

на правах рукописи



Елагина Ксения Александровна

**Адаптивные алгоритмы обнаружения и разрешения
ЧМ сигналов в РЛС обзора при сложном
помеховом воздействии**

Специальность 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: д-р техн. наук, старший научный сотрудник
Лозовский Игорь Филиппович

Официальные оппоненты: **Акулиничев Юрий Павлович**,
д-р техн. наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Томский государственный университет систем
управления и радиотехники», кафедра
радиотехнических систем, профессор

Тяпкин Валерий Николаевич,
канд. техн. наук, доцент,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский федеральный университет», отдел
«Радиолокационное вооружение Радиотехнических
войск Воздушно-космических сил», профессор

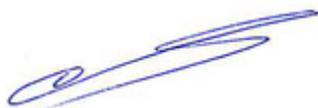
Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский
государственный университет»

Защита состоится 20 июня 2017 г. в 16 часов на заседании диссертационного
совета Д 212.099.21 на базе Сибирского федерального университета по адресу:
660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 28, ауд. Б319.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского
федерального университета <http://www.sfu-kras.ru>

Автореферат разослан _____ 2017 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Дмитриев Дмитрий Дмитриевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Радиолокационные станции (РЛС) функционируют в сложной помеховой обстановке, при этом должны обеспечиваться заданные характеристики обнаружения и разрешения движущихся целей.

Обеспечение заданных характеристик осуществляется на этапах внутрипериодной, междупериодной и межобзорной обработки.

Задача защиты РЛС от протяженных по дальности пассивных помех и непрерывных активных помех в основном решена путем применения адаптивных алгоритмов с оценкой неизвестных параметров помехи в обучающей выборке по дальности. Однако на РЛС могут воздействовать и другие помехи, которые можно отнести к сложным помеховым воздействиям из-за их нестационарности во времени и неоднородности по дальности. Наличие такого рода помех приводит к заметному ухудшению характеристик обнаружения и разрешения сигналов, увеличению числа ложных отметок.

В настоящее время не является в полной мере решенной задача уменьшения числа ложных отметок при уменьшении потерь обнаружения на весовую обработку, дискретизацию, потерь за счёт введения скоростной селекции и при возможном снижении аппаратных затрат на реализацию алгоритмов. В контексте диссертационной работы под ложными отметками понимаются ошибочные решения обнаружителя сигналов от таких сложных помеховых воздействий как отражения от «ясного неба», несинхронные точечные сигналы, несинхронные импульсные помехи, помехи от сверхрефракции, а также ложные отметки в области боковых лепестков, возникающих при сжатии сигналов. Необходимость защиты РЛС от помех такого типа и определила название диссертационной работы.

Степень разработанности. Для достижения заданных параметров обнаружения важнейшее значение имеет синтез сигналов. Теория сложных сигналов изложена в фундаментальных работах отечественных и зарубежных учёных: Варакина Л.Е., Вакмана Д.Е., Гоноровского И.С., Вудворда Ф.М., Ширмана Я.Д., Кука Ч., Бернфельда М. и др.

При сжатии сложных сигналов кроме главного лепестка образуются боковые лепестки, которые являются источником ложных отметок. Одним из возможных способов уменьшения уровня боковых лепестков является применение весовой обработки комплексной огибающей сигнала до сжатия или на выходе фильтра сжатия. В случае применения весовой обработки число ложных отметок существенно уменьшается, однако при этом главный лепесток сжатого сигнала расширяется и уменьшается его максимальное значение. В результате при обнаружении слабых сигналов возникают потери в пороговом сигнале.

Кроме уменьшения потерь необходимо обеспечивать и постоянный уровень ложных тревог. Адаптивные обнаружители с постоянным уровнем ложных тревог исследовались в работах таких отечественных и зарубежных учёных как Бакулев П.А., Батистов Ю.А., Лозовский И.Ф., Hansen V., Rohling H. и др.

В работах авторов получено решение задачи уменьшения числа ложных отметок в зависимости от помеховой обстановки. Однако нерешённым остаётся вопрос уменьшения потерь в обнаружителе с тем или иным способом стабилизации вероятности ложной тревоги, в фильтре сжатия которого для уменьшения уровня боковых лепестков применяется неравномерная весовая обработка.

В литературе имеются публикации о применении в радиолокации нетрадиционных зондирующих сигналов с частотной модуляцией (ЧМ), например, сигналов с нелинейной частотной модуляцией (НЧМ), пачечных сигналов с ЧМ отдельных импульсов.

Их изучением в последние годы занимались Лозовский И.Ф., Дмитриев С.Л., Тельминов О.А. и др.

При применении таких сигналов в качестве зондирующих сигналов РЛС за счёт низкого уровня боковых лепестков, отсутствия потерь на весовую обработку (НЧМ сигналы), высокой точности оценки частоты Доплера (пачечные сигналы) можно уменьшить потери обнаружения и число ложных отметок.

Однако нетрадиционные сигналы с ЧМ кроме преимуществ имеют и недостатки. Основными недостатками являются высокая чувствительность НЧМ сигналов к сдвигу по частоте Доплера, в результате для уменьшения потерь требуется применение многоканальных по доплеровской частоте согласованных фильтров (МСФ), что увеличивает аппаратные затраты. При этом все равно невозможно добиться одновременно низкого уровня боковых лепестков для сигналов с разной частотой Доплера. Применение пачечных сигналов возможно по точечным объектам исключительно в угловых направлениях, свободных от областей протяжённых помех.

РЛС также вынуждены работать в условиях отражений от оптически ненаблюдаемых объектов – отражений от «ясного неба», являющихся точечными движущимися помехами. К ним относят отражения от диэлектрических неоднородностей и турбулентностей атмосферы, стай птиц, скоплений насекомых и др. Увеличение числа ложных отметок от отражений от «ясного неба» приводит к возможной перегрузке информационной системы РЛС.

Изучением возможностей повышения защиты РЛС от помех такого типа занимались Бартенев В.Г., Лозовский И.Ф. и др.

В существующих РЛС, как правило, используются разностно-временные череспериодные компенсаторы небольшой кратности, что недостаточно для эффективного подавления точечных движущихся помех. Повышение защиты РЛС от отражений от «ясного неба» приводит к потерям обнаружения целей, движущихся с малыми радиальными скоростями.

Большое влияние на эффективность РЛС оказывает явление аномального распространения радиоволн. При отрицательных значениях вертикального градиента диэлектрической проницаемости тропосферы возникает явление сверхрефракции, что приводит к образованию приземного, приводного или тропосферного волновода, в котором концентрируется большая часть энергии зондирующего сигнала. Распространяющиеся по таким волноводам сигналы

являются помехами, т.к. могут приходиться с дальностей, превышающих максимальную дальность РЛС.

Вопросами защиты РЛС от сверхрефракции занимались Кострова Т.Г., Бернюков А.К., Карлов В.Д. и др.

В работах этих авторов неоднозначность отсчёта дальности предлагается устранять на основе анализа пачки эхо-сигналов в частотной области, при смене закона модуляции сложного сигнала и при применении вобуляции периода повторения зондирующих сигналов. В борьбе с помехами от сверхрефракции полезным может быть проведение измерений по сигналам, отражённым от поверхностно-распределённых объектов с эталонными эффективными площадями рассеяния (ЭПР), которые имеются на трассе распространения радиоволн. Однако ранее не были получены алгоритмы некогерентного накопления пачки сигналов с защитой от помех при сверхрефракции.

Сложность помеховой обстановки часто определяется взаимными помехами от соседних радиоэлектронных устройств, которые носят характер несинхронных импульсных помех большой интенсивности. Методы стабилизации вероятности ложной тревоги, основанные на автоматической регулировке усиления приёмника, не обеспечивают стабилизацию вероятности ложной тревоги при импульсных помехах. Способы защиты от импульсных помех, использующие временную селекцию (стробирование) неэффективны при несинхронных помехах. Недостатком известных способов стабилизации вероятности ложной тревоги путём введения ограничения в приёмном тракте является искажение полезного сигнала, что приводит к низкой помехозащищённости от пассивных помех. Выходом из сложившейся ситуации является разработка адаптивных алгоритмов обнаружения сигналов.

Другим вопросом, возникающим при разработке аппаратуры и требующим решения, является уменьшение потерь на дискретизацию.

Временное положение пика сжатого сигнала может не совпадать с моментами взятия отсчетов, что приводит к существенным потерям обнаружения сигналов. Для повышения точности оценки временного положения сигнала необходимо использовать высокую частоту дискретизации, однако на практике это часто не выполняется.

При поиске компромисса между стоимостью, требованиями к аппаратуре и уменьшением потерь обнаружения вместе с повышением точности оценки временного положения сигнала применяют интерполяцию (восстановление) пика амплитуды сигнала. Недостаток известных параболических и линейных интерполяторов заключается в большой погрешности при узком и широком корреляционном пике соответственно.

Таким образом, не все задачи решены, поэтому тема диссертационной работы актуальна.

Цель работы и задачи исследования. Целью работы является увеличение помехозащищённости РЛС от несинхронных точечных и несинхронных протяжённых по дальности помех, отражений от «ясного неба», помех от сверхрефракции.

Для достижения поставленной цели в работе потребовалось решить следующие **основные задачи**:

1. Разработать алгоритм, обеспечивающий с минимальными потерями обнаружение ЧМ сигналов от одиночных и близкорасположенных по дальности целей с разной ЭПР.

2. Синтезировать сигнал с НЧМ, обеспечивающий низкий уровень боковых лепестков в диапазоне частот Доплера, определить характеристики обнаружения и разрешения НЧМ сигналов.

3. Разработать алгоритмы обнаружения, повышающие эффективность защиты РЛС от отражений от «ясного неба» при сохранении видимости целей, движущихся с малыми радиальными скоростями.

4. Исследовать возможности применения сигналов с периодической частотной модуляцией (ПЧМ) для защиты РЛС от точечных помех типа отражения от «ясного неба».

5. Разработать алгоритм обнаружения некогерентной пачки импульсов на фоне априорно неизвестного вида помехи, включающей несинхронные шумовые и точечные, неоднородные по дальности помехи и помехи от сверхрефракции.

6. Разработать алгоритмы интерполяции пика амплитуды ЧМ сигналов.

В диссертационной работе получены следующие **новые научные результаты**:

- Предложен двухканальный обнаружитель одиночных и перекрывающихся во времени ЧМ сигналов со стабилизацией вероятности ложной тревоги, в одном из каналов которого применяется весовая обработка, обеспечивающий уменьшение потерь обнаружения по сравнению с одноканальным обнаружителем (новизна подтверждена получением патента на изобретение).

- Предложен алгоритм обнаружения некогерентной пачки импульсов на фоне априорно неизвестного вида помехи, в котором несинхронные точечные и несинхронные протяжённые по дальности помехи исключаются из выборки накапливаемых отсчётов, а при обнаружении отражений от «ясного неба» и помех от сверхрефракции элемент дальности бланкируется.

- Синтезирован сигнал с НЧМ, при оптимизации коэффициентов нелинейности ЧМ которого по сравнению с известными сигналами обеспечивается практически постоянный низкий уровень боковых лепестков для разных баз сигналов. Разработаны алгоритмы его обнаружения в диапазоне частот Доплера, позволяющие уменьшить потери обнаружения.

- Разработаны методы повышения защищённости РЛС обзора от отражений от «ясного неба», основанные на некогерентном накоплении и включающие обработку пачек импульсов с двумя параметрами возбуждения, ПЧМ сигналов, пачек импульсов одного углового направления и смежных лучей диаграммы направленности антенны (ДНА), скоростная селекция которых обеспечивается на основе адаптивного к мощности сигнала порога по частоте Доплера.

- Предложены алгоритмы интерполяции пиковых значений амплитуд ЧМ сигналов, позволяющие уменьшить потери обнаружения.

Теоретическая значимость работы. Разработанные в диссертационной работе алгоритмы обнаружения предназначены для применения в РЛС обзора и позволяют уменьшить потери и число ложных отметок. В результате проведённого в работе исследования получено:

- Выигрыш в пороговом сигнале при обнаружении ЧМ сигналов от близкорасположенных по дальности целей до 1...3 дБ достигается применением в обнаружителе со стабилизацией вероятности ложной тревоги второго канала с весовой обработкой и объединением выходов пороговых устройств по логическому «ИЛИ».

- Выигрыш в пороговом сигнале до 3,5 дБ при обнаружении сигналов от целей в диапазоне частот Доплера 0... 12 кГц (по модулю) достигнут при применении обнаружителя синтезированного НЧМ сигнала с низким уровнем боковых лепестков.

- Уменьшение потерь на дискретизацию и выигрыш в пороговом сигнале в цифровых системах без весовой обработки и с весовой обработкой по Хэммингу до 1,5 дБ и 0,4 дБ соответственно получены при применении 1-го...2-х каналов предложенного некогерентного интерполятора.

- Уменьшение радиальных скоростей обнаруживаемых целей при малом числе ложных отметок достигнуто при обработке по алгоритму некогерентного накопления с частотным порогом (НН-ЧП) пачки импульсов с двумя параметрами вобуляции, ПЧМ сигналов, пачек импульсов одного углового направления или смежных лучей ДНА, а также при осуществлении адаптации частотного порога к мощности сигнала.

- Модернизированный алгоритм НН-ЧП на основе бланкирования и исключения из выборки накапливаемых отсчётов сигналов помех повышает помехозащищённость РЛС, при этом потери обнаружения сигналов от целей не превышают 0,5 дБ.

Практическая значимость работы. Результаты диссертационного исследования по обработке пачки импульсов с двумя параметрами вобуляции по алгоритму некогерентного накопления с частотным порогом, интерполяторы пиковых значений амплитуд ЧМ сигналов (включены в техническое задание и выпущена конструкторская документация), а также способ двухканального обнаружения радиолокационных сигналов со стабилизацией вероятности ложной тревоги (включён в техническое задание) использованы при модернизации изделий 91Н6АМ и 9С18М1-3.

Результаты диссертации по обнаружению сигналов с нелинейной ЧМ в диапазоне частот Доплера 0...12 кГц, сигналов с периодической ЧМ, рекомендации по применению таких сигналов, алгоритм адаптации частотного порога к мощности сигнала, алгоритм обнаружения некогерентной пачки импульсов на фоне априорно неизвестного вида помехи используются при разработке перспективных РЛС обзора, что подтверждается актом о внедрении результатов диссертации в практические разработки.

Методы исследований, используемые в работе, основываются на методах теории вероятности и математической статистики, методах теории обнаружения и оценки параметров сигналов. При исследовании алгоритмов применялось статистическое моделирование с использованием пакетов MATLAB.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Двухканальный обнаружитель ЧМ сигналов со стабилизацией вероятности ложной тревоги, в одном из каналов которого применяется весовая обработка, а выходы пороговых устройств объединены операцией логического «ИЛИ», при обнаружении сигналов от близкорасположенных по дальности целей с существенно разной ЭПР по сравнению с одноканальным обнаружителем обеспечивает выигрыш в пороговом сигнале до 1...3 дБ.

2. Уменьшение порогового сигнала до 3,5 дБ по сравнению со случаем невзвешенного сигнала с линейной ЧМ (ЛЧМ) достигается при обнаружении в диапазоне частот Доплера 0...12 кГц синтезированного НЧМ сигнала с низким уровнем боковых лепестков.

3. Применение алгоритма НН-ЧП для пачки импульсов с двумя параметрами модуляции, ПЧМ сигналов, нескольких пачек импульсов одного углового направления или смежных лучей ДНА вместе с адаптацией порога по частоте Доплера к мощности сигнала при малом числе ложных отметок позволяет уменьшить минимальные радиальные скорости обнаруживаемых целей относительно НН-ЧП для 1-й пачки в зависимости от алгоритма и ширины спектра помехи в 1,7...4,5 раза.

4. Применение алгоритма НН-ЧП с исключением из выборки накапливаемых отсчётов несинхронных точечных и несинхронных протяжённых по дальности помех при бланкировании отражений от «ясного неба» и помех от свехрефракции обеспечивает надёжную защиту от помех, при этом потери обнаружения сигналов от целей не превышают 0,5 дБ.

5. Применение некогерентного алгоритма интерполяции для ЧМ сигнала без весовой обработки или с весовой обработкой по Хэммингу в цифровых системах при низкой частоте дискретизации позволяет уменьшить потери обнаружения до 1,5 дБ и 0,4 дБ соответственно.

Достоверность полученных результатов обуславливается подтверждением теоретических построений результатами статистического моделирования, а также сопоставлением с результатами работ других авторов, апробацией работы в печати и на конференциях.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

VII Всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем». – Ульяновск, УлГТУ, 22 – 23 сентября 2011 г.; научно-практическая конференция молодых учёных «Progress through innovative technologies». – Novosibirsk, NSTU, april 5, 2012; XIX международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (RLNS-2013). – Воронеж, 16 – 18 апреля 2013 г.; Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы радиоэлектроники». – Красноярск, СФУ, 6 – 7 мая 2015 г.; IX Всероссийская конференция

«Радиолокация и радиосвязь». – Москва, ИРиЭ им. В.А. Котельникова РАН, 23 – 25 ноября 2015 г.; Международная конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП-2016). – Новосибирск, НГТУ, 3 – 6 октября, 2016 г.

Публикации по теме работы. По теме диссертации опубликовано 14 работ. Из них 3 статьи опубликованы в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 1 публикация в сборнике научных трудов, 1 публикация в научно-техническом журнале, 8 публикаций в трудах всероссийских и международных конференций, получен 1 патент.

Личное участие. Все результаты, полученные в диссертации, получены лично автором или при его непосредственном участии. Из 14 опубликованных работ в соавторстве опубликовано 9. Автором лично написаны все программы статистических экспериментов, интерполяторы пика амплитуды сигнала реализованы на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС). В работах с соавторами постановка задач выполнена совместно с соавторами, при этом автор лично получил все результаты статистического моделирования и выполнил их анализ, а также подготовил проект патента на изобретение. Автором предложен улучшенный алгоритм НН-ЧП для нескольких пачек импульсов, позволяющий уменьшить радиальные скорости обнаруживаемых целей.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и 2 приложений. Общий объём диссертации 157 страниц, в том числе 155 страниц основного текста, включая библиографический список из 67 источников. Иллюстративный материал представлен на 95 рисунках и 11 таблицах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы и основные решаемые задачи, приведено краткое содержание основных глав работы, представлены выносимые на защиту положения и новые научные результаты.

Первая глава посвящена обзору литературы по теме диссертации.

В главе рассматривается решение компромиссной задачи уменьшения потерь обнаружения и числа ложных отметок, а также проблемы, возникающие при этом.

Известно, что для обеспечения малого числа ложных отметок применяют различные способы стабилизации вероятности ложной тревоги, платой за которую являются потери обнаружения.

Для уменьшения уровня боковых лепестков применяют весовую обработку, однако при этом также возникают потери. При применении сигналов с НЧМ можно избежать потерь, однако НЧМ сигналы обладают большей чувствительностью к сдвигу по частоте Доплера, чем ЛЧМ сигналы.

Проведён анализ литературы по способам защиты РЛС от отражений от «ясного неба», помех от свехрефракции, несинхронных шумовых и точечных помех. Показано, что для устранения перегрузки информационной системы РЛС

необходима разработка более эффективных алгоритмов. Исследованы вопросы интерполяции пика амплитуды сигнала.

По результатам проведённого анализа литературы сформулированы задачи исследования.

Вторая глава посвящена алгоритмам обнаружения и разрешения ЧМ сигналов в одноимпульсном режиме работы РЛС.

Помехи, затрудняющие обнаружение сигналов целей, могут быть вызваны боковыми лепестками соседних по дальности целей или точечных местных предметов.

Уменьшение потерь обнаружения и стабилизация вероятности ложной тревоги. Для осуществления стабилизации вероятности ложной тревоги известно применение нормирования мощности сигнала к оценке средней мощности помех в скользящем по дальности окне, а также применение регулировки порога обнаружения по числу ложных отметок за фиксированный интервал времени.

Главный недостаток первого способа обнаружения сигналов со стабилизацией вероятности ложной тревоги заключается в больших потерях из-за высокого уровня боковых лепестков на выходе фильтра сжатия при обнаружении слабого сигнала, частично перекрываемого более сильным сигналом, а в случае применения весовой обработки при низком уровне боковых лепестков имеют место дополнительные потери обнаружения. Регулировка порога обнаружения осуществляется до тех пор, пока не будет выполняться заданный уровень вероятности ложной тревоги.

В качестве решения компромиссной задачи уменьшения потерь обнаружения и стабилизации вероятности ложной тревоги в работе предложен двухканальный обнаружитель ЧМ сигналов, в одном из каналов которого применяется весовая обработка.

Структурная схема двухканального обнаружителя приведена на рисунке 1.

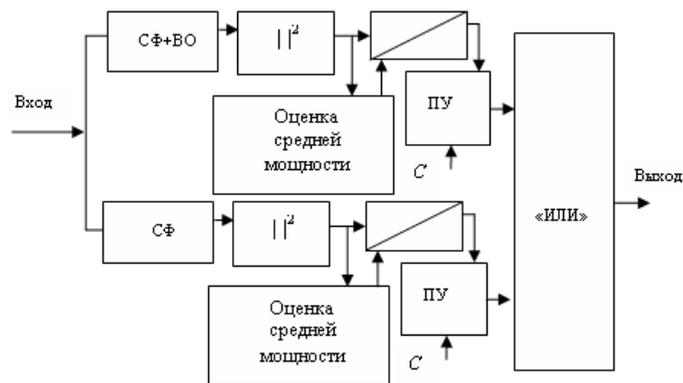


Рисунок 1 – Структурная схема двухканального обнаружителя

Согласно предлагаемому способу обнаружения решение о том, что сигнал присутствует в проверяемом элементе дальности, принимается в том случае, если хотя бы в одном канале квадрат огибающей сжатого сигнала, нормированный к оценке средней мощности сигнала в скользящем по дальности окне, симметрично расположенном относительно проверяемой на наличие цели дискретности по дальности, превысит порог обнаружения C в пороговом устройстве (ПУ).

Для оценки эффективности обнаружителей с нормировкой к средней мощности сигнала в скользящем по дальности окне относительно обнаружителя ЛЧМ сигнала без весовой обработки и с нормировкой к мощности шума были рассчитаны потери при обнаружении сигнала от цели, перекрываемого во времени сигналами от других близкорасположенных по дальности целей. Такие сигналы по отношению к обнаруживаемому сигналу являются помеховыми (при моделировании 1 или 2 сигнала одинаковой мощности располагались слева и справа относительно обнаруживаемого и были разнесены от него на 10 или 30 дискрет по дальности соответственно).

Параметры модели и сигналов: длительность $\tau = 20$ мкс, девиация $W = 2,5$ МГц, частота дискретизации $f_d = 3$ МГц. Частоты Доплера всех сигналов равны 12,5 кГц. Здесь и далее применялась весовая обработка по Хэммингу с относительным пьедесталом 0,08, размер скользящего по дальности окна – 64 отсчёта, вероятность ложной тревоги по шумам – 10^{-6} .

На рисунке 2 показаны зависимости потерь обнаружения от мощности помеховых сигналов.

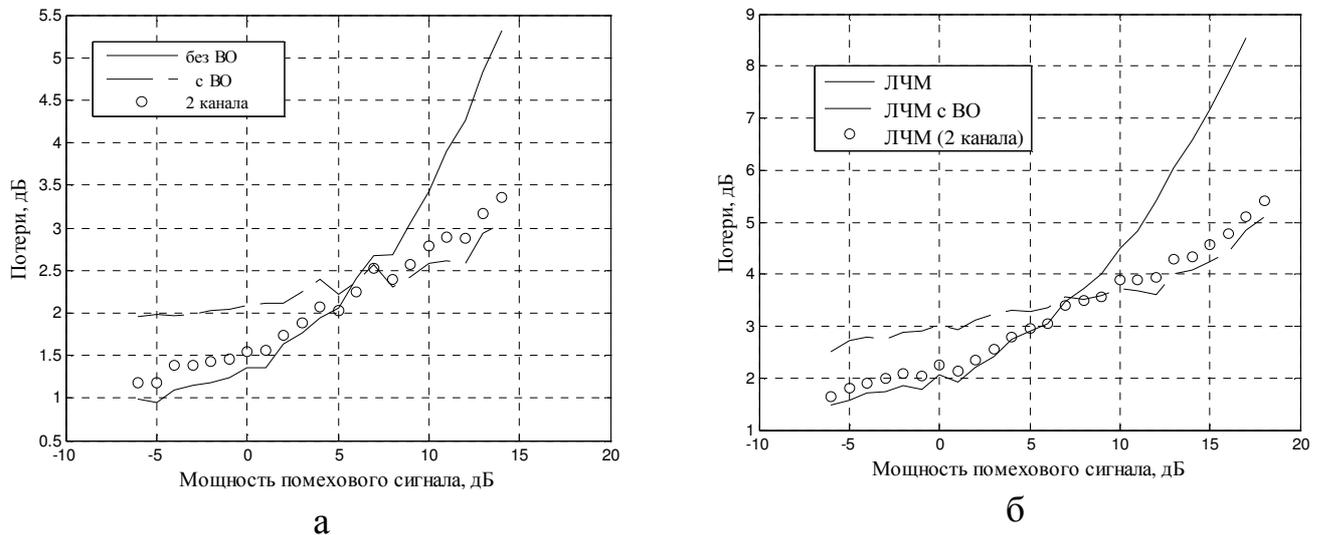


Рисунок 2 – Потери обнаружения:
а – 1 помеховый сигнал; б – 2 помеховых сигнала

Из рисунка 2 видно, что при увеличении мощности помехового сигнала рабочим каналом является канал с весовой обработкой, а при малой мощности (или при отсутствии) помехового сигнала – канал без весовой обработки.

Таким образом, для уменьшения потерь при обнаружении сигнала от малоразмерной цели на фоне мощных боковых лепестков сжатых сигналов от других целей предлагается использовать обнаружитель с разной весовой обработкой в двух каналах и со стабилизацией вероятности ложной тревоги. Выигрыш от применения обнаружителя с двумя каналами весовой обработки в среднем составляет 1...3 дБ относительно обнаружителя с одним каналом (как с весовой обработкой, так и без неё).

НЧМ сигналы. Для снижения уровня боковых лепестков сигналов используют весовую обработку, однако при этом возникают потери обнаружения,

равные 1...2 дБ. Альтернативным способом уменьшения уровня боковых лепестков без потерь на весовую обработку является применение сигналов с НЧМ.

В данной главе эвристическим способом синтезирован НЧМ сигнал с низким уровнем боковых лепестков. Закон изменения мгновенной частоты от времени синтезированного сигнала имеет вид:

$$f(t) = \frac{W \cdot \left(\left(\frac{t}{\tau} - 0,5 \right) + k_1 \cdot \operatorname{tg} \left(k_2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{t}{\tau} - 0,5 \right) \right) \right)}{1 + 2 \cdot k_1 \cdot \operatorname{tg} (0,5 \cdot k_2 \cdot \pi)}, \quad 0 \leq t \leq \tau, \quad (1)$$

где k_1, k_2 – коэффициенты нелинейности ЧМ. Коэффициенты нелинейности ЧМ (1) рассчитывались по минимальному уровню боковых лепестков на выходе согласованного фильтра (СФ).

Главное преимущество синтезированного НЧМ сигнала заключается в возможности его использования для разных баз сигналов из-за практически постоянного низкого уровня боковых лепестков.

На рисунке 3 для иллюстрации эффективности обнаружителей показаны зависимости потерь от мощности единственного помехового сигнала.

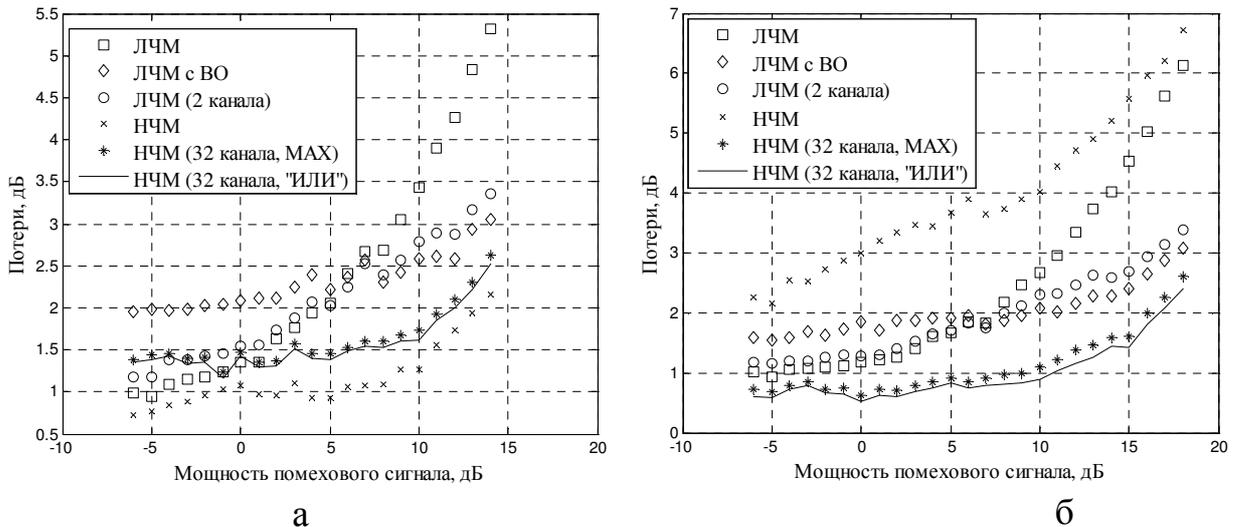


Рисунок 3 – Потери обнаружения:

а – частоты Доплера перекрывающихся сигналов равны 12,5 кГц, разнесение сигналов 10 дискрет по дальности; б – частоты Доплера равны 140 кГц, разнесение сигналов – 30 дискрет по дальности. Параметры модели и сигналов те же, что и при оценке эффективности двухканального обнаружителя.

Для уменьшения потерь и числа ложных отметок при обнаружении целей в диапазоне частот Доплера 0...12,5 кГц применялся обнаружитель с одноканальным СФ НЧМ сигнала, в широком диапазоне частот Доплера – обнаружитель с МСФ и объединением каналов блоком максимального отбора до нормировки к мощности сигнала в скользящем по дальности окне или выходов пороговых устройств после нормировки по «ИЛИ».

По результатам исследований по обнаружению целей, движущихся с разными радиальными скоростями, предложено разбить диапазон доплеровских частот (без учёта знака) на 2 поддиапазона и применять в каждом из них разные типы сигналов и соответствующие им обнаружители со стабилизацией вероятности ложной тревоги:

- 0...12,5 кГц – при отсутствии мощных сигналов местных предметов рекомендован обнаружитель НЧМ сигнала с одноканальным СФ, при этом можно получить выигрыш в пороговом сигнале до 1,5...3,5 дБ по отношению к обнаружителю невзвешенного ЛЧМ сигнала (относительно ЛЧМ сигнала с весовой обработкой – до 2 дБ). При наличии мощных сигналов местных предметов рекомендован двухканальный обнаружитель ЛЧМ сигналов;

- 12,5...140 кГц – двухканальный обнаружитель ЛЧМ сигнала, выигрыш у обнаружителя НЧМ сигнала с одноканальным СФ может составлять 2...10 дБ, а у обнаружителя НЧМ сигнала с МСФ – 1...2 дБ и более.

ПЧМ сигнал. В импульсных РЛС для определения скорости объектов оценивают частоту Доплера. Для однозначной оценки частоты Доплера требуется не менее 3-х импульсов, что требует временных затрат. Поэтому актуальной является задача получения информации о скорости движения за меньшее время, которая позволит осуществить своевременную скоростную селекцию и уменьшить число ложных отметок. Такую возможность даёт применение пачечных сигналов, частным случаем которых являются сигналы с ПЧМ. При применении пачечных сигналов и ПЧМ сигналов можно получить близкие результаты, однако при скважности передатчиков РЛС порядка 10...50 реализовать излучение ПЧМ сигнала может быть проще, чем прерывистого пачечного сигнала.

На рисунке 4 приведены законы изменения мгновенной частоты для ЛЧМ сигнала и сигнала с линейной периодической ЧМ.

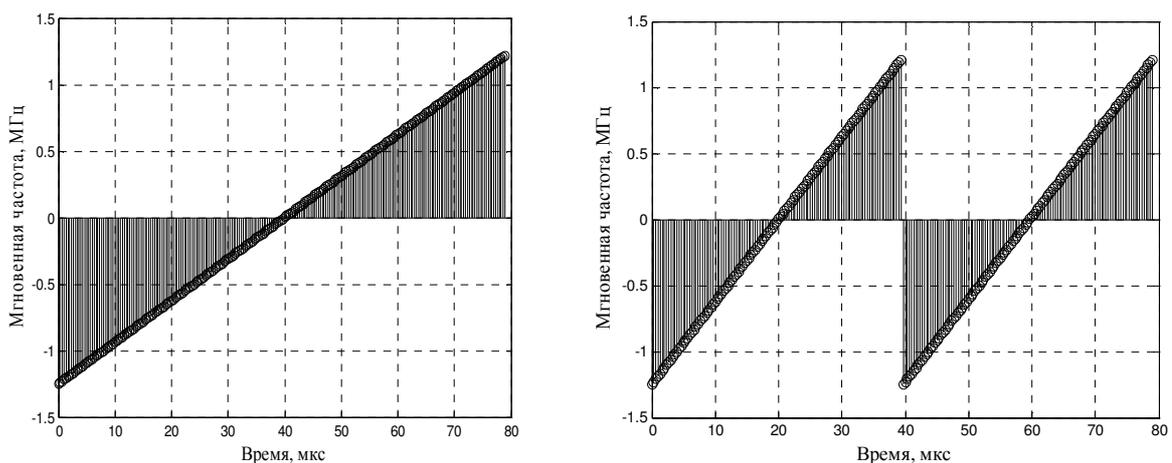


Рисунок 4 – Закон изменения мгновенной частоты:

а – ЛЧМ сигнал, б – сигнал с линейной периодической ЧМ (2 периода)

Однозначную оценку частоты Доплера \hat{F}_d для пачки из 3-х ЛЧМ импульсов с вобуляцией ΔT периода повторения импульсов T можно получить по междупериодной разности фаз:

$$e^{j\hat{\Phi}_{21}} = \frac{x_2 \cdot x_1^*}{|x_2 \cdot x_1|}, e^{j\hat{\Phi}_{32}} = \frac{x_3 \cdot x_2^*}{|x_3 \cdot x_2|}, \hat{F}_d = \frac{\arg(e^{j(\hat{\Phi}_{32} - \hat{\Phi}_{21})})}{2 \cdot \pi \cdot \Delta T},$$

где (x_1, x_2, \dots, x_3) – комплексные отсчёты отклика СФ в 3-х периодах, $e^{j\hat{\Phi}_{21}}$, $e^{j\hat{\Phi}_{32}}$ – оценки разностей фаз эхо-сигналов во 2-м и 1-м и 3-м и 2-м периодах соответственно.

\arg – операция получения фазы комплексного числа.

При обработке ПЧМ сигнала в СФ, рассчитанном на сжатие сигнала длительностью τ/N , на выходе СФ появляется N -когерентных сжатых сигналов, разнесённых на τ/N , что позволяет оценить частоту Доплера в одноимпульсной процедуре:

$$\hat{F}_{dpcm} = \frac{\arg \left(\frac{\sum_{i=1}^{N-1} x_{pcm}(t - ((N-1) - i) \cdot \tau/N) \cdot x_{pcm}^*(t - ((N-1) - (i-1)) \cdot \tau/N)}{\sum_{i=1}^{N-1} |x_{pcm}(t - ((N-1) - i) \cdot \tau/N) \cdot x_{pcm}^*(t - ((N-1) - (i-1)) \cdot \tau/N)|} \right)}{2 \cdot \pi \cdot \tau/N},$$

где x_{pcm} – комплексные отсчёты, отстоящие на τ/N и соответствующие пику огибающей отклика СФ на ПЧМ сигнал.

Интерполяция пика амплитуды сигналов. Временное положение пикового значения огибающей сжатого сигнала может не совпадать с моментами взятия отсчетов, что приводит к потерям при обнаружении сигналов, ухудшению точности оценки временного положения сигнала, особенно при низкой частоте дискретизации. На рисунке 5 наглядно показано влияние сдвига внутри интервала дискретизации на форму огибающей сжатого сигнала.

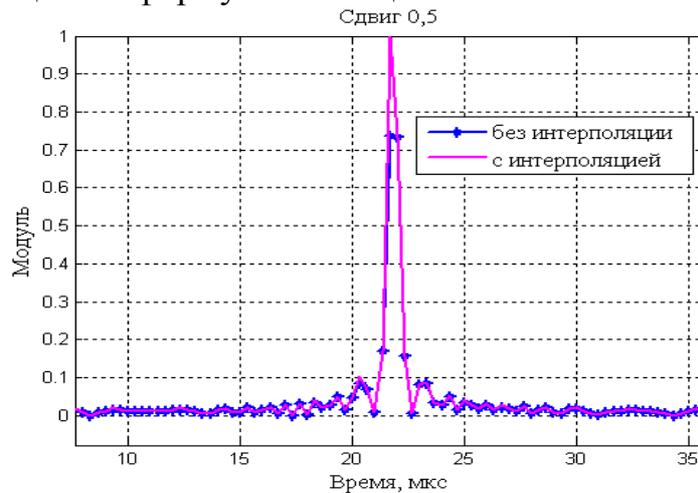


Рисунок 5 – Огибающая сигнала на выходе фильтра сжатия

В работе при участии автора разработаны алгоритмы некогерентной (последетекторной) интерполяции, позволяющие уменьшить потери обнаружения

сигнала в окрестности корреляционного пика при низкой частоте дискретизации. Проведён сравнительный анализ эффективности алгоритмов квадратурной (додетекторной) и некогерентной интерполяции.

Первое устройство некогерентной интерполяции включает в себя K - каналов, соответствующих разной величине временного смещения $\Delta\tau$ ($\Delta\tau = 0$ в 1-м канале и $\Delta\tau = \tau_d/2$ в K -м канале) внутри половины интервала дискретизации τ_d . Для каждого канала в память устройства оценки записываются отсчёты модуля сжатого сигнала без шума x , соответствующие пиковому отсчёту и смежным с ним отсчётам. Для всех каналов вычисляется коэффициент корреляции отсчётов огибающей принятого сигнала y с записанными в память известными отсчётами сигнала. Идентификация ситуации, которой соответствует истинное временное смещение $\Delta\tau$ отсчётов входного сигнала относительно коэффициентов СФ, происходит при выборе канала, в котором коэффициент корреляции максимален.

По результатам проведённого автором исследования установлено, что для восстановления амплитуды сигнала достаточно использовать 2 отсчёта сжатого сигнала, которые соответствуют моментам времени $t = -1,0$ или $t = 0,+1$. В этом случае коэффициент корреляции $\hat{\rho}(\Delta\tau)$ и амплитуда сигнала \hat{A}_p для некогерентного интерполятора по критерию минимума среднего квадрата ошибки равны:

$$\hat{\rho}(\Delta\tau) = \frac{y_0 \cdot x_0(\Delta\tau) + z \cdot x_1(\Delta\tau)}{\sqrt{(x_0^2(\Delta\tau) + x_1^2(\Delta\tau)) \cdot (y_0^2 + z^2)}}, \quad \hat{A}_p = \frac{y_0 \cdot x_0(\Delta\tau) + z \cdot x_1(\Delta\tau)}{x_0^2(\Delta\tau) + x_1^2(\Delta\tau)}, \quad (2)$$

$$z = \max(y_{-1}, y_1)$$

Пусть для некогерентной интерполяции по отношению отсчётов амплитуды сигнала $\frac{\max(x_{-1}(\Delta\tau), x_{+1}(\Delta\tau))}{x_0(\Delta\tau)} = f(\Delta\tau)$. Каждому значению $f(\Delta\tau)$ соответствует

значение интерполирующего коэффициента $k(\Delta\tau) = \frac{A_p(\Delta\tau = 0)}{A_p(\Delta\tau)}$, считываемое из

памяти устройства обработки при подаче на его вход величины $\frac{\max(y_{-1}, y_{+1})}{y_0}$, где

$x_{-1}(\Delta\tau), x_0(\Delta\tau), x_{+1}(\Delta\tau)$ – 3 отсчёта модуля сжатого сигнала без шума в моменты времени $t = -1,0,+1$ для временного смещения $\Delta\tau$, y_{-1}, y_0, y_{+1} – значения отсчётов модуля сжатого сигнала и шума. Восстановленное значение амплитуды сигнала в окрестности корреляционного пика для некогерентной интерполяции по отношению отсчётов амплитуды сигнала равно:

$$\hat{A}_p = y_0 \cdot k(\Delta\tau) \quad (3)$$

Квадратурная интерполяция выполнялась на входе детектора огибающей для каждой квадратуры сигнала с предварительным увеличением частоты дискретизации в 2 раза. Для осуществления интерполяции в каждой квадратуре

устройства обработки устанавливался фильтр нижних частот с конечной импульсной характеристикой вида $\sin(x)/x$. После интерполяции и получения огибающей сигнала частота следования отсчётов понижалась по критерию «максимум из двух».

Исследования показали, что при отсутствии весовой обработки эффективно и достаточно использовать всего 2 канала некогерентного интерполятора (2), а при применении весовой обработки по Хэммингу эффективно применение 1 канала некогерентного интерполятора (2) или квадратурного интерполятора, при этом выигрыш в пороговом сигнале в среднем составляет до 1,5 дБ и 0,4 дБ соответственно.

Интерполяторы пика амплитуды сигнала реализованы на ПЛИС. Установлено, что наименьшее количество ресурсов, необходимых для реализации, требуется для интерполятора по отношению амплитуд сигнала (3). При этом будет иметь место проигрыш $\approx 0,4$ дБ квадратурному интерполятору при весовой обработке по Хэммингу и многоканальному интерполятору (2) при отсутствии весовой обработки.

Третья глава посвящена алгоритмам обнаружения с некогерентным накоплением пачки импульсов и защите РЛС от отражений от «ясного неба».

В качестве помеховых воздействий рассматриваются несинхронные шумовые и точечные, неоднородные по дальности помехи и помехи от сверхрефракции, отражения от «ясного неба».

Для защиты РЛС от отражений от «ясного неба» для пачки импульсов с вобуляцией периода повторения импульсов известно применение алгоритма НН-ЧП. Его недостаток заключается в ухудшении характеристик обнаружения целей, движущихся с малыми радиальными скоростями.

Для повышения эффективности алгоритма НН-ЧП в работе предлагается применение двух параметров вобуляции. Предложенный алгоритм НН-ЧП для пачки импульсов с двумя параметрами вобуляции, дополняющий алгоритм НН-ЧП, имеет вид:

$$\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |x_i| > C(n) \cap \left(|\widehat{F}_{d1}| > C_{f1}(m, k-m) \cup |\widehat{F}_{d2}| > C_{f2}(k-m, n-k) \right), \quad (4)$$

где (x_1, x_2, \dots, x_n) – комплексные отсчёты отклика СФ в n -периодах, импульсы в периодах с 1-го по m -й следуют с интервалом T , импульсы с $(m+1)$ -го по k -й следуют с интервалом $(T + \Delta T_1)$, импульсы с $(k+1)$ -го по n -й следуют с интервалом $(T + \Delta T_2)$,

$$\widehat{F}_{d1} = \frac{\arg(e^{j(\widehat{\phi}_2 - \widehat{\phi}_1)})}{2 \cdot \pi \cdot \Delta T_1}, \quad \widehat{F}_{d2} = \frac{\arg(e^{j(\widehat{\phi}_3 - \widehat{\phi}_2)})}{2 \cdot \pi \cdot (\Delta T_2 - \Delta T_1)} - \text{оценки частоты Доплера,}$$

$$e^{j \cdot \widehat{\phi}_1} = \sum_{i=2}^m \frac{x_i \cdot x_{i-1}^*}{|x_i \cdot x_{i-1}^*|}, \quad e^{j \cdot \widehat{\phi}_2} = \sum_{i=m+2}^k \frac{x_i \cdot x_{i-1}^*}{|x_i \cdot x_{i-1}^*|}, \quad e^{j \cdot \widehat{\phi}_3} = \sum_{i=k+2}^n \frac{x_i \cdot x_{i-1}^*}{|x_i \cdot x_{i-1}^*|},$$

$\Delta T_1, \Delta T_2$ – параметры вобуляции,

$C_{f1}(m, k - m), C_{f2}(k - m, n - k)$ – частотные пороги,

\cup – операция логического «ИЛИ».

Для уменьшения радиальных скоростей обнаруживаемых целей при малом числе ложных отметок в работе предложен алгоритм НН-ЧП для нескольких пачек импульсов одного углового направления, а в условиях ограниченного временного баланса – алгоритм НН-ЧП для пачек импульсов смежных лучей ДНА при её сканировании по углу места или азимуту.

Алгоритм обнаружения, включающий некогерентное накопление амплитуд сигналов и бинарное накопление превышений частотных порогов, аналитическая запись которого одинакова для случая обработки пачек импульсов одного углового направления и при сканировании ДНА, имеет вид:

$$\frac{1}{R} \cdot \sum_{r=1}^R \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |x_{ir}| \right) > C_{HH}(n, R) \cap \sum_{r=1}^R \left(|\hat{F}_{d_r}| > C_{f_{HHB}}(n, R) \right) = R,$$

где x_{ir} – комплексные отсчёты отклика СФ в i -м периоде r -й пачки импульсов (или r -го луча ДНА), $i = 1 \dots n$, $r = 1 \dots R$,

$C_{HH}(n, R)$ – амплитудный порог,

\hat{F}_{d_r} – оценка частоты Доплера, полученная по r -й пачке (r -му лучу),

$C_{f_{HHB}}(n, R)$ – частотный порог,

\cap – операция логического «И»

В некоторых случаях вместо некогерентного накопления амплитуд сигналов пачек импульсов одного углового направления или смежных лучей ДНА ценой некоторых потерь в пороговом сигнале технически проще реализовать бинарное накопление. В этом случае алгоритм НН-ЧП по критерию « K из R » имеет вид:

$$\sum_{r=1}^R \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |x_{ir}| > C_{BH}(n, R, K) \right) \geq K \cap \sum_{r=1}^R \left(|\hat{F}_{d_r}| > C_{f_{BH}}(n, R) \right) = R, \quad (5)$$

где $C_{BH}(n, R, K)$ – амплитудный порог, $C_{f_{BH}}(n, R)$ – частотный порог.

Для повышения защищённости РЛС от отражений от «ясного неба» в работе предлагается применять алгоритм НН-ЧП для ПЧМ сигнала:

$$Z(t) > C_{pcm}(N) \cap \left| \hat{F}_{d_{pcm}} \right| > C_{f_{pcm}} \cap Z(t - \tau/N) < Z(t) > Z(t + \tau/N), \quad (6)$$

где $Z(t) = \sum_{i=1}^N |x_{pcm}(t - ((N - 1) - (i - 1)) \cdot \tau/N)|$ – результат некогерентного накопления сигнала,

$C_{pcm}(N)$ – амплитудный порог обнаружения ПЧМ сигнала, зависящий от числа периодов N ПЧМ сигнала, $C_{f_{pcm}}$ – частотный порог.

В работе предлагается следующий способ адаптации частотного порога к мощности сигнала, использующий информацию только текущего обзора. Для максимально возможной ширины спектра отражений от «ясного неба», номинальной вероятности ложной тревоги и разных значений мощности сигнала с шагом 1 дБ рассчитываются частотные пороги, которые далее записываются в память устройства обработки сигналов. По величине оценки мощности принятого сигнала из памяти устройства обработки считывается соответствующий частотный порог, который далее используется в НН-ЧП.

На рисунке 6 для алгоритмов (4) – (6) показаны минимальные радиальные скорости целей, при которых для фиксированного значения мощности сигнала и номинальной вероятности ложной тревоги от отражений от «ясного неба» обеспечивается вероятность обнаружения цели в соответствующем алгоритме, равная 0,5. Расчёты проведены для следующих моделей зондирующих сигналов: для 1-й – 3-х пачек из 3-х ЛЧМ импульсов с $\Delta T = 40$ мкс, ПЧМ сигнала из 2-х периодов с длительностью одного периода 40 мкс и для 1-й пачки из 4-х ЛЧМ импульсов с $\Delta T_1 = 40$ мкс и $\Delta T_2 = 120$ мкс, ширина спектра цели – 2 Гц, ширина спектра помехи – 40 Гц, $T = 1$ мс, вероятность ложной тревоги от отражений от «ясного неба» – не выше 10^{-2} . Рассмотрен случай обработки нескольких лучей ДНА по алгоритму НН-ЧП (5) по критерию « R из R », шаг сканирования равнялся 1 град, при каждом повторении эксперимента цель имела случайное смещение относительно максимума основного лепестка ДНА в пределах половины шага сканирования (ширина ДНА по уровню -3дБ ≈ 2 град).

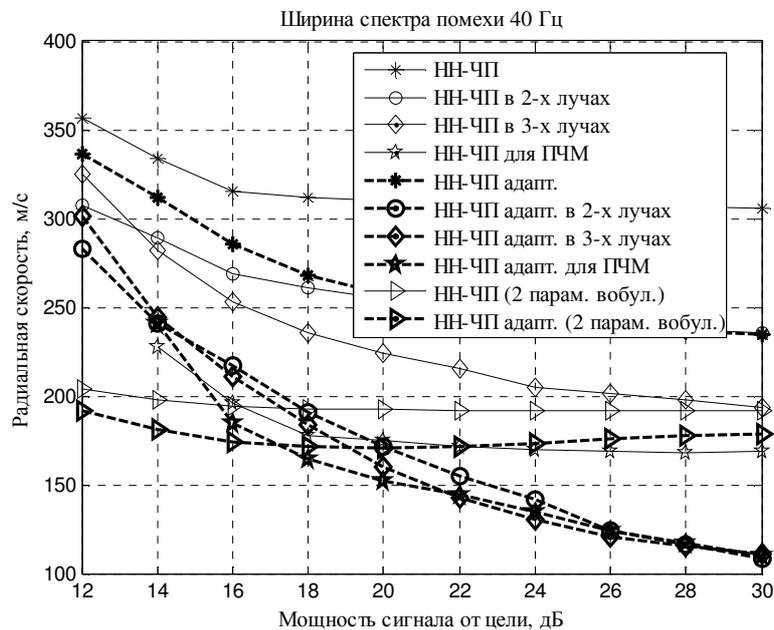


Рисунок 6 – Минимальные радиальные скорости обнаруживаемых целей

Таким образом, для уменьшения радиальных скоростей обнаруживаемых целей при малом числе ложных отметок предложено обрабатывать по алгоритму НН-ЧП:

- пачки импульсов с двумя параметрами возбуждения,
- ПЧМ сигналы,
- пачки ЛЧМ сигналов одного углового направления или смежных лучей ДНА, а также осуществлять адаптацию частотного порога к мощности сигнала.

Алгоритмы некогерентного накопления с защитой от помех. Улучшенные алгоритмы с некогерентным накоплением пачек импульсов объединены в алгоритм, который адаптируется к типу помехи. Алгоритм исключает периоды пачки с несинхронными точечными и протяжёнными по дальности помехами, а также бланкирует элемент дальности при обнаружении помех от сверхрефракции, отражений от «ясного неба».

Блок-схема разработанного алгоритма обнаружения сигнала от цели при априорно неизвестном виде помехи приведена на рисунке 7.

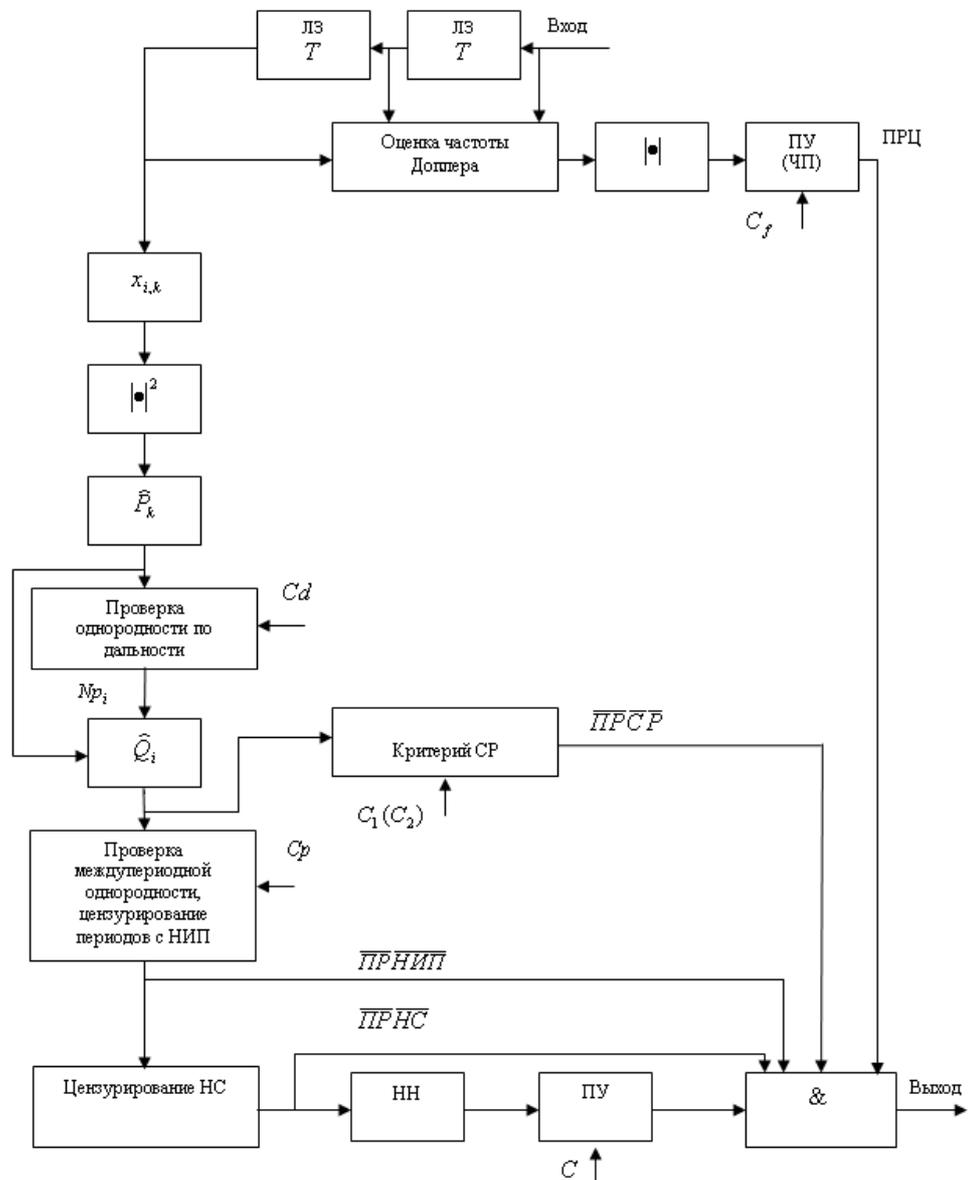


Рисунок 7 – Блок-схема алгоритма обнаружения движущейся цели

ПРЦ – признак обнаружения цели в алгоритме НН-ЧП, *ПРСР* – признак обнаружения сигнала СР, *ПРНИП* – признак обнаружения НИП, *ПРНС* – признак обнаружения НС, & – логическое «И». Черта над признаками обозначает инверсию. На схеме приведены пороги и переменные, подробно описанные в тексте диссертации.

Поскольку обнаружение сигнала происходит в условиях неизвестного вида помехи, ошибки ее классификации очевидным образом приведут к низким показателям обнаружения цели или ложным тревогам. Правильная классификация вида помехи необходима для адекватной работы обнаружителя сигналов цели.

В таблице показаны максимальные вероятности классификации при действии на входе обнаружителя того или иного типа эхо-сигнала мощностью от 0 до 30 дБ (на выходе СФ). В таблице обозначено: ОЯН – отражения от «ясного неба», НС – несинхронный точечный сигнал, НИП – несинхронная импульсная помеха, СР – помеха от сверхрефракции. Рассмотрена пачка из 6 импульсов. НС и/или НИП присутствовали в 2-х разных периодах пачки. Вероятность ложной тревоги по шумам – 10^{-6} , вероятность ложного цензурирования НС или НИП – 10^{-1} , вероятность ложной тревоги от СР – 10^{-1} , вероятность ложной тревоги от отражений «от ясного неба» – не более 10^{-2} . Частота Доплера сигнала от цели – 12 кГц, частота Доплера отражений от «ясного неба» – 1кГц, вобуляция – 40 мкс, основной период – 1мс. Частотные пороги устанавливались для ширины доплеровского спектра помех, равной 40 Гц.

Таблица – Максимальная вероятность классификации эхо-сигнала

Сигнал или помеха	Вероятность обнаружения	Вероятность классификации				
		Цель	ОЯН	НС	НИП	СР
Цель	1	1	0,003	0,002	0	0,092
ОЯН	0,005	0,005	1	0,001	0	0,089
НС	0,021	0,021	0,012	1	0	0
НИП	0	0	0	0	1	0
НС+НИП	0	0	0	1	1	0
СР	0,006	0,006	0,092	0	0	0,934

Из анализа таблицы следует, что разработанный алгоритм обеспечивает высокую вероятность правильной классификации типа помехи или сигнала (пересечение одноимённых строк и столбцов таблицы), а также помех в виде сложного помехового воздействия (пересечение строки «НС+НИП» со столбцами «НС» и «НИП»). В последнем случае каждый тип помехи, составляющий сложное помеховое воздействие, имеет высокую вероятность правильной классификации.

В заключении перечислены основные результаты диссертационной работы:

1. Предложен двухканальный обнаружитель ЧМ сигналов со стабилизацией вероятности ложной тревоги, в одном из каналов которого применяется весовая обработка, позволяющий обнаруживать малоразмерные цели на фоне мощных боковых лепестков от других целей, при этом выигрыш в величине порогового сигнала относительно обнаружителя с одним каналом составляет 1...3 дБ.

2. Получено, что применение синтезированного НЧМ сигнала с низким уровнем боковых лепестков эффективно для обнаружения аэродинамических целей в диапазоне частот Доплера 0... 12 кГц (по модулю), наблюдаемых на фоне других близкорасположенных по дальности аэродинамических целей мощностью до 30 дБ, при этом отсутствуют потери на весовую обработку, пороговый сигнал относительно обнаружителя невзвешенного ЛЧМ сигнала меньше до 3,5 дБ.

3. Для уменьшения потерь при низкой частоте дискретизации предложено использовать додетекторную или последдетекторную интерполяцию пика амплитуды сигнала. Показано, что при отсутствии весовой обработки эффективно и достаточно использовать всего 2 канала некогерентного интерполятора по критерию минимума среднего квадрата ошибки, а при применении весовой обработки по Хэммингу эффективно применение квадратурного интерполятора, выигрыш в пороговом сигнале при этом составляет до 1,5 дБ и 0,4 дБ соответственно.

4. Для уменьшения радиальных скоростей обнаруживаемых целей и бланкирования элемента дальности при обнаружении отражений от «ясного неба» предложен алгоритм НН-ЧП для пачки импульсов с двумя параметрами вобуляции, алгоритм НН-ЧП для ПЧМ сигнала и для 2-х – 3-х пачек ЛЧМ импульсов, излучённых в одном угловом направлении. Для получения выигрыша во времени предложено использовать межлучевую обработку. Применение весовой обработки при дополнительном расширении главного лепестка ДНА позволяет уменьшить потери в пороговом сигнале. Наилучшие результаты по величине порогового сигнала при обнаружении «тихоходных» и среднескоростных целей имеет алгоритм обнаружения, включающий некогерентное накопление амплитуд сигналов и бинарное накопление превышений частотных порогов. Для уменьшения аппаратных затрат предложено применять бинарное накопление амплитуд сигналов (критерий « K из R ») и бинарное накопление превышений частотных порогов (критерий « R из R »), при этом без перестройки несущей частоты РЛС для бинарного накопления амплитуд сигналов рекомендуется критерий « R из R », с перестройкой несущей частоты эффективнее применять критерий «1 из R ». Показано, что адаптация ЧП к мощности сигнала позволяет уменьшить минимальные радиальные скорости обнаруживаемых целей в среднем в 1,3...2 раза, что при мощности сигнала 12...30 дБ соответствует значениям радиальных скоростей 300... 235 м/с (1 пачка ЛЧМ импульсов) и 300...110 м/с (2...3 пачки ЛЧМ импульсов и ПЧМ сигнал), относительно НН-ЧП для 1-й пачки в зависимости от ширины спектра помехи – в 3...4,5 раза.

5. Разработан алгоритм обнаружения, обеспечивающий высокую вероятность классификации сигнала от движущейся цели и помех типа отражения от «ясного неба», несинхронные сигналы, несинхронные импульсные помехи, помехи от сверхрефракции. В условиях помех от сверхрефракции вероятность ложной тревоги не превышает $10^{-2} \dots 10^{-1}$, а потери обнаружения сигналов от целей не превышают 0,5 дБ.

Список публикаций по материалам диссертационной работы
Статьи в журналах перечня ВАК

1. Аксельрод, Г.З. Применение сигнала с нелинейной частотной модуляцией для уменьшения потерь обнаружения / Г.З. Аксельрод, К.А. Елагина // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2015. – №2. – С. 40 – 43.

2. Елагина, К.А. Эффективность обнаружителей сигналов в условиях точечных пассивных помех / К.А. Елагина // Вестник Концерна ПВО Алмаз-Антей. – 2016. – №1. – С. 69 – 75.

3. Елагина, К.А. Способы обнаружения сигналов с линейной и нелинейной частотной модуляцией со стабилизацией вероятности ложной тревоги / К.А. Елагина // Цифровая обработка сигналов. – 2016. – №2. – С. 20 – 25.

Патент

4. Способ двухканального обнаружения радиолокационных сигналов со стабилизацией вероятности ложной тревоги: пат. 2585257 Рос. Федерация: МПК G01S 7/36 / Елагина К.А., Аксельрод Г.З.; заявитель и патентообладатель АО «НПО НИИИП-НЗиК». – № 2015117986/07; заявл. 13.05.15; опубл. 27.05.2016, Бюл. № 15. – 9 с.

Прочие работы

5. Елагина, К.А. Алгоритм обнаружения некогерентной пачки импульсов в условиях воздействия несинхронных импульсных помех и сигналов / К.А. Елагина, И.Ф. Лозовский // Материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. «Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем», Ульяновск, 22-23 сентября 2011г. – С. 43 – 46.

6. Елагина, К.А. Обнаружение некогерентной пачки импульсов в условиях воздействия отражения от «ангелов» и несинхронных сигналов / К.А. Елагина, И.Ф. Лозовский // Материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. «Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем», Ульяновск, 22-23 сентября 2011 г. – С. 46 – 49.

7. Elagina, K. Découverte du groupe incohérent des impulsions aux conditions de la réflexion des «anges» et des signaux insynchrones / Elagina K., Lozovsky I. // Материалы науч.-практ. конф. молодых ученых «Progress Through Innovative Technologies – 2012». Новосибирск, 5 апреля 2012 г.: Изд-во Новосиб. госуд. техн. ун-та, 2012. – С 36 – 37.

8. Елагина, К.А. Алгоритмы некогерентной интерполяции пика амплитуды при обнаружении ЛЧМ сигнала / К.А.Елагина, И.Ф.Лозовский // Сборник научных трудов «Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем». Ульяновск, 2012г.: Изд-во Ульяновского госуд. техн. ун-та, 2012. – С. 31 – 39.

9. Елагина, К.А. Совокупные потери обнаружения в цифровых системах обработки с интерполяторами пика амплитуды сигналов / К.А. Елагина, И.Ф. Лозовский // Материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь» (RLNS – 2013), 16-18 апреля 2013 г. – Т.1 – С. 289 – 297.

10. Елагина, К.А. Обнаружение некогерентной пачки импульсов в условиях разного вида помех / К.А.Елагина, И.Ф.Лозовский // Вестник воздушно-космической обороны. – 2014. – №3. – С. 97 – 101.

11. Елагина, К. А. Алгоритм обнаружения в условиях помех «АНГЕЛ-ЭХО»/ К.А. Елагина // Материалы XVIII Всерос. науч.-техн. конф. «Современные проблемы радиоэлектроники». Красноярск, 6-7 мая 2015 г.: Изд-во Сиб. федер. ун-та, 2015. Т.1. – С. 40–45.

12. Аксельрод, Г.З. Применение сигналов с пилообразной ЧМ / Г.З. Аксельрод, К.А. Елагина // Материалы XVIII Всерос. науч.-техн. конф. «Современные проблемы радиоэлектроники». Красноярск, 6-7 мая 2015 г.: Изд-во Сиб. федер. ун-та, 2015. Т.1. – С. 45–50.

13. Елагина, К.А. Оценка частоты Доплера сигналов с линейной и периодической ЧМ / К.А. Елагина // Материалы IX Всерос. конф. «Радиолокация и радиосвязь». Москва, 23-25 ноября 2015 г.: ИРИЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2015. — С. 39 – 42.

14. Елагина, К.А. Эффективность обработки пачек импульсов в смежных лучах ДНА в условиях «Ангел-эхо» / К.А.Елагина // Материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП – 2016). Новосибирск, 3 – 6 октября 2016 г.: Изд-во Новосиб. госуд. техн. ун-та, 2016. Т.12. – С. 19 – 23.

Елагина Ксения Александровна

**АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И РАЗРЕШЕНИЯ ЧМ СИГНАЛОВ
В РЛС ОБЗОРА ПРИ СЛОЖНОМ ПОМЕХОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

Автореф. дисс. на соискание учёной степени канд. техн. наук

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г.Новосибирск, пр. К.Маркса,20,
Тел./факс (383) 346-08-57

Формат 60 x 84/16.Объем 1,5 п.л. Тираж экз.
Заказ . Подписано в печать . 2017 г.