

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.396.933.21

ДЖЕКИ
Абдула Мохамед

ВРЕМЕННЫЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ СИГНАЛОВ ВЕРТОЛЕТОВ
В ЗАДАЧЕ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРОСТРАНСТВА НА
МАЛЫХ ВЫСОТАХ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.12.04 – радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения

Минск 2011

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

Научный руководитель **Гейстер Сергей Романович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник государственного учреждения «Научно-исследовательский институт Вооруженных Сил Республики Беларусь»

Официальные оппоненты: **Костромицкий Сергей Михайлович**, доктор технических наук, профессор, директор открытого акционерного общества «КБ Радар»

Борискевич Анатолий Антонович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сетей и устройств телекоммуникаций учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Оппонирующая организация учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»

Защита состоится 14 апреля 2011 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.

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Обнаружение легкомоторных летательных аппаратов (вертолетов и легкомоторных самолетов), осуществляющих полет на малых и предельно малых высотах, является важной задачей как мирного, так и военного времени. В мирное время задача обнаружения легкомоторных аппаратов решается с целью пресечения ввоза наркотиков и контрабандных товаров, вывоза ценностей, а также исключения незаконного пересечения границы отдельными лицами и преступными группами. Рост актуальности контроля воздушных границ обусловлен возросшими объемами производства малоразмерных и сравнительно дешевых летательных аппаратов индивидуального пользования. Об этом свидетельствуют масштабы воздушных нарушений – ежедневно в мире совершаются десятки тысяч несанкционированных полетов на легкомоторных самолетах и вертолетах, например, в Бразилии – 2300 ... 2500 таких полетов.

Для незаконного оперативного пересечения границы с грузом наиболее эффективными являются вертолеты и легкомоторные самолеты. Высокая эффективность вертолетов обусловлена их существенными достоинствами: возможность выполнять полет на предельно малой высоте с огибанием рельефа местности, зависать и садиться в требуемых точках (включая труднодоступные районы), а также сравнительно высокая грузоподъемность.

В связи с этим в последние 15–20 лет существенно возросла актуальность охраны воздушных границ государств и мониторинга воздушного пространства на предельно малых высотах.

Впервые задача контроля воздушного пространства стала решаться в начале XX в., что было обусловлено появлением и расширением применения авиации. Задача решалась с использованием акустических локаторов, представлявших собой акустические звукоприемники различных конструкций. Решение об обнаружении принимал оператор на основе анализа звука.

В связи с появлением в 30-х гг. прошлого века радиолокационных средств обзора воздушного пространства и последующим их бурным развитием акустические локаторы перестали использоваться. Соответственно и развитие акустической локации воздушного пространства прекратилось. Поэтому в настоящее время самым распространенным видом автоматизированного контроля воздушного пространства является радиолокационный контроль. Это обусловлено возможностью проводить обзор больших воздушных зон, протяженностью в сотни и тысячи километров сравнительно малым количеством наземных радиолокационных станций (РЛС). При этом, однако, существует проблема обнаружения на малых и предельно малых высотах. Она не является новой, существовала всегда и обусловлена четырьмя основными группами факторов: первая группа связана с влиянием земной (водной) поверхности на распростране-

ние радиоволн; вторая группа связана с шарообразной формой Земли и рельефом местности, определяющим зоны прямой видимости и «радиотени»; третья группа связана с радиотехнической разведкой, проводимой нарушителями и обеспечивающей определение местоположения активных РЛС; четвертая группа связана с малой эффективной отражающей поверхностью летательных аппаратов, изготовленных по технологиям «Стелс», или малоразмерных аппаратов, выполненных в основном из композиционных материалов. С учетом этого можно констатировать – нарушители на легкомоторных летательных аппаратах могут эффективно пересекать границы на малых и предельно малых высотах.

Это обуславливает необходимость создания новых эффективных средств обнаружения, базирующихся на использовании естественных физических эффектов (явлений), возникающих при полете легкомоторных летательных аппаратов на малых и предельно малых высотах. Одним из таких физических факторов является появление акустических полей при работе двигательных установок летательных аппаратов. В основе успешной разработки акустических систем локации маловысотных аппаратов с винтовыми двигательными установками лежит использование временных и спектральных структур сигналов, адекватных практике. В связи с этим исследования отмеченных структур и корреляционных свойств сигналов вертолетов являются актуальной научной задачей, решение которой представляет значительный практический интерес в области создания пассивных акустических систем мониторинга воздушного пространства на малых и предельно малых высотах.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Результаты работы отражены в госбюджетной НИР «Разработать теорию, алгоритмы, методологию структурно-функциональной схемотехники и программно-аппаратные средства формирования, приема и обработки сигнально-кодовых конструкций в помехозащищенных радиоинформационных системах» №ГР20066154, выполнявшейся в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». Результаты данной работы связаны с повышением эффективности реализации на практике закона Республики Беларусь от 21 июля 2008 г. № 419-3 «О государственной границе Республики Беларусь», действие которого направлено на обеспечение пограничной безопасности Республики Беларусь.

Тема работы соответствует приоритетным направлениям научно-технической деятельности в мире и в Республике Беларусь, связанной в первую очередь с противодействием незаконному обороту наркотиков и незаконной торговле оружием. Эта деятельность характеризуется законодательными акта-

ми, число которых за последние 15–20 лет непрерывно растет в соответствии с масштабами распространения наркотиков и оружия (стрелковое оружие, переносные зенитные ракетные комплексы и пр.). Примерами таких актов являются:

- конвенция Организации Объединенных Наций о борьбе против незаконного оборота наркотических средств и психотропных веществ (Вена, 20 декабря 1988 г.);
- соглашение между государствами – членами Шанхайской организации сотрудничества о взаимодействии в борьбе с незаконным оборотом наркотических средств, психотропных веществ и их прекурсоров (Ташкент, 17 июня 2004 г.);
- соглашение между Правительством Российской Федерации и Правительством Республики Беларусь о сотрудничестве в борьбе с незаконным оборотом наркотических средств и психотропных веществ и злоупотребления ими (Минск, 22 ноября 1999 г.).

Результаты работы использованы республиканским инновационным университетским предприятием «Научно-технологический парк БНГУ «Политехник» для определения облика и характеристик пассивных акустических систем обнаружения, определения координат и скорости полета вертолетов и самолетов.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка моделей временных и спектральных структур сигналов, формируемых на выходе акустического приемника при приеме акустических полей вертолетов, на основе которых могут быть разработаны пассивные акустические системы, обеспечивающие эффективный мониторинг воздушного пространства в районах со сложным рельефом.

Для достижения этой цели в работе решались следующие задачи:

1. Обосновать акустический способ мониторинга воздушного пространства на малых и предельно малых высотах в приграничных районах со сложным рельефом местности.
2. Разработать структуру системы мониторинга воздушного пространства в районах со сложным рельефом местности.
3. Разработать математические модели временных и спектральных структур сигналов отдельной лопасти и системы лопастей воздушного винта.
4. Разработать математические модели временных и спектральных структур сигналов вертолета с учетом эффекта Доплера.
5. Экспериментально исследовать временную и спектральную структуры сигналов вертолета.

Объект исследования – система мониторинга воздушного пространства в районах со сложным рельефом местности. *Предмет исследования* – временные и спектральные структуры сигналов вертолетов, формируемых на выходе акустического приемника, которые обеспечивают синтез пассивных акустических

Положения, выносимые на защиту

1. Акустосейсмический способ мониторинга воздушного пространства и структура пассивной акустосейсмической системы обнаружения и определения координат вертолетов и легкомоторных самолетов на малых и предельно малых высотах. Система включает акустические и сейсмические датчики обнаружения – измерения координат, а ее функционирование основано на использовании акустических и сейсмических полей вертолетов и самолетов. Система является пассивной, что исключает эффективное противодействие ей со стороны нарушителей воздушного пространства, и отличается от радиолокационных систем возможностью функционирования в условиях отсутствия прямой видимости – в складках местности, руслах рек и пр.

2. Математическая модель временной структуры сигнала идеальной лопасти воздушного винта, принимаемого в плоскости вращения, позволяющая описать форму сигнала и устанавливающая математические взаимосвязи между параметрами вращающейся лопасти и создаваемого ей сигнала на выходе акустического приемника. Модель позволяет синтезировать устройство обработки сигнала отдельной лопасти, реализация которого в акустических датчиках приведет к увеличению дальности обнаружения винтовых летательных аппаратов за счет повышения отношения сигнал–помеха в результате частотно-временной фильтрации.

3. Математические модели временной и спектральной структур сигнала системы лопастей воздушного винта, принимаемого в плоскости вращения, которые учитывают эффект Доплера, возникающий при движении летательного аппарата, и соответственно позволяют определить радиальную скорость полета дозвукового летательного аппарата, а при многопозиционном приеме – абсолютную скорость. Кроме того, эти модели позволяют синтезировать устройства обработки принятого сигнала, обеспечивающие когерентное накопление и адаптивную к доплеровским смещениям частоты селекцию спектральных компонент сигналов несущего и рулевого винтов с последующим их некогерентным суммированием, что ведет к увеличению дальности обнаружения винтовых летательных аппаратов в условиях наличия внутренних шумов приемника и внешних помех за счет частотной избирательности устройства обработки.

4. Методика анализа временной и спектральной структур сигналов несущего и рулевого винтов вертолета, основанная на спектральной селекции и обеспечивающая выделение сигналов несущего и рулевого винтов из суммарного принятого сигнала на основе использования дискретных спектральных структур этих сигналов, параметры которых определяются характеристиками винтов и эффектом Доплера. Методика позволяет выделить из суммарного сиг-

нала сигналы несущего или рулевого винтов вертолета и для каждого из этих сигналов провести анализ спектральной и временной структур с оценкой параметров. На основе данной методики могут быть синтезированы устройства распознавания типа вертолета, а также устройства измерения скорости на основе обработки результатов ее независимых измерений по спектрам несущего и рулевого винтов, обеспечивающей снижение дисперсии ошибки на 29 %.

5. Экспериментально полученные оценки параметров временных и спектральных структур сигналов одновинтовых вертолетов, а также оценки корреляционных функций сигналов несущего и рулевого винтов и их параметров с учетом эффекта Доплера при приближении и удалении вертолетов. Исследования корреляционных функций сигналов позволили установить следующие параметры сигналов, определяющие структуры и параметры устройств обработки в составе обнаружителей и измерителей координат – ширину спектра сигнала отдельной реальной лопасти несущего винта около 100 – 180 Гц и рулевого винта около 500 – 800 Гц, время корреляции огибающей корреляционной функции несущего винта около 750 мс и рулевого винта около – 850 мс.

Личный вклад соискателя

1. Соискатель лично выполнил обоснование акустосейсмического способа и разработку структуры акустосейсмической системы мониторинга воздушного пространства на малых и предельно малых высотах в приграничных районах со сложным рельефом местности.

2. Совместно с руководителем соискатель выполнил разработку моделей временной и спектральной структур сигнала от системы лопастей винта в плоскости вращения; разработку методики анализа временной и спектральной структур сигналов несущего и рулевого винтов вертолета; экспериментальные исследования временных и спектральных структур сигналов вертолетов.

3. Совместно с А.С. Гейстером соискатель выполнил разработку математической модели временной структуры акустического сигнала идеальной лопасти воздушного винта, принимаемого в плоскости вращения, а также разработку моделей временной и спектральной структур сигнала несущего винта вертолета на выходе акустического приемника с учетом эффекта Доплера.

4. Совместно с А.М. Гладышевым и А.С. Гейстером соискатель выполнил анализ влияния эффекта Доплера на временную и спектральную структуры выходного сигнала акустического приемника при движении источника акустического поля.

Апробация результатов диссертации

Материалы, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на

шести конференциях – XIII международной научно-технической конференции «Современные средства связи» в г. Минске 7 – 9 октября 2008 г.; 6-й Белорусско-российской научно-технической конференции «Технические средства защиты информации» в г. Минске 21 – 22 мая 2008 г.; международной научно-технической конференции, посвященной 45-летию МРТИ–БГУИР, в г. Минске 19 марта 2009 г., Минск; 5-й международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2009» в г. Севастополе 20 – 25 апреля 2009 г.; IX Харьковской конференции молодых ученых «Радиофизика, Электроника, Фотоника и Биофизика» в г. Харькове 1 – 3 декабря 2009 г.; 46-й научно-технической конференции аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР в г. Минске 19–23 апреля 2010 г.

Опубликованность результатов диссертации

Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 11 работах в научных изданиях, соответствующих пункту 18 «Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь», общим объемом 2,61 авторского листа, в том числе 5 статей в научных журналах объемом 2,02 авторского листа, 1 доклад и 5 тезисов докладов в сборниках статей и материалов конференций объемом 0,6 авторского листа.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и двух приложений. В первой главе определена актуальность мониторинга воздушного пространства в приграничных районах, дано обоснование акустосейсмического способа и разработана структура акустосейсмической системы мониторинга воздушного пространства на малых и предельно малых высотах в приграничных районах со сложным рельефом местности. Во второй главе проведена разработка математических моделей временных структур сигналов отдельной лопасти и системы лопастей воздушного винта, формируемых на выходе акустического приемника. В третьей главе проведена разработка математических моделей временных и спектральных структур сигналов винтов вертолета с учетом эффекта Доплера. В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований временной и спектральной структур сигналов винтов вертолетов, а также корреляционных характеристик этих сигналов.

Полный объем диссертационной работы составляет 143 страниц, которые включают текст на 99 страницах, 70 иллюстраций на 29 страницах, список использованных источников из 75 наименований на 5 страницах, список публика-

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В *первой главе* проведен анализ актуальности мониторинга воздушного пространства на малых и предельно малых высотах в приграничных районах. Установлено, что актуальность такого мониторинга резко возросла в последнее десятилетие, что обусловлено следующими причинами: во-первых, перелет через границу (узкую зону контроля) является наиболее быстрым и эффективным способом преодоления границы; во-вторых, появление новых технологий в авиастроении привело к очередному витку в разработке и производстве сравнительно недорогих малоразмерных летательных аппаратов, к которым относятся вертолеты, легкомоторные самолеты и дельтапланы. Актуальна задача мониторинга и для Ливии, общая протяженность сухопутных границ которой составляет 4383 км. Эффективная охрана воздушных границ такой протяженности невозможна без специальных автоматических средств мониторинга.

Анализ существующих способов обнаружения (радиолокационные способы, электростатический, магнитный, гравитационный, оптический) низколетящих объектов на предельно малых высотах в условиях сильно пересеченной и гористой местности показал, что наиболее приемлемым является акустосейсмический способ обнаружения на основе сочетания приема акустических и сейсмических полей. Проведен анализ мирового опыта по использованию акустических и сейсмических полей для обнаружения вертолетов и самолетов, и разработана структура акустосейсмической системы мониторинга воздушного пространства в районах со сложным рельефом местности, представленная на рисунке 1. Основу ее составляют комбинированные акустосейсмические модули обнаружения, определения координат и распознавания (ООКР).

Разработана структура модуля ООКР, включающего набор датчиков, обеспечивающих прием акустических и сейсмических волн, акустоэлектрическое преобразование, обнаружение и передачу сигналов на центральный вычислитель модуля, устройства автоматического обнаружения, оценки угловых координат, распознавания класса (типа) аппарата и устройство передачи данных.

Во *второй главе* разработаны математические модели временных структур сигналов отдельной лопасти и системы лопастей воздушного винта. Под моделями понимается математическое описание временной структуры сигнала, пропорционального изменению давления в точке приема акустической волны от лопасти (системы лопастей), на выходе акустоэлектрического преобразователя. Рассмотрены акустическая модель вертолета и особенности направленного излучения акустических сигналов его винтами. Математические модели разработаны при следующих ограничениях: рассматривается идеальная лопасть, у которой отсутствует затекание

ограничениях: рассматривается идеальная лопасть, у которой отсутствует затекание воздуха; лопасти в винте рассматриваются без учета их взаимодействия в системе.

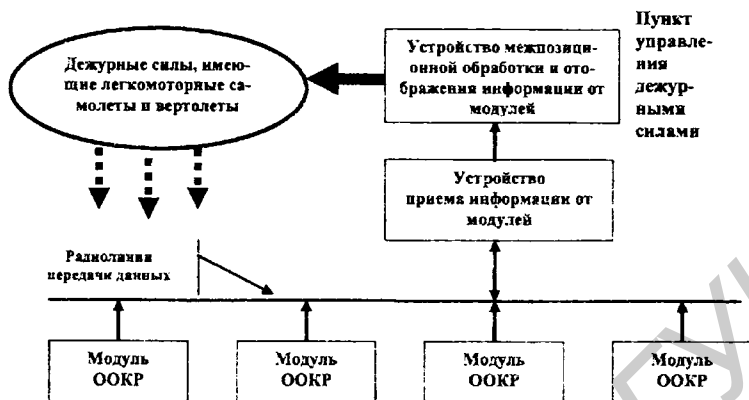


Рисунок 1 – Структура акустосейсмической системы мониторинга

Модель временной структуры сигнала $U_{p_{pr}}(t)$ на выходе акустоприемника для приближающейся идеальной лопасти описывается выражением

$$U_{p_{pr}}(t) = \begin{cases} k_{rs} k_{rt} k_{p-\alpha} \frac{\rho \pi^2 R_L^4}{T_V^2} \frac{1}{2} (\operatorname{tg}(t \Omega_V))^2 \text{ при } t_{f,s-N} \leq t \leq t_{f,s-K}; \\ 0 \text{ при } 0 \leq t < t_{f,s-N} \text{ и } t_{f,s-K} < t, \end{cases} \quad (1)$$

где k_{rs} – коэффициент преобразования изменения давления в электрический сигнал в акустоприемнике;

k_{rt} – коэффициент, учитывающий уменьшение уровня избыточного давления при распространении;

$k_{p-\alpha}$ – коэффициент, учитывающий угол атаки набегающей лопасти;

ρ – плотность воздуха;

R_L – радиус винта;

$t_{f,s-N} = (2\pi - \varphi_{f,s-N}) / \Omega_V$ – время начала формирования давления при положении лопасти $\varphi_{L-m} = (2\pi - \varphi_{f,s-N})$, которое отсчитывается с момента $t=0$, при котором $\varphi_{L-m} = 0$;

$t_{f,s-K} = (2\pi - \varphi_{f,s-K}) / \Omega_V$ – время окончания формирования давления при положении лопасти $\varphi_{L-m} = (2\pi - \varphi_{f,s-K})$;

$\varphi_{f,s-N}$, $\varphi_{f,s-K}$ – значения угла $\varphi_{f,s-L}$ для приближающейся лопасти, при

которых начинается и заканчивается формирование избыточного давления в направлении приема.

Рисунок 2 иллюстрирует подход к определению точки излучения на линии фронта избыточного давления для приближающейся идеальной лопасти.

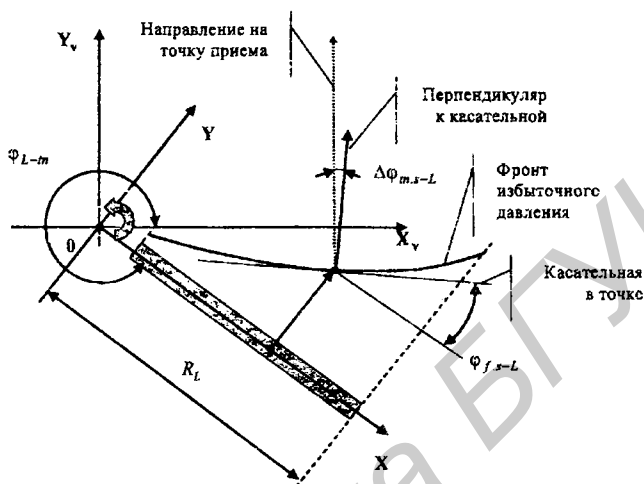


Рисунок 2 – Определение точки излучения

Аналогичным образом выглядит модель временной структуры сигнала $U_{p_{rad}}(t)$ удаляющейся идеальной лопасти. Отличие состоит лишь в изменении уровня и знака давления, углов начала и конца формирования поля (сигнала).

Математическую модель сигнала винта, центр которого не перемещается в пространстве, на временном интервале JT_V можно записать в виде

$$U_{p_L}(t) = \begin{cases} \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^{N_L} U_{p_{L1}} \left(t - (n-1) \frac{T_V}{N_L} - (j-1) T_{NV} \right), & 0 \leq t \leq JT_V; \\ 0, & t < 0, t > JT_V, \end{cases} \quad (2)$$

где $U_{p_{L1}}(t)$ – сигнал, формируемый одной лопастью, имеющей на момент времени $t = 0$ нулевое угловое положение относительно направления на наблюдателя;

J – число периодов вращения системы лопастей в течение интервала временного анализа;

N_L – число лопастей, вращающихся с периодом T_V .

В *третьей главе* разработаны математические модели временных и спектральных структур сигналов вертолета с учетом эффекта Доплера.

Вертолет является носителем сравнительно большого числа источников сигналов, из которых наиболее существенны несущий и рулевой (для одновин-

товой схемы) винты. Несущий винт характеризуется частотой вращения F_{NV} (периодом T_{NV}), а также числом лопастей N_{L-NV} . Рулевой винт характеризуется частотой вращения F_{RV} (периодом T_{RV}), а также числом лопастей N_{L-RV} .

С учетом того, что сигналы удаляющихся лопастей как несущего, так и рулевого винтов малы по сравнению с сигналами приближающихся лопастей, математическая модель временной структуры сигнала движущегося одновинтового вертолета, учитывающая эффект Доплера, может быть представлена в виде

$$U_{pV}(t) = \begin{cases} \sum_{j=1}^J \left\{ \sum_{n=1}^{N_{L-NV}} U_{PN1-pr} \left(t - (n-1)T_{NL-pr(ud)} - (j-1)T_{NL-pr(ud)}N_{L-NV} \right) + \right. \\ \left. + \sum_{n=1}^{K_{R/N} \times N_{L-RV}} U_{PR1-pr} \left(t - (n-1)T_{RL-pr(ud)} - (j-1)T_{RL-pr(ud)}N_{L-RV}K_{R/N} \right) \right\} & (3) \\ \text{при } 0 \leq t \leq JT_{NV}; \\ 0 \text{ при } t < 0, t > JT_{NV}. \end{cases}$$

В этом выражении в качестве анализируемого интервала использован интервал JT_{NV} . Периоды следования сигналов лопастей несущего $T_{NL-pr(ud)}$ и рулевого $T_{RL-pr(ud)}$ винтов в зависимости от направления и скорости вертолета относительно акустоприемника с учетом ветра описываются выражениями

$$T_{NL-pr(ud)} = T_{NL-0} \frac{c - V_{r-v} + V_{r-t}}{c - V_{r-v}}; \quad T_{RL-pr(ud)} = T_{RL-0} \frac{c - V_{r-v} + V_{r-t}}{c - V_{r-v}}, \quad (4)$$

в которых знаки радиальных скоростей соответствуют направлению перемещения вертолета и ветра относительно акустоприемника. Если вертолет зависает, то вместо периодов $T_{NL-pr(ud)}$ и $T_{RL-pr(ud)}$ используются периоды

$$T_{NL-0} = T_{NV} / N_{L-NV}; \quad T_{RL-0} = T_{RV} / N_{L-RV}. \quad (5)$$

В случае произвольной корреляции двух стационарных и стационарно связанных сигналов несущего $U_{PNV}(t)$ и рулевого $U_{PRV}(t)$ винтов обобщенное выражение для корреляционной функции суммарного сигнала $p_V(t)$ имеет вид

$$c_V(\tau) = c_{NV}(\tau) + c_{RV}(\tau) + c_{N-R}(\tau) + c_{R-N}(\tau), \quad (6)$$

где $c_{N-R}(\tau)$ и $c_{R-N}(\tau)$ – взаимные корреляционные функции сигналов несущего $U_{PNV}(t)$ и рулевого $U_{PRV}(t)$ винтов.

Соответствующее обобщенное выражение для спектральной структуры сигнала вертолета имеет вид

$$S_V(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} c_V(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau = S_{NV}(\omega) + S_{RV}(\omega) + S_{N-R}(\omega) + S_{R-N}(\omega), \quad (7)$$

где $S_{NV}(\omega)$ – спектр сигнала несущего винта;

$S_{RV}(\omega)$ – спектр сигнала рулевого винта;

$S_{N-R}(\omega)$ и $S_{R-N}(\omega)$ – взаимные спектры сигналов винтов.

Сигналы несущего $U_{pNV}(t)$ и рулевого $U_{pRV}(t)$ винтов представляют собой периодические процессы с нулевым средним, которые можно характеризовать как квазистационарные на интервале анализа JT_{NV} . Несущий и рулевой винты механически связаны между собой и запитываются энергией от одного источника. Однако механические конструкции несущего и рулевого винтов разнесены в пространстве и существенно отличаются по геометрическим параметрам. Кроме того, для исключения явления механического резонанса используется некратное соотношение периодов появления лопастей несущего и рулевого винтов, которое для зависшего вертолета равно $\frac{T_{NL-0}}{T_{RL-0}} = \frac{K_{R/N} N_{L-RV}}{N_{L-NV}}$, где

число $K_{R/N}$ является иррациональным. Следовательно, на интервале анализа сигналы несущего и рулевого винтов можно полагать стационарными и некоррелированными. Тогда обобщенные выражения для корреляционной функции и спектра суммарного сигнала одновинтового вертолета имеют вид

$$c_V(\tau) = c_{NV}(\tau) + c_{RV}(\tau); \quad S_V(\omega) = S_{NV}(\omega) + S_{RV}(\omega). \quad (8)$$

Энергетический спектр $S_{NL}(\omega)$ сигнала несущего винта

$$S_{NL}(\omega) = S_N(\omega T_{NL-pr}(ud)) S_{N1-pr}(\omega), \quad (9)$$

где $S_{N1-pr}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} c_{N1-pr}(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau$ – энергетический спектр сигнала одной приближающейся лопасти;

$S_N(\omega T_{NL-pr}(ud))$ – энергетический спектр ограниченной последовательности δ -модулированных импульсов.

С использованием подхода, предложенного профессором А.Е. Охрименко, выражение для $S_N(\omega T_{NL-pr}(ud))$ преобразуется к виду гребенчатой функции:

$$S_N(\omega T_{NL-pr}(ud)) = \frac{1 - r_{N-NV}^2}{1 - 2r_{N-NV} \cos(\omega T_{NL-pr}(ud)) + r_{N-NV}^2}, \quad (10)$$

для которой зубцы расходятся вправо и влево в бесконечность и имеют ширину $\Delta F_N \cong F_{NL-pr}(ud) / N$, где $F_{NL-pr}(ud) = 1/T_{NL-pr}(ud)$ – частота следования сигналов от приближающихся лопастей с учетом движения, а $N = JN_{L-NV}$.

Аналогичным образом представляется и энергетический спектр $S_{RV}(\omega)$ сигнала рулевого винта.

Анализ спектральной и временной структур несущего и рулевого винтов с

учетом использования сигналов от приближающихся лопастей позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, форма и ширина огибающей спектра сигнала несущего (рулевого) винта определяется формой и длительностью одиночного сигнала приближающейся лопасти. Во-вторых, частота следования и ширина зубцов в спектре сигнала несущего (рулевого) винта движущегося вертолета определяется частотой вращения винта и соответствующими доплеровскими добавками для несущего и рулевого винтов, имеющими разные значения. В-третьих, корреляционная функция сигнала несущего (рулевого) винта движущегося вертолета имеет свойства, аналогичные свойствам спектра, – является периодической, имеет ограниченные значения ширины огибающей и ширины зубцов. Причем форма и ширина зубца корреляционной функции определяется корреляционными свойствами последовательности сигналов от приближающихся лопастей несущего (рулевого) винта, а ширина огибающей – формой и длительностью одиночного сигнала приближающейся лопасти винта. Факторами, снижающими корреляционные свойства последовательности, являются изменение скорости вращения винта и колебательные движения лопастей. Также разработана методика определения скорости движения вертолета, основанная на усреднении оценок скорости, полученных путем независимой обработки спектров сигналов несущего и рулевого винтов с учетом эффекта Доплера. Методика позволяет получить более точное значение скорости по сравнению со способом на основе обработки сигнала только одного источника – несущего винта.

В *четвертой главе* представлены методика анализа временной и спектральной структур сигналов несущего и рулевого винтов вертолета, основанная на спектральной селекции, и результаты экспериментальных исследований временных и спектральных структур сигналов одновинтовых вертолетов.

Физической и математической основой *методики анализа временной и спектральной структур сигналов несущего и рулевого винтов вертолета* является дискретная спектральная структура сигналов винтов. Методика включает четыре этапа. Первым этапом является выделение момента пролета вертолета через линию базы, что выполняется путем поиска максимума по временной диаграмме сигнала. Вторым этапом является определение базовых частот (частот следования импульсов винтов) $f_{b1-0} = F_{NL-0} = F_{NV-0}N_{L-NV}$ и $f_{b2-0} = F_{RL-0} = F_{RV-0}N_{L-RV}$ без доплеровских сдвигов для временного интервала пролета вертолета через линию базы. Третьим этапом является анализ спектральной и временной структур несущего винта вертолета для любого временного интервала, когда вертолет движется на приближение или удаление. Это происходит следующим образом: от анализируемого временного интервала выполняется прямое преобразование Фурье и с учетом f_{b1-0} и f_{b2-0} в спектре для анализируемого временного интервала определяется базовая частота $f_{b1-pr(ud)}$,

целым значениям которой $f_{n-NV-pr(ud)} = n f_{b1-pr(ud)}$ соответствуют частоты спектральных компонент сигнала несущего винта. Затем определяется максимальный номер компоненты N_{NV-max} , которая еще существенна для анализа, и все компоненты в спектре анализируемого интервала обнуляются за исключением компонент в фильтрах на частотах $f_{n-NV-pr(ud)}$, $n = 1, \overline{N_{NV-max}}$ и в соседних фильтрах. В итоге получается спектральная структура сигнала несущего винта, имеющего соответствующие доплеровские сдвиги с учетом АЧХ приемника. От полученной структуры выполняется обратное преобразование Фурье и получается временная структура сигнала несущего винта с учетом доплеровского эффекта, которая подвергается анализу в различных вариантах – от прямого анализа формы одиночных сигналов до корреляционного анализа фрагмента. Четвертым этапом является анализ спектральной и временной структур рулевого винта, который выполняется аналогичным образом с использованием спектральных компонент на частотах $f_{n-RV-pr(ud)} = n f_{b2-pr(ud)}$, $n = 1, \overline{N_{RV-max}}$.

Для проведения исследований был изготовлен экспериментальный комплекс с приемниками на основе динамического микрофона SHURE SM-58, имеющего полосу пропускания от 40 Гц до 15 кГц по уровню -10 дБ и чувствительность -54 дБ В / Па. Частота дискретизации выбрана равной $F_d = 44,1$ кГц. Объектами исследований были вертолеты Ми-2 и Ми-8.

В качестве примера на рисунке 3 представлена временная диаграмма сигнала вертолета Ми-2. Начальная дальность до вертолета составляла около 600 м при скорости полета около 30 м/с.

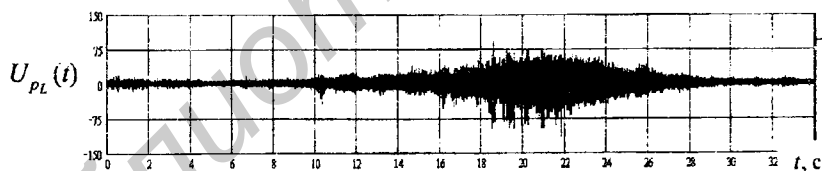


Рисунок 3 – Сигнал вертолета Ми-2 при его пролете

На рисунке 4 представлен энергетический спектр фрагмента принятого сигнала для $t = 17,0$.

В спектре имеется две базовые частоты – $f_{b1} = 14,769453$ Гц и $f_{b2} = 52,083$ Гц. На рисунке 5 для анализируемого интервала представлены временные диаграммы сигналов лопастей несущего $U_{pNL}(t)$ (фильтрация 6-ти компонент) и рулевого $U_{pRL}(t)$ (фильтрация 10-ти компонент) винтов, полученные с использованием разработанной методики анализа.

На рисунке 6 представлена оценка автокорреляционной функции сигнала несущего винта $C_{NL}(\tau)$, полученная на основе фрагмента длительностью 3 с

момента времени $t = 17,0$ с после соответствующей частотной фильтрации.

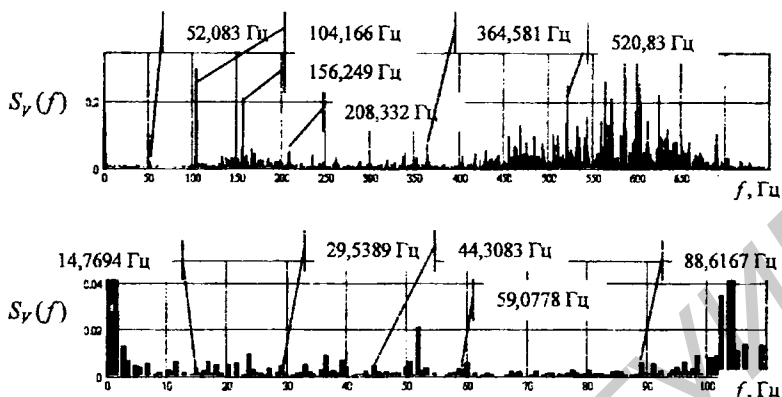


Рисунок 4 – Энергетический спектр сигнала приближающегося Ми-2

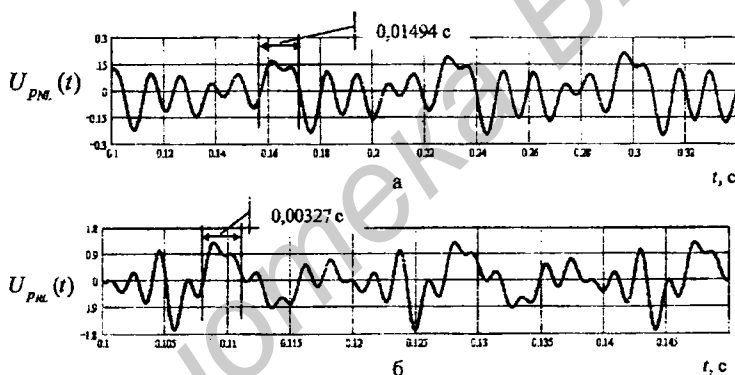


Рисунок 5 – Сигналы лопастей несущего (а) и рулевого (б) винтов

В четвертой главе представляются результаты исследований параметров временных (длительности и периоды следования сигналов) и спектральных (частоты и ширина спектральных компонент, ширина спектров несущего и рулевого винтов) структур сигналов одновинтовых вертолетов Ми-2 и Ми-8, а также оценки корреляционных функций сигналов несущего и рулевого винтов и их параметры с учетом эффекта Доплера при приближении и удалении.

В приложениях представлены обзор акустических локаторов обнаружения самолетов и акт внедрения результатов диссертационной работы.

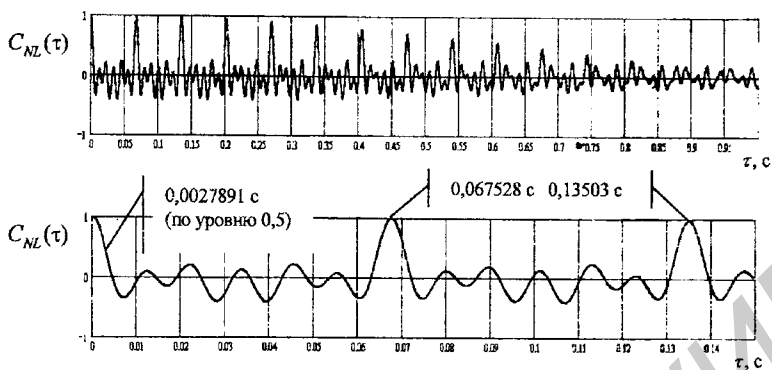


Рисунок 6 – Оценка автокорреляционной функции сигнала несущего винта

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. На основе анализа основных методов обнаружения показано, что для обнаружения и определения координат вертолетов и легкомоторных самолетов на малых и предельно малых высотах в условиях отсутствия прямой видимости наиболее эффективным является акустосейсмический способ [2–А]. Разработана обобщённая структура акустосейсмической системы мониторинга воздушного пространства в районах со сложным рельефом, включающая набор модулей обнаружения, определения координат и распознавания, многоканальное устройство приема информации и устройство межпозиционной обработки и отображения информации [11–А]. Разработана структура модуля обнаружения, определения координат и распознавания, состоящего из акустосейсмических датчиков, устройств обнаружения, оценки угловых координат, распознавания и передачи данных на устройство приема информации от модулей.

2. На основе анализа принципов полёта и конструкции установлены особенности направленного излучения акустических сигналов винтами вертолета, для характеристики которого в дальней зоне введена амплитудная диаграмма направленности излучения звука воздушным винтом. Впервые предложена акустическая модель двухвинтового вертолета, учитывающая частотную зависимость затухания звука при распространении [1–А, 7–А] и обеспечивающая ясное представление о соотношении уровней сигналов несущего и рулевого винтов при наблюдении из разных точек в дальней зоне [3–А; 9–А].

3. Впервые разработаны математические модели временных структур сигнала, создаваемого в акустическом приемнике приближающейся и удаляющейся идеальной лопастью при постоянном и изменяющемся угле атаки вдоль ло-

пасти [3-А, 6-А, 8-А], учитывающая длину и частоту вращения лопасти, а также сигнала от воздушного винта, представляющего собой систему лопастей с ограничением на акустическое взаимодействие отдельных лопастей винта [3-А, 6-А].

4. На основе анализа свойств сигналов несущего винта вертолета с учетом эффекта Доплера получены выражения для доплеровской частоты, учитывающие скорость вращения и число лопастей винта. Рассмотрены свойства спектра последовательности видеосигналов, формируемых системой лопастей винта движущегося летательного аппарата, с учетом эффекта Доплера [3-А, 5-А, 10-А]. Определен подход к учету скорости ветра в доплеровских смещениях частот спектральных компонент сигналов винтов вертолета [5-А].

5. Разработаны математические модели временной и спектральной структур принятого сигнала вертолета, включающего сигналы несущего и рулевого винтов, с учетом эффекта Доплера [5-А]. Форма и ширина огибающей спектра акустического сигнала от несущего (рулевого) винта определяются формой и длительностью одиночного сигнала приближающейся лопасти, а частота следования спектральных составляющих – числом лопастей, частотой вращения винта, скоростью полета вертолета относительно приемника и номером спектральной составляющей [5-А, 10-А]. Разработана методика определения радиальной скорости движения вертолета на основе эффекта Доплера в сигналах двух бортовых источников одновинтового вертолета – сигналах несущего и рулевого винтов, использование которой позволяет снизить до 29 % среднеквадратическое значение ошибки измерения скорости.

6. Методика анализа временной и спектральной структур сигналов несущего и рулевого винтов вертолета, основанная на спектральной селекции, позволила обработать экспериментально полученные сигналы вертолетов и отдельно выделить сигналы несущего и рулевого винтов из суммарного принятого сигнала. В итоге получены оценки параметров структур сигналов винтов, а также оценки соответствующих корреляционных функций и их параметров с учетом эффекта Доплера при приближении и удалении вертолетов. Исследования корреляционных функций сигналов позволили установить следующие параметры сигналов, определяющие структуры и параметры устройств обработки в составе обнаружителей и измерителей координат – ширину спектра сигнала отдельной реальной лопасти несущего винта около 100 – 180 Гц и рулевого винта около 500 – 800 Гц, время корреляции огибающей корреляционной функции несущего винта около 750 мс и рулевого винта около 850 мс. Исследования подтвердили соответствие доплеровских сдвигов спектральных компонент сигналов несущего и рулевого винтов скорости движения вертолета.

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Спектральные и временные структуры сигналов винтов вертолетов и закономерности проявления доплеровского эффекта позволяют провести синтез структур пассивных акустических устройств обнаружения, измерения координат и параметров движения вертолетов и легкомоторных самолетов, а также разработать алгоритмы обработки сигналов в этих устройствах.

2. Метод измерения скорости движения одновинтового вертолета, основанный на усреднении независимых оценок скорости по доплеровским смещениям сигналов несущего и рулевого винтов, может быть использован для разработки устройства измерения скорости, обладающего повышенной точностью.

3. Результаты исследований позволяют создать пассивные акустические системы мониторинга воздушного пространства на малых и предельно малых высотах, уникальность которых заключается в возможности их функционирования в зонах с отсутствием прямой видимости (русла рек, складки рельефа поверхности Земли, лесные массивы и пр.) без излучений зондирующих сигналов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1–А. Джеки, А.М. Эволюция временной и спектральной структур акустического сигнала выстрела (взрыва) при распространении в воздухе / С.Р. Гейстер, Р.В. Быков, А.М. Джеки // Вестник Военной академии Республики Беларусь. – 2007. – № 4 (17). – С. 67–75.

2–А. Джеки, А.М. Решение задачи обнаружения маловысотных легкомоторных летательных аппаратов путем использования акустических и сейсмических полей / С.Р. Гейстер, А.М. Джеки // Наука и военная безопасность. – 2008. – № 1. – С. 42–46.

3–А. Джеки, А.М. Физические основы формирования акустической волны винтом самолета и математическая модель временной структуры акустического сигнала идеальной лопасти / А.М. Джеки, А.С. Гейстер // Доклады БГУИР. – 2008. – № 3 (33). – С. 20–26.

4–А. Джеки, А.М. Доплеровский эффект при акустическом мониторинге движущихся автотранспортных средств / С.Р. Гейстер, А.М. Гладышев, А.С. Гейстер, А.М. Джеки // Доклады БГУИР. – 2010. – № 1 (47). – С. 5–11.

5–А. Джеки, А.М. Математические модели временной и спектральной структур акустического сигнала несущего винта вертолета на выходе акустического приемника с учетом эффекта Доплера / А.М. Джеки, А.С. Гейстер // Инженерный вестник. – 2010. – № 2 (30). – С. 11–15.

Материалы конференций

6-А. Джеки, А.М. Физические основы формирования акустической волны воздушным винтом самолета / А.М. Джеки, С.Р. Гейстер // VI Белорусско-Российск. науч.-техн. конф. «Технические средства защиты информации», Минск, 21–22 мая 2008 г.: материалы докл. и кратк. сообщ. – Минск, 2008. – С. 10.

7-А. Джеки, А.М. Математическая модель трассы распространения акустического сигнала в воздушной среде / С.Р. Гейстер, А.М. Джеки // Материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. «Современные средства связи», Минск, Высший государственный колледж связи, 7–9 окт. 2008 г. – Минск, 2008. – С. 19.

8-А. Джеки, А.М. Математическая модель акустической волны винта самолета / А.М. Джеки, А.С. Гейстер, А.М. Гладышев // Материалы 5-й Междунар. молодежн. науч.-техн. конф. «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2009», Севастопольский национальный технический университет, Украина, г. Севастополь, 20–25 апр. 2009 г. – С. 329.

9-А. Джеки, А.М. Временная структура акустического сигнала идеальной лопасти воздушного винта в приложении к задаче пассивной локации / А.М. Джеки // Сб. аннот. IX Харьковской конф. молод. ученых «Радиофизика, Электроника, Фотоника и Биофизика», Ин-т радиофизики и электроники им. О.Я. Усикова НАН Украины, Харьков, 1–3 дек. 2009 г. – С. 29.

10-А. Джеки, А. М. Модель акустического сигнала винта вертолета с учетом эффекта Доплера / А.М. Джеки // Материалы 46-й науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Минск, Беларусь, 19–23 апр. 2010 г., С. 10–11.

Материалы конференций

11-А. Джеки, А.М. Обнаружение маловысотных аэродинамических объектов в акустическом и сейсмическом полях применительно к контролю воздушных границ / А.М. Джеки, С.Р. Гейстер // Тезисы докл. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 45-летию МРТИ-БГУИР, Минск, БГУИР, 19 марта 2009 г. – С. 45.



Джэкі Абдула Мохамед

ЧАСАВЫЯ І СПЕКТРАЛЬНЫЯ СТРУКТУРЫ СІГНАЛАЎ ВЕРТАЛЁТАЎ У ЗАДАЧЫ АКУСТЫЧНАГА МАНІТОРЫНГУ ПРАСТОРЫ НА МАЛЫХ ВЫШЫНЯХ

Ключавыя словы: часавыя і спектральныя структуры сігналаў верталётаў, пасіўныя акустычныя сістэмы маніторынгу паветранай прасторы на малых і гранічна малых вышынях, эффект Доплера.

Мэта работы: распрацоўка часавых і спектральных структур сігналаў, фармаваных на выхадзе акустычнага прыёмніка пры прыёме акустычных палёў верталётаў, на аснове якіх могуць быць распрацаваны пасіўныя акустычныя сістэмы, якія забяспечваюць эфектыўны маніторынг паветранай прасторы ў раёнах са складаным рэльефам.

Аб'ектам даследавання з'яўляюцца сістэмы маніторынгу паветранай прасторы ў раёнах са складаным рэльефам мясцовасці.

Прадметам даследавання з'яўляюцца часавыя і спектральныя структуры сігналаў верталётаў, фармаваных на выхадзе акустычнага прыёмніка, якія забяспечваюць сінтэз пасіўных акустычных устройстваў выяўлення, вымярэння каардынат і распазнавання.

Метады даследавання: метады спектральнага аналізу, эксперыментальных даследаванняў, статыстычнай апрацоўкі эксперыментальных дадзеных.

Асноўныя вынікі работы: абгрунтаванне акустасейсмічнага спосабу маніторынгу паветранай прасторы і структура пасіўнай акустасейсмічнай сістэмы выяўлення і вызначэння каардынат верталётаў і лёгкаматорных самалётаў на малых і гранічна малых вышынях; матэматычная мадэль часавай структуры сігналаў ідэальнай лопасці паветранага вінта; матэматычныя мадэлі часавай і спектральнай структуры сігналаў сістэмы лопасцяў паветранага вінта, якія ўлічваюць эффект Доплера; метадыка аналізу часавай і спектральнай структуры сігналаў апорнага і рулявога вінтоў верталёта, заснаваная на спектральнай селекцыі і, якая забяспечвае вылучэнне сігналаў апорнага і рулявога вінтоў з сумарнага прынятага сігналаў; эксперыментальна атрыманыя адзнакі параметраў часавых і спектральных структур сігналаў аднавінтавых верталётаў, а таксама адзнакі карэляцыйных функцый сігналаў апорнага і рулявога вінтоў і іх параметраў з улікам эфекту Доплера пры набліжэнні і адаленні верталётаў.

Ступень выкарыстання: навуковыя вынікі былі выкарыстаны пры выкананні прац па вызначэнні аблічча і характарыстак пасіўных акустычных сістэм выяўлення, вызначэння каардынат і хуткасці палёту верталётаў і самалётаў.

Вобласць ужывання: стварэнне пасіўных акустычных сістэм маніторынгу паветранай прасторы на малых і гранічна малых вышынях у інтарэсах аховы мяжы і аб'ектаў.

Джеки Абдула Мохамед

ВРЕМЕННЫЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ СИГНАЛОВ ВЕРТОЛЕТОВ
В ЗАДАЧЕ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРОСТРАНСТВА
НА МАЛЫХ ВЫСОТАХ

Ключевые слова: временные и спектральные структуры сигналов вертолета, пассивные акустические системы мониторинга воздушного пространства на малых и предельно малых высотах, эффект Доплера.

Цель работы: разработка временных и спектральных структур сигналов, формируемых на выходе акустического приемника при приеме акустических полей вертолетов, на основе которых могут быть разработаны пассивные акустические системы, обеспечивающие эффективный мониторинг воздушного пространства в районах со сложным рельефом.

Объектом исследования являются системы мониторинга воздушного пространства в районах со сложным рельефом местности.

Предметом исследования являются временные и спектральные структуры сигналов вертолетов, формируемых на выходе акустического приемника, которые обеспечивают синтез пассивных акустических устройств обнаружения, измерения координат и распознавания.

Методы исследования: методы спектрального анализа, экспериментальных исследований, статистической обработки экспериментальных данных.

Основные результаты работы: обоснование акустосейсмического способа мониторинга воздушного пространства и структура пассивной акустосейсмической системы обнаружения и определения координат вертолетов и легкомоторных самолетов на малых и предельно малых высотах; математическая модель временной структуры сигнала идеальной лопасти воздушного винта; математические модели временной и спектральной структур сигнала системы лопастей воздушного винта, учитывающие эффект Доплера; методика анализа временной и спектральной структур сигналов несущего и рулевого винтов вертолета, основанная на спектральной селекции и обеспечивающая выделение сигналов несущего и рулевого винтов из суммарного принятого сигнала; экспериментально полученные оценки параметров временных и спектральных структур сигналов одновинтовых вертолетов, а также оценки корреляционных функций сигналов несущего и рулевого винтов и их параметров с учетом эффекта Доплера при приближении и удалении вертолетов.

Степень использования: научные результаты были использованы при выполнении работ по определению облика и характеристик пассивных акустических систем обнаружения, определения координат и скорости полета вертолетов и самолетов.

Область применения: создание пассивных акустических систем мониторинга воздушного пространства на малых и предельно малых высотах в интересах охраны границы и объектов.

SUMMARY

Jaki Abdualla Mohamed

TEMPORAL AND SPECTRAL STRUCTURES OF HELICOPTER SIGNALS IN THE TASK OF ACOUSTIC MONITORING OF AIR SPACE AT LOW ALTITUDES

Keywords: temporal and spectral structure of signals helicopter, passive acoustic monitoring system of air space at low and extremely low altitude, the Doppler effect.

Purpose: Development of the temporal and spectral patterns of signals that are generated at the output of acoustic receiver for receiving the acoustic field of helicopters, on the basis of which may be developed passive acoustic systems to ensure effective monitoring of air space in areas with difficult terrain.

Object of study: monitoring the airspace in areas with difficult terrain.

The subject of the study are temporal and spectral structure of signals of helicopters that are generated at the output of acoustic receiver, which provide a synthesis of passive acoustic detection devices, coordinate measuring and recognition.

Research method: Methods of spectral analysis, experimental research, statistical analysis of experimental data.

Work main result: rationale acoustoseismic way of monitoring the airspace and the structure of the passive acoustoseismic detection and positioning of helicopters and light airplanes at low and extremely low altitudes; mathematical model of the term structure signals an ideal blade propeller, the mathematical model of temporal and spectral structures signal system blade propeller, taking into account the Doppler effect, the method of analysis of temporal and spectral structure of signals and tail rotor helicopter, based on spectral selection and provides selection signals and tail rotor of the total received signal, the experimentally obtained parameter estimates of temporal and spectral patterns of signals single-rotor helicopters, as well as estimates of the correlation functions of signals and tail rotor, and their parameters with consideration of the Doppler effect at the approach and moving off of helicopters.

Degree of usage: scientific results have been used during the work, by definition, shape and characteristics of passive acoustic detection, positioning and speed of helicopters and airplanes.

Scope: the creation of passive acoustic monitoring of air space at low and extremely low altitudes in order to protect the borders and objects.

Научное издание

ДЖЕКИ АБДУЛА МОХАМЕД

**ВРЕМЕННЫЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ СИГНАЛОВ
ВЕРТОЛЕТОВ В ЗАДАЧЕ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА
ПРОСТРАНСТВА НА МАЛЫХ ВЫСОТАХ**

специальность 05.12.04 – радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Подписано в печать 09.03.2011.	Формат 60x84 ¹ / ₁₆ .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-взд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.	Заказ 114.
