

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук профессора Кострова Виктора Васильевича на диссертацию Белокурова Владимира Александровича «Методы и алгоритмы межобзорной обработки сигналов малоразмерных и сверхманевренных радиолокационных объектов с учётом бортовой навигационной информации», представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 2.2.16 – «Радиолокация и радионавигация» (технические науки)

Актуальность темы. Проблема разработки и совершенствования методов и способов повышения дальности действия современных и перспективных радиолокационных систем всегда представляла практический интерес и актуальность, которая определяется рядом факторов. В первую очередь, активным развитием авиации, как гражданской, так и военной, беспилотных летательных аппаратов, а также развитием и внедрением технологий уменьшения радиолокационной заметности. Другим фактором, который определяет актуальность данной проблемы, является то, что подобные цели могут совершать полёт и резкие манёвры на предельно малых высотах. При этом необходимо учитывать ряд противоречивых требований, которые предъявляются к современным радиолокационным системам. С одной стороны, необходимость обеспечения заданной зоны обзора и времени сканирования. С другой стороны – требования по мобильности, которые исключают применение мощных передатчиков и накладывают ограничения на размеры антенной системы.

Немаловажное значение имеют стоимость и массогабаритные характеристики радиолокатора, которые в конечном итоге определяют возможность массового применения подобных систем, в том числе, размещение их на малогабаритных беспилотных летательных аппаратах. Практическая реализация подобных требований требует системного подхода, который заключается в сочетании методических, схемотехнических и программных решений. При этом, одной из главных задач, решаемых при реализации данного подхода, является синтез алгоритмов и способов, которые объединяют в себе информацию от различных систем, находящихся на борту подвижного объекта, как радиолокационных, так и навигационных. В данном направлении ведущими НИИ и предприятиями промышленности постоянно проводятся НИР и ОКР.

Таким образом, тема диссертационной работы является актуальной.

Оценка содержания работы. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, библиографического списка из 259 наименований и двух приложений. Диссертация содержит 338 страниц, в том числе 293 страницы основного текста, 6 таблиц и 152 рисунка.

Во «Введении» диссертации рассматривается актуальность темы диссертационных исследований, определяется предмет, цель и задачи исследования. Определены выносимые на защиту положения. Приведены сведения о результатах внедрения и апробации диссертационной работы.

В первой главе диссертации рассмотрено влияние радиального ускорения цели на эффективность систем первичной обработки радиолокационной информации. Определено число каналов по ускорению в многоканальном алгоритме, при котором обеспечивается максимизация вероятности правильного обнаружения. Приведён статистический синтез и анализ ряда многоканальных по радиальному ускорению алгоритмов обнаружения.

Во второй главе диссертации проведён статистический синтез межпачечного алгоритма накопления отражённых от маневрирующей цели радиолокационных сигналов с возможностью раскрытия неоднозначных измерений дальности. Проведён статистический синтез и анализ межобзорного когерентного алгоритма накопления. В данном алгоритме начальная фаза отражённой пачки импульсов предполагается информационным параметром, по которому вводится многоканальность.

В третьей главе диссертации автор рассматривает различные решающие правила, используемые в методе «сопровождения до обнаружения на основе динамического программирования». Рассмотрено влияние радиального ускорения цели на вероятностные характеристики алгоритмов, реализующих межобзорное накопление. Синтезирован алгоритм межобзорного накопления с учётом навигационной информации. Синтезирован алгоритм межобзорного накопления зависшего БПЛА, путем некогерентного накопления микродоплеровских сигнатур. Эффективность предложенного алгоритма оценена в рамках натуральных экспериментов при использовании РЛС с непрерывным излучением. Кроме того, в данной главе диссертант рассмотрел возможность использования математического аппарата сферических инвариантных процессов при статистическом синтезе алгоритма межобзорного обнаружения на фоне коррелированных негауссовских шумов. Причём синтезированный алгоритм является инвариантным к закону распределения шума. Оценка эффективности также проведена на основе обработки данных реальной РЛС. Показано, что синтезированный алгоритм обеспечивает выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум 1,5 дБ.

В четвертой главе диссертационной работы рассмотрено решение одной из ключевых проблем, которая возникает при реализации алгоритмов межобзорной обработки, – аналитическое вычисление порога обнаружения в соответствии с критерием Неймана-Пирсона, связанной с негауссовским характером законов распределения на входе порогового устройства. Автор предлагает два подхода. Первый подход, который используется при вычислении законов распределения статистик (49) и (50), основан на свойствах характеристических функций. В нем также используется численное интегрирование для вычисления плотности распределения на входе порогового устройства (ПУ) при гипотезе H_0 . Использование данного подхода позволяет сократить время вычисления порога обнаружения в 6-8

раз. Суть второго подхода заключается в оценке методом моментов параметров обобщенного распределения Парето, которое аппроксимирует «хвост» распределения отсчётов, входящих в «скользящее» окно.

В пятой главе диссертации синтезирован алгоритм сопровождения малоотражающего объекта на основе использования гауссовского парциального фильтра, интегрированного с многомодельным фильтром Калмана.

В шестой главе диссертации рассмотрен синтез системы угловой ориентации на основе использования многомодельного фильтра Калмана, обеспечивающей снижение ошибок определения угловой ориентации маневрирующего носителя БРЛС.

В седьмой главе диссертации рассмотрены вопросы реализации, синтезированных в предыдущих главах, результатов. Приведены результаты натурных экспериментов.

В «Заключении» диссертации представлен перечень научных результатов диссертационного исследования. Представлена сводная таблица синтезированных алгоритмов, выигрышей, которые они обеспечивают, а также границами возможных применений.

Научная новизна. Научная новизна диссертационной работы состоит в обобщении известных и разработке нового подхода к обнаружению малоотражающих сверхманевренных объектов, основанного на объединении результатов межобзорного накопления радиолокационной информации с учётом использования навигационной информации.

В диссертации получены следующие научные результаты:

- оригинальный алгоритм выбора числа каналов по ускорению в многоканальном обнаружителе маневрирующей цели, который обеспечивает максимизацию средней вероятности правильного обнаружения многоканальной системы обработки;
- новый, защищенный патентом, способ обнаружения маневрирующей цели, в отличие от известного алгоритма с сегментированием входной выборки он обеспечивает заметный выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум, а по сравнению с известным многоканальным по скорости цели алгоритмом обеспечивает существенный выигрыш в числе вычислительных операций;
- 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;
- новый метод межобзорной обработки отражённых сигналов малоотражающего сверхманевренного объекта, учитывающий в обработке навигационную информацию о взаимных перемещениях носителя бортовой РЛС и объекта;
- новый алгоритм межобзорной обработки зависшего БПЛА, планерная составляющая отраженного сигнала которого не имеет доплеровского смещения частоты;

- новый эффективный метод вычисления порога обнаружения в алгоритме межобзорной обработки на фоне негауссовского шума;
- новый алгоритм стабилизации уровня ложной тревоги при межобзорном обнаружении, основанный на использовании метода моментов;
- 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;
- новый алгоритм определения угловой ориентации высокоманевренного носителя бортовой РЛС.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость работы заключается в развитии теории статистического синтеза алгоритмов межобзорного и межпачечного когерентного и некогерентного накопления отражённых от малоотражающих целей радиолокационных сигналов при неопределённости относительно законов распределения как коррелированных, так и не коррелированных шумов, в создании новых способов обнаружения слабых сигналов, в развитии теории оценивания скорости и ускорения целей радиолокационными средствами.

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что использование синтезированных алгоритмов, основанных на межобзорном когерентном и некогерентном накоплении отражённых сигналов, обеспечивает повышение вероятности правильного обнаружения малоотражающих целей, что эквивалентно увеличению дальности действия бортовой РЛС.

Кроме новых результатов по разработке методов и алгоритмов межобзорной обработки сигналов малоразмерных и сверхманевренных радиолокационных объектов, анализу и повышению качества работы бортовой навигационной аппаратуры, следует также отметить важные частные результаты, имеющие большое самостоятельное значение.

Значительный интерес, с моей точки зрения, представляют материалы гл. 3, в которых приведены результаты экспериментальных исследований пропеллерного эффекта в эхо-сигналах от зависшего БПЛА. Полученные спектрограммы позволяют выявить влияние разворотов БПЛА вокруг собственной оси, а также проанализировать зависимость ширины и структуры спектра от диаметра несущих винтов.

К числу наиболее интересных и полезных для практики результатов относится также разработка алгоритма вычисления адаптивного порога для стабилизации вероятности ложной тревоги в общем случае воздействия негауссовских помех (гл.4, с.19-20а, 201-209д). Реализация предложенного алгоритма позволяет существенно снизить вычислительную нагрузку на сигнальный процессор и направить высвободившийся ресурс на улучшение других тактико-технических характеристик.

Важными для определения параметров радиолокационной системы являются результаты исследования двухмодельного фильтра Калмана с перекрестными связями

(с постоянной скоростью и разворотом объекта) (гл.5, 6, с.20-22а, 227,245д).

Внедрение. Результаты диссертационной работы реализованы в учебном процессе Рязанского государственного радиотехнического университета и в ряде предприятий промышленности, о чем имеются акты реализации.

Достоверность и обоснованность. Достоверность полученных результатов обеспечена корректным применением математического аппарата, включая методы статистической радиотехники, теорию оптимального обнаружения и фильтрации, методы статистического моделирования. Обоснованность и достоверность основных результатов диссертации также подтверждается:

- корректностью постановки задач исследования; обоснованностью основных предположений, ограничений, допущений и исходных данных для расчетов;
- использованием апробированных методов имитационного и натурального моделирования, цифровой обработки сигналов и численных методов решения задач;
- удовлетворительным совпадением результатов проведенного моделирования в частных случаях с результатами, известными из современной литературы по радиолокационным системам;
- вычислительными и натурными (полунатурными) экспериментами, результаты которых не противоречат общей теории обнаружения, выводам отечественных и зарубежных ученых, опубликованным в ведущих научно-технических журналах;
- широким обсуждением результатов диссертации на международных и российских конференциях.

Основные научные положения, выносимые на защиту, выводы и рекомендации подтверждены расчетами и анализом с использованием методов вычислительной математики, математического и статистического моделирования и не вызывают сомнений.

Публикации. Основные выводы и положения диссертации достаточно широко опубликованы и отражены в научных изданиях и докладывались на представительных научно-технических конференциях, где получили одобрение научной общественности, признающей авторитет автора в разработке вопросов, положенных в основу диссертационной работы. Результаты диссертации опубликованы в 76 работах, в том числе: 1 коллективная монография, 31 статья в журналах, рецензируемых ВАК РФ, 14 публикаций с индексацией в международных базах (Scopus, Web of Science), 26 докладов на всероссийских и международных научно-технических конференциях, 3 патента на способ, 1 патент на устройство.

Рекомендации по использованию. Полученные в диссертации результаты целесообразно использовать заказывающими, научно-исследовательскими организациями РФ (в частности, АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей», АО «КРЭТ», «ГосНИИАС», АО «НИИП им. В.В. Тихомирова», АО «Корпорация «Фазотрон-НИИР», АО «ВНИИРТ» и др.) при техническом обосновании перспектив развития бортовых и наземных радиолокационных комплексов и систем и формировании ГТХ

и ТЗ на создание таких систем, а также организациями промышленности (АО «Полет», ФГУП «ГРПЗ», АО «МЗ РИП» и др.) при решении сложных научно-технических задач, возникающих при разработке радиолокационных измерительных систем.

Недостатки диссертационной работы. Интегрируя замечания по диссертации и автореферату, их можно свести к следующим:

1) Отсутствуют требования к стабильности генераторов сигналов передатчика и гетеродина приемника, к фазовой стабильности радиочастотного тракта РЛС, которые влияют на эффективность когерентного накопления. Не учитывается конечное время когерентности отражения от маневрирующих целей.

2) Ставится невыполнимая задача «синтеза квазиоптимальных алгоритмов обнаружения..., которые обеспечивают выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум при приемлемом числе вычислительных операций» (с.3 автореферата, с.14 диссертации).

3) Отсутствуют рекомендации по выбору «числа каналов по скорости, в которых находится спектр отраженного сигнала» (с.11а, 65, 102д). При неопределенности относительно параметров режима работы и движения БПЛА выбор максимальной частоты доплеровских фильтров также остается открытым (с.151-154д).

4) При синтезе алгоритма обнаружения сигнала с дискретной ЛЧМ используются оценки начальной фазы (гл. 2). Не ясна состоятельность и эффективность этих оценок в условиях неоднозначности измерения дальности и неизвестной скорости цели (с.13а, 92д). Не проведено исследование влияния времени переходного процесса оценивания фазы на характеристики обнаружения.

По тексту автореферата и диссертации имеются орфографические и синтаксические ошибки, одинаковые подписи к разным рисункам и таблицам, стилистические погрешности (с.1, 6, 28а; с.10, 20, 33, 58-60, 200, 207, 208, 241, 241, 243, 278д и др.).

Заключение. Считаю, что указанные недостатки диссертационной работы не наносят существенного ущерба значимости результатам диссертационной работы и не отражаются на её общей положительной оценке. Диссертация написана хорошим литературным языком и аккуратно оформлена. В целом можно констатировать, что решаемая в диссертации задача является сложной. В связи с этим основные результаты проведённых исследований представляют значительную ценность.

Отличительными особенностями работы являются высокий научный уровень, логическая последовательность поставленных задач и направленность на решение важных с практической точки зрения технических задач:

- наблюдения целей с малой эффективной площадью рассеивания;
- в условиях малого отношения сигнал-шум;
- в условиях наблюдения сверхманевренных целей.

Диссертация Белокурова Владимира Александровича является законченной

научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научная проблема повышения качества обнаружения и позиционирования малоразмерных сверхманевренных радиолокационных объектов за счет применения межобзорной, межпачечной обработки и бортовой навигационной информации, что имеет важное хозяйственное значение.

Содержание диссертации Белокурова Владимира Александровича на тему «Методы и алгоритмы межобзорной обработки сигналов малоразмерных и сверхманевренных радиолокационных объектов с учётом бортовой навигационной информации» соответствует п.п. 4, 5, 6, 10 паспорта специальности 2.2.16 – «Радиолокация и радионавигация» (технические науки).

Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации и позволяет сформировать обоснованное представление по всей работе в целом.

Учитывая вышеизложенное, считаю, что по актуальности тематики, глубине проводимых исследований и значимости полученных результатов рассматриваемая диссертационная работа соответствует требованиям п.п. 9, 10, 11, 13 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 29.03.2013 (ред. от 11.09.2021, с изм. от 20.03.2021 № 426), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора технических наук, а её автор – **Белокуров Владимир Александрович** – достоин присуждения учёной степени *доктора технических наук* по специальности 2.2.16 – «Радиолокация и радионавигация» (технические науки).

Официальный оппонент

профессор кафедры «Радиотехника»

доктор технических наук, профессор



Виктор Васильевич Костров

Подпись д.т.н., профессора В.В. Кострова удостоверяю.

Ученый секретарь Ученого Совета Муромского института (филиала)

Владимирского государственного университета

имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

01 сентября 2022 г.




О.Н. Полулях

Костров Виктор Васильевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Радиотехника» факультета информационных технологий и радиоэлектроники (ФИТР).

E-mail: vvk@mit.ru; Тел. раб. 8-(49234) 77-2-32

Рабочий адрес:

Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

602264, Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23

www.mivlgu.ru

E-mail: oid@mivlgu.ru;

Факс/тел.: 8-(49234) 77-1-28

С отзивом ознакомлен

7.09.2022

Белоф