

Учреждение образования  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.396.96

НГУЕН  
Тьен Тхай

**АДАПТИВНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВИНТОВ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В ДАТЧИКЕ С ОБРАЩЕННЫМ  
СИНТЕЗОМ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ**

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

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

Минск 2019

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

Научный руководитель **Гейстер Сергей Романович**, доктор технических наук, профессор, руководитель опытных и экспериментальных разработок ЗАО «Группа производственных технологий и авиационного машиностроения «Аэромаш»

Официальные оппоненты: **Цветков Виктор Юрьевич**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

**Ярмолик Сергей Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, начальник цикла кафедры автоматики, радиолокации и приемопередающих устройств учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь»

Оппонирующая организация ОАО «АЛЕВКУРП»

Защита состоится «27» июня 2019 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.02 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

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

Автореферат разослан «    » мая 2019 г.

И.о. ученого секретаря  
совета по защите диссертаций Д 02.15.02  
доктор технических наук, профессор



А. А. Борискевич

## ВВЕДЕНИЕ

Задача распознавания летательных аппаратов, выполняющих полеты на предельно малых высотах, актуальна как в мирное, так и военное время. Типовыми летательными аппаратами, выполняющими полеты на предельно малых высотах, являются вертолеты, самолеты, конвертопланы. В военное время к ним добавляются крылатые ракеты. Поэтому задачу распознавания классов маловысотных летательных аппаратов целесообразно решать на основе построения радиолокационных изображений их корпуса и винтов, которые могут быть получены с высоким качеством путем обращенного синтеза апертуры антенны. Диссертационная работа посвящена разработке способов и алгоритмов адаптивной обработки принятого сигнала в радиолокационном датчике, обеспечивающих формирование радиолокационных изображений винтов летательных аппаратов путем обращенного синтеза апертуры антенны для распознавания их класса. В основе качественного построения радиолокационных изображений винтов летательных аппаратов лежит адаптация опорных функций в алгоритмах построения изображений к априорно неизвестным частотам вращения винтов, координатам и параметрам движения (скорость, ракурс).

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Работа выполнена на кафедре информационных радиотехнологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» с целью создания высокоинформативных средств мониторинга предельно малых высот для Социалистической Республики Вьетнам. Исследования выполнены на инициативной основе.

### **Цель и задачи исследования**

*Цель* диссертационной работы заключается в разработке способов и алгоритмов адаптивной обработки принятого сигнала, обеспечивающих получение радиолокационных изображений (РЛИ) винтов маловысотных летательных аппаратов (ЛА) посредством обращенного синтеза апертуры антенны (ОСАА) в радиолокационном датчике (РЛД) мониторинга предельно малых высот (ПМВ) для распознавания их класса.

В диссертации решались следующие *задачи*:

1. Разработка облика РЛД, обеспечивающего автоматическое обнаружение, измерение координат и распознавание класса маловысотного ЛА.
2. Разработка математических моделей сигналов, отраженных от винтов летательных аппаратов, в приложении к построению РЛИ винтов путем ОСАА.
3. Разработка алгоритмов построения РЛИ винтов на основе пространственно-временной обработки принятого сигнала в рамках ОСАА.

4. Разработка способов и алгоритмов адаптации к априорно неизвестным координатам, параметрам движения (скорость, ракурс) и частотам вращения винтов ЛА.

5. Экспериментальные исследования основных алгоритмов РЛД с ОСАА.

*Объектом* исследования являются изображения аэродинамических объектов в радиодиапазоне. *Предметом* исследования являются способы, устройства и алгоритмы адаптивной пространственно-временной обработки сигналов для получения РЛИ винтов при обращенном синтезе апертуры антенны.

### **Научная новизна**

Научная новизна полученных результатов заключается в разработке:

– математической модели сигнала, отраженного от несущего винта (НВ) вертолета, в которой лопасть представляется набором изотропных отражателей, расположенных на линиях передней и задней кромок, отличающейся учетом маховых движений и изгибов лопастей, что позволяет более точно описать закон изменения амплитудно-фазовой структуры сигнала;

– алгоритмов построения РЛИ горизонтального и вертикального винтов ЛА на основе ОСАА, отличающихся адаптацией к априорно неизвестным радиальной скорости и частотам следования лопастей винтов, а также учетом в алгоритме построения РЛИ НВ вертолета маховых движений и изгибов лопастей, что обеспечивает высокое качество формирования РЛИ НВ;

– способа измерения частоты следования лопастей винта на основе свертки спектра «вторичной» модуляции отраженного сигнала (ОС) винта, отличающегося выделением слабого сигнала вторичной модуляции на фоне мощного сигнала корпуса и вычислением свертки сигнала «вторичной» модуляции с его комплексно-сопряженным образом, сдвинутым в частотной области на измеряемую частоту, что обеспечивает устранение негативного влияния на измерение быстрого изменения радиальной скорости ЛА, повышение отношения «сигнал винта/помеха» за счет когерентного накопления свертки и снижение ошибок измерения; важным свойством способа является возможность определения признака четности (нечетности) числа лопастей винта.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Математическая модель сигнала, отраженного от несущего винта вертолета как системы вращающихся лопастей, представленных наборами изотропных отражателей, расположенных на линиях передней и задней кромок лопастей, отличающаяся учетом маховых движений и изгибов лопастей (например, для несущего винта вертолета Ми-2 передняя кромка аппроксимируется двумя линейными отрезками, задняя кромка – четырьмя), что позволяет более точно описать закон изменения амплитудно-фазовой структуры отраженного от лопасти сигнала. При этом сигнал, отраженный

несущего винта, представляет собой набор линейно-частотно-модулированных импульсов, длительности которых обратно пропорциональны длинам отрезков, а девиация частоты пропорциональна расстоянию отрезка до центра вращения и частоте вращения.

2. Алгоритмы построения радиолокационных изображений горизонтального и вертикального винтов летательного аппарата на основе обращенного синтеза апертуры антенны, отличающиеся адаптацией к априорно неизвестным радиальной скорости и частотам следования лопастей винтов, а также учетом в алгоритме построения радиолокационного изображения несущего винта вертолета маховых движений и изгибов лопастей, что обеспечивает повышение отношения «сигнал/помеха» в радиолокационном изображении несущего винта по сравнению с алгоритмом без их учета (например, для вертолета Ми-2 примерно на 4,5...8,5 дБ).

3. Способ измерения частоты следования лопастей винта на основе свертки спектра «вторичной» модуляции отраженного сигнала винта, отличающийся выделением слабого сигнала «вторичной» модуляции на фоне мощного сигнала корпуса и вычислением свертки сигнала «вторичной» модуляции с его комплексно-сопряженным образом, сдвинутым в частотной области на измеряемую частоту, что обеспечивает устранение негативного влияния на ошибки измерения быстрого изменения радиальной скорости летательного аппарата и повышение отношения «сигнал винта/помеха» за счет когерентного накопления свертки. Способ обеспечивает повышение отношения «сигнал винта/помеха» по сравнению с традиционным способом с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) пропорционально количеству эффективных составляющих в спектре «вторичной» модуляции отраженного сигнала винта. При шаге настройки частоты каналов устройства свертки 0,01 Гц и времени когерентного накопления 1,365 с ошибки измерения частоты следования лопастей винта лежат в пределах  $\pm 0,005$  Гц, что обеспечивает высокое качество построения изображений. Важным свойством способа является обеспечение устойчивого определения признака четности числа лопастей винта, что позволяет сократить количество вариантов числа лопастей в алгоритме построения радиолокационного изображения винта и уменьшить требуемые вычислительные ресурсы.

4. Результаты экспериментальных исследований, включающие: подтверждение правильности разработанной модели отраженного сигнала несущего винта, учитывающей маховые движения и изгибы лопастей и представляющей сигнал несущего винта в виде примыкающих друг к другу импульсов с линейной частотной модуляцией, количество и параметры модуляции которых определяются числом и расположением отрезков на кромке; подтверждение работоспособности способа измерения частоты

следования лопастей винта в части обеспечения определения частоты следования лопастей для несущего и рулевого винтов вертолета Ми-2 и тянущего винта самолетов Ан-2, Ан-2МС, Як-52 с ошибками  $\pm(0,005...0,04)$  % от истинных значений; проверку устойчивости формирования признака четности (нечетности) числа лопастей; подтверждение работоспособности алгоритмов формирования изображений винтов полученным изображениям несущего и рулевого винтов вертолета, тянущих винтов самолетов.

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

#### **1. Соискатель лично:**

- выполнил анализ существующих математических моделей сигнала, отраженного от винта ЛА, в приложении к ОСАА;
- разработал математические модели сигналов, отраженных от винтов типовых маловысотных ЛА (вертолетов и легкомоторных самолетов);
- провел анализ временных и спектральных характеристик сигналов, отраженных от винтов типовых маловысотных ЛА, путем моделирования;
- рассмотрел возможность учета маховых движений и изгибов лопастей в математической модели сигнала, отраженного от НВ вертолета;
- рассмотрел и проанализировал задачи построения РЛИ винтов ЛА на основе ОСАА при монохроматическом зондирующем сигнале (МХЗС);
- проверил работоспособность и качество функционирования способа измерения частоты следования лопастей винта и алгоритмов построения РЛИ винтов на основе ОСАА для типовых маловысотных ЛА;
- исследовал влияние ошибок измерения дальности, параметров движения и частоты вращения на качество построения РЛИ винтов путем моделирования.

#### **2. Совместно с руководителем соискатель:**

- разработал алгоритмы построения РЛИ вертикального и горизонтального винтов ЛА на основе ОСАА;
- разработал способ измерения частоты следования лопастей винта на основе свертки спектра «вторичной» модуляции ОС винта;
- провел экспериментальные исследования способа измерения частоты следования лопастей винта и алгоритмов построения РЛИ винтов для типовых маловысотных ЛА.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 21-м Международном молодежном форуме «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» (г. Харьков, Украина, 2017 г.); 53-й научной конференции

аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск, 2017 г.); 54-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск, 2018 г.); 13-й Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2017» (г. Севастополь, Россия, 2017 г.); 14-й Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2018» (г. Севастополь, Россия, 2018 г.).

### **Опубликование результатов диссертации**

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 13 научных работ, в том числе 6 статей в научных рецензируемых журналах, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, объемом 2,39 авторского листа, 7 статей в сборниках материалов научных конференций объемом 0,6 авторского листа. Общий объем публикаций составляет 2,99 авторского листа.

### **Структура и объем диссертации**

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

Общий объем диссертации составляет 215 страниц, из них 94 страницы основного текста, 158 иллюстраций на 40 страницах, 19 таблиц на 3 страницах, библиографический список из 78 наименований на 7 страницах, список собственных публикаций из 13 наименований на 2 страницах и 11 приложений на 69 страницах, включая два акта внедрения (приложения Л и М).

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

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

В *первой главе* разработаны математические модели сигналов [2, 4], отраженных от винтов ЛА, в РЛД [1]. Вначале рассматривается математическая модель ОС горизонтального несущего винта. Винт ЛА, схематично изображенный на рисунке 1, рассматривается как система из  $N_L$  лопастей с угловым интервалом  $\Delta\phi_V = 2\pi / N_L$ , вращающаяся с частотой  $F_V$  вокруг центра  $C_V$  по часовой стрелке (или против часовой стрелки), движущегося с постоянной скоростью  $V_t$  по траектории, параллельной оси  $OX$ . Лопастей нумеруются по ходу вращения винта  $n_L = \overline{1, N_L}$ . Лопастей представляется набором изотропных отражателей, расположенных на линиях передней и задней кромок. Расстояние между соседними отражателями на кромках составляет  $\lambda / 4$  (рисунок 2). Присвоим отражателям на

передней (индекс  $p$ ) и задней (индекс  $z$ ) кромках номера  $n_{R\_p(z)} = \overline{1, N_R}$ . Комплексная огибающая сигнала, отраженного от винта, при использовании МХЗС описывается общим выражением

$$U_{L\_V}(t) = \sum_{n_L=1}^{N_L} \sum_{n_R=1}^{N_R} E_{n_L, n_R}(t) \exp \left[ i \left( \varphi_{n_L, n_R}(t) \right) \right], \quad (1)$$

где  $E_{n_L, n_R}(t)$ ,  $\varphi_{n_L, n_R}(t)$  – законы изменения амплитуды и фазы сигнала, отраженного от  $n_R$ -го отражателя на  $n_L$ -й лопасти;  $N_R$  – количество отражателей на одной лопасти.

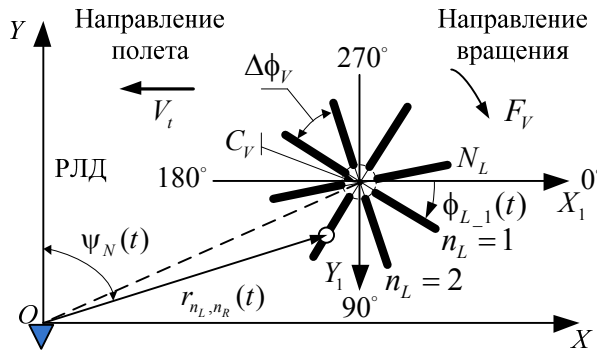


Рисунок 1. – Винт как система лопастей (проекция на плоскость  $XOY$ )

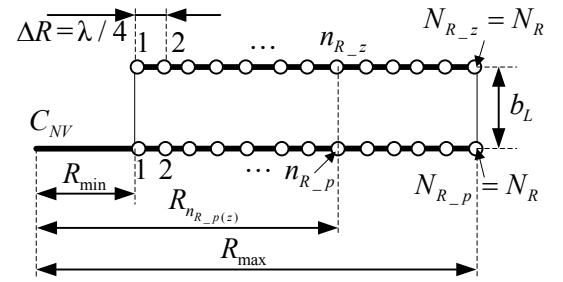


Рисунок 2. – Расстановка отражателей по кромкам

Законы изменения амплитуды, мощности и фазы сигнала, отраженного от  $n_R$ -го отражателя на  $n_L$ -й лопасти, можно представить в виде

$$E_{n_L, n_R}(t) = \sqrt{2\sigma_{s\_n_L, n_R}^2(t)}, \quad \varphi_{n_L, n_R}(t) = 2k r_{n_L, n_R}(t),$$

$$\sigma_{s\_n_L, n_R}^2(t) = \frac{P_0 G_{Tr} G_{Rec} \lambda^2 \sigma_{t\_n_L, n_R}(\psi_N(t))}{(4\pi)^3 (r_{n_L, n_R}(t))^4}, \quad (2)$$

где  $P_0$  – мощность зондирующего сигнала;  $G_{Tr}, G_{Rs}$  – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн;  $\sigma_{s\_n_L, n_R}^2(t)$  – закон изменения мощности ОС от отражателя;  $\sigma_{t\_n_L, n_R}(\psi_N(t))$  – эффективная отражающая поверхность  $n_R$ -го отражателя на  $n_L$ -й лопасти под углом облучения  $\psi_N(t)$ ;  $r_{n_L, n_R}(t)$  – закон изменения дальности до отражателя;  $k$  – волновое число.

Рассмотрены законы изменения дальностей до отражателей относительно фазового центра антенны РЛД для двух вариантов аппроксимации лопасти НВ (или рулевого (РВ), или тянущего (ТВ)): *вариант 1* – лопасть представляется набором изотропных отражателей на одной прямой линии, длина которой соответствует длине лопасти; *вариант 2* – лопасть представляется набором отражателей на двух прямых линиях передней и задней кромок лопасти. В варианте 2 отражатели на кромках являются изотропными только в полусферах, когда кромки обращены к РЛД.

Разработаны математические модели сигналов, отраженных от НВ и РВ



одновинтового вертолета, НВ соосного вертолета и ТВ самолета. Для упрощения лопасть РВ (или ТВ) представляется набором изотропных отражателей, расположенных на одной прямой линии передней кромки или двух прямых линиях передней и задней кромок.

Разработана [4] математическая модель ОС НВ, учитывающая маховые движения (МД) и изгибы лопастей. При этом лопасть НВ представляется набором изотропных отражателей, расположенных на изогнутых линиях передней и задней кромок лопасти, совершающей МД в процессе полного оборота. Кромки аппроксимируются кусочно-линейными функциями. В частности для вертолета Ми-2 передняя кромка аппроксимируется двумя отрезками длиной  $R_{p_{-1(2)}}$  с углом наклона  $\beta_{p_{-2}}$  второго отрезка относительно первого, а задняя кромка – четырьмя отрезками длиной  $R_{z_{-1(2,3,4)}}$  с углами наклона  $\beta_{z_{-2(3,4)}}$  второго, третьего и четвертого отрезков относительно первого. Угол наклона первых участков аппроксимации передней и задней кромок лопасти соответствует текущему углу взмаха  $\beta_L(\phi_L)$  (рисунок 3), где  $\phi_L$  – угловое положение лопасти.

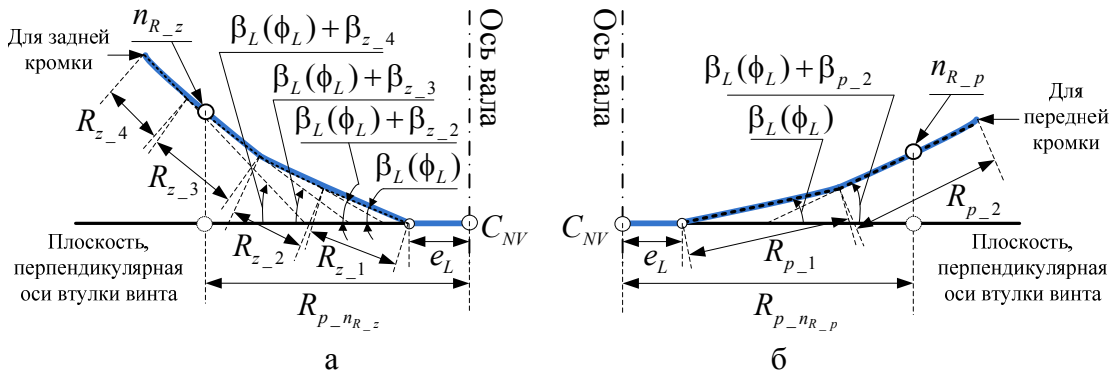
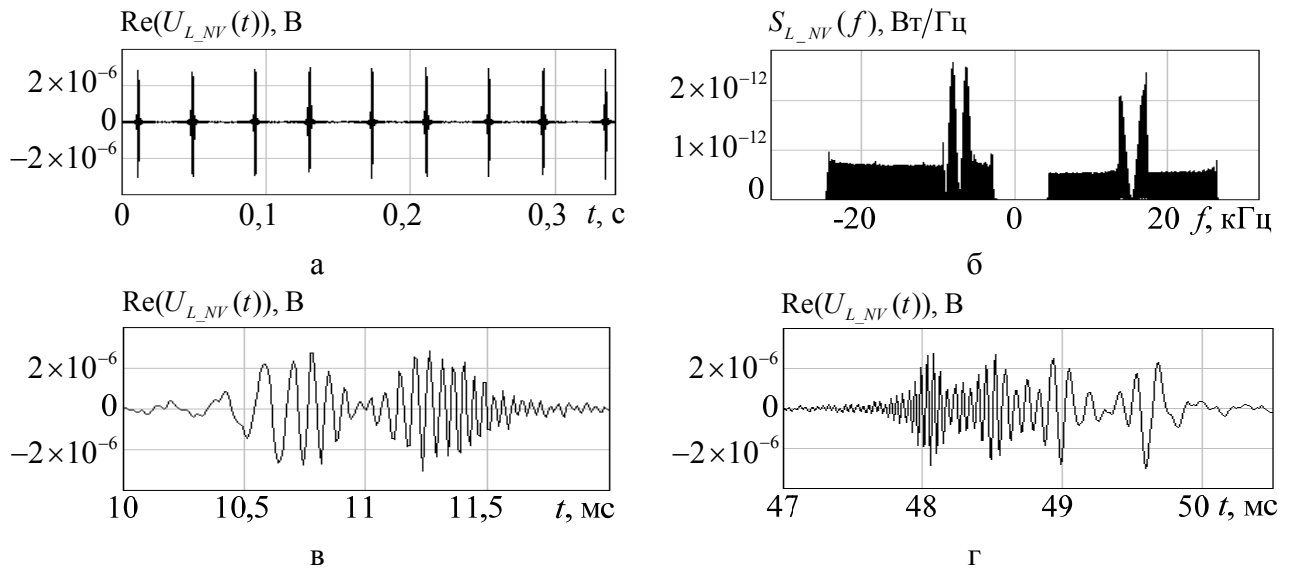


Рисунок 3. – Схема аппроксимации кромок лопасти

Результаты моделирования [4] для ОС НВ вертолета Ми-2 представлены на рисунке 4. Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы: ОС для многолопастной структуры НВ является импульсным. Каждый импульс имеет внутриимпульсную частотную модуляцию. При кусочно-линейной аппроксимации лопасти НВ, совершающей в процессе поворота МД, каждый импульс ОС состоит из примыкающих друг к другу импульсов с линейной частотной модуляцией, количество и параметры модуляции которых определяются числом и расположением линейных отрезков на кромке (рисунок 4, в, г). Длительности одиночных импульсов ОС винта обратно пропорциональны длинам линейных отрезков аппроксимации лопасти; частота повторения импульсов «вторичной» модуляции ОС винта, формируемых лопастями, определяется произведением  $N_L F_V$  числа лопастей  $N_L$  и частоты вращения винта  $F_V$  (рисунок 4, а); формы диаграмм обратного рассеяния кромок лопасти НВ имеют несколько главных лепестков (рисунок 4, в, г).



а – вещественная часть ОС; б – энергетический спектр ОС; в – ОС для приближающейся лопасти; г – ОС для удаляющейся лопасти

**Рисунок 4. – Сигнал, отраженный от НВ вертолета Ми-2, и его спектр**

Учет МД и изогнутых форм лопастей в модели ОС НВ позволяет более точно по сравнению с представлением лопасти прямыми линиями описать закон изменения амплитудно-фазовой структуры сигнала и, следовательно, повысить качество построения РЛИ НВ. Разработанная модель может использоваться для совершенствования алгоритма построения РЛИ НВ.

Во *второй главе* разработаны алгоритмы построения РЛИ винтов [3, 4, 9, 10], вращающихся в горизонтальной и вертикальной плоскостях, на основе ОСАА. Вначале рассмотрен алгоритм построения РЛИ горизонтального (несущего) винта (ГВ). Каналы ОСАА для ГВ с номерами  $n_{\theta_H} = \overline{0, N_{\theta_H} - 1}$ ,  $N_{\theta_H}$  – количество каналов синтеза, располагаются равномерно в пределах плоскости вращения винта по ходу вращения и связаны с  $N_{\theta_H}$  радиальными линиями, привязанными к центру  $C_{NV}$  и расставленными через интервал  $\Delta\theta_H$  (рисунок 5, а). На каждой радиальной линии обозначим  $N_{R_H}$  точек (рисунок 5, б), расположенных через интервал  $\Delta R_H$  в пределах длины лопасти от  $R_{\min_H}$  до  $R_{\max_H}$ . В качестве примера для вертикальных винтов на рисунке 6 представлены параметры каналов ОСАА для ТВ самолета. В каждом  $n_{\theta_H}$ -м канале ОСАА должна обеспечиваться компенсация доплеровских сдвигов фаз сигналов, отраженных от точечных отражателей. В основе этого лежит знание законов изменения радиальной дальности до каждого отражателя относительно фазового центра физической антенны РЛД. Дальность до  $(n_{\theta_H}, n_{R_H})$ -й точки отражения с учетом переключения канала ОСАА на приближение или удаление определяется через законы изменения координат  $x_{p(z)_{-n_{\theta_H}, n_{R_H}}}(t)$ ,  $y_{p(z)_{-n_{\theta_H}, n_{R_H}}}(t)$ ,  $z_{p(z)_{-n_{\theta_H}, n_{R_H}}}(t)$  обобщенным выражением

$$r_{n_{\theta\_H}, n_{R\_H}}(t) = \begin{cases} \sqrt{x_{p\_n_{\theta\_H}, n_{R\_H}}^2(t) + y_{p\_n_{\theta\_H}, n_{R\_H}}^2(t) + z_{p\_n_{\theta\_H}, n_{R\_H}}^2(t)} - \\ \text{работа на приближение;} \\ \sqrt{x_{z\_n_{\theta\_H}, n_{R\_H}}^2(t) + y_{z\_n_{\theta\_H}, n_{R\_H}}^2(t) + z_{z\_n_{\theta\_H}, n_{R\_H}}^2(t)} - \\ \text{работа на удаление.} \end{cases} \quad (3)$$

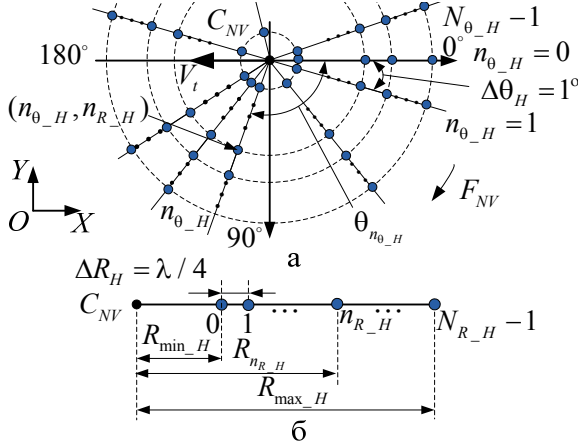


Рисунок 5. – Параметры каналов ОСАА для ГВ (вид сверху)

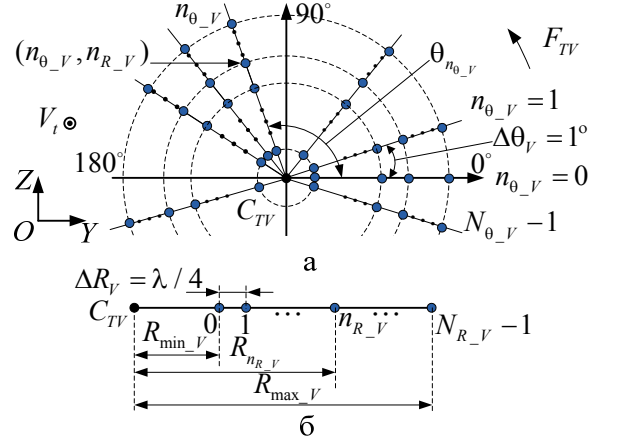


Рисунок 6. – Параметры каналов ОСАА для ТВ (вид спереди)

Причем законы изменения во времени координат  $(n_{\theta\_H}, n_{R\_H})$ -й точки анализа  $n_{\theta\_H}$ -го канала ОСАА для передней и задней кромок определяются использованием начальных координат центра вращения  $C_{NV}(x_{0\_NV}, y_{0\_NV}, z_{0\_NV})$ , скорости полета  $V_t$ , частоты вращения  $F_{NV}$ , расстояния  $R_{n_{R\_H}}$  от центра  $C_{NV}$  до точки анализа, углового положения  $n_{\theta\_H}$ -го канала ОСАА  $\theta_{n_{\theta\_H}}$ , ширины лопасти НВ  $b_{L\_NV}$  и с учетом направления вращения винта. Алгоритм формирования РЛИ ГВ на основе ОСАА в дискретном времени имеет вид

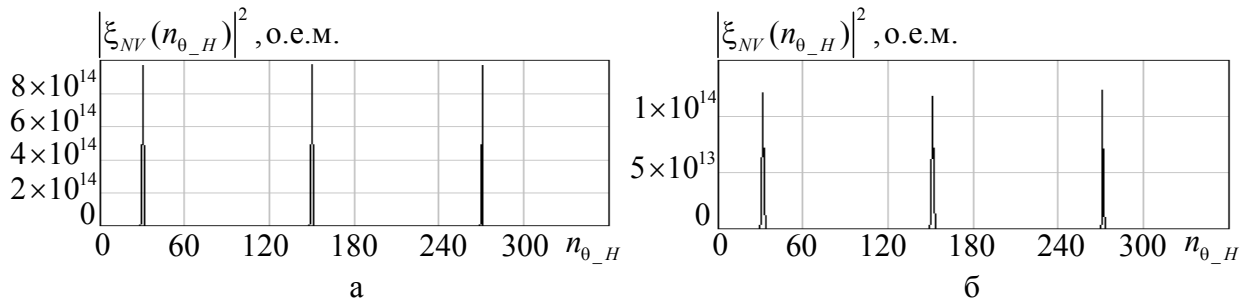
$$\xi_{NV}(n_{\theta\_H}) = \sum_{n_{R\_H}=0}^{N_{R\_H}-1} \sum_{j=0}^{N-1} U_{L\_NV}(jT_d) K_{n_{\theta\_H}, n_{R\_H}}(jT_d), \quad n_{\theta\_H} = \overline{0, N_{\theta\_H} - 1}, \quad (4)$$

где  $K_{n_{\theta\_H}, n_{R\_H}}(jT_d) = \exp(-i2kr_{n_{\theta\_H}, n_{R\_H}}(jT_d))$  –  $j$ -й отсчет опорной функции;  $U_{L\_NV}(jT_d)$  –  $j$ -й отсчет комплексной огибающей ОС для горизонтального (несущего) винта (ОС после компенсации мешающих отражений (МО) и сигнала, отраженного от корпуса ЛА);  $T_d = 1/F_d$  – период дискретизации;  $F_d$  – частота дискретизации;  $N$  – количество отсчетов в интервале синтеза  $T_{osa}$ .

РЛИ ГВ представляет собой совокупность квадратов модулей комплексных амплитуд с выходов каналов  $|\xi_{NV}(n_{\theta\_H})|^2$ ,  $n_{\theta\_H} = \overline{0, N_{\theta\_H} - 1}$  для предполагаемого направления вращения. Если направление вращения винта неизвестно, то ОСАА для построения РЛИ ГВ выполняется в двойном объеме –

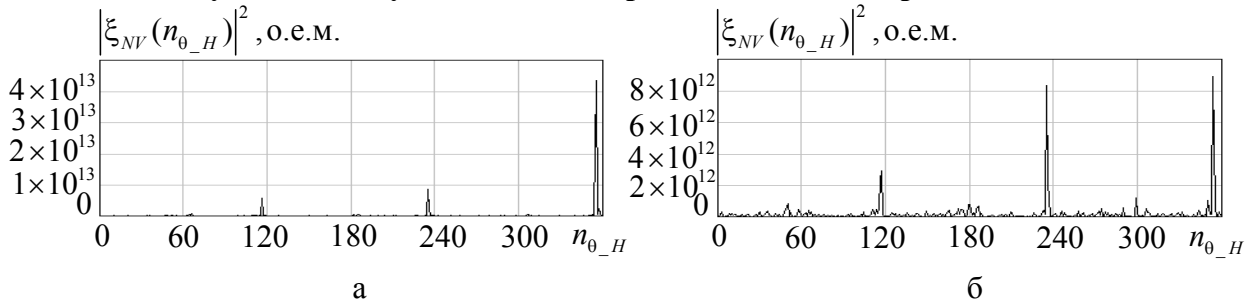
как для правостороннего, так и для левостороннего вращений. По аналогии с этим алгоритмом разработаны алгоритмы построения РЛИ РВ одновинтового вертолета и ТВ винтового самолета. Принципиальным отличием в этих алгоритмах является ориентация винта в пространстве – плоскость вращения РВ  $XOZ$ , а плоскость вращения ТВ  $YOZ$ . Для РВ и ТВ опорные функции в каналах ОСАА описываются на основе модели сигнала при представлении лопасти в виде одной прямой линии передней кромки. Таким образом, описанный алгоритм реализует ОСАА в соответствии с моделью сигнала НВ, лопасть которого представлена в виде двух линий – линии передней кромки и линии задней кромки. В алгоритме построения РЛИ НВ в качестве опорных функций в каналах ОСАА целесообразно использовать модель сигнала НВ [4], учитывающую МД и изгибы лопастей.

Результаты моделирования (рисунок 7) и экспериментального исследования (рисунок 8) (на этих рисунках о.е.м. – относительная единица мощности) для НВ вертолета Ми-2 показывают, что отношение «сигнал/помеха» в РЛИ НВ при учете МД и изгибов лопастей примерно на 8,45 дБ (моделирование) и 5,3 дБ (экспериментальное исследование) выше в РЛИ НВ при представлении лопастей в виде прямых линий без учета МД и изгибов. Результат получен при условиях моделирования:  $\Delta\theta_H = 1^\circ$  (360 каналов ОСАА),  $\Delta R_H = \lambda / 4$ , время синтеза  $T_{osa} = 0,243$  с.



**а – при учете МД и изгибов лопастей; б – без учета МД и изгибов лопастей**

**Рисунок 7. – Результаты моделирования для НВ вертолета Ми-2**



**а – при учете МД и изгибов лопастей; б – без учета МД и изгибов лопастей**

**Рисунок 8. – Результаты эксперимента для НВ вертолета Ми-2**

Путем моделирования получены РЛИ НВ и РВ вертолета Ми-2, а также ТВ самолета Ан-2. Проведен анализ влияния ошибок измерения дальности, параметров движения ЛА и частоты вращения винта на построение РЛИ винта и установлены допустимые ошибки измерения.

**Третья глава** посвящена разработке способа измерения частоты следования лопастей винта на основе свертки спектра «вторичной» модуляции (ССВМ) ОС винта [5]. При МХЗС ОС винта  $U_{L_V}(t)$  включает [2, 4, 5] последовательности импульсов «вторичной» модуляции от приближающихся (ПЛ)  $U_{PL_V}(t)$  и удаляющихся (УЛ)  $U_{UL_V}(t)$  лопастей, следующих с одинаковым периодом  $T_P = 1 / F_{LV}$ . Составляющие «вторичной» модуляции в левой части амплитудно-фазочастотного спектра (АФЧС) ОС винта обозначим как  $\xi_{-n}$ , а в правой части – как  $\xi_{+n}$ ,  $n = \overline{1, N_\xi}$ ,  $N_\xi$  – количество анализируемых спектральных составляющих. Из результатов исследования следуют важные свойства АФЧС «вторичной модуляции» ОС винтов, имеющих четное и нечетное количество лопастей: *первое* – разности фаз между соседними спектральными составляющими в каждой (правой или левой) части АФЧС комплексной огибающей ОС винта практически одинаковы; *второе* – фазы сверток в левой  $\xi_{-n}\xi_{-(n+1)}^*$  и правой  $\xi_{n+1}\xi_n^*$  частях АФЧС ОС для винта, имеющего нечетное количество лопастей, отличаются примерно на  $180^\circ$ , а для винта, имеющего четное количество лопастей, практически одинаковы. Свертка спектральных составляющих отдельно в правой и отдельно в левой частях спектра «вторичной» модуляции в спектральной области формируется следующим образом:

$$\text{для ОС ПЛ} \quad \xi_{\Sigma\_PL\_V} = \sum_{n=1}^{N_\xi} \xi_{n+1} \xi_n^*, \quad (5 \text{ а})$$

$$\text{для ОС УЛ} \quad \xi_{\Sigma\_UL\_V} = \sum_{n=1}^{N_\xi} \xi_{-n} \xi_{-(n+1)}^*. \quad (5 \text{ б})$$

Способ измерения частоты следования лопастей винта может быть реализован в многоканальном устройстве (МКУ) свертки спектра «вторичной» модуляции, в произвольном канале которого вычисляется ССВМ ОС винта для измеряемой частоты  $F_{LV\_izm}$ , устанавливаемой в диапазоне от  $F_{LV\_min}$  до  $F_{LV\_max}$  с шагом  $\Delta F$ . Измеренное значение частоты  $\hat{F}_{LV}$  отождествляется с частотой настройки канала  $F_{LV\_izm}$ , на выходе которого получен наибольший сигнал. При таком подходе ошибка измерения частоты следования лопастей винта лежит в диапазоне  $\pm 0,5\Delta F$ . Частота  $F_{LV\_izm}(n)$  для канала с номером  $n$  описывается выражением

$$F_{LV\_izm}(n) = F_{LV\_min} + n\Delta F, \quad n = \overline{0, N_F}, \quad N_F = ceil[(F_{LV\_max} - F_{LV\_min}) / \Delta F]. \quad (6)$$

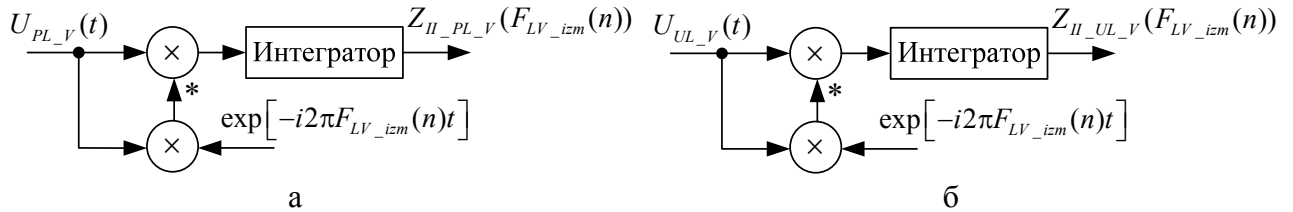
где  $N_F$  – количество каналов;  $ceil[]$  – операция округления с избытком.

Структурные схемы каналов МКУ ССВМ с номерами  $n$ , в которых реализуется ССВМ ОС УЛ и ПЛ винта для частоты  $F_{LV\_izm}(n)$  во временной

области, представлены на рисунке 9. По аналогии с выражениями (5 а) и (5 б) эти схемы обеспечивают формирование при времени накопления  $T_a$  во временной области сверток спектра «вторичной» модуляции ОС ПЛ и УЛ:

$$Z_{II\_PL\_V}(F_{LV\_izm}(n)) = \int_0^{T_a} U_{PL\_V}(t) U_{PL\_V}^*(t) \exp[i2\pi F_{LV\_izm}(n)t] dt, \quad (7 а)$$

$$Z_{II\_UL\_V}(F_{LV\_izm}(n)) = \int_0^{T_a} U_{UL\_V}(t) U_{UL\_V}^*(t) \exp[i2\pi F_{LV\_izm}(n)t] dt. \quad (7 б)$$



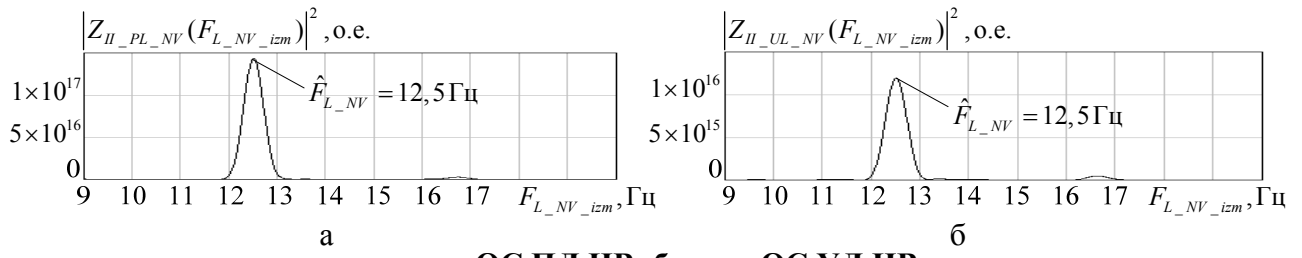
а – для ОС ПЛ винта; б – для ОС УЛ винта

Рисунок 9. – Структурная схема  $n$ -го канала МКУ ССВМ ОС винта

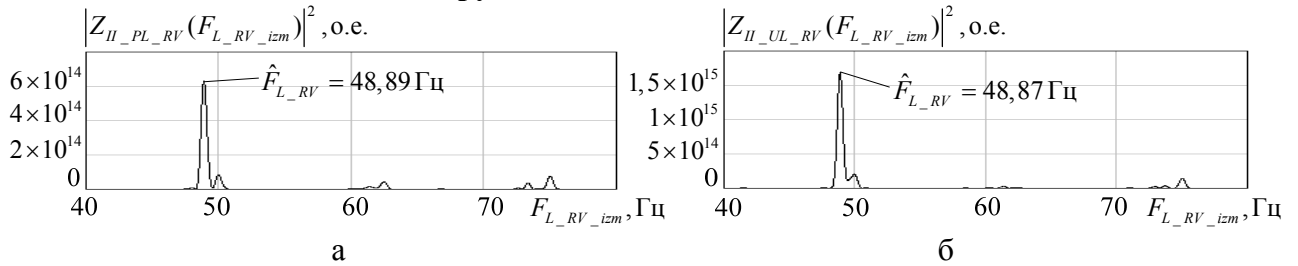
В этих схемах одновременно выполняется автоматическая компенсация доплеровской частоты сигнала, отраженного от корпуса (планера) ЛА, благодаря умножению сигналов ПЛ и УЛ на соответствующие комплексные сопряжения их копий, сдвинутые по частоте на измеряемую частоту. Для накопления сигналов свертки применяются узкополосные фильтры – интеграторы. Важным свойством способа является возможность определения признака четности числа лопастей винта.

В *четвертой главе* представлены результаты экспериментальных исследований алгоритмов построения РЛИ винтов и способа измерения частоты следования лопастей винта для вертолета Ми-2, самолетов Ан-2, Ан-2МС и Як-52. Обработке подвергались преобразованные сигналы, из которых путем режекции в спектральной области были удалены сигналы корпуса и МО. Рассмотрим только результаты экспериментальных исследований для вертолета Ми-2 и самолета Ан-2МС.

На рисунке 10 (для НВ) и рисунке 11 (для РВ) представлены зависимости квадратов модулей выходных сверток МКУ ССВМ от анализируемой частоты (при  $\Delta F = 0,01$  Гц и  $T_a = 2,73$  с, было использовано весовое окно Хэмминга). Из рисунков 10 и 11 оценка частоты следования лопастей НВ составила  $\hat{F}_{L\_NV} = 12,5$  Гц, оценка частоты следования лопастей РВ –  $\hat{F}_{L\_RV} = 48,87$  Гц. Модуль разности фаз между свертками  $Z_{II\_PL\_NV}(\hat{F}_{L\_NV})$  и  $Z_{II\_UL\_NV}(\hat{F}_{L\_NV})$  составил  $|\Delta\varphi_{Z\_NV}| = 217,95^\circ$  и, следовательно, НВ имеет нечетное число лопастей. Число лопастей РВ является четным, так как модуль разности фаз между свертками  $Z_{II\_PL\_RV}(\hat{F}_{L\_RV})$  и  $Z_{II\_UL\_RV}(\hat{F}_{L\_RV})$  составил  $|\Delta\varphi_{Z\_RV}| = 0,837^\circ$ .



а – для ОС ПЛ НВ; б – для ОС УЛ НВ  
**Рисунок 10. – Зависимости выходных сверток МКУ ССВМ ОС НВ вертолета Ми-2 от анализируемых частот следования лопастей**



а – для ОС ПЛ РВ; б – для ОС УЛ РВ  
**Рисунок 11. – Зависимости выходных сверток МКУ ССВМ ОС РВ вертолета Ми-2 от анализируемых частот следования лопастей**

Соответствующие варианты оценок частот вращения НВ  $F_{NV}$  и РВ  $F_{RV}$  представлены в таблице 1.

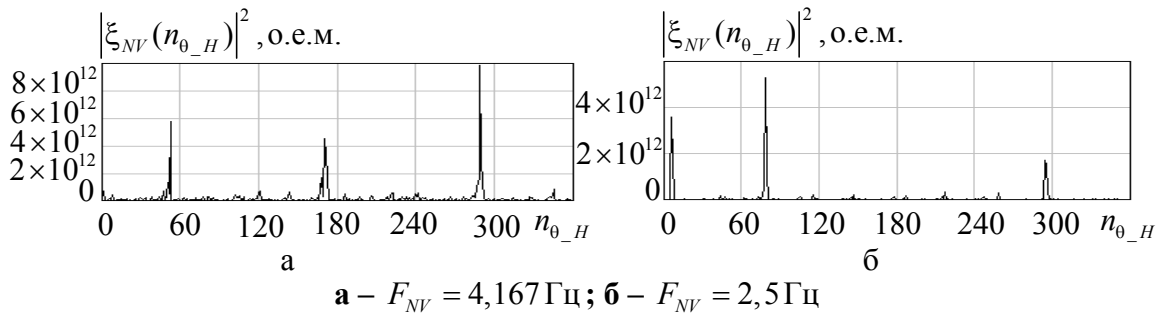
Таблица 1. – Варианты оценок частот вращения несущего и рулевого винтов

Число лопастей	2	3	4	5	6	7	8
$F_{NV}$ , Гц		4,167		2,5		1,786	
$F_{RV}$ , Гц	24,435		12,218				

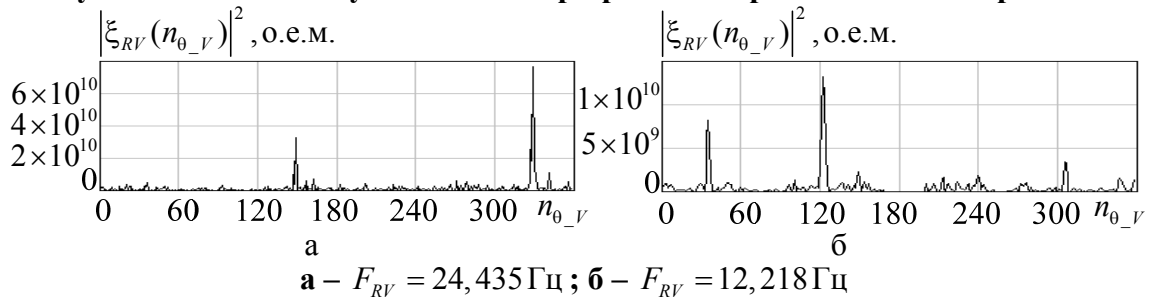
Частота вращения НВ должна лежать в пределах  $F_{NV} = 2,1...5$  Гц. Частота вращения винта также должна удовлетворять условию: линейная скорость концевой точки лопасти воздушного винта при вращении (не учитывая скорость движения ЛА) в полете лежит в пределах  $V_{KL} = 200...230$  м/с.

Результаты построения РЛИ НВ и РВ с возможными значениями частот вращения винта (таблицу 1) по алгоритмам [3] представлены на рисунках 12 и 13. *Параметры каналов ОСАА для построения РЛИ винтов ЛА:* 360 каналов ОСАА; время синтеза для НВ и РВ вертолета 0,243 с. Анализ результатов построения РЛИ винтов показывает, что при правильном сочетании (число лопастей, частота вращения) на РЛИ винта появляются высокие пики, следующие по угловому положению с одинаковыми интервалами и соответствующие положениям лопастей в начале синтеза апертуры (рисунки 12, а, 13, а). При неправильном сочетании получаются РЛИ с неправильными расположениями лопастей и низкими уровнями пиков (рисунки 12, б, 13, б). По РЛИ можно определить количество лопастей НВ  $N_{L_{NV}} = 3$  и РВ  $N_{L_{RV}} = 2$ , что соответствует винтам объекта исследований – вертолета Ми-2. По аналогии на рисунках 14, 15 представлены результаты измерения частоты следования лопастей и построения изображения для ТВ

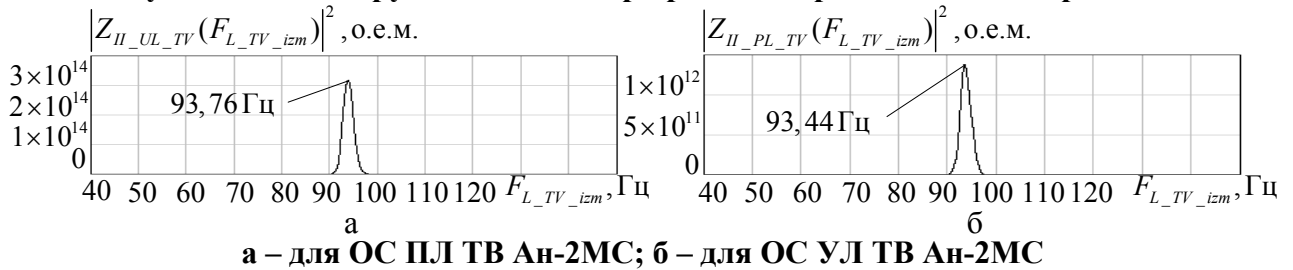
самолетов Ан-2МС с нечетным количеством лопастей. Его частота вращения составила  $F_{TV} = 18,75$  Гц при  $N_{L_{TV}} = 5$ .



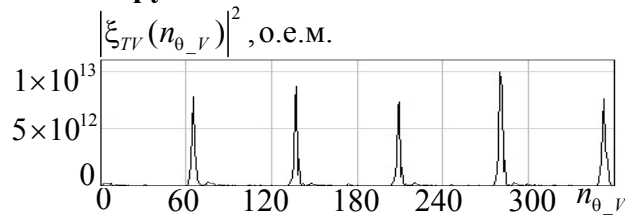
**Рисунок 12. – РЛИ несущего винта при разных вариантах частот вращения**



**Рисунок 13. – РЛИ рулевого винта при разных вариантах частот вращения**



**Рисунок 14. – Зависимости выходных сверток МКУ ССВМ ОС ТВ Ан-2МС от анализируемых частот следования лопастей**



**Рисунок 15. – РЛИ ТВ самолета Ан-2МС**

Результаты экспериментальных исследований показали следующее: способ измерения обеспечил получение оценки частот следования лопастей винтов с ошибками измерения, лежащими в пределах  $\pm 0,005$  Гц ( $\Delta F = 0,01$  Гц и  $T_a = 1,365$  с); признак четности (или нечетности) числа лопастей винта формировался устойчиво; полученные РЛИ винтов однозначно позволили определить количество их лопастей (3 лопасти у НВ Ми-2, 2 лопасти у РВ Ми-2, 4 лопасти у ТВ Ан-2, 5 лопастей у ТВ Ан-2МС, 3 лопасти у ТВ Як-52).

В **заключении** сформулированы основные научные результаты диссертации и рекомендации по их практическому использованию.

В **приложениях** показаны актуальности задачи мониторинга ПМВ в мирное и военное время, разработан облик РЛД с ОСАА [1, 7],



проанализировано негативное влияние сигнала корпуса на построение РЛИ НВ и сигнала НВ на построение РЛИ РВ и представлены алгоритм компенсации сигнала корпуса на основе обратного преобразования ОСАА для изображения корпуса ЛА [11, 13], результаты моделирования для ОС винтов типовых двухвинтовых ЛА, краткая характеристика некоторых современных вертолетов, результаты исследования способа измерения частоты следования лопастей винта для типовых двухвинтовых ЛА путем моделирования, краткое описание алгоритма построения РЛИ НВ на основе «title-wire» модели ОС винта, один из возможных алгоритмов измерения координат и параметров движения ЛА, результат экспериментальных исследований алгоритма построения РЛИ НВ с учетом МД и изгибов лопастей, а также акты внедрения.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

1. Разработаны математические модели сигналов, отраженных от винтов типовых маловысотных летательных аппаратов. Модели отличаются представлением каждой лопасти набором изотропных отражателей, расположенных на передней и задней кромках лопасти [2, 4]. Кромка лопасти может иметь вид прямой или кривой линии в зависимости от конкретного вида летательного аппарата. Учет маховых движений и изогнутых форм лопастей в модели сигнала, отраженного от несущего винта вертолета, позволяет более точно описать закон изменения фазовой структуры сигнала и, следовательно, повысить качество построения радиолокационного изображения несущего винта [4].

2. На основе полученных математических моделей сигналов, отраженных от винтов, разработаны алгоритмы построения радиолокационных изображений винтов на основе обращенного синтеза апертуры антенны [3–6, 9, 10], отличающиеся адаптацией к априорно неизвестным частотам следования лопастей винтов, координатам и радиальной скорости. Алгоритмы позволяют формировать радиолокационные изображения горизонтального и вертикального винтов летательных аппаратов. Структура радиолокационных изображений винтов является дискретной, как и структура спектра «вторичной модуляции» отраженных от летательных аппаратов сигналов, но имеет принципиальное отличие – радиолокационное изображение винта однозначно показывает количество лопастей для соответствующего винта. Учет маховых движений и изгибов лопастей в алгоритме построения изображений несущего винта позволил повысить уровень изображений лопастей примерно на 5...8 дБ по сравнению с алгоритмом без их учета.

3. Разработан способ измерения частоты следования лопастей винта на основе свертки спектра «вторичной» модуляции отраженного сигнала [5, 6].

По сравнению с известными [8, 12] разработанный способ наряду с выполнением основной функции устраняет негативное влияние на измерение быстрого изменения радиальной скорости летательного аппарата. Это свойство обеспечивает принципиальную возможность решения задач измерения параметров винтов летательного аппарата в радиолокационном датчике, для которого типовым условием наблюдения является быстрое изменение ракурса объекта наблюдения. Разработанный способ обеспечивает также существенное повышение отношения «сигнал винта/помеха» за счет когерентного накопления свертки, что приводит к соответствующему снижению ошибок измерения. Частота следования лопастей винта используется для определения признака класса летательных аппаратов («вертолет» или «самолет»), что позволяет уменьшить вычислительные затраты в радиолокационном датчике. Важным свойством способа является возможность определения признака четности числа лопастей винта. Признак четности используется в алгоритмах построения изображений винтов для уменьшения вариантов числа лопастей.

4. Результаты моделирования [2–4] и экспериментальных [5, 6] исследований алгоритмов построения радиолокационных изображений и способа измерения частоты следования лопастей винта для типовых маловысотных летательных аппаратов подтвердили практическую реализуемость разработанных способа и алгоритмов. Результаты экспериментальных исследований подтвердили правильность модели отраженного сигнала несущего винта вертолета, учитывающей маховые движения и изгибы лопастей, а также справедливость теоретических исследований способа измерения частоты следования лопастей и алгоритмов построения изображений горизонтального и вертикального винтов на основе обращенного синтеза апертуры антенны. Информация о частоте вращения, ориентации и количестве лопастей каждого из винтов позволяет выполнить распознавание обнаруженных маловысотных летательных аппаратов. Для внесения определенности в возможность реализации разработанных алгоритмов разработан облик датчика [1, 7], в котором обеспечивается формирование принятого сигнала, который подвергается адаптивной обработке для построения радиолокационных изображений винтов летательных аппаратов на основе обращенного синтеза апертуры антенны.

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Полученные результаты [1–7, 9–11, 13] целесообразно использовать для создания средств мониторинга предельно малых высот в приграничных районах (противодействие наркотрафику, контрабанде и пр.) и на подступах к военным объектам (обеспечение противовоздушной обороны).

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Гейстер, С. Р. Облик радиолокационного датчика обнаружения и распознавания низколетящих целей, использующего обращенный синтез апертуры антенны / С. Р. Гейстер, Т. Т. Нгуен // Наука и военная безопасность. – 2017. – № 1 (51). – С. 22–27.

2. Гейстер, С. Р. Математические модели радиолокационного сигнала, отраженного от винта вертолета, в приложении к обращенному синтезу апертуры / С. Р. Гейстер, Т. Т. Нгуен // Наука и военная безопасность. – 2018. – № 3 (57). – С. 34–40.

3. Гейстер, С. Р. Алгоритмы построения радиолокационного изображения винтов в горизонтальной и вертикальной плоскостях летательного аппарата в радиолокационном датчике с обращенным синтезом апертуры антенны / С. Р. Гейстер, Т. Т. Нгуен // Доклады БГУИР. – 2018. – № 5 (115). – С. 92–98.

4. Гейстер, С. Р. Маховые движения и изгибы лопастей несущего винта вертолета в модели отраженного сигнала / С. Р. Гейстер, Т. Т. Нгуен // Наука и военная безопасность. – 2018. – № 4 (58). – С. 37–42.

5. Гейстер, С. Р. Способ измерения частот следования лопастей винтов летательного аппарата на основе свертки спектра «вторичной» модуляции / С. Р. Гейстер, Т. Т. Нгуен // Доклады БГУИР. – 2019. – № 1 (119). – С. 68–74.

6. Гейстер, С. Р. Экспериментальные исследования алгоритмов построения радиолокационных изображений винтов и способа измерения частоты следования лопастей / С. Р. Гейстер, Т. Т. Нгуен // Доклады БГУИР. – 2019. – № 4 (122). – С. 72–78.

### Статьи в материалах научных конференций

7. Нгуен, Т. Т. Структура датчика формирования изображения летательного аппарата при обращенном синтезе апертуры антенны / Т. Т. Нгуен // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: материалы 21-го Междунар. молодежного форума, Харьков, Украина, 25–27 апреля 2017 г.: в 3 т. / Харьковский нац. ун-т радиоэлектроники. – Харьков, 2017. – Т. 3. – С. 79–80.

8. Нгуен, Т. Т. Метод определения частоты вращения винта при разработке алгоритма построения изображения винта / Т. Т. Нгуен // Материалы 53-й науч. конф. аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Минск, Беларусь, 7 мая 2017 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2017. – С. 62.

9. Нгуен, Т. Т. Особенности алгоритма построения изображения винта, вращающегося в горизонтальной плоскости / Т. Т. Нгуен // Материалы

53-йнауч. конф. аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Минск, Беларусь, 7 мая 2017 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2017. – С. 63.

10. Нгуен, Т. Т. Особенности алгоритма построения изображения винта, вращающегося в вертикальной плоскости / Т. Т. Нгуен, Гейстер С. Р. // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций: материалы 13-й Междунар. молодежной науч.-техн. конф. РТ-2017, Севастополь, Россия, 20–24 ноября 2017 г. / Севастопольский гос. ун-т. – Севастополь, 2017. – С. 41.

11. Нгуен, Т. Т. Особенности метода компенсации сигнала, отраженного от корпуса, при построении изображений винтов летательных аппаратов / Т. Т. Нгуен // Материалы 54-й науч. конф. аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Минск, Беларусь, 23–27 апреля 2018 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2018. – С. 83.

12. Нгуен, Т. Т. Метод определения радиуса винта летательного аппарата в радиолокационном датчике методом оконного преобразования Фурье / Т. Т. Нгуен // Материалы 54-й науч. конф. аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Минск, Беларусь, 23–27 апреля 2018 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2018. – С. 84–85.

13. Гейстер, С. Р. Некоторые особенности алгоритма построения изображения корпуса летательного аппарата / С. Р. Гейстер, Т. Т. Нгуен // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций: материалы 14-й Междунар. молодежной науч.-техн. конф. РТ-2018, Севастополь, Россия, 22–26 октября 2018 г. / Севастопольский гос. ун-т. – Севастополь, 2018. – С. 33.



## РЭЗІЮМЭ

Нгуен Тьен Тхай

### **Адаптыўнае фарміраванне малюнкаў вінтоў лятальных апаратаў ў датчыку са звернутым сінтэзам апертуры антэны**

*Ключавыя словы:* радыёлакацыйны датчык, звернуты сінтэз апертуры антэны, маніторынг гранічна малых вышынь, распазнаванне, радыёлакацыйны малюнак шрубы.

*Мэта работы* складаецца ў распрацоўцы спосабаў і алгарытмаў да адаптыўнай апрацоўкі прынятага сігнала ў радыёлакацыйным датчыку са звернутым сінтэзам апертуры антэны, якія забяспечваюць пабудову радыёлакацыйных малюнкаў вінтоў для распазнання класа малавышынных лятальных апаратаў.

*Метадамі даследавання* з'яўляюцца матэматычны аналіз, камп'ютарнае мадэляванне, эксперыментальнае даследаванне.

*Атрыманыя вынікі:*

аблічча радыёлакацыйнага датчыка, які забяспечвае маніторынг лімітава малых вышынь у лакальнай вобласці;

матэматычная мадэль сігнала, адлюстраванага ад апорнай шрубы шрубалету, адрозная ўлікам маховых рухаў і выгібаў лопасцяў, што дазваляе больш дакладна апісаць закон змены амплітудна-фазавай структуры сігнала;

алгарытмы пабудовы малюнкаў шрубаў лятальных апаратаў, адрозныя выкарыстаннем у каналах звернутага сінтэзу апертуры мадэлі сігнала апорнай шрубы, якая ўлічвае махавы рух і выгібы лопасцяў;

спосаб вымярэння частаты прытрымлівання лопастей шрубы на аснове скруткі спектру «другаснай» мадуляцыі адлюстраванага сігнала, які забяспечвае выключэнне негатыўнага ўплыву на вымярэнне хуткай змены радыяльнай хуткасці лятальнага апарата і падвышэнне адносін «сігнал шрубы / перашкода» за кошт кагерэнтнага назапашвання скруткі, што прыводзіць да адпаведнага зніжэння памылак вымярэння; важнай уласцівасцю спосабу з'яўляецца вызначэнне прыкметы цотнасці (няцотнасці) колькасці лопастей шрубы;

вынікі эксперыментальных даследаванняў алгарытмаў пабудовы радыёлакацыйных малюнкаў шрубаў і спосабу вымярэння частаты прытрымлівання лопастей шрубы, якія пацвярджаюць іх працаздольнасць і практычную рэалізацыю.

*Вобласць ужывання:* рэкамендуецца выкарыстанне атрыманых вынікаў для стварэння сучасных радыёлакацыйных сістэм, якія забяспечваюць кантроль паветранай прасторы на лімітава малых вышынях, а таксама для мадэрнізацыі існуючых радыёлакацыйных сістэм назірання.

## РЕЗЮМЕ

Нгуен Тьен Тхай

### **Адаптивное формирование изображений винтов летательных аппаратов в датчике с обращенным синтезом апертуры антенны**

*Ключевые слова:* радиолокационный датчик, обращенный синтез апертуры антенны, мониторинг предельно малых высот, распознавание, радиолокационное изображение винта.

*Цель работы* состоит в разработке способов и алгоритмов к адаптивной обработке принятого сигнала в радиолокационном датчике с обращенным синтезом апертуры антенны, обеспечивающих построение радиолокационных изображений винтов для распознавания класса маловысотных летательных аппаратов.

*Методами исследования* являются математический анализ, компьютерное моделирование, экспериментальное исследование.

*Полученные результаты:*

облик радиолокационного датчика, обеспечивающего мониторинг предельно малых высот в локальной области;

математическая модель сигнала, отраженного от несущего винта вертолета, отличающаяся учетом маховых движений и изгибов лопастей, что позволяет более точно описать закон изменения амплитудно-фазовой структуры сигнала;

алгоритмы построения изображений винтов летательных аппаратов, отличающиеся использованием в каналах обращенного синтеза апертуры модели сигнала несущего винта, учитывающей маховые движения и изгибы лопастей;

способ измерения частоты следования лопастей винта на основе свертки спектра «вторичной» модуляции отраженного сигнала, обеспечивающий устранение негативного влияния на измерение быстрого изменения радиальной скорости летательного аппарата и повышение отношения «сигнал винта/помеха» за счет когерентного накопления свертки, что приводит к соответствующему снижению ошибок измерения; важным свойством способа является определение признака четности (нечетности) числа лопастей винта;

результаты экспериментальных исследований алгоритмов построения радиолокационных изображений винтов и способа измерения частоты следования лопастей винта, подтверждающие их работоспособность и практическую реализуемость.

*Область применения:* рекомендуется использование полученных результатов для создания современных радиолокационных систем, обеспечивающих контроль воздушного пространства на предельно малых высотах, а также для модернизации существующих радиолокационных систем наблюдения.

## RESUME

Nguyen Tien Thai

### **Adaptive formation of aerial vehicles propellers images in a sensor with inverse synthesis of antenna aperture**

*Keywords:* radar sensor, inverse synthesis of antenna aperture, monitoring of extremely low altitudes, recognition, radar image of the propeller.

*The aim* is to develop new methods and algorithms for adaptive processing of received signal in a radar sensor with inverse synthesis of antenna aperture, providing the construction of radar images of propellers for recognition of the class of low-altitude aerial vehicles.

*Research methods:* mathematical analysis, computer modeling, experimental research.

*The obtained results:*

aspect of the radar sensor, which provides monitoring of extremely small heights in the local area;

mathematical model of the signal reflected from the helicopter main rotor, distinguished by the taking account of the flapping movements and bends of the blades, which makes it possible to more accurately describe the law of variation of the amplitude-phase structure of the signal;

algorithms for constructing the images of the aerial vehicles propellers, which differ in using the model of the main rotor signal, taking into account the flapping movements and bends of the blades, in channels of the inverse synthesis of aperture;

measurement method for the repetition frequency of the blades based on the convolution of the «secondary» modulation spectrum of the reflected signal, providing elimination of the negative impact of the rapid change in the radial velocity of the aerial vehicle on the measurement and significant increase of the ratio «signal of propeller / interference» due to convolution coherent accumulation, which leads to decreasing of measurement errors of the desired frequency; an important property of the method is determining of the sign of the evenness (oddness) of the number of propeller blades;

results of experimental studies of algorithms for constructing radar images of propellers and the measurement method for the repetition frequency of the blades, confirming their performance and practical feasibility.

*Application field:* it's recommended to use the obtained results for creation of modern radar systems, that provide control of airspace at extremely low altitudes, as well as for the modernization of existing radar monitoring system.

*Научное издание*

**Нгуен Тьен Тхай**

**АДАПТИВНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВИНТОВ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В ДАТЧИКЕ С ОБРАЩЕННЫМ  
СИНТЕЗОМ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

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

---

Подписано в печать хх.хх.2019.	Формат 60×84 <sup>1</sup> / <sub>16</sub> .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л.
Уч.-изд. л.	Тираж 60 экз.	Заказ

---

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