

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.396.96

ЛЕ
Ван Кыонг

**МНОГОКАНАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ
РАДИОЛОКАЦИОННОМ НАБЛЮДЕНИИ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

Минск 2022

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель **Козлов Сергей Вячеславович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационных радиотехнологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Официальные оппоненты: **Козадаев Константин Владимирович**, доктор физико-математических наук, профессор, проректор по учебной работе и интернационализации образования «Белорусский государственный университет».

Шаляпин Сергей Валентинович, кандидат технических наук, доцент, главный конструктор проекта производственного унитарного предприятия «Завод СВТ».

Оппонирующая организация Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь».

Защита состоится «19» мая 2022 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.02 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89 e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан « 11 » апреля 2022 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
кандидат технических наук, доцент

Т. А. Пулко

ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей радиолокационных станций (РЛС) является обеспечение требуемой дальности обнаружения воздушных объектов (ВО) как в беспомеховых условиях, так и в условиях помех. Традиционно это достигалось увеличением мощности излучения, длительности зондирующих сигналов (ЗС) и коэффициента усиления антенны в сочетании с использованием многолучевых диаграмм направленности (ДН) приемных антенн. С развитием РЛС с электронным управлением лучом появилась возможность увеличения дальности обнаружения ВО в заданных направлениях путем перераспределения энергии ЗС в пределах рабочего сектора и реализации различных вариантов «барьерных», то есть при фиксированном угловом положении главного лепестка ДН антенны, режимов обнаружения. Вместе с тем, длительность когерентного накопления (КН) была ограничена временем корреляции флуктуаций отраженного сигнала (ОС) и не превышала нескольких десятков миллисекунд, общая длительность накопления соответствовала времени пребывания цели в элементе разрешения и не превышала сотен миллисекунд.

В настоящее время имеет место усложнение сигнально-помеховой обстановки за счет увеличения числа работающих на излучение радиосредств и возможного использования источников преднамеренных помех. Появляются беспилотные летательные аппараты, конструктивно выполненные из слабоотражающих материалов и имеющие малые значения эффективной площади рассеяния (ЭПР). Становятся более жесткими ограничения, обусловленные экономическими факторами и требованиями электромагнитной совместимости. В указанных условиях традиционные пути обеспечения требуемых дальности обнаружения ВО являются практически исчерпанными.

Вместе с тем, очевидный прогресс в технике высокоточной обработки сигналов и антенных систем с электронным управлением лучом позволяет создавать РЛС с адаптивным обзором пространства, использующие широкополосные зондирующие сигналы при их многоканальной обработке. В ряде практически важных ситуаций время наблюдения ВО для таких РЛС может быть увеличено до значений порядка единиц секунд. При таком времени наблюдения энергия принимаемого сигнала разделяется между несколькими элементами разрешения и возникают явления миграции дальности (МД), когда локальные центры отражения цели перемещаются за время наблюдения на расстояние, превышающее разрешающую способность по дальности, и аналогичное явление миграции частоты (МЧ), обусловленное ненулевыми значениями радиальных ускорения и производной ускорения цели. Ситуации, когда необходимо учитывать МД и МЧ, будем называть режимом длительного радиолокационного наблюдения (ДРлН), а обработку принимаемых сигналов в этом случае – длительным накоплением. Кроме того, при использовании сигналов с определенной шириной спектра цель из точечной становится протяженной по дальности.

Парирование указанных явлений возможно на основе реализации неадаптивных и адаптивных способов обработки сигналов при обнаружении ВО, учитывающих явления МД и МЧ, протяженный по дальности характер цели и кор-

реляционные свойства ОС в каждом элементе разрешения. Эти способы могут быть полезным для «барьерных» режимов, при обнаружении цели с увеличением времени наблюдения в угловых областях с низким отношением сигнал/шум, поиске цели на большой дальности по данным от средств обнаружения в других частотных диапазонах или физических полях и в ряде других случаев.

Таким образом, данная работа посвящена обоснованию способов многоканальной обработки сигналов при ДРЛН, позволяющих повысить дальность или вероятность обнаружения ВО в условиях низких отношений сигнал/шум без увеличения излучаемой мощности.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами, темами

Работа выполнена на кафедре информационных радиотехнологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в интересах повышения эффективности РЛС обнаружения воздушных объектов для Социалистической Республики Вьетнам.

Тема диссертации включена в план научной работы учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» и соответствует Перечню приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности в Республике Беларусь на 2021–2025 гг. в области машиностроения, машиностроительных технологий, приборостроения и инновационных материалов (п. 4), обеспечения безопасности человека, общества и государства (п. 6).

Связь с крупными научными программами подтверждается использованием результатов исследований в НИР ГБ № 15–2028 «Разработка научных основ, принципов формирования и обработки сигналов в радиотехнических системах новых поколений, работающих в условиях больших динамических диапазонов сигналов», НИР ГБ № 20-2006 «Разработка способов обработки сигналов, принципов построения многоканальных и многочастотных радиотехнических средств и систем нового поколения с повышенными информационными возможностями и помехозащищенностью» и в НИР № 21-3060 «Обоснование алгоритмов первичной обработки радиолокационной информации высокоинформативной цифровой помехоустойчивой аппаратуры радиолокационного мониторинга земной поверхности для космических аппаратов», выполняемой в рамках задания № 1.4.2 «Современные системы радиолокационного мониторинга земной поверхности» ГПНИ «Цифровые и космические технологии, безопасность человека, общества и государства», проводимых кафедрой информационных радиотехнологий в соответствии с планом научных исследований учреждения образования «Белорусский Государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Цель и задачи исследования

Цель – повышение эффективности радиолокационных средств за счет реализации новых способов обработки сигналов при обнаружении воздушных

объектов в процессе их длительного радиолокационного наблюдения.

Объект – процесс длительного радиолокационного наблюдения.

Предмет – способы обработки сигналов при обнаружении воздушных объектов при длительном когерентном, некогерентном и комбинированном накоплении отраженных сигналов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Анализ параметров движения и характеристик сигналов, отраженных от типовых радиолокационных целей при их обнаружении в процессе ДРЛН.

2. Разработка моделей принимаемого сигнала с учетом изменения времени задержки и доплеровского сдвига частоты в процессе ДРЛН точечных и протяженных по дальности ВО.

3. Разработка способов когерентного, некогерентного и комбинированного накопления сигнала, отраженного от точечной нефлуктуирующей цели с учетом миграции дальности и частоты.

4. Разработка способа обработки сигналов, отраженных от протяженного по дальности воздушного объекта с учетом миграций и угловых рысканий.

5. Разработка методик и проведение исследования эффективности обнаружения ВО при ДРЛН.

6. Разработка рекомендаций по областям применения и практической реализации способов обработки сигналов при ДРЛН воздушных объектов.

Научная новизна

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

разработка базового способа КН сигнала, отраженного от точечной нефлуктуирующей цели, выполнена на основе уточненной модели его спектрально-временной структуры, учитывающей ненулевые вторую и третью производные дальности до цели, путем взвешенного суммирования отсчетов спектров принятых в каждом периоде повторения сигналов с фазовыми множителями, определяемыми производными дальности до цели и отсчетами амплитудно-фазочастотной характеристики (АФЧН) согласованного с одиночным сигналом фильтра, что позволило обеспечить компенсацию миграции дальности и частоты и когерентное накопление принимаемого сигнала на интервале времени 1...3 секунды постоянства параметров движения цели;

в способе обработки на основе дискретного преобразования Фурье (ДПФ) использована многоканальная внутрипериодная обработка (ВПО) с одновременной компенсацией МД и МЧ при расстановке каналов по «грубой» радиальной скорости, радиальному ускорению и его производной исходя из попадания сигналов на всем интервале наблюдения в один элемент разрешения по дальности и в один элемент разрешения по скорости, что *обеспечило* сокращение числа каналов обработки, в сравнении с базовым способом, пропорционально отношению несущей частоты к ширине спектра зондирующего сигнала;

в способе обработки на основе преобразования замкового камня (ПЗК) использована предварительная многоканальная ВПО с одновременной компенсацией только квадратичного и кубического компонента МД и МЧ при расстановке каналов по радиальной скорости исходя из интервала однозначного из-

мерения скорости и каналов по ускорению и его производной исходя из допустимого изменения доплеровского сдвига частоты на величину, обратно пропорциональную длительности наблюдения, что *обеспечило* сокращение числа каналов обработки, в сравнении с базовым способом, в число импульсов раз;

в способе комбинированного накопления (КомбН) принимаемого от точечной цели сигнала с разделением его на фрагменты по периодам повторения использованы процедуры когерентного накопления и расчета возможного положения цели по оси дальности для каждого фрагмента в соответствии с диапазоном «грубой» скорости и ускорением цели, выбора максимумов квадратов модулей спектральных отсчетов для каждого фрагмента в координатах «дальность-скорость», их суммирования и сравнения с адаптивно устанавливаемым на основе оценки мощности шума на выходе ВПО и порядковых статистик порога обнаружения, что *обеспечило* сокращение числа каналов обработки в сравнении со способами КН, пропорционально второй степени числа фрагментов;

в способе обработки сигналов, отраженного от протяженного по дальности ВО, использована компенсация МД и частичная компенсация МЧ на всей протяженности времени наблюдения с расстановкой каналов по «грубой» радиальной скорости и «грубому» радиальному ускорению исходя из компенсации МД с точностью до половины элемента разрешения по дальности с последующим адаптивным разделением принимаемого для каждого элемента разрешения по дальности сигнала на фрагменты по периодам повторения и комбинированным накоплением сигналов в каждом элементе разрешения по дальности путем суммирования максимумов квадратов модулей отсчетов спектров сигналов по всем фрагментам; для определения оптимального числа фрагментов использован критерий максимума оценки нормированного расстояния между выходным сигналом накопителя и средним значением выходного сигнала при наличии только шума, что *обеспечило* формирование решающей статистики с учетом частичной компенсации МЧ и угловых рысканиях ВО.

Положения, выносимые на защиту

1. Способы многоканальной обработки при КН сигнала, отраженного от точечной нефлуктуирующей цели, *отличающиеся* вычислением результатов внутрипериодной обработки (ВПО) в спектральной или временной области с одновременной компенсацией МЧ и составляющих МД в соответствии с настройкой канала обработки с последующим междупериодным накоплением сигнала на основе суммирования спектров для базового способа обработки или с использованием дискретного преобразования Фурье или преобразования замкового камня, что *обеспечивает* возможность накопления сигнала на временном интервале до 1...3 секунд, соответствующем постоянству параметров движения цели, с увеличением дальности обнаружения в 2...3 раза. Базовый способ обработки используется при известных производных дальности цели, выбор способа обработки на основе преобразований Фурье или замкового камня при неизвестных параметрах движения цели определяется соотношением между числом импульсов в пачке и отношением несущей частоты к ширине спектра зондирующего сигнала.

2. Способ многоканального комбинированного накопления сигнала, отраженного от точечной цели, *отличающийся* разделением его на непересекающиеся фрагменты, КН каждого фрагмента и суммированием максимумов квадратов модулей результатов, выбираемых из области по дальности и радиальной скорости в соответствии с настройкой канала по радиальному ускорению и минимальной и максимальной радиальной скорости цели, что *обеспечивает* сокращение числа каналов обработки пропорционально второй степени числа фрагментов при энергетических потерях в сравнении с КН на всем интервале наблюдения до 4,2 дБ.

3. Способ обработки сигнала, отраженного от протяженного по дальности ВО, *отличающийся* многоканальной ВПО по опорным значениям радиальной скорости и радиального ускорения при компенсации МД и частичной компенсацией МЧ, числу фрагментов, на которые разделяется сигнал в каждом элементе разрешения по дальности, выбором результатов обработки в каждом канале и для каждого элемента разрешения по дальности с максимальным значением нормированного расстояния между результатами обработки принимаемой реализации и шума, что *обеспечивает* возможность увеличения времени накопления с 0,06 секунд при ширине спектра сигнала 10 МГц и радиальной скорости ВО 250 м/с до значений 1...3 секунды, соответствующих постоянству параметров движения центра масс объекта, в сочетании с возможностью использования сигналов с шириной спектра до 100...150 МГц.

Личный вклад соискателя ученой степени

Представленные в диссертационной работе научные результаты, а также положения, выносимые на защиту, получены соискателем самостоятельно.

Основным соавтором публикаций является научный руководитель – доктор технических наук, доцент С.В. Козлов, который осуществлял определение целей и постановку задач исследований, принимал участие в проведении компьютерного моделирования, интерпретации, обобщении и публикации полученных результатов.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 55, 56 и 57-й научных конференциях аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск, 2019, 2020, 2021 г.); XXV Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация и связь» (г. Воронеж, Россия, 2019 г.); XXVI Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация и связь» (г. Воронеж, Россия, 2020 г.); открытой республиканской научно-практической конференции «Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020» (г. Минск, БГУИР, 28-29 октября 2020 г.). XXVII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация и связь» (г. Воронеж, Россия, 2021 г.).

Опубликование результатов диссертации

По результатам исследований, представленных в диссертации, опублико-

вано 24 научные работы, в том числе 5 статей в научных рецензируемых журналах, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, объемом 3,01 авторского листа, 13 статей в сборниках трудов научных конференций объемом 4,93 авторского листа, 6 тезисов докладов в сборниках материалов научных конференций. Общий объем публикаций составляет 7,94 авторского листа.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, трех глав, заключения, библиографического списка и приложений.

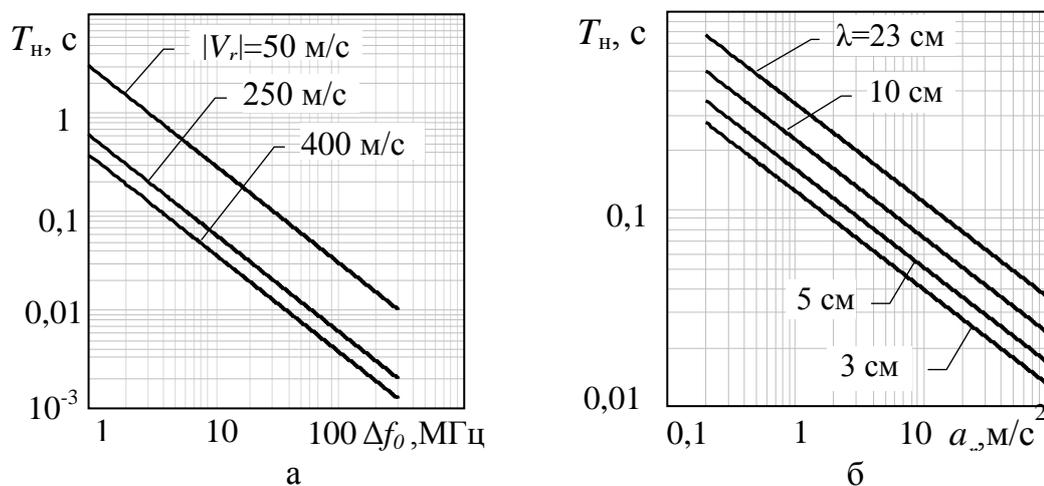
Общий объем диссертации составляет 200 страницы, из них 152 страницы основного текста, 68 иллюстрации на 25 страницах, 10 таблиц на 5 страницах, библиографического списка из 131 наименований на 11 страницах, списка собственных публикаций из 24 наименований на 3 страницах и 1 приложения на 4 страницах, включающее два акта внедрения результатов диссертации.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во *введении* показана актуальность темы диссертации, обоснованы цель, объект, предмет и задачи диссертационной работы.

В *первой главе* обобщены особенности реализации режима ДРЛН ВО, выполнена оценка влияния МД и МЧ, разработаны сценарии использования режима ДРЛН, обобщены модели движения центра масс ВО, его траекторных неустойчивостей (ТН) и угловых рысканий (УР) и обобщены модели ОС.

Установлено (рисунок 1), что при типовой скорости ВО 250 м/с радиолокационное наблюдение из-за МД следует считать длительным начиная с $T_{\text{н}}=0,5 \dots 1$ с; 50...100 мс и 6 мс для сигналов с шириной спектра $\Delta f_0=1$ МГц, 10 МГц и 100 МГц, соответственно. Использование известных процедур обработки из-за МЧ при маневре цели с радиальным ускорением $a_r=10 \dots 30$ м/с² ограничено временем наблюдения 10...100 мс.



а – от ширины спектра сигнала; б – от радиального ускорения

Рисунок 1. – Зависимости граничных значений, времени наблюдения, при которых не нужно учитывать МД и МЧ

Показано, что ДРЛН может быть использовано в барьерном режиме функционирования РЛС, обнаружении ВО с известными от других систем угловыми координатами и по собственным данным в угловых секторах воздействия интенсивных источников помех, обнаружении и каталогизации искусственных спутников Земли (ИСЗ) и космического мусора при типовых значениях времени наблюдения до нескольких секунд. Максимальное время определяется точность аппроксимации дальности между РЛС и центром масс ВО.

На основе анализа условий наблюдения установлено, что в режиме ДРЛН для прямолинейно движущегося ВО (самолета) необходимо учитывать линейную МД и МЧ, обусловленную радиальным ускорением, для ВО, совершающих маневр (разворот) и ИСЗ – линейную и квадратичную МД и МЧ, обусловленную, в том числе, производной дальности третьего порядка. Для описания закона изменения дальности между ВО и РЛС необходимо использовать полином третьей степени $r(t) = r_0 + V_{0r}t + a_r t^2 / 2 + a'_r t^3 / 6$, где r_0, V_{0r}, a_r, a'_r - начальные дальность, радиальная скорость, радиальное ускорение и производная радиального ускорения. С использованием известных моделей показано, траекторные неустойчивости при движении ВО в турбулентной атмосфере аналогичны изменению параметров движения целей и не существенны с позиций многоканальной обработки.

С учетом угловых рысканий и миграций дальности и частоты в процессе ДРЛН уточнены модели сигнала, принимаемого от одной блестящей точки (БТ) ВО $\dot{S}_\chi(t)$, и в одном элементе разрешения по дальности $\dot{S}_{\text{эл}\ell}(t)$, имеющие вид:

$$\dot{S}_\chi(t) = A_\chi(t - t_{r_\chi}(t)) e^{j\varphi_\chi(t)} e^{j\omega_0 t} e^{j\frac{4\pi}{\lambda} r(t)} \cdot \sum_{k=0}^{K-1} \dot{U}_0(t - kT_r - t_{r_\chi}(t)), \quad (1)$$

где $A_\chi(t)$ - закон изменения амплитуды отраженного от χ -й БТ сигнала, учитывающий зависимость ЭПР от времени (угла поворота) для вращающихся элементов конструкции; $\varphi_\chi(t) = \frac{4\pi}{\lambda} (r_{\text{ур}\chi}(t) + r_{\text{укк}\chi}(t))$ - разность фаз сигналов при отражении от χ -й БТ и центра масс объекта; $r_{\text{ур}\chi}(t), r_{\text{укк}\chi}(t)$ - проекция радиус-вектора до χ -й БТ от центра масс при угловых рысканиях и упругих колебаниях конструкции ВО; T_r - период повторения импульсов; t_{r_χ} - время задержки ОС для χ -й БТ; $\dot{U}_0(t)$ - закон модуляции одиночного ЗС; $\omega_0 = 2\pi f_0$ - несущая частота; $\lambda = c / f_0$ - длина волны; c - скорость света; K - число импульсов в пачке

$$\dot{S}_{\text{эл}\ell}(t) = e^{j\omega_0 t} e^{j\frac{4\pi}{\lambda} r(t)} \sum_{k=0}^{K-1} \dot{U}_0\left(t - kT_r - t_{r_0}(t) - \frac{\ell}{2\Delta f_0}\right) \cdot \sum_{\chi \in \chi_\ell} A_\chi(t - t_{r_\chi}(t)) e^{j\varphi_\chi(t)}, \quad (2)$$

где $t_{r_0}(t)$ - закон изменения времени задержки для элемент разрешения по дальности с $\ell=0$; $\sum_{\chi \in \chi_\ell} A_\chi(t - t_{r_\chi}(t)) e^{j\varphi_\chi(t)} = \dot{M}_\ell(t)$ - комплексная огибающая ОС,

принимаемого в ℓ -м элементе разрешения по дальности; χ_ℓ - множество номеров БТ, соответствующих ℓ -му элементу разрешения по дальности.

Для модели ОС от протяженной по дальности цели $\dot{S}_\chi(t) = \sum_\ell \dot{S}_{\text{эл}\ell}(t)$, где суммирование ведется по всем ℓ -м элементам разрешения по дальности, где находится ВО в начальный момент времени. Особенностью уточненных моделей (1), (2) является зависимость времени задержки и сдвига частоты от текущего времени для каждого элемента разрешения по дальности.

Проведен обзор литературы по теме исследований. Показано, что построение обнаружителей сигналов при ДРЛН точечных и протяженных по дальности ВО с учетом МД и МЧ исследованы недостаточно.

Вторая глава посвящена обоснованию способов обработки сигналов при ДРЛН точечной нефлуктуирующей цели. С учетом $|a_r| \neq 0$, $|a'_r| \neq 0$ уточнено время задержки ОС. Показано, что с требуемой для практики точностью для его расчета необходимо использовать скорректированные начальные дальность r_{0c} , радиальные скорость V_{0rc} , ускорение a_{rc} и производную ускорения a'_{rc} ВО. Приведены выражения для указанных параметров.

Для обоснования способов обработки использовано временное представление ОС в виде:

$$\dot{S}(t_m, t_k) = S_0 \text{rect} \left[\frac{1}{T_0} (t_m - \tau_k) \right] e^{j\pi\mu_c(t_m - \tau_k)} e^{-j\psi_k} e^{-j4\pi \frac{f_0}{c} V_{dk} t_m}, \quad (3)$$

где $\tau_k = t_{zc}(t_k) = \frac{2r(t_k) - r(t_k)/c}{c}$, $\psi_k = 4\pi \frac{f_0}{c} \left(r_{0c} + V_{0rc} t_k + \frac{1}{2} a_{rc} t_k^2 + \frac{1}{6} a'_{rc} t_k^3 \right)$ - время задержки начальная фаза для k -го импульса пачки; $V_{dk} = V_{0rc} + a_{rc} t_k + \frac{1}{2} a'_{rc} t_k^2$ - доплеровская скорость цели для k -го импульса пачки; $V_\tau = 2V_{0rc} / c$ - скорость изменения времени задержки; $\mu_c = \mu(1 - V_\tau)^2$ - скорректированная скорость изменения частоты ЛЧМ-сигнала; $t_k = kT_r$ - «медленное» время, которое изменяется от периода повторения к периоду повторения; $t_m = m / F_S$ - «быстрое» время в пределах одного периода повторения; T_0 - длительность импульса; F_S - частота дискретизации; S_0 - амплитуда сигнала.

Базовый способ обработки основан на компенсации МД и МЧ и КН сигнала в спектральной области. Используются (рисунок 2) спектральные преобразования и теорема о сдвиге: вычисляются отсчеты спектры $\dot{G}(F_m, t_k)$ «быстрого» времени; выполняется компенсация МД и МЧ и выравниваются фазы отсчетов спектров путем умножения их на корректирующие фазовые множители $\dot{Q}(F_m, t_k)$, определяемые опорными параметрами V_{0s}, a_s, a'_s движения цели в s -м канале; выполняется КН путем суммирования отсчетов спектров в «медленном» времени; результат умножается на отсчеты амплитудно-фазочастотной характеристики (АФЧХ) $\dot{G}_{\text{сф}}(F_m)$ согласованного фильтра (СФ) одиночного

сигнала (ВПО) и выполняется ДПФ суммарного спектра $\dot{Y}(t) = IFFT \{ \dot{G}_\Sigma(F) \}$:

$$\dot{G}_\Sigma(F_m) = \sum_{k=0}^{K-1} \dot{Q}(F_m, t_k) \dot{G}(F_m, t_k), \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} \dot{Q}(F_m, t_k) = & e^{\underbrace{j \frac{2\pi f_0}{c} (2V_{0s} t_k + a_s t_k^2 + \frac{1}{3} a_s' t_k^3)}_{\text{компенсация МЧ}}} \times \\ & e^{\underbrace{j \frac{4\pi}{c} \left(F_m + \frac{2f_0(V_{0s} + a_s t_k + \frac{1}{2} a_s' t_k^2)}{c} \right) \left(\left(V_{0s} + \frac{f_0}{\mu_c} a_s \right) t_k + \frac{1}{2} \left(a_s + \frac{f_0}{\mu_c} a_s' \right) t_k^2 + \frac{1}{6} a_s' t_k^3 \right)}_{\text{компенсация МД}}}. \quad (5) \end{aligned}$$

Результат применения способа для пачки из $K=1000$ импульсов показан на рисунке 3, где приведены сигналы на выходе ВПО без компенсации МД, при компенсации МД и результат КН.

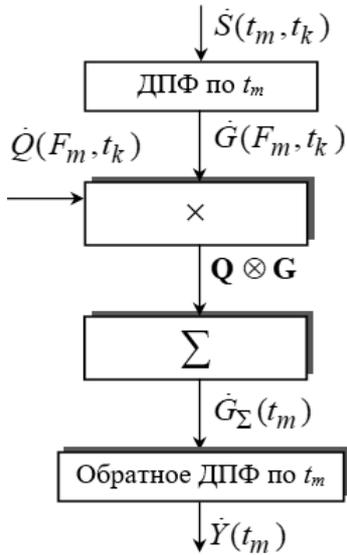


Рисунок 2. – Структура базового способа

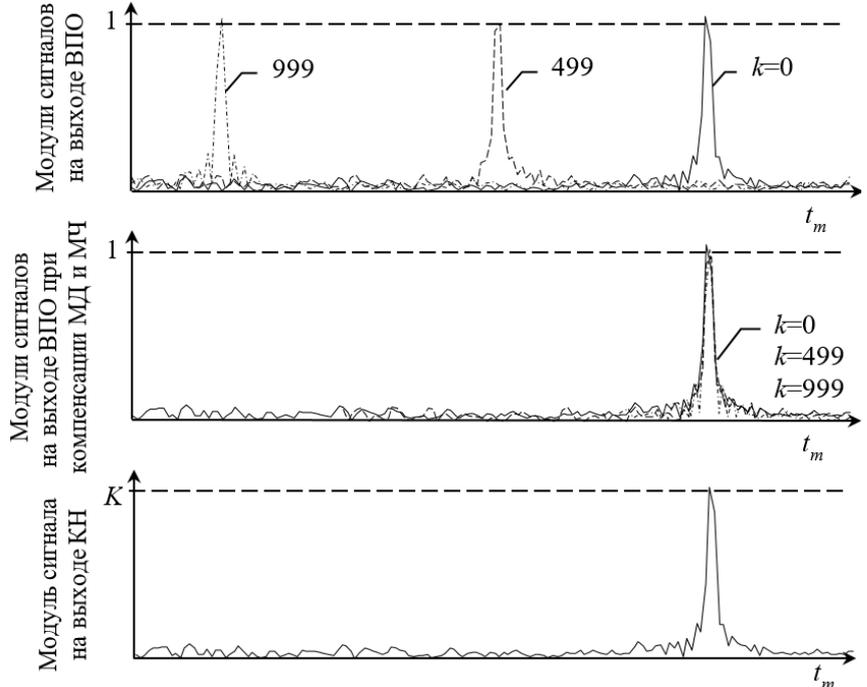


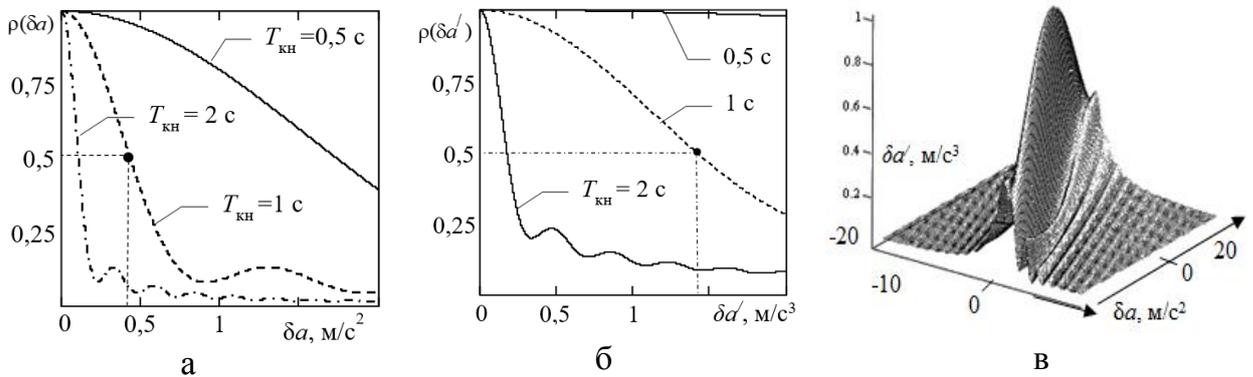
Рисунок 3. – Иллюстрация МД, ее компенсации и КН для базового способа

Для случая ДРЛН при времени КН $T_{\text{КН}}$ получена функция неопределенности (ФН) $\rho(\delta a, \delta a')$ ЗС в координатах «радиальное ускорение (δa) - производная радиального ускорения ($\delta a'$)» и соответствующие разрешающие способности:

$$\rho(\delta a, \delta a') = \frac{1}{T_{\text{КН}}^2} \left| \int_0^{T_{\text{КН}}} e^{j \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{1}{2} \delta a \cdot t^2 + \frac{1}{6} \delta a' \cdot t^3 \right)} dt \right|^2; \quad \Delta a = \frac{0,435 \cdot \lambda}{T_{\text{КН}}^2}; \quad \Delta a' = \frac{1,414 \cdot \lambda}{T_{\text{КН}}^3}. \quad (6)$$

Сечения и вид ФН приведен на рисунке 4. Величины $\Delta V_{\text{ЛМД}}, \Delta a, \Delta a'$

определяют требуемое число каналов обработки $N_{\text{бс}} = N_V N_a N_{a'} = 3,25 \cdot V_{\text{max}} a_{\text{max}} a'_{\text{max}} T_{\text{кн}}^6 / \lambda^3$, где $V_{\text{max}}, a_{\text{max}}, a'_{\text{max}}$ - максимальные радиальные скорость, ускорения и производная ускорения ВО.



а – сечение при $\delta a' = 0$; **б** – сечение при $\delta a = 0$; **в** – тело неопределенности
Рисунок 4. – Сечения ФН и объемный вид тела неопределенности при $\lambda = 1$ м

Способ на основе компенсации МД и МЧ и преобразования Фурье (рисунок 5) основан на многоканальной ВПО с компенсацией МД и МЧ в спектральной области с использованием корректирующих фазовых множителей $\dot{Q}_1(F_m, t_k)$, полученных из $\dot{Q}(F_m, t_k)$ исключением слагаемого $2V_{0s}t_k$ при компенсации МЧ, с последующим КН принимаемого сигнала в каждом элементе разрешения по дальности в отчетах ДПФ по периодам повторения. Введено понятие «разрешающая способность по «грубой» скорости» $\Delta V_{\text{лмд}} = \frac{c}{4\Delta f_0 T_{\text{кн}}}$, определяющее шаг расстановки каналов и точность компенсации линейной МД. Рассчитано число каналов обработки, которое сокращается в сравнении с базовым способом в $f_0 / (2\Delta f_0)$ раз.

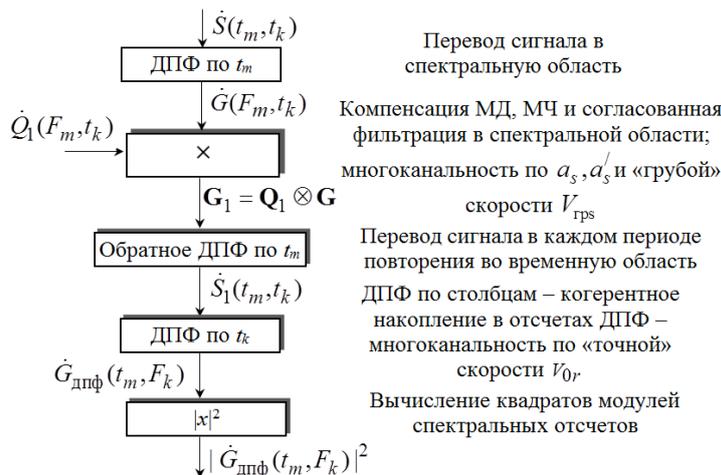


Рисунок 5. – Структура способа на основе компенсации МД, МЧ и ДПФ

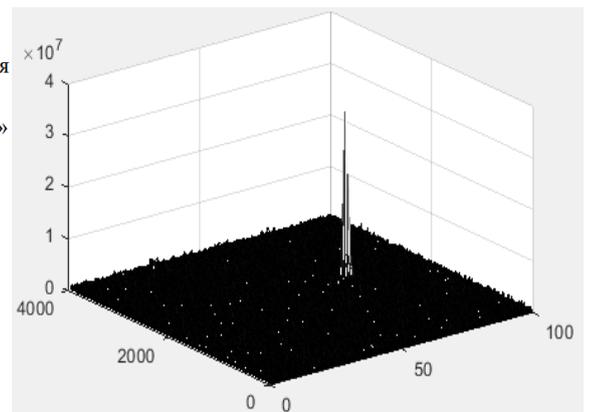
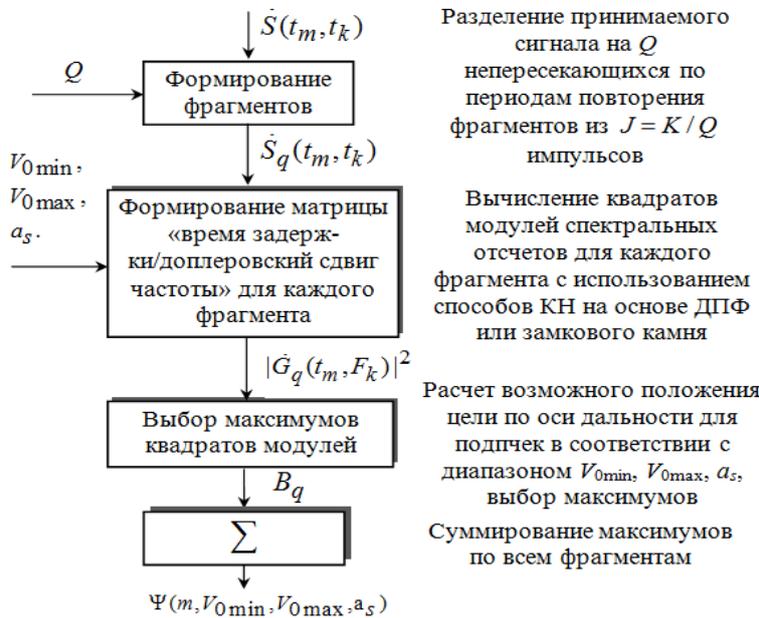


Рисунок 6. – Результат обработки – матрица «время задержки – доплеровский сдвиг частоты»

Способ на основе компенсации МД и МЧ и ПЗК основан на коррекции с одновременной ВПО только квадратичной и последующих составляющих МД и

МЧ с использованием фазовых множителей \dot{Q}_2 , отличающихся от предыдущего случая исключением множителя $e^{j\frac{4\pi}{c}F_m V_0 s t_k}$ компенсации ЛМД, и использовании ПЗК. Структурная схема отличается от предыдущей блоком интерполяции спектра и устранением неоднозначности по частоте. Сигналы после ВПО располагаются на одинаковом расстоянии друг от друга (ЛМД), а МЧ скомпенсирована, что необходимо для ПЗК. Требуемое число каналов обработки сокращается в сравнении с базовым способом в K раз.

Основной идеей *способа КомбН* отраженного от точечной цели сигнала (рисунок 7), является разделение его на непересекающиеся в медленном времени фрагменты (подпачки), что позволяет отказаться от учета производной радиального ускорения и сократить число каналов при компенсации МД и МЧ при обработке каждого фрагмента пропорционально кубу числа Q фрагментов.



Сигнал каждого фрагмента когерентно накапливается с использованием одного из быстрых способов, в результате чего образуется Q радиолокационных изображений – матриц квадратов модулей результатов обработки в координатах «дальность – неоднозначная радиальная скорость», причем отметка от цели от одного фрагмента к другому мигрирует по дальности и частоте в соответствии с радиальной скоростью и ускорением цели.

Рисунок 7. – Структура способа КомбН

Это определяет особенность способа – использование при некогерентном накоплении максимумов квадратов модулей результатов КН, выбираемых из областей дальность/радиальная скорость в соответствии с настройкой канала по «грубой» скорости и радиальному ускорению.

С использованием порядковых статистик разработана аналитическая методика расчета вероятности правильного обнаружения. Показано, что величина энергетического проигрыша - «платы» за уменьшение числа каналов при $D = 0,8; F = 10^{-8}$ составляет 1,5; 3,0; 4,2 дБ в сравнении со способами КН.

В *третьей главе* на основе развития способов обработки с компенсацией МД и МЧ для ситуации флуктуирующего ОС с различными параметрами флуктуаций в элементах разрешения по дальности, разработан адаптивный способ обработки при ДРЛН протяженного по дальности ВО. Идея способа состоит в многоканальной компенсации МД с настройкой каналов по «грубым» радиальной скорости и ускорению с точностью до половины элемента разре-

шения по дальности и соответствующей частичной компенсации МЧ (рисунок 8) с последующим адаптивным КомбН сигнала в каждом m -м элементе разрешения по дальности аналогично точечной нефлуктуирующей цели, но без расчета положения области поиска максимумов. При адаптивном КомбН, в отличие от известных подходов, проводится прямая оценка (рисунок 9) числа L фрагментов сигнала, на которые он разделяется в медленном времени. В таблице 1 приведено число каналов обработки от ширины спектра сигнала при $V_{\max}=300$ м/с, $V_{\min}=-300$ м/с; $a_{\max}=15$ м/с², $a_{\min}=-15$ м/с², $\lambda=3$ см.

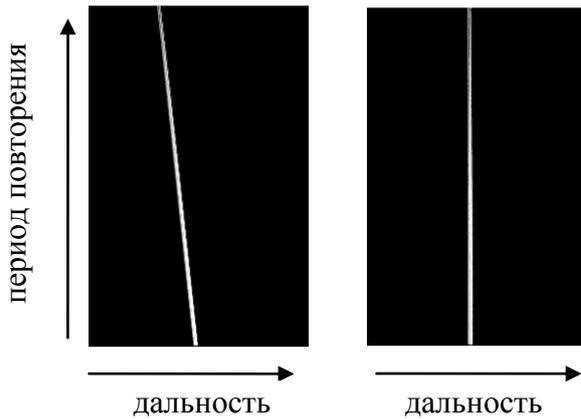


Рисунок 8. – Яркостное РЛИ на выходе ВПО до (слева) и после (справа) компенсации МД

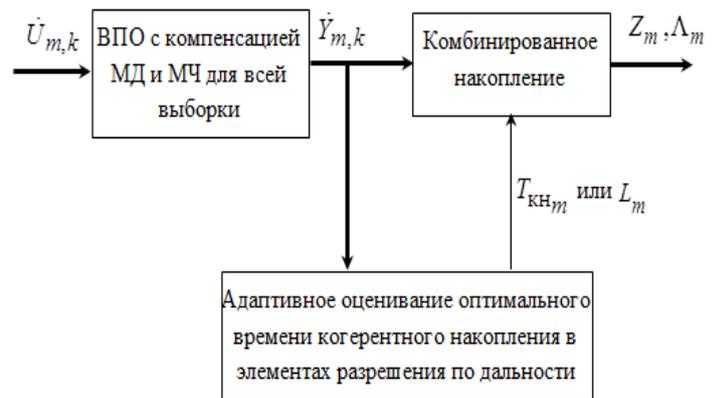


Рисунок 9. – Укрупненная структура способа адаптивного КомбН

Таблица 1 – Число каналов обработки при компенсации МД

Ширина спектра Δf_0 , МГц	5	10	25	50	100	150
Разрешающая способность, м/с ² / число каналов N_a по «грубому ускорению»	30/1	15/2	6/5	3/10	1,5/20	1/30
Разрешающая способность, м/с / число каналов N_V по «грубой» скорости	15/40	7,5/80	3/200	1,5/400	0,75/800	0,5/1200
Общее число каналов	40	160	1000	4000	16000	36000

Оптимальное число \hat{L}_m фрагментов для m -го элементе разрешения

$$\hat{L}_m = \arg \max_m \Lambda_m(L), \quad (7)$$

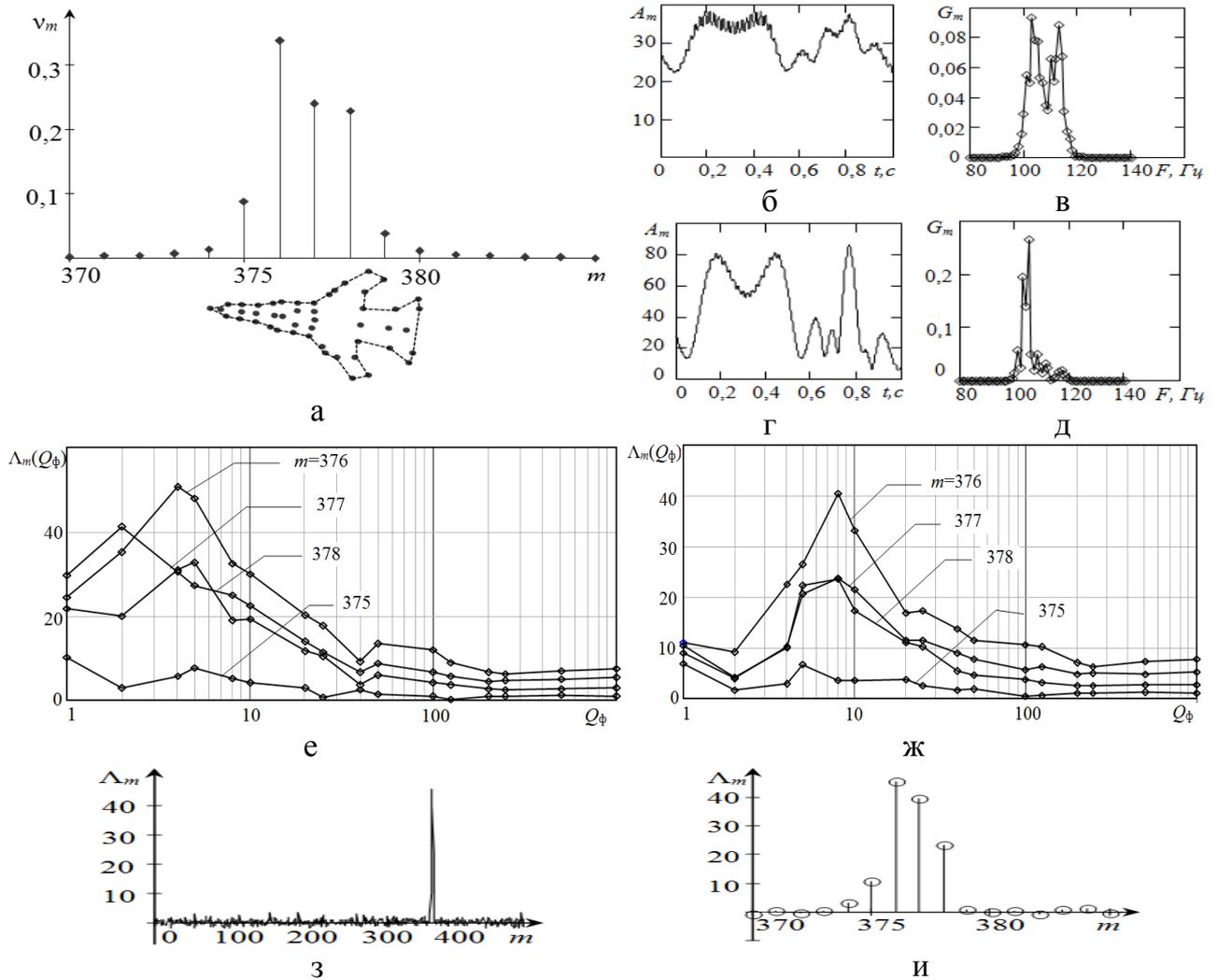
где $\Lambda_m(L) = (Z_m(L) - \bar{Z}_{\text{ш}}(L)) / \sigma_{\text{ш}}(L)$ - решающая статистика; $Z_m(L)$ - выходной сигнал комбинированного накопителя в m -м элементе разрешения по дальности при разделении сигнала на L фрагментов; $\bar{Z}_{\text{ш}}(L), \sigma_{\text{ш}}(L)$ - математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение выходного сигнала накопителя при наличии только шума.

Физический смысл критерия (7) состоит в том, что при оптимальном числе фрагментов полезный сигнал наилучшим образом выделяется по отношению к среднему уровню результатов обработки шума. При полной компенсации радиального ускорения центра масс ВО разделение на фрагменты и выбор максимумов квадратов модулей спектральных отсчетов по каждому фрагменту обеспечивает учет ширины спектра флуктуаций ОС и угловых рысканий ВО. Если ускорение компенсировано не полностью, то ширина зубца энергетического

спектра увеличится на $2\delta a T_H / \lambda$ и согласно (7) длительность фрагмента будет согласовано с изменением ширины зубца энергетического спектра.

Пример реализации КомбН приведен на рисунке 10. Рассматривался среднеразмерный самолет длиной 19 м, представленный 48 идентичными БТ, при $V_{0r}=305$ м/с, $r_0=50$ км, курсовом угле 185° , $T_H=1$ с и $\Delta f_0=25$ МГц.

При увеличении рассогласования по ускорению оптимальное число фрагментов оказывается больше, а выходной сигнал хуже выделяется на фоне шумов. Результаты обработки (рисунок 10з,и) можно трактовать как усредненный за время наблюдения дальностный портрет ВО.



а – распределение нормированной средней мощности ОС по элементам разрешения

б, в – амплитудная огибающая ОС для $m=375, 378$

в, д – спектры медленного времени ОС для $m=375, 378$

е, ж - зависимость Λ от числа фрагментов для $\delta a=0,2$ м/с² и $1,0$ м/с² при ОСШ $\gamma=1,0$

з, и – результат КомбН при $\delta a=1,0$ м/с² в крупном и мелком масштабе

Рисунок 10. – Характеристики сигналов и результатов их обработки при КомбН

Для снижения вычислительных затрат до 4...6 раз предложена двухэтапная процедура обработки: на первом этапе реализуется *компенсация только МД* с шагом, определяемым «грубой» радиальной скоростью и «грубым» радиальным ускорением», некогерентное накопление и обнаружение при вероятности ложных тревог $F_1=10^{-1} \dots 10^{-3}$; на втором этапе для элементов разрешения, где

обнаружен сигнал, проводится оценка нескомпенсированного ускорения, устраняется остаточная МЧ, проводится адаптивное КомБН и обнаружение при вероятности ложной тревоги $F_2 = F / F_1$.

Предлагаемый способ исследовался с использованием реализованной в средах *MatLab*, *MathCad* модели, воспроизводящей способы обработки при ДРЛН при формировании ОС от множества БТ на «жестком» каркасе при угловых рысканиях ВО или с использованием программного пакета BSCS.

На рисунке 15 приведены зависимости вероятности правильного обнаружения при $F = 10^{-8}$ от отношения сигнал/шум $\nu_{\max}\gamma$, где γ - суммарное, по всем элементам разрешения протяженного по дальности ВО, отношение сигнал/шум на выходе ВПО, ν_{\max} - относительная доля доминирующего по мощности элемента разрешения по дальности. Пунктирные и штрихпунктирные кривые рассчитаны аналитически для случая полной компенсации МД и МЧ.

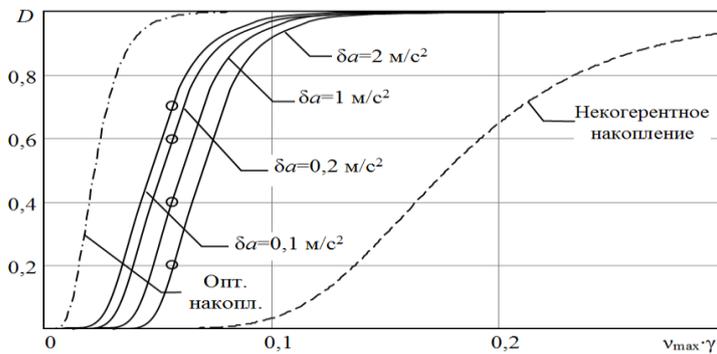


Рисунок 11. – Зависимости вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал/шум по доминирующему элементу разрешения цели

Величина энергетических потерь ($D=0,8$) при рассогласовании по ускорению $0,1 \dots 2$ м/с² составляет $3,0 \dots 4,2$ дБ. Аналогичные результаты получены с использованием программного пакет BSCS.

С использованием результатов моделирования и аналитических методик установлено, что при длительности накопления 1 с:

мощность излучения в барьерном режиме работы РЛС может быть уменьшена в $11,3 \dots 6,5$ раз; коэффициент увеличения дальности действия РЛС при фиксированной мощности излучения составит $1,83 \dots 1,60$; использование ДРЛН в сочетании с увеличением ширины спектра ЗС с 10 МГц до $100 \dots 150$ МГц обеспечивает энергетический выигрыш 10 дБ и более. Требуемые вычислительные затраты при $\Delta f_0 = 5 \dots 150$ МГц составят $60,8 \dots 1520$ GFLOP.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Выполнен анализ особенностей режима ДРЛН типовых воздушных объектов и моделей их движения. Проведена оценка влияния МД и МЧ. Для точечных и протяженных по дальности ВО с учетом траекторных нестабильностей, угловых рысканий и миграций дальности и частоты уточнены модели принимаемого сигнала, включающие модели сигнала, отраженного от одной блестящей точки и в элементе разрешения по дальности, и модель сигнала для протяженного по дальности ВО в целом [2,3,4,8,10,15,17,18,23].

2. Обоснованы базовый и «быстрые» способы обработки при КН отраженного от точечной нефлуктуирующей цели сигнала на основе спектральных пре-

образований. Их основой является компенсация МД и МЧ с одновременной ВПО с последующей междупериодной обработкой на основе суммирования спектральных отсчетов по периодам повторения для базового способа и преобразования Фурье или преобразования замкового камня. Получены функция неопределенности сигнала при наличии МД и МЧ в координатах «радиальное ускорение – производная радиального ускорения», значения разрешающих способностей по ним и выполнена оценка числа каналов обработки [2,3,10,13, 15].

3. Обоснован способ длительного комбинированного накопления отраженного от точечной цели сигнала, предусматривающий разделение его на непересекающиеся по периодам повторения фрагменты, КН в фрагментах с использованием одного из быстрых способов и последующее некогерентное накопление результатов обработки. Отличительной особенностью способа является использование при некогерентном накоплении максимумов квадратов модулей результатов КН, выбираемых из областей дальность/радиальная скорость в соответствии с заданной гипотезой о минимальном и максимальном значении радиальной скорости цели и настройки канала обнаружения по радиальному ускорению. Разработана методика расчета вероятности правильного обнаружения. Показано, что энергетические потери при обработке в сравнении с КН не превышают 4,2 дБ при 12-ти фрагментах при сокращении числа каналов обработки пропорционально квадрату числа фрагментов [5,12].

4. Обоснован адаптивный способ обработки сигнала, отраженного от протяженного по дальности ВО, предусматривающий компенсацию МД и МЧ в каналах по «грубым» радиальным скорости и ускорению, адаптивное разделение принимаемого для каждого элемента разрешения по дальности сигнала на непересекающиеся по периодам повторения фрагменты и комбинированное накопление сигнала путем выбора и суммирования максимумов спектральных отсчетов. Предложен критерий разделения сигнала на фрагменты и процедура оценки нескомпенсированного фазового множителя. Для сокращения вычислительных затрат предложена двухэтапная Вальдовская процедура обработки, предусматривающая некогерентное накопление сигнала в каждом элементе разрешения по дальности, обнаружение сигнала в каналах по «грубым» радиальным скорости и ускорению при увеличенном уровне вероятности ложной тревоги $10^{-1} \dots 10^{-3}$ и проведении адаптивной обработки на втором этапе только в элементах разрешения, где обнаружен сигнал на первом этапе [3,5,17,18,23,24].

5. На основе компьютерного моделирования с использованием модели отражательных характеристик ВО в виде множества БТ на «жестком» каркасе и с использованием программного пакета BSCS проведено исследование эффективности и выявлены основные закономерности адаптивной обработки при ДРЛН. Показано, что для протяженного по дальности ВО пороговое значение полного ОСШ по всем элементам разрешения по дальности определяется долей мощности доминирующего элемента разрешения по дальности, относительной долей мощности доминирующего спектрального компонента в этом элементе разрешения по дальности и величиной нескомпенсированного квадратичного и более высоких порядков фазового множителя. Энергетические потери в сравнении со случаем полной компенсации МД и МЧ составят, в зависимости от значения рас-

согласования по ускорению, величину 3...4 дБ [3,17,18].

6. Установлено, что использование режима ДРЛН при времени наблюдения 1 с позволяет уменьшить требуемую мощность излучения РЛС при ее функционировании в барьерном режиме работы в 6,5...11,3 раза или увеличить дальность обнаружения при фиксированной мощности в 1,6...1,83 раза. Показана перспективность совместного применения способа адаптивного КомБН и широкополосного зондирующего сигнала для повышения помехоустойчивости функционирования РЛС в условия согласованных по спектру активных шумовых помех [3,18].

7. Обоснованы требования к числу каналов обработки в зависимости от ширины спектра зондирующего сигнала и времени накопления. Выполнен расчет числа операций комплексного умножения и показана реализуемость способа на современной элементной базе [2,3,4,5,9,12,13,15,17,18].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанные способы обработки сигналов при длительном радиолокационном наблюдении воздушных объектов и модели и методики исследования их эффективности могут быть использованы при создании перспективных и модернизации существующих радиолокационных станций обнаружения и сопровождения ВО с повышенными требованиями по дальности обнаружения и помехоустойчивости на предприятиях и в организациях Республики Беларусь (ОАО «КБ Радар», ОАО «Алевкурп») и Социалистической Республики Вьетнам.

Результаты диссертации использованы акционерной технологической компанией ОТП FLC Viet Nam (ОТП FLC Technologies Jsc.) при обосновании технического облика и разработке радиолокационных средств обнаружения управления воздушным движением и УО БГУИР при выполнении НИР ГБ № 15-2028 «Разработка научных основ, принципов формирования и обработки сигналов в радиотехнических системах новых поколений, работающих в условиях больших динамических диапазонов сигналов», НИР ГБ № 20-2006 «Разработка способов обработки сигналов, принципов построения многоканальных и многочастотных радиотехнических средств и систем нового поколения с повышенными информационными возможностями и помехозащищенностью» и в НИР № 21-3060 «Обоснование алгоритмов первичной обработки радиолокационной информации высокоинформативной цифровой помехоустойчивой аппаратуры радиолокационного мониторинга земной поверхности для космических аппаратов» в рамках ГПНИ «Цифровые и космические технологии, безопасность человека, общества и государства».

Основные направления дальнейших исследований связаны с:

- теоретическим и экспериментальным исследованиям особенностей отражательных характеристик ВО различных типов с позиций достижимой эффективности обнаружения при ДРЛН;
- синтезу алгоритмов оценивания дальности, скорости и угловых координат воздушных объектов при ДРЛН;
- обоснованию алгоритмов распознавания на основе построения и анализа усредненных за время наблюдения дальностных портретов ВО с использованием широкополосных зондирующих сигналов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях

1. Ле Ван Кыонг. Выбор параметров реализации и свойства адаптивных максимально-правдоподобных алгоритмов оценивания угловых координат цели в радиолокационном измерителе с многоканальной приемной системой / Ле Ван Кыонг, С. В. Козлов // Наука и военная безопасность. – 2020. – № 1(63). – С. 42–46.

2. Ле Ван Кыонг. Модель и базовый алгоритм длительного когерентного накопления отраженного сигнала при ненулевых высших производных дальности до радиолокационной цели / Ле Ван Кыонг, С. В. Козлов // Доклады БГУ-ИР. – 2021. – № 2(Т19). – С. 49–57.

3. Ле Ван Кыонг. Длительное накопление отраженного сигнала при высоком разрешении по дальности и угловых рысканиях радиолокационной цели / Ле Ван Кыонг, С. В. Козлов, В. В. Радионович // Новости науки и технологий. – 2021. – № 2. – С. 19–30.

4. Ле Ван Кыонг. Алгоритмы длительного когерентного накопления отраженного сигнала при ненулевых высших производных дальности до радиолокационной цели в спектральной области / Ле Ван Кыонг, С. В. Козлов // Доклады БГУИР. – 2021. – № 5(Т19). – С. 35–44.

5. Ле Ван Кыонг. Способ длительного когерентно-некогерентного накопления сигнала при ненулевых высших производных дальности до радиолокационной цели / Ле Ван Кыонг, С. В. Козлов // Доклады БГУИР. – 2021. – № 7. – С. 89–98.

Материалы научных конференций

6. Ле Ван Кыонг. Пеленгация полезного сигнала на фоне мощной помехи в многоканальной приемной системе с использованием ансамбля нейронных сетей / Ле Ван Кыонг, С. В. Козлов // Радиолокация, навигация и связь: материалы XXV междунар. науч.-техн. конф, Воронеж, Россия, 16–18 апреля. 2019 г. – Воронеж, 2019. – Том. 5. – С. 8–14.

7. Ле Ван Кыонг. Особенности реализации адаптивных алгоритмов измерения и характеристики оценок угловых координат цели в радиолокационном измерителе с многоканальной приемной системой / Ле Ван Кыонг, С. В. Козлов // Радиолокация, навигация и связь: материалы XXVI междунар. науч.-техн. конф, Воронеж, Россия, 29 сентября–1 октября 2020 г. – Воронеж, 2020. – Том. 5. – С. 126–136.

8. Ле Ван Кыонг. Длительное некогерентное накопление отраженного сигнала при обнаружении высокоскоростной цели / Ле Ван Кыонг, С. В. Козлов // Радиолокация, навигация и связь: материалы XXVI междунар. науч.-техн. конф, Воронеж, Россия, 29 сентября–1 октября 2020 г. – Воронеж, 2020. – Том. 3. – С. 149–157.

9. Ле Ван Кыонг. Особенности реализации алгоритмов обработки радиолокационной информации повышенной сложности с использованием технологии Cuda / Ле Ван Кыонг, С. В. Козлов, С. П. Гунич // Информационные радио-

системы и радиотехнологии 2020: материалы Респ. науч.-практ. конф. (Республика Беларусь, Минск, 28-29 октября 2020 года) / редкол. : В. А. Богуш [и др.]. – Минск: БГУИР, 2020. – С. 220–224.

10. Ле Ван Кыонг. Математические модели отраженного сигнала при наличии миграции по дальности и ее производным / Ле Ван Кыонг, С. В. Козлов // Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020: материалы Респ. науч.-практ. конф. (Республика Беларусь, Минск, 28-29 октября 2020 года) / редкол. : В. А. Богуш [и др.]. – Минск: БГУИР, 2020. – С. 126–130.

11. Ле Ван Кыонг. Обоснование требований к размерам сетки при реализации адаптивных алгоритмов оценивания угловых координат цели в радиолокационном измерителе с многоканальной приемной системой / Ле Ван Кыонг, С. В. Козлов // Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020: материалы Респ. науч.-практ. конф. (Республика Беларусь, Минск, 28-29 октября 2020 года) / редкол. : В. А. Богуш [и др.]. – Минск: БГУИР, 2020. – С. 136–140.

12. Ле Ван Кыонг. Когерентно-некогерентное накопление отраженного сигнала при наличии миграции по дальности и ее производным / Ле Ван Кыонг, С. В. Козлов // Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020: материалы Респ. науч.-практ. конф. (Республика Беларусь, Минск, 28-29 октября 2020 года) / редкол. : В. А. Богуш [и др.]. – Минск: БГУИР, 2020. – С. 121–125.

13. Ле Ван Кыонг. Экономичные алгоритмы длительного когерентного накопления отраженного сигнала при наличии миграции по дальности и ее производным / Ле Ван Кыонг, С. В. Козлов // Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020: материалы Респ. науч.-практ. конф. (Республика Беларусь, Минск, 28-29 октября 2020 года) / редкол. : В. А. Богуш [и др.]. – Минск: БГУИР, 2020. – С. 173–177.

14. Ле Ван Кыонг. Особенности измерения дальности и однозначной радиальной скорости при длительном когерентном накоплении отраженного сигнала при наличии миграции по дальности и ее производным / Ле Ван Кыонг, С. В. Козлов // Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020: материалы Респ. науч.-практ. конф. (Республика Беларусь, Минск, 28-29 октября 2020 года) / редкол. : В. А. Богуш [и др.]. – Минск: БГУИР, 2020. – С. 146–150.

15. Ле Ван Кыонг. Базовый алгоритм длительного когерентного накопления отраженного сигнала при наличии миграции по дальности и ее производным / Ле Ван Кыонг, С. В. Козлов // Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020: материалы Респ. науч.-практ. конф. (Республика Беларусь, Минск, 28-29 октября 2020 года) / редкол. : В. А. Богуш [и др.]. – Минск: БГУИР, 2020. – С. 115–120.

16. Ле Ван Кыонг. Пеленгование сигнала с неизвестной поляризаций в системах с фазовой неоднозначностью / Ле Ван Кыонг, С. В. Козлов и др. // Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020: материалы Респ. науч.-практ. конф. (Республика Беларусь, Минск, 28-29 октября 2020 года) / редкол. : В. А. Богуш [и др.]. – Минск: БГУИР, 2020. – С. 151–155.

17. Ле Ван Кыонг. Эффективность длительного накопления отраженного сигнала для РЛС с высоким разрешением по дальности с учетом угловых рысканий самолетов / Ле Ван Кыонг // Радиотехника и электроника: материалы 57-

й науч. конф. аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Минск, Беларусь, апрель. 2021 г. – Минск, 2021. – С. 37–45.

18. Ле Ван Кыонг. Адаптивный способ и эффективность длительного накопления сигнала, отраженного от протяженной по дальности радиолокационной цели / Ле Ван Кыонг // Радиолокация, навигация и связь: материалы XXVII междунар. науч.-техн. конф, Воронеж, Россия, 28–30 сентября. 2021 г. – Воронеж, 2019. – Том. 2. – С. 176–195.

Тезисы докладов

19. Ле Ван Кыонг. Оптимизация структуры нейронных сетей при пеленгации полезных сигналов на фоне мощной помехи в многоканальной приемной системе / Ле Ван Кыонг // Радиотехника и электроника: материалы 55-й науч. конф. аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Минск, Беларусь, 22–26 апреля. 2019 г. – Минск, 2019. – С. 93–95.

20. Ле Ван Кыонг. Адаптивное оценивание угловых координат цели в радиолокационном измерителе с многоканальной приемной системой / Ле Ван Кыонг // Радиотехника и электроника: материалы 56-й науч. конф. аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Минск, Беларусь, апрель-май. 2020 г. – Минск, 2020. – С. 174–175.

21. Ле Ван Кыонг. Обнаружение высокоскоростных объектов при длительном некогерентном накоплении отраженного сигнала по радиолокационному изображению / Ле Ван Кыонг // Радиотехника и электроника: материалы 56-й науч. конф. аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Минск, Беларусь, апрель-май. 2020 г. – Минск, 2020. – С. 176–177.

22. Ле Ван Кыонг. Алгоритмы длительного накопления отраженного сигнала для РЛС с высоким разрешением по дальности с учетом угловых рысканий самолетов / Ле Ван Кыонг // Радиотехника и электроника: материалы 57-й науч. конф. аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Минск, Беларусь, апрель. 2021 г. – Минск, 2021. – С. 47–49.

23. Ле Ван Кыонг. Модель и параметры движения типовых радиолокационных целей при длительном накоплении отраженных сигналов / Ле Ван Кыонг // Радиотехника и электроника: материалы 57-й науч. конф. аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Минск, Беларусь, апрель. 2021 г. – Минск, 2021. – С. 45–47.

24. Ле Ван Кыонг. Вариант оценки параметров движения радиолокационной цели при длительном когерентном накоплении отраженного сигнала // Ле Ван Кыонг // Радиотехника и электроника: материалы 57-й науч. конф. аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Минск, Беларусь, апрель. 2021 г. – Минск, 2021. – С. 49–51.

РЭЗІЮМЭ

Ле Ван Кыонг

Шматканальная апрацоўка сігналаў пры працяглым радыёлакацыйным назіранні паветраных аб'ектаў

Ключавыя словы: адаптыўная апрацоўка, паветраны аб'ект, доўгі радыёлакацыйнае назіранне, дыскрэтнае пераўтварэнне Фур'е, кагерэнтнае накапленне, камбінаванае накапленне, міграцыя далёкасці, міграцыя частаты, шматканальная апрацоўка, пераўтварэнне замкавага каменя, радыяльныя хуткасць і паскарэнне, турбулентная атмасфера, вуглавая гойсаня.

Мэта працы: павышэнне эфектыўнасці радыёлакацыйных сродкаў за кошт рэалізацыі новых спосабаў апрацоўкі сігналаў пры выяўленні паветраных аб'ектаў у працэсе іх доўгага радыёлакацыйнага назірання.

Метады даследавання і якая выкарыстоўваецца апаратура: тэорыя аптымальнага прыёму, спектральны аналіз, тэорыя выпадковых працэсаў, статыстычны аналіз, матэматычнае і камп'ютэрнае мадэляванне.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: прапанаваны спосабы апрацоўкі сігналаў пры працяглым радыёлакацыйным назіранні кропкавых нефлуктуіруючых і многээлементных працяглых па далёкасці паветраных аб'ектаў, якія адрозніваюцца аперацыямі шматканальнай кампенсацыі міграцыі далёкасці і частоты сумесна з внутрыпериодной апрацоўкай ў спектральнай вобласці ў кожным перыядзе паўтарэння з наступным кагерэнтным, неадаптыўным або адаптыўным камбінаваным накапленнем адлюстраванага сігналу; прапанаваны крытэрыі падзелу сігналу на фрагменты пры камбінаваным накапленне сігналу, адлюстраванага ад працяглага па далёкасці паветранага аб'екта пры яго кутніх гойсаняў ў турбулентнай атмасферы; атрыманы аналітычныя саадносіны для імавернасці правільнага выяўлення і ацэнкі энергетычных страт для розных варыянтаў апрацоўкі; з выкарыстаннем камп'ютэрнага мадэлявання пацверджана працаздольнасць спосабаў апрацоўкі і распрацаваны рэкамендацыі па іх практычнаму прымяненню.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: распрацаваныя спосабы апрацоўкі сігналаў пры працяглым радыёлакацыйным назіранні паветраных аб'ектаў і мадэлі і метадыкі даследавання іх эфектыўнасці могуць быць выкарыстаны пры стварэнні перспектыўных і мадэрнізацыі існуючых радыёлакацыйных станцый выяўлення і суправаджэння паветраных аб'ектаў з падвышанымі патрабаваннямі па далёкасці выяўлення і перашкодаўстойлівасці.

Вобласць ужывання: праектаванне і ацэнка эфектыўнасці радыёлакацыйных сродкаў выяўлення паветраных аб'ектаў.

РЕЗЮМЕ

Ле Ван Кыонг

Многоканальная обработка сигналов при длительном радиолокационном наблюдении воздушных объектов

Ключевые слова: адаптивная обработка, воздушный объект, длительное радиолокационное наблюдение, дискретное преобразование Фурье, когерентное накопление, комбинированное накопление, миграция дальности, миграция частоты, многоканальная обработка, преобразование замкового камня, радиальные скорость и ускорение, турбулентная атмосфера, угловые рыскания.

Цель работы: повышение эффективности радиолокационных средств за счет реализации новых способов обработки сигналов при обнаружении воздушных объектов в процессе их длительного радиолокационного наблюдения.

Методы исследования и используемая аппаратура: теория оптимального приема, спектральный анализ, теория случайных процессов, статистический анализ, математическое и компьютерное моделирование.

Полученные результаты и их новизна: предложены способы обработки сигналов при длительном радиолокационном наблюдении точечных нефлуктуирующих и многоэлементных протяженных по дальности воздушных объектов, отличающиеся операциями многоканальной компенсации миграции дальности и частоты совместно с внутрипериодной обработкой в спектральной области в каждом периоде повторения с последующим когерентным, неадаптивным или адаптивным комбинированным накоплением отраженного сигнала; предложен критерий разделения сигнала на фрагменты при комбинированном накоплении сигнала, отраженного от протяженного по дальности воздушного объекта при его угловых рысканиях в турбулентной атмосфере; получены аналитические соотношения для вероятности правильного обнаружения и оценки энергетических потерь для различных вариантов обработки; с использованием компьютерного моделирования подтверждена работоспособность способов обработки и разработаны рекомендации по их практическому применению.

Рекомендации по использованию: разработанные способы обработки сигналов при длительном радиолокационном наблюдении воздушных объектов и модели и методики исследования их эффективности могут быть использованы при создании перспективных и модернизации существующих радиолокационных станций обнаружения и сопровождения воздушных объектов с повышенными требованиями по дальности обнаружения и помехоустойчивости.

Область применения: проектирование и оценка эффективности радиолокационных средств обнаружения воздушных объектов.

RESUME

Le Van Cuong

Multichannel signal processing in long-term radar surveillance of air object

Keywords: adaptive processing, air object, long-term radar surveillance, discrete Fourier transform, coherent accumulation, combined accumulation, range migration, frequency migration, multichannel processing, keystone transformation, radial velocity and acceleration, turbulent atmosphere, angular yaw.

The purpose of the work is to increase the efficiency of radar facilities by implementing new methods of signal processing when detecting air object during their long-term radar surveillance.

Research methods and equipment used: optimal reception theory, spectral analysis, theory of random processes, statistical analysis, mathematical and computer modeling.

The results obtained and their novelty: the methods of signal processing for long-term radar surveillance of point non-fluctuating and multi-element long-range aerial objects are proposed, differing in the operations of multi-channel compensation of range and frequency migration together with intra-period processing in the spectral region in each repetition period followed by coherent, non-adaptive or adaptive combined accumulation of the reflected signal; a criterion for splitting the signal into fragments is proposed for the combined accumulation of a signal reflected from an extended-range air object at its angular yaw in a turbulent atmosphere; analytical ratios are obtained for the probability of correct detection and evaluation of energy losses for various processing options; the operability of processing methods is confirmed using computer modeling and recommendations for their practical application are developed.

Recommendations for use: the developed methods of signal processing during long-term radar surveillance of air objects and models and methods for investigating their effectiveness can be used to create promising and modernize existing radar stations for detecting and tracking air objects with increased requirements for detection range and noise immunity.

Application field: design and evaluation of the effectiveness of radar detection of aerial objects.

Научное издание

Ле Ван Кыонг

**МНОГОКАНАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ
РАДИОЛОКАЦИОННОМ НАБЛЮДЕНИИ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

Подписано в печать 6.4.2022.

Формат 60×84 ¹/₁₆.

Бумага офсетная.

Гарнитура «Таймс».

Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. 1,63.

Уч.-изд. л. 1,4.

Тираж 56 экз.

Заказ 90.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,

№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.

ЛИ №02330/264 от 14.04.2014

220013, Минск, П. Бровки, 6