

УДК 621.396.96

На правах рукописи



Громов Вячеслав Александрович

**ОБНАРУЖЕНИЕ И СЕЛЕКЦИЯ ВЕКТОРНЫХ СИГНАЛОВ
НАЗЕМНЫХ РЛС X-ДИАПАЗОНА В КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ
ПАССИВНОГО РАДИОМОНИТОРИНГА**

Специальность 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Томск – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Шарыгин Герман Сергеевич

Официальные оппоненты: **Алешечкин Андрей Михайлович**, доктор технических наук, доцент (Сибирский федеральный университет, заведующий кафедрой радиоэлектронных систем)

Шипилов Сергей Эдуардович, кандидат физико-математических наук, доцент (Национальный исследовательский Томский государственный университет, кафедра радиофизики)

Ведущая организация: **Центральное конструкторское бюро автоматики,**
г. Омск


Защита состоится 29 декабря 2014 года в 10:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.268.04 на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники по адресу: г. Томск, пр-т Ленина, 40, ТУСУР, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на сайте ТУСУР (<http://www.tusur.ru/export/sites/ru.tusur.new/ru/science/education/diss/2014/32-1.pdf>).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные составителем и заверенные гербовой печатью организации, просим высылать по адресу: 634050, г. Томск, пр-т Ленина, 40, ТУСУР, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.268.04 Акулиничеву Ю.П.

Автореферат разослан «___» _____ 2014 года.

Учёный секретарь диссертационного совета Д 212.268.04,

доктор технических наук, профессор  Ю.П. Акулиничев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В современном мире необходимость контроля излучений радиосредств различного назначения связана с их широким распространением. Контроль проводится с целью выявления несанкционированных источников излучения, проверки соблюдения технических ограничений на параметры излучающей аппаратуры, поиска и местоопределения излучателей в случаях аварийных ситуаций, для обеспечения безопасности движения воздушных судов и т.п. Отдельной и важной областью применения систем мониторинга радиоизлучений являются радиоразведка и радиопротиводействие в случаях военных конфликтов или для борьбы с терроризмом.

Использование космических аппаратов для мониторинга радиочастотной обстановки земной поверхности имеет ряд преимуществ перед другими способами мониторинга. Главными из этих преимуществ являются высокая оперативность, глобальный характер обзора и отсутствие недоступных для мониторинга участков. В последнее время активно разрабатываются и применяются активные радиолокационные средства наблюдения земной поверхности, размещаемые на космических аппаратах. Радиолокаторы космического базирования используют такие прогрессивные методы, как синтезирование апертуры антенн, интерференционный прием или поляризационные способы селекции наземных объектов. Современное состояние техники радиолокационного наблюдения позволяет получать трехмерные изображения земной поверхности с разрешающей способностью до единиц метров. Однако, активное однопозиционное или многопозиционное радиолокационное наблюдение не позволяет решать специфические, но важные задачи обнаружения и определения координат различных источников радиоизлучения, находящихся на земной поверхности или в околоземном пространстве, которые могут быть замаскированы или по другим причинам недоступны для радиолокационного наблюдения. Поэтому актуальной является задача разработки пассивных методов обнаружения, определения координат и параметров движения различных источников излучений в широком радиодиапазоне, начиная от радиолокационных станций различного базирования и заканчивая мобильными телефонами.

Среди широкого круга проблем, возникающих при разработке и создании пассивных систем радиомониторинга космического базирования, ключевой является проблема обнаружения и селекции источников радиоизлучения (ИРИ). Обеспечение национальной безопасности страны во многом непосредственно связано с наличием эффективных пассивных космических радиоэлектронных систем, именно поэтому улучшение их тактико-технических характеристик является актуальной проблемой. Космические пассивные системы радиомониторинга, использующие группировку малых космических аппаратов на низких круговых орбитах, должны иметь возможность приема сигнала различной поляризации. В этих условиях особое значение приобретает решение задачи использования информации о состоянии поляризации принимаемых электромагнитных волн для обнаружения и селекции радиосигналов.

Теоретической базой для решения задач синтеза алгоритмов обработки векторных сигналов является современная статистическая теория поляризации радиолокационных сигналов, развитая в трудах отечественных ученых Потехина В.А., Мелитицкого В.А., Сарычева В.А., Козлова А.И., Татаринова В.Н. Сведения в открытой литературе о практически применяемых системах обработки векторных сигналов относятся к активной радиолокации, где используются способы зондирования с последовательным (попеременным) излучением и одновременным двухканальным приемом сигналов ортогональных поляризаций (космические радиолокационные системы SIR-C/X-SAR, LightSAR, ENVISAT, PALSAR, RADARSAT, TERRASAR-X и др.) В последние годы исследованы возможности одновременного измерения поляризационного состояния электромагнитных волн в активной радиолокации с использованием сложных сигналов (В.А. Хлусов). Пассивные системы наведения, применяемые в ракетной технике, используют приемные антенны с круговой поляризацией, что в большинстве случаев приводит к дополнительным энергетическим потерям. Открытые сведения о разработках пассивных РЛС космического базирования, как в России, так и за рубежом, отсутствуют. Наиболее перспективными считаются разностно-временные (гиперболические) способы определения координат и их модификации, при этом резко снижаются требования к направленности приемных антенн. Также появляется возможность полностью или частично отказаться от поиска по направлению на ИРИ. Однако, при этом возникают существенные трудности обеспечения нужного энергетического потенциала системы, что приводит к необходимости использовать всю энергию векторных сигналов путем согласования (адаптации) приемного устройства по поляризации. Системы согласования могут выполнять также функции поляризационной селекции (распознавания) излучающих объектов.

Цель диссертационной работы – разработать и исследовать способ обнаружения и селекции векторных сигналов с использованием их поляризационных свойств в космических системах пассивного радиомониторинга наземных ИРИ с учетом особенностей, возникающих в типичном случае приема бокового излучения направленных антенн.

Основные задачи исследования:

- анализ условий функционирования пассивных космических радиоэлектронных систем с учетом влияния трассы распространения сигналов источников излучения;
- описание и исследование поляризационных свойств сигналов наземной РЛС при их приеме на космических аппаратах;
- анализ экспериментальных данных и исследование поляризационных свойств сигналов наземной РЛС X-диапазона с учетом влияния местности и местных предметов при приеме основного и бокового излучения направленных антенн;
- описание и обоснование модели наблюдаемых сигналов;
- выбор поляризационного параметра для использования в системе обнаружения и селекции радиосигналов;

- разработка способов и алгоритмов обнаружения и селекции векторных сигналов на основе анализа их поляризационных свойств;
- определение характеристик обнаружения и различения сигналов.

Научная новизна работы состоит в том, что:

1. С использованием методов математического моделирования выполнен анализ поляризационных свойств сигналов наземной РЛС X-диапазона с параболической зеркальной антенной, регистрируемых на борту космического аппарата.

2. Выполнен анализ экспериментальных данных о поляризационных свойствах сигналов наземной РЛС кругового обзора X-диапазона при приеме основного и бокового излучения передающей антенны.

3. Разработан и исследован способ интервального обнаружения и селекции векторного сигнала по поляризационного инварианту – углу эллиптичности – с использованием критерия Неймана-Пирсона.

Практическая значимость диссертационной работы обусловлена необходимостью решения задач синтеза алгоритмов обнаружения и селекции сигналов с использованием их поляризационных свойств для пассивных космических систем радиомониторинга и последующего сравнительного анализа характеристик точности систем. Проведенные исследования составляют содержание этапа системотехнического проектирования пассивных космических радиоэлектронных систем, представляют научный интерес и являются основой для совершенствования устройств и программ обработки сигналов в таких системах.

Предложенный способ позволяет одновременно решать задачи обнаружения и поляризационной селекции радиолокационных сигналов, что является важным его преимуществом перед традиционными пороговыми методами обнаружения.

Методы исследования. Поставленные задачи решены с использованием теории вероятности, статистических методов оптимальной фильтрации, аппарата математической статистики и имитационного моделирования.

Теоретической основой для решения задач синтеза способа обнаружения и селекции векторных сигналов в пассивных космических системах радиомониторинга является статистическая теория поляризации радиолокационных сигналов и статистическая теория обнаружения и оценки параметров радиолокационных сигналов.

Параметрический синтез производится путем оптимизации интервалов обнаружения сигналов по поляризационному инварианту для достижения наилучших показателей по характеристикам обнаружения и различения сигналов.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Установлено, что при регистрации на борту космического аппарата сигнала наземной РЛС X-диапазона, имеющей параболическую зеркальную антенну, ориентированную вдоль поверхности земли и излучающую линейно-поляризованную в основном направлении волну, поляризационный параметр сигнала – угол эллиптичности – имеет случайные отклонения от нулевого

значения, с вероятностью 0,98 не превышающие ± 5 градусов в секторе углов места 0–10 градусов и 0,87 в секторе углов места 0–20 градусов от вертикали.

2. Предложенный способ обнаружения радиолокационных сигналов, при котором принятие решения о наличии сигнала производится в случае попадания угла эллиптичности в интервал, определенный с использованием критерия Неймана-Пирсона, позволяет производить обнаружение и селекцию излучений РЛС по неэнергетическому параметру

3. Установленная на основании анализа экспериментальных данных устойчивость угла эллиптичности принимаемого сигнала в пределах длительности импульса позволяет усовершенствовать метод интервального обнаружения в широкополосной пассивной системе путем анализа нескольких значений угла эллиптичности за время импульса и таким образом снизить требования к необходимому отношению сигнал/шум (на 10–15 дБ при вероятности ложной тревоги, равной 0,01, и вероятности правильного обнаружения 0,9 в полосе пропускания приемника $\Delta f_{\text{пр}} \approx 3/\tau_{\text{и}}$).

Обоснованность научных положений и достоверность полученных результатов подтверждается их публикацией в рецензируемых научных журналах и полученным патентом на изобретение. Результаты исследования согласуются с результатами теоретических исследований, имитационного моделирования и имеющимися экспериментальными данными, полученными на наземных трассах.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной микроволновой конференции «European Radar Conference» (Манчестер, 2011 г.); Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 2011 г.); Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР – 2010» (Томск, 2010 г.); Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск, 2010 г.).

Внедрение результатов работы. Проведённый анализ поляризационных свойств сигналов РЛС использовался при выполнении проектов по ведомственной программе «Развитие научного потенциала высшей школы на 2009–2013 годы». Результаты синтеза и исследования алгоритма обнаружения, селекции радиосигнала использовались при выполнении проекта федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы: проведение научных исследований по созданию перспективных пассивных космических систем мониторинга наземных источников радиоизлучения». Результаты исследований и разработанные алгоритмы использованы при выполнении двух проектов по грантам Российского фонда фундаментальных исследований в 2012–2013 гг.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 20 работ, из них 1 патент на изобретение, 2 свидетельства программ для ЭВМ, 5 статей в рецензируемых журналах, 3 – в сборниках докладов международных конференций, 1 – в сборнике докладов всероссийских конференций, 7 – в научно-технических отчетах и в 1 научном издании. В том числе 3 публикации

содержатся в изданиях, индексированных в базе данных Scopus, 3 – в базе данных Web of Science, 12 – в базе данных РИНЦ.

Личный вклад. Непосредственно автором выполнены:

- анализ поляризационных свойств сигналов наземной РЛС, регистрируемых на борту космического аппарата;

- обработка и анализ экспериментальных данных о поляризационных свойствах сигналов РЛС на наземных трассах;

- разработан метод интервального обнаружения и различения векторного сигнала по поляризационного инварианту – углу эллиптичности с использованием критерия Неймана-Пирсона (в соавторстве с Г.С. Шарыгиным – 50%);

- предложена структура алгоритма, реализующая метод интервального обнаружения и различения векторного сигнала по поляризационному инварианту - углу эллиптичности с использованием критерия Неймана-Пирсона;

- исследованы характеристики обнаружения и селекции сигналов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав основного текста, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 139 страниц, содержит 72 рисунка, 7 таблиц. Список литературы включает 54 источника.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи работы, приведены сведения о научной новизне, практической значимости и определены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Поляризационные свойства сигналов РЛС при их приеме на космическом аппарате» рассмотрены поляризационные характеристики радиосигнала наземной РЛС X-диапазона при его приеме на космическом аппарате (КА). Приведена структура пассивной многопозиционной космической системы мониторинга наземных источников радиоизлучения. Выполнен анализ факторов, влияющих на поляризационную структуру принимаемого радиосигнала. Анализ показал, что на поляризационную структуру радиосигнала наземного источника излучения оказывают влияние следующие факторы: антенная система источника радиоизлучения, местные предметы и подстилающая поверхность, атмосфера Земли.

Для описания состояния поляризации полностью поляризованного сигнала использован неэнергетический параметр – угол эллиптичности, определяемый выражением

$$\varepsilon = 0,5 \cdot \arcsin\left(2 \cdot E_x \cdot E_y \cdot \sin(\delta) / (E_x^2 + E_y^2)\right), \quad (1)$$

где E_x, E_y и $\delta = \varphi_y - \varphi_x$ – соответственно амплитуды и разность фаз ортогонально поляризованных составляющих в линейном (декартовом) поляризационном базисе.

Путем численного моделирования исследованы поляризационные характеристики антенной системы при приеме бокового излучения. Для исследования была выбрана параболическая зеркальная антенна с облучателем в виде круглого волновода, содержащего штыревой вибратор для возбуждения электромагнитной волны линейной поляризации. Исследование поляризационной диаграммы антенны показало, что номинальная линейная поляризация антенны сохраняется в главном лепестке диаграммы направленности (ДН), угол эллиптичности равен 0 градусов. В области боковых и задних лепестков ДН состояние поляризации отличается от линейной. В области боковых лепестков на уровне не ниже -3дБ от максимума бокового лепестка угол эллиптичности находится в интервале ± 5 градусов. Изменение угла эллиптичности носит периодический характер, зависящий от угла места и азимута. Сравнение ДН и поляризационной диаграммы показывает, что для заданных сечений угла места или азимута максимальные отклонения угла эллиптичности от номинального (равного 0 градусов) находятся в области минимумов ДН антенны. Если допустить, что чувствительность приемной аппаратуры космической системы не сможет обеспечить необходимого отношения сигнал/шум принимаемого сигнала для данных секторов ДН передающей антенны, то их можно не учитывать при анализе.

Рассмотрение влияния атмосферы Земли в частотном диапазоне 8–12 ГГц показало, что эффекты Фарадея и Коттона-Мутона для данного диапазона частот вносят искажения в величину угла эллиптичности радиосигнала не более чем на ± 1 градус. Ряд других эффектов оказывает еще меньшее влияние на состояние поляризации.

Исследования влияния местных предметов и подстилающей поверхности показали, что учет данных факторов в общем виде затруднен. Сложности связаны с тем, что заранее не известны форма и свойства предмета, от которого отразилась радиоволна, и, соответственно, как повлияет этот фактор на ее поляризационную структуру. Анализ результатов численного моделирования рассеяния плоской электромагнитной волны на предмете сложной формы показал, что в интервале углов места 0–20 градусов от вертикали угол эллиптичности рассеянной волны с вероятностью 0,95 не превышает ± 5 градусов. Это косвенно подтверждает, что волна источника радиоизлучения при переотражении местными предметами сохраняет свою номинальную поляризацию в точке приема.

Исследования поляризационного состояния сигнала, приведенные в первой главе, показали, что для большинства случаев при приеме бокового излучения направленных антенн, значения угла эллиптичности сохраняют свое номинальное значение. Это позволяет использовать данный параметр радиолокационного сигнала в качестве параметра обнаружения.

Во **второй** главе «Оценка мгновенных значений угла эллиптичности сигналов РЛС по экспериментальным данным» выполнен анализ мгновенных значений угла эллиптичности сигналов РЛС кругового обзора для закрытой наземной трассы в X-диапазоне. Используются первичные экспериментальные данные, полученные ранее в НИИ РТС ТУСУР.

На рисунке 1 приведен график зависимости мгновенных значений угла эллиптичности, вычисленных по отсчетам сигналов, изображенных на рисунке 2. Экспериментальное оборудование позволяло получить информацию о внутренней структуре прямоугольного импульса (на 1 импульс сигнала приходится 30 отсчетов). На рисунке 1 положение импульса ограничено вертикальными пунктирными линиями.

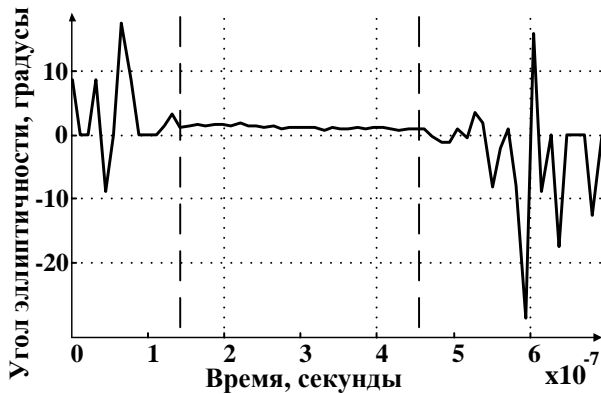


Рисунок 1 – Зависимость углов эллиптичности за время регистрации

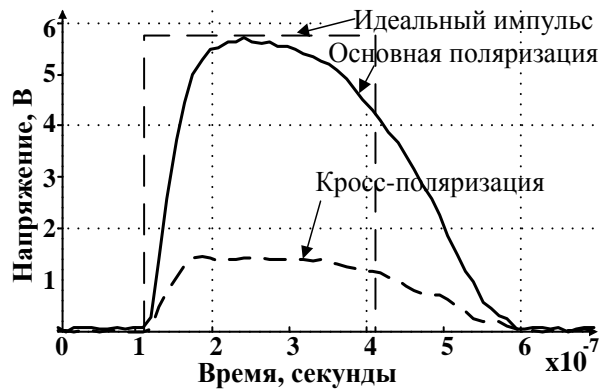


Рисунок 2 – Огибающие регистрируемых сигналов

Экспериментальные данные получены для закрытой трассы. Известно, что при рассеянии вперед (бистатический угол – 180 градусов) волна сохраняет свою номинальную поляризацию. Антенна излучает линейно-поляризованную волну, поэтому значения углов эллиптичности в пределах импульса должны быть равны 0 градусов. Изображенные на рисунке 1 значения находятся в интервале от 1 до 1,5 градусов. Данное отклонение может быть отнесено к погрешности измерений.

На рисунке 3 изображен набор огибающих сигналов длительностью 5,6 мкс основной поляризации за 1 оборот антенны. На графиках показана зависимость уровня сигнала в дБ/мВ от углового положения антенны РЛС. Кроме прямого сигнала (нулевой угол отворота) можно видеть переотраженные (задержанные по времени) импульсы.

По зарегистрированным сигналам РЛС построена измеренная ДН антенны для основной и кроссовой поляризации и сделаны оценки значений угла эллиптичности. На рисунке 5 приведены графики измеренной ДН антенны на основной и кроссовой поляризации (ось значений ординат слева) в секторе углов ± 10 градусов. ДН построены по максимальным значениям напряжения в пределах длительности импульса.

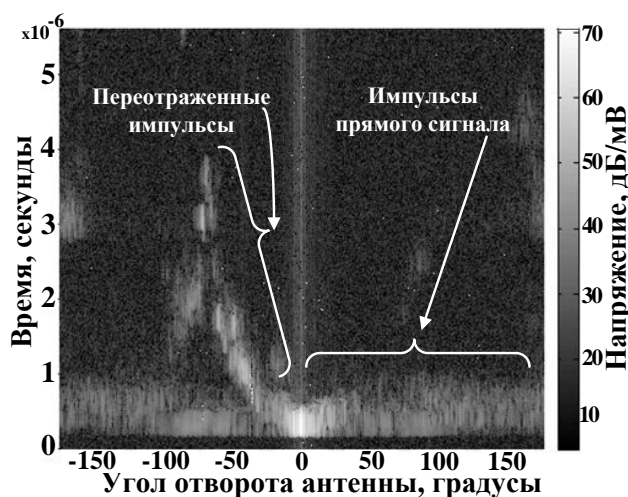


Рисунок 3 – Огибающие сигналов за 1 оборот антенны РЛС

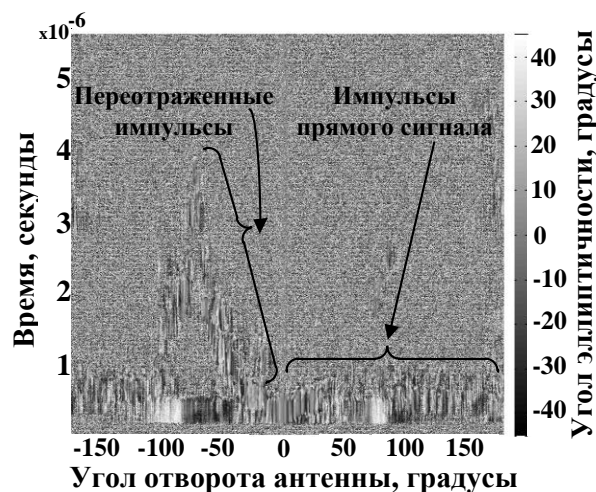


Рисунок 4 – Зависимость углов эллиптичности за 1 оборот антенны

На рисунке 5 приведен также график измеренных углов эллиптичности для соответствующих значений ДН (ось значений ординат справа). На графике углов эллиптичности показано, что при отвороте антенны передатчика от нулевого положения угол эллиптичности отличен от 0 градусов и медленно изменяет свои значения в пределах области определения. Отличие углов эллиптичности от 0 связано с тем, что при отвороте антенны бистатический угол отличен от 180 градусов. Таким образом, происходит фазовый набег, что приводит к изменению измеренного состояния поляризации радиоволны в точке приема. Отклонение углов эллиптичности для главного лепестка ДН объясняется также тем, что при отвороте антенны в точке приема регистрируют сигнал, который состоит из суммы прямого и переотраженного импульсов.



Рисунок 5 – ДН антенны и угол эллиптичности

На рисунке 4 приведен график мгновенных углов эллиптичности сигналов РЛС, зарегистрированных за один оборот антенны (длительность одной реализации 5,6 мкс). Показано изменение значений угла эллиптичности в зависимости от углового положения антенны и от времени наблюдения. Значения угла эллиптичности импульсного сигнала изменяются в зависимости от отворота антенны (рисунок 5). Значения угла эллиптичности в пределах импульса сигнала не изменяются или изменяются в пределах нескольких градусов.

Чтобы получить наглядное представление о значениях угла эллиптичности для различных углов отворота антенны, путем анализа совокупности измеренных диаграмм построены оценки плотностей распределения вероятностей (ПРВ). На рисунке 6 приведены следующие ПРВ углов эллиптичности:

1. Главный лепесток ДН. Значения угла эллиптичности выбраны при отвороте антенны в пределах главного лепестка, где сектор углов и время наблюдения определялись по уровню сигнала 0,9 от максимального значения для основной поляризации. Уровень 0,9 выбран для того, чтобы исключить (уменьшить) влияние переходных процессов измерительной аппаратуры.

2. 1-й боковой лепесток ДН. Значения выбраны в области 1-го бокового лепестка.

3. 2-й боковой лепесток ДН. Значения выбраны в области 2-го бокового лепестка.

4. За 1 оборот антенны. Значения выбраны за 1 оборот антенны передатчика в пределах длительности импульса сигнала.

5. Шумовые значения. Значения выбраны до начала импульса, когда нет полезного сигнала.

На рисунке 7 приведена ПРВ углов эллиптичности переотраженных импульсов сигнала. Переотраженные импульсы – импульсы, которые задержаны по времени прихода на интервал времени, больший длительности первого импульса. Для построения ПРВ использованы значения углов эллиптичности импульсов, уровень которых в 3–5 раз выше уровня шума. Основная область переотраженных импульсов (рисунок 4) расположена в секторе углов отворота антенны от -40 до -100 градусов и времени наблюдения от 1 до 4 мкс. Углы эллиптичности переотраженных импульсов распределены в интервале от -45 до 45 градусов.

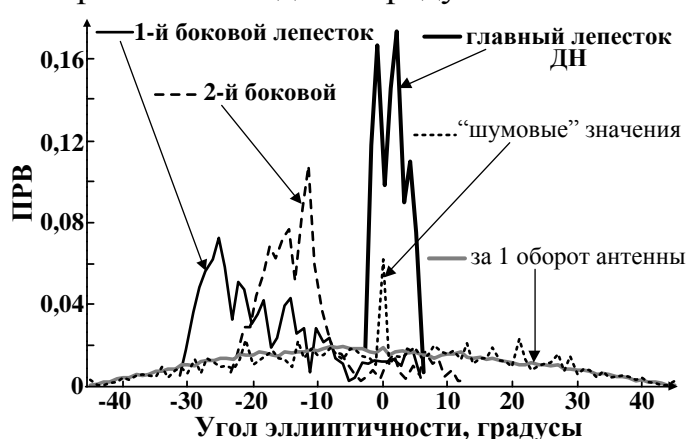


Рисунок 6 – ПРВ углов эллиптичности

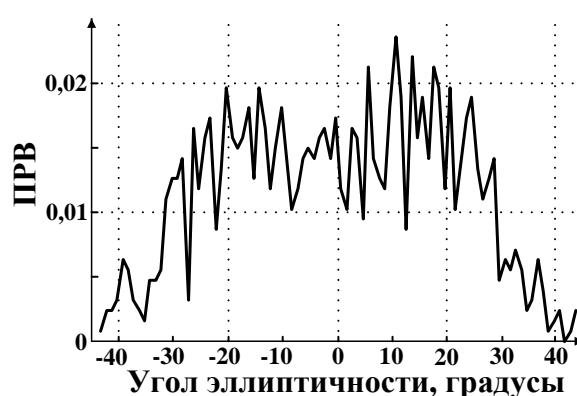


Рисунок 7 – ПРВ углов эллиптичности переотраженных импульсов

Результаты исследования поляризационного параметра сигнала РЛС – угла эллиптичности – показали следующее:

1. В пределах длительности импульса сигнала углы эллиптичности имеют постоянное значение.

2. При приеме основного излучения антенны значения угла эллиптичности импульсов сигнала в главном лепестке ДН равны 0, что соответствует линейной поляризации излучения (номинальной поляризации антенны).

3. Значения угла эллиптичности импульсов сигнала в главном лепестке ДН заключены в интервале от -3 до 6 градусов, что позволяет отнести их к линейной поляризации.

4. Значения угла эллиптичности импульсов сигнала для всех азимутов ДН заключены в пределах от -45 до 45 градусов. Плотность распределения вероятностей имеет вид параболы, ветви которой направлены вниз, с максимальными значениями в области углов эллиптичности 0 градусов и минимальными значениями в области углов ± 45 градусов.

5. Значения углов эллиптичности переотраженных импульсов сигнала также заключены в пределах области ± 45 градусов. Плотность распределения вероятностей имеет максимумы значений в области углов эллиптичности 11 и -18 градусов и минимумы в области углов ± 45 градусов.

Таким образом, обнаружение радиоимпульсного сигнала наземной РЛС с заданными поляризационными свойствами в главном лепестке может быть основано на устойчивости значений углов эллиптичности в пределах длительности импульса сигнала. Также возможно проводить обнаружение по N значениям угла эллиптичности сигнала, которые имеют одинаковые значения или заключены в определенном интервале.

В **третьей главе** «Обнаружение и различение векторных сигналов» описан способ обнаружения и селекции радиолокационных сигналов по поляризационному признаку – углу эллиптичности векторного сигнала. Угол эллиптичности векторного сигнала использован для интервального обнаружения и селекции сигналов в пассивных системах радиомониторинга, при этом границы интервала обнаружения при применении критерия Неймана-Пирсона определяются с учетом вероятности ложной тревоги, а вероятность правильного обнаружения зависит от отношения сигнал/шум и рассчитывается для различных углов эллиптичности полезного векторного сигнала.

Выбор параметра для обнаружения и различения сигналов. Угол эллиптичности, не зависящий от поворота осей координат, является наиболее подходящим неэнергетическим параметром для использования в качестве обнаруживаемого признака радиолокационного сигнала. Результаты исследований поляризационных свойств радиосигналов наземной РЛС позволяют сделать вывод о том, что угол эллиптичности может быть использован для обнаружения радиосигналов с заданными поляризационными свойствами.

Принцип обнаружения и различения сигналов по углу эллиптичности заключается в следующем. Пусть угол эллиптичности полезного радиолокационного сигнала ε_0 априорно известен, тогда обнаружение такого сигнала по измеренному значению угла эллиптичности ε производится следующим образом. В окрестности ожидаемой величины ε_0 по некоторому правилу определяется интервал обнаружения. Интервал обнаружения – это

интервал значений угла эллиптичности $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{П} - \varepsilon_{Л}$. Здесь $\varepsilon_{Л}$ и $\varepsilon_{П}$ левая и правая граница интервала обнаружения соответственно. Если измеренный угол эллиптичности ε находится в пределах этого интервала, то принимается решение о наличии полезного сигнала, в противном случае принимается решение о его отсутствии. При использовании критерия Неймана-Пирсона интервал $\Delta\varepsilon$ выбирается таким, чтобы вероятность нахождения в нем значения ε «чистого шума» (когда на входе устройства нет полезного сигнала) была равна заданной вероятности ложной тревоги $P_{ЛТ}$.

Используя численное моделирование, построена ПРВ расчетных мгновенных значений угла эллиптичности шума $W_{ш}(\varepsilon)$.

На рисунке 8 приведен график ПРВ мгновенных значений угла эллиптичности шума $W_{ш}(\varepsilon)$. Полученная функция $W_{ш}(\varepsilon)$ аппроксимирована кривой $y(\varepsilon)$, которая может быть задана в аналитическом виде ($y(\varepsilon) = a + b \cdot \varepsilon + c \cdot \varepsilon^2$, где a, b, c – коэффициенты квадратного уравнения).

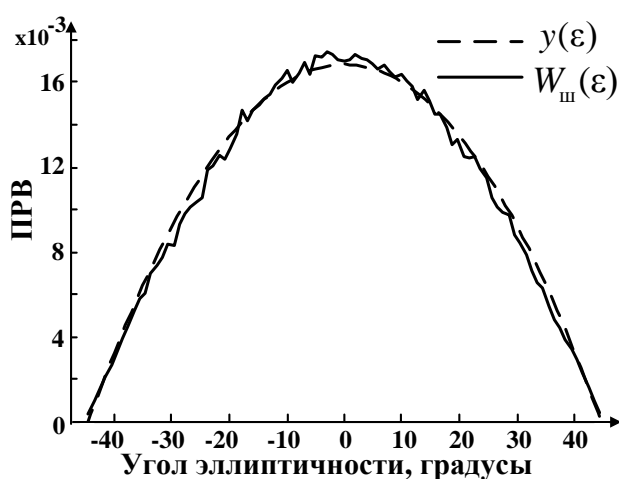


Рисунок 8 – ПРВ угла эллиптичности при отсутствии полезного сигнала

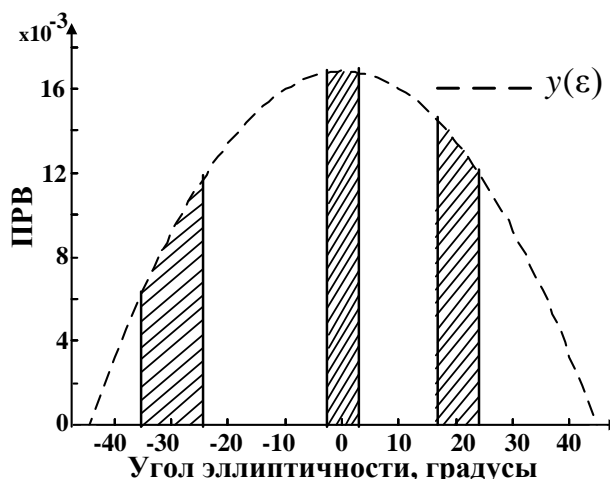


Рисунок 9 – Примеры возможных интервалов обнаружения для $P_{ЛТ} = 0,1$

На рисунке 9 показаны интервалы значений угла эллиптичности ε для обнаружения полезных сигналов с известными (заданными) углами эллиптичности ε_0 , равными 0, 20 и -30 градусов. Площадь участков, ограниченных интервалом обнаружения и кривой $y(\varepsilon)$, соответствует $P_{ЛТ} = 0,1$. Границы интервала выбраны симметричными относительно ε_0 .

В таблице 1 указаны симметричные границы интервалов обнаружения для некоторых заданных значений $P_{ЛТ}$ и углов эллиптичности полезного сигнала.

Таблица 1 – Интервалы обнаружения по углу эллиптичности

Вероятность ложной тревоги $P_{ЛТ}$	Границы интервала обнаружения в градусах при угле эллиптичности ε_0		
	0	20	45
0,01	[-0,3; 0,3]	[19,6; 20,4]	[-45; -40,4], [40,4; 45]
0,10	[-3; 3]	[16,3; 23,7]	[-45; -32,7], [32,7; 45]
0,30	[-9; 9]	[8,5; 31,5]	[-45; -26,7], [26,7; 45]

Правильное обнаружение сигнала происходит тогда, когда угол эллиптичности смеси полезного сигнала и шума ε попадает в заданный интервал обнаружения $\Delta\varepsilon$. На рисунке 10 приведены кривые ПРВ угла эллиптичности смеси полезного сигнала и шума $W_{c+ш}(\varepsilon)$ для трех значений вероятности ложной тревоги $P_{ЛТ}$, для разных отношений сигнал/шум q и угла эллиптичности $\varepsilon_0 = 0^\circ$. Величина q определяет отношение полной энергии полезного сигнала $E_{c+ш}$ в двух ортогонально поляризованных приемных каналах к средней мощности шума $E_{ш}$ в каждом канале. ПРВ на рисунке 10 получены с помощью моделирования.

Площадь участка, ограниченного интервалом обнаружения и кривой $W_{c+ш}(\varepsilon)$, соответствует вероятности правильного обнаружения $P_{ПО}$ при заданной $P_{ЛТ}$ для заданного угла эллиптичности.

На рисунке 11 показана зависимость $P_{ПО}$ сигнала для угла эллиптичности $\varepsilon_0 = 0^\circ$ для различных значений $P_{ЛТ}$ в зависимости от отношения сигнал/шум. Известно, что при применении обычного порогового метода для обнаружения сигнала со случайной начальной фазой и амплитудой $P_{ПО}$ при вероятности ложной тревоги $P_{ЛТ} = 0,01$ и отношении сигнал/шум 4, 8 и 14 дБ соответственно равна 0,6, 0,83 и 0,9.

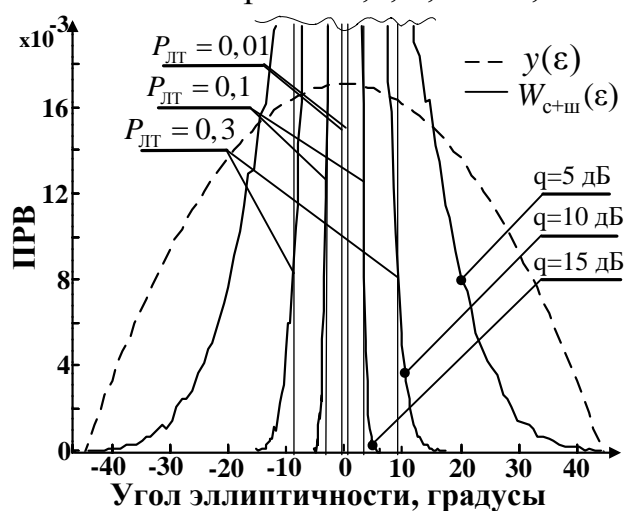


Рисунок 10 – Кривые ПРВ угла эллиптичности смеси полезного сигнала и шума

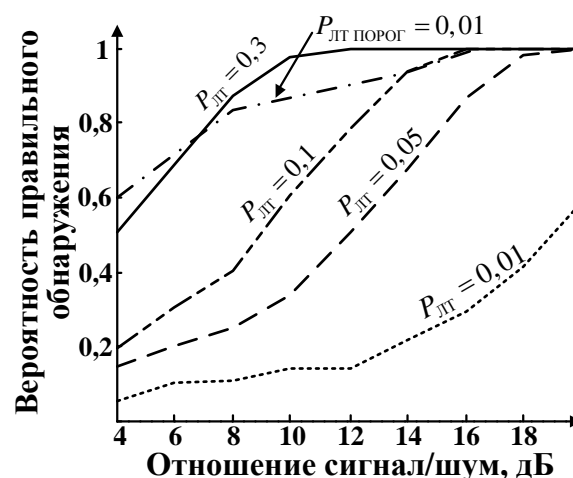


Рисунок 11 – Вероятность правильного обнаружения

Алгоритм обнаружения и различения сигналов. Алгоритм обнаружения и селекции радиолокационных сигналов по поляризационному параметру – углу эллиптичности выглядит следующим образом.

Для принятия решения о наличии или отсутствии селектируемого сигнала по поляризационному признаку задают $P_{ЛТ}$ и угол эллиптичности обнаруживаемого сигнала ε_0 . По заданным значениям $P_{ЛТ}$, ε_0 и плотности вероятности угла эллиптичности «шума» вычисляют интервал обнаружения $\Delta\varepsilon = [\varepsilon_{Л}, \varepsilon_{П}]$, используя соотношение:

$$P_{\text{ЛТ}} = \int_{\varepsilon_{\text{Л}}}^{\varepsilon_{\text{П}}} W_{\text{ш}}(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (2)$$

где $W_{\text{ш}}(\varepsilon)$ – ПРВ угла эллиптичности «шума» (аппроксимирована кривой, заданной в аналитическом виде $y(\varepsilon)$), $\varepsilon_{\text{Л}}$ и $\varepsilon_{\text{П}}$ – левая и правая граница интервала обнаружения.

Вычисленный по формуле (1) угол эллиптичности ε принятого сигнала сравнивается с границами интервала обнаружения $\Delta\varepsilon$. Если ε принадлежит интервалу $\Delta\varepsilon$, принимается решение о том, что сигнал с углом эллиптичности ε_0 обнаружен. Если ε не принадлежит интервалу $\Delta\varepsilon$, принимается решение о том, что сигнал не обнаружен.

Обобщенная структурная схема приемного устройства, реализующего предложенный алгоритм, приведена на рисунке 12а. Введены следующие обозначения: **А** – двухполяризационная антенна, на выходе которой образуются ортогонально поляризованные составляющие E_x, E_y ; **П** – приемник, на выходе которого создаются квадратуры $E_{xc}, E_{sx}, E_{yc}, E_{sy}$ составляющих E_x, E_y ; **В** – вычислитель угла эллиптичности ε принятого сигнала; **РУ** – решающее устройство, которое по заданным ε_0 и $P_{\text{ЛТ}}$ вычисляет границы интервала обнаружения, сравнивает измеренный ε с интервалом обнаружения и определяет, входит ε в интервал обнаружения или нет; **И** – индикатор.

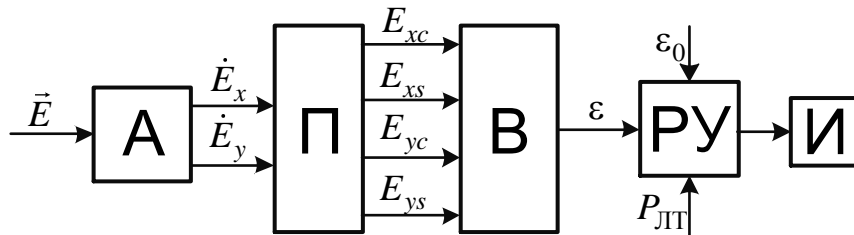


Рисунок 12а – Обобщенная структурная схема приемного устройства.

Схема алгоритма обнаружения и селекции приведена на рисунке 12б.

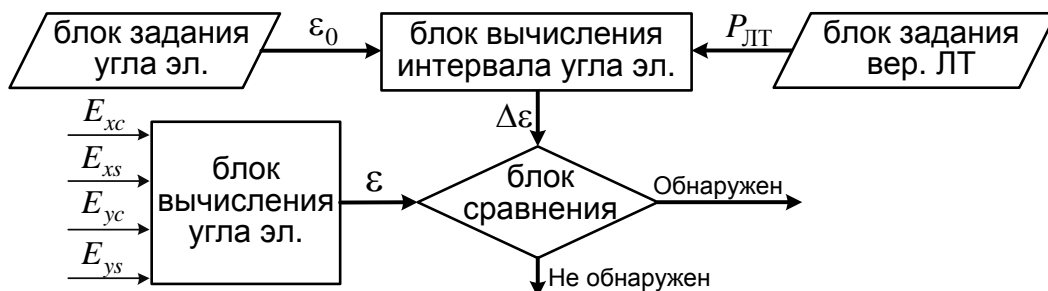


Рисунок 12б – Схема алгоритма обнаружения.

Поскольку одно и то же значение $P_{\text{ЛТ}}$ может быть получено при разной ширине интервала обнаружения (в зависимости от выбора границ), ему может соответствовать разная величина $P_{\text{ПЮ}}$. Определение границ интервала обнаружения, описанное по формуле (2), не является оптимальным, так как распределение угла эллиптичности смеси полезного сигнала и шума будет

завесить от отношения сигнал/шум и иметь смещение относительно обнаруживаемого угла эллиптичности. Под оптимальным выбором границ понимается такой их выбор, при котором $P_{\text{ПО}}$ будет максимальной для данных условий. Указанное смещение относительно границ обнаружения в итоге приведет к снижению $P_{\text{ПО}}$. Для выбора оптимальных границ обнаружения можно использовать вариант, который будет учитывать отношение сигнал/шум, $P_{\text{ЛТ}}$, значение обнаруживаемого угла эллиптичности, и, таким образом, максимизировать $P_{\text{ПО}}$ для заданных условий.

Путем численного моделирования для заданных значений угла эллиптичности ε_0 , $P_{\text{ЛТ}}$ и отношения сигнал/шум можно определить оптимальный интервал обнаружения $\Delta\varepsilon$, соответствующий максимальной величине $P_{\text{ПО}}$.

В таблице 2 приведены оптимальные интервалы обнаружения для некоторых заданных углов эллиптичности ε_0 для $P_{\text{ЛТ}} = 0,1$ и различных отношений сигнал/шум. В таблице 3 приведены значения $P_{\text{ПО}}$, соответствующие интервалам, взятым из таблицы 2.

Таблица 2 - Интервалы обнаружения по углу эллиптичности

Угол эллиптичности ε_0 в градусах	Границы интервала обнаружения в градусах для различных отношений сигнал/шум, дБ			
	4	8	12	16
0	[-2,97; 2,97]	[-2,97; 2,97]	[-2,97; 2,97]	[-2,97; 2,97]
10	[7,05; 13,31]	[6,65; 12,89]	[6,7; 12,94]	[6,9; 13,15]
40	[31,25; 45], [-45; -33,82]	[31,4; 45], [-45; -33,64]	[32; 45], [-45; -32,96]	[32,65; 45], [-45; -32,29]

Таблица 3 - Вероятность правильного обнаружения

Угол эллиптичности ε_0 в градусах	Вероятность правильного обнаружения для различных отношений сигнал/шум, дБ			
	4	8	12	16
0	0,171	0,376	0,775	0,998
10	0,177	0,398	0,802	0,999
40	0,292	0,785	0,998	1

Анализ эффективности. Сравнение порогового и интервального методов показывает (рисунок 11), что для обеспечения одинаковой $P_{\text{ПО}}$ при применении интервального метода требуется допустить в 5–10 раз большую $P_{\text{ЛТ}}$ и обеспечить большее на 5–7 дБ отношение сигнал/шум. Однако, предложенный интервальный метод обнаружения позволяет одновременно решать задачу поляризационной селекции радиолокационных сигналов, что является важным его преимуществом.

Селекция двух сигналов с разными углами эллиптичности возможна, если интервалы обнаружения этих сигналов не перекрываются. Таким образом,

разрешающая способность по углу эллиптичности может быть принята равной ширине интервала обнаружения. На рисунке 13 показана зависимость величины разрешающей способности от заданных значений угла эллиптичности обнаруживаемого сигнала ε_0 для различной $P_{ЛТ}$, при отношении сигнал/шум 18 дБ. Графики разрешающей способности получены путем моделирования.

Обнаружение по нескольким значениям угла эллиптичности в пределах длительности импульса. Для каждого значения $P_{ЛТ}$, угла эллиптичности ε_0 и отношения сигнал/шум q можно вычислить оптимальное (максимальное) значение $P_{ПО}$ (таблицы 2 и 3).

При обнаружении по нескольким значениям могут быть следующие варианты определения характеристик обнаружения:

1. Полоса пропускания приемника много больше полосы сигнала $\Delta f_{np} \gg \Delta f_{сиг}$. Тогда отсчеты шумов можно считать независимыми. Так как каждое обнаружение производится независимо по каждому полученному значению угла эллиптичности со своей $P_{ЛТ}$ и $P_{ПО}$, то результирующее значение вероятности можно найти перемножением вероятностей (события независимые). Вероятности ложной тревоги $P_{ЛТ}$ и правильного обнаружения $P_{ПО}$ будут равны

$$P_{ЛТ_N} = (P_{ЛТ})^N, P_{ПО_N} = (P_{ПО})^N, \quad (3)$$

где N – число используемых значений угла эллиптичности, которые подряд попали в интервал обнаружения, $P_{ЛТ}$ и $P_{ПО}$ – вероятность при одном значении. При условии, что $P_{ЛТ}$ и $P_{ПО}$ для каждого значения угла эллиптичности одинаковы.

Если $P_{ПО}$ для каждого значения разные (например, изменяется q), то $P_{ПО_N}$ будет равна

$$P_{ПО_N} = \prod_{i=1}^N P_{ПОi}, \quad (4)$$

где $P_{ПОi}$ – $P_{ПО}$ вероятность правильного обнаружения при i значении.

2. Полоса пропускания приемника меньше или равна ширине полосы сигнала $\Delta f_{np} \leq \Delta f_{сиг}$. Так как интервал корреляции шума в этом случае приблизительно равен длительности импульса, то обнаружение равносильно мгновенному обнаружению по 1 значению:

$$P_{ЛТ_N} \cong P_{ЛТ}, P_{ПО_N} \cong P_{ПО}. \quad (5)$$

При условии $\Delta f_{np} \gg \Delta f_{сиг}$ и использовании (3) будет происходить уменьшение $P_{ЛТ_N}$, а также уменьшение $P_{ПО_N}$.

Для того чтобы сохранить высокую $P_{ПО}$, необходимо увеличить $P_{ЛТ}$ для обнаружения по одному значению угла эллиптичности. Увеличивая $P_{ЛТ}$, расширяем интервал обнаружения (рисунок 14). Так как интервал обнаружения становится шире, то и вероятность попадания в него увеличивается, соответственно увеличивается $P_{ПО}$.

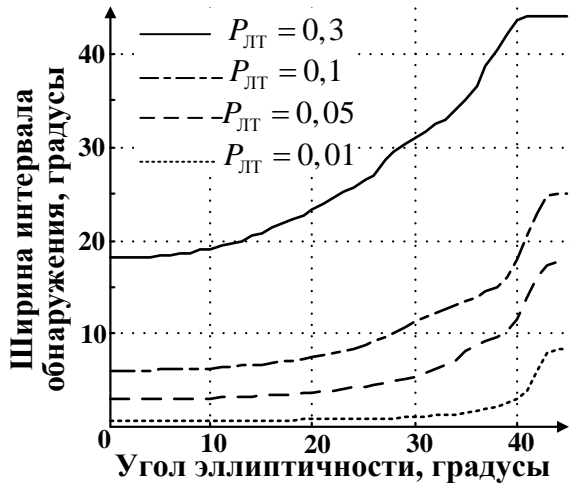


Рисунок 13 – Разрешающая способность поляризационной селекции

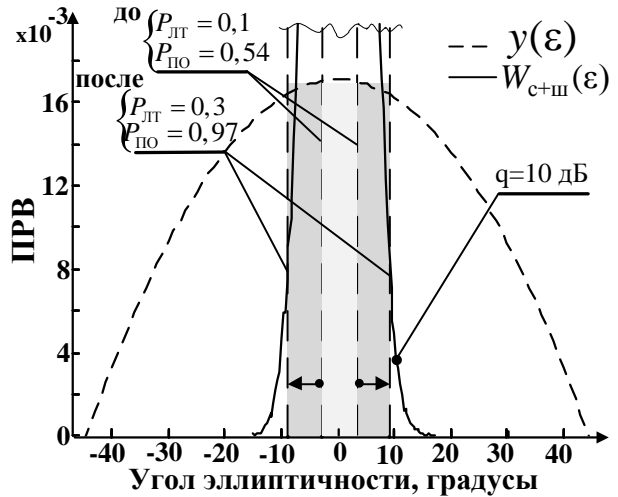


Рисунок 14 – К обнаружению по нескольким значениям

Путем моделирования можно выполнить расчет $P_{ПО}$ в зависимости от количества значений угла эллиптичности для различных отношений сигнал/шум, для заданного угла эллиптичности и $P_{ЛТ}$ (для одного значения). Моделирование выполнено при условии, что $P_{ПО}$ для каждого значения сигнала одинакова и результирующие величины $P_{ПО_N}$ и $P_{ЛТ_N}$ вычислены по формулам (3). На рисунке 15 приведен результат моделирования для угла эллиптичности 0 градусов, при $P_{ЛТ} = 0,1$ для одного значения.

$P_{ЛТ_N}$ зависит от количества значений угла эллиптичности, по которым производят обнаружение. Пусть при фиксированном значении $P_{ЛТ_N}$ производят обнаружение по некоторому числу значений угла эллиптичности принятого сигнала. Чтобы получить фиксированное значение $P_{ЛТ_N}$ необходимо, чтобы $P_{ЛТ}$ для одного значения обнаруживаемого угла эллиптичного была равна

$$P_{ЛТ} = \sqrt[N]{P_{ЛТ_N}}, \quad (6)$$

где N – число значений угла эллиптичности.

Используя моделирование, построим зависимости $P_{ПО_N}$ от количества значений угла эллиптичности для различных отношений сигнал/шум, для заданного угла эллиптичности $\varepsilon = 0$ и фиксированной $P_{ЛТ_N}$. На рисунке 16 показаны $P_{ПО_N}$ для результирующей $P_{ЛТ_N} = 0,1$.

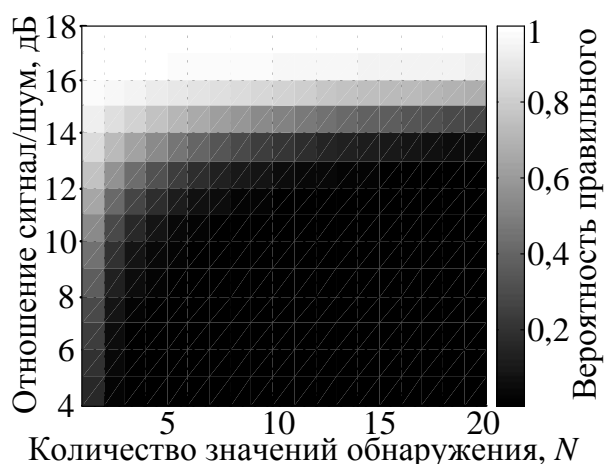


Рисунок 15 – Вероятность правильного обнаружения ($P_{\text{ЛТ}} = 0,1$ для одного значения)

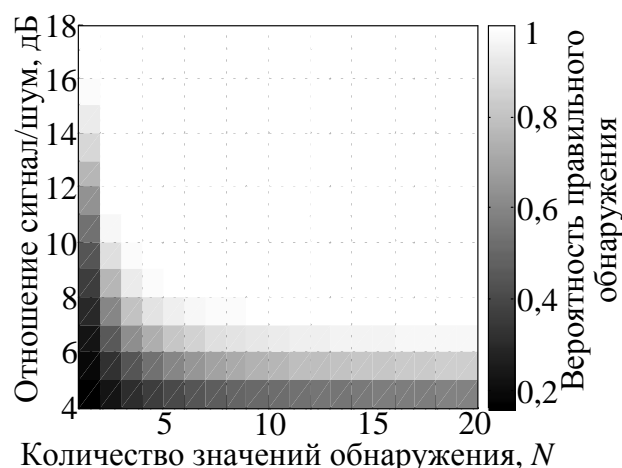


Рисунок 16 – Вероятность правильного обнаружения ($P_{\text{ЛТ}} = 0,1$ фиксированная)

При обнаружении по N значениям угла эллиптичности, для сохранения высокой $P_{\text{ПО}_N}$, можно увеличить $P_{\text{ЛТ}}$ и тем самым расширить интервал обнаружения. Расширение интервала обнаружения приводит к тому, что разрешающая способность поляризационной селекции ухудшается.

Выбор оптимальной полосы пропускания приемника. При обнаружении по нескольким отсчетам, измеренным за время длительности импульса, требуется, чтобы полоса пропускания приемника была не менее $N \cdot \Delta f_{\text{сиг}}$, при этом отсчеты по шумовой составляющей можно считать независимыми. При увеличении N характеристики обнаружения улучшаются за счет возможности расширения интервала обнаружения и в то же время ухудшится из-за снижения отношения сигнал/шум при расширении полосы пропускания приемника. При вычислении характеристик обнаружения, показанных на рисунке 16, полагалось, что отношение сигнал/шум для одного отсчета при увеличении числа отсчетов неизменно. На практике с увеличением полосы пропускания приемника отношение сигнал/шум ухудшается. Был выполнен расчет характеристик обнаружения при условии, что с увеличением числа отсчетов обнаружения N отношение сигнал/шум уменьшается в N раз.

На рисунках 17–18 приведены зависимости вероятности правильного обнаружения от количества отсчетов N в пределах импульса в случае, когда $\Delta f_{\text{пр}}$ выбирается равной $N \cdot \Delta f_{\text{сиг}}$. Графики позволяют выбирать оптимальное число отсчетов угла эллиптичности в пределах импульса и, соответственно, оптимальную полосу пропускания приемника для получения наилучших характеристик обнаружения.

Следует отметить, что использование графиков возможно и целесообразно в случае, когда несущая частота и ширина спектра сигнала известны, либо производится их последовательный или параллельный поиск. В случае пассивной радиолокации параметры сигнала могут быть неизвестны, в этом случае $\Delta f_{\text{пр}}$ выбирается заведомо больше ширины спектра сигнала, и для оценки характеристик обнаружения используются данные рисунка 16.

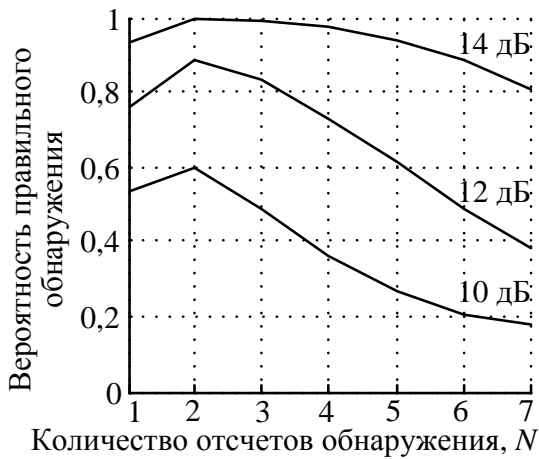


Рисунок 17 – Вероятность правильного обнаружения для $N = 1...7$ ($P_{ЛТ_N} = 0,1$)

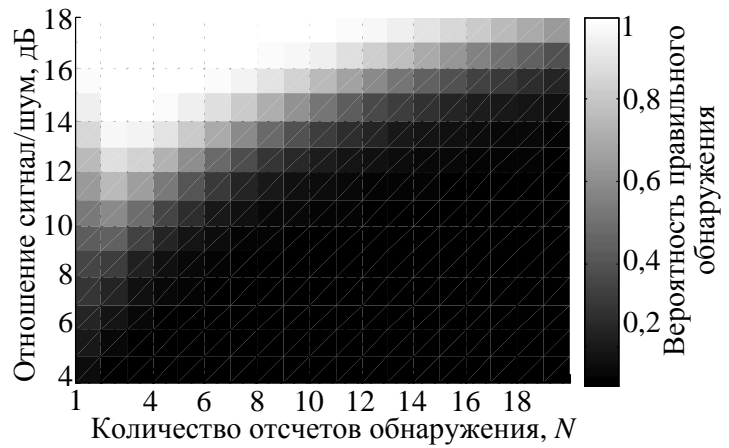


Рисунок 18 – Вероятность правильного обнаружения $N = 1...19$ ($P_{ЛТ_N} = 0,1$)

В **заключении** сформулированы теоретические и практические результаты, полученные автором в процессе работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выполнен анализ поляризационных свойств радиосигнала X диапазона на трассе РРВ «Земля-космос», результаты которого показали, что:

- искажения состояния поляризации волны радиосигнала, которые вызваны эффектами Фарадея и Коттона-Муттона, для данного диапазона частот малы, и нет необходимости учитывать их влияние. Ряд других эффектов оказывает еще меньшее влияние на состояние поляризации;

- угол эллиптичности плоской электромагнитной волны, рассеянной на предмете сложной формы, в интервале углов места 0–20 градусов от вертикали с вероятностью 0,95 не превышает ± 5 градусов. Получены функции плотности распределения вероятностей оценок угла эллиптичности для различных угловых секторов диаграммы рассеяния;

- для сектора углов ориентации антенны ИРИ, типичного для геометрии пассивной космической системы мониторинга, состояние поляризации остается равной номинальной. Сравнение ДН и поляризационной диаграммы показало, что для заданных сечений угла места или азимута максимальные отклонения угла эллиптичности от номинального находятся в области минимумов ДН антенны. Если допустить, что чувствительность приемной аппаратуры космической системы не сможет обеспечить необходимого отношения сигнал/шум принимаемого сигнала для данных участков сектора ДН передающей антенны, то их можно не учитывать при анализе.

2. Исследованы оценки мгновенного угла эллиптичности импульсного сигнала РЛС кругового обзора на закрытой наземной трассе в X-диапазоне, рассчитанные по имеющимся экспериментальным данным. Показано, что значения углов эллиптичности в области главного лепестка ДН антенны равны 0 градусов, что соответствует номинальной линейной поляризации. В области боковых и задних лепестков ДН антенны значения углов эллиптичности

отличны от нуля и изменяются в пределах области определения. Значения углов эллиптичности в пределах длительности импульса остаются постоянными. Получены функции ПРВ оценок угла эллиптичности для различных угловых секторов поляризационной диаграммы. Показана эквивалентность средних уровней двухпозиционной ЭПР предметов сложной формы в азимутальной и угломестной плоскостях, что позволяет использовать данные наземного эксперимента для анализа космических систем радиомониторинга.

3. Разработан и исследован способ мгновенного обнаружения и селекции радиолокационных сигналов с известным (заданным) поляризационным параметром – углом эллиптичности, состоящий в том, что принятие решения о наличии сигнала осуществляется при условии попадания измеренного отсчета угла эллиптичности в интервал обнаружения. Интервал обнаружения определяется с использованием критерия Неймана-Пирсона. Разработан соответствующий алгоритм обнаружения и селекции.

3. Разработан и исследован способ обнаружения и селекции радиолокационных сигналов по нескольким мгновенным отсчетам угла эллиптичности в пределах импульса, которые подряд попали в интервал обнаружения.

4. Получены характеристики обнаружения и селекции для разработанных способов. Показана зависимость вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал/шум для различной вероятности ложной тревоги. Показана зависимость вероятности правильного обнаружения от количества отсчетов угла эллиптичности, по которым производят обнаружение. Сделана оценка разрешающей поляризационной селекции сигналов по углу эллиптичности.

5. Предложен алгоритм, позволяющий при обнаружении по мгновенному отсчету угла эллиптичности максимизировать вероятность правильного обнаружения для заданных условий за счет выбора оптимального интервала обнаружения и числа отсчетов в пределах импульса.

6. Разработано программное обеспечение для реализации предложенных в работе алгоритмов.

Основные публикации по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. Громов В.А. Угол эллиптичности электромагнитных сигналов и его использование для неэнергетического обнаружения, оптимального по критерию Неймана-Пирсона / В.А. Громов, Г.С. Шарыгин, М.В. Миронов // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55, № 3. – С. 15–21.

2. Шарыгин Г.С. Численное моделирование дифракции Фраунгофера в приближении Гюйгенса-Френеля и индикатрисы прямого рассеяния самолетов / Г.С. Шарыгин, В.А. Громов, М.В. Крутиков // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55, № 3. – С. 21-27.

3. Громов В.А. Повышение точности определения координат разностно-дальномерным методом с использованием группировки низкоорбитальных

малых космических аппаратов / В.А. Громов, М.В. Миронов, Е.П. Ворошилин, Г.С. Шарыгин // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – Т. 22, № 2. Ч. 2. – С. 14-16.

4. Громов В.А. Оценка мгновенного угла эллиптичности сигналов РЛС кругового обзора на закрытой наземной трассе в X-диапазоне / В.А. Громов, Аникин А.С. // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2013. – Т. 29, № 3. – С. 17-23.

5. Громов В.А. Поляризационные искажения сигналов бокового излучения наземной РЛС X-диапазона при приеме на космическом аппарате / В.А. Громов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2013. – Т. 28, № 2. – С. 14-20.

Публикации в других изданиях:

6. Пат. 2476903 РФ, МПК G 01 S 13/04. Способ обнаружения и селекции радиолокационных сигналов по поляризационному признаку и устройство для его осуществления / В.А. Громов (РФ), Г.С. Шарыгин (РФ). – № 2011108902/07; заявл. 09.03.2011; опубл. 27.02.2013, Бюл. № 6. – 14 с.

7. Громов В.А. Программа для ЭВМ «Radar Ellipse 1.0» / В.А. Громов, Ю.И. Байров, А.А. Сазонов, А.А. Зайцев // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014610172 от 09.01.2014 г.

8. Громов В.А. Программа для ЭВМ «Radar Ellipse 2.0» / В.А. Громов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014610818 от 17.01.2014 г.

9. Вопросы пассивного радиомониторинга: научное издание / [авт. колл. под рук. д.т.н., проф. Г.С. Шарыгина] / авт.: Е.П. Ворошилин, Е.П. Великанова, В.А. Громов, В.П. Денисов, Д.В. Дубинин, М.В. Крутиков, А.А. Мещеряков, М.В. Миронов, В.И. Тисленко и Г.С. Шарыгин. – Томск, Изд-во ТУСУР, 2012. – 280 с.

10. Gromov V.A. Method of the Radar Signals Detection and Selection Using Polarization Parameters / V.A. Gromov, G.S. Sharygin, M.V. Mironov // Proceedings of the 8th European Radar Conference (Manchester, UK). – 2011, – P. 245-248.

11. Громов В.А. Оценка мгновенного угла эллиптичности сигналов РЛС кругового обзора на закрытой наземной трассе в X-диапазоне / В.А. Громов, Аникин А.С. // Материалы докладов XIX международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж). – 2013. – Т. 3. – С. 1502-1512.

12. Громов В.А. Метод обнаружения и селекции радиолокационных сигналов по поляризационному признаку / В.А. Громов, Г.С. Шарыгин, М.В. Миронов // Материалы докладов XVII международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж). – 2011. – Т. 3. – С. 1728-1734.

13. Громов В.А. Моноимпульсное обнаружение сигналов в поляризационных РЛС по углу эллиптичности / В.А. Громов, Г.С. Шарыгин // Материалы докладов Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Томск). – 2010. – Ч. 1. – С. 30–33.

14. Концепция перспективных пассивных космических систем радиомониторинга наземных источников излучения: отчет о НИР (промежуточный) / Шарыгин Г.С. – Томск: ТУСУР, 2009. – 311 с.

15. Концепция перспективных пассивных космических систем радиомониторинга наземных источников излучения: отчет о НИР (промежуточный) / Шарыгин Г.С. – Томск: ТУСУР, 2010. – 401 с.

16. Концепция перспективных пассивных космических систем радиомониторинга наземных источников излучения: отчет о НИР (промежуточный) / Шарыгин Г.С. – Томск: ТУСУР, 2010. – 150 с.

17. Концепция перспективных пассивных космических систем радиомониторинга наземных источников излучения: отчет о НИР (итоговый) / Шарыгин Г.С. – Томск: ТУСУР, 2011. – 338 с.

18. Концептуальные основы мониторинга земной поверхности и нижней атмосферы с использованием космических технологий: отчет о НИР (промежуточный) / Шарыгин Г.С. – Томск: ТУСУР, 2009.

19. Концептуальные основы мониторинга земной поверхности и нижней атмосферы с использованием космических технологий: отчет о НИР (промежуточный) / Шарыгин Г.С. – Томск: ТУСУР, 2010.

20. Синтез оптимальной системы обработки векторных сигналов с неизвестной поляризацией для получения максимально возможного отношения сигнал/шум в космических системах пассивного радиомониторинга наземных источников излучения: отчет о НИР (РФФИ № 12-08-31364) / Громов В.А. – Томск: ТУСУР, 2013. – 23 с.

Тираж 100. Заказ № ____.
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.
Тел. (3822)533180.