

Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники»

Объект авторского права

УДК 621.396.96

ТОЛМАЧЁВ
Алексей Владимирович

**ФОРМИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВИНТОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ В МНОГОПОЗИЦИОННОЙ РЛС ПОСРЕДСТВОМ
СИНТЕЗА АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.12.14 – радиолокация и радионавигация

Минск 2024

Научная работа выполнена в государственном учреждении «Научно-исследовательский институт Вооруженных Сил Республики Беларусь».

Научный руководитель **Гейстер Сергей Романович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник открытого акционерного общества «Алевкурп»

Официальные оппоненты: **Козлов Сергей Вячеславович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных радиотехнологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Ярмолик Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент, главный научный сотрудник службы системных исследований в области радиотехники унитарного государственного научно-производственного предприятия «Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси»

Оппонирующая организация Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»

Защита состоится «02» мая 2024 г. в 14⁰⁰ 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, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. +375-17-293-89-89.

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

Автореферат разослан «29» марта 2024 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент



Т. А. Пулко

ВВЕДЕНИЕ

Опыт последних лет свидетельствует о возрастании роли средств воздушного нападения в достижении целей вооруженной борьбы. Новые реалии требуют соответствующего развития средств противовоздушной обороны (ПВО). Одним из наиболее актуальных продолжает оставаться направление развития радиолокационных систем обнаружения целей.

Несмотря на постоянное совершенствование элементной базы и создание новых технических решений, в настоящее время не в полной мере решены проблемы обнаружения целей на малых (МВ) и предельно малых высотах (ПМВ). Дополнительным фактором, ухудшающим возможности радиолокационной станции (РЛС) по обнаружению, выступает снижение скорости полета летательного аппарата (ЛА). В то же время полет ЛА на фоне движущегося наземного транспорта (например, над шоссе) со скоростью, сопоставимой со скоростью движения колесно-гусеничной техники, и вовсе может исключить возможность селекции такого ЛА от автомобиля [8–А].

Также в последнее время все большую популярность, как в военной, так и в гражданской сфере, получают малоразмерные беспилотные летательные аппараты (БЛА). Военные конфликты последнего десятилетия показали, что такие БЛА на современном этапе их развития применяются не только для разведки и целеуказания (ЦУ), но и для огневого поражения сил и средств противника [8–А].

Вместе с тем современные однопозиционные РЛС (ОРЛС) обзора воздушного пространства обладают низкой живучестью в условиях интенсивного применения противорадиолокационных ракет (ПРР), что значительно ограничивает их боевые возможности в условиях современного противовоздушного боя.

Таким образом перспективные и современные РЛС обзора должны обеспечить обнаружение малоразмерных, малоскоростных и маловысотных целей, а также обладать высокой живучестью в условиях массированного применения ПРР.

Полуактивная многопозиционная РЛС (МРЛС) с обращенным синтезом апертуры антенны (ОСАА) может решить эти проблемы с помощью селекции малоскоростных винтовых ЛА от колесно-гусеничной техники по радиолокационным изображениям (РЛИ) винтов, построенным путем ОСАА [11–А].

До настоящего времени вопрос разработки алгоритмов ОСАА для построения РЛИ винтов ЛА в МРЛС оставался открытым. Решению этой задачи посвящена данная диссертационная работа.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь с научными программами (проектами), темами

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021 – 2025 годы, утвержденным Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156

(пункт 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы»), а также соответствует пунктам 151 и 156 Комплексной программы перспективных научных исследований и разработок в Вооруженных Силах на 2021 – 2025 годы, утвержденной Министром обороны Республики Беларусь 02.07.2020.

Результаты исследований, представленные в диссертации, использованы при выполнении научно-исследовательской работы «Разработка модели боевых действий группировок зенитных ракетных войск и войсковой ПВО при их совместном применении (в ходе операции) в условиях массированного применения противником ударных беспилотных авиационных комплексов», шифр: «Аркебуза» (№ государственной регистрации 20220175).

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Целью исследования является построение радиолокационных изображений винтов летательных аппаратов для их селекции на фоне колесно-гусеничной техники в радиолокационной станции с разнесенными в пространстве приемным и передающим пунктами.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Определены характерные недостатки ОРЛС обзора при решении задачи обнаружения малоразмерных малоскоростных ЛА на МВ и ПМВ в условиях массированного применения ПРР.

2. Разработан облик перспективной МРЛС с ОСАА, предназначенной для обзора воздушного пространства на МВ и ПМВ, способной вести радиолокационную разведку в условиях применения противником ПРР.

3. Обоснованы математические модели сигналов, отраженных от корпуса и винтов различных объектов, для модуля МРЛС, представляющего собой разнесенные в пространстве приемный и передающий пункты.

4. Разработаны алгоритмы ОСАА для построения РЛИ винтов ЛА для модуля МРЛС.

5. Разработан алгоритм селекции ЛА на фоне движущейся наземной техники для МРЛС.

Объект исследования – многопозиционная радиолокационная станция с обращенным синтезом апертуры антенны.

Предмет исследования – радиолокационные изображения винтов летательных аппаратов.

Научная задача – разработка модели сигнала, отраженного от винтов летательных аппаратов, и алгоритма обращенного синтеза апертуры антенны для построения радиолокационных изображений винтов летательных аппаратов в многопозиционной радиолокационной станции.

Выбор объекта и предмета обусловлен актуальностью решения задачи селекции малоскоростных ЛА на фоне движущейся колесно-гусеничной техники в условиях применения ПРР.

Научная новизна

Научная новизна полученных автором результатов заключается:

1. В обосновании математической модели сигнала, отраженного от винтов летательных аппаратов, для бистатического модуля многопозиционной РЛС, в приложении к обращенному синтезу апертуры антенны.

Модель сигнала *отличается представлением* кромок лопастей множеством отражателей, излучающими в полусфере и расположенными на прямых линиях, *учетом* расстояний, которые проходят излученная и отраженная волны, и углов между кромкой лопасти и передающей и приемной позициями.

2. В разработке алгоритма построения радиолокационных изображений винтов летательных аппаратов путем обращенного синтеза апертуры антенны для бистатического модуля многопозиционной РЛС.

Алгоритм обращенного синтеза апертуры антенны для бистатического модуля *учитывает* взаимное расположение летательного аппарата, приемного и передающего пунктов. Это *позволяет увеличить* отношение «сигнал/шум» в радиолокационном изображении винта по сравнению с алгоритмом, в котором не учитывается разнос приемной и передающей позиций.

3. В разработке алгоритма селекции малоскоростных винтовых летательных аппаратов на фоне движущейся колесно-гусеничной техники для бистатического модуля, *который позволяет обеспечить* селекцию по радиолокационным изображениям винтов, и *отличается* использованием нового признака селекции на основе обнаружения факта наличия винтов у объекта.

Положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель сигнала, отраженного от винтов летательных аппаратов, для бистатического модуля многопозиционной РЛС, *отличающаяся представлением* для бистатической локации передних и задних кромок лопастей множеством отражателей, излучающих в полусфере и расположенных на прямых линиях, *учетом расстояний*, которые проходят излученная и отраженная волны, и *углов* между перпендикуляром к кромке лопасти и линиями, проведенными из центра винта в передающий и приемный пункты. Модель *используется* для формирования опорных функций каналов построения радиолокационных изображений винтов и *позволяет* обеспечить требуемое качество получаемых изображений.

2. Алгоритм построения радиолокационных изображений винтов летательных аппаратов путем обращенного синтеза апертуры антенны для бистатического модуля, *отличающийся* учетом взаимного расположения летательного аппарата, приемного и передающего пунктов, что *обеспечивает* увеличение отношения «сигнал/шум» в изображении лопастей несущего винта вертолета Ми-2 до 11,9 дБ при угле $80^\circ - 90^\circ$ между линией «приемный пункт – центр винта» и линией «приемный пункт – передающий пункт» и удалении от приемного пункта 2500 м по сравнению с алгоритмом, который не учитывает разнос приемного и передающего пунктов.

3. Алгоритм селекции малоскоростных винтовых летательных аппаратов на фоне движущейся колесно-гусеничной техники для

бистатического модуля, *позволяющий* обеспечить селекцию винтовых летательных аппаратов по радиолокационным изображениям винтов с условной вероятностью правильной селекции 0,7 при времени синтеза апертуры 1 с и отношении «сигнал/шум» в изображении лопастей винта 10 дБ: вертолета Ми-2 по изображению несущего винта – на удалении 13770 м от приемного пункта; самолета Ан-2 по изображению тянущего винта – 12150 м; квадрокоптера Phantom 3 SE по изображению любого из винтов – 710 м.

Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации с отграничением их от соавторов совместных исследований и публикаций

Все основные результаты, изложенные в диссертационной работе, получены соискателем самостоятельно. В совместно опубликованных работах автору принадлежат анализ технических возможностей радиолокационных станций по обнаружению малоразмерных малоскоростных целей, а также разработка требований к перспективным средствам обзора воздушного пространства на малых высотах.

Соавторами опубликованных работ являются научный руководитель, доктор технических наук, профессор С.Р. Гейстер и Е.Н. Чумаков, которые принимали участие в анализе опыта применения радиолокационных станций при решении задач обнаружения маловысотных целей в ходе локальных конфликтов.

1. Совместно с руководителем соискатель обосновал и разработал:

облик перспективной многопозиционной РЛС обзора на малых и предельно малых высотах, предназначенной для селекции малоскоростных летательных аппаратов от движущейся наземной колесно-гусеничной техники при условии их совместного нахождения в одном разрешаемом объеме;

математические модели временных структур сигналов, отраженных от винтов летательных аппаратов, учитывающие особенности, возникающие из-за различия ракурсов наблюдения лопастей винтов из приемной и передающей позиций;

алгоритмы обращенного синтеза апертуры антенны для построения радиолокационных изображений корпуса и винтов обнаруженного объекта в бистатическом модуле многопозиционной РЛС, учитывающие особенности, возникающие во временной структуре отраженных сигналов, обусловленные разносом приемного и передающего пунктов.

2. Соискатель лично:

определил особенности, возникающие в отраженном сигнале от тянущего винта легкомоторного самолета вследствие крутки лопастей;

обосновал соотношение между длительностями сигналов, отраженных от кромок лопастей винтов летательных аппаратов, в однопозиционной РЛС и бистатическом модуле многопозиционной РЛС на примере несущего винта вертолета;

разработал алгоритм селекции малоскоростных винтовых летательных аппаратов от движущейся наземной колесно-гусеничной техники при сопоставимых скоростях движения для многопозиционной РЛС;

обосновал возможность практического применения алгоритмов обращенного синтеза апертуры антенны в бистатическом модуле многопозиционной РЛС.

Научные выводы и положения, выносимые на защиту, принадлежат лично соискателю. Результаты, полученные соавторами публикаций, в представленную диссертационную работу не вошли.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения и результаты диссертации обсуждались на восьми конференциях и трех семинарах: научно-техническом семинаре ГУ «НИИ ВС РБ» «Актуальные вопросы разработки, производства и эксплуатации вооружения и военной техники», г. Минск, 24 апреля 2020 г.; XXVI Международной научно-технической конференции ФГБОУ ВО «ВГУ» «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж, 29 сентября – 1 октября 2020 г.; IV Международной военно-научной конференции ГУ «НИИ ВС РБ» «Прикладные аспекты научной деятельности в области обороны и безопасности государства», г. Минск, 29 апреля 2021 г.; научно-техническом семинаре ГУ «НИИ ВС РБ» «Проблемные вопросы разработки, испытаний и эксплуатации вооружения и военной техники», г. Минск, 26 мая 2021 г.; IX Международной научной конференции по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, а также по вопросам технологий двойного применения в рамках X Международной выставки вооружения и военной техники «MILEX-2021», г. Минск, 23 – 26 июня 2021 г.; XXVII Международной научно-технической конференции ФГБОУ ВО «ВГУ» «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж, 28 – 30 сентября 2021 г.; Международной научно-практической конференции ГУО «ИПС РБ» «Актуальные проблемы образовательной и научной деятельности (совершенствование деятельности по обеспечению пограничной безопасности Союзного государства)», г. Минск, 26 октября 2021 г.; VI Международной научно-практической конференции УО «БГАА» «Авиация: история, современность, перспективы развития», г. Минск, 25 ноября 2021 г.; научном семинаре УО «ВА РБ» «Проблемные вопросы и перспективы создания пассивных систем обнаружения воздушных объектов», г. Минск, 30 ноября 2021 г.; V Международной научно-технической (практической) конференции ГУ «НИИ ВС РБ» «Прикладные аспекты научной деятельности в области обороны и безопасности государства: 20-летний опыт НИИ Вооруженных Сил», г. Минск 25 – 26 мая 2022 г.; XXVII Международной научно-технической конференции ФГБОУ ВО «ВГУ» «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж, 27 – 29 сентября 2022 г.

Использование результатов диссертации подтверждено актами о практическом использовании в мероприятиях оперативной подготовки

командования Военно-воздушных сил и войск противовоздушной обороны и внедрении в учебный процесс.

Опубликованность результатов диссертации

Результаты исследований опубликованы в 15 работах, включающих 7 статей в научных журналах, соответствующих пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, общим объемом 3,01 авторского листа, 8 статей в сборниках материалов научных конференций объемом 2,2 авторского листа.

Также результаты работы опубликованы в 3 тезисах докладов научных семинаров объемом 0,74 авторского листа.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из перечня сокращений и обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и девяти приложений, представленных в отдельном томе. Список использованных источников включает библиографический список из 123 наименований и список публикаций соискателя ученой степени из 15 наименований.

Общий объем – 298 страниц:

1. Том 1 (диссертация) на 111 страницах, который включает: основной текст на 84 страницах, 46 иллюстраций на 16 страницах, библиографический список на 9 страницах, список публикаций автора на 2 страницах.

2. Том 2 (приложения к диссертации) на 188 страницах, который включает: приложения на 177 страницах, библиографический список на 9 страницах, список публикаций автора на 2 страницах

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В *первой главе* рассмотрены основные проблемы, возникающие при обнаружении малоразмерных малоскоростных ЛА, осуществляющих полет на МВ и ПМВ. Проанализирован опыт применения существующих ОРЛС в локальных конфликтах последних десятилетий [3–А; 8–А]. Установлено, что современные РЛС обзора обладают недостаточными возможностями по обнаружению малоразмерных малоскоростных ЛА в условиях применения ПРР. Для решения этих проблем предлагается использовать МРЛС обзора на МВ и ПМВ с ОСАА, которую целесообразно представить ее в виде совокупности четырех бистатических модулей (приемный и передающий пункты которых разнесены на расстояние базы R_B в несколько сотен метров), расположенных под прямыми углами относительно друг друга, с совмещенными приемными пунктами (рисунок 1) [11–А; 15–А].

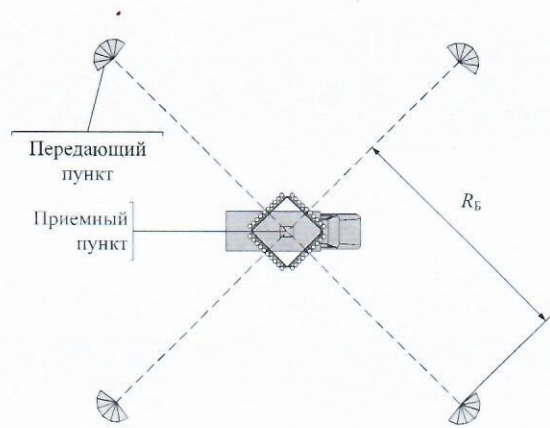


Рисунок 1 – Предлагаемая конфигурация МРЛС

Выполнить задачу селекции малоскоростных винтовых ЛА от наземной колесно-гусеничной техники при сопоставимых скоростях движения возможно по РЛИ их винтов, построенных путем ОСАА [1–А]. При разработке алгоритмов ОСАА для разнесенных приемного и передающего пунктов необходимо учитывать фазовый сдвиг сигнала, отраженного от объекта, относительно приемника и передатчика, для обеспечения когерентного накопления сигнала. Это может быть достигнуто за счет применения в ходе разработки алгоритмов ОСАА соответствующих математических моделей отраженных сигналов.

Во *второй главе* рассматриваются математические модели сигналов, отраженных от винтов ЛА, вращающихся как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях, а также отраженный сигнал (ОС) от корпуса объекта на примере корпуса автомобиля ЗиЛ 131 для одного модуля МРЛС. ОС от винтов приведен на примере несущего винта (НВ) вертолета Ми-2. В начальных условиях моделирования было задано, что вертолет движется из начальной точки C с координатами (x_0, y_0, z_0) в прямоугольной системе координат $OXYZ$, в центре которой находится приемный пункт (Rc), а передающий (Tr) удален от него по оси OX на расстояние $R_B=500$ м (рисунок 2).

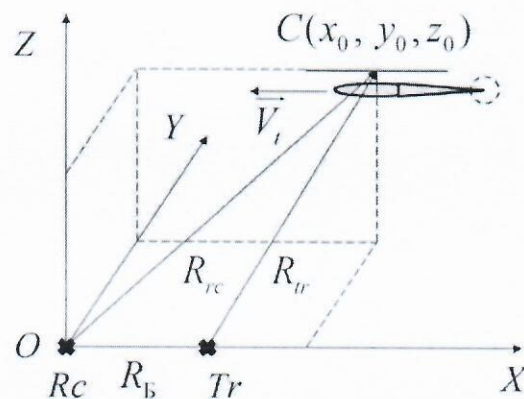


Рисунок 2 – Движение вертолета в системе координат $OXYZ$

Для упрощения поверхность кромки лопасти представлена отражателями, излучающими в полусфере, и расположенными на прямой линии через интервал $\Delta R=\lambda/4$ (рисунок 3) [4–А].

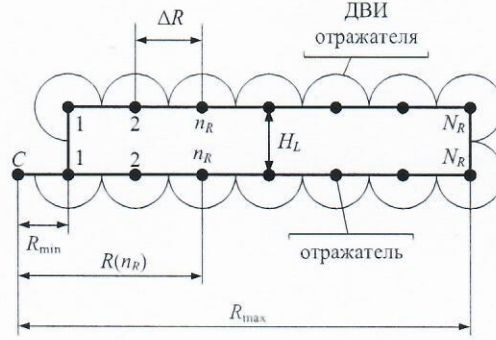


Рисунок 3 – Расположение отражателей на корпусе объекта и кромке лопасти

Обобщенная математическая модель временной структуры ОС от винтов ЛА для модуля МРЛС имеет следующий вид [1–А; 4–А; 10–А; 14–А]:

$$u(t) = \sum_{n_{LV}=0}^{N_{LV}-1} U_L(n_{LV}, t) \sum_{n_R=0}^{N_R-1} E(n_{LV}, n_R, t) \exp[i(\omega_0 t + \varphi_{\text{МРЛС}}(n_{LV}, n_R, t))]. \quad (1)$$

Комплексная огибающая этого сигнала [4–А; 10–А; 14–А]

$$U(t) = \sum_{n_{LV}=0}^{N_{LV}-1} U_L(n_{LV}, t) \sum_{n_R=0}^{N_R-1} E(n_{LV}, n_R, t) \exp[i(\varphi_{\text{МРЛС}}(n_{LV}, n_R, t))]. \quad (2)$$

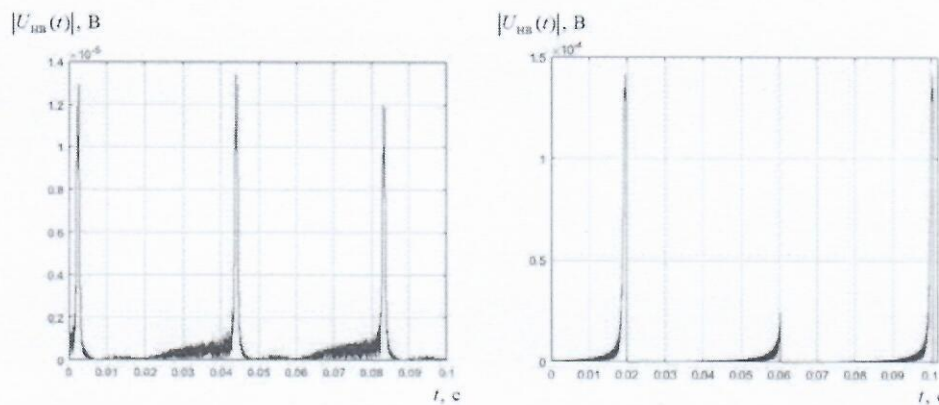
где $U_L(n_{LV}, t)$ – закон модуляции последовательности из L одиночных отраженных сигналов; t – время; $n_R = 0 \dots N_R - 1$ – номер отражателя на кромке лопасти; $n_{LV} = 0 \dots N_{LV} - 1$ номер лопасти винта; N_R – количество отражателей на кромке; $E(n_{LV}, n_R, t)$ – амплитуда ОС от отражателя на лопасти; i – мнимая единица; $\omega_0 = 2\pi f_0$ – несущая частота; $\varphi_{\text{МРЛС}}(n_{LV}, n_R, t) = k(R_{rc}(n_{LV}, n_R, t) + R_r(n_{LV}, n_R, t))$ – закон изменения фазы ОС от отражателя в МРЛС; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число; λ – длина волны; $R_{rc(r)}(n_{LV}, n_R, t)$ – расстояние от отражателя до фазового центра приемной (передающей антенны); $\varphi_C(n_R, t)$ – случайная фаза ОС от отражателя.

$$U_L(n_{LV}, t) = U_C(t) F_{\text{рез норм}}(\theta_{\text{пад}}(n_R, n_{LV}, t), \theta_{\text{отр}}(n_R, n_{LV}, t)), \quad (3)$$

де $U_C(t) = 1$ – закон модуляции МХЗС; $F_{\text{рез норм}}(\theta_{\text{пад}}(n_R, n_{LV}, t), \theta_{\text{отр}}(n_R, n_{LV}, t))$ – результирующая нормированная диаграмма вторичного излучения (ДВИ) кромки лопасти; $\theta_{\text{пад}}(n_R, n_{LV}, t)$ – угол излучения электромагнитной волны (ЭМВ); $\theta_{\text{отр}}(n_R, n_{LV}, t)$ – угол приема отраженной ЭМВ (рисунок 3).

$F_{\text{рез норм}}(\theta_{\text{пад}}(n_R, n_{LV}, t), \theta_{\text{отр}}(n_R, n_{LV}, t)) = F_r(\theta_{\text{пад}}(n_R, n_{LV}, t)) F_{rc}(\theta_{\text{отр}}(n_R, n_{LV}, t))$, (4) где $F_r(\theta_{\text{пад}}(n_R, n_{LV}, t))$ ($F_{rc}(\theta_{\text{отр}}(n_R, n_{LV}, t))$) – нормированная ДВИ кромки лопасти относительно передатчика (приемника).

Следует отметить, что имеют место такие угловые положения лопасти, когда ДВИ лопасти относительно передающей антенны $F_r(\theta_{\text{отр}}(n_R, n_{LV}, t))$ не совмещена в пространстве с ДВИ относительно приемной антенны $F_{rc}(\theta_{\text{отр}}(n_R, n_{LV}, t))$. В этом случае прием ОС невозможен (рисунок 4, б).



$a - x_0 = 600 \text{ м}, y_0 = 100 \text{ м}, z_0 = 100 \text{ м}$ $б - x_0 = 505 \text{ м}, y_0 = 0 \text{ м}, z_0 = 500 \text{ м}$

Рисунок 4 – Модуль комплексной огибающей первых импульсов сигнала, отраженного от несущего винта, для различных начальных точек движения

Разнос приемного и передающего пунктов оказывает наибольшее влияние на комплексную огибающую ОС от лопастей винтов на удалениях от модуля МРЛС, не превышающих $(2...3)R_B$. На больших удалениях ОС от винтов в модуле МРЛС практически идентичны ОС в ОРЛС [1–А; 4–А; 10–А].

Для подтверждения корректности выбранного подхода по представлению кромок лопастей были проведены электродинамическое моделирование и эксперимент, по результатам которых было определено, что комплексная огибающая ОС от вращающейся лопасти при представлении ее кромок дискретными отражателями (рисунок 3), полученная в результате математического моделирования, соответствует комплексной огибающей, полученной в ходе эксперимента.

В *третьей главе* представлены алгоритмы ОСАА для построения РЛИ корпуса объектов и винтов ЛА для модуля МРЛС (рисунок 5) [5–А].

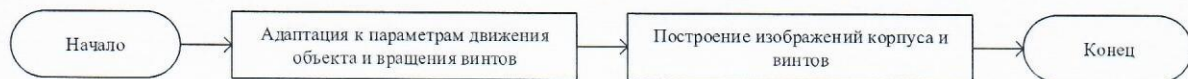


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма ОСАА

Построение РЛИ корпуса объекта рассматривалось на примере автомобиля ЗиЛ-131 (рисунок 6) [6–А].

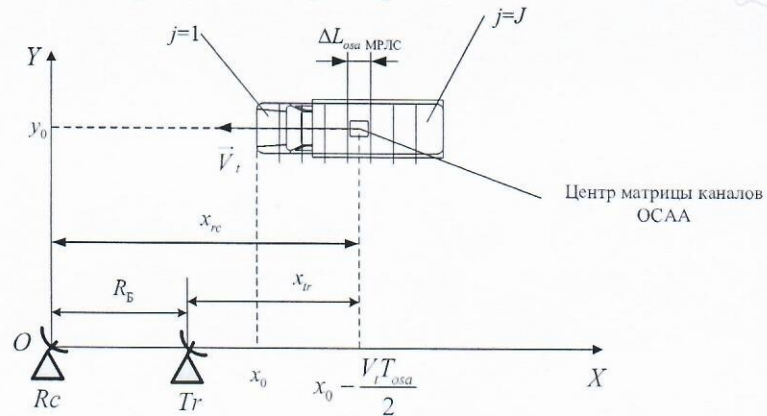


Рисунок 6 – Графическое пояснение ОСАА по корпусу

При представлении ОС от автомобиля в дискретном виде обобщенный алгоритм ОСАА для построения РЛИ корпуса описывается выражением

$$\xi(j) = \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{n=0}^{N-1} U(nT_d) K(j, nT_d), \quad (5)$$

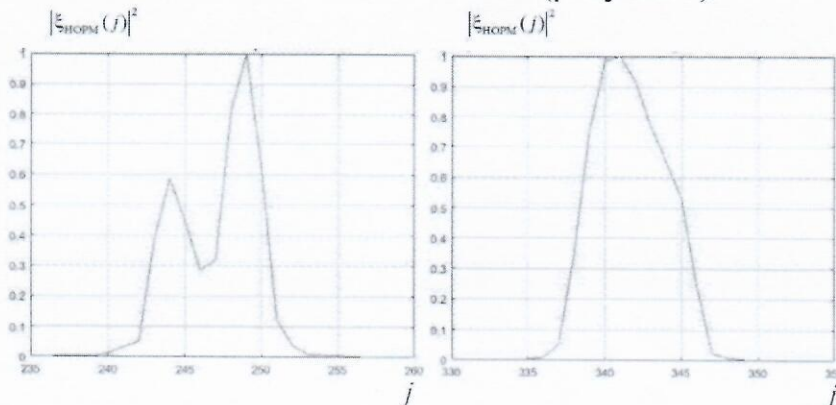
где $j=0 \dots J-1$ – номер синтезированной диаграммы направленности (ДН), соответствующей каналу ОСАА; $n=0 \dots N-1$ – номера отсчетов по времени; $T_d = T_{оса} / N$ – период дискретизации сигнала; $U(nT_d)$ – дискретное представление комплексной огибающей ОС; $K(j, nT_d)$ – опорная функция.

В опорной функции для модуля МРЛС необходимо учитывать фазовый сдвиг сигнала относительно приемной и передающей позиций

$$K(j, nT_d) = \exp[-ik(R_{rc}(j, nT_d) + R_v(j, nT_d))], \quad (6)$$

где $R_{rc}(j, nT_d)$ ($R_v(j, nT_d)$) – дальность от приемной (передающей) позиции до сечения корпуса автомобиля j -й синтезированной ДН в n -м временном отсчете;

РЛИ корпуса объекта – это совокупность квадратов модулей комплексных амплитуд, накопленных в каналах МКУ ОСАА (рисунок 7).



а – РЛИ корпуса при движении параллельно оси OX

б – РЛИ корпуса при движении параллельно оси OY

Рисунок 7 – РЛИ корпуса автомобиля для начальной точки $x_0=1000$ м, $y_0=500$ м

При построении РЛИ винтов адаптация к параметрам вращения винта производится с помощью измерения частоты вращения винта методом свертки спектра вторичной модуляции и поочередного изменения плоскостей и направления вращения каналов ОСАА (рисунок 8). РЛИ будет формироваться в том случае, когда направление, частота и плоскость вращения каналов ОСАА будут совпадать с направлением, плоскостью частотой и вращения исследуемого винта $F_{осаа} = F_{нв}$, что позволяет определить плоскость его вращения [5–А].

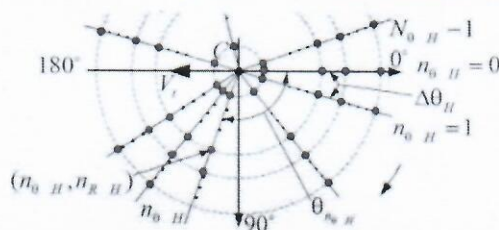


Рисунок 8 – Параметры каналов ОСАА при построении РЛИ винтов

Угловым интервалом между каналами ОСАА $\Delta\theta_H = 1^\circ$. Номер произвольного канала ОСАА $n_{\theta H} = 0 \dots N_{\theta H} - 1$, где $N_{\theta H} = 360$. Угловое положение $n_{\theta H}$ -го канала: $\theta(n_{\theta H}) = n_{\theta H} \Delta\theta_H$. Номер точки на радиальной линии $n_{RH} = 0 \dots N_{RH} - 1$, где N_{RH} – количество отражателей на поверхности лопасти. Номер произвольной точки отражения канала ОСАА $(n_{\theta H}, n_{RH})$. Расстояние от центра каналов ОСАА до точки на радиальной линии: $R(n_{RH}) = R_{\min} + n_{RH} \Delta R$. Выражение, определяющее алгоритм ОСАА для формирования РЛИ винта в модуле МРЛС идентично (5) [5–А]

$$\xi(n_{\theta H}) = \sum_{n_{RH}=0}^{N_{RH}-1} \sum_{n=0}^{N-1} U_{\text{НВ}}(nT_d) K(n_{\theta H}, n_{RH}, nT_d), \quad (7)$$

$$K(n_{\theta H}, n_{RH}, nT_d) = \exp(-ik(R_{rc}(n_{\theta H}, n_{RH}, nT_d) + R_r(n_{\theta H}, n_{RH}, nT_d))), \quad (8)$$

где $R_{rc}(n_{\theta H}, n_{RH}, t)$ ($R_r(n_{\theta H}, n_{RH}, t)$) – закон изменения расстояния от приемной (передающей) позиции до точки $(n_{\theta H}, n_{RH})$ в канале ОСАА, определяемый законами изменения координат этих точек [5–А].

Таким образом в каждом канале ОСАА осуществляется компенсация доплеровской добавки частоты в фазе ОС и когерентное накопление сигнала.

Необходимость учета в опорной функции $K(n_{\theta H}, n_{RH}, nT_d)$ разнеса приемного и передающего пунктов модуля МРЛС возможно оценить по качеству получаемых РЛИ винта (в качестве примера – НВ), в которых учитывается и не учитывается разнос приемной и передающей позиций.

Сравнительным показателем, показывающим эффективность каждого из вариантов алгоритма ОСАА, может выступать отношение «сигнал/шум» в РЛИ. Средняя мощность сигнала в РЛИ может быть найдена из суммы квадратов модулей комплексных амплитуд [7–А]

$$2\sigma_\xi^2 = \frac{1}{N_{\theta H}} \sum_{n_{\theta H}=0}^{N_{\theta H}-1} |\xi(n_{\theta H})|^2. \quad (9)$$

В свою очередь отношение «сигнал/шум» может быть определено из следующего выражения [7–А]:

$$\mu_\xi = \frac{\sigma_\xi^2}{P_\text{ш}}. \quad (10)$$

где $P_\text{ш}$ – мощность шума в РЛИ винта.

Моделирование показало, что построение РЛИ НВ в модуле МРЛС путем ОСАА без учета позиционного разнеса возможно, если удаление центра вращения винта от приемного пункта превышает $R_{rc} \geq 5R_B$ (рисунок 9). На таком удалении различия ракурсов наблюдения из приемной и передающей позиций, оказываются незначительными, что позволяет обеспечить когерентное накопление сигнала без учета разнеса приемника и передатчика. При одинаковых ракурсах наблюдения центра вращения НВ из приемной и передающей позиций (рисунок 9,

положение №1) отношение «сигнал/шум» в РЛИ, построенных путем ОСАА как с учетом, так и без учета разноса приемного и передающего пунктов, в модуле МРЛС практически идентичны друг другу [7–А].

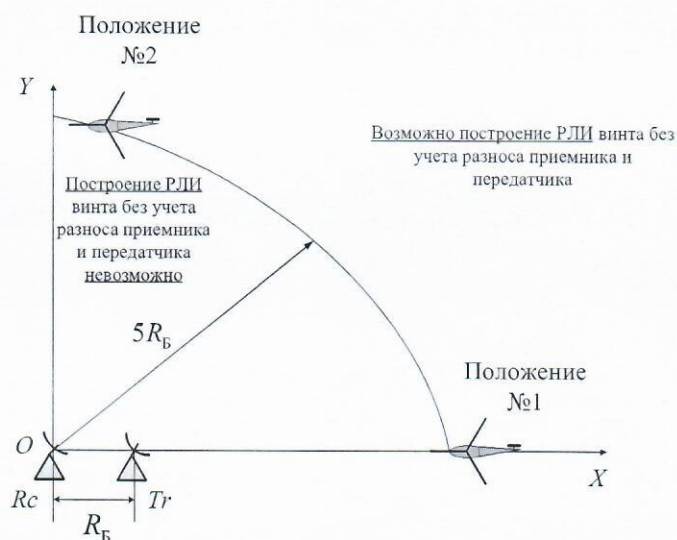
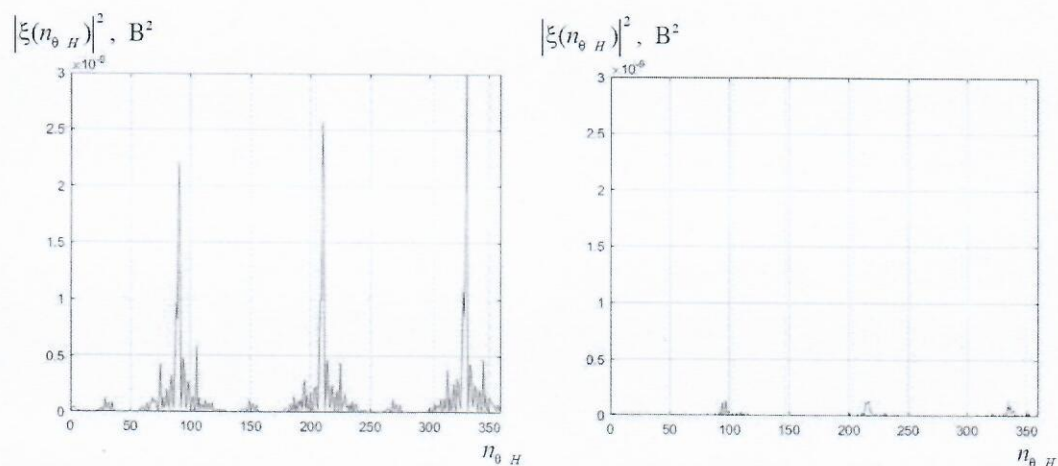


Рисунок 9 – Положение центра вращения НВ в системе координат модуля МРЛС

Наибольший выигрыш в отношении «сигнал/шум» в РЛИ винта, построенном с помощью алгоритма ОСАА, учитывающего разнос приемника и передатчика, по сравнению с алгоритмом для ОРЛС, $\Delta\mu_\xi = 11,9$ дБ имеет место, когда центр вращения винта находится на удалении от приемной позиции $R_{rc} = 5R_B$, и угол его наблюдения в азимутальной плоскости относительно линии базы из приемной позиции составляет около $\beta_{rc} \approx 80^\circ \dots 90^\circ$ (рисунок 9, положение №2; рисунок 10) [7–А].



а – РЛИ с учетом разноса приемной и передающей позиции

б – РЛИ без учета разноса приемной и передающей позиций

Рисунок 10 – РЛИ НВ, построенные путем ОСАА для положения №2 (рисунок 9)

По мере удаления центра вращения НВ от приемной позиции разница в отношении «сигнал/шум» в РЛИ, уменьшается вследствие уменьшения различий между ракурсами наблюдения из приемной и передающей позиций [7–А].

В *четвертой главе* предложен вариант алгоритма селекции ЛА по РЛИ его винтов от наземной движущейся техники [6–А] при условии их совместного нахождения в одном разрешаемом объеме (рисунок 11).

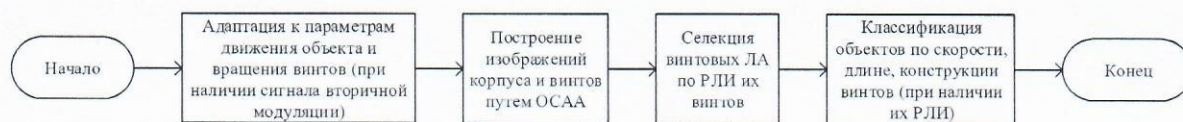


Рисунок 11 – Обобщенная блок-схема алгоритма селекции ЛА на фоне движущейся наземной техники для МРЛС

На первом этапе алгоритма селекции производится адаптация к параметрам движения объекта и вращения винтов. Это необходимо для обеспечения когерентного накопления сигнала на этапе ОСАА. Затем производится построение РЛИ его корпуса и определяется протяженность объекта в азимутальной плоскости. Далее из принятого суммарного сигнала вычитается сигнал, отраженный от корпуса. В случае наличия в оставшейся реализации сигнала вторичной модуляции, производится адаптация к параметрам вращения винтов и построение их РЛИ. Если РЛИ винтов имеют место, то обнаруженный объект классифицируется, как винтовой ЛА, если нет – то как наземный транспорт или реактивный ЛА. Далее производится окончательная классификация обнаруженной цели в зависимости от ее скорости, линейных размеров, а также от количества и плоскости вращения винтов (при наличии РЛИ винтов) по трем группам классов: колесно-гусеничная техника, винтовые ЛА, реактивные ЛА.

Для корректной оценки работоспособности алгоритма селекции проводилось многократное моделирование. По его результатам было определено, что разработанный алгоритм позволяет обеспечить селекцию винтовых ЛА по РЛИ их винтов с условной вероятностью правильной селекции $D_{\text{винт}} = 0,7$ при времени синтеза апертуры $T_{\text{оса}} = 1$ с и отношении «сигнал/шум» в изображении лопастей винта $\rho_{tr} = 10$ дБ: вертолета Ми-2 по изображению несущего винта – на удалении от приемного пункта 13770 м; самолета Ан-2 по изображению тянущего винта – 12150 м; квадрокоптера Phantom 3 SE по изображению любого из винтов – 710 м.

В **Приложении А** представлен порядок расчета мощности монохроматического зондирующего сигнала для бистатического модуля МРЛС с учетом компенсации мешающих отражений от подстилающей поверхности и приема мощного сигнала подсвета передающего пункта, характерного для бистатических РЛС с малой базой.

В **Приложении Б** приведены варианты формирования набора приемных диаграмм направленности для обзора пространства в цифровой антенной решетке.

В **Приложении В** подробным образом описаны математические модели сигналов, отраженных от корпуса объекта и винтов ЛА, вращающихся в различных плоскостях, для бистатического модуля МРЛС.

Приложение Г посвящено детальному описанию алгоритмов ОСАА для построения изображений корпуса объектов и винтов ЛА, вращающихся в различных плоскостях, для бистатического модуля МРЛС.

В **Приложении Д** приведены сведения о скорости движения и размерах типовых объектов, которые могут находиться в зоне обзора МРЛС.

В **Приложении Е** приведена подробная блок-схема алгоритма селекции ЛА на фоне колесно-гусеничной техники по факту обнаружения РЛИ винтов. Также в представленном алгоритме селекции предусмотрена возможность более подробной классификации обнаруженной цели в зависимости от скорости ее движения и протяженности в азимутальной плоскости, определяемой по результатам построения РЛИ корпуса объекта путем ОСАА.

Приложение Ж посвящено обобщенному порядку работы приемного и передающих пунктов МРЛС.

В **Приложении З** приведены результаты электродинамического моделирования диаграмм вторичного излучения двух- и трехлопастного винтов.

В **Приложении Е** представлены копии актов о практическом использовании результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. На современном этапе развития средств ПВО значительное внимание уделяется обнаружению малоразмерных малоскоростных ЛА. Широкое использование в локальных конфликтах последних десятилетий ПРР существенно снизили живучесть ОРЛС. Также резко возросло количество применяемых БЛА, в том числе и коммерческих, переоборудованных в барражирующие боеприпасы. При этом существует ряд проблем, возникающих в ходе решения задачи селекции малоскоростных ЛА на фоне колесно-гусеничной техники. Для решения вышеперечисленных проблем предлагается использовать МРЛС с ОСАА, облик которой был разработан в рамках данной работы. Использование нескольких маломощных передающих устройств, расположенных на достаточном удалении от приемного пункта, позволит обеспечить скрытность МРЛС, а в случае обнаружения передатчиков средствами разведки противника и поражения их ПРР – высокую живучесть МРЛС [3–А; 8–А; 11–А; 13–А; 14–А; 15–А].

2. Обоснованы математические модели сигналов, отраженных от корпуса наземных и воздушных объектов и винтов ЛА, для бистатического модуля МРЛС, учитывающие особенности, возникающие в комплексной огибающей ОС из-за несоответствия углов излучения и приема ЭМВ от поверхности объекта. В представленных моделях сигнала учитывается изменение фазового

набега ОС, обусловленное разными расстояниями, проходимыми падающей и отраженной ЭМВ, вследствие разноса передающего и приемного пунктов. Определено соотношение между длительностью одиночного отраженного радиоимпульса с амплитудной и фазовой модуляцией, обусловленной вращением лопасти винта, в ОРЛС и в модуле МРЛС. Также обоснована математическая модель сигнала, отраженного от ТВ самолета, учитывающая крутку лопасти в ОРЛС и МРЛС [1–А; 2–А; 4–А; 9–А; 10–А; 12–А; 14–А].

3. Разработаны алгоритмы построения РЛИ винтов ЛА путем ОСАА для бистатического модуля МРЛС, в опорных функциях которых учитывается взаимное расположение ЛА, приемного и передающего пунктов, что обеспечивает улучшение отношения «сигнал/шум» в изображении, например, НВ вертолета до 11,9 дБ при углах наблюдения центра вращения винта в азимутальной плоскости относительно линии базы из приемной позиции $80^\circ - 90^\circ$ и удалении от приемного пункта 2500 метров по сравнению с алгоритмами, которые не учитывают разнос приемной и передающей позиций. Обосновано выражение для расчета необходимого времени ОСАА для построения РЛИ различных объектов, в том числе и малоразмерных БЛА мультикоптерного типа, для модуля МРЛС. Доказана возможность применения алгоритмов ОСАА в модуле МРЛС. Определены условия, при которых в бистатическом модуле МРЛС возможно использовать алгоритмы ОСАА, в которых не учитывается разнос приемного и передающего пунктов [5–А; 7–А].

4. Разработан алгоритм селекции малоскоростных винтовых ЛА на фоне движущейся колесно-гусеничной техники для бистатического модуля МРЛС, отличающийся селекцией винтовых ЛА по РЛИ их винтов, полученных путем ОСАА с условной вероятностью $D_{\text{винт}} = 0,7$. В алгоритме селекции предусмотрена возможность использования алгоритмов ОСАА для совмещенных приемной и передающей позиций [6–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Облик МРЛС с ОСАА может быть использован в ходе разработки новейшей МРЛС обзора на МВ и ПМВ. Подобную РЛС целесообразно использовать: 1) в составе подвижных маловысотных разведывательных групп для оперативного наращивания радиолокационного поля на сложных участках Государственной границы; 2) для обеспечения радиолокационной информацией подразделений ПВО сухопутный войск, а также ЗРВ при обороне важных военно-экономических объектов (например, аэродром, командный пункт, завод и др.) [3–А; 11–А; 15–А].

2. Обоснованные математические модели сигналов, отраженных от различных наземных и воздушных объектов, возможно использовать в ходе решения задач обработки сигналов в бистатических и многопозиционных системах с малой базой [1–А; 2–А; 4–А; 9–А; 10–А; 12–А; 14–А].

3. Разработанные алгоритмы ОСАА для построения РЛИ винтов ЛА в модуле МРЛС, могут быть использованы в ходе разработке перспективных

МРЛС с ОСАА с различными видами конфигурации. Представленные алгоритмы позволяют учитывать различную фазу сигнала относительно приемной и передающей позиций. В рамках обоснования алгоритмов ОСАА для построения РЛИ корпуса объекта в модуле МРЛС были определены условия, при которых возможно построение РЛИ корпуса объекта в азимутальной плоскости. Это позволило определить оптимальную конфигурацию МРЛС, состоящей из нескольких таких модулей [5-А – 7-А].

4. Разработанный алгоритм селекции малоскоростных винтовых ЛА для МРЛС с ОСАА возможно использовать и в ОРЛС, что делает его универсальным инструментом для решения задач селекции винтовых ЛА при разработке перспективных РЛС [6-А].

Полученные результаты были использованы в НИР «Аркебуза» при определении возможностей ЗРВ и войсковой ПВО по борьбе с ударными беспилотными летательными аппаратами противника, в ходе совместной штабной тренировки ВВС и войск ПВО при расчете потенциальных разведывательных возможностей подразделений РТВ и внедрены в учебный процесс кафедры автоматики, радиолокации и приемо-передающих устройств учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь».

Разработанные в диссертации алгоритмы ОСАА и алгоритмы селекции ЛА в МРЛС рекомендуется использовать в качестве методологической основы при создании перспективных МРЛС.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях, соответствующих требованиям пункта 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий

1–А. Толмачёв А.В. Различия между сигналами, отраженными от лопасти несущего винта вертолета, в бистатической и однопозиционной радиолокационных станциях // Наука и военная безопасность. – 2021. – №2. – С. 31 – 35.

2–А. Толмачёв А.В. Математическая модель сигнала, отраженного от тянущего винта самолета, учитывающая крутку лопасти // Наука и военная безопасность. – 2021. – №4. – С. 31 – 37.

3–А. Толмачёв А.В., Чумаков Е.Н. Проблемные вопросы обнаружения и поражения тактических беспилотных летательных аппаратов зенитными ракетными комплексами // Наука и военная безопасность. – 2022. – №1. – С. 24 – 27.

4–А. Толмачёв А.В. Модель сигнала, отраженного от несущего винта вертолета, в бистатической радиолокационной станции. // Наука и военная безопасность. – 2022. – №1. – С. 36 – 40.

5–А. Толмачёв А.В. Построение радиолокационных изображений несущего винта вертолета с помощью обращенного синтеза апертуры антенны в многопозиционной радиолокационной станции. // Наука и военная безопасность. – 2022. – №2. – С. 28 – 32.

6–А. Толмачёв А.В. Селекция летательных аппаратов на фоне движущихся наземных объектов в многопозиционной радиолокационной станции // Наука и военная безопасность. – 2022. – №3. – С. 27 – 31.

7–А. Толмачёв А.В. Особенности построения радиолокационных изображений несущего винта вертолета путем обращенного синтеза апертуры антенны в многопозиционной радиолокационной системе // Наука и военная безопасность. – 2023. – №1. – С. 36 – 39.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

8–А. Толмачёв А.В., Гейстер С.Р. Проблемы обнаружения и распознавания малоразмерных летательных аппаратов на малых высотах // Сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 29 сентября – 1 октября 2020 г.). – Воронеж: Изд. дом ВГУ, 2020. – Т. 4. – С. 16 – 21.

9–А. Толмачёв А.В. Соотношение между длительностями сигналов, отраженных от лопасти несущего винта вертолета, в бистатической и однопозиционной радиолокационных станциях. // Сборник материалов IX Международной научной конференции по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использования технологий двойного назначения (Минск, 23 – 26 июня 2021 г.) / сост.: К.Н. Рожко. – Минск: Звезда, 2021. – С. 129 – 133.

10–А. Толмачёв А.В. Отличия в математических моделях сигнала, отраженного от несущего винта вертолета в бистатической и

однопозиционной радиолокационных станциях // Сборник трудов XXVII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». (Воронеж, 28 – 30 сентября 2021 г.) – Воронеж: Изд. дом ВГУ, 2021. – Т. 2. – С. 317 – 328.

11–А. Толмачёв А.В. Облик многопозиционной радиолокационной станции обзора на малых высотах // Материалы Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы образовательной и научной деятельности (совершенствование деятельности по обеспечению пограничной безопасности Союзного государства)», Минск, 26 октября 2021 г. / ИПС РБ; редкол.: И.К.Таперкин [и др.]. – Минск: ИПС, 2021. – Ч. 1. – С. 230 – 233.

12–А. Толмачёв А.В. Особенности математической модели сигнала, отраженного от автомобиля, в бистатической радиолокационной станции. // Сборник трудов VI Международной научно-практической конференции «Авиация: история, современность, перспективы развития» (Минск, 25 ноября 2021 г.). – Минск: БГАА, 2021. – С. 532 – 535.

13–А. Толмачёв А.В. Расчет мешающих отражений в бистатической радиолокационной станции // Сборник трудов XXVII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». (Воронеж, 27 – 29 сентября 2022 г.) – Воронеж: Изд. дом ВГУ, 2022. – Т. 3. – С. 212 – 220.

Статьи в сборниках тезисов докладов научных конференций

14–А. Толмачёв А. В. Обоснование различий между комплексными огибающими отраженного от лопасти несущего винта вертолета сигнала в бистатической и однопозиционной радиолокационных станциях. // Тезисы докладов Международной военно-научной конференции «Прикладные аспекты научной деятельности в области обороны и безопасности государства». (Минск, 29 апреля 2021 г.) – Минск: НИИ ВС РБ, 2021. – С. 161 – 162.

15–А. Толмачёв А.В. Варианты формирования набора приемных диаграмм направленности в бистатической радиолокационной станции // Тезисы докладов V Международной научно-технической (практической) конференции «Прикладные аспекты научной деятельности в области обороны и безопасности государства: 20-летний опыт НИИ Вооруженных Сил». (Минск, 25 – 26 мая 2022 г.) – Минск: НИИ ВС РБ, 2022. – С. 223 – 224.

РЭЗІЮМЭ

Талмачоў Аляксей Уладзіміравіч

ФАРМИРАВАННЕ ВІДАРЫСАЎ ВІНТОЎ ЛЯТАЛЬНЫХ АПАРАТАЎ У ШМАТПАЗІЦЫЙНАЙ РЛС ПРЫ ДАПАМОЗЕ СІНТЭЗУ АПЕРТУРЫ АНТЭНЫ

Ключавыя словы: шматпазіцыйная радыёлакацыйная станцыя, звернуты сінтэз апертуры антэны, радыёлакацыйныя відарысы.

Мэта працы: распрацоўка алгарытмаў звернутага сінтэзу апертуры антэны для пабудовы радыёлакацыйных відарысаў вінтоў лятальных апаратаў у шматпазіцыйнай радыёлакацыйнай станцыі.

Метады даследвання: матэматычны аналіз, матэматычнае мадэляванне, вымярэнне, эксперымент.

Выкарыстаная апаратура: антэна вымяральная П6 – 23А, асцылограф Smart DS 6062E, ЭВМ «Манаблок Тэсла».

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацаваны матэматычныя мадэлі часавых структур адлюстраваных сігналаў ад розных паветраных і наземных аб'ектаў у шматпазіцыйнай радыёлакацыйнай станцыі, якія ўлічваюць асаблівасці, якія ўзнікаюць з прычыны неадпаведнасці ракурсаў назірання аб'екта з прыёмнай і перадавальнай пазіцый; вызначаны асаблівасці, якія ўзнікаюць у адлюстраваным сігнале ад цягнучага вінта лёгкаматорнага самалёта з прычыны круткі лопасцяў; распрацаваны алгарытмы звернутага сінтэзу апертуры антэны для пабудовы радыёлакацыйных відарысаў корпуса і вінтоў выяўленага аб'екта ў шматпазіцыйнай радыёлакацыйнай станцыі, якія ўлічваюць асаблівасці, якія ўзнікаюць у часовай структуры адлюстраваных сігналаў з прычыны разнясення ў прастору прыёмнага і перадавальнага пунктаў; распрацаваны алгарытм селекцыі лятальных апаратаў на фоне наземнага транспарту, для шматпазіцыйнай радыёлакацыйнай станцыі; выканана праверка магчымага практычнага прымянення распрацаваных алгарытмаў селекцыі лятальных апаратаў і звернутага сінтэзу апертуры антэны ў шматпазіцыйнай радыёлакацыйнай станцыі.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: навуковыя вынікі былі рэалізаваны ў навукова-даследчай працы «Распрацоўка мадэлі баявых дзеянняў групавак зенітных ракетных войск і вайскавай супрацьпаветранай абароны пры іх сумесным ужыванні (у ходзе аперацый) ва ўмовах масіраванага ўжывання праціўнікам ударных беспілотных авіяцыйных комплексаў» (шыфр «Аркебуза»); выкарыстоўваюцца і прымяняюцца ў навучальным працэсе кафедры аўтаматыкі, радыёлакацыі і прыёма-перадавальных прылад установы адукацыі «Ваенная акадэмія Рэспублікі Беларусь»; выкарыстаны падчас сумеснай штабной трэніроўкі Ваенна-паветраных сіл і войск супрацьпаветранай абароны пры разліку патэнцыйных разведвальных магчымасцяў падраздзяленняў радыётэхнічных войск.

Вобласць ужывання: стварэнне перспектыўных шматпазіцыйных радыёлакацыйных станцый са звернутым сінтэзам апертуры антэны.

РЕЗЮМЕ

Толмачёв Алексей Владимирович

ФОРМИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВИНТОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В МНОГОПОЗИЦИОННОЙ РЛС ПОСРЕДСТВОМ СИНТЕЗА АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ

Ключевые слова: многопозиционная радиолокационная станция, обращенный синтез апертуры антенны, радиолокационные изображения.

Цель работы: разработка алгоритмов обращенного синтеза апертуры антенны для построения радиолокационных изображений винтов летательных аппаратов в многопозиционной радиолокационной станции.

Методы исследования: математический анализ, математическое моделирование, измерение, эксперимент.

Использованная аппаратура: антенна измерительная П6 – 23А, осциллограф Smart DS 6062E, ЭВМ «Моноблок Тесла».

Полученные результаты и их новизна: разработаны математические модели временных структур отраженных сигналов от различных воздушных и наземных объектов в многопозиционной радиолокационной станции, учитывающие особенности, возникающие вследствие несоответствия ракурсов наблюдения объекта из приемной и передающей позиций; определены особенности, возникающие в отраженном сигнале от тянущего винта легкомоторного самолета вследствие крутки лопастей; разработаны алгоритмы обращенного синтеза апертуры антенны для построения радиолокационных изображений корпуса и винтов обнаруженного объекта в многопозиционной радиолокационной станции, учитывающие особенности, возникающие во временной структуре отраженных сигналов вследствие разнесения в пространстве приемного и передающего пунктов; разработан алгоритм селекции летательных аппаратов на фоне движущегося наземного транспорта для многопозиционной радиолокационной станции; выполнена проверка возможного практического применения разработанных алгоритмов селекции летательных аппаратов и обращенного синтеза апертуры антенны в многопозиционной радиолокационной станции.

Рекомендации по использованию: научные результаты были реализованы в научно-исследовательской работе «Разработка модели боевых действий группировок ЗРВ и войсковой ПВО при их совместном применении (в ходе операций) в условиях массированного применения противником ударных БАК» (шифр «Аркебуза»); используются и применяются в учебном процессе кафедры автоматизации, радиолокации и приемо-передающих устройств УО «ВА РБ»; использованы в ходе совместной штабной тренировки ВВС и войск ПВО при расчете потенциальных разведывательных возможностей подразделений РТВ.

Область применения: создание перспективных многопозиционных радиолокационных станций с обращенным синтезом апертуры антенны.

SUMMARY

Tolmachov Alexey Vladimirovich

FORMATION OF IMAGES OF AIRCRAFT PROPELLERS IN A MULTI-POSITION RADAR BY MEANS OF ANTENNA APERTURE SYNTHESIS

Keywords: multi-position radar station, inverted antenna aperture synthesis, radar images.

Purpose of the work: development of algorithms for inverted antenna aperture synthesis for constructing radar images of aircraft propellers in a multi-position radar station.

Research methods: mathematical analysis, mathematical modeling, measurement, experiment.

Used equipment: P6 – 23A measuring antenna, oscilloscope Smart DS 6062E, Tesla Monoblock computer.

The results obtained and their novelty: mathematical models of temporal structures of reflected signals from various air and ground objects in a multi-position radar station were developed, taking into account the features arising from the discrepancy between the observation angles of an object from the receiving and transmitting positions; the features arising in the reflected signal from the tractor propeller of a light-engine aircraft due to the twist of the blades are determined; algorithms for inverted antenna aperture synthesis were developed for constructing radar images of the body and propellers of a detected object in a multi-position radar station, taking into account the features that arise in the temporal structure of reflected signals due to spatial diversity of receiving and transmitting points; an algorithm for selecting aircraft against the background of moving ground transport for a multi-position radar station was developed; a check was made of the possible practical application of the developed algorithms for selecting aircraft and inverted synthesis of the antenna aperture in a multi-position radar station.

Recommendations for use: scientific results were implemented in the research work "Development of a model of combat operations of air defense and military air defense groupings in their joint use (during operations) in conditions of massive use by the enemy of shock unmanned aerial systems" (code "Arquebus"); are used and applied in the educational process of the Department of Automation, Radar and Transceivers of the Educational Establishment "The Military Academy of the Republic of Belarus"; used in the course of joint staff training of the Air Force and Air Defense Forces when calculating the potential reconnaissance capabilities of the Radio technical troops units.

Scope: development of advanced multi-position radar with inverted antenna aperture synthesis.

Научное издание

**Толмачёв
Алексей Владимирович**

**ФОРМИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВИНТОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ В МНОГОПОЗИЦИОННОЙ РЛС ПОСРЕДСТВОМ
СИНТЕЗА АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.12.14 – радиолокация и радионавигация**

Подписано в печать 20.03.2024. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,4. Тираж 60 экз. Заказ 25.

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.
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск