

РАДИОЛОКАЦІЯ І РАДІОНАВІГАЦІЯ РАДИОЛОКАЦИЯ И РАДИОНАВИГАЦИЯ RADIOLOCATION AND RADIONAVIGATION

УДК 004.89: 621.396

DOI:10.30837/rt.2021.4.207.09

*В.В. ЖИРНОВ, канд. техн. наук, С.В. СОЛОНСКАЯ, канд. техн. наук,
И.Ю. ШУБИН, канд. техн. наук*

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ

Введение

Приводятся результаты разработки метода, создания программ и экспериментальных исследований системы автоматического обнаружения радиолокационных отметок воздушных объектов и их распознавания с обработкой реальных записей в обзорных РЛС. Актуальность этих работ – создание универсальных алгоритмов автоматической обработки информации для обеспечения эффективного обнаружения полезных сигналов за счет накопления как сигнальной (энергетической), так и смысловой информации в анализируемой ячейке и в ее окрестности в сложных условиях малых сигналов.

Существующие методы автоматизации обнаружения радиолокационных отметок воздушных объектов и их распознавания [1, 2] не учитывают смысловую сторону процессов и не позволяют создавать эффективные системы автоматической обработки радиолокационных сигналов. Поэтому перспективно создание и использование символьной модели отметок сигналов, включающей в себя образ изучаемого объекта и семантическую составляющую процесса обработки радиолокационных сигналов.

В известных радиолокационных информационных системах [1, 2] анализируются межпериодные изменения сигнальной обстановки, но ограничиваются созданием геометрического образа. Если объект точечный и подвижный, то формируется образ из пачки принятых элементарных отраженных сигналов в виде протяженной по азимуту отметки. Если же объект протяженный, например, облака, дождевые тучи, стаи птиц, локальные воздушные неоднородности «ангел-эхо» и т.д., то из принятых сигналов формируется образ этого объекта. Известны также операции в интеллектуальных информационных системах (ИИС), где используются алгоритмы анализа процессных знаний, в основе которых лежит модель действий человека-оператора и которые связаны с возможностью параллельного восприятия информации с последующим принятием решения по анализу признаков [3 – 6]. Эффективным средством математического описания смысловой информации является алгебра конечных предикатов и предикатных операций.

Задачи обнаружения и распознавания радиолокационных объектов [2, 5] характеризуются высоким уровнем априорной неопределенности. Это та предварительная известная информация, которая должна использоваться при обнаружении и распознавании радиолокационных объектов. Пути преодоления трудностей решения этих задач сходны и достаточно сложны. Есть отличия между способами обнаружения и распознавания объектов.

Символьная модель отметок воздушных объектов с учетом ее образной и семантической составляющих

Предикатные признаки символьной модели отметок воздушных объектов – это математическое описание процедур и отношений при восприятии и анализе сигналов оператором в виде различительных признаков или свойств. В нашем случае это система элементарных или первоначальных (унарных и бинарных) предикатных признаков, а также математическое описание предикатных признаков символьных моделей отметок точечных и протяженных воздушных объектов.

В ходе исследований использовались экспериментальные данные (рис. 1), полученные при записи отраженных сигналов обзорной РЛС сантиметрового диапазона (длительность импульса 1 мкс, частота зондирования 365 Гц). На рисунке приведены распределения амплитуд изображений радиолокационных отметок в матрице размером 129×129 реальных записей сигналов РЛС. В разработанную модель входят процедуры формализации и анализа геометрического сигнального образа отметки от наблюдаемых воздушных объектов на основе алгебры предикатов [7 – 10] и операции создания предикатной модели семантической составляющей для распознавания наблюдаемых объектов локации.

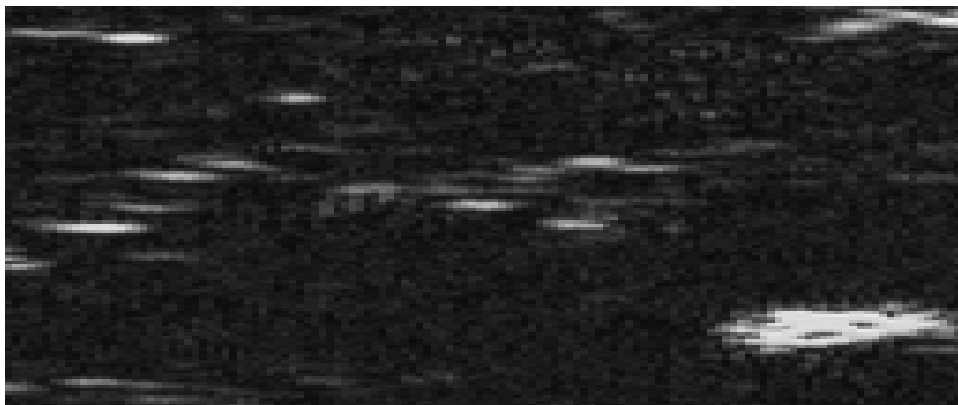


Рис. 1. Распределение амплитуд изображений РЛ отметок в матрице размером 129×129 реальных записей сигналов РЛС сантиметрового диапазона

Пусть $M = \{q_{11}, q_{12}, \dots, q_{ij}, \dots, q_{mn}\}$ – множество, представляющее собой прямоугольную 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 $t_{ij} = 0$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$. B элементов обработки, превысивших порог, с характеристикой $(t_{11}, t_{12}, \dots, t_{ij}, \dots, t_{mn})$, запишется формулой $A(x) = t_{11}x^{q_{11}} \vee \dots \vee t_{mn}x^{q_{mn}} = \bigvee_{i=1, j=1}^{mn} t_{ij}x^{q_{ij}}$. Здесь выражение $x^{q_{ij}}$ – форма узнавания события. Когда $x = q_{ij}$, то $x^{q_{ij}} = 1$.

Предикатные признаки символьной модели отметок воздушных объектов

Элементарные предикатные признаки символьной модели отметок воздушных объектов и их распознавания в общем виде – это система n унарных и бинарных предикатов Z_j . Для радиолокационных систем обзора пространства это могут быть: унарный предикат $Z_{p_{ij}}$ наличия сигнала в a_{ij} информационной ячейке и бинарные предикаты $Z_{d_{ij}}$, $Z_{a_{ij}}$ ухода сигнала в соседние по дальности и по азимуту ячейки [7 – 10].

При таких исходных условиях эти предикатные признаки формируются по правилам:

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

$$Z_{d_{ij}} = 1, \text{ при } A_{i-1j} > 0 \wedge Z_{p_{ij}} = 1, \quad (2)$$

$$Z_{a_{ij}} = 1, \text{ при } Z_{p_{ij}} = 1 \wedge A_{ij-1} > 0. \quad (3)$$

Далее получены предикатные признаки символьной модели отметок точечных и протяженных воздушных объектов как совокупности предикатных признаков наличия и ухода сигнала в соседние по азимуту и по дальности ячейки. Это процесс формирования

предикатного признака отметки точечного объекта как совокупности предикатных признаков Z_{aij} соседней за l_n ячейки (n – количество сигнальных импульсов в пачке; l_1 и l_n – номера начала и конца пачки) зондирований РЛС, имеющего процедурный характер отношений и позволяющего получить информацию о пачке отраженных сигналов от точечного подвижного объекта.

Если имеется предикатный признак Z_{aij+l_1} соседней по азимуту ячейки, то на следующем шаге обработки проверяется наличие предикатного признака Z_{aij+l_2} в информационной ячейке a_{ij+l_2} .

$$Z_{aij+l_2} = (A_{ij} > 0 \wedge Z_{pi+l_2j} = 1) = 1 \quad (4)$$

Решая уравнение (4), находим значения l_2 и составляем предикатное уравнение

$$Z_{aij+l_2+1} = (A_{ij+l_2} > 0 \wedge Z_{pij+l_2+1} = 1) = 1 \quad (5)$$

На n -м шаге предикатное уравнение имеет вид

$$Z_{aij+l_n} = (A_{ij+l_{n-1}} > 0 \wedge Z_{pij+l_n} = 1) = 1 \quad (6)$$

В результате решения системы n предикатных уравнений (4) – (6) определяются все значения $l_1 \dots l_n$ и символьная модель отметки точечного воздушного объекта в виде предикатного уравнения

$$Z_{mij} = \bigwedge_{l_1}^{l_n} Z_{ai,j+l_n} = Z_{ai,j+l_1} \wedge Z_{ai,j+l_2} \wedge Z_{ai,j+l_{n-1}} \wedge Z_{ai,j+l_n} = \bigwedge_{l_1}^{l_n} Z_{ai,j+l_n} \quad (7)$$

Виды символьных изображений радиолокационных отметок для точечных и воздушных объектов, полученные в результате модельных экспериментов, приведены на рис. 2.

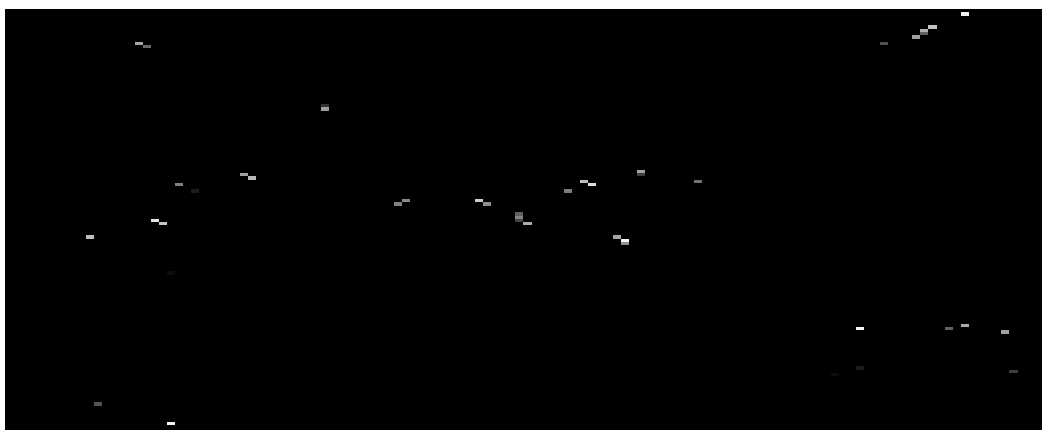


Рис. 2. Виды символьных изображений отметок

Для оценки энергетического признака символьной модели отметки введено понятие накопленной энергии пачки [7] как суммы амплитуд ячеек пачки в направлении, определяемом вектором (l_n) согласно предикатному уравнению (7). 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:

$$I_{m2} = \sum_{l_1}^{l_n} q_{i,j+l_n} Z_{ai,j+l_n} \quad (8)$$

По виду предикатного признака символьной модели отметки (7), найденного из системы предикатных уравнений (4) – (6), и по энергетическому признаку этой пачки, определенному как суммарная амплитуда в виде (8), осуществляется процедура распознавания отметок точечных воздушных объектов.

Если имеется предикатный признак Z_{di+k_1j} соседней ячейки по дальности, то в следующем шаге обработки проверяется наличие предикатного признака Z_{di+k_2j} в информационной ячейке a_{i+k_2j} .

$$Z_{di+k_2j} = (A_{ij} > 0 \wedge Z_{pi+k_2j} = 1) = 1 \quad (9)$$

Решая уравнения (12), найдем значения k_2 и составим предикатное уравнение:

$$Z_{di+k_2+1j} = (A_{i+k_2j} > 0 \wedge Z_{pi+k_2+1j} = 1) = 1 \quad (10)$$

На n -м шаге предикатное уравнение имеет вид

$$Z_{di+k_nj} = (A_{i+k_{n-1}j} > 0 \wedge Z_{pi+k_nj} = 1) = 1 \quad (11)$$

В результате решения системы n предикатных уравнений (9) – (11) находим все значения $k_1 \dots k_n$ и запишем формулу столбца символьной модели протяженного объекта в виде предикатного уравнения:

$$Z_{cdij} = \bigwedge_{k_1}^{k_n} Z_{di+k_n,j} = Z_{di+k_1,j} \wedge Z_{di+k_2,j} \wedge Z_{di+(k_{n-1}),j} \wedge Z_{di+k_n,j} = 1 \quad (12)$$

Если одновременно 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 предикатный признак Z_{bij} символьной модели сигнальных отметок для протяженных воздушных объектов. В этом случае в следующем шаге обработки проверяется наличие столбца символьной модели протяженного объекта Z_{cdij} в информационной ячейке $a_{i+k_2,j+l_2}$ следующего по номеру $j+l_2$ зондирования РЛС [10].

$$Z_{di+k_2,j+l_2} = (A_{ij+l_2} > 0 \wedge Z_{pi+k_2j+l_2} = 1) = 1 \quad (13)$$

Решая уравнения (13), находим значения k_2 и l_2 составим предикатное уравнение:

$$Z_{di+k_2+1,j+l_2} = (A_{i+k_2,j+l_2} > 0 \wedge Z_{pi+k_2+1,j+l_2} = 1) = 1 \quad (14)$$

На n -м шаге предикатное уравнение имеет вид

$$Z_{di+k_n, j+l_2} = (A_{i+k_{n-1}, j+l_2} > 0 \wedge Z_{pi+k_n, j+l_2} = 1) = 1 \quad (15)$$

В результате решения системы n предикатных уравнений (16) – (18) находим все значения $k_1 \dots k_n$ и запишем форму (вид) столбца протяженного объекта в виде предикатного уравнения:

$$Z_{cdij+l_2} = \bigwedge_{k_1}^{k_n} Z_{di+k_n, j+l_2} = Z_{di+k_1, j+l_2} \wedge Z_{di+k_2, j+l_2} \wedge Z_{di+(k_{n-1}), j+l_2} \wedge Z_{di+k_n, j+l_2} = 1 \quad (16)$$

В результате решения систем предикатных уравнений, подобных уравнениям (13) – (16), находим все возможные значения параметров столбцов символьной модели протяженного объекта Z_{cdij} для $j+1 \dots j+l_n$ азимутальных направлений и значение предикатного признака

Z_{bij} символьной модели неподвижного протяженного объекта как решение предикатного уравнения

$$Z_{bij} = \left(\bigwedge_{l_1, k_1}^{l_n, k_n} Z_{cdi+k, j+l} = 1 \right) = \bigwedge_{l_1}^{l_n} \left(\bigwedge_{k_1}^{k_n} Z_{cdi+k, j+l} = 1 \right) = 1. \quad (17)$$

Для оценки энергетического признака символьной модели сигнальных отметок для протяженных воздушных объектов введено понятие накопленной энергии протяженного объекта [7, 10] как сумму амплитуд ячеек символьной модели протяженного объекта в направлениях, определяемых векторами (k_n, l_n) согласно предикатному уравнению (17). С учетом распределения амплитуд в пределах символа (k_n, l_n) и, используя данные о форме, определяем энергетический признак символа протяженных неподвижных воздушных объектов как суммарную амплитуду в виде

$$I_{b2} = \sum_{k_1, l_1}^{k_n, l_n} q_{i+k_n, j+l_n} Z_{cdi+k, j+l}. \quad (18)$$

По виду предикатного признака символьной модели сигнальных отметок для протяженных неподвижных объектов, найденного из системы предикатных уравнений (9) – (12) и (13) – (17), и по энергетическому признаку символьной модели, определенному как суммарную амплитуду в виде (18), осуществляется процедура распознавания протяженных воздушных объектов.

Для оценки эффективности метода, созданных программ проведены модельные эксперименты с использованием записей радиолокационных сигналов. При этом использованы специальные методы обработки цифровой и логической информации [11 – 15]. Апробация проведена в соответствии с правилом, если: 1) отметке соответствуют предикатный признак символьной модели сигнальной отметки для протяженных неподвижных объектов, то отметка относится к классу ангел-эхо; 2) отметке соответствует предикатный признак символьной модели пачки сигналов, то отметка относится к классу воздушных объектов. По результатам экспериментов все они были правильно идентифицированы. Эксперименты показали, что при малых значениях отношения сигнал/помеха, которые не превышают 10 дБ, вероятность обнаружения и распознавания воздушных объектов выше, чем при обработке традиционными методами, а при значениях более 15 дБ результаты приближаются к оптимальным.

Выводы

Приведены результаты апробации метода обработки радиолокационных изображений на основе интеллектуального анализа процессов для системы автоматического обнаружения радиолокационных отметок воздушных объектов и их распознавания. Метод основан на

определении системы предикатных признаков, позволяющей описать семантическую составляющую символьной модели отметок. Приводятся процедуры формирования предикатных признаков символьной модели точечных и протяженных воздушных объектов как совокупности предикатных признаков наличия и ухода (смещения) сигнала в соседние по азимуту и по дальности ячейки. Создано алгоритмически – программное обеспечение с обработкой реальных записей обзорных РЛС. Показано как по величинам параметров геометрического образа символьного изображения определяется принадлежность отметки к точечному или протяженному воздушному объекту. В результате семантического анализа стационарности флуктуаций пачки идентифицируется принадлежность отметок подвижным или неподвижным воздушным объектам. Исследованы семантические составляющие распознавания, которые подобны алгоритмам принятия решений человеком-оператором. Распознавание отметок проводится путем решения разработанных уравнений предикатных операций.

Список литературы:

1. Jianping Ou, Jun Zhang, and Ronghui Zhan. Processing Technology Based on Radar Signal Design and Classification // International Journal of Aerospace Engineering. Vol. 2020, pp. 1-19. Article ID 4673763. <https://doi.org/10.1155/2020/4673763>.
2. Skolnik M. I. (eds) (2021) Radar Handbook, McGraw-Hill, New York.
3. Berkler Katrin. Trends in artificial intelligence / Editorial team Janis Eitner (V.i.S.d.P.), Katrin Berkler, Henning Köhler, Roman Möhlmann. Fraunhofer-Gesellschaft e.V., 2018. p.p. 1-32.
4. Левыкин В.М., Чалая О.В. Модель жизненного цикла знаний – емкого бизнес-процесса // УСыМ. 2017. №1. С. 68-85.
5. Журавлев, Ю. И. Об алгебраическом подходе к решению задач распознавания или классификации / Ю. И. Журавлев // Проблемы кибернетики. 2005. Вып. 33. С. 5–68.
6. Russell S. (2019) Human compatible: Artificial intelligence and the problem of control, Penguin.
7. Solonskaya S., Zhirnov V. (2018). Intelligent analysis of radar data based on fuzzy transforms // Telecommunications and Radio Engineering, 77(15), pp.1321-1329.
8. You He; Jianjuan Xiu; Xin Guan. Radar Data Processing with Applications // Publisher John Wiley & Sons. 2017. <https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpRDPAA0001/viewerType:toc/>. ISBN978-1-118-95686.
9. Kozulia Tatiana, Sharonova Natalia, Kozulia Mariia. Knowledge-based information support formation for complex systems research // Системні дослідження та інформаційні технології. 2017. No 3. P. 63-72.
10. Солонская, С.В., Жирнов, В.В. Предикатная модель процессных знаний при обнаружении и распознавании протяженных объектов типа облака, тучи, «ангел-эхо» в обзорных РЛС // Радиотехника. 2020. № 202. С 164-172.
11. Bendich P., Bubenik P., Wagner A. Algorithms and complexity for Turaev–Viro invariants // Journal of Applied and Computational Topology, vol. 2.1, pp.33-53, 2018.
12. Zhirnov V., Solonska S. (2020). Intelligent system for detection of low-visible air objects in surveillance radars // Telecommunications and Radio Engineering. 2020. Vol. 79, Issue 17. pp. 1513-1519.
13. Advanced Methods and Deep Learning in Computer Vision. 1st Edition / Editors: E. R. Davies, Matthew Turk. Academic Press. 2021. Page Count: 586. ISBN: 9780128221099.
14. Zubkov O., Sheiko S., Oleynikov M., Kartashov V., Babkin S. INVESTIGATION OF EFFICIENCY OF DETECTION AND RECOGNITION OF DRONE IMAGES FROM VIDEO STREAM OF STATIONARY VIDEO CAMERA // Telecommunications and Radio Engineering. 2021. Vol. 80, Issue 3. pp. 23-37.
15. Sytnik, Igor Vyzmitinov. ADAPTIVE APPROACH TO FILTERING OF STOCHASTIC PROCESSES IN RESCUER RADAR // Telecommunications and Radio Engineering. 2021. Vol. 80, Issue 3. pp. 1513-1519.

Поступила в редколлегию 11.11.2021

Сведения об авторах:

Жирнов Владимир Витальевич – канд. техн. наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, в.н.с. НИЦ интегрированных радиоэлектронных систем и технологий, Украина; e-mail: nauka123@ukr.net; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2397-3126>

Солонская Светлана Владимировна – канд. техн. наук, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, доцент кафедры естественных и гуманитарных наук, Украина; e-mail: solonskaya@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8841-7825>

Шубин Игорь Юрьевич – канд. техн. наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры программной инженерии, Украина, e-mail: igor.shubin@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1073-023X>