

На рис. 1, 2, 3, 4 показаны 6 типов характерных пачек радиолокационных сигналов с наложенными на них случайными составляющими и их спектральные изображения.

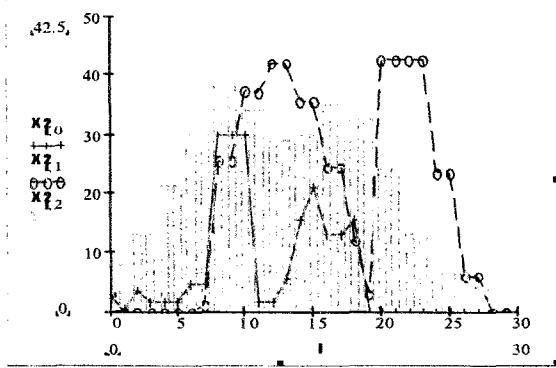


Рис. 1

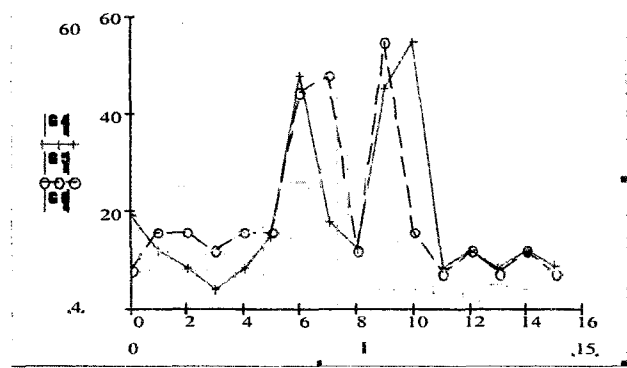


Рис.2

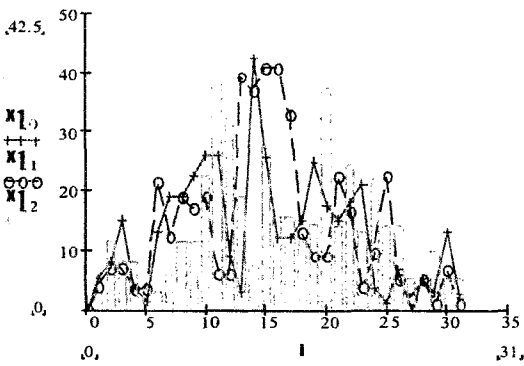


Рис. 3

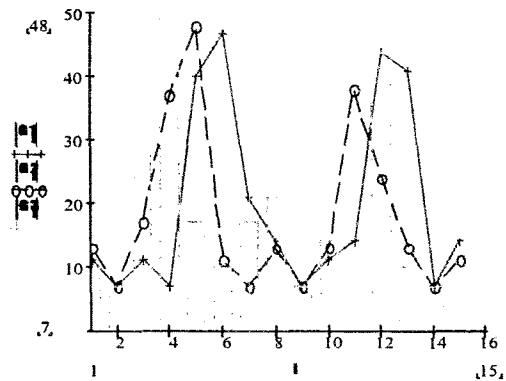


Рис.4

На рис. 5, 6 показаны виды предикатов  $f(x)$  и  $F(y)$

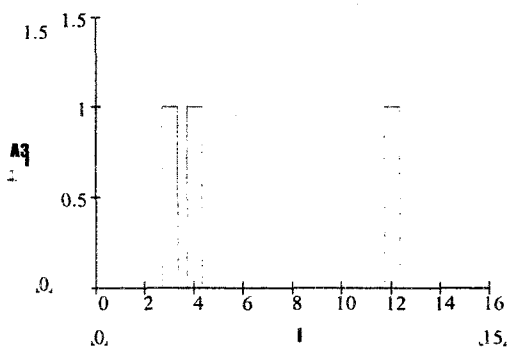


Рис. 5

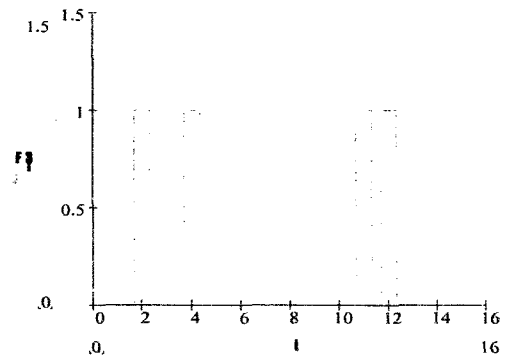


Рис. 6

Определены характеристики предикатных признаков;  $S_i = E_i$  – энергетического как сумму единиц в  $f(x)$ ,  $j_i = P_i$  – количества пиков и  $l_i = L_i$  – количество нулей между пиками.

Предикатные уравнения идентификации типов  $S_j$  спектральных изображений составлены для случая первой модели получения спектральных изображений путем преобразования Фурье пачек импульсов, сформированных с помощью датчика случайных чисел, корреляционной матрицы помех и характеристик сигналов подвижных объектов

$$S := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..N-2 \\ \left| \begin{array}{l} s_i \leftarrow 1 \text{ if } PK_i = 0 \wedge E_i > 0 \\ s_i \leftarrow 5 \text{ if } PK_i = 1 \wedge E_i \leq 3 \\ s_i \leftarrow 3 \text{ if } PK_i \geq 2 \wedge \max(L_i) \leq 2 \wedge E_i \leq 2 \\ s_i \leftarrow 2 \text{ if } PK_i \geq 2 \wedge \max(L_i) \geq 2 \wedge E_i \geq 2 \\ s_i \leftarrow 4 \text{ if } PK_i = 1 \wedge E_i \leq 1 \wedge (NI_i)_0 \leq 1 \\ s_i \leftarrow 1 \text{ if } PK_i = 1 \wedge E_i > 3 \wedge (NI_i)_0 \geq 1 \\ s_i \leftarrow 1 \text{ if } PK_i = 1 \wedge (NI_i)_0 \geq 3 \end{array} \right. \\ s \end{array} \right.$$

Здесь:  $PK_i$  – количество спектральных пиков,  $NI_i$  – количество нулей до пиков, начиная с нулевого канала,  $S_i$  – результат идентификации спектральных изображений с известными типами: при  $S_i=1$ ,  $S_i=2$  – спектральное изображение отметок подвижных отметок, а при других значениях  $S \geq 3$  – изображения пассивной помехи.

### 3. Результаты сравнительной оценки эффективности энергетического и функционально-семантического методов обработки радиолокационных сигналов

Для проведения экспериментальных исследований проводилось математическое моделирование полета маловысотной цели типа ЯК-52. Самолет осуществлял полет в направлении РЛС 19Ж6 со скоростью 250 м/с на высоте 800 м. Проводилось радиолокационное обнаружение цели на фоне пассивных помех. При этом формировался массив данных из 1000 отметок с дискретностью по дальности 150 м. Все операции по селекции воздушной цели и распознаванию радиолокационных спектральных изображений на фоне помех выполнялись автоматически и в реальном масштабе времени.

Для каждой дальности определялись вероятность правильного обнаружения радиолокационных отметок самолета (энергетический метод) и вероятность правильной идентификации их спектральных изображений (функционально-семантический метод) на фоне пассивных помех интенсивностью 1000 относительных единиц.

Для сравнительной оценки эффективности указанных методов была использована следующая методика.

#### 1. Исследование эффективности энергетического метода обработки сигналов.

- Рассчитывалась вероятность правильного обнаружения  $D$  радиолокационных отметок на фоне пассивных помех при оптимальной обработке когерентных пачек сигналов при заданной вероятности ложной тревоги  $F=10^{-2}$

- Определялась вероятность правильного обнаружения  $D$  радиолокационных отметок для квазиоптимальной межпериодной обработки на основе некогерентного накопления пачек сигналов при заданной вероятности ложной тревоги  $F=10^{-2}$ .

- Проводилось построение кривых оптимального и квазиоптимального обнаружения отметок моделируемой цели. Результаты расчетов приведены на рис. 9.

#### 2. Исследовалась эффективность функционально-семантического метода обработки сигналов.

- Проводилось сравнение уровней ложной тревоги  $F$  при энергетической и функционально-семантической обработке при отсутствии отраженного от цели сигнала и при мощной помехе ( $h = 1000$ ). На рис. 7 приведены результаты идентификации типа спектральных изображений отметок от цели  $S_i$  по всей трассе полета. Здесь по оси ординат – результаты идентификации: при  $S_i=1$ ,  $S_i=2$  – спектральное изображение отметок подвижных отметок, а при других значениях  $S \geq 3$  – изображения пассивной помехи, по оси абсцисс – количество экспериментов. Из анализа рисунка следует, что из 1000 экспериментов по идентификации изображений отметок только 3 ложные, то есть вероятность ложной идентификации ниже  $10^{-2}$ .

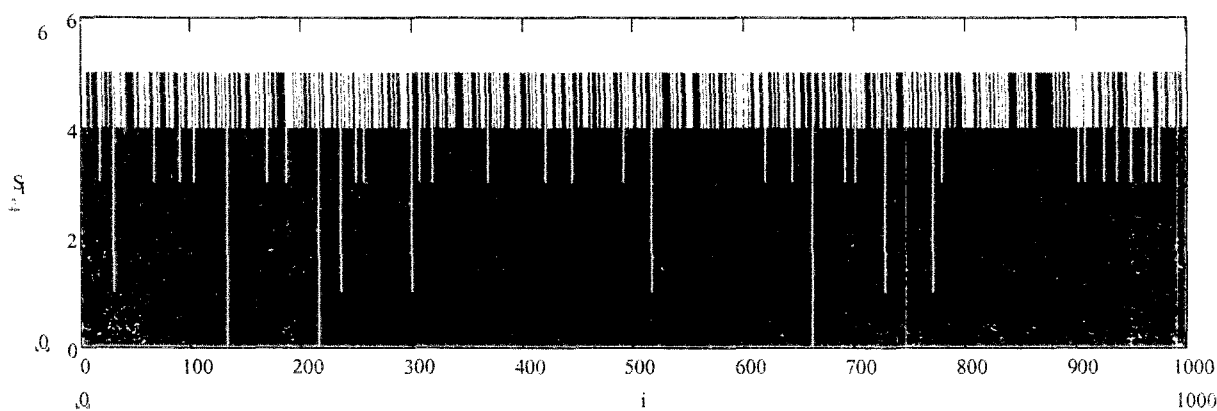


Рис. 7. Результаты идентификации типа спектральных изображений отметок от цели при отсутствии отраженного сигнала

- Определение вероятности правильной идентификации типа спектрального изображения отметки цели на фоне пассивных помех при наличии отраженного сигнала. Проведено 2000 экспериментов, при каждом последующем эксперименте относительная интенсивность сигнала  $h$  меняется на 0,2 единицы. На рис.8. приведены результаты идентификации типа спектральных изображений отметок от цели  $S_i$  по всей трассе полета.

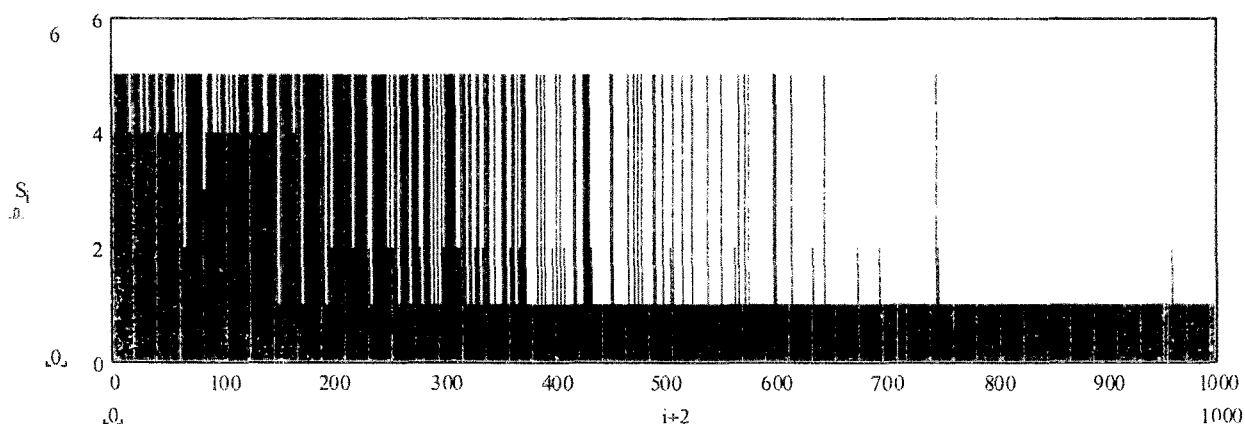


Рис. 8. Результаты идентификации типа спектральных изображений отметок от цели при наличии сигнала

- Определение вероятности правильной идентификации типа спектральных изображений отметок цели  $p_i$ . Для этого производится вычисление отношения количества правильных ответов  $N_c$  к общему числу испытаний  $N$ , то есть  $p_i \approx N_c/N$ .

- По результатам, приведенным на рис. 8, проводилось построение кривых вероятности правильной идентификации типа спектральных изображений отметок цели. Результаты расчетов приведены на рис.9.

На рис. 9 приведены кривые оптимального 1 (сплошная) обнаружения отметки от цели для когерентной пачки, квазиоптимального 2 (штрихпунктирная) обнаружения цели для некогерентной пачки при наличии внутреннего шума приемника и пассивной помехи и кривые вероятности правильной идентификации 3, 4 (пунктирные) типа спектральных изображений радиолокационных отметок.

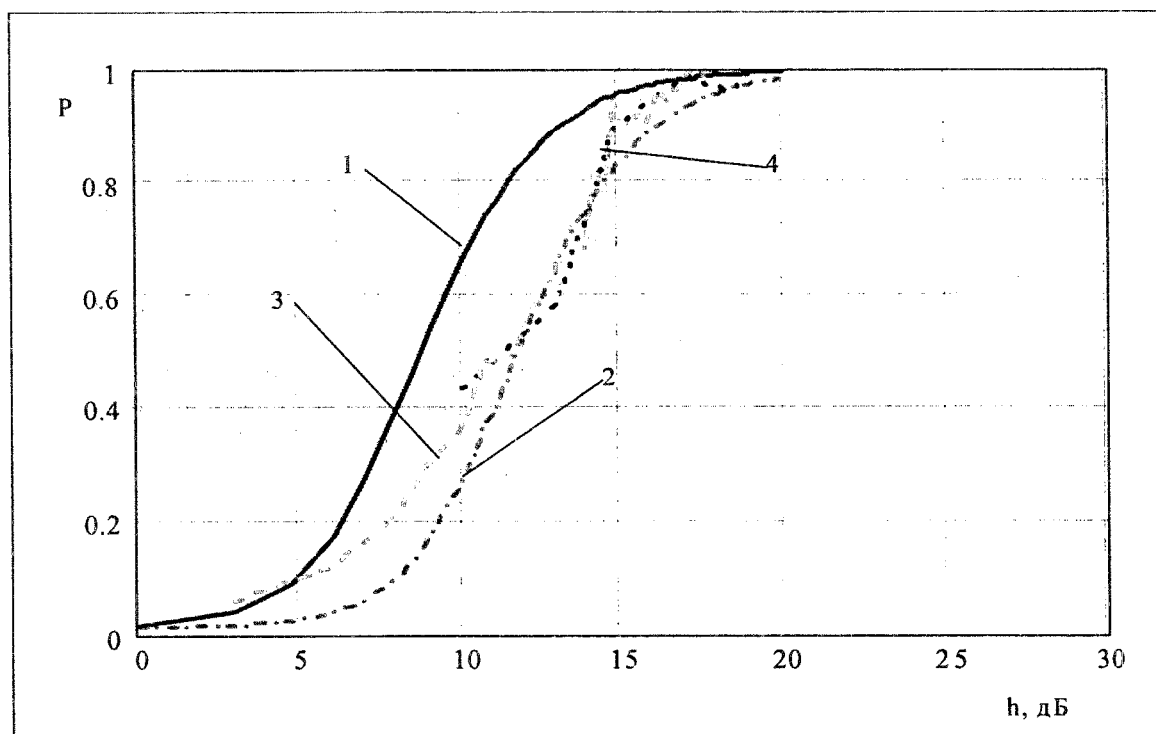


Рис. 9. Кривые оптимального 1 (сплошная), квазиоптимального 2 (штрихпунктирная) обнаружения отметки цели и кривые вероятности правильной идентификации 3, 4 (пунктирные) спектральных изображений радиолокационных отметок

### Заключение

1. Сравнение кривых вероятности правильной идентификации 3, 4 (пунктирные) спектральных изображений радиолокационных отметок с кривыми оптимального 1 (сплошная), квазиоптимального 2 (штрихпунктирная) обнаружения отметки цели для когерентной пачки в условиях пассивных помех показывает:

- кривые вероятности правильной идентификации 3, 4 (пунктирные) спектральных изображений радиолокационных отметок идут ниже кривой оптимального 1 (сплошная) обнаружения отметки цели, но выше квазиоптимального 2 (штрихпунктирная) обнаружения отметки цели.

- при малых и больших значениях отношений сигнал/помеха кривые вероятности правильной идентификации 3, 4 (пунктирные) спектральных изображений проходят ближе к кривой оптимального обнаружения. Это объясняется тем, что при малых отношениях сигнал/помеха в изображении как в многомерном образе сигнала больше информации, чем в одномерном накопленном сигнале при энергетической обработке. При больших отношениях сигнал/помеха случайные составляющие в поступающих для обработки характеристиках предикатных признаков незначительны и предикатные признаки как бы становятся детерминированными.

2. Следует также отметить, что в отличие от обычных статистик, порог перехода на логический уровень обработки формируется на основе реальной информации о виде спектрального изображения и не является фиксированным, а адаптируется в каждой конкретной ситуации по уровню максимума спектрального пика. Такая адаптация позволяет отображать информацию о форме спектра независимо от энергетики пачки и, в конечном счете, стабилизирует вероятность ошибки при определении типа спектрального изображения отметки.

3. Последнее делает актуальным применение функционально-семантических методов для обработки виртуальных радиолокационных изображений в условиях нестационарных помех типа «ангел-эхо».

**Список литературы:** 1. *Солонская С.В.* О возможности использования алгебры предикатов для классификации воздушных объектов по радиолокационному спектральному изображению // Радиотехника : Всеукр. науч.-техн. сб. – 2004. – Вып. 139. – С.73-76. 2. *Шабанов-Кушнарченко Ю.П.* Теория интеллекта. Математические средства. – Х. : Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1984. – 144 с. 3. *Жирнов В.В., Солонская С.В.* Интеллектуальная система радиолокационного обнаружения малозаметных воздушных объектов // Радиозлектроника и информатика. – 2005. – Вып. 3. – С.134-138. 4. *Леховицкий Д.И., Кириллов И.Г.* Моделирование пассивных помех импульсным РЛС на основе процессов авторегрессии произвольного порядка // Системи обробки інформації. – Х. : ХУПС, 2008. – № 3 (70). – С. 90–101. 5. *Баранов П. Е., Гавриленко А. Г.* Математические модели радиолокационных отражений от мешающих объектов // Труды Одесского политехнического университета. -1999. – Вып. 3, 1999. – С. 34 – 40. 6. *Быков В.В.* Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. – М. : Сов. Радио, 1971. – 328 с. 7. *Жирнов В.В., Солонская С.В.* Распознавание радиолокационных отметок по спектральному изображению с адаптивными весовыми коэффициентами // Радиозлектроника и информатика. – Х., 2006. – Вып. 1. – С. 121-124. 8. *Теоретические основы радиолокации / под ред. Я.Д. Ширмана.* – М. : Сов. радио, 1970. – 560с. 9. *Леховицкий Д.И., Рябуха В.П., Жуга Г.А., Рачков Д.С.* СДЦ в импульсных РЛС: 3. Структуры, параметры и эффективность квазиоптимальных систем междупериодной обработки гауссовых сигналов на фоне гауссовых пассивных помех // Прикладная радиозлектроника – 2008. – Т.8, №2. – С.109-123.

*Харьковский национальный  
университет радиозлектроники*

*Поступила в редколлегию 27.03.2011*