

## **СЕМАНТИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ В ОБЗОРНЫХ РЛС ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ И РАСПОЗНАВАНИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

### **Постановка проблемы**

Широкое использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) как малоразмерных, малозаметных воздушных объектов требует совершенствования процедур обработки радиолокационной информации с целью их обнаружения, так как решить эти задачи существующими способами в полной мере не удастся. Актуальны также вопросы более полного использования и качественного повышения информационных возможностей радиолокационных станций (РЛС), особенно при обнаружении подобных объектов в зоне местных предметов, гидрометеоров, дискретных мешающих отражений (ДМО), в том числе типа «ангел-эхо» (АЭ).

### **Анализ исследований и публикаций**

Сегодня широкое применение находят БПЛА, в первую очередь с разведывательными целями [1, 2]. Малоразмерные и малозаметные БПЛА тактического уровня являются достаточно специфическими объектами радиолокационной разведки.

Особенностями БПЛА являются: возможность их полета на предельно малых высотах; малая эффективная поверхность рассеивания; обнаружение БПЛА, как правило, происходит в зоне засвечивания от местных предметов, что требует включения аппаратуры защиты от пассивных помех; режимы полета могут сопровождаться режимами зависания (остановки), что затрудняет распознавание БПЛА на фоне пассивных помех.

В работе для решения этой проблемы предлагается использовать новую информационную технологию, которая разработана путем формализации процессов восприятия и преобразования сигналов и сигнальных образов с учетом возможностей унификации процедур межпериодной и многообзорной обработки радиолокационных сигналов и информации на основе семантического анализа. При этом предлагается повысить возможность обнаружения и распознавания БПЛА за счёт накопления энергетической и семантической составляющих сигнальной информации.

В известных радиолокационных системах мониторинга воздушного пространства [3] существуют операции, основанные на накоплении сигнальной информации текущего и нескольких предыдущих циклов измерений. В этих системах недостаточно используются алгоритмы, в основе которых лежит модель накопления информации человеком-оператором, которая связана с возможностью восприятия пространственно-временного изображения радиолокационной информации с последующим принятием решения по анализу признаков.

Анализ публикаций показывает, что в существующих РЛС, в основном, используются статистические методы обработки сигналов, которые не позволяют проводить содержательный анализ информации, связанный с проблемой восприятия сигналов и сигнальных образов. Подобные операции возможны при использовании семантической технологии, которая приблизит процедуры восприятия и анализа сигналов и сигнальных образов к логике человека [4 – 6]. Преимуществом алгоритмов, в основе которых лежит модель человека-оператора, является вариативный комплексный анализ пространственно-временного изображения (геометрического образа) сигнальной информации [7 – 9].

Цель статьи – определение потенциальных возможностей обзорных радиолокационных средств по обнаружению и распознаванию малоразмерных и малозаметных БПЛА при внедрении интеллектуальных процедур обработки радиолокационных сигналов на основе семантического анализа.

## Возможности обзорных РЛС по обнаружению БПЛА

Возможности обзорных РЛС Украины по обнаружению малоразмерных и малозаметных летательных аппаратов приведены в [2]. Анализ проводится на примере БПЛА австрийского производства "Zala" и российского производства типа "Иркут-2М", "Иркут-3", их технические характеристики приведены в таблице. Это малоразмерные БПЛА ближнего действия, весом в несколько килограммов, которые не нуждаются в специальных стартовых установках и могут запускаться "из рук". Изготовленные из композитных материалов с минимальным использованием металлических деталей имеют низкие отражающие свойства и эффективную отражающую поверхность (ЭПР) не более  $0,001 \text{ м}^2$ .

Несмотря на малую радиолокационную заметность БПЛА, энергетического потенциала существующих обзорных РЛС хватает для того, чтобы обнаруживать их на дальностях 15 – 20 км, но обнаружение, как правило, осуществляется на фоне отражений от земной поверхности и необходимо применять систему селекции движущихся целей (СДЦ) [2].

Тип БПЛА	"Zala-421-08"	"Иркут-2М"	"Иркут-3"
Размах крыльев, м	–	1,5	2,0
Длина, м	0,4	0,5	0,9
Максимальная взлетная масса, кг	2,1	3	3
Крейсерская скорость, км/час	100	105	90
Длительность полета, час	1,5	1,5	1,25
Практическая высота полета, м	3000	3000	3000
ЭПР, кв. м	$5 \cdot 10^{-4} \dots 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4} \dots 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4} \dots 10^{-3}$

Таким образом, обнаружение мини-БПЛА будет осуществляться в условиях отражений от местных предметов. Для их подавления необходимо включать системы защиты от пассивных помех (система СДЦ). Какой бы совершенной система ни была, ее включение приводит к дополнительным потерям в энергии сигналов, в результате чего дальность обнаружения уменьшается на 15 – 20 %, а также к появлению импульсных остатков в виде помеховых локальных изображений.

Использование семантической технологии обработки пространственно-временных изображений сигнальной информации может устранить приведенные недостатки и тем самым повысить эффективность обзорных РЛС.

### Семантическая технология обработки в обзорных РЛС

Для решения этой проблемы предлагается использовать новую информационную технологию, на основе формализации процессов восприятия и преобразования сигналов сформировать пространственно-временные изображения с учетом возможностей их семантического анализа с использованием алгебры конечных предикатов.

Покажем операции этой технологии. Пространство сигнальных образов (изображение), формируется в динамической памяти с искусственным послесвечением и обладает определенным распределением их расположения и амплитуд  $q_{ij}(r, \beta, t, T_s, \Delta)$ . Это распределение зависит от координат  $x, y$  местоположения, вектора скорости воздушного объекта, времени  $t$ , периода обзора РЛС  $T_s$  и параметра  $\Delta$  искусственного послесвечения (рис.1).

Полагаем, что формируемый в памяти массив данных представляет собой прямоугольную матрицу амплитуд радиолокационного сигнала  $\|A\|$  размером  $M \times N$ . Каждый элемент матрицы  $a_{ij}$  связан с соответствующим участком лоцируемой зоны соответственно, где  $i, j$  – номера элементов матрицы по дальности  $D$  и азимуту  $\beta$ .

Поскольку БПЛА могут находиться как в режиме полета, так и в режиме остановки, то и поток информации будет сопровождаться разными семантическими признаками, а именно: в режиме полета – признаком  $Z_{tyij}$  трассового следа; в режиме зависания (остановки) – призна-

ком  $Z_{nij}^p$  повтора сигнала. При этом модель трассового следа отметок подвижного объекта будет определяться как совокупностью затухающих амплитуд отметок вдоль направления движения с дискретностью, определяемой скоростью воздушного объекта  $V_0$  и временем цикла измерений РЛС  $T_s$  (рис.1). Это так называемый «режим искусственного послесвечения» в массиве амплитуд  $\|A\|$ , осуществляется уменьшением величины амплитуды  $q_{ij}^{k-1}$  предыдущего  $(k-1)$ -го цикла обзора на определенную величину  $\Delta$  при отсутствии сигнала в текущем  $k$ -м обзоре:

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

Семантическая модель трассового следа определяется как совокупность предикатных признаков ухода отметок  $Z_{tyij}$ . Модель повтора отметок в режиме зависания (остановки) воздушного объекта определяется совокупностью повторяющихся сигнальных отметок, количество которых определяется длительностью зависания (остановки) воздушного объекта (рис.1). При этом семантическая модель повтора отметок определяется как совокупность предикатных признаков повтора отметок  $Z_{nij}^p$ .

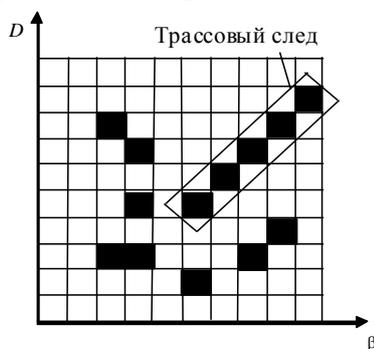


Рис.1. Модель трассового следа отметок

Повышение эффективности выделения отметок малоподвижных и малозаметных воздушных объектов предполагает выполнение операций накопления энергии сигнала и информации с учетом семантических признаков трассового следа и повтора отметок в виде предикатных признаков и их функций, сформированных за ряд обзоров РЛС. При этом семантическая составляющая признака трассового следа  $Z_{tyij}$  позволяет получить информацию о величине и направлении трассового следа отметок от подвижных воздушных объектов, образуемого как совокупность предикатных признаков ухода отметок  $Z_{tyij}$ . Семантическая составляющая признака повтора отметок

в режиме зависания (остановки) воздушного объекта позволяет получить информацию о количестве повторяющихся сигнальных отметок, необходимом при выполнении операций накопления энергии и информации.

В разработанную технологию входят операции формализации и анализа геометрического образа трасс подвижных объектов и остановки (зависания) на основе математического аппарата алгебры конечных предикатов [9 – 12]. 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:

$$A(x) = t_{11}x^{q_{11}} \vee \dots \vee t_{mn}x^{q_{mn}} = \bigvee_{i=1, j=1}^{mn} t_{ij}x^{q_{ij}} \quad (2)$$

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

Для описания ситуации вокруг анализируемого в данный момент элемента зоны обзора РЛС в качестве семантической составляющей вводится система предикатных признаков, позволяющая формализовать происходящие изменения в течение нескольких обзоров РЛС:

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

– предикатный признак  $Z_{yij}$  ухода отметки из элементов обработки, прилегающих к рассматриваемому элементу;

При таких исходных условиях предикатные признаки формируются по следующему правилу:

$$Z_{nij} = 1 \text{ при } A_{ij}^p > 0 \wedge A_{ij}^{p-1} > 0 \quad (3)$$

$$Z_{yij} = 1 \text{ при } A_{ij}^{p-1} > 0 \wedge A_{ij}^p = 0 \wedge Z_{nij} = 0, \quad (4)$$

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

При наличии признака  $Z_{yij}$  формируется предикатный признак трассового следа  $Z_{tyij}$ , позволяющий получить информацию о величине и направлении трассового следа отметок от подвижных воздушных объектов, образуемого как совокупность предикатных признаков ухода отметок  $Z_{tyij}$ .

Предикатный признак (функции) трассового следа  $Z_{tyij}$  сформирован путем перебора значений  $k_n, l_n$  у имеющихся предикатных признаков  $Z_{yij}$  ухода отметки из элементов обработки и удовлетворяющих предикатному уравнению [9]:

$$Z_{tyij} = \bigwedge_{k_1, l_1}^{k_n, l_n} Z_{yi+k_n, j+l_n} = Z_{yi+k_1, j+l_1} \wedge Z_{yi+k_2, j+l_2} \wedge \dots \wedge Z_{yi+(k_{n-1}), j+(l_{n-1})} \wedge Z_{yi+k_n, j+l_n} = 1, \quad (5)$$

где  $(k_1 - k_n, l_1 - l_n)$  – номера элементов изображения трассового следа для анализируемого элемента  $ij$ .

Полученный признак трассового следа из предикатного уравнения (7) используется двояко: как семантическая составляющая при определении информации о величине и направлении трассового следа отметок от подвижных воздушных объектов при определении величины накопленной энергии сигнала, а также как дополнительный отличительный признак при обнаружении и распознавании отметок малозаметных и малоподвижных воздушных объектов.

Проведены экспериментальные работы по проверке эффективности предложенной технологии. Апробация проведена в соответствии с правилом: 1) если отметке соответствуют предикатный признак  $Z_n$ , то отметка относится к классу неподвижного объекта, например, дискретных мешающих отражений типа «ангел-эх»; 2) если отметке соответствует предикатный признак  $Z_{tyij}$  один или в совокупности с признаком  $Z_n$ , то отметка относится к классу малоподвижных и малозаметных воздушных объектов.

### Результаты исследования

Предлагаемая модель обнаружения и распознавания малоподвижных и малозаметных воздушных объектов составляет основу предлагаемой технологии обработки сигналов в интеллектуальной системе контроля воздушного пространства.

При анализе трассового следа введено понятие пространственного спектра как распределение амплитуд отметок трассового следа в направлении, определяемом вектором  $k_n, l_n$  согласно предикатному уравнению (5). Вид распределения амплитуд отметок

трассового следа формируется согласно (1) путем постепенного уменьшения (затухания) поступившего сигнала в случае отсутствия его обновления в последующих обзорах, поэтому заранее известно, каким должно быть распределение амплитуд (пространственный спектр) отметок трассового следа. Используя данные о форме и пространственном спектре трассового следа, можно определить его направление (вектор скорости воздушного объекта) и суммарную амплитуду в виде

$$W1_{i,j} = \sum_{k_i, l_i}^{k_n, l_n} q_{i+k_n, j+l_n} \cdot \quad (6)$$

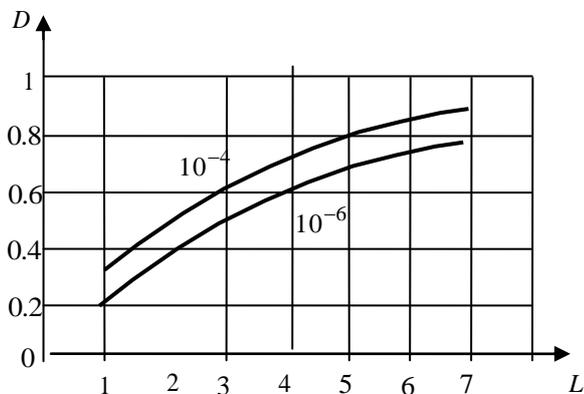


Рис. 2. Графики зависимости вероятности обнаружения мини-БПЛА  $D$  от длины трассового следа  $L$  и вероятности ложной тревоги  $F$

Так как БПЛА, использующиеся для разведки воздушной и наземной обстановки, могут находиться как в режиме полета, так и в режиме остановки, то и поток сигнальной информации будет сопровождаться разными семантическими составляющими, а именно: в режиме полета – предикатным признаком  $Z_{tij}$  трассового следа; в режиме зависания (остановки) – предикатным признаком  $Z_{nij}^p$  повтора сигнала. Тогда суммарная амплитуда с учетом режима зависания будет определяться как

$$W_{i,j} = W1_{i,j} + W2_{i,j} = \sum_{k_i, l_i}^{k_n, l_n} q_{i+k_n, j+l_n} + \sum_p q_{i,j}^p \cdot z_{nij}^p \cdot \quad (7)$$

Полученная сумма амплитуд отметок, попавших в пределы пространственного спектра вектора трассового следа и режима зависания, сравнивается с порогом. Порог выбирается из известной величины  $\sigma$ , среднеквадратического отклонения шума. Сигнал, прошедший пороговую обработку, используется в качестве энергетического признака.

По виду предикатного признака (функции) трассового следа, найденного из предикатного уравнения (5) путем перебора значений  $k_n, l_n$ , и по энергетическому признаку накопленной амплитуды отметок (7) осуществляется процедура распознавания отметок малоподвижных и малозаметных воздушных объектов.

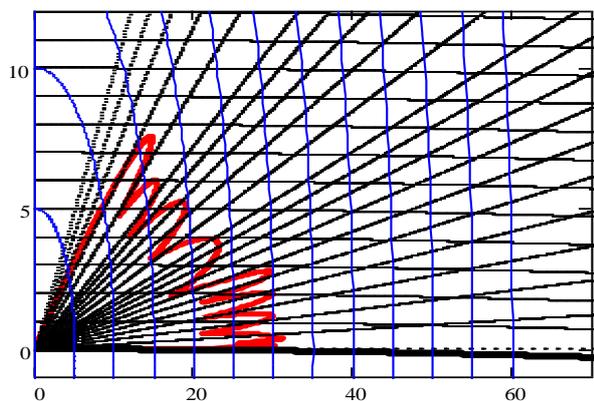


Рис. 3. Вертикальное сечение зоны обнаружения РЛС сантиметрового диапазона волн с обычной обработкой сигналов

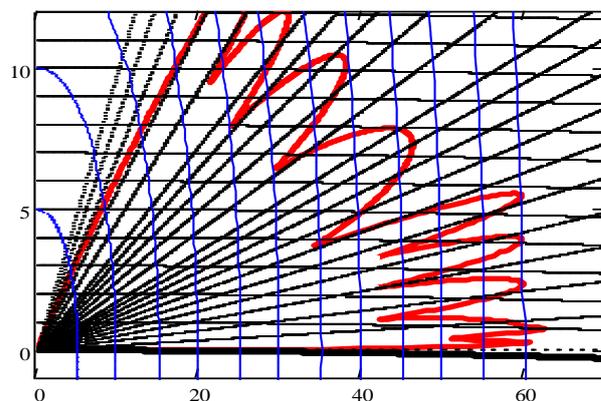


Рис. 4. Вертикальное сечение зоны обнаружения РЛС сантиметрового диапазона волн с семантической обработкой сигналов

Проведена сравнительная оценка эффективности предлагаемой семантической технологии обработки сигнальной информации. При расчетах для сравнения использовалась класси-

ческая модель внутриобзорной обработки радиолокационного сигнала. На рис. 2 приведены графики зависимости вероятности обнаружения  $D$  от длины трассового следа  $L$  и вероятности ложной тревоги  $F$ . Предварительные модельные эксперименты показывают, что вероятность обнаружения при одинаковых исходных данных повышается с 0,2 при обычной обработке до 0,8 при использовании семантической технологии (рис. 2), что равноценно увеличению зоны видимости РЛС в два раза. На рис. 3, 4 показаны вертикальное сечение зоны обнаружения РЛС сантиметрового диапазона волн с обычной и с семантической обработкой сигналов соответственно.

### Заключение

Таким образом, использование предлагаемой семантической технологии в обзорных РЛС позволяет существенно увеличить их эффективность по обнаружению малозаметных и малоподвижных воздушных объектов типа БПЛА. Эта технология основывается на семантическом анализе радиолокационной информации путем формирования пространственно-временных изображений с использованием алгебры конечных предикатов. Такой подход позволяет реализовать технологию обнаружения малозаметных объектов в реальном времени при сжатии радиолокационной информации с сохранением ее полноты. По предварительным модельным расчетам вероятность обнаружения малозаметных объектов увеличивается с 0,2 до 0,8, что равноценно увеличению зоны видимости РЛС в два раза.

### Список литературы:

1. Airland Battle Doctrine / Mark R. Schwartz // Modern war, №6. Jul–Aug 2013. P. 28-31.
2. Вишневський С.Д., Бейліс Л.В., Климченко В.Й. Потенційні можливості РЛС РТВ з виявлення оперативно-тактичних та тактичних безпілотних літальних апаратів. // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2017. № 2(27). С. 92-98.
3. Гусь В.И. Особенности трассовой обработки при сопровождении воздушных целей, наблюдаемых под малыми углами места над подстилающей поверхностью // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2007. Т. 50. № 1. С. 14–25. Режим доступа: [doi:http://dx.doi.org/10.20535/S00213470070100254](http://dx.doi.org/10.20535/S00213470070100254)
4. Russel S. Artificial intelligence: A modern approach, 3rd edition / S. Russel, P. Norvig. Pearson Ed., 2010. 1132 p.
5. Li Jian Radar Signal Processing and Its Applications / Jian Li, R. Hummel, P. Stoica, E. G. Zelnio. Springer, 2013. 279 p. Режим доступа: [https://books.google.de/books?id=9K\\_hBwAAQBAJ&hl=ru&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.de/books?id=9K_hBwAAQBAJ&hl=ru&source=gbs_navlinks_s)
6. George F. L. Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem-Solving. 4ed. Wil-liams, 2005. 864 p.
7. Chen Kun-Mu Microwave life-detection systems for searching human sub-jects under earthquake rubble or behind barrier / Kun-Mu Chen, Yong Huang, Jianping Zhang, A. Norman and others // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2000. V. 47, Issue 1. P. 105-114. – DOI: 10.1109/10.817625.
8. Zhuravlev Yu. I. Analysis of a training sample and classification in one recognition model / Yu. I. Zhuravlev, L. A. Aslanyan, V. V. Ryazanov // Pattern Recognition and Image Analysis: Pleiades Publishing. 2014. V. 24, Issue 3. P. 347–352. Режим доступа: <https://doi.org/10.1134/S1054661814030183>.
9. Солонская С. В. Технология обработки сигналов в интеллектуальной системе обнаружения и распознавания воздушных объектов / С. В. Солонская, В. В. Жирнов // Системи обробки інформації. Харків : ХУПС, 2015. № 11(136). С. 68-72.
10. Zhirnov V.V., Solonskaya S.V., Zima I.I. Application of wavelet transform for generation of radar virtual images // Telecommunications and Radio Engineering. 2014. V. 73 (17). P. 1533-1539. |Scopus|0.534|. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v73.i17.20.
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. 2016. V. 75 (15). P. 1331-1341. |Scopus|0.534. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i15.20.
12. Solonskaya S.V., Zhirnov V.V. Intelligent analysis of radar data based on fuzzy transforms / Telecommunications and Radio Engineering. 2018. V. 77 (15). P. 1321-1329. |Scopus|0.69|

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники;  
Харьковский национальный  
автомобильно-дорожный университет

Поступила в редколлегию 25.12.2018