

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

СЕМАНТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФЛУКТУАЦИЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ПАЧКИ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ

Введение

Недостаток классических радиолокационных систем состоит в низкой автоматизации процессов обработки данных, в том числе семантического анализа амплитудных флуктуаций пачки во временной области в интересах идентификации воздушных объектов. В статье приводится пример реализации разработанного авторами метода семантического анализа амплитудных флуктуаций пачки во временной области на основе математического аппарата алгебры конечных предикатов (АКП). Метод основан на определении семантических составляющих на этапе формирования и анализа символьной модели пачки импульсных сигналов от подвижных летательных аппаратов. Символьная модель пачки описывается предикатной функцией на множестве импульсных сигналов, превысивших некоторое пороговое значение. Для идентификации типов флуктуаций пачки вводятся предикаты-признаки, по их сочетанию любой вид флуктуации однозначно соотносится с одним из типов согласно разработанным уравнениям предикатных операций.

Известно описание детерминированных, дискретных и конечных интеллектуальных процессов [1 – 4], которые могут быть ориентированы на совершенствование информационной технологии обработки радиолокационных сигналов и ее практическое использование. Для описания семантической составляющей процессов обработки спектральных изображений необходим язык отношений и действий над ними. Понятие отношения эквивалентно понятию предиката. Алгебраический аппарат предикатов и предикатных операций эффективен и удобен для описания различной формализуемой информации, в том числе радиолокационной, а также моделирования деятельности оператора (эксперта) обзорной РЛС [5 – 8]. Использование АКП позволило приступить к формальному описанию абстрактных понятий, которыми пользуется оператор обзорной РЛС.

Цель и задачи исследования

Семантический анализ флуктуаций радиолокационной пачки для идентификации воздушных объектов – это получение семантических составляющих в процессе анализа амплитудных флуктуаций радиолокационной пачки. Объектами исследования являются логические отношения, учитывающие зависимые связи между компонентами амплитудных составляющих флуктуаций радиолокационной пачки либо отличительные особенности различных изображений, каковыми могут являться количество максимумов, расстояния между ними.

В работе рассматривается метод семантического анализа амплитудных флуктуаций радиолокационной пачки на основе предикатной модели процессных знаний формирования и анализа символьной модели совокупности импульсных сигналов от подвижных летательных аппаратов типа самолет, вертолет, БПЛА, и от мелких (точечных) атмосферных неоднородностей типа «ангел-эхо». Модель имеет пачечную структуру, и в результате семантического анализа амплитудных флуктуаций пачки во временной области необходимо получить классификационные отличительные признаки флуктуаций пачки от мешающих отражений и воздушных объектов. Необходимо исследовать семантические составляющие принятия решений, которые подобны алгоритмам принятия решений человеком-оператором. Разработать алгоритм и программно реализовать метод семантического анализа флуктуаций радиолокационной пачки для идентификации воздушных объектов в обзорных РЛС.

Семантическая модель радиолокационной пачки от точечных летательных аппаратов и мешающих отражений типа «ангел-эхо»

Семантическая модель процессных знаний формирования и анализа амплитудой картины 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. 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).

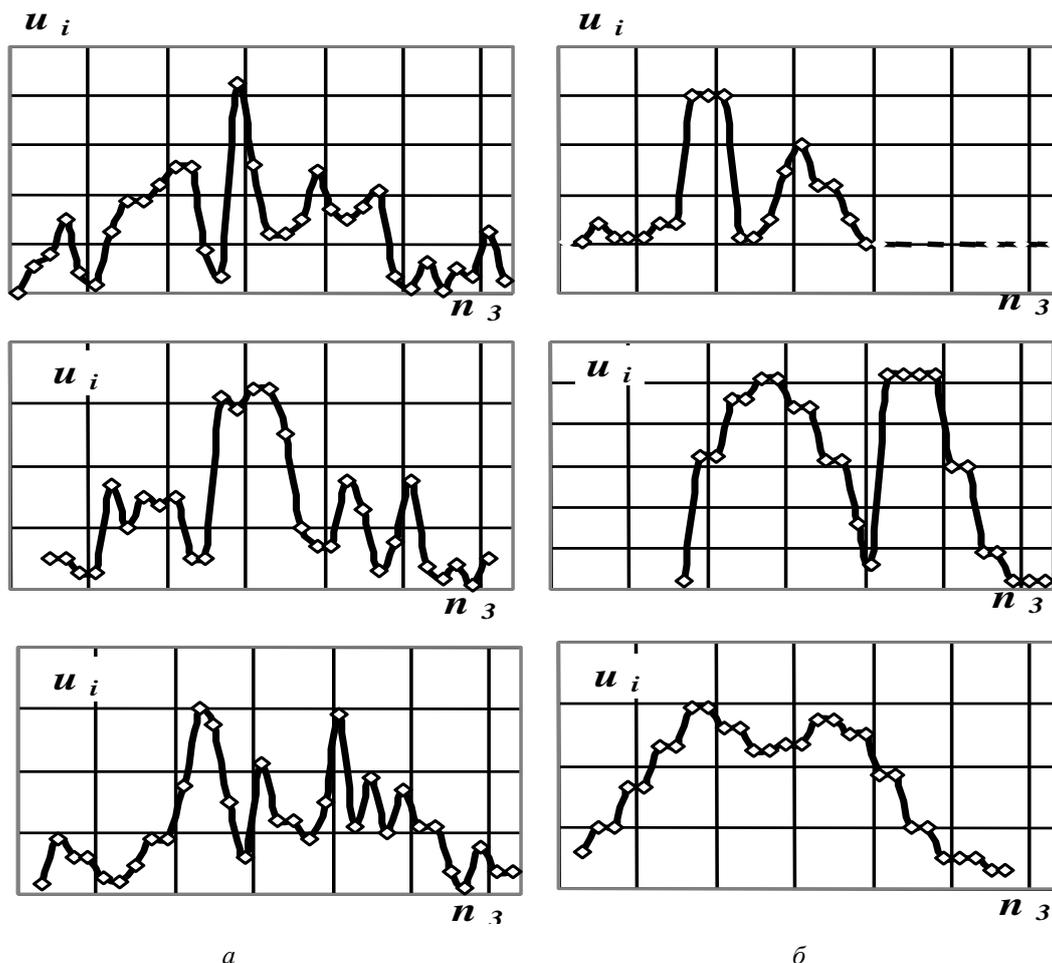


Рис. 1. Пачки импульсов отражений от ангел-эхо (а) и от воздушных объектов (б)

В результате анализа виды типов картин флуктуаций радиолокационной пачки в амплитудной области для мешающих отражений типа «ангел-эхо» и воздушных объектов классифицированы на некоторое количество типов $S_j, j = \overline{1, n}$ (рис. 2).

В разработанную модель входят процедуры формализации и анализа геометрического сигнального образа пачки от наблюдаемых объектов на основе алгебры предикатов [9 – 11] и операций создания предикатной модели процессных знаний для получения решений о наблюдаемых объектах локации на основе методов интеллектуального анализа реальных процессов.

Пусть $M = \{q_{11}, q_{12}, \dots, q_{ij}, \dots, q_{mn}\}$ – фиксированное 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 $t_{ij} = 0$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$.

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 $x^{q_{ij}} = 1$.

Предикатная модель процессных знаний о символьной модели радиолокационных отметок 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 символьного изображения флуктуаций отметки $A(x)$ в течение нескольких 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 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 предикатные признаки формируются по следующему правилу:

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

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

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

где $A(x)$ – предикат события наличия-отсутствия сигнала в соответствующем элементе анализа.

Для радиолокационных станций (РЛС) обзора пространства амплитудная картина флуктуаций огибающей пачки описывается двумя составляющими [7, 8]:

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

$$I_{m1} = Z_{mij} = \bigwedge_{l_1}^1 Z_{ai, j+l_1} = Z_{ai, j+l_1} \wedge Z_{ai, j+l_2} \wedge \dots \wedge Z_{ai, j+l_{n-1}} \wedge Z_{ai, j+l_n} = 1; \quad (6)$$

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

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

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

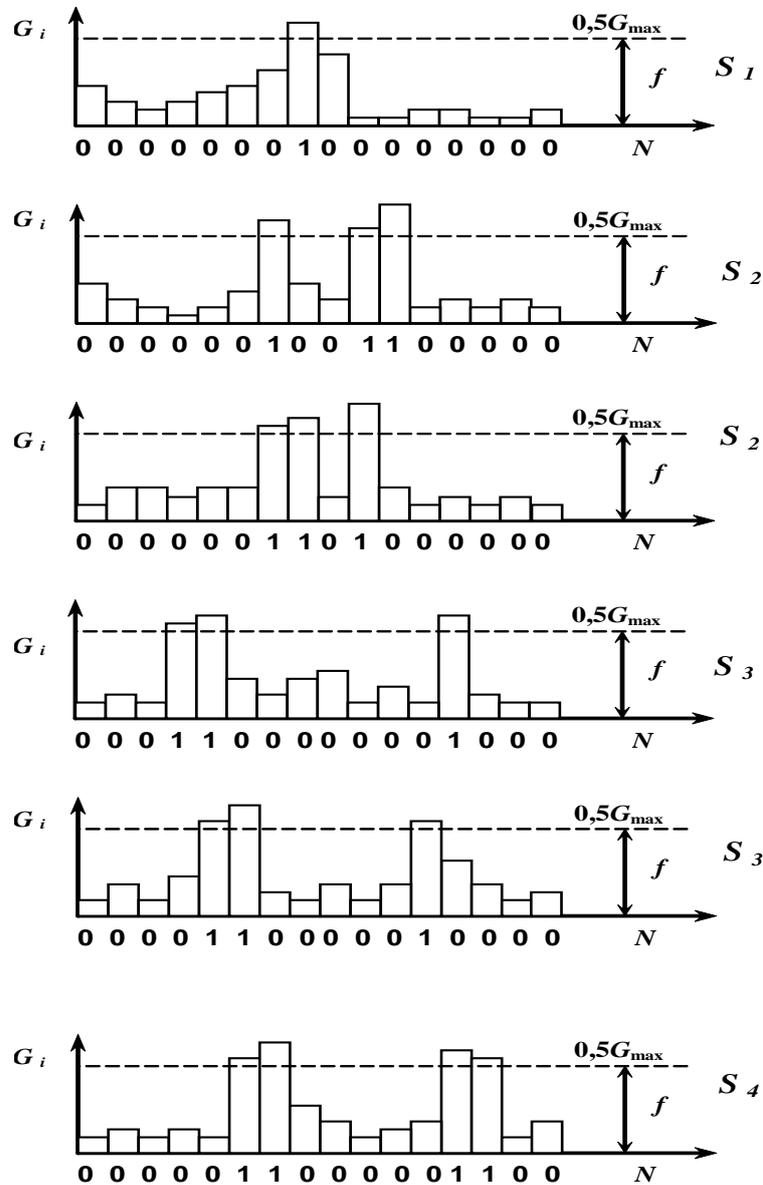


Рис. 2. Типы амплитудных картин флуктуаций пачек импульсов $S_j, j = \overline{1,4}$ и их предикатные функции $A(x)$ в виде кода, как результат превышения порога $0,5 G_{\max}$

Метод семантического анализа амплитудных флуктуаций радиолокационной пачки на основе предикатной модели процессных знаний $\mathbf{0}$ символьной модели

Семантический или смысловой анализ амплитудных флуктуаций радиолокационной пачки проведен на логическом уровне обработки с помощью алгебры конечных предикатов

[9, 10]. Для анализа используем разработанную предикатную модель I_{m2} (7) амплитудных флуктуаций радиолокационной пачки, определяемой как совокупность произведений каждого элемента символьной пачки $Z_{ai,j+1_n}$ на их амплитудные значения $q_{i,j+1_n}$:

$$I_{m2} = q_{i,j+1_1} Z_{ai,j+1_1} \vee \dots \vee q_{i,j+1_n} Z_{ai,j+1_n} = \bigvee_{l_1}^{l_n} q_{i,j+1_n} Z_{ai,j+1_n}.$$

Пусть $M = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ – множество, состоящее из n элементов – значений амплитудных составляющих пачки, A – некоторое из его подмножеств $A \subseteq M$, амплитудные составляющие q_i которого превышают некое пороговое значение $|G_n| = |G_{\max}|/2$. Для множества M составляем набор логических элементов (t_1, t_2, \dots, t_n)

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

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.

Для идентификации с амплитудными типами была сформирована система предикатов-признаков L_i , 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 $F(t)$
$$\Phi = \sum_i^{k-1} f_i = \sum_{i=1}^{k-1} [t_i + t_{i+1}] \bmod 2,$$
 где индекс $|M_2$

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 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 описывается следующими уравнениями:

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

$$S_j = (L_1^0 \vee L_1^1 \vee \dots \vee L_1^j) \wedge (L_2^0 \vee L_2^1 \vee \dots \vee L_2^l) \wedge (L_3^1 \vee L_3^2 \vee \dots \vee L_3^s).$$

В общем виде (8) можно представить как

$$S_j = \left(\bigvee_{j_1}^j L_1^{j_1} \right) \wedge \left(\bigvee_{l_1}^{l_2} L_2^{l_1} \right) \wedge \left(\bigvee_{s_1}^{s_2} L_3^{s_1} \right).
\tag{9}$$

На основе полученных уравнений разработана функциональная схема определения типов флуктуаций пачки (рис. 3).

Таким образом, все операции по классификации и радиолокационному распознаванию воздушных объектов на основе предложенного алгоритма идентификации типов амплитудных флуктуаций пачки выполняются автоматически и в реальном масштабе времени. Следует также отметить, что в отличие от обычных статистик, порог формирования элементов q_i

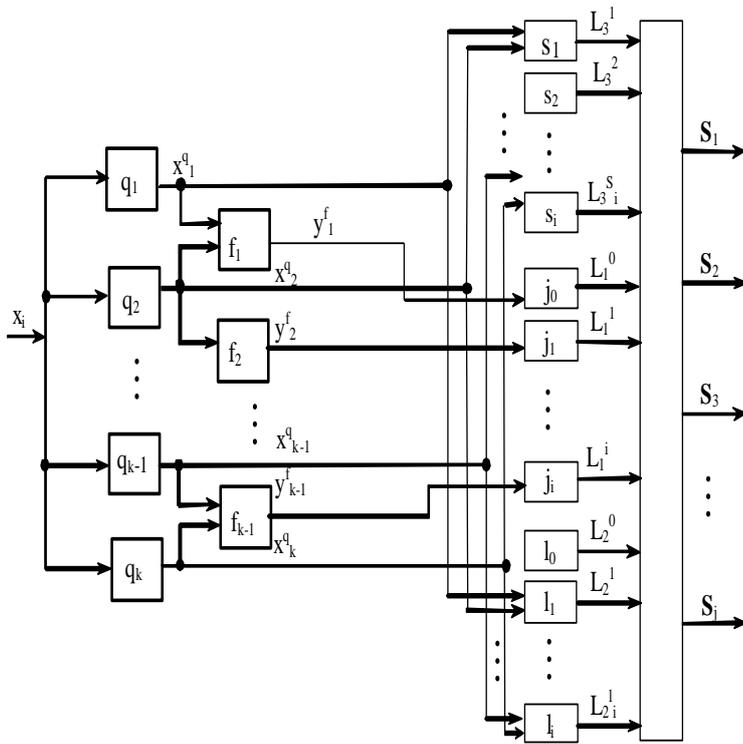


Рис. 3. Схема алгоритма определения типов флуктуаций пачки

не является фиксированным, а адаптируется в каждой конкретной ситуации по уровню максимума амплитудного пика. Такая адаптация позволяет отображать информацию о форме и типе амплитудных флуктуаций независимо от энергетики пачки и, в конечном счете, стабилизирует вероятность ошибки при определении типа флуктуаций пачки.

Верификация и оценка эффективности разработанного метода [11, 12] проведены на основе реальных данных, полученных на обзорной РЛС сантиметрового диапазона (длительность импульса 1 мкс, частота зондирования 365 Гц, период обзора 10 с). На основе этих данных смоделированы типы характерных пачек радиолокационных сигналов. По результатам экспериментов все они были правильно идентифицированы.

Заключение

Разработан метод семантического анализа амплитудных флуктуаций радиолокационной пачки на основе предикатной модели процессных знаний формирования и анализа символьной модели совокупности импульсных сигналов от подвижных летательных аппаратов типа самолет, вертолет, БПЛА, и от атмосферных неоднородностей типа «ангел-эхо».

Модель имеет пачечную структуру. В результате семантического анализа амплитудных флуктуаций пачки во временной области можно получить классификационные отличительные признаки флуктуаций пачки от мешающих отражений и воздушных объектов. Исследованы семантические составляющие алгоритма принятия решений, которые подобны алгоритмам принятия решений человеком-оператором. Разработан алгоритм и программно реализован метод семантического анализа флуктуаций радиолокационной пачки для идентификации воздушных объектов в обзорных РЛС. Сигнальная информация описывается предикатной функцией на множестве амплитуд импульсов пачки, превысивших некоторое пороговое значение. Идентификация типов флуктуаций проводится путем решения разработанных уравнений предикатных операций. На основании полученных уравнений синтезирована функциональная схема автоматического определения типов флуктуаций. Верификация разработанного метода проведена на основе реальных данных, полученных на обзорной РЛС сантиметрового диапазона (длительность импульса 1 мкс, частота зондирования 365 Гц, период обзора 10 с). На основе этих данных смоделированы типы характерных пачек радиолокационных сигналов. По результатам экспериментов все они были правильно идентифицированы.

Список литературы

1. Li Jian Radar Signal Processing and Its Applications / Jian Li, R. Hummel, P. Stoica, E. G. Zelnio. Springer, 2013. 279 p.
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 : изд-во 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 Igor, Snisar Stanislav, Zhyrnov Volodymyr, Slavhorodskyi Vlad. 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 (English translation of Elektrosvyaz and Radio-tekhnika). 2018. Vol. 77, Issue 20. P. 1827-1835.
11. Igor Shubin, Svitlana Solonska, Stanislav Snisar, Volodymyr Zhyrnov, Vlad Slavhorodskyi, Victoria Skovorodnikova. Efficiency Evaluation for Radar Signal Processing on the Basis of Spectral-Semantic Model // 2020 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, 2020 , 25 – 29 February. P. 171-174.
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.

Поступила в редколлегию 17.09.2020

Сведения об авторах:

Жирнов Владимир Витальевич – к.т.н., Харьковский национальный университет радиоэлектроники, в.н.с. НИЦ интегрированных радиоэлектронных систем и технологий, Украина; e-mail: nauka123@ukr.net

Солонская Светлана Владимировна – к.т.н., 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>