

Практическая ценность исследования заключается в разработке методики расчета распределения электромагнитного поля. Найденны функции Грина системы уравнений Максвелла-Больцмана и сделан их гармонический анализ. Установлено, что результаты, полученные на основании флуктуационно-диссипативной теоремы и ланжевеновского подхода, эквивалентны. При  $T = \tilde{T}$  уравнения (10) и (11) сводятся к уравнениям для корреляционной функции Фурье-компонент электромагнитного поля.

**Литература:** 1. *Виноградов Н.Н.* Физика плазмы. Т.10. М.: Наука, 1984. 1064 с. 2. *Климонтович Ю.Л., Якименко И.П.* Статистическая теория молекулярных систем. М.: МГУ, 1980. 224с. 3. *Ишимару С.* Основные принципы физики плазмы. М.: Атомиздат, 1975. 288с. 4. *Чернишов М.М., Грицай С.В.* Поширення електромагнітних хвиль. ХНУРЕ, 2004. №1. 299с. 5. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Статистическая физика, Т.1. М.: Наука, 1976. 584с. 6. *Ситенко А.Г.* Электромагнитные флуктуации в плазме.

ХГУ, 1965. 184с. 7. *Полевой В.Г.* Теплообмен электромагнитным полем. М.:Наука, 1990. 192с. 8. *Scott B.* Plasma Phys. Contr. Fusion. 1992. V.34. P.1977. 9. *Nedospasov A.V.* Sov. J. Plasma Phys. 1989. V.15. P.659. 10. *Tomson W.B., Hbbard J.* Rev. Mod. Phys. 1960. V.5. P.714.

Поступила в редколлегию 23.08.2007

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф. Приходько В.И

**Чернышов Николай Николаевич**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник Научного физико-технологического центра МОН и НАН Украины. Научные интересы: компьютерное моделирование (программы: ANSYS, FLUKA, SINTEZ, GEFEST); ядерная физика, теория поля. Адрес: Украина, 61022, Харьков, пл.Свободы, 6, тел. 336-97-31.

**Крижевский Николай Владимирович**, инженер научно-го физико-технологического центра МОН и НАН Украины. Научные интересы: теория автоматического управления. Адрес: Украина, 61022, Харьков, пл.Свободы, 6.

УДК621.396:510.62

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА МНОГООБЗОРНОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

*ЖИРНОВ В.В., СОЛОНСКАЯ С.В.*

Приводятся алгоритмы интеллектуальной системы радиолокационного обнаружения отметок воздушных объектов на фоне мешающих отражений, которые обеспечивают автоматизацию важных операций многообзорной обработки информации и эффективность обнаружения накоплением сигнальной (энергетической) и логической информации в анализируемой ячейке разрешения и в ее окрестности. При этом благодаря использованию формального языка теории интеллекта - математического аппарата алгебры предикатов достигается повышение быстродействия и возможность работы в реальном масштабе времени.

### 1. Введение

Приведем результаты решения задач формирования и обработки интеллектуальных картинных образов радиолокационной информации в обзорных РЛС для обнаружения воздушных объектов путем разделения (классификации) всей совокупности отметок на полезные и бесполезные. Такой подход позволяет создавать универсальные алгоритмы автоматизации важных операций многообзорной обработки информации и обеспечивает повышенную эффективность обнаружения слабых полезных сигналов за счет накопления сигнальной (энергетической) и логической (интеллектуальной) информации в анализируемой ячейке разрешения и в ее окрестности в сложных условиях мешающих отражений.

Постоянное совершенствование информационных средств обеспечения безопасности воздушного движения и автоматизации процессов управления воз-

душным движением требуют совершенствования процедур обработки радиолокационной информации, так как решить эти задачи существующими способами в полной мере не удастся. Актуальны также вопросы более полного использования и качественного повышения информационных возможностей РЛС, особенно в зоне местных предметов, гидрометеоров, отражений от искусственных облаков, дипольных отражателей, дискретных мешающих отражений (ДМО), в том числе типа «ангел-эхо» (АЭ).

Основной недостаток современной техники обработки сигналов и информации состоит в том, что в ней неэффективно используется интеллект человека – оператора РЛС, который, имея данные о радиолокационной обстановке в картинном виде о координатах, форме, яркости и многообзорной предыстории полезных и помеховых отметок, может эффективно извлекать радиолокационную информацию (РЛИ) и передавать потребителю.

В системах обработки РЛИ [1-3] существовали операции, основанные на анализе совокупной информации о радиолокационных отметках текущего и нескольких предыдущих циклов обзора пространства, обеспечивающих завязку трасс ЛА и их сопровождение. Соответствующие алгоритмы реализовывались аппаратно в отдельных устройствах первичной и вторичной обработки, включаемых последовательно. Такое последовательное использование информации приводило к существенным потерям превосходства человека-оператора при реализации сложных алгоритмов обработки РЛИ в условиях множественных имитирующих и комбинированных помех. Эти преимущества оператора связаны с возможностью параллельного восприятия информации как картины и использования при сравнительном анализе и принятии решения информации в виде картинных образов. При этом наличие энергетического или доплеровского контраста эхо – сигналов отметок целей на фоне помех человек-оператор может определить не по пре-

вышению амплитудного порога, а по анализу квалификационных признаков, что особенно эффективно при выделении слабых эхо – сигналов малозаметных объектов.

Основным преимуществом интеллектуальных алгоритмов человека-оператора [4,5] является вариативный комплексный анализ пространственно-временной картины, отображаемой на экране индикатора. Оператор не связан жесткой последовательностью операций обработки РЛИ. Он выделяет (обнаруживает) отметки – логически накапливаемые пачки импульсов, оценивает и выдает их координаты, но в основном выделяет (фильтрует) геометрические образы трасс ЛА и помехового фона. Это позволяет регулировать неявные пороги визуального обнаружения, откладывать, отменять и изменять недостоверные решения и оценки, принимать решения по накопленному траекторному сигналу (образцу) ЛА, присваивать признаки и так далее.

Из анализа современного состояния техники обработки радиолокационных сигналов следует, что при создании современных унифицированных модулей обработки (УМО) наиболее целесообразны интеллектуальные картинные методы извлечения и анализа радиолокационной информации или так называемые интеллектуальные картинные технологии обработки [6]. Они объединяют детальные цифровые карты сигналов, помех и их преобразований и процессоры обработки, использующие улучшенные интеллектуальные алгоритмы человека-оператора.

## 2. Цель и постановка задачи

Цель – разработка алгоритмов интеллектуальной системы формирования и обработки картинных образов радиолокационной информации в обзорных РЛС для обнаружения воздушных объектов путем разделения (классификации) совокупности отметок на полезные и бесполезные; автоматизация важных операций многообзорной обработки информации, обеспечивающих повышенную эффективность обнаружения слабых сигналов благодаря накоплению сигнальной (энергетической) и логической (интеллектуальной) информации в анализируемой ячейке разрешения и в ее окрестности в сложных условиях мешающих отражений. При этом накопление логической информации осуществляется в результате анализа динамической карты интенсивностей РЛ отражений зоны обзора, подверженной воздействию ДМО с отслеживанием происходящих в ней изменений на основе поэлементного сопоставления интенсивностей отраженных сигналов в течение многих обзоров РЛС.

При автоматизации операций многообзорной обработки, подобной действию человека-оператора, удобно пользоваться так называемыми интеллектуальными алгоритмами распознавания изображений. При этом радиолокационные изображения отметок помех и воздушных объектов преобразуются в логические зависимости, подобные логике человека-оператора в виде предикатных уравнений.

## 3. Суть работы

Анализ особенностей поведения изображений сигнальных отметок мешающих отражений (МО), дискретных мешающих отражений и отражений от воздушных объектов (ВО) показывает [4,6,8], что информативным является вид картины вокруг анализируемого (лоцируемого) в данный момент элемента (ячейки) пространства, сформированной путем накопления информации во времени и пространстве в течение ряда обзоров (кадров) РЛС. Исходя из этого, все возможные виды картин были разбиты на  $S_j, j = 1, \dots, N$  типов, имеющих различную степень “правдоподобности” для ситуаций, когда принимаются только сигналы ВО или МО, или ДМО, и для тех ситуаций, когда они принимаются совместно в различных сочетаниях. При этом основой для выделения отметок ВО на фоне ДМО или МО является картинный анализ упорядоченного, с определенной скоростью, движения отметок аэродинамических объектов, которое существенно отличается от характера перемещения отметок ДМО, в том числе типа АЭ.

На основе анализа различий позиционного поведения РЛЦ и АЭ формируется ряд предикатных признаков, используемых для отождествления радиолокационных отметок, т.е. альтернативного отнесения их к одному из двух классов: отметкам РЛЦ либо отметкам ДМО (рис.1).

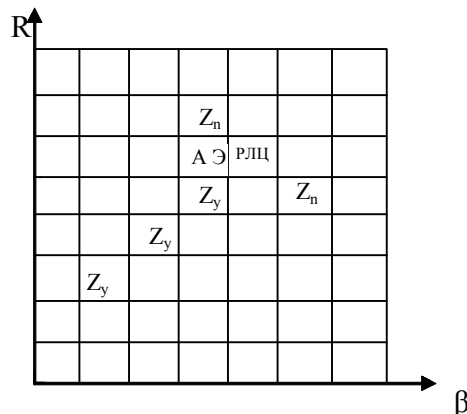


Рис. 1. Отождествление радиолокационных отметок

Здесь использованы следующие обозначения:  $i, j$  – номера дискрет по дальности  $R$  и азимуту  $\beta$  соответственно;  $Z_n$  – признак повтора в элементе обработки сигналов предыдущего  $k-1$  и текущего  $k$  обзоров;  $Z_{nc}$  – признак повтора в элементе обработки сигналов  $(k-2)$  и  $(k-1)$  обзоров (для элементов обработки  $(i \pm 1)j, i(j \pm 1)$   $Z_{nc}$  является признаком повтора в соседнем элементе обработки);  $Z_y$  – признак ухода отметки за пределы элемента обработки за период обзора; АЭ, РЛЦ – соответственно, отметки АЭ и РЛЦ.

Для подобной ситуации критерий оценки качества отождествления РЛ отметок может быть выбран из

статистического подхода, приведенного в [1]. Он предполагает, что в одной точке пространства (элементе обработки) с ненулевой априорной вероятностью могут находиться отметки различных классов (РЛЦ, АЭ).

Решение задачи оптимизации процедуры отождествления РЛ отметок основано на методах статистической теории многоальтернативного (в данном случае двухальтернативного) распознавания. При наличии двухальтернативной ситуации для классической процедуры анализа оптимальная система отождествления радиолокационных отметок определяется величиной отношения правдоподобия или ее логарифмом [1,2]. При этом  $A = (A_1, A_2)$  – алфавит классов отождествляемых отметок;  $P(A/b_i), P(A/b_j)$  – условные вероятности классов, где  $b_i, b_j$  – векторы совокупности признаков, характеризующих принадлежность радиолокационных отметок к различным классам.

Тогда отношение правдоподобия определится как

$$l(A) = \frac{P(A/b_i)}{P(A/b_j)} \geq \frac{P(b_i)}{P(b_j)}, \quad (1)$$

где  $P(b_i), P(b_j)$  – априорные вероятности появления совокупностей признаков  $b_i$  и  $b_j$ ;  $P(b_i)/P(b_j)$  – пороговое значение отношения правдоподобия.

Решение задачи отождествления отметок заключается в выявлении двух гипотез:  $H_1$  – отметка относится к классу, который характеризуется совокупностью признаков  $b_i$ ;  $H_2$  – отметка относится к классу, характеризующему совокупностью признаков  $b_j$ . Путем сравнения  $i(A)$  с пороговым значением определяется принадлежность события к гипотезе  $H_1$  или  $H_2$ . Неравенство (1) является байесовским критерием, минимизирующим ошибку решения задачи отождествления отметок. Вероятность ошибки определяет меру разделимости отметок различных классов при данных распределения вектора  $A$ .

Суммарная ошибка, учитывающая ошибки первого (необнаружения) и второго (ложной тревоги) родов, определяется, как их взвешенная сумма:

$$P_{\text{ош}\Sigma} = \sum_{G_1} P(b_i)[1 - P(A/b_i)] + \sum_{G_2} P(b_j)[1 - P(A/b_j)] = P(b_i) \cdot P_1 + P(b_j) \cdot P_2, \quad (2)$$

где  $G_1, G_2$  – возможные области  $A$ , соответствующие совокупности признаков  $b_i$  и  $b_j$ ;  $P_1, P_2$  – ошибки первого и второго родов соответственно.

$P_1$  и  $P_2$  также можно определить путем интегрирования плотности вероятности отношения правдоподобия  $P(l/b_i)$  и  $P(l/b_j)$ :

$$P_1 = \int_0^T P(l/b_i) dl, \quad P_2 = \int_T^{\infty} P(l/b_j) dl,$$

где  $T = P(b_j)/P(b_i)$  – порог отождествления.

Вычисление  $P_{\text{ош}\Sigma}$  сводится по существу к интегрированию в  $n$ -мерном пространстве плотности распределения вероятностей анализируемых классов.

В рассматриваемом случае отождествление радиолокационных отметок производится путем анализа признаков, присвоенных каждой из отметок на основе многообзорного поэлементного сопоставления позиций сигналов на формируемой карте интенсивностей радиолокационных отражений. При этом возникает задача выделения признаков, обеспечивающих минимальную ошибку отождествления радиолокационных отметок из всей совокупности формируемых признаков.

#### 4. Предикатное представление операций многообзорной обработки радиолокационной информации

Математический аппарат алгебры предикатов позволяет формализовать основные события (операции) для реализации интеллектуальных алгоритмов обнаружения и распознавания изображений отметок помех и воздушных объектов, основанных на использовании логических зависимостей, подобных логике человека-оператора [4,7,8].

Исходя из сути интеллектуальной системы картинной многообзорной обработки сигналов и информации, можно предположить следующие основные операции алгоритма:

- формирование для элементов зоны обзора РЛС карты интенсивностей сигнала отметок отражений с учетом многообзорного поведения сигнала в каждом элементе обработки;
- формирование для элементов зоны обзора РЛС карты предикатов событий наличия, повтора в данном элементе, повтора в соседних элементах и ухода сигнала на основе межобзорного сопоставления карты интенсивностей сигнала отметок и предикатов событий;
- экстраполяция предикатов на время (количество периодов обзора), пропорциональное интенсивности соответствующих отметок сигналов отражений;
- выделение и классификация РЛ отметок летательных аппаратов на фоне помеховых отражений, в том числе типа «ангел-эхо» решением предикатных уравнений, сформированных для соответствующих РЛ отметок.

Для выполнения этих операций разработан алгоритм ИС [4-6], который частично был реализован в унифицированном модуле многообзорной обработки сигналов и информации. Массив данных представляет собой прямоугольную матрицу  $\|A\|$  размерностью  $M \times N$ , каждый элемент которой является  $g$  –разрядным двоичным числом. При этом  $\alpha$  разрядов двоичного числа каждого из элементов  $a_{ij}$  (ячеек ОЗУ) отведено для квантования интенсивностей сигналов,  $\theta$  разрядов – для хранения информации о предикатах,

а  $(g - \alpha - \theta)$  разрядов – для хранения информации принятия решения об обнаружении отметки. Каждый элемент  $a_{ij}$  «жестко» связан с соответствующим участком лоцируемой зоны (элементом обработки). Размеры элементов обработки выбраны таким образом, чтобы РЛ объекты, движущиеся со скоростями из диапазона наиболее вероятных скоростей движения целей, за период обзора не выходили за его пределы.

Пусть  $M = \{q_{11}, q_{12}, \dots, q_{ij}, \dots, q_{mn}\}$  – фиксированное множество, представляющее собой прямоугольную матрицу  $\|A\|$  размерностью  $M \times N$  и состоящее из  $k = m \times n$  элементов — значений амплитуд сигналов в элементах обработки зоны обзора РЛС,  $B$  – некоторое из его подмножеств  $B \subseteq M$ , амплитуды сигналов  $q_{ij}$  которого превышают некие пороговые значения  $V_{ij}$ . Составляем набор логических элементов  $t_{ij}$  по следующему принципу: если  $q_{ij} \in B$ , то  $t_{ij} = 1$ ; если  $q_{ij} \notin B$ , то  $t_{ij} = 0$ ,  $i = \overline{1, m}$ ,  $j = \overline{1, n}$ .

Предикат  $A(x)$  на множестве  $M$ , соответствующий множеству  $B$  элементов обработки, превысивших порог, с характеристикой  $(t_{11}, t_{12}, \dots, t_{ij}, \dots, t_{mn})$ , запишется формулой [3]:

$$A(x) = t_{11}x^{q_{11}} \vee t_{12}x^{q_{12}} \vee \dots \vee t_{ij}x^{q_{ij}} \vee \dots \vee t_{mn}x^{q_{mn}} = \bigvee_{i=1, j=1}^{mn} t_{ij}x^{q_{ij}}. \quad (3)$$

Здесь выражение  $x^{q_{ij}}$  – форма узнавания события. При  $x = q_{ij}$   $x^{q_{ij}} = 1$ .

Для формирования интеллектуальной картины вокруг анализируемого в данный момент элемента зоны обзора РЛС вводится система предикатных признаков (функций), позволяющая формализовать происходящие изменения в  $A(x)$  в течение ряда обзоров РЛС:

– предикатный признак  $Z_{nij}^k$  повтора сигналов в  $a_{ij}$  элементе обработки ( $i, j$  – номера элементов (дискрет) по дальности и азимуту;  $k$  – номер обзора, начиная с текущего обзора). Определяется как повтор сигналов в текущем и предыдущих обзорах;

– предикатный признак  $Z_{ncij}$  повтора сигналов в соседнем элементе обработки. Определяется как повтор сигналов в  $(k - 2)$  и  $(k - 1)$  обзорах для  $(i \pm 1)j$ ,  $i(j \pm 1)$  элементов обработки. Иначе, это признак повтора сигналов в предыдущем обзоре хотя бы в одном из элементов обработки, прилегающих к рассматриваемому элементу;

– предикатный признак  $Z_{yij}$  ухода отметки в элементах обработки, прилегающих к рассматриваемому элементу.

При этих исходных условиях формирование предикатных признаков может быть осуществлено по следующему алгоритму:

$$Z_{nij} = 1 \text{ при } A_{ij}^k > 0 \cap A_{ij}^{k-1} > 0;$$

$$Z_{ncij} = 1 \text{ при } Z_{ni+1, j+1}^{k-1} = 1; \quad (4)$$

$$Z_{yij} = 1 \text{ при } A_{ij}^{k-1} > 0 \cap A_{ij}^k = 0 \cap Z_{ni, j} = 0,$$

где  $A$  – предикат события наличия/отсутствия сигнала в соответствующей ячейке обработки;  $1$  – принимает значения от  $-L$  до  $+L$  в зависимости от скорости перемещения селективируемых РЛ целей.

Определенные согласно (4) предикатные признаки запоминаются в оперативной памяти (ОЗУ) для каждого элемента обработки. Запоминаются в ОЗУ и величины сигналов, и по мере поступления текущей радиолокационной информации в обзорах уточняются и значения признаков, и величины сигналов (постепенное затухание сигнала при отсутствии текущего сигнала – эффект искусственного послесвечения). Они или остаются неизменными, или претерпевают изменения (экстраполяция) в зависимости от поведения сигнала в элементе обработки и в прилегающих к нему элементах. На основе анализа динамики поведения предикатных признаков во времени, т.е. контроля их экстраполированного значения и текущего значения сигнала, принимается решение об обнаружении отметки цели в элементе обработки.

Алгоритм экстраполяции признаков имеет следующий вид:

$$Z_{nij} = 1 \text{ при } Z_{nij}^k = 1 \cup (Z_{nij}^{k-1} = 1 \cap A_{ij}^k = 0 \cap \cap A_{ij}^{k-1} > 0); \quad (5)$$

$$Z_{yij} = 1, \text{ при } Z_{yij}^k = 1 \cup (Z_{yij}^{k-1} = 1 \cap A_{ij}^k = 0 \cap A_{ij}^{k-1} > 0);$$

$$q_{ij} = q_{ij}^{k-1} - \Delta, \text{ при } q_{ij}^k = 0 \cap q_{ij}^{k-1} > 0. \quad (6)$$

Экстраполяция предикатных признаков  $Z_{nij}$  и  $Z_{yij}$  и значения сигнала в элементе обработки производится согласно (5) и (6) путем их перезаписи в те же ячейки памяти, в которых они были записаны на предыдущих обзорах. Основой для сохранения путем перезаписи значения признака является либо его повторное формирование при выполнении соответствующих условий (4), либо наличие ненулевого уровня амплитуды сигнала  $A$  в рассматриваемой ячейке, либо в случае, когда два первых условия выполняются одновременно.

Основой для формирования экстраполированного затухающего сигнала, уменьшающегося от обзора к обзору на величину  $\Delta$ , является факт отсутствия поступающего в текущем обзоре сигнала (6). В случае непоступления сигнала в текущем обзоре значение  $q_{ij}$ , записанное в соответствующей ячейке памяти в предыдущем обзоре, уменьшается на определенную величину  $\Delta$ . Тем самым обеспечивается экстраполяция признаков на время, пропорциональное затуханию сигнала в данном элементе обработки. Значение  $\Delta$  может быть различным в зависимости от типа

предикатного признака, для которого экстраполяция производится ( $Z_{nij}$  либо  $Z_{yij}$ ). Экстраполяция признака  $Z_{nci}$  происходит автоматически при экстраполяции признака  $Z_{nij}$  в элементах обработки, прилегающих к рассматриваемому элементу.

Для повышения эффективности обнаружения отметок малоскоростных малоразмерных воздушных объектов можно модифицировать алгоритм так, чтобы в случае повтора сигналов в смежных обзорах в одном элементе обработки их уровни можно было суммировать, увеличивая тем самым энергию накопления полезного сигнала и интервал времени экстраполяции признака  $Z_{nij}$ :

$$q_{ij} = q_{ij}^k + q_{ij}^{k-1}, \text{ при } q_{ij}^k \cap q_{ij}^{k-1} > 0. \quad (7)$$

Для примера на рис.2 представлена функциональная схема возможного программно-аппаратного устройства реализации алгоритма формирования и экстраполяции признака  $Z_{nij}$ .

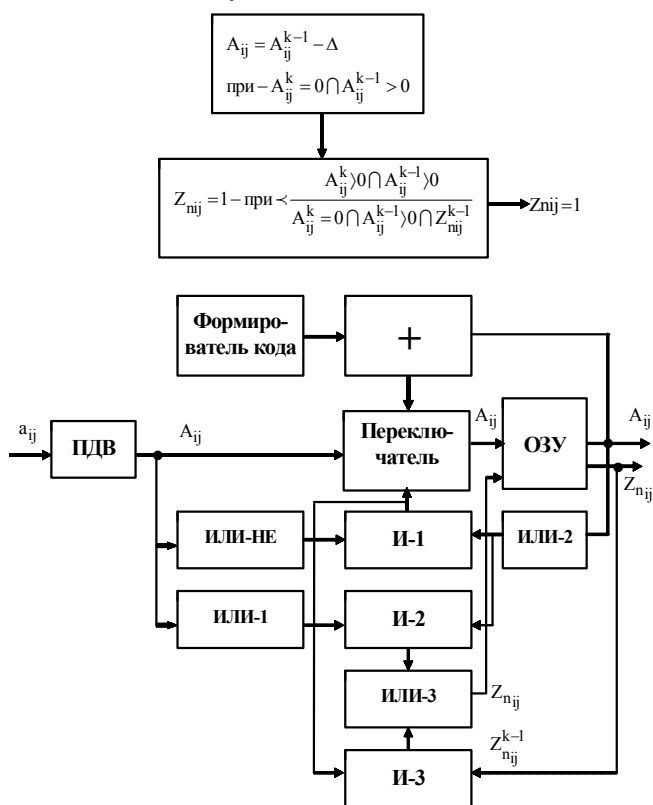


Рис. 2. Функциональная схема программно-аппаратного устройства реализации алгоритма формирования и экстраполяции признака  $Z_{nij}$

Устройство работает следующим образом. Данные об уровнях сигналов, прошедшие пороговую обработку в преобразователе входных данных (ПВД), в двоичном параллельном коде поступают на переключатель и на логические элементы «ИЛИ-НЕ» и первый «ИЛИ». Эти логические элементы предназначены соответственно для определения наличия нулевого (отсутствие сигнала) и ненулевого (наличие сигнала) уровней сигнала в каждом из элементов обработки в текущем обзоре. Второй логический элемент «ИЛИ»

предназначен для определения наличия ненулевого уровня сигнала в каждом из элементов обработки в предыдущем обзоре. На него подаются данные, записанные в память на предыдущем этапе обработки (обзоре).

Логические элементы «И» выполняют функции сравнивающего устройства. При поступлении сигналов на оба входа второго логического элемента «И», т.е. при выполнении условия  $A_{ij}^k > 0 \cap A_{ij}^{k-1} > 0$  на его выходе формируется признак  $Z_{nij}$ , который через третий логический элемент «ИЛИ» записывается в соответствующую ячейку памяти.

Экстраполяция путем перезаписи признака  $Z_{nij}$  производится при поступлении на третий логический элемент «И» признака  $Z_{nij}^{k-1}$ , записанного в соответствующей ячейке памяти в предыдущем обзоре, и наличии ненулевого уровня сигнала, хранящегося в этой ячейке, либо при новом (повторном) формировании признака  $Z_{nij}$ .

Время экстраполяции признаков  $Z_{nij}$  и  $Z_{yij}$  определяется величиной накопленного сигнала  $A_{ij}^k$  и величиной  $\Delta$  вычитателя (уменьшителя) запомненного сигнала от обзора к обзору и обеспечивается следующим образом. При нулевом уровне сигнала в  $ij$ -м элементе обработки в текущем обзоре и ненулевом уровне сигнала, хранящемся в соответствующей ячейке ОЗУ, на выходе первого логического элемента «И» формируется управляющее воздействие, подаваемое на переключатель. Происходит подключение ко второму входу сумматора формирователя кода (кода величины  $\Delta$ ) и обеспечивается уменьшение уровня сигнала, записанного в ОЗУ в предыдущем обзоре.

Для формирования признака  $Z_{ncij}$  данные об уровнях сигналов текущего обзора в двоичном параллельном коде поступают на вход логического элемента «ИЛИ», который предназначен для формирования предиката наличия сигнала в каждом элементе обработки. В схеме совпадения происходит поэлементное сопоставление данных текущего обзора с данными предыдущего обзора, хранящимися в блоке памяти. При совпадении предикатов событий ненулевого уровня сигнала в текущем и предыдущем обзорах формируется признак  $Z_{nij}$ , который подается на второй блок памяти в виде уровня логической единицы. В результате во втором блоке памяти формируется матрица признаков повтора сигналов  $Z_{nij}$  предыдущего обзора.

В памяти ЭВМ хранятся, с постоянным обновлением, данные о признаках  $Z_n$  смежных азимутальных направлений (например, трех). При наличии признака  $Z_n$  хотя бы в одном из восьми элементов обработки, прилегающих к рассматриваемому  $ij$ -му элементу обработки, формируется признак  $Z_{ncij}$ .

Аналогичным образом может быть осуществлен просмотр элементов обработки, прилегающих к рассмат-

риваемому, при формировании признака  $Z_{yij}$ . При этом просмотр прилегающих элементов обработки производится в целях выявления хотя бы в одном из них в текущем обзоре ситуации, характеризующейся операцией уменьшения уровня сигнала, записанного в соответствующей ячейке признака  $Z_n$  (условие 7).

Носителем информации об уменьшении уровня сигнала путем вычитания величиной  $\Delta$  является управляющее воздействие, подаваемое на переключатель (см. рис.2). Прохождение управляющего воздействия на схему формирования признака  $Z_{yij}$  бланкируется наличием признака  $Z_{nij}$ .

### 5. Обнаружение воздушных объектов на основе решения предикатных уравнений анализа картин

Рассмотренные алгоритмы позволяют формировать все возможные виды картин  $S_j$ ,  $j = 1, \dots, N$  типа для каждого элемента обработки, определяемых совокупностью предикатных признаков. В данном случае  $N = 8$ .

В результате решения предикатных уравнений сравнения полученных предикатных функций с эталонными, сформированными на основании априорных и оперативных данных о классах отождествляемых отметок, формируется информация об обнаружении сигнала цели.

Алгоритм идентификации типов картин в общем виде описывается следующей системой уравнений:

$$S_j = \left( \bigvee_{\gamma=0}^1 Z_n^\gamma \right) \wedge \left( \bigvee_{\gamma=0}^1 Z_{nc}^\gamma \right) \wedge \left( \bigvee_{\gamma=0}^1 Z_y^\gamma \right). \quad (8)$$

Здесь выражение типа  $Z_n^\gamma$  – форма узнавания значения предикатного признака. При  $\gamma = 0$   $Z_n^\gamma = 0$ , при  $\gamma = 1$   $Z_n^\gamma = 1$ .

В результате анализа совокупности признаков  $b_i$  осуществляется отождествление РЛ отметок, т.е. отнесение их к одному из двух классов  $A_1$  (отметки АЭ) либо  $A_2$  (отметки РЛЦ). Здесь использовано в качестве решающего правило максимума отношения правдоподобия, где решающее устройство отождествляет рассматриваемую отметку с тем из классов, условная вероятность которого при данном сочетании признаков  $b_i$  выше:

$$b_i \Rightarrow A_1, \text{ если } P(A_1 / b_i) > P(A_2 / b_i);$$

$$b_i \Rightarrow A_2, \text{ если } P(A_1 / b_i) < P(A_2 / b_i).$$

Плотности распределения признаков в каждом из классов отождествляемых отметок оценены путем моделирования на ЭВМ алгоритмов многообзорной обработки, при условии адекватности модели массива видеоданных, поступающих на вход устройства обработки, реальным характеристикам АЭ.

### 6. Заключение

Для оценки эффективности рассмотренных алгоритмов селекции РЛЦ на фоне АЭ проведено моделирование массива видеоданных, поступающих на устройство первичной обработки при воздействии на РЛС кругового обзора мешающих отражений типа АЭ, и работы УМО. При этом проводился анализ вероятностных характеристик отождествления РЛ отметок. В результате моделирования произведены:

- оценка вероятностей распределения признаков  $Z_n$ ,  $Z_{nc}$ ,  $Z_y$  и их сочетаний в классах  $A_1$  и  $A_2$ ;
- оценка вероятностей ошибок отождествления РЛ отметок  $P(L)$  при использовании различных сочетаний  $b_i$  признаков;
- оценка частных коэффициентов отождествления РЛ отметок различных классов ( $K_{oa}$ ,  $K_{oc}$ ), а также обобщенного коэффициента отождествления РЛ отметок  $K_0$ .

При отождествлении РЛ отметок в модели применено следующее решающее правило:

- если отметке соответствуют предикатные признаки  $Z_n$ ,  $Z_{nc}$  либо их совокупность, то принимается решение, что отметка принадлежит к классу  $A_1$ ;
- если отметке соответствует предикатный признак  $Z_y$  один либо в совокупности с признаками  $Z_n$ ,  $Z_{nc}$ , то принимается решение, что отметка принадлежит к классу  $A_2$ .

Графики вероятности появления предикатных признаков по отдельности и в различных сочетаниях в классах  $A_1$  и  $A_2$  представлены на рис.3.

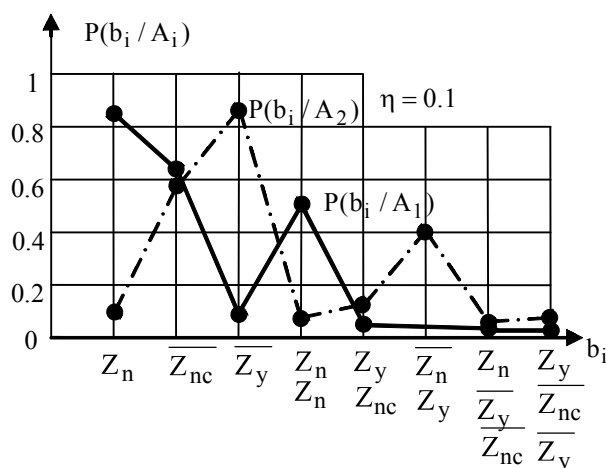


Рис. 3. Графики вероятности появления предикатных признаков в различных сочетаниях в классах  $A_1$  и  $A_2$

На рис.4 представлены зависимости оценок вероятности ошибок отождествления РЛ отметок  $P(b_i / A_i)$  от используемой совокупности предикатных признаков  $b_i$ . Оценки получены для различных скоростей перемещения РЛ целей и плотности ДМО  $\eta = 0.1$  (отношение количества ДМО к общему количеству элементов обработки).

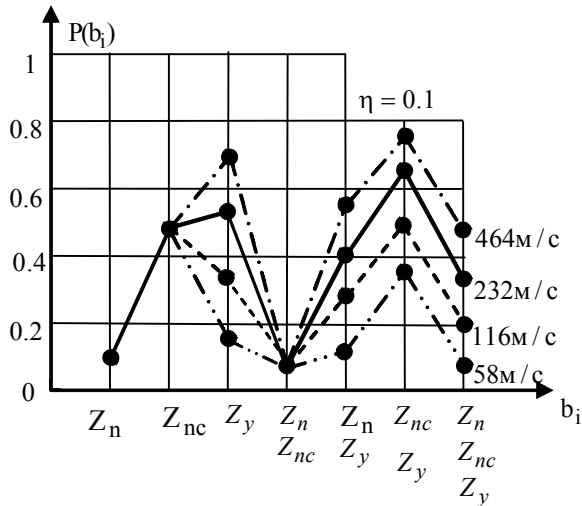


Рис. 4. Оценки вероятности ошибок отождествления РЛ отметок при различной совокупности предикатных признаков  $b_i$  и скоростей перемещения РЛ целей

На рис.5 приведены зависимости вероятности ошибки отождествления отметок РЛ целей от плотности ДМО  $\eta$  при использовании одного признака  $Z_n$  и совокупности двух признаков  $Z_n$  и  $Z_{nc}$ .

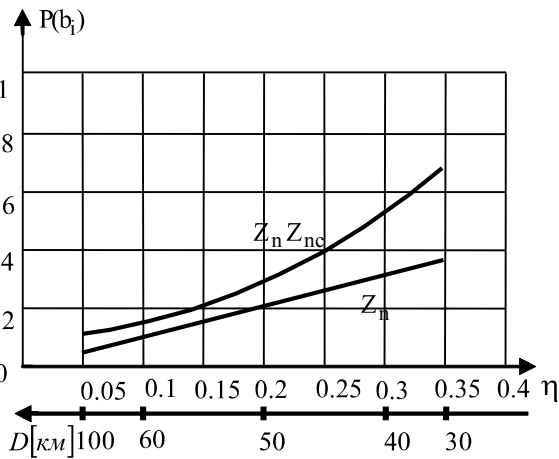
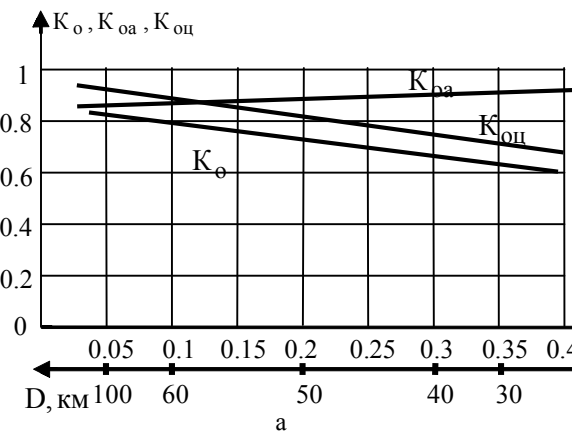


Рис. 5. Вероятности ошибок отождествления РЛ отметок при различной плотности ДМО и совокупности предикатных признаков



Нарис.6 представлены зависимости частных  $K_{оа}$ ,  $K_{оц}$  и обобщенного  $K_o$  коэффициентов отождествления от плотности ДМО  $\eta$  при использовании одного предикатного признака  $Z_n$  (рис.6, а) и совокупности двух признаков  $Z_n$  и  $Z_{nc}$  (рис.6, б).

Анализ результатов показывает, что использование одного признака  $Z_n$  в большинстве случаев обеспечивает получение более высоких значений обобщенного коэффициента отождествления РЛ отметок  $K_o$ .

Эффективность обнаружения была проверена на основе записей реальных сигналов РЛС сантиметрового диапазона. В качестве МЗЦ использовался спортивный самолет (Ан-12) с ЭПР около  $1 \text{ м}^2$ . Был обнаружен эхо-сигнал цели на фоне ДМО. При этом обеспечивается автоматизация операций формирования и анализа картины, сформированной путем накопления сигнальной (энергетической) и логической (интеллектуальной) информации в анализируемой ячейке разрешения и в ее окрестности во времени и пространстве в течение многих обзоров РЛС. Благодаря использованию формального языка теории интеллекта - математического аппарата алгебры предикатов достигается повышение быстродействия и возможность работы в реальном масштабе времени. Как показывают результаты исследований, использование подобных интеллектуальных алгоритмов позволяет существенно повысить вероятность правильного обнаружения малозаметных целей на фоне ДМО.

*Научная новизна* заключается в том, что впервые в системах радиолокационного обнаружения воздушных объектов используются математические средства алгебры предикатов для интеллектуализации многообзорного анализа картины поведения сигнала в анализируемой ячейке разрешения и в ее окрестности во времени и пространстве.

*Практическая значимость* интеллектуальной системы состоит в автоматизации сложных операций многообзорной обработки радиолокационной информации, подобных действию человека-оператора, в повышении эффективности обнаружения малозаметных воздушных

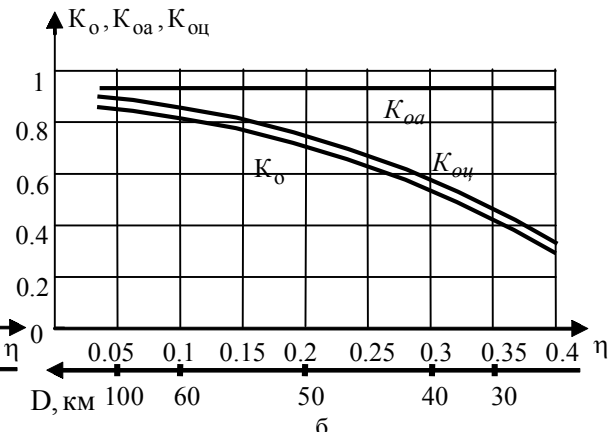


Рис. 6. Зависимости  $K_{оа}$ ,  $K_{оц}$  и  $K_o$  коэффициентов отождествления от плотности ДМО  $\eta$ : а - при использовании признака  $Z_n$ ; б - при использовании признаков  $Z_n$  и  $Z_{nc}$

ных объектов, а также в повышении быстродействия и возможности работы в реальном масштабе времени.

**Литература:** 1. *Справочник по радиолокации*: в 4 т /Под ред. М.Скольника; пер. с англ. М.: Сов. радио, 1976. 376 с. 2. *Бакулев П.А., Степин В.Н.* Методы и устройства селекции движущихся целей. М.: Радио и связь, 1986. 288 с. 3. *Кузьмин С.З.* Основы проектирования систем цифровой обработки РЛИ. М.: Радио и связь, 1986. 323 с. 4. *Жирнов В.В., Литвинов В.В., Филлюшкин И.П.* Обнаружитель движущихся целей на основе картинных методов обработки. // Судостроительная промышленность. Сер. РЛ. 1991. Вып. 29. С. 78-83. 5. *Жирнов В.В., Дохов А.И.* Картинные методы извлечения и анализа радиолокационной информации в обзорных РЛС // Прикладная радиоэлектроника. 2004. Том 3, №1. С.29-34. 6. *Жирнов В.В., Лебедев О.Г.* Радиолокационные мешающие отражения от неоднородностей приземной окружающей среды. Экспериментальные характеристики и статистическая модель // Радиотехника. 2001. Вып. 121. С. 69-73. 7. *Шабанов-Кушнаренко Ю.П.* Теория интеллекта. Математические сред-

ства. Х.: Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1984. 144 с. 8. *Жирнов В.В., Солонская С.В.* Интеллектуальная система радиолокационного обнаружения малозаметных воздушных объектов // Радиоэлектроника и информатика. 2005. Вып. 3. С.134-138.

Поступила в редколлегию 09.08.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Шабанов-Кушнаренко С.Ю.

**Жирнов Владимир Витальевич**, канд. техн. наук, вед. научн. сотрудник НИЦ ИИРЭСТ ХНУРЭ. Научные интересы: обработка радиолокационной информации, распознавание амплитудных и спектральных радиолокационных изображений Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина 14, тел.: (057)702-11-38, e-mail: vzh@kture.kharkov.ua

**Солонская Светлана Владимировна**, инженер НИЦ ИИРЭСТ ХНУРЭ. Научные интересы: интеллектуальные системы обработки и распознавания изображений, теория информации. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057)702-11-38, e-mail: svsol@kture.kharkov.ua.

УДК519.218:82:621.37

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ БЕЗЫНЕРЦИОННЫХ, В ВИДЕ СТЕПЕННЫХ СТОХАСТИЧЕСКИХ ПОЛИНОМОВ, ФИЛЬТРОВ АСИММЕТРИЧНО-ЭКССЕСНОГО II ТИПА I-ГО ВИДА ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА НА ФОНЕ ГАУССОВСКОЙ ПОМЕХИ

*КОВАЛЬ Е.А.*

Описывается проблема выделения одного из множества шумовых сигналов в условиях его аддитивного взаимодействия с гауссовской помехой. В качестве шумового выступает асимметрично-эксцесный II типа I-го вида, из класса близких к гауссовским, случайный процесс. К рассмотрению предлагаются математические модели полиномиальных безынерционных фильтров, представляющих собой стохастические полиномы в виде степенных преобразований от суммы полезного шумового сигнала и помехи. Отклик подобных фильтров приближается к полезному сигналу.

### Введение

Проблема обеспечения высокой помехоустойчивости систем передачи информации была и остается одной из основных проблем радиотехники. Существует несколько путей ее решения, среди которых: поиск новых видов радиосигналов и устройств для обработки, которые выделяют сигнал из его смеси с помехой наилучшим образом. Одним из направлений развития на пути совершенствования радиосигналов является использование в работе систем связи шумовых сигналов. Перспективным направлением развития подобных систем связи является использование в качестве шумового сигнала какого-либо из близких

к гауссовским сигналов [1, 2]. Стремление максимально упростить процедуру фильтрации подобных сигналов приводит к рассмотрению возможности использования нелинейных полиномиальных безынерционных фильтров, впервые предложенных в работе [3]. Алгоритм синтеза подобных фильтров для случая аддитивного взаимодействия полезного сигнала и помехи детально рассмотрен в работе [4]. Ранее были приведены математические модели полиномиальных безынерционных фильтров для случаев, когда полезный сигнал представлял собой один из асимметричных [5, 6] либо эксцесных [7, 8] случайных процессов. В качестве искажающего рассматривался гауссовский случайный процесс. Целью данной работы является исследование процесса фильтрации близких к гауссовским сигналов на фоне их аддитивного взаимодействия с гауссовской помехой, в основу которого положено использование математических моделей полиномиальных безынерционных фильтров. Для достижения поставленной цели нужно решить следующие задачи: синтезировать математические модели полиномиальных безынерционных фильтров степени  $s = 1, 2, 3, 4$  асимметрично-эксцесного сигнала II типа I-го вида; исследовать эффективность синтезированных математических моделей фильтров.

### Сущность

Согласно поставленной задаче, на входе фильтра действует некоторый случайный процесс, представляющий собой аддитивную смесь полезного сигнала и помехи, т.е.  $\xi(t) = s(t) + n(t)$ , где  $s(t)$  – асимметрично эксцесный II типа I-го вида полезный случайный процесс, а  $n(t)$  – помеха в виде гауссовского случайного процесса. В качестве априорно известных статистических характеристик обоих сигналов выступает моментно-кумулянтное описание. Отметим, что решение данной задачи проводится в предположении о стационарности в узком смысле, независимости и равенстве нулю моментов первого порядка обоих