

В.В. ЖИРНОВ, канд. техн. наук, С.В. СОЛОНСКАЯ, канд. техн. наук

ПРЕДИКАТНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССНЫХ ЗНАНИЙ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ И РАСПОЗНАВАНИИ ПАЧЕЧНОЙ СТРУКТУРЫ СИГНАЛОВ ОТ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В ОБЗОРНЫХ РЛС

Введение

Рассматриваются вопросы представления и обработки процессных знаний при межпериодной обработке сигнальной информации в интеллектуальных обзорных радиолокационных системах. Актуальность данной работы заключается в повышении эффективности систем мониторинга воздушного пространства и систем управления подвижными объектами путем создания универсального алгоритма обнаружения и распознавания полезных сигналов за счет накопления сигнальной (энергетической) и логической информации в анализируемой ячейке и ее окрестности в условиях мешающих воздействий. В разработанную предикатную модель процессных знаний входят процедуры формирования и анализа геометрического сигнального образа точечных объектов с последующим принятием решений о наблюдаемых объектах локации.

В современных технологиях обработки сигналов и информации недостаточно используются алгоритмы, в основе которых лежит модель накопления информации человеком-оператором и которые связаны с возможностью воспринимать пространственно-временное изображение радиолокационной информации с последующим принятием решения по анализу признаков.

В известных информационных технологиях [1] существуют операции, основанные на сигнальной информации текущего и нескольких предыдущих циклов измерений. В этих системах анализируется динамика изменений первичных картин сигнальной обстановки. Информационные технологии обработки сигналов и информации с элементами интеллектуализации [2 – 4] могут решать весь комплекс задач, выполняемых человеком-оператором, или осуществлять поддержку принятия решений; важную роль при разработке таких технологий играют методы обнаружения и распознавания сигналов [5 – 7]. Задачи обнаружения и распознавания радиолокационных объектов характеризуются высоким уровнем априорной неопределенности. При распознавании априорную информацию можно получить с той или иной степенью точности за счет увеличения времени наблюдения.

Цель и задачи исследования

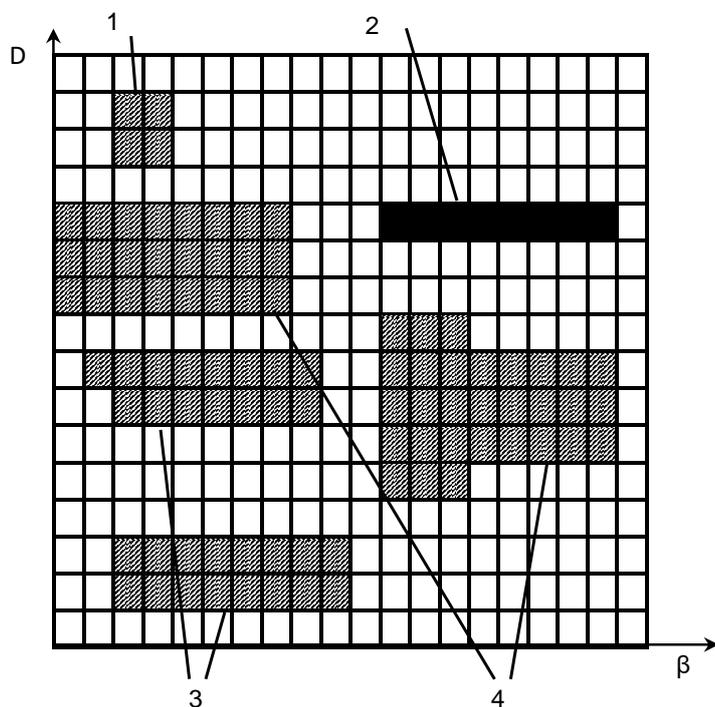
Цель – разработка предикатной модели процессных знаний при обнаружении и распознавании пачечной структуры сигналов от летательных аппаратов в обзорных радиолокационных системах и метода принятия решений, основанного на прецедентах.

Задачи исследования – предлагается проанализировать особенности и выделить структурные элементы процессной модели знаний. Показать, что преимущества данной модели связаны с возможностями конфигурирования и иерархического представления процесса обнаружения и распознавания подвижных объектов на основе интеллектуального анализа сигналов с использованием алгебры конечных предикатов и теории нейронных сетей. Показать, как этот подход может использоваться для автоматизации процесса обнаружения и распознавания воздушных точечных объектов.

Предикатная модель процессных знаний при обнаружении и распознавании воздушных точечных объектов

В разработанную модель входят процедуры формализации и анализа символьной модели точечных объектов на основе алгебры предикатов [8 – 13] и операций, предназначенные для создания предикатной модели процессных знаний при обнаружении и распознавании

воздушных точечных объектов. Символьная модель наблюдаемых точечных объектов формируется из набора радиолокационных сигналов N информационных ячеек от каждого элемента зоны обзора. Обычно из полученных сигналов формируется карта или матрица данных. В нашем случае формируется символьная модель сигнальных отметок точечных объектов



1 – импульсная помеха; 2 – точечный объект;
3 – «ангел-эхо»; 4 – протяженные объекты.

Рис. 1 Символьные модели сигнальных отметок точечного объекта и мешающего фона

типа самолет, вертолет и БПЛА (рис. 1). Таким образом, обычная база данных превращается в базу знаний, в результате анализа которой можно и нужно получить требуемое решение. Рассмотрим особенности оцениваемых межпериодных информационных потоков. Формируемый массив данных представляет собой матрицу амплитуд $\|A\|$ размером $M \times N$. Для таких условий модель символа отметки точечного подвижного объекта будет определяться как совокупность пачки сигналов-отражений от объекта за время облучения его антенной РЛС. Пусть $M = \{q_{11}, q_{12}, \dots, q_{ij}, \dots, q_{mn}\}$ – множество, представляющее собой матрицу $\|A\|$ размерностью $M \times N$, состоящее из элементов $k = m \times n$ – значений амплитуд сигналов в элементах обработки зоны обзора РЛС, а B – некоторое из его подмножеств $B \subseteq M$, амплитуды сигналов которого q_{ij} превышают

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 $(t_{11}, t_{12}, \dots, t_{ij}, \dots, t_{mn})$, запишем так:

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

Выражение $x^{q_{ij}}$ – форма узнавания события, когда $x = q_{ij}$, то $x^{q_{ij}} = 1$.

Предикатная модель процессных знаний о наблюдаемых воздушных или наземных объектах в общем виде – это система n унарных и бинарных предикатов Z_j :

$$M = \{Z_j, j = 1..n\}. \quad (2)$$

Такая система предикатов (атрибуты или предикатные признаки процесса) позволяет описать ситуацию вокруг анализируемой в данный момент информационной ячейки и процесс формирования символьного изображения отметки из $A(x)$ в течение нескольких циклов зондирования РЛС. Например, для РЛС обзора пространства это могут быть:

– унарный предикат $Z_{p_{ij}}$ присутствия (presence) или наличия сигнала в a_{ij} информационной ячейке; i, j – номера элементов зоны обзора РЛС;

- бинарный предикат Z_{dij} ухода (departure) сигнала a_{ij} в соседнюю по дальности информационную ячейку;
- бинарный предикат Z_{aij} перехода сигнала в смежную (adjacent) по азимуту или соседнюю информационную ячейку, прилегающую к рассматриваемой ячейке.

Эти предикатные признаки формируются по следующим правилам:

$$Z_{pij} = 1, \text{ при } A_{ij} > 0 \quad (3)$$

$$Z_{dij} = 1, \text{ при } A_{i-1j} > 0 \wedge Z_{pij} = 1 \quad (4)$$

$$Z_{aij} = 1, \text{ при } Z_{pij} = 1 \wedge A_{ij-1} > 0, \quad (5)$$

где A_{ij} – предикат события наличия-отсутствия сигнала в соответствующем элементе анализа.

Предикатная модель процессных знаний о наблюдаемых объектах локации, адаптированная на обнаружение разных точечных объектов, имеет вид

$$M^o = \{Z_j \mid \forall Z_j \in M \exists O_k \in O, k, j = 1..n\}, \quad (6)$$

где O – предметная область, O_k – объекты предметной области.

Разработана в общем виде иерархичная предикатная модель процессных знаний межпериодной обработки обзорной радиолокационной системы (рис. 2), что позволяет представить «горизонтальный» процесс в виде «вертикальной» структуры в аналитической предикатной форме.

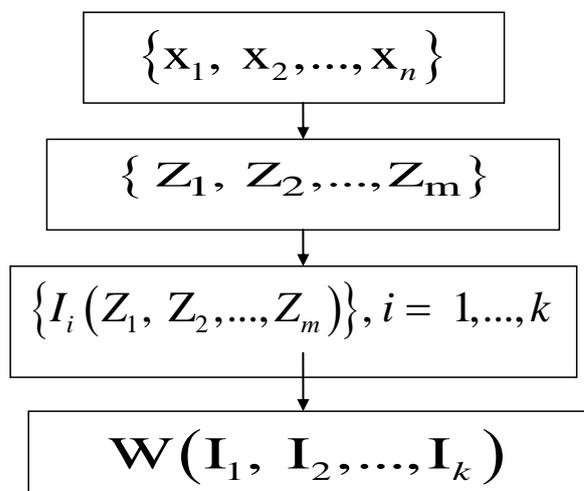


Рис. 2. Предикатная модель обработки процессных знаний

Первый уровень модели – это полученные в результате наблюдений данные $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, которые не всегда имеют удобный для использования формат. На втором уровне реляционная сеть $\{Z_1, Z_2, \dots, Z_m\}$ задает связи между данными, которые определяют структуру информации.

На третьем уровне накопление знаний на основе данных и информации представляется как добавление новых сетей отношений $\{I_i(Z_1, Z_2, \dots, Z_m)\}, i = 1, \dots, k$, заданных на множестве начальных данных $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$.

Четвертый уровень метазнаний объединяет все предыдущие уровни, позволяя находить новое понимание существующего знания. Формально уровень метазнаний имеет вид предикатной операции $W(I_1, I_2, \dots, I_k)$, который задан на множестве $\{I_1, I_2, \dots, I_k\}$, связывает всю полученную информацию и в процессе ее обработки получает новую информацию.

На рис. 3 приведена реальная, экспериментально полученная, пачка импульсов, отраженных от самолета. Здесь две информационные единицы связаны отношением «причина – следствие»: отношением появления сигнала в a_{ij} ячейке (это предикатный признак Z_{pij}^k присутствия (англ.–presence) сигнала); отношением «соседней ячейки» (это предикатный

начинает формироваться новая символьная модель (пачка) сигнальных отметок для точечных подвижных и малоподвижных летательных аппаратов типа самолет, вертолет, БПЛА;

3. Если выполняются 1-е и 2-е уравнения, то формируются бинарные предикаты Z_{dij} и Z_{aij} . Это означает, что сигнал в исследуемую ячейку переходит и из соседней по дальности a_{i-1j} ячейки, и из соседней по азимуту a_{ij-1} ячейки. При этом начинает формироваться новая символьная модель сигнальных отметок для протяженных неподвижных объектов типа облака, тучи или атмосферной неоднородности типа «ангел-эхо»;

Рассмотрим, как формируется структура пачки сигнальных отметок для точечных воздушных объектов. Для начала определим номер $l = l_1$ рядом расположенного элемента обработки с предикатным признаком Z_{aij} соседнего элемента обработки, где l_1 – номер начала пачки символьной модели сигнальной отметки для точечного подвижного или малоподвижного объекта. Для первого шага начала формирования символьной модели примем $l_1 = 0$.

Исходя из анализа вариантов решения уравнений (8) и с учетом анализа структурных элементов процессной модели знаний по обнаружению и распознаванию точечных подвижных объектов, на основе интеллектуального анализа определяем очередность последующих процедур (шагов) обработки предикатных процессных знаний.

На следующем шаге, при составлении предикатных уравнений для нахождения номера $l = l_2$ элемента обработки с подобным предикатным признаком учитываем обозначившееся на первом шаге направление (a_{ij}, a_{ij+l_1}) формирования символьной модели пачечной структуры сигнальной отметки точечного объекта. При изменении номера по координате l_1 направление поиска совпадает с направлением азимутальной оси координат j (вправо). Анализ структурных элементов процесса межпериодной обработки сигналов в обзорных РЛС показывает, что сначала идет заполнение информационных ячеек по дальности i , а затем – заполнение информационных ячеек по азимуту j . Таким образом, если имеется предикатный признак Z_{aij+l_1} соседней ячейки по азимуту, то на следующем шаге обработки проверяется наличие предикатного признака Z_{aij+l_2} в информационной ячейке a_{ij+l_2} :

$$Z_{aij+l_2} = (A_{ij} > 0 \wedge Z_{pi+l_2j} = 1) = 1. \quad (9)$$

Решая уравнение (9), находим значения l_2 . Для выполнения последующих операций определения номеров ячеек уточняем направление вычислением градиентов номеров по оси i , т.е. $\Delta l_2 = l_2 - l_1$.

При $\Delta l_2 = +1$ предикатное уравнение имеет вид

$$Z_{aij+l_2+1} = (A_{ij+l_2} > 0 \wedge Z_{pij+l_2+1} = 1) = 1. \quad (10)$$

На n -м шаге определяем $\Delta l_n = l_n - l_{n-1}$. Для этого шага при $\Delta l_n = +1$ предикатное уравнение имеет вид

$$Z_{aij+l_n} = (A_{ij+l_{n-1}} > 0 \wedge Z_{pij+l_n} = 1) = 1. \quad (11)$$

В результате решения системы n предикатных уравнений (9) – (11) находим все значения $l_1 \dots l_n$ и вид пачки символьной модели подвижного объекта в виде предикатного уравнения:

$$Z_{mij} = \bigwedge_{l_1}^{l_n} Z_{ai, j+l_n} = Z_{ai, j+l_1} \wedge Z_{ai, j+l_1} \wedge \dots \wedge Z_{ai, j+l_{n-1}} \wedge Z_{ai, j+l_n} = 1. \quad (12)$$

Сформирована система предикатных уравнений (8) – (12) модели процессных знаний межпериодной обработки сигнальной информации при формировании новой символьной модели пачечной структуры сигнальной отметки для точечных подвижных и малоподвижных летательных аппаратов для обзорных РЛС. С помощью этих уравнений определяется структура и перечень процедурных и семантических операций процессных моделей знаний.

Вид структуры и перечень процедурных и семантических операций обработки процессных знаний следует из анализа вариантов решения уравнений (8). Если выполняется 2-е уравнение, то формируется бинарный предикат Z_{aij} . Это означает, что сигнал в исследуемую ячейку переходит из соседней по азимуту a_{ij-1} ячейки и начинает формироваться новая символьная модель пачки сигналов (сигнальных отметок) для точечных подвижных и малоподвижных летательных аппаратов типа самолет, вертолет, БПЛА. В результате решения системы n предикатных уравнений (9) – (11) находим место, границы или пределы $l_1 \dots l_n$ предикатного признака пачки символьной модели подвижного объекта Z_{mij} в виде предикатного уравнения (12).

Метод принятия решений, основанный на известных прецедентах

На основе модели процессных знаний при обнаружении и распознавании пачечной структуры воздушных объектов разработан метод принятия решений, основанный на прецедентах. В зависимости от типов связей, используемых в модели, различают классифицирующие и функциональные сети [3]. Для наших целей наиболее применимы продукционные или комбинированные сети. В моделях этого типа используются некоторые элементы логических и сетевых моделей [8]. Из логических моделей заимствована идея правил вывода или решающего правила, а из сетевых моделей – описание знаний в виде семантической нейронной сети (рис. 4).

В методе выделена процедурная информация, которая описывается иными средствами, чем декларативная информация. Вместо логического вывода появляется вывод или решающее правило на знаниях. При формализации процессных знаний получения и обработки символьной модели пачки сигналов (сигнальной отметки) для точечных летательных аппаратов типа самолет, вертолет, БПЛА используется система предикатных уравнений (9) – (11), в результате решения которых находим вид и значение предикатного признака пачки символьной модели подвижного объекта Z_{mij} в виде предикатного уравнения (12). Вид предикатного признака символьной модели пачки сигналов (сигнальной отметки), найденный из системы предикатных уравнений система предикатных уравнений (9) – (11), является информационным признаком и используется при распознавании отметок воздушных объектов для точечных подвижных и малоподвижных летательных аппаратов типа самолет, вертолет, БПЛА.

Для оценки энергетического признака символьной модели пачки введено понятие накопленной энергии пачки [11] как сумма амплитуд (предикатов) сигналов информационных ячеек пачки, определяемая вектором (l_n) согласно предикатному уравнению (12). С учетом распределения амплитуд в пределах пачки (l_n) и используя данные о форме, определяем энергетический признак пачки сигналов (отметок) подвижных воздушных объектов как суммарную амплитуду в виде

$$I_{m2} = \sum_{l_1}^{l_n} q_{i, j+l_n} Z_{ai, j+l_n}. \quad (13)$$

Матрица данных $M = \{q_{11}, q_{12}, \dots, q_{ij}, \dots, q_{mm}\}$		
Первый уровень Матрица предиката событий $A = \{A_{11}, A_{12}, \dots, A_{ij}, \dots, A_{mm}\}$		
Второй уровень Система унарных и бинарных предикатов $\{Z_{11}, Z_{12}, \dots, Z_{ij}, \dots, Z_{mm}\}$: – унарный предикат Z_{pij} присутствия (англ. – presence) в a_{ij} информационной ячейке $Z_{pij} = 1$, при $A_{ij} > 0$ (i, j – номера элементов зоны обзора РЛС); – бинарный предикат Z_{dij} ухода (англ. – departure) сигнала a_{ij} в соседнюю по дальности информационную ячейку $Z_{dij} = 1$, при $A_{i-1j} > 0 \wedge Z_{pij} = 1$; – бинарный предикат Z_{aij} перехода сигнала в смежную по азимуту (англ. – adjacent) или соседнюю информационную ячейку $Z_{aij} = 1$, при $Z_{pij} = 1 \wedge A_{ij-1} > 0$,		
Третий уровень Добавление новых реляционных сетей $\{I_i(Z_1, Z_2, \dots, Z_m)\}$, $i = 1, \dots, k$, заданных на множестве начальных данных $A = \{A_{11}, A_{12}, \dots, A_{ij}, \dots, A_{mm}\}$: – предикатный признак пачки сигналов (отметок) подвижных воздушных объектов: $I_{m1} = Z_{mij} = \bigwedge_{l_1}^{l_n} Z_{ai, j+l_1} = Z_{ai, j+l_1} \wedge Z_{ai, j+l_2} \wedge \dots \wedge Z_{ai, j+l_{n-1}} \wedge Z_{ai, j+l_n} = 1;$ – энергетический признак пачки сигналов (отметок) подвижных воздушных объектов: $I_{m2} = \sum_{l_1}^{l_n} q_{i, j+l_n} Z_{ai, j+l_n};$ где k, l – номера элементов символьных моделей объектов, начиная с текущего.		
Четвертый уровень объединяет все предыдущие уровни, имеет вид предикатной операции $W(I_1, I_2, \dots, I_k)$.		
Возможная схема принятия решения		
Точечный подвижный объект $O_m = W(I_{m1}, I_{m2})$		

Рис. 4. Иерархическая схема принятия решения

Заключение

Разработана предикатная модель процессных знаний при обнаружении и распознавании пачечной структуры воздушных объектов. Актуальность работы заключается в повышении эффективности систем мониторинга воздушного пространства и систем управления подвижными объектами через создание универсального алгоритма обнаружения и распознавания полезных сигналов за счет накопления сигнальной (энергетической) и логической информации в анализируемой ячейке и ее окрестности в условиях мешающих воздействий.

Разработан метод принятия решений, основанный на прецедентах. В зависимости от типов связей, используемых в модели, различают классифицирующие и функциональные сети. Для наших целей наиболее применимы продукционные или комбинированные модели. В моделях этого типа используются некоторые элементы логических и сетевых моделей.

Из логических моделей заимствована идея правил вывода или решающего правила, а из сетевых моделей – описание знаний в виде семантической нейронной сети.

Список литературы:

1. Сколник М.И. Справочник по радиолокации. В 2 т. ; пер. с англ. ; под ред. В.С. Вербы. Москва : Техносфера, 2014. 672 с.
2. Иванилов А.А. Реляционные алгебры и алгебры предикатов / А. А. Иванилов, Ю.П. Шабанов-Кушнаренко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2007. № 4/2. С. 43–48.
3. Russel S. Artificial intelligence. A modern approach, Second Edition / S. Russel, P. Norvig. Williams, 2006. 1410 p.
4. Бондаренко М. Ф. Теория интеллекта : учебник / М. Ф. Бондаренко, Ю. П. Шабанов-Кушнаренко. Харьков : СМИТ, 2007. 576 с.
5. Горелик, А. Л. Методы распознавания / А. Л. Горелик, В. А. Скрипкин. Москва : Высш. шк., 2004. 261 с.
6. Журавлев Ю. И. Об алгебраическом подходе к решению задач распознавания или классификации // Проблемы кибернетики. 2005. Вып. 33. С. 5–68.
7. Жирнов В.В., Солонская С.В. Предикатная модель процессных знаний о наблюдаемых объектах в многоканальных интеллектуальных системах мониторинга // Радиотехника. 2019. Вып. 199. С. 67–74.
8. Solonskaya S. V., Zhirnov, V. V. Intelligent analysis of radar data based on fuzzy transforms // Telecommunications and Radio Engineering (English translation of *Elektrosvyaz and Radiotekhnika*). 2018. 77 (15). P. 1321–1329.
9. Shubin I., Snisar S., Zhyrnov V., Slavhorodskiy V. Practical Application of Formal Representation of Information for Intelligent Radar Systems. 5th International Scientific-Practical Conference “Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)”. 2018. 9–12 October. P. 433–436.
10. Solonskaya S.V., Zhirnov V.V. Signal processing in the intelligence systems of detecting low-observable and low-doppler aerial targets // Telecommunications and Radio Engineering. 2018. Vol. 77, Is. 20. P. 1827–1835.
11. Zhirnov V.V., Solonskaya S.V., Zima I.I. Magnetic and electric aspects of genesis of the radar angel clutters and their virtual imaging // Telecommunications and Radio Engineering (English translation of *Elektrosvyaz and Radiotekhnika*) 2016. 75 (15). P. 1331–1341.
12. Solonska S., Zhyrnov V., Holovin O. Semantic Processing of Radar Spectral Information for Air Object Recognition // 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference: Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2019 Proceedings.
13. Shubin I., Solonska S., Snisar S., Slavhorodskiy V., Skovorodnikova V. Semantic Radar Technology for Detecting and Recognizing Low-Visible Air Objects // 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference: Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2019 Proceedings.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 25.03.2020