

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОЕННАЯ АКАДЕМИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ»**

УДК 621.396.96

**СВИНАРСКИЙ  
Мечислав Витальевич**

**ОДНОШАГОВОЕ РАДИОЛОКАЦИОННОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ С  
АДАПТАЦИЕЙ К УГЛАМ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ  
НАБЛЮДАЕМОГО ОБЪЕКТА МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО**

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

по специальности 05.12.14 – радиолокация и радионавигация

Минск 2020

Научная работа выполнена в учреждении образования «Военная академия Республики Беларусь».

Научный руководитель

**Ярмолик Сергей Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизирующей радиолокации и приемо-передающих устройств учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь».

Официальные оппоненты:

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

**Шалыпин Сергей Валентинович**, кандидат технических наук, доцент, директор общества с ограниченной ответственностью «Научно-производственная компания САМЕРА».

Оппонирующая организация

Открытое акционерное общество «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации».

Защита состоится «17» декабря 2020 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 «    » ноября 2020 г.

Ученый секретарь

совета по защите диссертаций Д 02.15.02  
кандидат технических наук, доцент

Т.А. Пулко

## **ВВЕДЕНИЕ**

Решению задачи радиолокационного распознавания (РЛР) посвящено обширное число публикаций. При этом известные устройства РЛР объектов в ряде практических случаев характеризуются относительно низкой эффективностью, обусловленной изменяющимися условиями наблюдения. Данное обстоятельство приводит к трагическим событиям «случайно» сбитых пассажирских самолетов, число жертв которых достигает более 1000 человек. Так 8 января 2020 г. иранской системой противовоздушной обороны был сбит пассажирский Boeing-737, принятый за крылатую ракету.

Одним из перспективных способов повышения эффективности принимаемых решений о классе объекта является адаптация устройства РЛР к изменяющимся условиям наблюдения. В процессе перемещения аэродинамического объекта постоянно изменяются углы его пространственной ориентации относительно радиолокатора. Отмеченный факт обуславливает необходимость решения задачи адаптации устройства РЛР к текущим углам пространственной ориентации (УПО) наблюдаемого объекта при принятии решения о его классе. На практике наибольшее распространение при адаптации устройств РЛР к УПО объекта получил метод максимального правдоподобия. Следует отметить, что использование максимально правдоподобных оценок УПО объекта при решении задачи РЛР, характеризуется низкой эффективностью. Важным вопросом при решении задачи РЛР является формирование априорного банка данных эталонных портретов, соответствующих используемому диапазону изменения УПО объекта. Известные способы формирования банка данных, позволяющие обеспечить эффективное принятие решения о классе объекта, характеризуются избыточностью хранимых эталонных портретов.

Настоящая диссертация посвящена разработке одношагового устройства РЛР, адаптивного к УПО объекта, его анализу и экспериментальному исследованию. Для обеспечения требуемых показателей качества разрабатываемого устройства РЛР целесообразно формировать априорный банк данных с минимально необходимым количеством эталонных портретов.

### **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

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

Тема диссертации включена в утвержденные планы научной работы учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь» и соответствует Перечню перспективных направлений диссертационных исследований Вооруженных Сил Республики Беларусь в области анализа процессов обнаружения, распознавания (различения и классификации), разрешения сигналов (помех), измерения их параметров и разработки предложений по их оптимизации (п. 289). Содержание диссертационной работы

соответствует Перечню приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016-2020 годы в области промышленных и строительных технологий и производстве (п. 3), национальной безопасности и обороноспособности, защите от чрезвычайных ситуаций (п. 9).

Результаты научных исследований были использованы при модернизации комплекта программного обеспечения обработки радиолокационных сигналов и информации «RCSW V2» оптико-электронного и радиолокационного комплекса контроля воздушной и наземной обстановки «ZORKI», о чем имеется соответствующий акт о практическом внедрении.

### **Цель и задачи исследования**

Цель исследования – повышение эффективности функционирования одношаговых устройств радиолокационного распознавания класса наблюдаемого объекта.

Задачи исследования:

1. Провести аналитический обзор публикаций, посвященных решению задачи радиолокационного распознавания. Определить основные причины низкой эффективности функционирования известных устройств радиолокационного распознавания. Рассмотреть возможность использования адаптации к углам пространственной ориентации объекта в интересах повышения эффективности принятия решений о его классе.

2. Провести статистический синтез оптимального одношагового устройства радиолокационного распознавания, адаптивного к пространственной ориентации наблюдаемого объекта. Рассмотреть возможность перехода от разработанного оптимального устройства к квазиоптимальному одношаговому устройству радиолокационного распознавания, адаптивному к пространственной ориентации наблюдаемого объекта.

3. Провести сопоставительный анализ эффективности функционирования разработанного устройства радиолокационного распознавания, адаптивного к углам пространственной ориентации объекта, с наиболее распространенным адаптивным устройством радиолокационного распознавания.

4. Разработать методику уменьшения количества эталонных радиолокационных портретов, хранимых в банке данных устройства распознавания, с учетом анализируемого диапазона изменения углов пространственной ориентации распознаваемых объектов. Провести оценку эффективности разработанной методики.

Объект исследования – одношаговые устройства радиолокационного распознавания класса наблюдаемого аэродинамического объекта.

Предмет исследования – способы адаптации одношагового устройства распознавания к изменяющимся углам пространственной ориентации объекта.

## Научная новизна

Научная новизна полученных результатов заключается в:

- разработке способа адаптации одношагового устройства радиолокационного распознавания к углам пространственной ориентации наблюдаемого объекта, *отличающегося* использованием для аппроксимации закона распределения углов пространственной ориентации численного метода Монте-Карло, что *позволило* улучшить показатели качества принимаемых решений о классе наблюдаемого объекта;

- разработке методики уменьшения количества хранимых эталонных портретов в результирующем банке данных устройства распознавания, соответствующих углам пространственной ориентации аэродинамических объектов, *отличающейся* учетом допустимой величины углового рассогласования между наблюдаемым и эталонными радиолокационными портретами, что *позволило* уменьшить количество хранимых эталонных портретов.

## Положения, выносимые на защиту

1. Способ адаптации одношагового устройства распознавания класса радиолокационного объекта к изменяющимся углам его пространственной ориентации, *отличающийся* использованием результата аппроксимации плотности вероятности оценок анализируемых углов численным методом Монте-Карло, что *позволило* повысить вероятность правильного распознавания по сравнению с устройством радиолокационного распознавания, использующим для адаптации максимально правдоподобные оценки углов пространственной ориентации объекта (применение предложенного способа адаптации для дальномерных портретов объектов 3 классов с разрешающей способностью по дальности 2 м при отношении сигнал-шум на выходе фильтра сжатия от 1 дБ до 15 дБ, позволило повысить вероятности правильного распознавания для классов: «Крылатая ракета» от 1% до 15%, «Истребитель» от 2% до 18%, «Бомбардировщик» от 15% до 35%).

2. Методика уменьшения количества эталонных портретов, хранимых в результирующем банке данных устройства распознавания, *отличающаяся* использованием неравномерного шага изменения углов пространственной ориентации объектов, обусловленного допустимым снижением вероятности правильного распознавания для заданного отношения сигнал-шум, что *позволило* сократить количество хранимых эталонных портретов по сравнению со случаем равномерного шага изменения углов пространственной ориентации объектов (использование неравномерного шага изменения угла курса объектов при составлении набора дальномерных портретов объектов 3 классов с разрешающей способностью по дальности 2 м, при допустимом снижении вероятности правильного распознавания не более 3% для отношения сигнал-шум на выходе

фильтра сжатия 5 дБ, позволило уменьшить количество эталонных портретов для классов: «Крылатая ракета» до 45%, «Истребитель» до 13%, «Бомбардировщик» до 4%, по сравнению с использованием равномерного шага изменения угла курса через 1 градус).

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

Все основные результаты диссертационных исследований получены соискателем лично. Основным соавтором публикаций является научный руководитель – кандидат технических наук, доцент Ярмолик С. Н., который определял цели, ставил задачи исследований, принимал участие в выборе методов исследований и обсуждении результатов. Совместно с Ярмоликом С. Н. и Солонаром А. С. разработана методика определения углов пространственной ориентации объекта, наблюдаемого в системе координат линии визирования радиолокатора. Вклад Храменкова А. С., Зайко Е. В. и Леоновича А. С. в совместно опубликованных работах заключался в анализе и описании результатов.

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

Основные результаты диссертации докладывались на: Международной научно-практической конференции «XI, XII, XIII Машеровские чтения» (г. Витебск, 2017, 2018, 2019); Международной научной конференции «ИТС 2017, 2018, 2019» (г. Минск, 2017, 2018, 2019); XXI, XXII Республиканской научной конференции «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях» (г. Гомель, 2018, 2019); II Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития авиации» (г. Минск, 2018); VIII, IX Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации» (г. Минск, 2018, 2019); Международной военно-научной конференции «Проблемы обеспечения военной безопасности государства в современных условиях» (г. Минск, 2019); 8-ой Международной научной конференции по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения «MILEX.INNOVATIONS – 2019» (г. Минск, 2019).

### **Опубликование результатов диссертации**

Основные результаты научных исследований по теме диссертации опубликованы в 23 печатных работах: 10 статьях, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (5,5 авторских листа), 3 тезисах докладов и 10 материалов конференций.

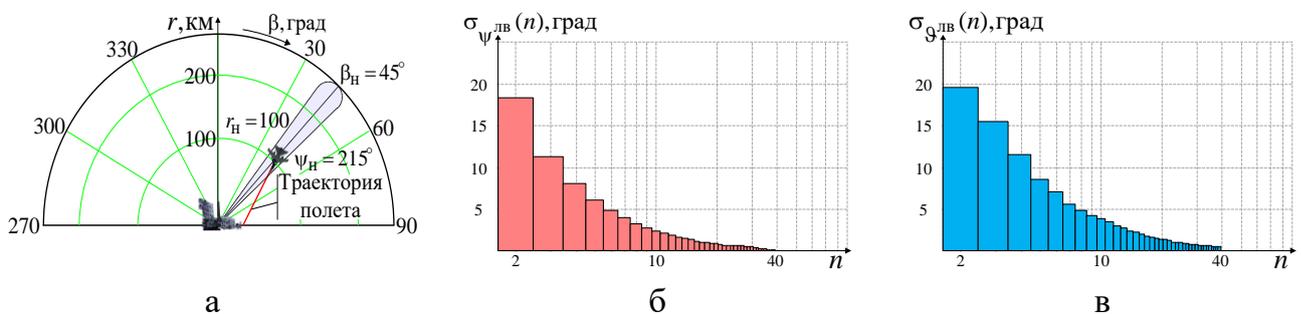
## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и пяти приложений. Общий объем диссертации составляет 177 страниц из них 130 страниц основного текста, 5 приложений на 33 страницах, 72 рисунка и 9 таблиц, список использованных источников состоит из 132 наименований на 11 страницах, список авторских публикаций содержит 23 наименования на 3 страницах.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В **первой главе** диссертации проведен анализ работ, посвященных вопросу РЛР классов наблюдаемых объектов. Для решения задачи РЛР в качестве классификационных признаков широко используются радиолокационные портреты (РЛП) объектов. При этом известно, что наибольшее влияние на вид и параметры анализируемого РЛП оказывает пространственная ориентация объекта, наблюдаемого в системе координат линии визирования (ЛВ) радиолокатора [1]. Пространственная ориентация объекта характеризовалась совокупностью трех углов ( $\Theta^{ЛВ} = \|\psi^{ЛВ} \quad \vartheta^{ЛВ} \quad \gamma^{ЛВ}\|^T$ ): курса ( $\psi^{ЛВ}$ ), тангажа ( $\vartheta^{ЛВ}$ ) и крена ( $\gamma^{ЛВ}$ ) [2].

На практике наиболее распространенным является устройство РЛР, использующее для адаптации максимально правдоподобные оценки УПО объекта [7]. При этом формирование максимально правдоподобных оценок УПО объекта неизбежно связано с ошибками их определения. Методом математического моделирования проведен анализ влияния ошибок оценивания углов курса и тангажа объекта на качество принимаемых решений о его классе. На рисунке 1, а представлен фрагмент траектории полета объекта (где  $r_H$  – начальная дальность,  $\beta_H$  – начальный азимут,  $\psi_H$  – начальный угол курса).



**а – траектория полета; б – СКО ошибок определения угла курса объекта;  
в – СКО ошибок определения угла тангажа объекта**

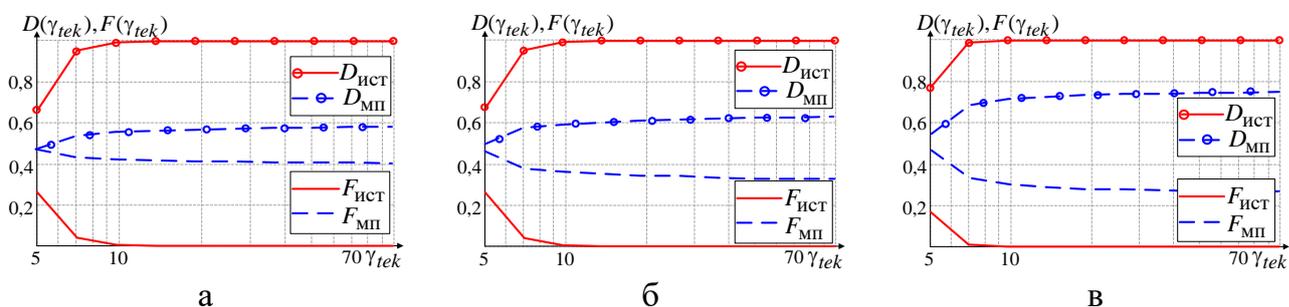
**Рисунок 1. – Ошибки определения углов пространственной ориентации наблюдаемого объекта в процессе его прямолинейного полета**

Скорость объекта равнялась 1100 км/ч. В качестве источника радиолокационной информации выступал трехкоординатный радиолокатор кругового обзора с периодом обзора  $\Delta t = 10$  с. Количество контактов с объектом

( $n = \overline{1, N}$ ) равнялось  $N = 40$ . При моделировании использовались следующие значения среднеквадратического отклонения (СКО) ошибок измерения сферических координат объекта: дальности  $\sigma_r = 300$  м, азимута  $\sigma_\beta = 0,25$  град, угла места  $\sigma_\varepsilon = 0,3$  град. Результаты оценивания СКО ошибок определения углов курса ( $\sigma_{\psi_{\text{ЛВ}}}(n)$ ) и тангажа ( $\sigma_{\theta_{\text{ЛВ}}}(n)$ ) объекта представлены на рисунке 1, б, в.

Анализ представленных результатов позволяет утверждать, что ошибки определения УПО наблюдаемого объекта при его полете по прямолинейной траектории с увеличением числа контактов уменьшаются, а на начальных контактах с объектом составляют десятки градусов [3].

Распознавание проводилось по дальномерным РЛП (ДРЛП) для объектов трех классов: «Крылатая ракета», «Истребитель», «Бомбардировщик». В качестве показателей эффективности использовались характеристики распознавания, представляющие собой зависимость условных вероятностей правильного ( $D$ ) и ложного ( $F$ ) распознавания класса наблюдаемого объекта от отношения сигнал-шум ( $\gamma_{\text{тек}}$ ). На рисунке 2 представлены характеристики распознавания, усредненные по ансамблю анализируемых классов для различных контактов с наблюдаемым объектом, применительно для двух случаев: 1) в качестве эталонных портретов в устройстве РЛР использовались ДРЛП, соответствующие истинному значению УПО объекта. Данный подход позволил оценить потенциально достижимые показатели качества устройства РЛР ( $D_{\text{ист}}$ ,  $F_{\text{ист}}$ ); 2) в качестве эталонных портретов в устройстве РЛР использовались ДРЛП анализируемых классов объектов, соответствующие максимально правдоподобным оценкам углов курса и тангажа объекта. Данный подход позволил оценить показатели качества наиболее распространенного устройства РЛР, адаптивного к УПО наблюдаемого объекта ( $D_{\text{МП}}$ ,  $F_{\text{МП}}$ ).



а – 3-й контакт; б – 6-й контакт; в – 10-й контакт

Рисунок 2. – Характеристики распознавания, усредненные по ансамблю классов

Полученные результаты иллюстрируют низкую эффективность функционирования наиболее распространенного устройства РЛР, адаптивного к УПО объекта, подтверждая необходимость его совершенствования.

Во второй главе диссертации по критерию минимума апостериорного риска синтезировано оптимальное устройство совместного измерения УПО

наблюдаемого объекта и распознавания его класса [6]. В результате синтеза оптимального устройства совместного измерения-распознавания получено двухфункциональное решающее правило. На первом этапе минимизации апостериорного риска формируется оптимальная оценка УПО объекта ( $\hat{\Theta}^{\text{ЛВ}}$ ):

$$\hat{\Theta}^{\text{ЛВ}} = \sum_{g=1}^M P(A_g | \mathbf{f}) \hat{\Theta}^{\text{ЛВ}}(A_g), \quad (1)$$

где  $M$  – количество распознаваемых классов;  $P(A_g | \mathbf{f})$  – апостериорная вероятность наблюдения объекта  $g$ -го класса;  $\mathbf{f}$  – реализация принятого сигнала;  $\hat{\Theta}^{\text{ЛВ}}(A_g)$  – оценка УПО, условная по  $g$ -му классу объекта.

Второй этап минимизации апостериорного риска производился с учетом сформированной оптимальной оценки УПО объекта (1). Решение о классе наблюдаемого объекта принималось в соответствии с выражением:

$$\text{если } \bar{R}_{ps}(A_k^*, \hat{\Theta}^{\text{ЛВ}}, \mathbf{f}) < \bar{R}_{ps}(A_l^*, \hat{\Theta}^{\text{ЛВ}}, \mathbf{f}), \quad l, k = \overline{1, M}, \quad l \neq k, \text{ то } A_k^*, \quad (2)$$

где  $\bar{R}_{ps}(A_k^*, \hat{\Theta}^{\text{ЛВ}}, \mathbf{f})$  – апостериорный риск принятия решения в пользу объекта  $k$ -го класса;  $A_k^*$  – результат принятия решения в пользу объекта  $k$ -го класса.

Адаптация отношения правдоподобия к УПО объекта осуществлялась в соответствии с выражением:

$$\Lambda(\mathbf{f} | A_g) = \int_{\Gamma_{\Theta^{\text{ЛВ}}}} p(\Theta^{\text{ЛВ}} | A_g) \Lambda(\mathbf{f} | \Theta^{\text{ЛВ}}, A_g) d(\Theta^{\text{ЛВ}}), \quad g = \overline{1, M}, \quad (3)$$

где  $\Gamma_{\Theta^{\text{ЛВ}}}$  – область определения УПО объекта;  $p(\Theta^{\text{ЛВ}} | A_g)$  – априорная плотность вероятности УПО, условная  $g$ -му классу объекта;  $\Lambda(\mathbf{f} | \Theta^{\text{ЛВ}}, A_g)$  – отношение правдоподобия, условное по УПО объекта  $g$ -го класса.

В интересах возможности обеспечения практической реализации синтезированного оптимального устройства совместного измерения-распознавания, осуществлен переход к квазиоптимальному устройству распознавания, адаптивному к УПО объекта [23]. С этой целью использованы следующие ограничения: в результате первичной обработки выделен РЛП ( $\xi_{n+1}$ ) наблюдаемого объекта и произведена оценка сферических координат его центра масс, представляющих собой вектор наблюдения ( $\hat{\Theta}_{n+1} = \|\hat{r}_{n+1} \quad \hat{\beta}_{n+1} \quad \hat{\varepsilon}_{n+1}\|^T$ ); в результате вторичной обработки сформирована оценка вектора состояния координат и параметров перемещения центра масс объекта ( $\hat{\mathbf{a}}_{n+1} = \|\hat{x} \quad \hat{V}_x \quad \hat{a}_x \quad \hat{y} \quad \hat{V}_y \quad \hat{a}_y \quad \hat{z} \quad \hat{V}_z \quad \hat{a}_z\|^T$ ); в качестве априорных плотностей вероятности УПО наблюдаемого объекта использовались их апостериорные значения ( $p(\hat{\Theta}_{n+1}^{\text{ЛВ}}) \approx p(\Theta^{\text{ЛВ}} | A_g), g = \overline{1, M}$ ). При этом распределение результатов

оценивания координат и параметров движения наблюдаемого объекта ( $p(\hat{\mathbf{a}}_{n+1})$ ) фактически определяет апостериорное распределение его УПО ( $p(\hat{\Theta}_{n+1}^{\text{ЛВ}}) = p(\mathbf{h}(\hat{\mathbf{a}}_{n+1}))$ ). Данный подход позволил отказаться от сложной процедуры непосредственного оценивания УПО объекта. В результате введенных ограничений получено решающее правило распознавания класса объекта:

$$\text{если } z(\xi | A_k) > z(\xi | A_l), \quad l = \overline{1, M}, \quad l \neq k, \quad \text{то } A_k^*, \quad (4)$$

где  $z(\xi | A_l) = \ln(\Lambda(\xi | A_l)) = \xi^{*\text{T}} \mathbf{B}(A_l) \xi + a(A_l)$  – значение логарифма отношения правдоподобия в  $l$ -м канале обработки;  $\mathbf{B}(A_l) = (\mathbf{R}(A_0))^{-1} + (\mathbf{R}(A_l) + \mathbf{R}(A_0))^{-1}$  – матрица обработки РЛП в  $l$ -м канале обработки;  $\mathbf{R}(A_0)$  – корреляционная матрица фоновой составляющей РЛП;  $\mathbf{R}(A_l)$  – корреляционная матрица сигнальной составляющей РЛП объекта  $l$ -го класса;  $a(A_l) = \ln \frac{\det \mathbf{R}(A_0)}{\det(\mathbf{R}(A_l) + \mathbf{R}(A_0))}$  – смещение в  $l$ -м канале обработки.

При этом адаптация корреляционной матрицы сигнала к УПО наблюдаемого объекта осуществлялась согласно следующему выражению:

$$\mathbf{R}(A_l) \approx \int_{\Gamma_{\Theta^{\text{ЛВ}}}} p(\hat{\Theta}_{n+1}^{\text{ЛВ}}) \mathbf{R}(A_l, \Theta^{\text{ЛВ}}) d(\Theta^{\text{ЛВ}}), \quad l = \overline{1, M}, \quad (5)$$

где  $p(\hat{\Theta}_{n+1}^{\text{ЛВ}})$  – апостериорная плотность распределения УПО объекта на текущем ( $n+1$ ) контакте;  $\mathbf{R}(A_l, \Theta^{\text{ЛВ}})$  – корреляционная матрица сигнала, зависящая от УПО объекта в  $l$ -м канале обработки устройства распознавания.

На рисунке 3 представлена структурная схема разработанного устройства распознавания.

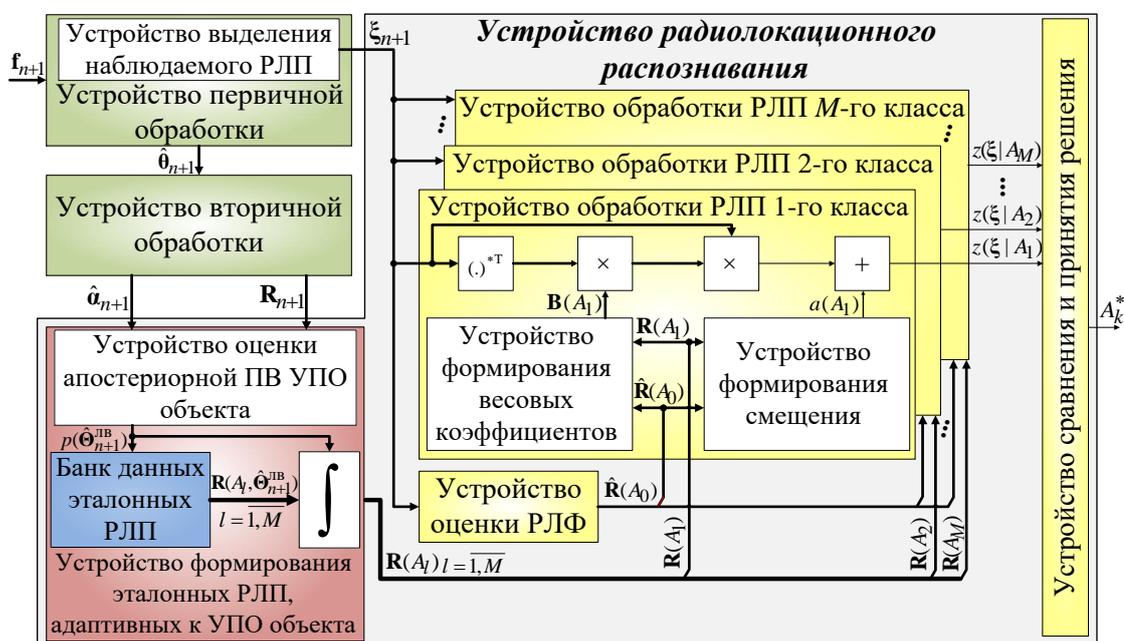


Рисунок 3. – Структурная схема квазиоптимального одношагового устройства распознавания, адаптивного к углам пространственной ориентации объекта

В диссертационной работе проведены исследования влияния условий наблюдения на ЗР оценок УПО объекта ( $p(\hat{\Theta}_{n+1}^{LB})$ ) [4], основные результаты которых сведены в таблицу 1.

**Таблица 1. – Результаты исследования влияния условий наблюдения на закон распределения оценок углов пространственной ориентации объекта**

Закон распределения угла курса объекта	Закон распределения угла тангажа объекта	Закон распределения угла крена объекта
<p><math>p(\psi^{LB}   \vartheta^{LB}, \gamma^{LB} = const)</math></p> <p><math>\sigma_{\beta} = 0,5^{\circ}</math>  <math>\sigma_{\epsilon} = 0,3^{\circ}</math>  <math>\sigma_r = 50</math>  <math>n = 3</math></p> <p><math>\sigma_{\psi^{LB}} = 41,2^{\circ}</math></p>	<p><math>p(\vartheta^{LB}   \psi^{LB}, \gamma^{LB} = const)</math></p> <p><math>\sigma_{\beta} = 0,25^{\circ}</math>  <math>\sigma_{\epsilon} = 0,6^{\circ}</math>  <math>\sigma_r = 50</math>  <math>n = 3</math></p> <p><math>\sigma_{\vartheta^{LB}} = 42,6^{\circ}</math></p>	<p><math>p(\gamma^{LB}   \psi^{LB}, \vartheta^{LB} = const)</math></p> <p><math>\sigma_{\beta} = 0,25^{\circ}</math>  <math>\sigma_{\epsilon} = 0,3^{\circ}</math>  <math>\sigma_r = 50</math>  <math>n = 5</math></p> <p><math>\sigma_{\gamma^{LB}} = 20,2^{\circ}</math></p>
<p><math>p(\psi^{LB}   \vartheta^{LB}, \gamma^{LB} = const)</math></p> <p><math>\sigma_{\beta} = 1,5^{\circ}</math>  <math>\sigma_{\epsilon} = 0,3^{\circ}</math>  <math>\sigma_r = 50</math>  <math>n = 3</math></p> <p><math>\sigma_{\psi^{LB}} = 64,1^{\circ}</math></p>	<p><math>p(\vartheta^{LB}   \psi^{LB}, \gamma^{LB} = const)</math></p> <p><math>\sigma_{\beta} = 0,25^{\circ}</math>  <math>\sigma_{\epsilon} = 1,2^{\circ}</math>  <math>\sigma_r = 50</math>  <math>n = 3</math></p> <p><math>\sigma_{\vartheta^{LB}} = 57,5^{\circ}</math></p>	<p><math>p(\gamma^{LB}   \psi^{LB}, \vartheta^{LB} = const)</math></p> <p><math>\sigma_{\beta} = 0,25^{\circ}</math>  <math>\sigma_{\epsilon} = 0,3^{\circ}</math>  <math>\sigma_r = 50</math>  <math>n = 20</math></p> <p><math>\sigma_{\gamma^{LB}} = 0,3^{\circ}</math></p>

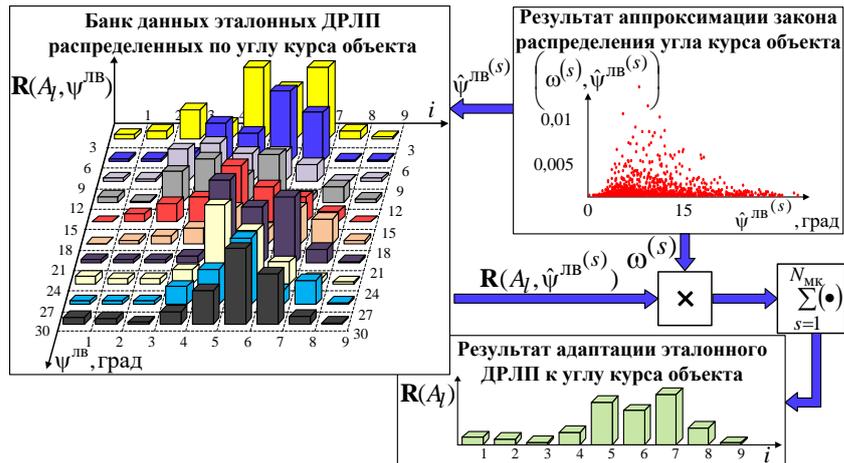
Анализ результатов моделирования показал, что: ЗР оценок УПО изменяется от контакта к контакту с объектом; на первых контактах с объектом анализируемый ЗР характеризуется сложной формой; при увеличении количества контактов с объектом ЗР оценок УПО объекта стремится к нормальному закону; наибольшее влияние на вид и параметры анализируемого ЗР оказывают: дальность, СКО ошибок измерения азимута и угла места центра масс объекта.

Проведенные исследования показали, что использование численного метода Монте-Карло для оценивания плотности вероятности УПО наблюдаемого объекта позволяет реализовать разработанный способ адаптации (5) [4, 5, 9]. В основе оценивания требуемой плотности вероятности методом Монте-Карло лежит аппроксимация плотности УПО объекта ( $p(\hat{\Theta}_{n+1}^{LB})$ ) совокупностью случайных отсчетов ( $\hat{\Theta}_{n+1}^{LB(s)}$ ,  $s = \overline{1, N_{МК}}$ ,  $N_{МК} \gg 1$ ) с использованием нормированных весов этих отсчетов ( $\omega^{(s)}$ ) [4, 9]. Учитывая введенные обозначения, процедура адаптации к УПО наблюдаемого объекта (5) примет следующий вид:

$$\mathbf{R}(A_l) \approx \sum_{s=1}^{N_{МК}} \omega^{(s)} \mathbf{R}(A_l, \hat{\Theta}_{n+1}^{LB(s)}), \quad (6)$$

где  $N_{МК}$  – число отсчетов Монте-Карло, необходимых для аппроксимации анализируемой плотности вероятности;  $\mathbf{R}(A_l, \hat{\Theta}_{n+1}^{LB(s)})$  – корреляционная матрица сигнала, соответствующая случайному  $s$ -му отсчету УПО объекта.

На рисунке 4 представлен пример формирования ДРЛП, адаптивного к углу курса объекта.



**Рисунок 4. – Пример формирования дальномерного радиолокационного портрета, адаптивного к углу курса объекта**

В результате аппроксимации ЗР угла курса объекта, сформированы  $N_{МК}$  случайных отсчетов оценок угла курса ( $\hat{\psi}^{ЛВ(s)}$ ) и соответствующие им нормированные веса ( $\omega^{(s)}$ ,  $s = \overline{1, N_{МК}}$ ). Из банка данных эталонных ДРЛП извлекались корреляционные матрицы сигнала, соответствующие полученным оценкам угла курса объекта ( $R(A_l, \hat{\psi}^{ЛВ(s)})$ ). Адаптация корреляционных матриц сигнала к углу курса объекта ( $R(A_l)$ ), осуществлялась в соответствии с выражением (6). Достоинством предложенного способа формирования эталонных РЛП, адаптивных к УПО объекта, является возможность учета формы изменяющейся апостериорной плотности УПО объекта, а также переход от многомерного интегрирования (5) к суммированию дискретных отсчетов (6).

Важным моментом адаптации эталонных РЛП к УПО объекта является вопрос организации априорного банка данных эталонных портретов. Исследование эффективности функционирования устройства РЛР при наличии углового рассогласования между наблюдаемым и эталонными РЛП позволило сформулировать методику уменьшения количества хранимых в банке данных эталонных портретов [8, 10]. Разработанная методика предполагает [10]:

1. Формирование исходной совокупности эталонных РЛП, соответствующих равномерному шагу изменения УПО распознаваемых объектов. Используемый шаг изменения анализируемых углов определяется степенью изрезанности диаграммы обратного вторичного излучения распознаваемого объекта, обеспечивая избыточность исходного банка данных эталонных РЛП.

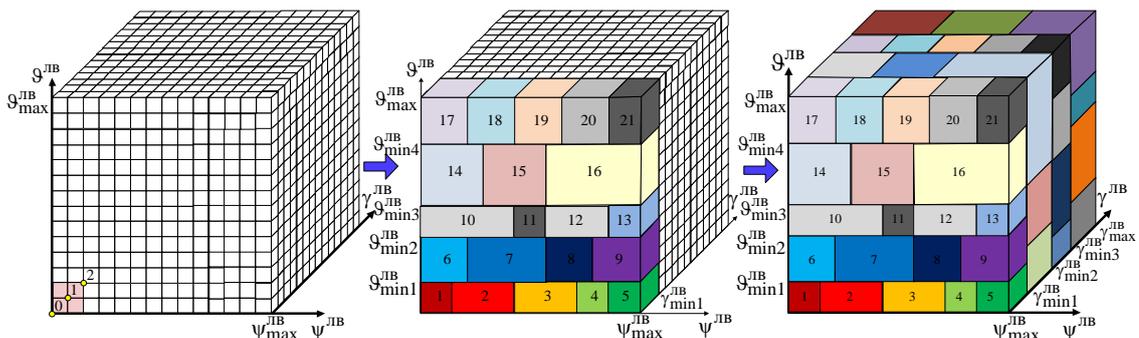
2. Задание условий функционирования устройства РЛР, предполагающее выбор значения отношения сигнал-шум и значения допустимой величины снижения вероятности правильного распознавания, обусловленной наличием углового несоответствия между наблюдаемым и эталонным портретами.

3. Определение максимального углового рассогласования между наблюдаемым и эталонными РЛП, при допустимой величине снижения вероятности правильного распознавания. Полученное рассогласование определяет значение УПО эталонных РЛП объектов, сохраняемых в банк данных.

4. Сохранение эталонного портрета, соответствующего рассчитанному значению УПО объекта, в результирующий банк данных устройства РЛР.

5. Определение очередного эталонного портрета банка данных, соответствующего допустимому угловому рассогласованию между наблюдаемым и эталонными радиолокационными портретами: повторение п.3 и п.4 методики.

На рисунке 5 представлен вариант разбиения области определения УПО объекта на сектора в соответствии с предложенной методикой.



**Рисунок 5. – Вариант разбиения области определения углов пространственной ориентации объекта на сектора**

Таким образом, использование разработанной методики позволило сократить количество эталонных портретов, хранимых в результирующем банке данных, обеспечивая при этом требуемую эффективность функционирования устройства РЛР [10]. Особенностью сформированного результирующего банка данных является неравномерность шага изменения УПО объекта.

В **третьей главе** методом математического моделирования произведен анализ эффективности функционирования синтезированного устройства РЛР, адаптивного к УПО объекта. Качество принимаемых решений о классе наблюдаемого объекта оценивалось для избыточного и результирующего банка данных эталонных портретов. С этой целью разработан комплекс моделирования и экспериментальных исследований, позволяющий в качестве входного воздействия для анализируемых устройств РЛР использовать имитируемые или реальные радиолокационные данные, оценивать выбранные показатели качества устройств РЛР для заданных условий наблюдения.

Распознавание проводилось для объектов трех классов: «Крылатая ракета», «Истребитель», «Бомбардировщик». Все наблюдаемые объекты перемещались равномерно и прямолинейно с учетом их высотно-скоростных характеристик. При моделировании использовались параметры, соответствующие прототипу радиолокатора кругового обзора 22Ж6 «Десна». В качестве классификационных признаков использовались ДРЛП распознаваемых объектов. Банк данных

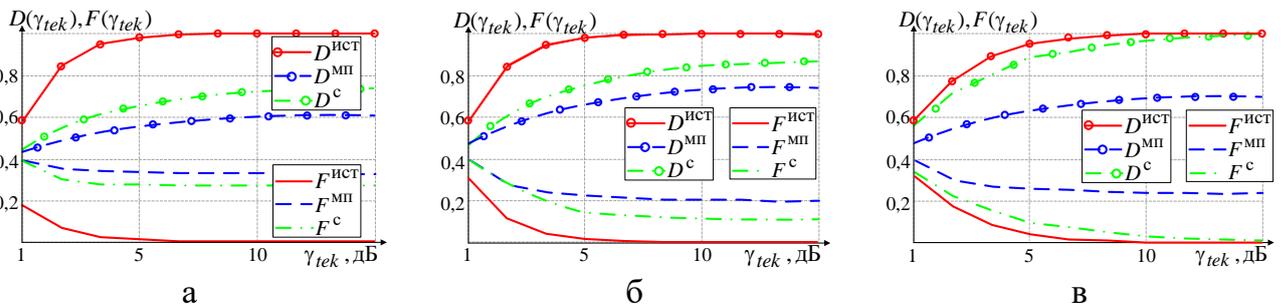
анализируемых классов объектов формировался с использованием верифицированного программного продукта «Backscattering Simulation». В качестве показателей эффективности анализировались характеристики распознавания. Для проведения сопоставительного анализа были выбраны [9]:

а) одношаговое устройство РЛР, использующее в интересах адаптации истинные значения УПО объекта. Идеализация процедуры измерения УПО объекта позволила получить потенциально достижимые характеристики распознавания для заданных условий наблюдения ( $D^{\text{ист}}$ ,  $F^{\text{ист}}$ );

б) одношаговое устройство РЛР, использующее в интересах адаптации максимально правдоподобные оценки УПО объекта. Учет ошибок оценивания УПО объекта позволил получить характеристики распознавания, соответствующие сопоставляемому устройству распознавания ( $D^{\text{мп}}$ ,  $F^{\text{мп}}$ );

в) синтезированное квазиоптимальное одношаговое устройство РЛР, использующее в интересах адаптации аппроксимацию ЗР УПО объекта. Использование данного подхода позволило оценить прирост характеристик распознавания, обусловленный эффективностью разработанного способа адаптации к УПО объекта ( $D^c$ ,  $F^c$ ).

На рисунке 6 представлены результаты моделирования для 3-го контакта с объектом при использовании избыточного банка данных эталонных ДРЛП [9].



а – «Крылатая ракета»; б – «Истребитель»; в – «Бомбардировщик»

Рисунок 6. – Характеристики распознавания для 3-го контакта с объектом

Анализ результатов моделирования подтверждает эффективность функционирования предложенного способа адаптации устройства РЛР к УПО объекта. Таким образом, разработанный способ адаптации одношагового устройства распознавания класса радиолокационного объекта к изменяющимся углам его пространственной ориентации, отличающийся использованием результата аппроксимации плотности вероятности оценок анализируемых углов численным методом Монте-Карло, позволил повысить вероятность правильного распознавания по сравнению с устройством РЛР, использующим для адаптации максимально правдоподобные оценки УПО объекта (применение предложенного способа адаптации для дальномерных портретов объектов 3 классов с разрешающей способностью по дальности 2 м при отношении сигнал-шум на выходе фильтра сжатия от 1 дБ до 15 дБ, позволило повысить вероятности

правильного распознавания для классов: «Крылатая ракета» от 1% до 15%, «Истребитель» от 2% до 18%, «Бомбардировщик» от 15% до 35%) [9].

Эффективность разработанной методики уменьшения количества хранимых эталонных портретов, оценивалась методом математического моделирования. При моделировании избыточный банк данных составлял 360 эталонных ДРЛП для каждого анализируемого класса, что соответствовало изменению только угла курса объекта. Использование неравномерного шага изменения угла курса, позволило уменьшить количество хранимых эталонных ДРЛП для классов: «Крылатая ракета» до 197, «Истребитель» до 314, «Бомбардировщик» до 344 при обеспечении требуемой эффективности функционирования устройства РЛР.

Таким образом, разработанная методика уменьшения количества эталонных портретов, хранимых в результирующем банке данных устройства РЛР, отличающаяся использованием неравномерного шага изменения УПО объектов, обусловленного допустимым снижением вероятности правильного распознавания для заданного отношения сигнал-шум, позволила сократить количество хранимых эталонных портретов по сравнению со случаем равномерного шага изменения УПО объектов (использование неравномерного шага изменения угла курса объектов при составлении набора дальномерных портретов объектов 3 классов с разрешающей способностью по дальности 2 м, при допустимом снижении вероятности правильного распознавания не более 3% для отношения сигнал-шум на выходе фильтра сжатия 5 дБ, позволило уменьшить количество эталонных портретов для классов: «Крылатая ракета» до 45%, «Истребитель» до 13%, «Бомбардировщик» до 4%, по сравнению с использованием равномерного шага изменения угла курса через 1 градус) [10].

В четвертой главе приведены результаты полунатурных испытаний синтезированного устройства РЛР, адаптированного к УПО наблюдаемого объекта. Экспериментальные исследования с целью регистрации отраженных радиолокационных сигналов и траекторной информации аэродинамических объектов проводились в районе национального аэропорта г. Минска в дневное время суток в безоблачных условиях. В качестве источника анализируемых данных выступал радиолокационный модуль комплекса контроля наземной и воздушной обстановки (шифр «ZORKI»). Дополнительно информация о наблюдаемых объектах фиксировалась с использованием вспомогательного сервиса Flightradar24, который обеспечивает определение местоположения воздушных судов в режиме реального времени. В ходе проведения эксперимента наблюдались аэродинамические объекты двух типовых классов: «Малоразмерный объект» (Cessna 560XL), «Крупноразмерный объект» (Boeing 737-800) [10].

Результаты полунатурного эксперимента показали, что:

- применение разработанного способа адаптации ДРЛП объектов 2 классов к углу курса объекта, при использовании избыточного банка данных эталонных

портретов с разрешающей способностью по дальности 15 м и значениях отношений сигнал-шум на выходе фильтра сжатия от 1 дБ до 10 дБ, позволило повысить вероятности правильного распознавания для классов: «Малоразмерный объект» от 2% до 8%, «Крупноразмерный объект» от 5% до 12%;

- переход при распознавании объектов от избыточного к результирующему банку данных эталонных портретов с помощью разработанной методики при заданных потерях (не более 3%) в условных вероятностях правильного распознавания для отношения сигнал-шум равным 10 дБ позволил сократить количество хранимых эталонных портретов: для классов «Малоразмерный объект» до 72%, «Крупноразмерный объект» до 34%.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

1. Проведен аналитический обзор публикаций, посвященных решению задачи радиолокационного распознавания классов наблюдаемых объектов. Отмечено, что одним из перспективных направлений исследований является повышение эффективности функционирования устройств распознавания за счет адаптации к изменяющимся условиям наблюдения радиолокационных объектов [5, 9, 15]. Проведенный анализ зависимости классификационных признаков от условий наблюдения показал, что существенное влияние на качество принимаемых решений о классе наблюдаемого объекта оказывают углы его пространственной ориентации [1, 5, 7, 8, 9, 13, 15].

2. Проведен обзор существующих устройств распознавания, адаптивных к углам пространственной ориентации наблюдаемого объекта. Наиболее эффективным адаптивным устройством распознавания является устройство, использующее для адаптации максимально правдоподобные оценки углов пространственной ориентации наблюдаемых объектов [5, 7, 11, 12, 13, 14]. Проведенные исследования показали, что формирование максимально правдоподобных оценок углов ориентации аэродинамических объектов неизбежно связано с ошибками их оценивания [2, 3, 5, 7, 12, 13, 14]. Методом математического моделирования проанализировано влияние ошибок определения углов пространственной ориентации наблюдаемого объекта на качество принимаемых решений о его классе. Полученные результаты показывают, что наличие ошибок оценивания углов пространственной ориентации, существенно снижает эффективность принимаемых решений о классе наблюдаемого объекта, особенно на первых контактах с ним [2, 3, 5, 7, 9, 22]. Проведенный анализ подтверждает необходимость разработки нового способа адаптации устройства распознавания к пространственной ориентации распознаваемого объекта [5, 9].

3. Разработана методика определения углов пространственной ориентации наблюдаемого объекта [2]. По критерию минимума апостериорного риска

синтезировано оптимальное устройство совместного измерения углов пространственной ориентации наблюдаемого объекта и принятия решения о его классе [6, 16]. В интересах практической реализации синтезированного оптимального устройства совместного измерения-распознавания предложен вариант перехода к квазиоптимальному устройству распознавания, адаптивному к углам пространственной ориентации наблюдаемого объекта [9, 23].

4. Разработан способ адаптации устройства распознавания к углам пространственной ориентации наблюдаемого объекта, отличающийся использованием метода Монте-Карло для аппроксимации плотности вероятности анализируемых углов [4, 5, 9, 15, 21]. Методом математического моделирования показано, что использование разработанного способа адаптации для дальномерных портретов объектов 3 классов с разрешающей способностью по дальности 2 м при отношении сигнал-шум на выходе фильтра сжатия от 1 дБ до 15 дБ позволило повысить условные вероятности правильного распознавания объектов для класса «Крылатая ракета» до 15%, для класса «Истребитель» до 18%, для класса «Бомбардировщик» до 35%, по сравнению с устройством распознавания, использующим для адаптации максимально правдоподобные оценки углов пространственной ориентации наблюдаемого объекта [9].

5. Разработана методика уменьшения количества эталонных портретов, хранимых в результирующем банке данных устройства распознавания, отличающаяся неравномерным шагом изменения углов пространственной ориентации объектов [8, 10, 17, 19]. Методом математического моделирования показано, что использование разработанной методики для дальномерных портретов объектов 3 классов с разрешающей способностью по дальности 2 м при допустимым снижении вероятности правильного распознавания не более 3% для отношения сигнал-шум на выходе фильтра сжатия 5 дБ позволило сократить количество хранимых эталонных портретов для класса «Крылатая ракета» до 45%, для класса «Истребитель» до 13%, для класса «Бомбардировщик» до 4%, по сравнению с равномерным шагом изменения угла курса объекта. Показано, что на количество эталонных портретов, хранимых в результирующем банке данных, существенное влияние оказывает текущее значение отношения сигнал-шум [10].

6. Проведены полунатурные исследования синтезированного квазиоптимального устройства распознавания, адаптивного к углам пространственной ориентации наблюдаемого объекта [10]. В качестве источника сигнальной и траекторной информации о наблюдаемых аэродинамических объектах выступал радиолокационный модуль комплекса контроля наземной и воздушной обстановки «ZORKI». Результаты проведенных исследований подтвердили преимущество разработанного устройства распознавания по сравнению с устройством распознавания, использующим для адаптации максимально правдоподобные оценки углов пространственной ориентации

наблюдаемого объекта [10]. При этом банк данных анализируемых устройств распознавания сформирован при помощи разработанной методики уменьшения количества эталонных портретов. Данное обстоятельство подтверждает эффективность предложенной методики при практической реализации устройств распознавания, адаптивных к пространственной ориентации объекта.

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

1. Предложенный в диссертации способ адаптации устройства радиолокационного распознавания к пространственной ориентации наблюдаемого объекта и методика уменьшения количества эталонных портретов, хранимых в результирующем банке данных устройства распознавания, могут использоваться при модернизации существующих радиолокационных станций, а также при проектировании и создании перспективных радиолокаторов.

2. Разработанный в рамках диссертационной работы программный комплекс моделирования и экспериментальных исследований позволяет оценивать эффективность функционирования одношаговых устройств радиолокационного распознавания, адаптивных к пространственной ориентации наблюдаемого объекта. Особенностью разработанного комплекса является возможность использования, как имитируемых радиолокационных данных, так и данных, зарегистрированных с помощью радиолокационных систем. При этом имеется возможность применения различных банков данных эталонных портретов. Разработанный комплекс моделирования может быть полезен разработчикам радиотехнических систем, работающим в области распознавания, а также для проведения научных исследований.

3. Полученные результаты диссертационных исследований подтверждены:

- актом внедрения в модернизируемом комплексе программного обеспечения обработки радиолокационных сигналов и информации «RCSW V2» оптико-электронного и радиолокационного комплекса контроля воздушной и наземной обстановки «ZORKI»;

- актом о возможном практическом использовании при модернизации радиолокационной станции наведения зенитного ракетного комплекса «Тор-М2»;

- актом о возможном практическом использовании при модернизации радиолокационной станции 9С35М1 зенитного ракетного комплекса «Бук»;

- актом реализации в учебный процесс кафедры автоматики, радиолокации и приемо-передающих устройств учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь».

Дальнейшее развитие тематики диссертационных исследований может заключаться в применении разработанного способа адаптации к УПО объекта при реализации последовательных устройств распознавания [18, 20].

**СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ****Статьи в рецензируемых научных изданиях**

1. Свинарский, М. В. Влияние ракурса наблюдения цели на эффективность классификации радиолокационных объектов / М. В. Свинарский, С. Н. Ярмолик, А. С. Храменков // Докл. БГУИР. – 2017. – № 2. – С. 31–38.
2. Оценивание углов ориентации летательного аппарата в интересах адаптации к условиям наблюдения / С. Н. Ярмолик, М. В. Свинарский, А. С. Солонар, Е. В. Зайко // Вест. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2017. – № 4. – С. 73–82.
3. Повышение точности оценивания ориентации летательного аппарата в интересах адаптации радиолокационных портретов к условиям наблюдения / С. Н. Ярмолик, М. В. Свинарский, А. С. Храменков, Е. В. Зайко // Докл. БГУИР. – 2018. – № 5. – С. 57–64.
4. Учет распределения углов пространственной ориентации летательного аппарата при адаптации радиолокационных портретов к изменяющимся условиям наблюдения / С. Н. Ярмолик, М. В. Свинарский, А. С. Храменков, Е. В. Зайко // Докл. БГУИР. – 2018. – № 6 – С. 65–72.
5. Способ повышения эффективности распознавания радиолокационных объектов с адаптацией к углам пространственной ориентации / С. Н. Ярмолик, М. В. Свинарский, А. С. Храменков, Е. В. Зайко // Вест. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2018. – № 3. – С. 68–75.
6. Методика синтеза байесовского алгоритма распознавания радиолокационных объектов с адаптацией к их углам пространственной ориентации / С. Н. Ярмолик, М. В. Свинарский, А. С. Храменков, Е. В. Зайко // Вест. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2018. – № 4. – С. 56–66.
7. Повышение эффективности систем радиолокационного распознавания за счет адаптации к пространственной ориентации объекта наблюдения / С. Н. Ярмолик, М. В. Свинарский, А. С. Храменков, Е. В. Зайко // Докл. БГУИР. – 2019. – № 4. – С. 40–47.
8. Особенности хранения эталонных портретов в системах радиолокационного распознавания с учетом рассогласования по углам пространственной ориентации / С. Н. Ярмолик, М. В. Свинарский, А. С. Храменков, Е. В. Зайко // Вест. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2019. – № 2. – С. 44–54.
9. Ярмолик, С. Н. Адаптация устройства радиолокационного распознавания к изменяющимся углам пространственной ориентации объекта наблюдения / С. Н. Ярмолик, М. В. Свинарский, Е. В. Зайко // Вест. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2019. – № 4. – С. 127–137.

10. Методика уменьшения количества эталонных портретов устройства радиолокационного распознавания / С. Н. Ярмолик, М. В. Свинарский, А. С. Храменков, Е. В. Зайко // Вест. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2020. – № 1. – С. 79–89.

### **Материалы конференций**

11. Свинарский, М. В. Использование данных вторичной обработки в интересах решения задачи адаптации к условиям наблюдения радиолокационной цели / М. В. Свинарский, Е. В. Зайко // XI Машеровские чтения : материалы междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Витебск, 18 окт. 2017 г. / Витеб. гос. ун-т ; редкол.: И. М. Прищепа (гл. ред.) [и др.]. – Витебск, 2017. – С. 32–34.

12. Свинарский, М. В. Особенности адаптации радиолокационных систем распознавания к ориентации цели в пространстве наблюдения / М. В. Свинарский, С. Н. Ярмолик, Е. В. Зайко // Информационные технологии и системы 2017 (ИТС 2017) : материалы междунар. науч. конф., Минск, 25 окт. 2017 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Л. Ю. Шилин (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 222–223.

13. Свинарский, М. В. Решение задачи распознавания объектов наблюдения с использованием оценок их пространственной ориентации / М. В. Свинарский, Е. В. Зайко // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях : материалы XXI Респ. науч. конф. студентов и аспирантов, Гомель, 19–21 марта 2018 г. / Гомел. гос. ун-т ; редкол.: О. М. Демиденко (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2018. – С. 71–72.

14. Свинарский, М. В. Особенности оценивания углов пространственной ориентации объекта при адаптации устройств радиолокационного распознавания / М. В. Свинарский, С. Н. Ярмолик, Е. В. Зайко // Актуальные проблемы и перспективы развития авиации : сб. материалов II междунар. науч.-практ. конф. учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Минск, 25–26 апр. 2018 г. : в 2 ч. / Белорус. гос. акад. авиации ; под науч. ред. Г. Ф. Ловшенко. – Минск, 2018. – Ч. 1. – С. 95–102.

15. Свинарский, М. В. Повышение эффективности радиолокационного распознавания за счет адаптации портретов к углам пространственной ориентации объекта / М. В. Свинарский, Е. В. Зайко // XII Машеровские чтения : материалы междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Витебск, 19 окт. 2018 г. / Витеб. гос. ун-т ; редкол.: И. М. Прищепа (гл. ред.) [и др.]. – Витебск, 2018. – С. 27–29.

16. Синтез устройства совместного измерения-распознавания с адаптацией к углам пространственной ориентации радиолокационных объектов / М. В. Свинарский, С. Н. Ярмолик, А. С. Храменков, Е. В. Зайко //

Информационные технологии и системы 2018 (ИТС 2018) : материалы междунар. науч. конф., Минск, 25 окт. 2018 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Л. Ю. Шилин (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2018. – С. 70–71.

17. Свинарский, М. В. Особенности формирования и хранения эталонных портретов объектов при решении задачи радиолокационного распознавания / М. В. Свинарский, Е. В. Зайко, А. С. Леонович // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях : сб. материалов XXII Респ. науч. конф. студентов и аспирантов, Гомель, 25–27 марта 2019 г. / Гомел. гос. ун-т ; редкол.: О. М. Демиденко [и др.]. – Гомель, 2019. – С. 83–84.

18. Радиолокационное распознавание по сигнальным и траекторным признакам с адаптацией к пространственной ориентации объекта / С. Н. Ярмолик, А. С. Храменков, М. В. Свинарский, Е. В. Зайко // 8-я международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения, Минск, 16–17 мая 2019 г. : сб. науч. ст. : в 5 ч. / Гос. воен.-пром. ком. Респ. Беларусь. – Минск, 2019. – Ч. 2. – С. 131–134.

19. Свинарский, М. В. Формирование базы данных эталонных сигнальных признаков для решения задачи радиолокационного распознавания / М. В. Свинарский, Е. В. Зайко // XIII Машеровские чтения : материалы междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Витебск, 18 окт. 2019 г. / Витеб. гос. ун-т ; редкол.: И. М. Прищепа (гл. ред.) [и др.]. – Витебск, 2019. – С. 36–38.

20. Адаптация устройства последовательного радиолокационного распознавания к пространственной ориентации цели / М. В. Свинарский, С. Н. Ярмолик, А. С. Храменков, Е. В. Зайко // Информационные технологии и системы 2019 (ИТС 2019) : материалы междунар. науч. конф., Минск, 30 окт. 2019 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2019. – С. 264–265.

#### **Тезисы докладов**

21. Вероятностные распределения углов пространственной ориентации распознаваемого радиолокационного объекта / М. В. Свинарский, С. Н. Ярмолик, А. С. Храменков, Е. В. Зайко // Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации : тез. докл. VIII Междунар. науч.-практ. конф. авиац. фак. учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», Минск, 17–18 мая 2018 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2018. – С. 143–144.

22. Учет пространственной ориентации объекта в эталонных дальномерных портретах устройства радиолокационного распознавания / М. В. Свинарский,

С. Н. Ярмолик, А. С. Храменков, Е. В. Зайко, А. С. Леонович // Проблемы обеспечения военной безопасности государства в современных условиях : тез. докл. междунар. воен.-науч. конф., Минск, 17–18 апр. 2019 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2019. – С. 309.

23. Квазиоптимальное устройство распознавания радиолокационных объектов с адаптацией к пространственной ориентации объекта / М. В. Свинарский, С. Н. Ярмолик, А. С. Храменков, Е. В. Зайко, А. С. Леонович // Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации : тез. докл. IX междунар. науч.-практ. конф. учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», Минск, 23–24 мая 2019 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2019. – С. 138–139.

## РЭЗІЮМЭ

Свінарскі Мечыслаў Вітальевіч

### **Аднакрокавае радыёлакацыйнае распазнаванне, адаптыўнае да вуглоў прасторавай арыентацыі назіраемага аб'екта метадам Монтэ-Карла**

**Ключавыя словы:** аднакрокавае распазнаванне радыёлакацыйных аб'ектаў, адаптацыя да прасторавай арыентацыі назіраемага аб'екта, банк дадзеных эталонных партрэтаў.

**Мэта работы:** павышэнне эфектыўнасці функцыянавання аднакрокавых прылад радыёлакацыйнага распазнавання класаў назіраемых аб'ектаў.

**Метады даследавання і выкарыстаная апаратура:** метады статыстычнай тэорыі прыняцця рашэнняў, а таксама метады матэматычнага мадэлявання і паўнатуральнага эксперыменту.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** праведзены аналітычны агляд публікацый, прысвечаных рашэнню задачы радыёлакацыйнага распазнавання класаў назіраемых аб'ектаў. Выяўлены асноўныя недахопы вядомай прылады распазнавання, якая выкарыстоўвае ў інтарэсах адаптацыі максімальна праўдападобныя ацэнкі вуглоў прасторавай арыентацыі. Сінтэзавана аднакрокавая прылада радыёлакацыйнага распазнавання, адаптыўная да вуглоў прасторавай арыентацыі назіраемага аб'екта. У інтарэсах адаптацыі выкарыстана апраксімацыя закона размеркавання вуглоў прасторавай арыентацыі лікавым метадам Монтэ-Карла. Распрацавана метадыка змяншэння колькасці эталонных партрэтаў, якія захоўваюцца ў выніковым банку дадзеных, пры забеспячэнні патрабуемай эфектыўнасці функцыянавання аналізуемай прылады распазнавання. Метадамі матэматычнага мадэлявання і паўнатуральнага эксперыменту праведзены супастаўляльны аналіз паказчыкаў якасці сінтэзаванай прылады распазнавання з вядомай адаптыўнай прыладай распазнавання, якая выкарыстоўвае для адаптацыі максімальна праўдападобныя ацэнкі вуглоў прасторавай арыентацыі назіраемага аб'екта. Пры гэтым выкарыстоўваліся розныя банкі дадзеных эталонных партрэтаў.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні:** вынікі даследавання могуць быць выкарыстаны пры распрацоўцы прылад радыёлакацыйнага распазнавання для павышэння паказчыкаў эфектыўнасці распазнавання.

**Вобласць прымянення:** мадэрнізацыя радыёлакатараў агляду і дакладнага вымярэння каардынатаў старога парку, якія маюць у сваім складзе аднакрокавыя прылады распазнавання, а таксама праектаванне і стварэнне перспектыўных радыёлакатараў новага пакалення, адаптыўных да вуглоў прасторавай арыентацыі назіраемага аб'екта.

## РЕЗЮМЕ

Свинарский Мечислав Витальевич

**Одношаговое радиолокационное распознавание, адаптивное к углам пространственной ориентации наблюдаемого объекта методом Монте-Карло**

**Ключевые слова:** одношаговое распознавание радиолокационных объектов, адаптация к пространственной ориентации наблюдаемого объекта, банк данных эталонных портретов.

**Цель работы:** повышение эффективности функционирования одношаговых устройств радиолокационного распознавания классов наблюдаемых объектов.

**Методы исследования и использованная аппаратура:** методы статистической теории принятия решений, а также методы математического моделирования и полунатурного эксперимента.

**Полученные результаты и их новизна:** проведен аналитический обзор публикаций, посвященных решению задачи радиолокационного распознавания классов наблюдаемых объектов. Выявлены основные недостатки известного устройства распознавания, использующего в интересах адаптации максимально правдоподобные оценки углов пространственной ориентации. Синтезировано одношаговое устройство радиолокационного распознавания, адаптивное к углам пространственной ориентации наблюдаемого объекта. В интересах адаптации использована аппроксимация закона распределения углов пространственной ориентации численным методом Монте-Карло. Разработана методика уменьшения количества эталонных портретов, хранимых в результирующем банке данных, при обеспечении требуемой эффективности функционирования анализируемого устройства распознавания. Методами математического моделирования и полунатурного эксперимента проведен сопоставительный анализ показателей качества синтезированного устройства распознавания с известным адаптивным устройством распознавания, использующим для адаптации максимально правдоподобные оценки углов пространственной ориентации наблюдаемого объекта. При этом использовались различные банки данных эталонных портретов.

**Рекомендации по использованию:** результаты исследования могут быть использованы при разработке устройств радиолокационного распознавания для повышения показателей эффективности распознавания.

**Область применения:** модернизация радиолокаторов обзора и точного измерения координат старого парка, имеющих в своем составе одношаговые устройства распознавания, а также проектирование и создание перспективных радиолокаторов нового поколения, адаптивных к углам пространственной ориентации наблюдаемого объекта.

## SUMMARY

Svinarski Mechislav

### **Single-step radar detection adaptive to the spatial orientation angles of the observed object by Monte-Carlo**

**Key words:** single-step recognition of radar objects, adaptation to the spatial orientation of the observed object, database of reference portraits.

**The purpose of the research:** to improve the efficiency of single-step devices of radar detection of classes of the observed objects.

**The research methods and the equipment applied:** methods of statistical theory of decision making, as well as methods of mathematical modeling and semi-natural simulation.

**The results obtained and their novelty:** the analytical review of publications devoted to the solution of the problem of radar recognition of classes of observed object was carried out. The basic drawbacks of the known recognition device that uses estimations of angles of spatial orientation of maximum credibility in the interests of adaptation were revealed. A single-step radar recognition device adaptive to the spatial orientation angles of the observed object was synthesized. Approximation of the law of distribution of spatial orientation angles by Monte Carlo computational algorithm was used in the interests of adaptation. The technique of reducing the number of reference portraits stored in the resulting database, while ensuring the required efficiency of the analyzed recognition device was developed. By methods of mathematical modeling and semi-natural simulation, a comparative analysis of the quality indicators of the synthesized recognition device with a known adaptive recognition device that uses maximum credible estimation of the angles of spatial orientation of the observed object for adaptation was carried out. Various databases of reference portraits were used.

**Usage recommendations:** the results of the study can be used in the development of radar recognition devices to improve the efficiency of the performance of recognition.

**Application:** modernization of radars of view and accurate measurement of the coordinates of the old release, that have single-step recognition devices in their composition, as well as the design and development of promising new-generation radars, adaptive to the angles of spatial orientation of the observe.

**Свинарский Мечислав Витальевич**

**ОДНОШАГОВОЕ РАДИОЛОКАЦИОННОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ С АДАПТАЦИЕЙ К  
УГЛАМ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ НАБЛЮДАЕМОГО ОБЪЕКТА  
МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.12.14 – радиолокация и радионавигация

---

Подписано в печать . . . .2020	Формат 60x84 1/16.	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.  
ЛП № 02330/264 от 14.04.2014.  
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск.