

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ МАЛОЗАМЕТНЫХ И МАЛОПОДВИЖНЫХ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ**Введение**

Совершенствование техники, развитие научных исследований в различных областях приводит к необходимости внедрения интеллектуальных систем контроля воздушного пространства, в частности контроля малоаметных и малоподвижных воздушных объектов. В последние годы одной из наиболее динамично развивающихся областей являются беспилотные летательные аппараты, используемые для различных целей, в том числе для разведки воздушной и наземной обстановки в зоне боевых действий. В этой сфере активно используются все последние достижения в области передачи, приема и обработки информации.

В связи с этим, вопросы повышения эффективности систем контроля малоаметных и малоподвижных воздушных объектов актуальны. В данной работе предлагается повысить возможности обнаружения и сопровождения малоаметных и малоподвижных воздушных объектов за счет накопления энергетической и семантической составляющих сигнальной информации.

В известных информационных системах мониторинга воздушного пространства [1, 2] существуют операции, основанные на анализе информации текущего и нескольких предыдущих циклов измерений. В этих системах, как правило, недостаточно используются алгоритмы, в основе которых лежит модель человека-оператора и связанные с возможностью параллельного восприятия полученной информации с последующим принятием решения по анализу признаков.

Анализ публикаций показывает, что в существующих технологиях сбора и обработки сигнальной информации в основном используются статистические методы, которые не позволяют проводить содержательный анализ информации, связанный с проблемой зрительного восприятия сигналов и сигнальных образов и описанием сложных планов поведения в динамических средах. Как показывает практика, подобные операции возможны при совершенствовании процедур автоматизированной обработки сигнальной информации на основе интеллектуальной технологии, которая приблизит процедуры восприятия и анализа сигналов и сигнальных образов к логике человека [3, 4].

В данной работе также используются некоторые операции логического распознавания и компараторной идентификации [5, 6], в которых обработка информации выполняется согласно четко определенному алгоритму для выделения необходимой информации. Основная сложность в методах логического распознавания образов состоит в низкой автоматизации процессов обработки данных, в том числе в системах обнаружения, распознавания и интеллектуального анализа сигналов объектов.

Преимуществом алгоритмов, в основе которых лежит модель человека-оператора, является вариативный комплексный анализ пространственно-временной картины (геометрического образа сигнальной информации) [7, 8]. Однако в настоящее время есть существенная проблема математического описания человеческих ощущений объективных процессов физического мира [6], в том числе математического описания восприятия человеком-оператором пространственно-временной картины сигнальной информации о динамике воздушной и наземной обстановки.

Цель и задачи исследования. Цель – повышение эффективности обнаружения и распознавания геометрических образов малоподвижных, малоаметных воздушных объектов за счет накопления энергетической и семантической составляющих сигнальной информации. Задачи – разработка новых методов восприятия, формализации и преобразования сигнальной информации в изображения с целью обеспечить накопление и выделение важнейших отли-

чительных семантических признаков с точки зрения той или иной конкретной задачи идентификации малоподвижных объектов и параметров их движения.

Пространственно-временная модель сигналов

Для исследований в качестве интеллектуальной системы контроля малозаметных и малоподвижных воздушных объектов выбрана обзорная РЛС, работающая в режиме кругового или секторного обзора. При работе такая РЛС формирует N измерительных каналов от каждого элемента зоны обзора, размеры которого определяются разрешающей способностью или импульсным объемом РЛС. Полученные сигналы о воздушных объектах запоминаются в памяти и формируют карту (матрицу) интенсивностей сигналов зоны обзора РЛС.

В результате многообзорного накопления формируется новый пространственный сигнальный образ или виртуальное изображение. Формируется такое изображение в динамической памяти с искусственным послесвечением, т.е. постепенным забыванием истории сигнальной информации. Изображение воздушных объектов на экране индикатора обзорной РЛС или на его эквиваленте в матричной памяти в пределах одного цикла (обзора) измерений РЛС формируется в виде отметок (пачка принятых сигналов, величина которой определяется шириной диаграммы направленности антенны). Для подвижных объектов при накоплении отметок сигналов в пределах нескольких обзоров РЛС можно сформировать так называемый трассовый след. Размер отметки по дальности для летающих аппаратов ограничивается одним элементом зоны обзора РЛС, так как их размеры намного меньше импульсного объема. Размер отметки по азимуту определяется шириной диаграммы направленности (ДН) антенны.

Пространство сигнальных образов (виртуальное изображение), сформированное в динамической памяти с искусственным послесвечением, обладает определенным распределением их расположения и амплитуд $q_{ij}(r, \beta, t, T_s, \Delta)$. Это распределение зависит от координат (x, y) местоположения воздушного объекта, времени t , периода обзора РЛС T_s и параметра Δ 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 β .

Режим искусственного послесвечения в массиве амплитуд $\|A\|$ осуществляется уменьшением величины амплитуды q_{ij}^{k-1} предыдущего $(k-1)$ -го цикла обзора на определенную величину Δ в случае отсутствия сигнала в текущем k -м обзоре:

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

Для таких условий модель трассового следа отметок подвижного объекта будет определяться как совокупность затухающих отметок вдоль направления движения с дискретностью, определяемой скоростью воздушного объекта V_0 и временем цикла измерений РЛС T_s (рис.1).

Эффективность обнаружения сигнальных отметок на фоне ДНО определяется отношением сигнал/помеха по формуле [1, 2]:

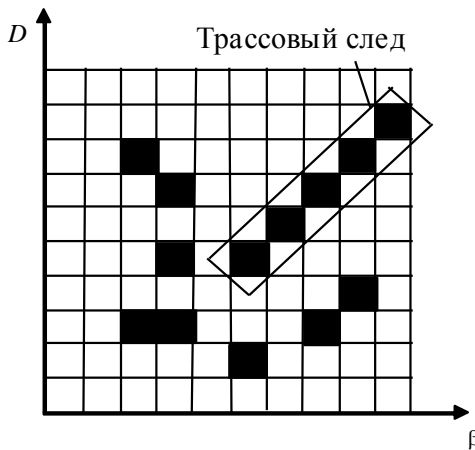


Рис. 1. Модель трассового следа отметок

$$g = \frac{[Q_s (t - (k - 1) \cdot T_s) - (k - 1) \cdot \Delta]^2}{Q_{nr}^2}, \quad (2)$$

где Q_s – амплитуда отметки сигнала; Q_{nr}^2 – дисперсия отметок ДНО; T_s – период обзора РЛС.

Анализ (2) показывает, что отношение сигнал/помеха g увеличивается при уменьшении параметра затухания Δ . Однако при этом повышается вероятность ложной тревоги за счет долго затухающих отметок неподвижных объектов, появившихся в предыдущих обзорах РЛС.

Повышение эффективности выделения отметок малоподвижных и малозаметных воздушных объектов предполагает выполнение операций накопления, как энергии сигнала, так и информации об изображении трассового следа в виде предикатных признаков и функций, сформированных за ряд обзоров РЛС. По предварительным оценкам накопленной энергии сигнала и информации о формировании трассового следа за ряд обзоров РЛС показывает, что при размерах трассового следа 7–9 отметок эффективность выделения отметок подобных воздушных объектов наилучшая.

Технология предикатного представления и анализа сигналов

В разработанную технологию входят операции формализации и анализа геометрического образа трасс подвижных объектов на основе математического аппарата алгебры конечных предикатов [6 – 9].

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

$$A(x) = t_{11}x^{q_{11}} \vee \dots \vee t_{mn}x^{q_{mn}} = \bigvee_{i=1, j=1}^{mn} t_{ij}x^{q_{ij}} \quad (3)$$

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

Для формализации процессов восприятия и преобразования сигналов и сигнальных образов использованы модели семантической обработки сигнальной информации и алгебра конечных предикатов. 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 обзорях;

– предикатный признак Z_{yij} ухода отметки в элементах обработки, прилегающих к рассматриваемому элементу;

При таких исходных условиях предикатные признаки формируются по следующему правилу:

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

$$Z_{yij} = 1 \text{ при } A_{ij}^{k-1} > 0 \wedge A_{ij}^k = 0 \wedge Z_{nij} = 0, \quad (5)$$

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

Поскольку для формирования предикатного признака трассового следа используется признак Z_{yij} , то осуществляется операция обновления (экстраполяции) данного признака с учетом его предыстории перезаписыванием в ту же ячейку памяти, в которой он был записан. Основой для сохранения значения признака является либо его повторное формирование при выполнении соответствующих условий (5), либо наличие ненулевого уровня амплитуды сигнала в рассматриваемой ячейке, либо выполнение двух этих условий одновременно:

$$Z_{yij} = 1 \text{ при } Z_{yij}^k = 1 \vee (Z_{yij}^{k-1} = 1 \wedge A_{ij}^{k-1} > 0 \wedge A_{ij}^k = 0). \quad (6)$$

С учетом сформированного признака Z_{yij} приступим к формированию предикатного признака трассового следа Z_{tyij} , позволяющего получить информацию о величине и направлении трассового следа отметок от подвижных воздушных объектов, образуемого как совокупность предикатных признаков ухода отметок Z_{tyij} .

Предикатный признак Z_{tyij} формирования трассового следа сигнальной отметки имеет вид предикатного уравнения [9]

$$Z_{tyij} = \bigwedge_{k_1, l_1}^{k_n, l_n} Z_{yi+k_n, j+l_n} = Z_{yi+k_1, j+l_1} \wedge Z_{yi+k_2, j+l_2} \wedge \dots \wedge Z_{yi+(k_{n-1}), j+(l_{n-1})} \wedge Z_{yi+k_n, j+l_n} = 1, \quad (7)$$

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 двойко: 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 (классификации или распознавании) отметок малозаметных и мало-подвижных воздушных объектов.

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

Результаты исследования

Операции формирования совокупности предикатных признаков Z_{tyij} и Z_n как геометрического сигнального образа малоподвижных и малозаметных воздушных объектов и их обнаружение и распознавание составляют основу предлагаемой технологии обработки сигналов в интеллектуальной системе контроля воздушного пространства.

Размер длины трассового следа или значения $k_1, l_1 \dots k_n, l_n$ выбираем исходя из необходимого для анализа количества затухающих отметок в трассовом следе. Анализ модельных экспериментов по оценке эффективности выделения отметок малоподвижных и малозаметных воздушных объектов по признакам накопленной энергии сигнала и информации о формировании трассового следа за ряд обзоров РЛС показывает, что при размерах трассового следа 7-9 вероятность правильного обнаружения малозаметных объектов при одинаковых исходных данных повышается с 0,2 до 0,8.

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 (7). Вид распределения амплитуд отметок трассового следа формируется согласно (1) путем постепенного уменьшения (затухания) поступившего сигнала при условии 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 $W_{ij} = \sum_{k_1, l_1}^{k_n, l_n} q_{i+k_n, j+l_n}$. Так как беспилотные летательные аппараты, использующиеся для разведки воздушной и наземной обстановки, могут находиться как в режиме полета, так и в режиме зависания, то и поток сигнальной информации будет сопровождаться разными семантическими составляющими, а именно: в режиме полета – предикатным признаком Z_{tyij} трассового следа; в режиме зависания – предикатным признаком Z_{nij}^p повтора сигнала. Тогда суммарная амплитуда с учетом режима зависания будет определяться как

$$W_{i,j} = W_{1,i,j} + W_{2,i,j} = \sum_{k_1, l_1}^{k_n, l_n} q_{i+k_n, j+l_n} + \sum_p q_{i,j}^p \cdot Z_{nij}^p \quad (8)$$

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

По виду предикатного признака (функции) трассового следа, найденного из предикатного уравнения (7) путем перебора значений k_n, l_n , и по энергетическому признаку накопленной амплитуды отметок (8) осуществляется процедура распознавания отметок малоподвижных и малозаметных воздушных объектов за ряд обзоров РЛС.

Заключение

Разработанная технология обработки сигналов частично была реализована в системе обнаружения и распознавания радиолокационного изображения малоподвижных воздушных объектов типа «спортивный самолет АН-12» и малозаметного и неподвижного мешающего воздушного объекта типа «ангел-эхо» [6].

Проведена оценка эффективности предлагаемого метода по реальным экспериментальным данным. При расчетах по обоснованию эффективности предлагаемого алгоритма и устройства пространственно-спектральной фильтрации с использованием многообзорной обработки была использована для сравнения классическая модель внутриобзорной обработки радиолокационного сигнала. На рис. 2 приведены графики зависимости вероятности правильного обнаружения малозаметных целей D от длины трассового следа L и вероятности ложной тревоги F .

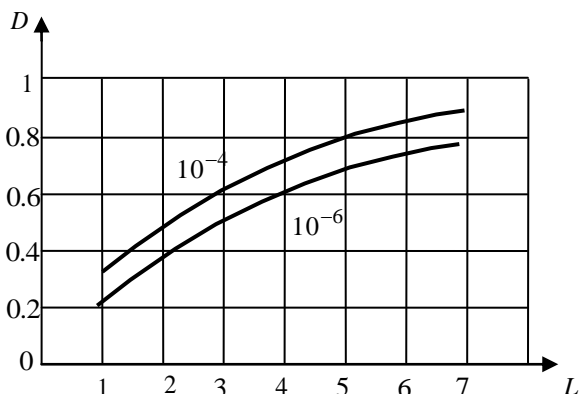


Рис. 2. Графики зависимости вероятности обнаружения малозаметных целей D от длины трассового следа L и вероятности ложной тревоги F

Анализ рисунка показывает, что использование информации об отметках цели за ряд последующих обзоров повышает вероятность правильного обнаружения. При соответствующих размерах окна анализа (согласован с длиной трассового следа) вероятность правильного обнаружения малозаметных целей D при одинаковых исходных данных повышается с 0,2 при внутриобзорной обработке до 0,8 при использовании алгоритма трассовой фильтрации (рис 2).

Таким образом, использование предлагаемых алгоритмов интеллектуальной системы обработки по сравнению с классическими методами внутриобзорной обработки позволяет существенно увеличить эффективность обнаружения отметок малозаметных и мало-подвижных воздушных объектов.

Список литературы:

1. Справочник по радиолокации : в 2 кн. ; под ред. М. И. Скольника ; пер. с англ. под общей ред. В.С. Вербы. – Москва : Техносфера, 2014. – 672 с.
2. Li Jian Radar Signal Processing and Its Applications / Jian Li, R. Hummel, P. Stoica, E. G. Zelnio – Springer, 2013. – 279 p. https://books.google.de/books?id=9K_hBwAAQBAJ&hl=ru&source=gbs_navlinks_s.
3. George F. L. Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem-Solving. 4ed. – Williams, 2005. – 864 p.
4. Chen Kun-Mu. Microwave life-detection systems for searching human subjects 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. – pp. 105-114. – DOI: 10.1109/10.817625.
5. 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. – pp 347–352. – <https://doi.org/10.1134/S1054661814030183>.
6. Жирнов В. В. Картинные методы извлечения и анализа радиолокационной информации в обзорных РЛС / В. В. Жирнов, А. И. Дохов // Прикладная радиоэлектроника. – Харьков : ХНУРЭ, 2004. – Т. 3. № 1. – С. 29-34.
7. Жирнов В. В. Интеллектуальная система многообзорной обработки радиолокационной информации / В. В. Жирнов, С. В. Солонская // Радиоэлектроника и информатика. – Харьков : ХНУРЭ, 2007. – № 3. – С. 6-12.
8. Солонская С. В. Предикатное представление сигналов в многоканальных информационных системах / С. В. Солонская, В. В. Жирнов // Сб. матер. 5-й Междунар. научно-техн. конф. «Информационные системы и технологии». – Харьков : ХНУРЭ, 2016. – С. 55-56.
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.