

*В.В. ЖИРНОВ, канд. техн. наук, С.В. СОЛОНСКАЯ, канд. техн. наук,
В.И. ЗАРИЦКИЙ, канд. техн. наук*

МЕТОД БОРЬБЫ С НЕСТАЦИОНАРНЫМИ ЕСТЕСТВЕННЫМИ И ИМИТИРУЮЩИМИ ПОМЕХАМИ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ОБЗОРНЫХ РЛС

Введение

Рассмотрены актуальные вопросы защиты РЛС от нестационарных естественных и имитирующих искусственных помех на основе интеллектуального анализа сигнальной отметки. Предложены универсальные алгоритмы автоматизации операций обработки информации, обеспечивающие эффективную идентификацию ложных отметок за счет семантических признаков флуктуаций радиолокационной отметки. Показано, как этот подход может использоваться для быстрого автоматического обнаружения и распознавания ложных отметок воздушных и надводных объектов. В разработанную технологию системы входят процедуры формализации и анализа символьной модели изображения наблюдаемых объектов для принятия решений, основанных на прецедентах.

Известно, что обзорные РЛС, использующие как сложные сигналы с внутримпульсной модуляцией, так и локаторы обычного типа, подвержены воздействию нестационарных естественных, например типа «ангел-эхо», и преднамеренных имитирующих помех. Для создания преднамеренных имитирующих отметок противник использует внесение амплитудной модуляции в ретранслируемый зондирующий сигнал РЛС [1, 2]. В результате анализа удалось выяснить, что в имитирующих помехах, полученных путем размножения амплитудной модуляцией, появляются так называемые «интеллектуальные» флуктуации пачечной структуры ложных отметок, которые отличаются от флуктуаций пачек реальных отметок и могут быть легко обнаружены человеком-оператором [3, 4]. Это объясняется тем, что при переизлучении с различной задержкой образуется пачка многократных помех и различия, вводимых амплитудной модуляцией флуктуаций связаны с различием в форме между отраженными от реальной цели сигналами и имитирующими сигналами.

Анализ состояния проблемы показывает, что интеллектуальными считают системы [4, 5], которые могут решать комплекс задач, выполняемых человеком-оператором, или осуществляют поддержку принятия решений. В радиолокационных системах контроля подвижных объектов на воздушном и надводном транспорте используют методы обнаружения и распознавания сигналов [6, 7]. Основной недостаток в известных методах состоит в низкой автоматизации процедур обработки данных, в том числе при обнаружении, распознавании и принятия решений о нестационарных естественных и имитирующих искусственных помехах.

Символьная модель изображений амплитудных флуктуаций пачки сигналов от нестационарных естественных и имитирующих помех и от реальных объектов

Символьная модель процессных знаний формирования и анализа изображений амплитудных флуктуаций пачки импульсных сигналов – это математическое описание процедур и отношений при восприятии и анализе сигналов человеком-оператором в виде различительных признаков (или свойств) для определения типов объектов [8]. Такое математическое описание процессов деятельности эксперта называется идентификацией. Процессы действий эксперта можно идентифицировать прямо и косвенно. При прямой или логической идентификации действий оператора рассматриваем, что для определенного действия оператора поступают сигналы (виды амплитудных флуктуаций пачки), выбираемые из некоторого

множества амплитудных составляющих пачки, и регистрируются ответные сигналы. Всевозможные ответные сигналы деятельности оператора образуют множество.

В ходе исследований типов флуктуаций пачки использовались реальные экспериментальные данные (рис. 1), полученные на обзорной РЛС сантиметрового диапазона (длительность импульса 1 мкс, частота зондирования 365 Гц, период обзора 10 с).

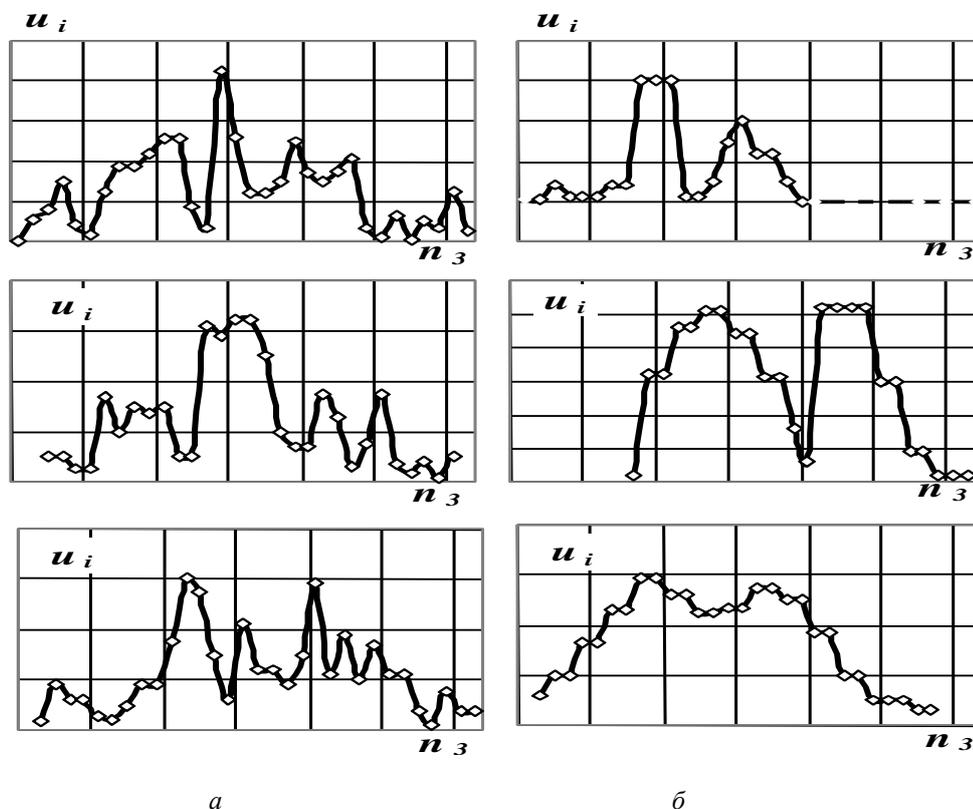


Рис.1. Пачка сигналов от ложных (а) и от реальных (б) объектов

В результате анализа картин флуктуаций радиолокационной пачки в амплитудной области для нестационарных имитирующих искусственных помех и естественных мешающих отражений типа «ангел-эхо» (рис. 1, а) и воздушных объектов (рис. 1, б) классифицированы на некоторое количество типов.

Семантическая модель процессных знаний для идентификации нестационарных естественных и имитирующих искусственных помех

В разработанную символьную модель входят процедуры формализации и анализа геометрического сигнального образа пачки от наблюдаемых объектов на основе алгебры предикатов [9 – 11] и операций создания предикатной (семантической) модели процессных знаний для получения решений о наблюдаемых объектах локации на основе методов интеллектуального анализа реальных процессов. 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 или сектора 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 $(t_{11}, t_{12}, \dots, t_{ij}, \dots, t_{mn})$, запишется формулой

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

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

Семантическая (предикатная) модель процессных знаний формирования и анализа изображений амплитудных флуктуаций пачки импульсных сигналов от наблюдаемых воздушных или наземных объектов в общем виде – это система n унарных и бинарных предикатов Z_j :

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

Такая система предикатов позволяет описать ситуацию вокруг анализируемой в данный момент информационной ячейки и позволяет формализовать процесс формирования символического изображения отметки $A(x)$ в течение ряда циклов зондирования РЛС. Их еще называют атрибутами или предикатными признаками процесса. Например, для радиолокационных систем обзора пространства это могут быть:

- унарный предикат $Z_{p_{ij}}$ присутствия или наличия сигнала в a_{ij} информационной ячейке; i, j – номера элементов зоны обзора РЛС;
- бинарный предикат $Z_{d_{ij}}$ ухода сигнала из a_{ij} в соседнюю по дальности информационную ячейку;
- бинарный предикат $Z_{a_{ij}}$ перехода сигнала в смежную по азимуту или соседнюю информационную ячейку, прилегающую к рассматриваемой ячейке.

При таких исходных условиях эти предикатные признаки формируются по следующим правилам:

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

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

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

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

Для радиолокационных станций (РЛС) обзора пространства семантическая модель флуктуаций огибающей пачки описывается двумя составляющими [7]:

1. Предикатным признаком символической модели пачки сигналов (отметок) воздушных объектов, определяемым как решение уравнения

$$I_{m1} = Z_{mij} \bigwedge_{i=1}^n Z_{ai, j+1} \bigwedge_{j=1}^n = 1. \quad (6)$$

2. Предикатной моделью амплитудных флуктуаций радиолокационной пачки, определяемой как совокупность произведений каждого элемента символической пачки на их амплитудные значения:

$$I_{m2} = \bigvee_{l_1}^{l_n} q_{i,j+l_n} Z_{ai,j+l_n} \quad (7)$$

где l_1, l_n – номера элементов начала и конца пачки.

На рис. 2 приведены реальные, экспериментально полученные картины пачек импульсов от естественных мешающих помех типа «ангел-эхо» и имитирующих летающие объекты помех. В формулах (6) и (7) предусмотрена возможность проверки связей различного типа между информационными единицами. Прежде всего, эти связи характеризуют отношения между информационными единицами. Семантика отношений носит и декларативный, и процедурный характер. С другой стороны процесс, как правило, описывается как функциональными связями, так и отношениями между информационными ячейками. Имея предикатные признаки, мы можем формализовать процессные знания получения символьных моделей нестационарных сигнальных отметок, как для помех типа «ангел-эхо», так и для имитирующих летающие объекты помех [12, 13].

При этом две информационные единицы могут быть связаны отношением "причина – следствие". Это могут быть: отношение появления сигнала в a_{ij} ячейке (предикатный признак Z_{pij}^k присутствия сигнала); отношение ухода сигнала из a_{ij} ячейки (предикатный признак Z_{dij} ухода сигнала); и отношение "соседней ячейки" (предикатный признак Z_{aij} перехода сигнала в смежную по азимуту информационную ячейку). Приведенные отношения характеризуют декларативные знания.

Если между двумя информационными единицами установлено отношение "аргумент – функция", то оно характеризует процессное знание, связанное с вычислением определенных предикатных функций. Исследуем возможные операции.

Для этого составляем предикатные уравнения возможных состояний и путем их решения определяем номера $k = k_1$ и $l = l_1$ рядом расположенных элементов обработки с предикатными признаками Z_{dij} и Z_{aij} соседнего элемента обработки. Определяем также, с какими из этих признаков работать. Для этого при появлении предиката Z_{pij} наличия сигнала в a_{ij} информационной ячейке составляем предикатные уравнения для проверки возможности формирования бинарного предиката Z_{dij} (прихода сигнала из соседней по дальности a_{i-1j} ячейки) и бинарного предиката Z_{aij} (перехода сигнала из смежной по азимуту a_{ij-1} ячейки), полученные из условий (4) и (5)

$$(A_{i-1j} > 0 \wedge Z_{pij} = 1) = 1; (Z_{pij} = 1 \wedge A_{ij-1} > 0) = 1. \quad (8)$$

Из анализа вариантов решений уравнений (8) можно сделать следующие выводы:

1. Если выполняется 1-е уравнение, то формируется бинарный предикат Z_{dij} . Это означает, что сигнал в исследуемую ячейку переходит из соседней по дальности a_{i-1j} ячейки и начинает формироваться новая символьная модель сигнальных отметок для протяженных неподвижных объектов типа облака, тучи или атмосферной неоднородности типа «ангел-эхо»;

2. 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 (пачка) сигнальных отметок для точечных подвижных и малоподвижных летательных аппаратов типа самолет, вертолет, БПЛА.

Каждый тип амплитудной картины S_j , приведенный на рис. 2, имеет соответствующие нули и единицы согласно предикатной функции $A(x)$. Тип S_1 имеет одиночные группы единиц среди всех остальных нулей. Тип S_2 имеет две группы единиц, а количество нулей между ними меньше или равно двум.

Метод семантической обработки символьного изображения

Для идентификации с амплитудными типами была сформирована система предикатов-признаков L_j , «чувствительных» к количеству и разрывности нулей, единиц и групп сомкнутых единиц (амплитудных пиков) в предикате $A(x)$.

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 амплитудных пиков использована арифметическая сумма Φ предиката $F(t)$ $\Phi = \sum_{i=1}^{k-1} f_i = \sum_{i=1}^{k-1} [t_i + t_{i+1}] \mid M_2$, где индекс $\mid M_2$ означает суммирование по модулю два. Анализ возможных значений Φ для различных типов амплитудных 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

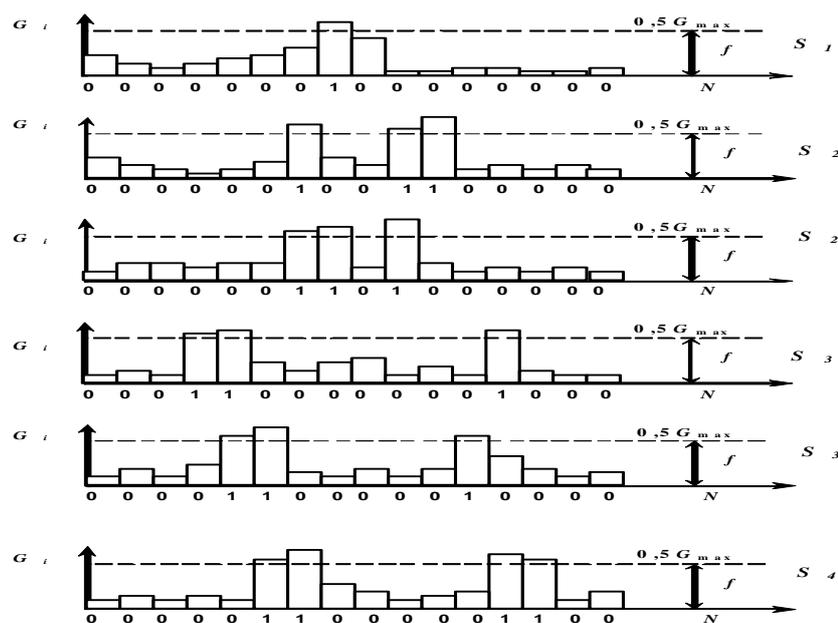


Рис. 2. Типы амплитудных картин флуктуаций пачек сигналов

двух групп сомкнутых единиц результат такой операции равен четырем, для трех пиков – шести и т.д. В признаке $L_1^{j_i}$, верхний индекс j_i указывает на наличие в предикате $f(x)$ на количество амплитудных 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 амплитудных 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 для амплитудных картин, представленных на рис. 2, описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}
S_1 &= L_1^1 \wedge L_2^0 \wedge (L_3^1 \vee L_3^2); \\
S_2 &= L_1^2 \wedge (L_2^0 \vee L_2^1 \vee L_2^2 \vee L_2^3) \wedge (L_3^2 \vee L_3^3 \vee L_3^4); \\
S_3 &= L_1^2 \wedge (L_2^5 \vee L_2^6 \vee L_2^7 \vee L_2^8) \wedge L_3^3; \\
S_4 &= L_1^2 \wedge (L_2^4 \vee L_2^5 \vee L_2^6) \wedge (L_3^4 \vee L_3^5 \vee L_3^6); \\
S_j &= (L_1^0 \vee L_1^1 \vee \dots \vee L_1^j) \wedge (L_2^0 \vee L_2^1 \vee \dots \vee L_2^l) \wedge (L_3^0 \vee L_3^1 \vee \dots \vee L_3^s)
\end{aligned}
\tag{9}$$

В общем виде (9) можно представить так:

$$S_j = \left(\bigvee_{j_1}^{j_2} L_1^{j_1} \right) \wedge \left(\bigvee_{l_1}^{l_2} L_2^{l_1} \right) \wedge \left(\bigvee_{s_1}^{s_2} L_3^{s_1} \right).
\tag{10}$$

На основе полученных уравнений разработана функциональная схема алгоритма определения типов флуктуаций пачки, приведенная на рис. 3.

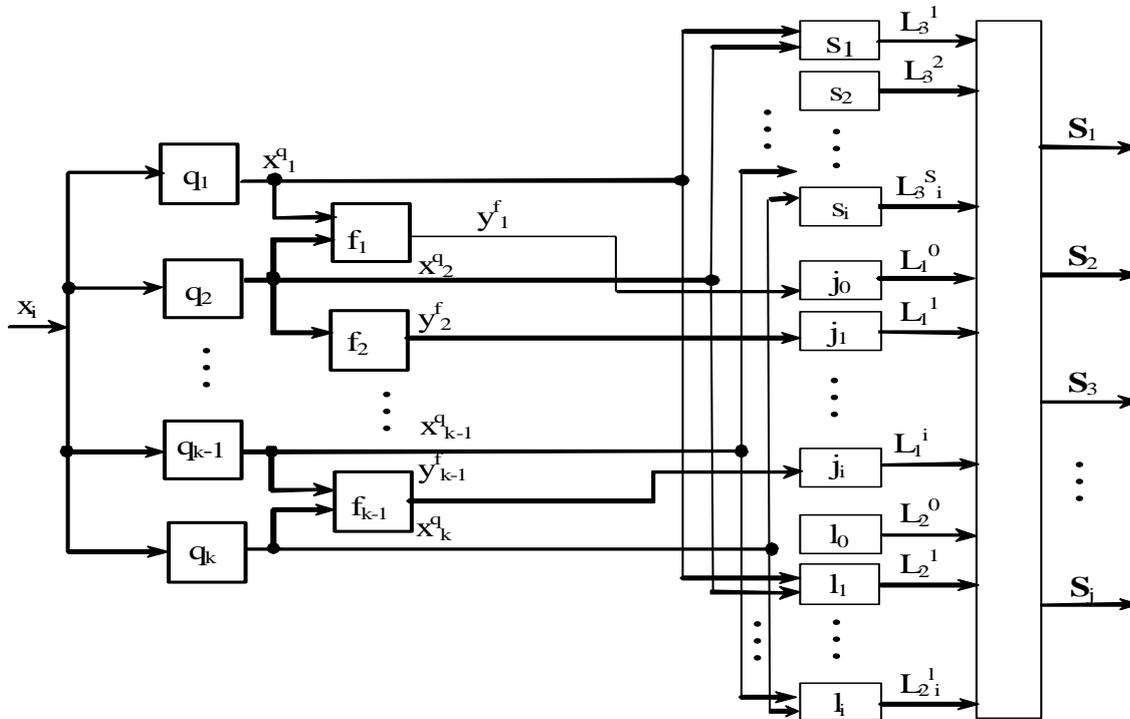


Рис. 3. Схема алгоритма определения типов флуктуаций пачки

По полученной совокупности признаков-предикатов L_i спектральный образ однозначно соотносится с одним из типов спектра S_j . Распознавание воздушных объектов осуществляется по результатам идентификации спектральных типов.

Верификация предложенной модели проводилась на реальных данных (рис. 2), полученных на обзорной РЛС сантиметрового диапазона. На основе этих данных смоделированы типы характерных пачек радиолокационных сигналов. По результатам модельных экспериментов все они были правильно идентифицированы. Таким образом, все операции по классификации и распознаванию воздушных объектов выполняются автоматически и в реальном масштабе времени.

Заклучение

1. Разработан метод защиты обзорных РЛС от нестационарных естественных и имитирующих искусственных помех. В основе способа лежит интеллектуальный анализ символьного изображения радарных отметок. Предложены универсальные алгоритмы автоматизации операций обработки информации, обеспечивающие эффективную идентификацию ложных отметок за счет семантических признаков флуктуаций радиолокационной отметки. Показано, как этот подход может использоваться для быстрого автоматического обнаружения и распознавания ложных отметок воздушных и надводных объектов. В разработанную технологию системы входят процедуры формализации и анализа символьной модели изображения наблюдаемых объектов для принятия решений, основанных на прецедентах.

2. Реализован метод семантической обработки символьного изображения для обзорных радиолокационных систем. Для идентификации типов амплитудных флуктуаций вводятся семантические признаки-предикаты, по их сочетанию любая картина однозначно соотносится с одним из типов, согласно разработанным уравнениям предикатных операций. На основании полученных уравнений синтезирована функциональная схема определения типов картин. На основе этих данных смоделированы типы характерных пачек радиолокационных сигналов. По результатам модельных экспериментов все они были правильно идентифицированы.

Список литературы:

1. Карманов Ю.Т., Непомнящий Г.А. Способ защиты РЛС со сложным сигналом от имитирующей помехи // Вестник ЮУрГУ. 2009. №26. С. 41–46.
2. Тенденции развития авиационных средств радиоэлектронной борьбы ВВС США / Я.Н. Кожушко [и др.] // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2011. № 2(6). С. 44–48.
3. Миллиметровая радиолокация. Методы обнаружения и наведения в условиях естественных и организованных помех / А.Б. Борзов и [др.]. Москва : Радиотехника, 2010. 376 с.
4. Russel S. Artificial intelligence. A modern approach, Second Edition / S. Russel, P. Norvig. Williams, 2006. 1410 p.
5. Бондаренко М. Ф. Теория интеллекта : учебник / М. Ф. Бондаренко, Ю. П. Шабанов-Кушнаренко. Харьков : изд-во СМІТ, 2007. 576 с.
6. Журавлев Ю. И. Об алгебраическом подходе к решению задач распознавания или классификации / Ю. И. Журавлев // Проблемы кибернетики. 2005. Вып. 33. С. 5–68.
7. Advanced Methods and Deep Learning in Computer Vision. 1st Edition / Editors: E. R. Davies, Matthew Turk. Academic Press. 2021. Page Count: 586. ISBN: 9780128221099.
8. Volodymyr Zhyrnov, Svitlana Solonska PROCESS KNOWLEDGE BOUT OBSERVED OBJECTS IN INTELLECTUAL MONITORING SYSTEMS // Telecommunications and Radio Engineering – 2020. Vol. 79, Issue 18, Pages 1599-1607. |Scopus|0.69|. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i18.20.
9. TRENDS IN ARTIFICIAL INTELLIGENCE (Тенденції в штучному інтелекту) // Editorial team Janis Eitner (V.i.S.d.P.), Katrin Berkler, Henning Köhler, Roman Möhlmann. Fraunhofer-Gesellschaft e.V., 2018. p.p. 1-32/ <https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/en/Publications/Trends-in-artificial-intelligence.pdf>.
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. Volume 77, Issue 20, Pages 1827-1835.
11. 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>.
12. Solonska S., Zhyrnov V. Adaptive semantic analysis of radar data using fuzzy transform (Book Chapter). Springer, 2020, Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. Vol 48. P. 157-179.
13. Volodymyr Zhyrnov, Svitlana Solonska INTELLIGENT SYSTEM FOR DETECTION OF LOW-VISIBLE AIR OBJECTS IN SURVEILLANCE RADARS // Telecommunications and Radio Engineering – 2020. Vol. 79, Issue 17, Pages 1513-1519. |Scopus|0.69|. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i17.20.

Поступила в редколлегию 23.09.2021

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

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

Зарицкий Валерий Иванович – канд. техн. наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, начальник научно-исследовательской части (НИЧ), Украина, e-mail: valerii.zarytskyi@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9047-8152>