

На правах рукописи

Белок

БЕЛОКУРОВ ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ МЕЖОБЗОРНОЙ
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ МАЛОРАЗМЕРНЫХ И
СВЕРХМАНЕВРЕННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ
ОБЪЕКТОВ С УЧЁТОМ БОРТОВОЙ
НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ**

2.2.16 — Радиолокация и радионавигация (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Москва
2022

Работа выполнена на кафедре радиотехнических систем
ФГБОУВО «Рязанский государственный
радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина».

- Научный консультант: **Кошелев Виталий Иванович**,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехнических систем ФГБОУВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина»
- Официальные оппоненты: **Меркулов Владимир Иванович**,
доктор технических наук, профессор, заместитель генерального конструктора АО «Концерн «Вега» (г. Москва);
Ильчук Анатолий Ростиславович,
доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина» (г. Фрязино);
Костров Виктор Васильевич,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Радиотехника» МИВЛГУ (г. Муром).
- Ведущая организация: АО «Корпорация-«Фазотрон-НИИР»,
(115516, г. Москва, Кавказский бульвар, 59)

Защита состоится 11 октября 2022 года в 10.00 часов на заседании диссертационного 24.2.327.01 при ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, ул. Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте МАИ по ссылке:
<http://www.mai.ru/events/defence>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4, Ученый совет МАИ.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2022 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета, к.т.н.



А. А. Горбунова

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время аэродинамические возможности современных летательных аппаратов (ЛА) существенно развиваются. Появляются ЛА, способные выполнять полёт в режиме сверхманевренности. Широкое распространение получают ЛА пятого поколения, особенностью которых является возможность совершать манёвры с существенными перегрузками, а также различные фигуры высшего пилотажа.

В условиях совместного маневрирования носителя бортовой РЛС (БРЛС) и объекта в передней полусфере резко снижается время когерентного накопления отражённых сигналов. Частота Доплера отражённого сигнала начинает меняться в процессе когерентного накопления пачки импульсов, приводя к «размыванию» спектра отражённого сигнала по каналам скорости, что приводит к уменьшению вероятности правильного обнаружения и энергетической дальности действия РЛС.

Важной особенностью, которая осложняет обнаружение и измерение параметров движения ЛА пятого поколения, является снижение радиолокационной заметности за счёт применения специальной геометрии и покрытия фюзеляжа. Анализ диаграмм обратного рассеивания подобных объектов показывает, что уровень отражённого сигнала в передней полусфере меньше на несколько порядков по сравнению с уровнем сигнала, отражённого в задней полусфере. Это приводит к существенному уменьшению энергетической дальности действия бортовой РЛС. Увеличение мощности передатчика ограничено, поэтому основным способом повышения энергетического потенциала является увеличение времени когерентного накопления на этапе первичной обработки, а также межобзорное накопление отражённых сигналов.

Другим направлением развития средств воздушного наблюдения является широкое распространение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Особенностью подобных объектов является малое значение эффективной площади рассеивания (ЭПР). Малым значением ЭПР также обладает широкий спектр средств воздушного нападения.

Таким образом, задача обнаружения малоотражающих сверхманевренных пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов при помощи бортовой РЛС в настоящее время является актуальной.

Традиционный подход, применяемый в современных бортовых РЛС, заключается в разделении обработки радиолокационной информации на первичную и вторичную. На этапе первичной обработки решаются задачи обнаружения и измерения параметров движения объекта, которые называются отметками. Данные операции в БРЛС выполняются в антенной системе координат (СК). После обнаружения отметки поступают в систему вторичной обработки, в которой решаются задачи построения трасс

по поступающим отметкам в соответствующей СК. При этом каждый этап обработки оптимизируется отдельно. Решению задачи обнаружения на этапе первичной обработки посвятили свои работы такие учёные, как Бакут П.А., Ширман Я.Д., Бакулев П.А., Сосулин Ю.Г., Лёзин Ю.С., Лукошкин А.П., Чапурский В.В., Репин В.Г., Тартаковский Г.П., Гаврилов К.Ю., Попов Д.И., Кошелев В.И., Черемисин О.П., Паршин Ю.Н., Костров В.В., Чижов А.А., Сычёв М.И. и др., задачи обнаружения сверхманевренных объектов решались в работах Ильчука А.Р., Кузьменкова Ю.В., Логинова В.М., Аганина А.Г., Самарина О.Ф., Corazza G., Carlson V. Решению задач вторичной обработки при сопровождении воздушных объектов, а в некоторых трудах в условиях их малозаметности и сверхманевренности посвятили свои работы такие учёные, как Кузьмин С.З., Коновалов А.А., Перов А.И., Меркулов В.И., Юдин В.Н., Фарина А., Bar-Shalom Y., Barniv Y., Fortman T., Blackman S., Li X., Kirubarajan T., Blom H., Bloem E., Deb S., Doucet A., Boers Y., Driessen H., Gordon N., Mahler R., Kreucher C., Kastella K., Morelande M., Reid D. и др. В решении задач цифровой реализации разработанных алгоритмов можно отметить работы известных специалистов в области ЦОС: Рабинера Л., Гоулда Б., Марпл-мл. С.Л., В.В. Витязева, Гольденберга Л.М. и др.

Современным действенным подходом к повышению эффективности обнаружения малоотражающих сверхманевренных объектов является подход, основанный на совмещении первичной и вторичной обработок радиолокационной информации в один этап. Использование данного подхода в бортовых РЛС имеет отличительные особенности, связанные с движением носителя РЛС, а также существенным влиянием ошибок определения его угловой ориентации на характеристики обнаружения алгоритмов межобзорного накопления. Использование известных алгоритмов основанных на совмещении первичной и вторичной обработки радиолокационной информации в один этап без учета навигационных параметров подвижного носителя бортовой РЛС, приводит к существенным потерям в пороговом отношении сигнал-шум и как следствие, к снижению энергетической дальности действия.

Объектом исследования являются алгоритмы обнаружения-сопровождения целей, функционирующие в современных и перспективных БРЛС и предназначенные для обнаружения малоотражающих сверхманевренных объектов.

Предметом исследования является совокупность алгоритмов «сопровождения до обнаружения», интегрированных с каналом навигационного обеспечения носителя РЛС.

Цель исследования: повышение эффективности обнаружения малоотражающих сверхманевренных объектов в бортовых РЛС как в системах первичной обработки, так и с учетом их совмещения с системами

вторичной обработки и межобзорным накоплением отражённых сигналов, а также с учётом навигационной информации носителя БРЛС.

Для достижения цели исследования в диссертации поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Исследовать влияние радиального ускорения малоотражающего сверхманевренного объекта на характеристики обнаружения и энергетическую дальность БРЛС с целью выбора числа каналов по ускорению на основе максимизации средней вероятности правильного обнаружения в многоканальной схеме построения системы первичной обработки радиолокационной информации.

2. Синтезировать квазиоптимальные алгоритмы обнаружения малоотражающих сверхманевренных объектов на этапе первичной обработки радиолокационной информации, которые обеспечивают выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум, при приемлемом числе вычислительных операций. Синтезировать алгоритмы межпачечного накопления отражённых сигналов в режимах устранения неоднозначности по дальности в бортовой РЛС.

3. Разработать метод межобзорного накопления отражённых сигналов малоотражающего сверхманевренного объекта в БРЛС, который учитывает взаимные перемещения носителя БРЛС и радиолокационного объекта на основе использования информации об угловой ориентации носителя и обеспечивает выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум.

4. Разработать алгоритм межобзорного когерентного накопления отражённых сигналов малоотражающего сверхманевренного объекта, позволяющий повысить отношение сигнал-шум по сравнению с известным алгоритмом некогерентного накопления отражённых сигналов.

5. Разработать способ аналитического вычисления порогов обнаружения в алгоритмах межобзорного накопления на фоне негауссовских шумов, который реализуем в реальном времени.

6. Разработать алгоритм межобзорного накопления отражённых от малоотражающего объекта сигналов на фоне негауссовских коррелированных помех.

7. Разработать алгоритм межобзорного накопления отражённых сигналов от зависшего БПЛА с борта подвижного носителя РЛС.

8. Разработать алгоритм сопровождения малоотражающего сверхманевренного объекта на основе использования многомодельного фильтра Калмана и гауссовского парциального фильтра, позволяющий повысить точность оценки координат объекта.

9. Разработать алгоритм определения угловой ориентации повышенной точности, предназначенный для высокоманевренного носителя бортовой РЛС на основе использования многомодельного фильтра Калмана, позволяющий уменьшить потери в пороговом отношении сигнал-шум

межобзорных алгоритмов накопления.

Методы исследований, использованные в диссертационной работе, основаны на статистической теории радиотехнических систем, теории принятия решений, методах нелинейной парциальной фильтрации, методе экстремальных статистик, описании случайных процессов в виде сферических инвариантных процессов, математическом аппарате характеристических функций, методах линейной калмановской фильтрации, а также методах интегрального исчисления. Основные численные результаты исследования получены на основе аналитических методов расчётов, методов статистического моделирования и экспериментальных исследований.

Научное и практическое значение полученных результатов состоит в развитии способов и алгоритмов обнаружения малоотражающих сверхманевренных объектов, учитывающих динамику носителя бортовой РЛС и основанных на межобзорном когерентном и некогерентном накоплении отражённых сигналов, что обеспечивает заметное повышение вероятности правильного радиолокационного обнаружения таких объектов, что эквивалентно увеличению дальности действия бортовой РЛС в предельном случае до 10 %...20 %.

Достоверность научных положений диссертационной работы, основных её результатов и выводов подтверждается корректным использованием математического аппарата, близостью результатов имитационного моделирования и теоретических расчётов, а также натурных и полунатурных экспериментов, сопоставлением полученных результатов с результатами независимых источников информации.

Результаты, полученные в диссертационной работе, подтверждаются публикациями в научных изданиях, входящих в перечень ВАК для опубликования результатов докторских диссертаций по специальности 2.2.16, а также в изданиях, входящих в базу данных Scopus. Основные результаты также подтверждены натурными экспериментами и актами внедрения.

Новизна полученных результатов подтверждается также полученными тремя патентами на способы. Кроме того, основные результаты диссертации неоднократно докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Запатентованный способ и алгоритм обнаружения малоотражающих сверхманевренных объектов, обеспечивающий выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум до 4...5 дБ за счёт уменьшения числа каналов приёма при формировании порога обнаружения, а также предложенный алгоритм межпачечного накопления с возможностью раскрытия неоднозначных измерений дальности отражённых сигналов малоотражающих сверхманевренных объектов;

2. Метод межобзорной обработки отражённых сигналов малоотражающего сверхманевренного объекта, обеспечивает выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум до 2 дБ за счет совмещения последовательных секторов обзора в пространстве измерений на основе использования навигационной информации о положении и угловой ориентации носителя БРЛС;

3. Алгоритмы вычисления порога обнаружения при межобзорном накоплении на фоне негауссовского шума, обеспечивают инвариантность к закону распределения шума за счёт аналитического вычисления порога обнаружения путём аппроксимации закона распределения отсчётов при гипотезе H_0 , а также снижение вычислительных затрат в 6...8 раз за счёт использования методов численного интегрирования, по сравнению с алгоритмами, которые реализуют вычисление порога обнаружения путём моделирования;

4. Аналитически исследованный и проверенный в натурном эксперименте алгоритм межобзорной обработки отражённых от малоотражающего объекта сигналов на фоне негауссовских коррелированных помех, инвариантный к закону распределения шума, обеспечивает выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум 1,5 дБ;

5. Аналитически исследованный и проверенный в натурном эксперименте алгоритм определения угловой ориентации высокоманевренного носителя бортовой РЛС, применение которого при межобзорном накоплении отражённых радиолокационных сигналов обеспечивает выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум до 2 дБ за счёт использования многомодельного фильтра Калмана в канале обработки навигационной информации;

6. Аналитически исследованный и проверенный в натурном эксперименте алгоритм межобзорной обработки эхо-сигнала, отраженного от зависшего БПЛА, обеспечивает выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум до 2 дБ по сравнению с энергетическим приёмником за счет использования априорной информации о параметрах микродоплеровской сигнатуры отраженного сигнала, а также межобзорного накопления с учётом навигационной информации о параметрах движения носителя РЛС.

Постановка задачи диссертационного исследования, все алгоритмы и способы, а также результаты, представленные в выносимых на защиту положениях, являются **личным вкладом** соискателя в диссертационную работу. Заимствованные результаты обозначены в работе соответствующими ссылками.

Научная новизна диссертации заключается в разработке новых способов и комплекса алгоритмов обнаружения малоотражающих сверхманевренных объектов, основанных на комплексировании результатов меж-

пачечного и межобзорного накопления радиолокационной информации и информации, поступающей от навигационной системы БРЛС.

Концептуально разработан класс методов, позволяющих **интегрировать** алгоритмы первичной и часть алгоритмов, вторичной обработки радиолокационных сигналов без традиционного жесткого их разделения на этапы первичной и вторичной обработки, что является **важным обобщением** известных методов.

Полученные новые (ранее неизвестные) научные результаты состоят в следующем:

1. Разработан новый способ обнаружения маневрирующей цели. В отличие от известных алгоритмов с сегментированием входной выборки он обеспечивает заметный выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум, а по сравнению с многоканальным по скорости цели алгоритмом обеспечивает существенный выигрыш в числе вычислительных операций.

2. Разработан новый алгоритм выбора числа каналов по ускорению в многоканальном обнаружителе маневрирующей цели, который обеспечивает максимизацию средней вероятности правильного обнаружения многоканальной системы обработки.

3. Разработан новый алгоритм межпачечного накопления отражённых сигналов, в режиме работы бортовой РЛС с высокой частотой повторения импульсов при обнаружении малоотражающего сверхманевренного объекта с раскрытием неоднозначности при измерении дальности. В отличие от известных алгоритмов предлагаемый алгоритм обеспечивает коррекцию ошибок измерения дальности, вызванных ускорением цели, а также отличается более высоким отношением сигнал-шум, достигаемым межпачечным накоплением сигналов целей.

4. Разработан новый метод межобзорной обработки отражённых сигналов малоотражающего сверхманевренного объекта, учитывающий навигационную информацию о взаимных перемещениях носителя бортовой РЛС и объекта. Этот метод основан на определении смещения сектора сканирования между соседними обзорами с использованием навигационной информации, что позволяет эффективно реализовать межобзорное накопление сигналов бортовых РЛС, находящихся на подвижном носителе. Метод позволяет расширить сферу применения межобзорного накопления на более широкий класс РЛС.

5. Разработан новый алгоритм межобзорной обработки зависшего БПЛА, планерная составляющая отраженного сигнала которого не имеет доплеровского смещения частоты. В отличие от известного алгоритма обнаружения на основе анализа микродоплеровской сигнатуры, дополнительно введено межобзорное накопление с целью повышения порогового отношения сигнал-шум и, как следствие, дальности действия.

6. Разработан новый эффективный метод вычисления порога обнаружения в алгоритме межобзорной обработки на фоне негауссовского шума. В отличие от существующего алгоритма, основанного на моделировании, данный метод использует свойства характеристических функций и их численного интегрирования, что обеспечивает временной выигрыш для вычисления порога, что имеет важное практическое значение.

7. Разработан новый алгоритм стабилизации уровня ложной тревоги при межобзорном обнаружении, основанный на использовании метода моментов. В отличие от известных алгоритмов стабилизации уровня ложных тревог данный алгоритм обеспечивает заданный уровень ложных тревог при различных характерных для задач радиолокации законах распределения шума на входе порогового устройства.

8. Разработан новый алгоритм межобзорной обработки на фоне негауссовских коррелированных помех, который обеспечивает эффективное обнаружение сигналов на фоне широкого класса помех с различными законами распределения на основе использования математического аппарата сферических инвариантных процессов.

9. Разработан новый алгоритм определения угловой ориентации высокоманевренного носителя бортовой РЛС. В отличие от известных алгоритмов предложено использовать в системе угловой ориентации летательного аппарата многомодельный фильтр Калмана с перекрёстными связями. Это позволяет уменьшить ошибки угловой ориентации носителя бортовой РЛС при интенсивных маневрах и, как следствие, повысить вероятность правильного обнаружения малоразмерных малоотражающих целей.

Внедрение научных результатов диссертационной работы произведено в разработки следующих предприятий:

1) алгоритм межобзорного когерентного накопления отражённых сигналов малоотражающего сверхманевренного объекта внедрен в разработки АО «МНИИ «Агат»;

2) способ аналитического вычисления порогов обнаружения в алгоритмах межобзорного накопления на фоне негауссовского шума, основанный на использовании математического аппарата характеристических функций, внедрен в инициативные разработки АО «ГРПЗ», в рамках СЧ НИОКР «Разработка радиолокационной станции 3-х миллиметрового диапазона РЛС-ЗВ боевого вертолёта»;

3) алгоритм фильтрации выходных сигналов микромеханических гироскопов, позволяющий повысить точность определения угловой ориентации высокоманевренного носителя БРЛС. Данный алгоритм внедрен в программное обеспечение контроллера обработки выходных сигналов трёхосного микромеханического измерителя параметров движения ИПД-ММ разработки ПАО «МИЭА»;

4) алгоритм определения угловой ориентации высокоманевренного носителя БРЛС на основе использования многомодельного фильтра Калмана с перекрёстными связями внедрён в учебный процесс ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» в виде аппаратно-программного обеспечения лабораторных работ по курсам: «Системы локации и навигации», «Средства РЭБ ЛА», «Теоретические основы радиоэлектронной борьбы», «Радиотехнические системы», а также в программы целевой подготовки кадров по программе ОПК.

Результаты внедрения подтверждены соответствующими актами внедрения.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 39 научно-технических конференциях всероссийского и международного уровня в форме научных докладов. Основные результаты диссертационной работы также подтверждены результатами экспериментов.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 76 работах. Из них 1 коллективная монография, 31 статья в журналах, рецензируемых ВАК РФ, 14 публикаций в международных базах (Scopus, Web of Science), 26 докладов на всероссийских и международных научно-технических конференциях, 3 патента на способ, 1 патент на устройство. Число работ без соавторства 16, из них 7 статей в журналах, рецензируемых ВАК РФ, 8 докладов на всероссийских и международных научно-технических конференциях, 1 доклад, вошедший в базу данных Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, библиографического списка из 259 наименований и двух приложений. Диссертация содержит 338 страниц, в том числе 293 страниц основного текста, 6 таблицы и 152 рисунка.

Содержание диссертации

Во введении проведён обзор существующих методов обнаружения малоотражающих сверхманевренных объектов. Обосновывается актуальность темы научных исследований, направленной на повышение эффективности обнаружения малоотражающих сверхманевренных объектов с учётом необходимости использования навигационной информации, формулируются цели работы и поставлены соответствующие им задачи исследований. Приводятся общая структура диссертационной работы, основные положения, выносимые на защиту, и научная новизна. Даются формулировки основных понятий, терминов и определений, вводятся используемые в тексте диссертации аббревиатуры и условные обозначения.

В первой главе рассмотрен анализ диапазона изменения радиально-го ускорения сверхманевренного объекта. Проанализировано влияние радиального ускорения объекта на ряд технических характеристик систем первичной обработки, в частности на энергетическую дальность действия бортовой РЛС при обнаружении объекта в антенной СК, а также точность оценки скорости и ускорения на основе анализа матрицы Фишера.

На основе статистической теории радиолокации синтезированы оптимальный, квазиоптимальные адаптивные и неадаптивные алгоритмы и способ обнаружения малоотражающих сверхманевренных объектов в антенной СК. Введение многоканальности по радиальному ускорению приводит к компенсации фазового набега сигнала за счёт ускорения, когерентному накоплению отражённого сигнала в одном канале по скорости и увеличению вероятности правильного обнаружения. С другой стороны, введение многоканальности по радиальному ускорению приводит к необходимости увеличения порога обнаружения в каналах обнаружения, что приводит к уменьшению вероятности правильного обнаружения. В связи с этим разработан алгоритм оптимального, в соответствии с критерием максимума средней вероятности правильного обнаружения, выбора числа каналов по радиальному ускорению. Показано, что оптимальное значение числа каналов по ускорению $M_{\text{аopt}}$, составляет приблизительно 25 % от числа импульсов N пачки обрабатываемых радиоимпульсов. Так, $M_{\text{аopt}} = 128$ при $N=512$, $M_{\text{аopt}}=240$ при $N=1024$.

На основе анализа неравенства Рао - Крамера показано, что потенциальная точность оценки радиального ускорения на этапе первичной обработки зависит от выбора точки отсчёта радиального ускорения. Минимальное значение дисперсии оценки радиального ускорения достигается при выборе точки отсчёта в середине принятой пачки импульсов.

С целью сокращения числа вычислительных операций предложено использовать накопление мультипликаций. Синтезирован способ инвариантного обнаружения малоотражающего сверхманевренного объекта на основе многоканального по ускорению накопления мультипликаций. Решающее правило $\zeta_1(\mathbf{z})$ алгоритма обнаружения в m -м канале по ускорению имеет вид:

$$\zeta_1(\mathbf{z}) = \left| \sum_{j=0}^{N-2} z_{j+1} z_j^* \exp(-i(j+0,5-0,5N)\varphi'_m) \right|^2 \geq \zeta_0, \quad (1)$$

где \mathbf{z} — вектор входных отсчётов, соответствующих одному каналу по дальности и состоящий из элементов $\mathbf{z} = \{z_j\}_{j=0}^{N-1}$; φ'_m — настройка m -го канала по ускорению; ζ_0 — порог обнаружения; N — число импуль-

сов в пачке; i — мнимая единица. Оценка скорости в m -м канале по ускорению:

$$\hat{\varphi}_{c_m} = \arg \left\{ \sum_{j=0}^{N-2} z_{j+1} z_j^* \exp[-i(j + 0,5 - 0,5N)\varphi'_m] \right\}, \quad (2)$$

где $\arg\{\bullet\}$ — аргумент комплексного числа.

С практической точки зрения реализация алгоритма (1) с помощью БПФ нецелесообразна, так как частотные каналы равномерно перекрывают диапазон 2π , а диапазон значений радиального ускорения для реальных объектов существенно меньше 2π . Целесообразным является расставить частотные каналы в диапазоне изменений радиального ускорения. На данный способ обнаружения малоотражающего сверхманевренных объектов получен патент на изобретение РФ. Анализ вычислительной эффективности алгоритма обнаружения (1) показывает, что данный алгоритм позволяет существенно снизить вычислительные операции, число которых пропорционально числу каналов по ускорению, при этом пороговое отношение сигнал-шум возрастает не более чем на 0,5 дБ. С другой стороны, данный алгоритм обеспечивает выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум до 5 дБ по сравнению с алгоритмами, основанными на разбиении пачки импульсов на сегменты.

Повышение вероятности правильного обнаружения возможно при уменьшении числа каналов по радиальному ускорению и как следствие, уменьшении величины порога обнаружения в каждом из каналов. В диссертационной работе синтезирован адаптивный двухэтапный алгоритм обнаружения. На первом этапе каналы по ускорению расставляются равномерно. После этого выбирается пара соседних каналов, которые определяют новые диапазоны настройки каналов по ускорению. Пара соседних каналов по ускорению выбирается таким образом, чтобы амплитуды спектральных отсчетов в них были максимальными. После этого происходит перенастройка каналов по ускорению в соответствии с новым значением интервала по ускорению. В работе показано, что предлагаемый алгоритм обеспечивает выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум 1,5 дБ при трёх каналах по ускорению и 0,6 дБ при четырёх каналах по ускорению. На данный способ обнаружения малоотражающих сверхманевренных объектов получен патент на изобретение РФ.

Одной из проблем, возникающих при реализации многоканального по скорости и ускорению алгоритма обнаружения малоотражающих сверхманевренных объектов, являются существенные вычислительные затраты, требуемые на аппаратную реализацию:

$$N_R M_a (5N \log_2 N + 6N),$$

где N_R — число каналов по дальности; $\log_2(\bullet)$ — логарифм по основанию 2, т.е. число операций растёт пропорционально числу каналов по ускорению. В связи с этим в работе предложены алгоритмы, которые обеспечивают снижение вычислительных затрат. Алгоритм реализует когерентное суммирование выходных отсчётов БПФ одного канала по ускорению и одного канала по дальности и может быть описан решающим правилом вида:

$$\xi_p(\mathbf{z}) = \left| \sum_{k=pm_a}^{(p+1)m_a-1} \sum_{j=0}^{N-1} z_j \exp\left(-i \frac{2\pi}{N} jk\right) \right|^2 \geq \xi_{p_0}, \quad (3)$$

где m_a — число каналов по скорости, в которых находится спектр отражённого сигнала; p — канал по скорости; ξ_{p_0} — порог обнаружения. Суммирование в данном случае когерентное, так как начальная фаза сигнала на выходе каналов БПФ случайная, но одинаковая для всех каналов по скорости. Вычислительные затраты при этом определяются выражением:

$$N_R (5N \log_2 N + M_a 2N).$$

Число отсчётов, участвующих в суммировании, зависит от ускорения объекта. Выигрыш в числе вычислительных операций составляет порядка M_a раз. Потери в пороговом отношении сигнал-шум лежат в диапазоне от 2 до 4 дБ по сравнению с многоканальным по скорости и ускорению алгоритмом.

Таким образом, в первой главе рассмотрено влияние радиального ускорения объекта на характеристики обнаружения многоканального по скорости и ускорению обнаружителя. Предложен алгоритм выбора оптимального числа каналов по ускорению $M_{\text{опт}}$ на основе максимизации средней вероятности правильного обнаружения. Разработан алгоритм обнаружения, обеспечивающий выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум до 1,5 дБ, инвариантный к скорости и многоканальный по ускорению алгоритм обнаружения, обеспечивающий выигрыш в числе вычислительных операций (до M_a раз), и неадаптивные алгоритмы обнаружения малоотражающих сверхманевренных объектов, позволяющие существенно (до M_a раз) сократить число требуемых на реализацию операций в БРЛС. При этом решение об обнаружении объекта выносится в каждой пачке.

С другой стороны, современные бортовые РЛС используют разные режимы работы. При работе в передней полусфере используется режим высокой частоты повторения импульсов, особенностью которого является неоднозначность измерений дальности. Для устранения неоднозначности по дальности используют излучение в каждом угловом положении нескольких пачек импульсов и обнаружение объекта в каждой из них. С

целью повышения эффективности обнаружения малоотражающих сверхманевренных объектов целесообразным является совмещение обнаружения объекта с устранением неоднозначности, т.е. использование межпачечного накопления, которое рассмотрено в следующей главе. Разработанные в данной главе многоканальные по ускорению алгоритмы используются как в системах первичной обработки, так и как источник входной информации алгоритмов межобзорной обработки, рассмотренных в следующих главах.

Во второй главе выполнены синтез и анализ алгоритмов межпачечного накопления отражённых сигналов от малоотражающего сверхманевренного объекта при устранении неоднозначности измерений дальности в антенной СК.

Одним из способов однозначного определения дальности в режиме ВЧПИ является использование дискретной линейной частотной модуляции (ДЛЧМ), часто называемой модуляцией с «отскоком», при этом в каждом угловом положении антенны излучаются несколько пачек импульсов с разной девиацией частоты. На практике число пачек ограничивается тремя. При этом возможности межпачечного накопления не используются. В диссертационной работе синтезирован алгоритм совместного некогерентного межпачечного накопления пачек импульсов и устранения неоднозначности по дальности при работе по малоотражающему сверхманевренному объекту.

Сигнал, принимаемый на первом такте, имеет несущую частоту $f_{\text{пр}1} = f_0 + f_{\text{дц}} + f'_{\text{дц}} t$, где f_0 — несущая частота первого такта; $f_{\text{дц}}$ — частота Доплера; $f'_{\text{дц}}$ — скорость изменения частоты Доплера, вызванная радиальным ускорением объекта. Частота принимаемого сигнала во второй пачке $f_{\text{пр}2} = f_0 + k_{\text{чм}}(t - t_R) + (f_{\text{дц}} + f'_{\text{дц}} NT_{\text{п}}) + f'_{\text{дц}} t$, где $k_{\text{чм}}$ — крутизна изменения несущей частоты во второй пачке; $T_{\text{п}}$ — период повторения импульсов в пачках. Промежуточные частоты после гетеродинирования имеют вид: для первой пачки $f_{\text{пр}1} = f_{\text{пр}0} + f_{\text{дц}} + f'_{\text{дц}} t$, для второй пачки $f_{\text{пр}2} = f_{\text{пр}0} + (f_{\text{дц}} + f'_{\text{дц}} NT_{\text{п}}) - k_{\text{чм}} t_R + f'_{\text{дц}} t$. Разностная частота при использовании двух пачек импульсов имеет вид: $f_{\text{р}2} = f_{\text{пр}1} - f_{\text{пр}2} = k_{\text{чм}} t_R - f'_{\text{дц}} NT_{\text{п}}$, а при использовании трёх пачек импульсов: $f_{\text{р}3} = k_{\text{чм}2} t_R - f'_{\text{дц}} 2NT_{\text{п}}$, где $k_{\text{чм}1}, k_{\text{чм}2}$ — крутизна изменения несущей частоты во второй и третьей пачках. Анализ данных выражений показывает, что «отскок» по дальности зависит от радиального ускорения объекта. Разностная частота между первой и второй пачками отличается не только на величину «отскока», пропорционального дальности, но и на добавку, связанную с наличием ускорения объекта $f'_{\text{дц}} NT_{\text{п}}$.

Решающее правило предлагаемого алгоритма совместного некогерентного межпачечного накопления и раскрытия неоднозначности измерения дальности по «отскоку» для R -й гипотезы дальности, m -го канала по ускорению, n -го канала по скорости имеет вид:

$$\xi_2(\mathbf{z}) = \sum_{r=0}^{n_R-1} \left| \sum_{k=0}^{N-1} z_k \exp(-ik^2 \varphi'_m) \exp(-i(\varphi_n - \varphi_r^R + r\varphi'_m N)k) \right|^2 \geq \xi_0, \quad (4)$$

где $\{0, \varphi_1^R, \varphi_2^R\}_{R=0}^{N_R-1}$ — массив, содержащий все возможные комбинации «отскоков» дальности для трёх пачек импульсов; n_R — число пачек, используемых для раскрытия неоднозначности измерения дальности, $n_R=3$; φ'_m — настройка m -го канала по ускорению; N_R — число возможных комбинаций дальности; ξ_0 — порог обнаружения; φ_n — настройка n -го канала по скорости.

В алгоритме (4) «отскок» по дальности анализируется в каждом канале по ускорению. Кроме того, величина «отскока» корректируется с учётом канала по ускорению, в котором происходят измерения дальности.

Алгоритм обнаружения соответствующий статистике (4), обеспечивает выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум до 4 дБ при $N=1024$, $M_a=10$ по сравнению с классическим алгоритмом раскрытия неоднозначности по дальности при помощи ДЛЧМ с «отскоком» и обнаружением объекта в каждой из трёх пачек без учёта ускорения цели.

Одним из основных способов устранения априорной неопределенности является замена неизвестных параметров их оценками. В диссертационной работе предложено ввести оценку начальной фазы принятых пачек импульсов и использование полученных данных в формировании гипотез движения при межобзорном накоплении. Решающее правило, реализующее межобзорное когерентное накопление для траектории, начинаемой из (i, j, n, m) -го канала, имеет вид:

$$\lambda_{i, j, n, m} = \max_{l \in N_h} \left| s_{(i, j, n, m)_0}^{(l)} + \exp\left(i \arg\left(s_{(i, j, n, m)_0}^{(l)}\right)\right) \sum_{k=1}^{K-1} s_{(i, j, n, m)_k}^{(l)} \exp(-i\hat{\varphi}_{0_k}^{(l)}) \right|^2 \geq \lambda_0, \quad (5)$$

$$\left\{ \hat{\varphi}_{0_1}, \dots, \hat{\varphi}_{0_{K-1}} \right\} = \max_{\hat{\varphi}_1, \dots, \hat{\varphi}_{K-1}} \left| s_{(i, j, n, m)_0}^{(l)} + \exp\left(i \arg\left(s_{(i, j, n, m)_0}^{(l)}\right)\right) \sum_{k=1}^{K-1} s_{(i, j, n, m)_k}^{(l)} \exp(-i\varphi_{0_k}^{(l)}) \right|^2, \quad (6)$$

где K — число обзоров, с которых происходит накопление; N_h — число гипотезных траекторий; l — номер гипотезы движения цели; $\arg()$ —

аргумент комплексного числа; $\hat{\varphi}_{0_k}^{(l)}$ — оценка начальной фазы в l -й гипотезе движения на k -м обзоре; $s_{(i,j,n,m)_k}^{(l)}$ — комплексный отсчёт в i -м канале по дальности, j -м канале по скорости, n -м канале по азимуту, m -м канале по углу места на k -м обзоре, соответствующий l -й гипотезе; λ_0 — порог обнаружения.

Номера каналов (i,j,n,m) , соответствующие l -й гипотезе движения, определяются на основе выбранной модели движения цели.

Обнаружитель, функционирующий в соответствии с решающим правилом (б), целесообразно использовать в суммарном канале моноимпульсных РЛС, имеющих один строб по дальности и не раскрывающих неоднозначность по дальности.

Таким образом, во второй главе предложен алгоритм, сочетающий межпачечное накопление и раскрытие неоднозначности измерения дальности при использовании ДЛЧМ с «отскоком» при обнаружении малоотражающих сверхманевренных объектов. Выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум составляет до 4 дБ по сравнению с известным алгоритмом, в котором не учитывается ускорение цели. Кроме того, предложен алгоритм межобзорного когерентного накопления, обеспечивающий выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум до 2 дБ по сравнению с известным алгоритмом межобзорного накопления. Кроме того, по сравнению с известным алгоритмом межобзорного накопления, использующим первичные пороги обнаружения, выигрыш увеличивается и достигает 3,3 дБ.

В третьей главе диссертации рассмотрены вопросы влияния динамики движения носителя бортовой РЛС на характеристики обнаружения известных алгоритмов межобзорного накопления. Показано, что без учёта данных, поступающих от бортовой навигационной системы носителя РЛС, эффективное межобзорное накопление невозможно. Рассмотрено место разработанных алгоритмов в структуре обработки сигналов в БРЛС.

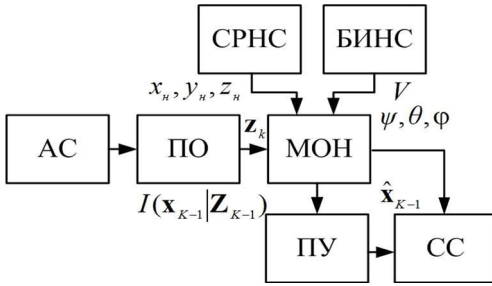


Рисунок 1

На рисунке 1 введены следующие обозначения: АС — антенная система; ПО первичная обработка радиолокационной информации без пороговой обработки; МОН — межобзорное накопление;

ПУ — пороговое устройство; СС — система сопровождения; СРНС — спутниковая радионавигационная система; БИНС — бесплатформенная навигационная система.

Широко применяемой на практике при межобзорном накоплении является статистика $I(\mathbf{x}_k|\mathbf{z}_k)$, которая зависит от вектора состояния \mathbf{x}_k на k -м обзоре, включает в себя параметры движения обнаруживаемого объекта и описывается выражением:

$$I(\mathbf{x}_k|\mathbf{z}_k) = \max_{\mathbf{x}_{k-1} \in T(\mathbf{x}_k)} \{I(\mathbf{x}_{k-1}|\mathbf{z}_{k-1})\} + L(\mathbf{z}_k|\mathbf{x}_k), \quad (7)$$

где $L(\mathbf{z}_k|\mathbf{x}_k)$ — логарифм отношения правдоподобия на k -м обзоре; $T(\mathbf{x}_k)$ — область значений вектора состояния \mathbf{x}_k текущего обзора, в которую переходит вектор состояния с предыдущего обзора; $k=0..K-1$; \mathbf{z}_k — вектор измерений на k -м обзоре. Решение об обнаружении объекта принимается по результатам сравнения статистики $I(\mathbf{x}_k|\mathbf{z}_k)$ с порогом обнаружения, вычисляемым на основе критерия Неймана – Пирсона. Величина области $T(\mathbf{x}_k)$ определяется переходной матрицей \mathbf{F} , зависящей от модели движения объекта.

Существующие в настоящее время алгоритмы межобзорной накопления, реализующие вычисление в соответствии с (7), не учитывают возможность движения носителя РЛС. Это приводит к тому, что диапазон значений области $T(\mathbf{x}_k)$ в процессе движения носителя РЛС смещается и в конечном итоге приводит к невозможности межобзорного накопления в соответствии с выражением (7) и выбранной моделью движения цели, что показано в диссертационной работе.

В качестве входной информации для алгоритма (7) используются результаты накопления на этапе первичной обработки. Но влияние радиального ускорения объекта при этом также не учитывается.

В диссертационной работе предложен способ, учитывающий движение носителя за счёт смещения положения области $T(\mathbf{x}_k)$ между двумя соседними обзорами. На рисунке 2 показано формирование области $T(\mathbf{x}_k)$ для двумерного случая, т.е. для случая стабилизации антенны по крену и тангажу либо установки РЛС на БПЛА.

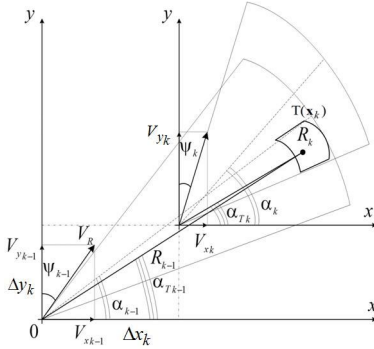


Рисунок 2

На рисунке 2 введены следующие обозначения: V_R — путевая скорость носителя БРЛС в связанной системе координат (СК); ψ_k, ψ_{k-1} — значения курса на k -м и $(k-1)$ -м обзорах; α_k, α_{k-1} — значения центра сектора обзора на k -м и $(k-1)$ -м обзорах в подвижной СК; $\Delta x_k, \Delta y_k$ — смещение центра подвижной СК между k -м и $(k-1)$ -й обзорами;

$\alpha_{Tk}, \alpha_{Tk-1}$ — значения азимутов объекта на k -м и $(k-1)$ -м обзорах в подвижной СК; R_k, R_{k-1} — значения дальностей до объекта на k -м и $(k-1)$ -м обзорах в лучевой СК; $V_{xk}, V_{xk-1}, V_{yk}, V_{yk-1}$ — проекции скорости движения носителя РЛС на оси подвижной СК. На рисунке 2 тонкой пунктирной линией обозначен центр сектора сканирования в подвижной СК; тонкой сплошной линией обозначено положение сектора обзора на k -м и $(k-1)$ -м обзорах в подвижной СК. Обозначим также $(x_{n_{k-1}}, y_{n_{k-1}})$ и (x_{n_k}, y_{n_k}) координаты объекта на k -м и $(k-1)$ -м обзорах в подвижной СК.

Коррекция положения носителя заключается в определении смещения центра подвижной СК между двумя соседними обзорами, а также поворота сектора сканирования и последующем определении смещения области $T(x_k)$ на основе использования аффинного преобразования:

$$\begin{aligned} x_{n_{k-1}} &= \cos(d_\alpha)x_{n_k} - \sin(d_\alpha)y_{n_k} + \Delta x_k, \\ y_{n_{k-1}} &= \sin(d_\alpha)x_{n_k} + \cos(d_\alpha)y_{n_k} + \Delta y_k, \end{aligned} \quad (8)$$

где d_α — разность между центрами сектора обзора на k -м и $(k-1)$ -м обзорах; $\Delta x_k, \Delta y_k$ — смещение начала нормальной СК между k -м и $(k-1)$ -м обзорами. После вычисления (8) вычисляется значение i_R -го канала дальности и i_α -го канала азимута относительно центра подвижной СК на $(k-1)$ -м обзоре по формулам:

$$i_R = \text{int} \left(\frac{\sqrt{((x_{n_{k-1}})^2 + (y_{n_{k-1}})^2)}}{\delta R} \right), i_\alpha = \text{int} \left(\frac{\text{atan2}(y_{n_{k-1}}, x_{n_{k-1}})}{\alpha_{k-1}} 0,5N_\alpha \right), \quad (9)$$

где δR — ширина канала по дальности; N_α — число каналов по азимуту; $\text{int}(\bullet)$ — целая часть числа. На заключительном этапе производится анализ попадания i_R -го, i_α -го элемента разрешения в сектор сканирования на

($k-1$)-м обзоре.

Анализ выражений (8),(9) показывает, что ошибки определения угловой ориентации носителя бортовой РЛС приводят к ошибкам в вычислении области $T(\mathbf{x}_k)$, что накладывает жёсткие требования к точности вычисления параметров угловой ориентации носителя бортовой РЛС. Ошибки в определении угловой ориентации в конечном счете приводят к потерям в пороговом отношении сигнал-шум при накоплении в соответствии с выражениями (7)-(9). В частности, при СКО оценки курса 3° и 5° потери в пороговом отношении составят 1 и 2 дБ соответственно. В работе показано, что потери могут достигать величины до 4 дБ при использовании статистики (7) без учёта движения носителя БРЛС и накоплении данных с 12 обзоров. Таким образом, задачу повышения эффективности межобзорного накопления необходимо решать совместно с задачей повышения точности навигационных данных, поступающих от бортовой навигационной аппаратуры.

Обнаружение малоотражающих объектов, движущихся с малой скоростью на фоне негауссовских коррелированных помех, представляет собой сложную задачу. В диссертации в рамках описания помех от морской поверхности сферическими инвариантными процессами синтезирован алгоритм межобзорного накопления, который может быть описан решающим правилом вида:

$$\lambda_{i,j,n,m} = \max_{l \in N_h} \prod_{k=0}^{K-1} \left(1 - \frac{\left| \left(\mathbf{s}_j^{(l)} \right)^H \left(\hat{\mathbf{C}}_{(i,n,m)k}^{(l)} \right)^{-1} \mathbf{z}_{(i,n,m)k}^{(l)} \right|^2}{\left(\mathbf{z}_{(i,n,m)k}^{(l)} \right)^H \left(\hat{\mathbf{C}}_{(i,n,m)k}^{(l)} \right)^{-1} \mathbf{z}_{(i,n,m)k}^{(l)} \left(\mathbf{s}_j^{(l)} \right)^H \left(\hat{\mathbf{C}}_{(i,n,m)k}^{(l)} \right)^{-1} \mathbf{s}_j^{(l)}} \right)^{-1}, \quad (10)$$

где i, j, n, m — номера каналов по дальности, скорости, азимуту и углу места; $\mathbf{z}_{(i,n,m)}^{(l)}$ — массив данных после АЦП двух квадратурных каналов и соответствующих i -му каналу по дальности, n -му каналу по азимуту и m -му каналу по углу места; $\mathbf{s}_j^{(l)} = \begin{bmatrix} 1 & \exp(i(j+k\Delta V_k^{(l)})) & \dots & \exp(i(N-1)(j+k\Delta V_k^{(l)})) \end{bmatrix}$ — модель опорного сигнала, соответствующая настройке $(j+k\Delta V_k^{(l)})$ -го канала по скорости; $\hat{\mathbf{C}}_{(i,n,m)k}^{(l)}$ — оценка корреляционной матрицы помехи в $i+k\Delta R_k^{(l)}$ -м канале по дальности, $n+k\Delta n_k^{(l)}$ -м канале по азимуту, $m+k\Delta m_k^{(l)}$ -м канале по углу места; N_h — число гипотез движения объекта; i — мнимая единица; K — число обзоров; $k=0 \dots K-1$.

Эффективность синтезированного алгоритма межобзорного накопления на фоне негауссовских коррелированных помех оценивалась на

экспериментальных данных РЛС РИХ. Показано, что алгоритм (10) обеспечивает выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум 1,5 дБ при числе обзоров $K=3$ по сравнению с известным алгоритмом.

Таким образом, в третьей главе рассмотрен способ межобзорного накопления отражённых сигналов малоотражающих маневрирующих объектов, который позволяет учесть движение носителя бортовой РЛС. Предлагаемый способ основан на использовании информации бортовой навигационной системы носителя о значениях курса в случае стабилизации по крену и тангажу; курса, крена и тангажа - в случае отсутствия стабилизации по крену и тангажу. Распределение статистики (7) в случае негауссовского распределения шума также является негауссовским, что приводит к сложностям аналитического вычисления порога обнаружения. В следующей главе рассмотрены метод аналитического вычисления порога обнаружения при межобзорном накоплении, а также метод стабилизации уровня ложной тревоги при использовании статистики (7) в бортовой РЛС, реализующих межобзорное накопление при движении носителя БРЛС. Разработанный алгоритм позволяет существенно (в 6...8 раз) уменьшить число операций при вычислении порога обнаружения.

Четвёртая глава посвящена теоретическому анализу законов распределения статистики (7) на входе порогового устройства с целью получения аналитических зависимостей на основе использования математического аппарата характеристических функций (ХФ). Кроме того, разработан метод стабилизации уровня ложной тревоги при межобзорном накоплении с использованием статистики (7).

В этой главе разработан метод аналитического вычисления порога обнаружения при межобзорном накоплении сигналов, отражённых от малоотражающих сверхманевренных объектов. В отличие от известного способа вычисления порога обнаружения, предлагаемый метод может быть использован в реальном времени для стабилизации уровня ложной тревоги при межобзорном накоплении отражённых радиолокационных сигналов.

Использование на практике статистики (7) при межобзорном накоплении имеет трудности, связанные с негауссовским законом распределения. В существующих алгоритмах эта проблема решается путём численного моделирования, что затрудняет использование данного подхода для реализации в реальном времени.

Статистика (7) на каждом k -м обзоре представляет собой сумму двух случайных величин, для нахождения закона распределения которой необходимо вычисление свёртки двух плотностей распределения вероятностей. Одна из них представляет собой распределение монотонной функции отношения правдоподобия и является априорно известной. Вторая - распределение максимального значения статистики $I(\mathbf{x}_{k-1}|\mathbf{z}_{k-1})$ в области

$T(\mathbf{x}_{k-1})$. Данное распределение меняется в течение накопления.

В работе предложено заменить операцию вычисления свёртки двух плотностей на операцию перемножения ХФ. После этого происходит численное интегрирование при вычислении прямого и обратного преобразования Фурье, которым связаны плотность распределения вероятностей и ХФ. Исключение операции моделирования отсчётов с заданными законами распределения, а так же использование операций быстрого преобразования Фурье позволяют существенно сократить вычислительные затраты до 6...8 раз при определении порога обнаружения.

Согласно известной теореме Балкема - де Хаана - Пикэндса интегральная функция распределения $F(y)$ отсчётов, превысивших порог u , может быть аппроксимирована обобщённым распределением Парето:

$$F(y) = 1 - \frac{M_{\text{POT}}}{N_w} \left(1 + c \frac{y}{a} \right)^{-\frac{1}{c}},$$

где u — порог, определяемый методом POT («peaks over threshold»); N_w — число элементов в «скользящем» окне; M_{POT} — число отсчётов «скользящего» окна, превысивших порог u ; a, c — параметры распределения Парето.

В работе предложен способ стабилизации уровня ложной тревоги в «скользящем» окне на основе данной теоремы. Параметры обобщённого распределения Парето a, c вычисляются на основе метода моментов:

$$\hat{c} = \frac{1}{2} \left(\frac{\bar{y}^2}{\sigma_y^2} - 1 \right), \quad \hat{a} = \frac{1}{2} \bar{y} \left(\frac{\bar{y}^2}{\sigma_y^2} + 1 \right), \quad (11)$$

где σ_y^2 — дисперсия элементов массива $\{x_i - u\}_{i=0}^{N_w-1}$; \bar{y} — математическое ожидание элементов массива $\{x_i - u\}_{i=0}^{N_w-1}$.

Порог обнаружения согласно критерию Неймана - Пирсона вычисляется в соответствии с выражением:

$$u + \hat{c} \left[\left(F_1 \frac{N_w}{0,1 N_w} \right)^{-\hat{c}} - 1 \right], \quad (12)$$

где F_1 — вероятность ложной тревоги на один канал. Структурная схема предлагаемого способа стабилизации уровня ложных тревог для межобзорного алгоритма накопления отражённых сигналов (7) в 2D координатах (дальность-азимут) показана на рисунке 3.

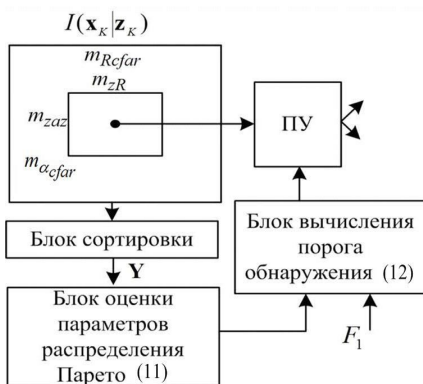


Рисунок 3

Таким образом, в четвёртой главе разработан метод аналитического вычисления порога обнаружения на основе использования аппарата ХФ. Достоинством данного метода является независимость от вида распределения шума на входе обнаружителя, реализующего межобзорное накопление в соответствии со статистикой (7), а также возможность реализации данного метода в реальном времени. Аналитическое вычисление порога обнаружения при межобзорном накоплении позволяет на основе допустимых потерь в пороговом отношении сигнал-шум ввести требования к погрешностям оценки углов ориентации носителя бортовой РЛС.

В пятой главе диссертационной работы рассмотрены возможности применения гауссовского парциального фильтра с целью оценивания параметров движения малоотражающего сверхманевренного объекта с адаптацией к маневрам носителя на основе многомодельного фильтра Калмана с перекрёстными связями. Применение данного подхода позволяет повысить точность оценки параметров движения малоотражающего сверхманевренного объекта до 2...3 раз по сравнению с известным алгоритмом сопровождения на основе парциальных фильтров при равном числе парциальных фильтров. При этом в качестве входной информации разработанного алгоритма используются выходные отчёты многоканального по скорости и ускорению обнаружителя маневрирующих объектов, рассмотренного в первой главе.

В четвёртой главе диссертации показано, что одним из основных подходов к решению задачи обнаружения и оценки параметров движения малоотражающего сверхманевренного объекта является вычисление статистики $I(\mathbf{x}_k | \mathbf{z}_k)$.

Другим подходом к решению задачи оценки параметров является использование метода Монте-Карло, который позволяет численно вычислить апостериорную плотность распределения вероятностей в наборе

На рисунке 3 ПУ—пороговое устройство; $N_w = m_{Rcfar} m_{\alpha_cfar}$ — размеры «скользящего» окна по дальности и азимуту; $m_{zR} m_{zaz}$ — размер защитного интервала по дальности и азимуту; \mathbf{Y} —массив с элементами «скользящего» окна, превысившими порог u . Порог u в соответствии с методом РОТ выбирается таким образом, что бы его превысило не более 10 % числа элементов N_w .

значений из вектора состояния \mathbf{x}_k . В диссертационной работе рассмотрена интеграция многомодельного калмановского фильтра и гауссовского парциального фильтра для решения данной задачи.

При использовании многомодельного гауссовского парциального фильтра апостериорная плотность распределения вероятностей $p(\mathbf{x}_k|m_k, \mathbf{z}_k)$ может быть аппроксимирована выражением:

$$p(\mathbf{x}_k|m_k, \mathbf{z}_k) \approx C_k p(\mathbf{z}_k|m_k, \mathbf{x}_k) N(\mathbf{x}_k|\bar{\mu}_k, \bar{\Sigma}_k), \quad (13)$$

где $N(\mathbf{x}_k|\bar{\mu}_k, \bar{\Sigma}_k)$ — функция, описывающая нормальный закон распределения с параметрами: $\bar{\mu}_k$ — вектор математических ожиданий на k -м обзоре; $\bar{\Sigma}_k$ — матрица ковариаций на k -м обзоре. Размерность вектора $\bar{\mu}_k$ и матрицы $\bar{\Sigma}_k$ определяется размерностью вектора состояния; m_k — дискретная переменная, определяющая предполагаемую модель движения объекта на k -м обзоре; $p(\mathbf{z}_k|m_k, \mathbf{x}_k)$ — функция правдоподобия на k -м обзоре при гипотезе H_1 и m_k модели движения; C_k — нормировочная константа на k -м обзоре.

В работе рассмотрены две модели движения: а) движение с постоянной скоростью, б) координатный разворот. Переключение между моделями происходит на основе матрицы переходов, определяемой односвязной марковской последовательностью.

Эффективность предлагаемого алгоритма сравнивалась с известным алгоритмом оценки параметров движения малоотражающего сверхманевренного объекта на основе парциальных фильтров при равном числе парциальных фильтров на тестовых данных с одинаковыми отношениями сигнал-шум. Показано, что предлагаемый алгоритм обеспечивает выигрыш в точности оценки параметров движения малоотражающего сверхманевренного объекта до 2..3 раз при равном числе парциальных фильтров.

В шестой главе рассмотрен синтез алгоритма определения угловой ориентации на основе использования в качестве кинематических параметров ориентации носителя бортовой РЛС кватернионов. В данной главе также рассматриваются вопросы обработки выходных сигналов микромеханических гироскопов (ММГ) на основе многомодельных фильтров Калмана с перекрёстными связями для использования в бортовых навигационных комплексах высокоманевренных носителей бортовой РЛС. Фильтрация выходных сигналов ММГ осуществляется с целью повышения точности определения угловой ориентации, которая оказывает существенное влияние на эффективность межобзорного накопления.

В данной главе разработан алгоритм определения угловой ориентации подвижного носителя бортовой РЛС с использованием многомодельного фильтра Калмана с перекрёстными связями, предназначенный

для повышения вероятности правильного обнаружения малоотражающих сверхманевренных объектов.

С целью фильтрации выходных сигналов ММГ разработан комбинированный алгоритм фильтрации, сочетающий нелинейную процедуру по распознаванию информативной составляющей в смеси сигнала и шума и дальнейшую линейную фильтрацию в случае принятия положительного решения о наличии полезного сигнала. Для распознавания полезного сигнала предложено использовать три решающих правила, основанных на следующих признаках: амплитудных, корреляционных и спектральных.

Уравнения для итоговых оценок параметров кватерниона при мнимых единицах Гамильтона и дрейфов гироскопов на k -м такте имеют вид:

$$\hat{\mathbf{q}}_{k \text{ IMM}} = \sum_{m=0}^{M_{\text{IMM}}-1} \hat{\mathbf{q}}_{k_m} P_{k_m}, \quad (14)$$

где P_{k_m} — апостериорные вероятности m -го фильтра многомодельного фильтра Калмана; $\hat{\mathbf{q}}_{k_m}$ — оценка векторной части кватерниона в m -м канале фильтра Калмана; M_{IMM} — число каналов в многоканальном фильтре Калмана. Апостериорная вероятность m -го фильтра многомодельного фильтра Калмана вычисляется на основе анализа функции правдоподобия невязки для каждого из каналов.

Увеличение точности оценки углов ориентации определяется тем, что каждый канал многомодельного фильтра Калмана имеет разную полосу пропускания. В случае резкого маневра носителя бортовой РЛС возрастает апостериорная вероятность P_{k_m} широкополосного канала многомодельного фильтра Калмана.

Таким образом, в шестой главе синтезирован алгоритм фильтрации сигналов микромеханических датчиков угловых скоростей, предназначенный для установки на высокоманевренные носители бортовой РЛС, позволяющие при угловых скоростях $\omega = (30 \dots 240)^\circ/\text{с}$ обеспечить: СКО шума – не более $0,1^\circ/\text{с}$, амплитуду максимального выброса шума – не более $0,3^\circ/\text{с}$, фазовое запаздывание – не более 10° . Кроме того, рассмотрен алгоритм определения угловой ориентации высокоманевренного носителя РЛС на основе использования многомодельного фильтра Калмана с перекрестными связями.

В седьмой главе диссертации рассмотрены вопросы аппаратно-программной реализации результатов диссертационной работы, рассмотрены примеры разработанных и модифицированных систем, а также алгоритмов для обнаружения малоотражающих сверхманевренных объектов с использованием бортовой навигационной информации носителя БЛС.

В рамках экспериментов использовался разработанный стенд на ос-

нове РЛС AWR1642, а также бесплатформенной инерциальной навигационной системы на базе инерциального модуля ADIS16405BMLZ. В качестве объекта был использован квадрокоптер. В автопилот загружалось полётное задание, в соответствии с которым происходил полёт объекта. Движение носителя бортовой РЛС имитировалось вращением платформы, на которой установлена РЛС AWR1642. Углы ориентации вычислялись по показаниям инерциального модуля. Данные углы использованы для коррекции смещения сектора обзора (8),(9) при межобзорном накоплении в соответствии с (7). Пороговая обработка выполнялась в соответствии с выражениями (11), (12). Обработка экспериментальных данных показала, что дальность обнаружения увеличивается на 9 %.

Также в данной главе диссертационной работы рассмотрены примеры решения следующих научно-технических задач:

- обнаружение малоотражающих сверхманевренных объектов;
- оценка параметров малоотражающих сверхманевренных объектов;
- оценка угловой ориентации маневрирующих носителей БРЛС.

Перечисленные задачи решены на практике при создании следующих аппаратных и программных средств, входящих в состав:

- систем обработки радиолокационной информации (программное обеспечение БЦВМ, внедрены в разработки АО «ГРПЗ»);
- систем обработки радиолокационной информации (программное обеспечение БЦВМ АО «МНИИ «Агат»);
- систем обработки бортовой навигационной информации (программное обеспечение для ММГ ИПД-ММ, разработки ПАО «МИЭА»);
- бесплатформенных инерциальных навигационных систем (программное обеспечение для БИНС-СП, разработки ПАО «МИЭА»);
- систем межобзорного накопления радиолокационной информации подвижного носителя БРЛС (программное обеспечение ЧМ РЛС AWR1642 boots, внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «РГРТУ им. В.Ф. Уткина»);
- систем бесплатформенной гировертикали (программное обеспечение на базе IMU модуля ADIS16405BMLZ и микроконтроллера stm32f407, внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «РГРТУ им. В.Ф. Уткина»).

В седьмой главе показано, что предлагаемые в диссертационной работе алгоритмы и способы успешно использованы при практической реализации систем межобзорной обработки радиолокационной информации с учётом бортовой навигационной информации носителей БРЛС.

В заключении сформулированы выводы по диссертационной работе:

- 1) проанализировано влияние радиального ускорения на энергетические и вероятностные характеристики многоканального доплеровского

фильтра (МДФ). Увеличение радиального ускорения приводит к уменьшению усреднённых коэффициента улучшения и вероятности правильного обнаружения МДФ, что вызывает уменьшение энергетической дальности БРЛС от 5...8 % при $a_r=100$ м/с² до 41...70% при $a_r=400$ м/с²;

2) на основе анализа матрицы Фишера показано, что дисперсия оценки скорости минимальна при выборе точки отсчёта в середине пачки, при этом оценки скорости и ускорения не коррелированы;

3) определено оптимальное количество каналов по ускорению $M_{\text{аорт}}$ на основе максимизации средней вероятности правильного обнаружения;

4) разработан способ инвариантного к радиальной скорости и многоканального по ускорению обнаружения маневрирующего объекта, который обеспечивает выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум до 4..5 дБ по сравнению с алгоритмами обнаружения, основанными на сегментировании входной выборки;

5) разработан алгоритм межпачечного накопления, совмещённый с устранением неопределённости по дальности в режиме ВЧПИ, который обеспечивает выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум до 4 дБ по сравнению с известным, который не учитывает ускорение цели;

6) разработан алгоритм когерентного межпачечного накопления, который обеспечивает выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум 2 дБ по сравнению с известным алгоритмом межобзорного некогерентного накопления;

7) разработан алгоритм межобзорной обработки отраженного эхосигнала зависшего БПЛА с борта подвижного носителя малогабаритной РЛС, который обеспечивает выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум до 2 дБ по сравнению с алгоритмом, который не учитывает движение носителя РЛС, при накоплении данных с 6 обзоров;

8) рассмотрено влияние движения носителя бортовой РЛС на эффективность межобзорного накопления. Показано, что, в крайнем случае, при интенсивном маневрировании носителя БРЛС межобзорное накопление невозможно. При $N=256$, $N_R=50$, $F=10^{-6}$ потери в пороговом отношении сигнал-шум могут достигать 4 дБ. Также показано, что при использовании межобзорного накопления необходимо вводить многоканальность по ускорению. Использование допустимого уровня потерь в пороговом отношении сигнал-шум при межобзорном накоплении позволяет ввести заданный уровень погрешностей определения угловой ориентации носителя бортовой РЛС;

9) показано, что за счёт учёта смещения сектора обзора между двумя соседними обзорами с использованием информации об углах ориентации носителя БРЛС и координатах, получаемых от спутниковой навигационной системы, возможна реализация межобзорного накопления. Показано, что ошибки определения углов ориентации влияют на эффек-

тивность накопления. Погрешность определения координат центра связанной СК не оказывает существенного влияния на эффективность накопления в случае, если размер элемента разрешения по дальности существенно больше погрешности определения координат;

10) разработан метод аналитического вычисления плотности распределения отсчётов на входе порогового устройства при межобзорном накоплении с использованием статистики (7), позволяющий реализовать вычисление порога обнаружения в реальном времени. Анализ осуществлялся на основе критерия согласия Колмогорова;

11) разработан метод стабилизации уровня ложных тревог на основе использования теории экстремальных статистик и оценки параметров обобщённого распределения Парето методом моментов. Разработанный способ инвариантен к закону распределения отсчетов на входе порогового устройства и не требует существенных вычислительных затрат;

12) разработан алгоритм сопровождения малоотражающего маневрирующего объекта при низком отношении сигнал-шум. Алгоритм основан на использовании разработанного многомодельного гауссовского парциального фильтра, обеспечивает уменьшение СКО оценки координат объекта до 2...3 раз по сравнению с известным алгоритмом при равном количестве парциальных фильтров;

13) разработан алгоритм определения угловой ориентации высокоманевренного носителя БРЛС, обеспечивающий снижение погрешности определения углов ориентации при маневре носителя БРЛС, который обеспечивает снижение потерь в пороговом отношении на 2 дБ;

14) разработан алгоритм оценки амплитуды и частоты частотной подставки лазерного гироскопа, входящего в состав навигационной системы высокоманевренного объекта на основе использования периодограмм наименьших квадратов. Данный алгоритм обеспечивает оценку амплитуды с СКО: 0,83 %с и частоты с СКО: 0,38 Гц по 20 отсчётам.

В приложениях приведены списки условных обозначений, терминов, сокращений и аббревиатур.

Выводы

Таким образом, решена крупная научно-техническая проблема повышения качественных показателей обнаружения малоотражающих сверхманевренных объектов в перспективных БРЛС, заключающаяся в повышении энергетической дальности действия. Перспективность использования разработанных в рамках диссертационного исследования алгоритмов и способов обнаружения связана с тем, что данные алгоритмы не предполагают увеличения мощности передатчика, а направлены на увеличение времени накопления отражённых сигналов.

Работы по расширению сфер применения итогов диссертационных исследований ведутся в Научно-образовательном центре технологии об-

работки радиолокационных и навигационных сигналов (научный руководитель — проф. В.И. Кошелев, директор — доц. В.Г. Андреев) молодыми учёными, аспирантами, магистрантами и студентами Рязанского государственного радиотехнического университета.

Основные результаты диссертации опубликованы в 84 научных работах. Ниже приведен библиографический список наиболее значимых из них.

Монографии

1. Кошелев В.И., Андреев В.Г., Белокуров В.А. Современные методы повышения эффективности обнаружения радиолокационных сигналов. М.: Горячая линия — Телеком. 2016. — 154 с. (ISBN 978-5-9912-0571-9)

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

2. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Адаптивное обнаружение маневрирующих целей // Цифровая обработка сигналов. — №1. — 2005. — С. 41-45.

3. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Межобзорное накопление отражённых радиолокационных сигналов на фоне негауссовских коррелированных помех // Радиотехника и электроника. — №4. — 2022. — С. 1-8. (**Web of Science**).

4. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Синтез и анализ обнаружителей радиолокационных сигналов, отражённых от маневрирующей цели // Известия вузов. Радиоэлектроника. — № 3. — 2005. — С. 56-62. (**Scopus**)

5. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Выбор числа каналов обнаружителя маневрирующих целей // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. — Выпуск 18. — 2006. — С. 26-29.

6. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Реализация метода Гуда - Томаса для доплеровской фильтрации сигналов // Цифровая обработка сигналов. — № 4. — 2007. — С. 51-53.

7. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Сопровождение маневрирующей цели на фоне помех // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. — Выпуск 31. — 2010. — С. 89-91.

8. Кошелев В.И., Белокуров В.А., Логинов С.Н. Реализация алгоритмов доплеровской фильтрации сигналов на базе современных сигнальных процессоров фирмы Analog Device // Вопросы радиоэлектроники. Серия радиолокационная техника. — Выпуск 3. — 2010. — С. 65-76.

9. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Обнаружение и сопровождение малоразмерного объекта // Вопросы радиоэлектроники. Серия радиолокационная техника. — Выпуск 1. — 2011. — С.97 -105.

10. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Использование фильтра Калмана с перекрёстными связями в системе ориентации высокоманевренного объекта // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. — №1 — 2011. — С. 3 -7.

11. Андреев В.Г., Белокуров В.А. Метод повышения точности начальной выставки бесплатформенных навигационных систем // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. — №2.—2011.— С. 28-33.

12. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Вычисление порога при межпериодном

обнаружении малоразмерной цели // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. — №4. — 2011. — С. 31-34.

13. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Метод повышения дальности действия в РЛС с квазинепрерывным сигналом // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. — №1. — 2012. — С. 28-33.

14. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Синтез алгоритма обнаружения цели, совмещённого с устранением неоднозначности по дальности // Известия вузов России. Сер. Радиоэлектроника. — №3. — 2012. — С. 36-41.

15. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Синтез и анализ адаптивного межпачечного алгоритма обнаружения малоразмерной цели // Цифровая обработка сигналов. — № 2. — 2012. — С. 49-54.

16. Кошелев В.И., Белокуров В.А., Горкин В.Н., Холопов И.С. Использование трёхосных MEMS гироскопов и акселерометров для задач определения пространственной ориентации подвижных объектов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. — Выпуск 41. — 2012.— С. 22-37.

17. Кошелев В.И., Андреев В.Г., Белокуров В.А. Когерентно-некогерентное накопление слабых радиотехнических сигналов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета.— № 4.— 2012.— С. 18-21.

18. Андреев В.Г., Белокуров В.А. Моделирование магнитометрических сигналов бесплатформенных инерциальных навигационных систем // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета.— № 1.— 2013.— С. 45-49.

19. Кошелев В.И., Андреев В.Г., Белокуров В.А. Снижение погрешности угловой ориентации бесплатформенных навигационных систем, вызванной дрейфом микромеханических гироскопов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета.— № 2.— 2013.— С. 27-32.

20. Кошелев В.И., Андреев В.Г., Белокуров В.А. Обнаружение сигналов последовательным методом Монте-Карло с систематической перевыборкой // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета.— № 4. Ч.1 — 2013.— С. 35-38.

21. Белокуров В.А. Рекуррентное обнаружение маневрирующего объекта // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета.— № 4. Ч.2 — 2013.— С. 6-10.

22. Белокуров В.А. Обнаружение объекта при низком отношении сигнал-шум // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета.— № 2. — 2014.— С. 146-149.

23. Белокуров В.А., Козлов Д.Н. Обнаружение-сопровождение маневрирующей цели при низком отношении сигнал-шум // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета.— № 3.— 2014.— С. 46-50.

24. Белокуров В.А. Оценка амплитуды и координат движущегося объекта гауссовским парциальным фильтром с разделением вектора состояний // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета.— № 5.—2015.— С. 50-55.

25. Андреев В.Г., Чан Нгюк Лык, Белокуров В.А. Параметрический спектральный анализ зашумлённых сигналов с гауссовской формой спектра // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета.— № 55.—

2016.— С. 16-21.

26. Белокуров В.А. Система угловой ориентации на основе гауссовского парциального фильтра // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета.— № 2.— 2016.— С. 11-17.

27. Бакулев П.А., Кошелев В.И., Белокуров В.А. Синтез последовательного алгоритма сопровождения траекторий с адаптивным порогом при первичном обнаружении сигнала // Радиотехника. — № 8. — 2016.— С. 67-74.

28. Белокуров В.А. Применение автоковариационного метода наименьших квадратов в инвариантной схеме угловой ориентации // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета.— № 2. — 2018.— С. 9-17.

29. Белокуров В.А. Стабилизация уровня ложной тревоги при обнаружении объекта на фоне негауссовского шума // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета.— № 4.—2018.— С. 22-27.

30. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Алгоритм стабилизации уровня ложных тревог при межобзорном накоплении отражённых сигналов // Цифровая обработка сигналов. — № 4. — 2018. — С. 50-54.

31. Белокуров В.А. Когерентное межобзорное накопление флуктуирующих пачек импульсов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета.— № 1.— 2019.— С. 15-19.

32. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Обнаружение флуктуирующей цели на фоне негауссовского шума при межобзорном накоплении // Радиотехника. — №5 — 2019. — С. 161-167.

33. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Анализ плотности распределения вероятностей радиолокационного сигнала на выходе первичного порогового устройства межобзорного обнаружителя // Радиотехника. — №11. — 2019 — С. 41-46.

Доклады в трудах зарубежных конференций

34. Андреев В.Г., Галкин В.И., Горкин В.Н., Белокуров В.А., Кошелев В.И., Молчанов А.В. Модуль фильтрации сигналов лазерного гироскопа // 17th Saint Petersburg International conference on integrated navigation systems: Proceedings // Saint Petersburg: Concern CSRI Electropribor, 2010.— Р. 52-53. (**Scopus**)

35. Андреев В.Г., Галкин В.И., Кошелев В.И., Белокуров В.А., Молчанов А.В. Цифровая фильтрация сигналов инерциального модуля с целью повышения точности угловой ориентации // 18th Saint Petersburg International conference on integrated navigation systems: Proceedings // Saint Petersburg: Concern CSRI Electropribor, 2011.— Р. 52-53. (**Scopus**)

36. Кошелев В.И., Белокуров В.А., Козлов Д.Н. Оптимизация каналов по скорости и ускорению в многоканальном доплеровском фильтре // 2nd Mediterranean Conference on Embedded Computing MECO-2013, Budva, Montenegro, June 15th-20th 2013.-Р.180-183. (**Scopus**)

37. Кошелев В.И., Белокуров В.А., Козлов Д.Н. Алгоритм парциальной фильтрации для обнаружения маневрирующей цели // Международная IEEE-Сибирская конференция по управлению и связи (Sibcon-2013), 12-13 сентября 2013 г., Красноярск. (SCOPUS ID: 2-s2.0-84893331734). (**Scopus**)

38. Кошелев В.И., Андреев В.Г., Белокуров В.А. Начальная выставка бесплатформенных навигационных систем с компенсацией вибраций носителя // XIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навига-

ционными системам, 28-30 мая 2012 г, Санкт-Петербург. – С. 101-104. (**Scopus**)

39. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Подпороговое обнаружение-сопровождение малоразмерной маневрирующей цели // CriMiCo 2014 - 2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology: Conference Proceedings. 2014. – С. 1131-1132. (**Scopus**)

40. Белокуров В.А., Козлов Д.Н. Использование парциальной фильтрации для обнаружения высокоманевренных объектов // 12th International conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE), 2014, Novosibirsk, Russia, October 2nd-4nd 2014.– Vol. 1.– P. 335-338 (SCOPUS ID: 2-s2.0-84924386445). (**Scopus**)

41. Молчанов А.В., Чиркин М.В., Белокуров В.А., Кошелев В.И. Прецизионная обработка квадратурных сигналов цифрового лазерного гироскопа // 22nd Saint Petersburg International conference on integrated navigation systems: Proceedings // Saint Petersburg: Concern CSRI Electropribor, 2015.– P. 307-314. (**Scopus**)

42. Молчанов А.В., Чиркин М.В., Белокуров В.А., Кошелев В.И. Применение передовой методики обработки к триаде прецизионных лазерных гироскопов // 23rd Saint Petersburg International conference on integrated navigation systems: Proceedings // Saint Petersburg: Concern CSRI Electropribor, 2016. – P. 300 304. (**Scopus**)

43. Кошелев В.И., Чиркин М.В., Белокуров В.А., Мишин В.Ю. Реализация модуля обработки сигналов цифрового лазерного гироскопа на ПЛИС // 6rd Mediterranean Conference on Embedded Computing MECO-2017, Bar, Montenegro, June 15th-20th 2017. – P.180-183. (**Scopus**)

44. Белокуров В.А. Реализация аффинного преобразования на языке HLS // 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing MECO-2018, Budva, Montenegro, June 10th-14th 2018. – P.355-358. (**Scopus**)

45. Кошелев В.И. Белокуров В.А., Кагаленко М.В. Применение характеристических функций при межобзорном накоплении // 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing MECO-2019, Budva, Montenegro, June 10th-14th 2019. – P.256-261. (**Scopus**)

46. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Multi-Frame Detection on Board Platform //9th Mediterranean Conference on Embedded Computing MECO-2020, Budva, Montenegro. (**Scopus**)

Доклады в трудах всероссийских и международных конференций

47. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Алгоритм обнаружения маневрирующей цели // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции DSPA – 2003, Москва, 2003.

48. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Адаптивное выделение сигналов, отражённых маневрирующим объектом на фоне шумов // Цифровая обработка сигналов и ее применения: материалы докладов VII Международной научно-технической конференции DSPA-2005.– Москва, 2005.– Т. I.– С. 267 271.

49. Кошелев В.И., Андреев В.Г., Галкин В.И., Горкин В.Н., Белокуров В.А., Холопов И.С. Улучшение характеристик микромеханических датчиков угловых скоростей // Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA 2010: тез. докл. 12-й Междунар. конференции и выставки.–Т. 2.– М.: Институт проблем управления РАН, 2010.– С. 59 61.

50. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Алгоритм совместного обнаружения и оценивания траекторий малоразмерных объектов // Радиолокационная техника: устройства, станции, системы РЛС-2010 – Тез. докл. II-й Всероссийской НТК, Муром. 2010.– С. 52-53.

51. Белокуров В.А. Алгоритм обнаружения малоразмерных объектов // XVI Международная НТК «Информационные системы и технологии ИСТ-2010». Нижний Новгород, 2010. – С. 16.

52. Кошелев В.И., Андреев В.Г., Белокуров В.А. Использование метода парциальной фильтрации при обнаружении малоразмерного объекта // Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA 2011: тез. докл. 13-й Междунар. конференции и выставки.–Т. 2.– М.: Институт проблем управления РАН, 2011.– С. 3-4.

53. Кошелев В.И., Андреев В.Г., Белокуров В.А. Повышение эффективности обнаружения малоразмерных высокоскоростных целей // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: материалы 4-й Междунар. науч.-техн. конференции ARMIMP-2011 / РНТОРЭС им. А.С. Попова.— М.; Суздаль, 2011.— С. 101-102.

54. Белокуров В.А. Исследование функционирования алгоритма РНД при малом отношении сигнал-шум // 19-я Международная научно-техническая конференция «Современное телевидение и радиоэлектроника», 15-16 марта 2011, Москва. - С.250-251.

55. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Межобзорное обнаружение малоразмерной цели на фоне шумов // 20-я Международная научно-техническая конференция «Современное телевидение и радиоэлектроника», 20-21 марта 2012 г., г. Москва. – С. 154-155.

56. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Повышение дальности действия бортовой РЛС // 67-я Всероссийская конференция с международным участием «Научная сессия, посвящённая Дню радио», 16-17 мая 2012, Москва. - С.301-302.

57. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Адаптивный межпачечный алгоритм обнаружения малоразмерной цели с раскрытием неоднозначности по дальности // II-я Всероссийская конференция «Радиоэлектронные средства передачи и приёма сигналов и визуализации информации», 27-28 июня 2012, Таганрог, С. 41-43.

58. Кошелев В.И., Белокуров В.А., Андреев В.Г. к-этапное межпачечное обнаружение малоразмерной цели // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: материалы 5-й Междунар. научно-техн. конференции ARMIMP-2012 / РНТОРЭС им. А.С. Попова.— М.; Суздаль, 2012.— С. 103-104.

59. Кошелев В.И., Андреев В.Г., Белокуров В.А. Повышение точности измерения дальности до цели при межпачечном накоплении радиотражений // Цифровая обработка сигналов и её применение — DSPA 2013: тез. докл. 15 й Междунар. конференции.— Т. 1.— М.: Институт проблем управления РАН, 2013.— С. 295-296.

60. Андреев В.Г., Белокуров В.А., Фролов Д.А. Применение переопределённых авторегрессионных моделей для моделирования дрейфа микромеханических гироскопов в бесплатформенных курсогировертикалях // Гироскопия и навигация — № 2. —2013. — стр. 133.

61. Кошелев В.И., Белокуров В.А., Андреев В.Г. Выбор порога обнаружения

при межпачечном накоплении сигнала // Перспективные технологии в средствах передачи информации—ПТСПИ 2013: тез. докл. X Междунар. конференции.— Т. 1.— Владимир: ВлГУ, 2013.— С. 169-171.

62. Белокуров В.А., Андреев В.Г. Проблемы теории и практики развития войск ПВО ВС в современных условиях: материалы XXI военно-научной конференции.— Смоленск: ВА ВПВО ВС РФ им. Маршала Советского Союза А.М. Василевского, 2013.— Ч. 2.— С. 40-41.

63. Кошелев В.И., Белокуров В.А., Андреев В.Г. Обработка радиоотражений от маневрирующей цели // Перспективные технологии в средствах передачи информации: материалы 11-й Междунар. науч.-техн. конференции /Владим. гос. ун-т; редкол.: А.Г. Самойлов.— Владимир: ВлГУ, 2015.— С. 188-190.

64. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Повышение точности определения угловой скорости датчика угловой скорости с использованием метода наименьших квадратов // Цифровая обработка сигналов и её применение — DSPA 2016: тез. докл. Междунар. конференции.— Т. 2.— М.: Институт проблем управления РАН, 2016.— С. 295-296.

65. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Повышение эффективности межобзорного накопления радиолокационных сигналов // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». – Рязань. 2016. С.114-119.

66. Кошелев В.И., Белокуров В.А. Анализ эффективности межобзорного алгоритма обнаружения объекта на фоне негауссовского шума // Материалы II Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». Рязань, 2017. – С.138-144.

67. Белокуров В.А. Алгоритм межпачечного когерентного накопления отражённого сигнала // Материалы XII Всероссийской научно-технической конференции "Радиолокация и радиосвязь". Москва. 2018. ИРЭ РАЕ им. Котельникова. С. 79-81.

68. Белокуров В.А. Пороговая обработка при обнаружении флуктуирующих пачек импульсов // Материалы XXV Международной научно-технической конференции "Радиолокация, навигация, связь". Том 3. Воронеж.; ВГУ. – 2019. С. 279-284.

69. Белокуров В.А. Межобзорное накопление на фоне шума с гамма-распределением // Материалы Всероссийской конференции (с международным участием) "Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий" (REDS-2019).

70. Белокуров В.А. Пороговая обработка при межобзорном накоплении радиолокационных данных // Материалы XIII-й Всероссийская научно-техническая конференция "Радиолокация и радиосвязь". Москва. 2019. ИРЭ РАЕ им. Котельникова. С. 112-116.

71. Белокуров В.А. Алгоритм обнаружения зависшего воздушного объекта // XIV Международная конференция "Перспективные технологии в средствах передачи информации - ПТСПИ-2021", 6-7 октября 2021 г., г. Владимир.

72. Белокуров В.А. Синтез алгоритма межобзорного накопления на фоне негауссовских коррелированных помех // XXVII Международная научно-техническая конференция "Радиолокация, навигация, связь", 28-30 сентября 2021 г., Воронеж.

Патенты

73. Способ обнаружения сигналов, отраженных от маневрирующей цели. Патент РФ № 2282873 (заявка № 2004138168. Приор. 27.12.2004. Зарегистр. 27.08.2006. Авторы: Кошелев В.И., Белокуров В.А.

74. Способ адаптивной настройки каналов ускорения в многоканальном обнаружителе маневрирующей цели. Заявка N 2013159048/07 (091962). Дата подачи заявки 30.12.2013. Авторы: Козлов Д.Н., Кошелев В.И., Белокуров В.А.

75. Способ обнаружения траекторий маневрирующего объекта. Заявка N 2014104650/07 (007409). Дата подачи заявки 10.02.2014. Авторы: Козлов Д.Н., Кошелев В.И., Белокуров В.А.

76. Устройство регистрации полётной информации парашютиста. Патент РФ 170197U1 (заявка № 2016149958) Приор. 19.12.2016. Зарегистр. 18.04.2017. Авторы: Концевой А.Г., Кутовой С.С., Осипов М.П., Абанин В.С., Кошелев В.И., Белокуров В.А.

Б е л о к у р о в Владимир Александрович

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ МЕЖОБЗОРНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ
МАЛОРАЗМЕРНЫХ И СВЕРХМАНЕВРЕННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ
ОБЪЕКТОВ С УЧЁТОМ БОРТОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 2,0.

Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ