

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОПИСАНИЯ ПРИЗНАКОВ РАДИОЛОКАЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЦЕЛЕЙ В БОРТОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

RESEARCH FEATURES DESCRIPTIONS OF THE CHARACTERISTICS OF RADAR RECOGNITION OF AIR TARGETS IN AIRBORNE RADAR SYSTEMS

V. Nadtochiy

Summary. In the article the peculiarities of the description of the characteristics of radar recognition of air targets on the basis of known mathematical models of radar signals reflected from these goals.

Keywords: radar recognition, signs of recognition, secondary modulation, modulation characteristic, spectral-Doppler portrait.

Надточий Виктор Николаевич

Адъюнкт, ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», (г. Воронеж)
nadtochiy_90@mail.ru

Аннотация. В статье проведены исследования особенностей описания признаков радиолокационного распознавания воздушных целей на основе известных математических моделей радиолокационных сигналов отраженных от этих целей.

Ключевые слова: радиолокационное распознавание, признаки распознавания, вторичная модуляция, модуляционные признаки, спектрально-доплеровский портрет.

Анализ боевого опыта контингента стран НАТО и США в вооруженных конфликтах в Косово, Афганистане, Ираке и Сирии показал, что в современной войне решающая роль в достижении успеха перешла от наземных операций, проводимых сухопутными войсками, к воздушным операциям, проводимых в воздушно-космической сфере при массированном и планомерном применении авиации [1].

Современный театр военных действий характеризуется значительным количеством задействованных противоборствующими сторонами воздушных объектов (целей), динамичностью тактической обстановки и изменяющимися условия применения радиолокационных систем (РЛС) управления оружием. В этих условиях эффективность выполнения боевых задач авиации во многом определяется своевременностью и достоверностью получения информации об окружающей обстановке [2]. На борту современных и перспективных воздушных судов (ВС) одним из информационных датчиков комплекса бортового оборудования является радиолокационная станция. Во многих случаях РЛС является основным, а в некоторых случаях и единственным источником достоверной информации о воздушных целях. Ее функционирование обеспечивает информационную осведомленность летчика о типе и классе объектов, находящихся на театре военных действий, а также степени их опасности. Такая осведомленность достигается реализацией в вычислительной системе современной бортовой РЛС алгоритмов распознавания объектов в виде функциональных каналов радиолокационного распознавания (РЛР) [3].

В современной радиолокации задача РЛР воздушных целей (ВЦ) является актуальной. Сложность ее решения обусловлена высокой динамикой изменения воздушной обстановки и низкой стабильностью измеренных значений информационных признаков распознаваемых объектов. В этом случае возникает необходимость решения *противоречия* между адекватной оценкой воздушно-целевой обстановки в зоне действия РЛС при априорной неопределенности информации о цели, ограничениях времени на ее обработку и принятие решения. При этом адекватность оценки обстановки достигается достоверным описанием признаков распознавания классов (типов) целей, наблюдаемых на максимальном удалении ВЦ от РЛС. Разрешение данного противоречия видится в результате анализа возможностей реализации существующих подходов и способов достоверного описания признаков радиолокационного распознавания воздушных целей в современных условиях ведения войны.

Цель работы: — исследование особенностей достоверного описания признаков радиолокационного распознавания воздушных целей.

Достоверность распознавания целей во многом определяется качеством априорного описания классов и типов объектов на языке информационных признаков.

Формирование признакового пространства при распознавании является ее центральной проблемой. При этом отсутствуют полностью формализованные методы решения данной проблемы [4, 5]. Поэтому проблема радиолокационного распознавания требу-

ет проведения исследований, направленных на выявление новых свойств отраженных радиолокационных сигналов, позволяющих выделить дополнительные достоверные устойчивые информативные признаки распознавания.

В настоящее время для распознавания ВЦ используют следующие признаки [6]:

- ◆ тактические, отражающие особенности боевого применения воздушных объектов;
- ◆ траекторные, отражающие летно-технические характеристики, динамические свойства и координатные параметры воздушных объектов;
- ◆ сигнальные, учитывающие особенности амплитудных, поляризационных и спектральных характеристик отраженных сигналов.

К тактическим признакам относятся [6, 7]: место в массированной ракетно-авиационном ударе (МРАУ), количественный состав групповой цели, тип боевого порядка, способ противодействия средствам системы ПВО и т.д. Наиболее важным условием решения задачи распознавания целей по тактическим признакам является учет априорной информации о возможной структуре МРАУ и его элементах. Это может быть достигнуто на основе высокой организации управления всеми взаимодействующими силами и средствами.

Среди траекторных признаков выделяются координатные признаки, характеризующие пространственное положение цели (дальность, высота, угловое положение) и скорость ее движения [6, 7]. Информация о дальности и скорости сближения с целью позволяет определить время для принятия решения на выполнение маневра и прицеливание, обеспечивая классификацию наблюдаемой ВЦ по степени опасности. Траекторные признаки доступны для непосредственного измерения в РЛС истребителя. Достаточно эффективные оценки параметров траектории могут быть получены только на этапе устойчивого сопровождения.

Представленные в работах [8, 9] результаты исследований показали, что траекторные и тактические признаки при их самостоятельном использовании не обеспечивают приемлемой достоверности распознавания на заданной дальности.

Сигнальные признаки формируются при использовании частотно-временных параметров отраженных от ВЦ сигналов. В качестве сигнальных признаков могут быть использованы: значение ЭПР цели, определяющее энергетику отраженного сигнала, и ее флуктуации; поляризационные и модуляционные признаки; радиолокационные дальностные, дальностно-поляризационные, дальностно-угловые портреты и др. [6].

Использование признаков, характеризующих энергетику принятого сигнала [6], позволяет классифицировать ВЦ по размерам «Большая-Средняя-Малая». Для этого необходимо определить эталоны средних значений ЭПР для основных типов целей с помощью натуральных экспериментов или методами имитационного моделирования на ЭВМ, и сформировать базу данных этих эталонов. Однако энергетический признак недостаточно информативен и его применение зависит от ряда условий, определяемых ракурсом наблюдения цели, траекторией полета и наличия внешних подвесок вооружения на ВС. Поэтому при его использовании распознавание цели по принципу «Большая-средняя-малая» не достигает высокой достоверности. Выполнение данных условий требует большого числа априорных данных и усложняет выделение характерных признаков распознавания ВЦ.

Информация о поляризационных свойствах целей содержится в поляризационной матрице вторичного излучения. Однако измерение всех ее элементов предполагает прием отраженного от цели сигнала на двух ортогональных линейных или круговых поляризациях. Это приводит к увеличению массы и геометрических размеров антенн РЛС.

В отдельных работах [10, 11] в качестве информационных признаков распознавания выделяются дальностные радиолокационные портреты ВЦ.

При большой полосе частот зондирующих сигналов со сплошным спектром удается отдельно наблюдать (разрешать) элементы конструкции целей вдоль линии визирования. Если при этом реализуется инверсное синтезирование апертуры антенны за счет длительной когерентной обработки сигналов, то возможен переход к двумерным портретам целей, которые в процессе распознавания сравниваются с соответствующими эталонами. Недостатками таких методов являются: ракурсная зависимость, наличие на воздушном судне подвесок вооружения, высокие требования к полосе частот и вычислительным возможностям РЛС.

В настоящее время, по мнению отечественных и зарубежных специалистов [6, 7, 11] для распознавания ВЦ наиболее перспективными являются модуляционные признаки их вторичного излучения, возникающие в процессе отражения зондирующего сигнала от конструкции двигателей воздушной цели: лопастей винтов, пропеллеров, лопаток компрессоров и турбин силовой установки и т.д. Их применение позволяет формировать детальный, уникальный для каждого типа ВЦ спектрально-доплеровский портрет (СДП). Для формирования СДП в качестве информативных используют следующие параметры вторичной модуляции (ВМ) отраженных сигналов:

- ◆ характер амплитудных соотношений спектральных компонент ВМ сигналов, отраженных от ВЦ разных классов и типов;

- ◆ коэффициенты взаимосвязи доплеровских частот спектральных компонент ВМ, характерные для сигналов, отраженных от турбореактивных самолетов различных типов [3, 8, 12];
- ◆ характер траекторий доплеровских частот планерной и модуляционных компонент спектра сигнала, позволяющий классифицировать ВЦ по принципу «Ведущий-Ведомый» [8];
- ◆ импульсный характер модуляции сигналов, отраженных от вертолетов и др. [3, 12];

Модуляционные признаки выявляются при облучении цели протяженными во времени сигналами, позволяющими разрешать соответствующие элементы спектра доплеровских частот. Кроме того, в спектре отраженного сигнала за счет его многократного перетражения от различных элементов конструкции ВЦ возможно наличие дополнительных частотных составляющих, характеризующих конкретный тип объекта.

Однако к недостаткам применения модуляционных признаков при распознавании ВЦ можно отнести необходимость знания закона изменения вторичной модуляции сигнала для всех типов воздушных целей с учетом возможного затенения лопаток компрессора воздухозаборником при ракурсах движения ВЦ больше 60°, а также снижения дальности наблюдения признака по отношению к дальности обнаружения вследствие меньшей интенсивности комбинационных составляющих двигателя по отношению к планерной составляющей [13, 14]. Появление новых типов целей или отсутствие информации о существующих целях приводит к ложным решениям (отсутствует признак «не знаю»).

Для формирования СДП целей и закона изменения вторичной модуляции сигнала необходимо провести анализ моделей отраженного сигнала.

Характерной особенностью ВЦ «самолет с ТРД», «самолет с ТВД», «Вертолет» является наличие вращающихся лопастных структур в виде ступеней компрессора или турбины низкого давления КНД (ТНД) и несущих винтов [6]. Сигнал, отраженный от вращающейся многолопастной структуры при гармоническом зондировании описывается выражением (1) [6].

где $N_{л}$ — количество лопастей, k — номер лопасти, $\sigma(t, \Theta)$ — ЭПР лопасти как функция времени и ракурса наблюдения Θ , отсчитываемого от оси вращения; $F_{рот}$ — частота вращения ротора, R — радиус ступеней КНД (ТНД).

Данная модель сигнала позволяет исследовать лишь основные закономерности характера отражений от динамических структур различной конфигурации и не позволяет учесть зависимость ЭПР лопастей от ракурса наблюдения, нестабильность частоты их вращения, геометрические размеры этих лопастей и др.

Оценка информационных свойств отраженных РЛ сигналов от ВЦ была проведена по результатам анализа летных экспериментальных исследований [8, 9, 15]. По итогам анализа была сформирована обобщенная модель отраженного сигнала от ВЦ, имеющая вид (2) [3].

где I — количество значений коэффициентов взаимосвязи гармонических компонент сигнала $C(i)$, $N_{дв}$ — число двигателей у наблюдаемого ВЦ; A_{im} , φ_{im} — соответственно амплитуда и начальная фаза составляющей сигнала с номером im ; $F_{рот m}$ — частота вращения ротора компрессора низкого давления (КНД) m -го двигателя; $n_{ш}$ — случайная величина, имеющая характеристики нулевого среднего и дисперсию

$$\sigma_f^2.$$

Коэффициенты взаимосвязи определяются суперпозицией

$$C(i) = I_1(i)N_{л1} + I_2(i)N_{л2} \tag{3}$$

где $N_{л1}, N_{л2}$ — количество лопаток на первой и второй ступенях компрессора соответственно;

$$I_{1(2)} = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, I_{1(2)\max}$$

а значение I_{\max} вычисляется в соответствии с выражением

$$I_{1(2)\max} = \text{int} \left(\frac{4\pi R}{\lambda N_{л1(2)}} \right). \tag{4}$$

$$S(t) = \sum_{k=1}^{N_{л}} \sqrt{\sigma \left(t - \frac{k}{N_{л} F_{рот}}, \Theta \right)} \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} R \sin \Theta \cos \left[2\pi F_{рот} \left(t - \frac{k}{N_{л} F_{рот}} \right) \right] \right\} \tag{1}$$

$$S(t) = \sum_{m=1}^{N_{дв}} \sum_{i=1}^I A_{im}(t) \exp \left[j 2\pi \left(f_0 + \frac{2V_{ш}}{\lambda} + C(i) F_{рот m} \right) t + j \varphi_{im} \right] + n_{ш}(t), \tag{2}$$

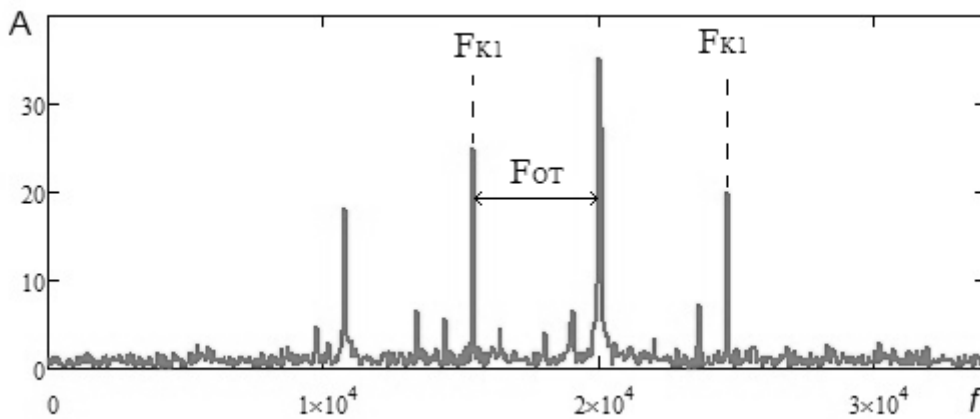


Рис. 1. СДП ВЦ, состоящий из спектральных составляющих ВМ

При применении сигналов сантиметрового диапазона длин волн (до 4 см) размер лопаток и межлопаточных расстояний превышает длину волны сигнала. Поэтому на структуру сигнала, отраженного от самолетов с ТРД, существенное влияние оказывает отражения от первой и второй ступеней КНД и ТНД. На больших дальностях распознавания спектрально-доплеровский портрет (СДП) цели содержит составляющие планера и первой ступени КНД или ТНД в зависимости от ракурса наблюдения [16]. Модель отраженного сигнала от вращающейся многолопастной структуры описывается выражением (1), а модель отраженного сигнала от ВЦ со всеми составляющими компонентами этой цели — выражением (2). Отраженный сигнал (2) по сравнению с (1) содержит значительное множество информационных составляющих, частоты и амплитуды которых, вследствие размещения ступеней на одном вращающемся валу, однозначно связаны с частотой вращения ротора низкого давления. Верхняя и нижняя границы спектра ВМ определяются динамикой элементов лопаточного колеса, движущихся с максимальной скоростью относительно источника наблюдения. В результате модель отраженного сигнала в виде (2) наиболее полно описывает СДП цели и обладает более высокой информативностью для априорной классификации объектов в целях их распознавания.

Реальный отраженный сигнал, описанный моделью (2), отличается от модели (1) учетом зависимости движения планера самолета и составляющих силовой установки двигателя, разным количеством лопаток на ступенях (в КНД $N_{л1} < N_{л2}$, а в ТНД $N_{л1} > N_{л2}$), расположением вращающихся структур двигателя и воздухозаборников (сопел), разницей частот вращения лопаточных конструкций двигателя для самолетов с несколькими двигателями, временем наблюдения сигнала, влиянием эффекта затенения, переотражения

и др. [17]. Пример спектра такого сигнала представлен на рисунке 1.

В таком спектре сигнала (2) проявляется планерная составляющая, относительно которой составляющие ВМ смещены симметрично влево и вправо на частоты, описываемые кратностью количества двигателей. Учитывая, что лопатки КНД и ТНД установлены под углом к плоскости вращения ротора низкого давления (РНД), при облучении цели в ППС все составляющие левой боковой полосы спектра ВМ отраженного сигнала имеет большую амплитуду по сравнению с составляющими правой боковой полосы (рис. 1, спектральная составляющая F_{K1}). При атаке в ЗПС характер амплитуд спектральных составляющих сигнала меняется наоборот.

При анализе модели отраженного сигнала (2) информативным признаком классов ВЦ является значение частоты основного тона вторичной модуляции $F_{OT} = N_d F_{pom}$ (рис. 1). Описаниями классов ВЦ являются значения величины F_{OT} , лежащие в неперекрывающихся областях спектра для каждого из классов. Так, например, для класса «Самолет с ТРД» значения F_{OT} лежат в диапазоне $F_{OT} = [1,4...16,2]$ кГц, для класса «Самолет с ВД» — $F_{OT} = [32...240]$ Гц, для класса «Вертолет» — $F_{OT} = [2,26...28]$ Гц.

Частота вращения РНД двигателей наблюдаемых объектов в классе «Самолет с ТРД» составляет $(0,7...0,9)F_{pom\ max}$

и поддерживается постоянной при отсутствии маневрирования. Значение частоты вращения РНД находится в пределах 70–180 Гц. У двухдвигательных самолетов двигатели являются независимыми системами, следовательно, частоты вращения РНД будут отличны друг от друга.

Таким образом, эффективность алгоритмов распознавания типа ВЦ на основе модуляционных признаков зависит от знания закона изменения вторичной модуляции сигнала на основе взаимосвязи доплеровских частот спектральных компонент ВМ. Для более полного представления признакового пространства типа цели необходимо повышать точность оценки частот составляющих этого спектра и увеличивать количество спектральных составляющих, на основе которых будет приниматься решение о типе ВЦ.

При формировании алфавита типов на языке модуляционных признаков необходимо реализовать тип «не знаю», который при появлении новых типов целей или отсутствии информации о существующих целях в базе данных БРЛС приведет к уменьшению ложных решений. Кроме того важным является проведение исследований математических моделей радиолокационных сигналов, отраженных от воздушных целей, на основе геометрических особенностей конструкции их двигателей и закона изменения вторичной модуляции сигнала на адекватность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ашурбейли И.Р. и др. Опыт и уроки боевого применения войск и вооружения ПВО в локальных войнах и вооруженных конфликтах [Текст] / И. Р. Ашурбейли, Б. Ф. Чельцов, А. И. Хюпенен, С. А. Волков. — М., 2012. — 204 с.
2. Верба В.С. и др. Интегрированные многодатчиковые комплексы мониторинга окружающего пространства [Электронный ресурс] / В. С. Верба, В. И. Меркулов, Д. А. Милияков, В. С. Чернов // Журнал радиоэлектроники. — 2015. — № 4. — Режим доступа: www.jre.cplire.ru (Дата обращения 22.06.2017).
3. Васильев О.В. и др. Особенности распознавания воздушных целей в бортовой РЛС при длительной когерентной обработке сигналов [Текст] / О. В. Васильев, В. А. Абатуров, Р. А. Потапов, А. Г. Ситников, С. С. Коротков // Радиотехника. — 2011. — № 2. — С. 43–51.
4. Фомин Я.А., Тарловский Г. Р. Статистическая теория распознавания образов [Текст] / Я. А. Фомин, Г. Р. Тарловский — М.: Радио и связь, 1986. — 264 с.
5. Горелик А.Л. и др. Современное состояние проблемы распознавания: Некоторые аспекты [Текст] / А. Л. Горелик, И. Б. Гуревич, В. А. Скрипкин — М.: Радио и связь, 1985. — 161 с.
6. Ширман Я.Д. и др. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование [Текст] / Я. Д. Ширман, С. А. Горшков, С. П. Лещенко, Г. Д. Братченко, В. М. Орленко // Радиотехника. — 2000. — № 2. — С. 5–65.
7. Небабин В.Г., Сергеев В. В. Методы и техника радиолокационного распознавания [Текст] / В. Г. Небабин, В. В. Сергеев — М.: Радио и связь, 1985. — 153 с.
8. Черных М.М. и др. Экспериментальные исследования информационных свойств когерентных радиолокационных сигналов [Текст] / М. М. Черных, О. В. Васильев, А. В. Богданов, А. Н. Савельев, В. Е. Макаев // Радиотехника. — 2000. — № 3. — С. 47–54.
9. Черных М.М., Васильев О. В. Экспериментальная оценка когерентности радиолокационного сигнала, отраженного от воздушной цели [Текст] // Радиотехника. — 1999. — № 2. — С. 75–78.
10. Авиационные системы радиовидения / Под ред. Г. С. Кондратенкова. — М.: «Радиотехника», 2015. — 648 с.
11. P. Tait, Introduction to Radar Target Recognition, the Institution of Engineering and Technology, 2006, p. 404.
12. Абатуров В.А. и др. Математические модели радиолокационных сигналов, отраженных от воздушных целей разных классов [Текст] / В. А. Абатуров, О. В. Васильев, В. А. Ефимов, В. Е. Макаев // Радиотехника. — 2006. — № 7. — С. 28–33.
13. Макаев В.Е., Васильев О. В. Метод радиолокационного распознавания воздушной цели по турбинному эффекту [Текст] // Радиотехника. — 2000. — № 11. — С. 30–33.
14. Низовцов Н. В. Алгоритм распознавания типа воздушной цели на основе анализа ее радиолокационного спектрального портрета при управлении длительностью когерентной обработки сигнала [Текст] / Многофункциональные радиолокационные комплексы: научно-методические материалы под ред. Б. Г. Татарского. — М.: изд. ВВИА им. Проф. Н. Е. Жуковского, 2001, — С. 61–65.
15. Васильев О.В. и др. Экспериментальное обоснование модели отраженного от вертолета радиолокационного сигнала [Текст] / О. В. Васильев, В. П. Кутахов, В. Г. Щекотилов, И. А. Юрчик // Радиотехника. — 2001. — № 8. — С. 54–59.
16. Макаев В. Е. Обоснование признака типа воздушной цели для распознавания по эффекту «вторичной модуляции» отраженных радиолокационных сигналов [Текст] / Многофункциональные радиоэлектронные комплексы: научно-методические материалы под ред. П. И. Дудника. — М.: изд. ВВИА им. Проф. Н. Е. Жуковского, 1995. — С. 30–34.
17. Васильев О.В., Макаев В. Е. Анализ особенностей спектральной структуры отраженного радиолокационного сигнала от самолета ТА и ИД РЛС для распознавания их типа [Текст] / Многофункциональные радиоэлектронные комплексы: научно-методические материалы под ред. П. И. Дудника. — М.: изд. ВВИА им. Проф. Н. Е. Жуковского, 1995. — С. 52–55.

© Надточий Виктор Николаевич (nadtochiy_90@mail.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»