

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ РАДИОЛОКАЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ И ВЫЯВЛЕНИЕ ИХ НЕДОСТАТКОВ

Коломоец Р.В., аспирант "Белгородского государственного национально
исследовательского университета"

Научный руководитель: Шамраев А.А., к.т.н., доцент, доцент кафедры
информационных технологий и робототехнических систем "Белгородского
государственного национально исследовательского университета"
Белгородский государственный национально исследовательский университет
г. Белгород

В автоматическом режиме реализация методов распознавания по тактическим признакам является сложной задачей, так как для моделирования всех возможных вариантов состава группы воздушных объектов (ВО), способов постановки помех, способов принуждения от отказа полетного задания необходимо знать априорные данные о объекте и поставленных ей задачах, а сам процесс будет очень ресурсозатратным. Поэтому метод распознавания по тактическим признакам осуществляется за счет профессионализма оператора осуществляющего наблюдение за объектом. Метод распознавания по траекторным признакам осуществляется в виде пошаговой процедуры принятия решения, в основе которой заложен критерий Неймана-Пирса [1]. Метод распознавания по траекторным признакам представляет собой многоступенчатый процесс принятия решений, основанный на критерии Неймана-Пирса. Для каждого заранее определенного класса объектов установлены предельные значения траекторных признаков. Определение местоположения объекта в пространстве возможных значений каждого признака позволяет проводить первичное радиолокационное распознавание. При непосредственном распознавании следует использовать не все траекторные параметры, а лишь определенные группы, которые характеризуют основные свойства рассматриваемого класса объектов.

Для примера приведена классификация по скоростным признакам:

1. Медленный сверхвысотный воздушный объект (МСВ) с высотой от 15 до 100 км и скоростью в диапазоне от 0 до 7 м/с.
2. Малоскоростной средневысотный воздушный объект (МССВ) с высотой до 5-6 км и скоростью от 0 до 100 м/с.
3. Скоростной маловысотный воздушный объект (СМВ) со скоростью до 500 м/с и высотой в десятки и единицы метров.
4. Скоростной высотный воздушный объект (СВ) с максимальной скоростью до 1000 м/с и высотой до 20 км.
5. Сверхскоростной сверхвысотный воздушный объект (СССВ) со скоростью до 3000 м/с и высотой от 40 до 150 км.
6. Сверхскоростной высотный воздушный объект (ССВ) со скоростью в диапазоне от 1200 м/с до 2000 м/с и высотой до 30 км.

Однако существует достаточное количество классов ВО, которые могут одновременно находиться в заданных пространствах признаков (самолеты малых, средних и больших размеров на этапе стационарного полета), и правильно не распознаются с требуемым качеством по траекторным признакам.

Для получения физических размеров ВО необходимо уменьшать импульсный объем, то есть повышать разрешающую способность по пространственным координатам до единиц-десятков метров.

Под разрешающей способностью по определённой координате понимается минимальное расстояние между двумя ВО, при равенстве других координат, когда они наблюдаются раздельно.

Для сантиметрового и дециметрового диапазона волн при использовании фазированных антенных решеток (ФАР) на передачу обычно используют антенную систему с равномерным амплитудным распределением (максимальное усиление при минимальной ширине диаграммы направленности). Амплитудное распределение фазированных антенных решеток на прием делают спадающим к краям, что позволяет добиться минимального уровня боковых лепестков диаграммы направленности ($\theta_{\text{БЛ}} \approx -30\text{db}$), но требует увеличения размеров для равенства размеров диаграмм направленности на передачу и прием.

По техническим характеристикам разрешающая способность по дальности у современных РЛС использующих модулированные широкополосные сигналы составляет не менее 200 м.

Для определения продольных размеров ВО необходимо использовать различные разновидности сигнальных признаков, распознавание по которым является наиболее правдоподобным, но в свою очередь более ресурсозатратным.

Современные методы радиолокационного распознавания классов воздушных объектов подразделяются в следующем виде[2]:

- 1) метод распознавания по модуляционным эффектам турбин;
- 2) метод распознавания по поляризационному признаку;
- 3) метод распознавания по корреляционному признаку;
- 4) метод распознавания по узкополосным сигналам;
- 5) метод распознавания по многочастотным сигналам;
- 6) метод распознавания по сверхширокополосным сигналам.

Метод распознавания по сверхширокополосным сигналам, проблемы его реализации и недостатки

Существует возможность описать радиолокационную сигнатуру воздушных объектов с помощью сигнальных признаков, представляющих собой наглядные совокупности дважды отраженных сигналов от различных точек на поверхности объекта. Расположение этих признаков на временной оси и их количество зависят от геометрии формы объекта и угла облучения радиолокационной станции. Для создания таких сигнатур необходима разрешающая способность в 2 метра, особенно в случае, если требуется распознать объекты размером 6 метров и более.

Добиться высокой точности правильного распознавания, на уровне 90% при минимальном числе оборотов к объекту, позволяют узкополосные сигналы с шириной спектра до 75 МГц, при отношении сигнал/шум до 25дБ на один снимок [3].

Зная заранее радиолокационные характеристики воздушных объектов, можно провести их радиолокационное распознавание, сопоставив их с уже имеющимися данными и определить класс и тип объекта на основе наибольшего сходства.

Для получения образцовых портретов объекта необходимо провести длительные эксперименты, что является одним из недостатков. Эта задача усложнена тем, что радиолокационный портрет объекта сильно зависит от ракурса и может изменяться в значительных пределах. Представляется сложным реализовать эту задачу для отдельных классов объектов.

Также можно отметить еще один недостаток. Отраженный сигнал, исходящий от разнообразно расположенных блестящих объектов, словно «размывается» по различным диапазонам дальности. Это приводит к снижению отношения сигнал/шум в каждом элементе, отвечающем за дальность, и уменьшает размеры зоны, в которой возможно распознавание, по сравнению с потенциальной зоной обнаружения радара. Таким образом, при использовании данного метода распознавания задача идентификации малых воздушных

объектов может быть решена не в пределах всей зоны обнаружения. Поскольку применение сверхширокополосного сигнала для обнаружения воздушных объектов неэффективно, в таких радарх применяются несколько типов зондирующих сигналов: один используется для обнаружения объектов, а другие – для распознавания их классов и форм.

Для достижения высокой эффективности в распознавании различных классов воздушных объектов с помощью технологий, которые работают на основе сверхширокополосных сигналов, необходимо точно определять расстояние до цели, используя широкий зондирующий сигнал. По этой причине, при реализации данной методологии в радиолокационных системах требуется использовать три вида зондирующих сигналов: узкополосный для первичного обнаружения объектов, широкополосный для детального измерения расстояний и сверхширокополосный для классификации целей.

Данные особенности метода снижают его ценность на практике и в современных системах распознавания не применяются.

Метод распознавания по многочастотным сигналам, проблемы его реализации

Применение данного метода сталкивается с несколькими проблемами, что существенно снижает его практическую эффективность, и в современных, а также в будущих системах он не находит применения. В то же время, существует другой метод распознавания, использующий многочастотные сигналы, который демонстрирует отличные результаты. Он требует незначительно больше времени для обработки, но при этом использует десятки частот, распределенных между соседними значениями в диапазоне от 4 до 8 МГц[4].

Метод распознавания с использованием сигнала может быть исследован в различных диапазонах волн - от метровых до сантиметровых. Самыми важными параметрами для распознавания являются среднее значение модуля поляризационного коэффициента, размеры объекта вдоль, и среднее значение электронного парамагнитного резонанса. Комбинация этих параметров и многочастотное колебание способны обеспечить качественные характеристики при распознавании.

Суть метода состоит в следующем: объект облучается разнообразными сигналами, которые охватывают широкий диапазон частот, он ведет себя подобно электрическому фильтру с заданными параметрами. Резонансные частоты этого фильтра определяются формой объекта и его геометрическими размерами. Эти резонансные частоты проявляются в ответе фильтра, то есть в отраженном сигнале от объекта. Следовательно, радиолокационные сигналы должны иметь несущие частоты, которые соответствуют резонансной области объекта. Чаще всего используются сигналы, имеющие пачечную структуру с частотными компонентами, представленными в виде колебаний одинаковой продолжительности с постоянной частотой заполнения, которая изменяется от импульса к импульсу линейно.

Метод распознавания по узкополосным сигналам, проблемы его реализации

Среди методов, наиболее подходящих для практического применения, выделяются те, которые основаны на узкополосных сигналах для распознавания воздушных объектов (ВО). Одним из таких подходов является использование радиолокационных сигналов для определения объектов по их интенсивности, что подразумевает анализ средней эффективной площади рассеивания (ЭПР). Эта площадь зависит от свойств самого объекта, включая диэлектрическую ϵ и магнитную μ проницаемости материала, из которого он изготовлен. На ЭПР также влияют угол облучения, форма и относительные размеры конструктивных элементов ВО по сравнению с длиной волны, а также поляризация антенн радиолокационной системы как передающей, так и приемной.

Для уменьшения заметности воздушных нарушителей на радарх стремятся уменьшить площадь рассеяния различных деталей и узлов. Эффективная площадь

рассеяния самолетов и ракет в одинаковых зонах обнаружения имеет разницу до 25 дБ, в то время как у самолетов стратегической и тактической авиации – до 10 дБ. Изменения в аэродинамической форме и размерах ВО, а также устранение внешних подвесок способствуют этому[5].

Во вторых, рассматриваются возможности по использованию специальных покрытий острых кромок элементов ВО, либо применения специальных мероприятий. Поэтому, предпочтение будет отдано переизлучающим покрытиям, настроенным на определенные участки сантиметрового диапазона волн. Зафиксированные эффекты сильно проявляются в сантиметровом диапазоне, но практически не ощутимы в метровом. Проблемы реализации метода распознавания по корреляционному признаку.

Метод распознавания по корреляционному признаку, проблемы его реализации

В процессе разработки метода распознавания на основе корреляционных признаков были учтены различия в коэффициентах корреляции амплитуд сигналов, полученных при многочастотном зондировании. Эксперименты, проведенные на разных частотах рабочего диапазона радиолокационной системы, продемонстрировали четкую зависимость эквивалентной площади рассеяния (ЭПР) от частоты корреляции. Это открытие может быть использовано в многочастотных системах для снижения негативного влияния флуктуаций, а также в комплексах с активным распознаванием, основанном на измерении корреляционных характеристик[6]. При применении многочастотного зондирующего сигнала были зафиксированы различия в коэффициентах взаимной корреляции амплитуд сигналов, отраженных от различных объектов.

Исследования показали, что коэффициент корреляции сигналов при различных частотах несущих сигналов может быть до 0,5 МГц для больших воздушных судов и не менее 0,8 МГц для малых воздушных объектов, таких как небольшие летательные аппараты или беспилотники. При достаточно продолжительном наблюдении этот корреляционный признак может быть использован для идентификации различных классов воздушных судов, таких как пассажирские самолеты (если $r < 0,3$) и маломасштабные самолеты (если $0,5 < r < 0,75$).

Эксперименты исследователей показали, что для достижения вероятности правильного распознавания объектов различных типов требуется разное количество обращений. Например, для классификации пассажирского самолета необходимо провести 5-6 независимых обзоров с вероятностью распознавания не менее 0,6-0,8. В то же время, для определения малоразмерного самолета такого же качества достаточно 3-5 обращений. Однако, если требуется вероятность распознавания не менее 0,8, потребуется более 14 обращений к объекту. Таким образом, корреляционный признак r позволяет эффективно распознавать класс объектов, в данном случае - пассажирские и малоразмерные самолеты.

Метод распознавания по поляризационным признакам, проблемы его реализации

Метод распознавания малых воздушных объектов на основе поляризационных различий отраженных сигналов основывается на анализе поляризационных характеристик принимаемых сигналов. При облучении объекта с сложной структурой линейно поляризованным сигналом принимаются два отраженных сигнала[7]. Первый из них имеет поляризацию, совпадающую с поляризацией зондирующего сигнала (коллинеарная поляризация), в то время как поляризация второго сигнала перпендикулярна поляризации зондирующего (кросс-модуляция или перекрестная поляризация).

Экспериментальные исследования, проведенные в различных диапазонах частот комплекса, показали явную зависимость эквивалентной площади рассеяния (ЭПР) от частоты. Для получения информации о классах объектов необходимо, чтобы локационный комплекс имел возможность одновременно излучать и принимать сигналы с двумя различными поляризациями, например, горизонтальной и вертикальной. Для успешной реализации метода распознавания требуется высокая степень совпадения комплексных

коэффициентов передачи трактов излучения и приема зондирующих сигналов, а также трактов когерентной обработки отраженных сигналов. Качество и точность оценки элементов поляризационной матрицы зависят от количества обращений к объекту.

Таким образом, при использовании данного метода для достижения удовлетворительных результатов необходимо обеспечить высокое совпадение комплексных коэффициентов передачи для трактов излучения и приема сигналов, а также для их когерентной обработки. Качество и точность оценки элементов поляризационной матрицы напрямую зависят от числа обращений к объекту.

Метод распознавания по модуляционным эффектам, проблемы его реализации

Данный метод обладает значительными трудностями при аппаратной реализации. Исследования, касающиеся изменения частоты сигналов, отражаемых воздушными объектами, демонстрируют наличие доплеровских спектральных компонент, связанных как с вращающимися элементами самолета, так и с радиальной скоростью V_r его движения[8]. Хотя метод распознавания является относительно простым в реализации, он сопряжен с серьезными техническими трудностями.

Метод, основанный на модуляционных эффектах турбин и учитывающий случайные перемещения объектов, включая курсовое движение и изменения углов крена и тангажа, фокусируется на расширении спектрального диапазона. На расстояниях до 700-800 метров можно наблюдать "турбинную" модуляцию. Этот подход оказывается весьма эффективным для распознавания строев, отдельных типов воздушных объектов и определения моментов запуска ракет с носителей.

Для применения данного метода в радиотехнических исследованиях требуется значительное время контакта с воздушным объектом (около 50-100 мс при частоте $F_{п}$ более 5 кГц). Однако в бортовых системах и комплексах, а также в системах наведения и сопровождения целей различных направлений, данный метод находит своё применение.

Из разнообразия всех рассмотренных методов наиболее простым, с точки зрения получения и обработки сигнала, является метод распознавания по траекторным признакам, при использовании которых дальность распознавания практически совпадает с дальностью обнаружения. Однако при нахождении воздушного объекта в пространственной среде скорость-высота, где также могут находиться воздушные объекты других классов, их распознавание вызывает определенные сложности. Для распознавания классов таких воздушных объектов необходима дополнительная информация о них, прежде всего физические размеры.

Делая вывод можно сказать, что по результатам исследований средств распознавания имеется положительная динамика в построении эффективной аппаратуры и алгоритмов распознавания. Однако требуется решить ряд важных задач, одной из которых является проблема обеспечения эффективного распознавания в условиях воздействия помех. Также необходимо уделять внимание пропускной способности при правильном распознавании воздушного объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. **Небабин, В. Г.** Методы и техника радиолокационного распознавания / В. Г. Небабин, В. В. Сергеев. – М.: Радио и связь, 1984. – 152 с.
2. **Бердышев В. П.** Радиолокационные системы / В.П. Бердышев, Е.Н. Гарин, А.Н. Фомин. - Красноярск: Сибирский Федеральный Университет, 2011. - 400 с. - ISBN 978-5-7638-2479-7.

3. **Семенец В.О., Трухин М.П.** Способы противодействия беспилотным летательным аппаратам // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 3. С. 4–12.
4. **Ваградян В. Г. и др.** Обнаружение и распознавание искусственных и естественных летающих объектов //Тринадцатая годовая научная конференция. – 2019. – С. 34.
5. **Бархатов, А. В.** Пассивная когерентная радиолокация / А. В. Бархатов, В. И. Веремьев, Е. Н. Воробьев, А. А. Коновалов и др. – СПб.: Издво СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. – 163 с.
6. **Воробьев, Е.Н.** Исследование сигнальных признаков распознавания малых БПЛА в полуактивной РЛС / Е.Н. Воробьев // Вестник Новгородского государственного университета. Сер.: Технические науки. – 2019. – № 4. – С.72–77.
7. **Петров И. И. и др.** Алгоритм распознавания малоразмерных воздушных объектов на основе анализа радиолокационных спектральных портретов //Т-Comm-Телекоммуникации и Транспорт. – 2022. – Т. 16. – №. 3. – С. 4-10.
8. **Коновалов А. А.** Основы траекторной обработки радиолокационной информации. Часть 1 // СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2013. 164 с.

Коломеец Роман Валерьевич. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Аспирант, соискатель ученой степени. Область научных интересов - Автоматизация и управление технологическими процессами и производством. E-mail: kr74v@yandex.ru. Телефон: +7 915 984 8481