

Учреждение образования  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.396.96

**ВУ**  
**Тхань Ха**

**АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В  
ОБНАРУЖИТЕЛЯХ-ИЗМЕРИТЕЛЯХ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ  
ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ СО СКАНИРУЮЩЕЙ  
МНОГОКАНАЛЬНОЙ АНТЕННОЙ СИСТЕМОЙ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

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

Минск 2021

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

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

Официальные оппоненты: **Костромицкий Сергей Михайлович**, член-корреспондент НАНБ, доктор технических наук, профессор, директор Республиканского научно-производственного унитарного предприятия «Центр радиотехники НАН Беларуси»;

**Солонар Андрей Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры автоматики, радиолокации и приемо-передающих устройств учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь».

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

Защита состоится «01» апреля 2021 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 «\_\_» февраля 2021 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций,  
кандидат технических наук, доцент



Т. А. Пулко

## ВВЕДЕНИЕ

Постоянное усложнение электромагнитной обстановки за счет увеличения числа работающих на излучение радиосредств и возможного наличия источников помех приводит к увеличению вероятности функционирования радиолокационных средств обнаружения воздушных объектов (ВО) в предельно сложных сигнально-помеховых ситуациях (ССПС). В наибольшей степени это относится к наиболее многочисленным обзорным радиолокационным станциям (РЛС) обнаружения воздушных объектов, которые с 60 гг. прошлого Века по настоящее время являются основным информационным средством в системах управления воздушным движением (УВД) и системах контроля воздушного пространства. Поэтому задачи повышения их помехоустойчивости и качества выдаваемой информации продолжают оставаться весьма актуальными. Эти задачи должны решаться в условиях жестких ограничений на конструктивную сложность и стоимость РЛС.

К числу ССПС следуют отнести, прежде всего, случай наличия интенсивных мешающих отражений (МО) и маскирующих помех, в том числе при их воздействии по главному лепестку (ГЛ) диаграммы направленности (ДН) антенны РЛС и случай наличия групповой цели (ГЦ) из 3...4 объектов с расстоянием между отдельными объектами, соизмеримыми с разрешающей способностью по дальности. В наибольшей степени функционирование в ССПС характерно для РЛС обнаружения метрового диапазона длин волн, которые, с одной стороны, способны эффективно обнаруживать малоразмерные воздушные объекты, с другой стороны имеют низкую разрешающую способность по угловым координатам и дальности, что увеличивает вероятность воздействия помех по главному лепестку ДН антенны и наличия ГЦ. Известные алгоритмы обработки на фоне «белого» шума в указанных условиях не являются оптимальными. Повышение эффективности обнаружения целей и точности определения координат возможно на основе реализации специализированных адаптивных алгоритмов первичной обработки радиолокационной информации в одно- и многоканальных приемных системах, учитывающих особенности компенсации внешних помех при механическом вращении антенной системы, флуктуирующий характер отраженного сигнала и относительно низкую разрешающую способность обзорных РЛС по дальности и угловым координатам.

Данная работа посвящена обоснованию адаптивных алгоритмов обработки сигналов в обнаружителях-измерителях координат воздушных объектов с сканирующими антенными системами, позволяющих повысить эффективность обнаружения, оценивания координат и сопровождения воздушных объектов.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

Работа выполнена на кафедре информационных радиотехнологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в интересах создания новых подходов, адаптивных алго-

ритмов и устройств первичной обработки информации в РЛС обнаружения воздушных объектов для Социалистической Республики Вьетнам.

Тема диссертации включена в план научной работы учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» и соответствует пунктам 3 и 9 перечня приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 годы.

Связь с крупными научными программами подтверждается использованием результатов исследований в НИР ГБ № 15–2028 «Разработка научных основ, принципов формирования и обработки сигналов в радиотехнических системах новых поколений, работающих в условиях больших динамических диапазонов сигналов», выполненной в 2015–2020 г. и в НИР ГБ № 20-2006 «Разработка способов обработки сигналов, принципов построения многоканальных и многочастотных радиотехнических средств и систем нового поколения с повышенными информационными возможностями и помехозащищенностью», проводимой кафедрой информационных радиотехнологий в соответствии с планом научных исследований учреждения образования «Белорусский Государственный университет информатики и радиоэлектроники».

### **Цель и задачи исследования**

*Целью* диссертационной работы является повышение эффективности обнаружения и точности измерения координат воздушных объектов за счет реализации адаптивных алгоритмов первичной обработки в обнаружителях-измерителях со сканирующей многоканальной антенной системой для сложных сигнально-помеховых ситуаций.

*Объектом* исследования являются обнаружители-измерители угловых координат ВО с многоканальной антенной системой.

*Предметом* исследования являются адаптивные алгоритмы обработки сигналов в сложных сигнально-помеховых ситуациях.

Для достижения поставленной цели решались следующие *задачи*:

1. Анализ типовых условий применения и функционально-технического облика обнаружителей-измерителей обнаружения ВО со сканирующими одно- и многоканальными антенными системами с позиций реализации адаптивных алгоритмов первичной обработки информации в ССПС и разработка математических моделей принимаемых реализаций при когерентной и некогерентной обработке.

2. Синтез адаптивных алгоритмов обнаружения и оценивания угловых координат ВО в обнаружителях-измерителях с многоканальными антенными системами (АС).

3. Разработка адаптивного алгоритма совместного обнаружения-измерения дальности элементов групповой цели с использованием оценочно-компенсационного подхода.

4. Исследование эффективности разработанных алгоритмов аналитическими методами и методами компьютерного и полунатурного моделирования.

5. Комплексное исследование эффективности функционирования обна-

ружителей-измерителей ВО в сложных сигнально-помеховых ситуациях на этапах первичной и вторичной обработки информации.

### Научная новизна

Научная новизна полученных результатов заключается в:

- разработке одноэтапного алгоритма совместного обнаружения и оценивания координат ВО в свободном пространстве при наличии внешних помех, *отличающегося* дополнительными операциями оценки мощности взвешенных внутренних шумов и некомпенсированных остатков внешних помех в каждом периоде повторения, обеления адаптированной выборки во временной области, оценки априори неизвестной мощности ОС методом наименьших квадратов (МНК) и построения матрицы обработки для измененного опорного сигнала, что *позволило* получить решающие статистики для типовых моделей флуктуаций ОС при отдельных пространственной и временной обработках;

- разработке квазиоптимального алгоритма совместного обнаружения и оценивания координат ВО при наличии МО и внешних помех, *отличающегося* разделением обработки на два этапа с операциями предварительной адаптивной компенсации внешних помех, оценки доплеровского сдвига частоты МО с учетом фаз ДН адаптированного канала по каждому импульсу пачки и формирования многоканальной адаптированной во временной области выборки путем коррекции доплеровского сдвига частоты МО и их череспериодной компенсации (ЧПК) в каждом приемном канале (ПК) на первом этапе и операциями адаптивной ПКП по многоканальной адаптированной выборке с последующей обработкой аналогично одноканальному алгоритму с учетом взвешивания ДН приемных каналов при ЧПК на втором этапе, что *обеспечило* сокращение размерности обрабатываемых корреляционных матриц (КМ) в сравнении с оптимальным пространственно-временным алгоритмом пропорционально числу импульсов в пачке или возможность обнаружения и измерения угловых координат при малых угловых различиях воздушного объекта и источника помех в сравнении с квазиоптимальным алгоритмом при формировании провалов в диаграммах направленности компенсационных каналов;

- разработке алгоритма обнаружения-измерения дальности элементов групповой цели, *отличающегося* использованием оценочно-компенсационного подхода, при итеративно выполняемых операциях обнаружения и оценивания комплексной амплитуды и времени прихода доминирующего сигнала и вычитания его масштабной копии из принимаемой реализации, что *позволило* снизить влияние боковых лепестков (БЛ) функции рассогласования (ФР) сильных сигналов на обнаружение и оценивание времени прихода слабых сигналов без использования оконной обработки принимаемой реализации;

- получении точных и приближенных аналитических соотношений, определяющих дисперсию оценки азимута ВО, и результатов компьютерного и полунатурного моделирования, *отличающихся* учетом структур одно- и двухэтапных алгоритмов обработки, ошибок калибровки приемных каналов и взаимосвязи первичной и вторичной обработки радиолокационной информации,

что *позволило* количественно оценить предельные возможности обнаружителей-измерителей УК с многоканальной приемной системой и получить характеристики полноты и точности выдаваемой радиолокационной информации.

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

1. Одноэтапные и двухэтапные квазиоптимальные алгоритмы обработки сигналов в обнаружителях-измерителях угловых координат воздушных объектов со сканирующей многоканальной антенной системой, *отличающиеся* использованием оценок мощности отраженного сигнала методом наименьших квадратов по адаптированной выборке и наличием двух этапов пространственной адаптации для оценки доплеровского сдвига частоты мешающих отражений и компенсации внешней помехи по выборке сигналов приемных каналов после устранения мешающих отражений, что *позволило* обеспечить возможность обнаружения и оценивания угловых координат воздушного объекта при его угловом отклонении от источника помех в 3-5 раз меньше ширины главного лепестка диаграммы направленности основного канала в сравнении с известным алгоритмом, предусматривающим формирование провалов в диаграммах направленности компенсационных каналов, при сокращении, в сравнении с оптимальным пространственно-временным алгоритмом, размерности обрабатываемых матриц пропорционально числу импульсов в отраженном сигнале.

2. Оценочно-компенсационный алгоритм обнаружения-измерения дальности элементов групповой цели, *отличающийся* итеративно проводимыми процедурами оценки времени задержки и комплексной амплитуды доминирующего по амплитуде отраженного сигнала и вычитания масштабной копии эталонного сигнала из принимаемой реализации, что *позволило* повысить вероятность правильного обнаружения элементов групповой цели со средними расстояниями между ними 1...3 величины разрешающей способности РЛС по дальности в сравнении с согласованной обработкой для одиночной цели на 0,15...0,25 при сокращении среднего числа ложных тревог до четырех раз.

3. Результаты аналитического исследования, компьютерного и полунатурного моделирования, подтверждающие возможность практической реализации предлагаемых алгоритмов при достижимых ошибках калибровки приемных трактов с повышением полноты радиолокационной информации в сложных сигнально-помеховых ситуациях с существующего уровня 0,1...0,2 до уровня 0,7...0,8.

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

Представленные в диссертационной работе научные результаты, а также положения, выносимые на защиту, получены соискателем самостоятельно.

Основным соавтором публикаций является научный руководитель – доктор технических наук, доцент С.В. Козлов, который осуществлял определение целей и постановку задач исследований, принимал участие в проведении полунатурного моделирования, интерпретации, обобщении и публикации полученных результатов. Совместно с А.Н. Морозом предложены варианты алгоритмов

обработки сигналов для РЛС с коническим сканированием. Совместно со специалистами Центра 1.9 НИЧ БГУИР разработана методика, лабораторная установка и проведено полунатурное моделирование алгоритмов обработки сигналов в обнаружителях-измерителях с многоканальной антенной системой.

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

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 54, 55 и 56-ой научных конференциях аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск, 2018, 2019, 2020 г.); 8-й международной научной конференции по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения (г. Минск, 2019 г.); XXV Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация и связь» (г. Воронеж, Россия, 2019 г.); XXVI Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация и связь» (г. Воронеж, Россия, 2020 г.); I Российской научной конференции «Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества» (г. Омск, Россия, 2020 г.); XXV Международной научно-технической конференции «Современные средства связи» (г. Минск, 2020 г.); открытой республиканской научно-практической конференции «Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020» (г. Минск, 2020 г.).

### **Опубликование результатов диссертации**

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 22 научных работ, в том числе 4 статьи в научных рецензируемых журналах, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, объемом 2,51 авторского листа, 10 статей в сборниках трудов научных конференций объемом 3,75 авторского листа, 8 тезисов докладов в сборниках материалов научных конференций. Общий объем публикаций составляет 6,26 авторского листа.

### **Структура и объем диссертации**

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

Общий объем диссертации составляет 196 страниц, из них 126 страниц основного текста, 56 иллюстраций на 28 страницах, 12 таблиц на 6 страницах, библиографический список из 125 наименований на 10 страницах, список собственных публикаций из 22 наименований на 3 страницах и 4 приложений на 23 страницах, включая три акта внедрения на 4 страницах.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

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

В *первой главе* проведен анализ типовых условий применения и функционально-технического облика обнаружителей-измерителей угловых координат ВО со сканирующими одно- и многоканальными АС с позиций реализации адаптивных алгоритмов первичной обработки [2, 3, 5, 9, 16, 19]. Разработан перечень из четырех ССПС, отличающихся числом и направлениями воздействия источников помех (ИП) и параметрами групповой цели.

Обобщена модель обнаружителя-измерителя УК ВО со сканирующей в одной плоскости многоканальной АС (рисунок 1), включающей основную приемопередающую антенну с ДН по напряжению  $\dot{F}_0(\alpha)$ , коэффициентом усиления (КУ) по мощности  $G_0$  и шириной ГЛ в азимутальной плоскости  $\Delta\alpha_{0,5}$  и  $\ell = \overline{1, L}$  компенсационных антенн с ДН  $\dot{F}_\ell(\alpha)$ , КУ  $G_\ell \ll G_0$  и значениями ширины ГЛ  $\Delta\alpha_{0,5}^k \gg \Delta\alpha_{0,5}$ .

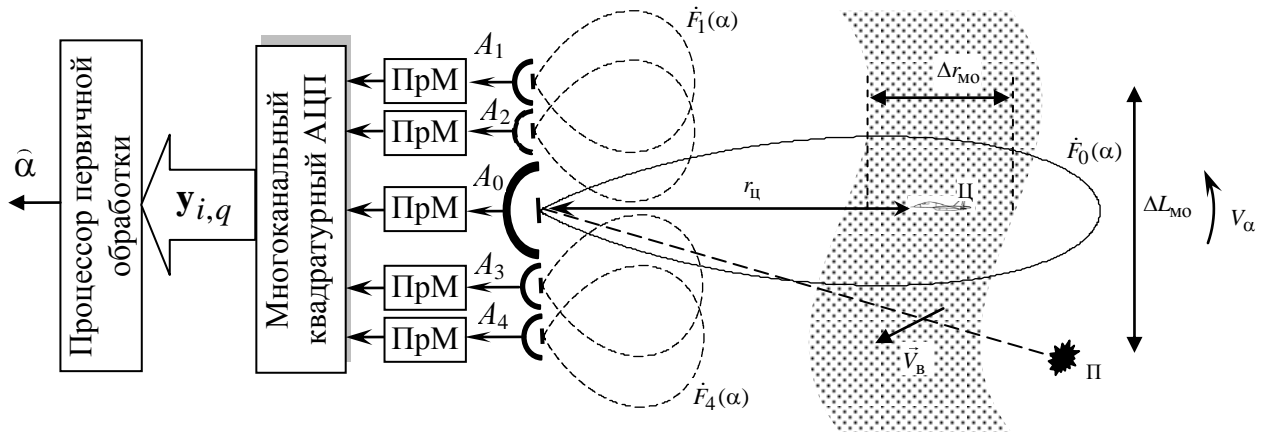


Рисунок 1. – Структура обнаружителя-измерителя УК и ситуация наблюдения ВО

Отраженный от ВО (азимут  $\alpha_c$ , дальности  $r_{ц}$ ) сигнал имеет заданный доплеровский сдвиг частоты  $F_{DC}$ , экспоненциальную корреляционную функцию (КФ) флуктуаций с интервалом корреляции  $\tau_c$  и мощностью  $P_c$ , определяемой в максимуме главного лепестка ДН передающей антенны и на выходе изотропной антенны после внутрипериодной обработки (ВПО). МО являются пространственно-изотропными в окрестности ВО с радиальной и поперечной протяженностями  $\Delta r_{MO}$  и  $\Delta L_{MO} > (2...3)\Delta\alpha_{0,5}r_{ц}$ , и характеризуются КФ флуктуаций  $R_{MO}(t) = \sigma_{MO}^2 r_{MO}(t)$ , где  $\sigma_{MO}^2$  – мощность МО на выходе изотропной антенны после ВПО;  $r_{MO}(t)$  – нормированная КФ флуктуаций МО, и неизвестным доплеровским сдвигом частоты  $F_{DP}$ . На измеритель воздействуют  $m = \overline{1, M}$  ИП с азимутами  $\alpha_{\Pi, m}$  и мощностями на выходе изотропной антенны после ВПО  $P_m$ . Азимутальное положение АС при  $t = 0$  равно  $\alpha_a^0$ , угловая скорость вращения  $V_\alpha$ . Наблюдению при цифровой обработке для моментов времени



$t_{i,q} = (i-1)T_r + \tau_z + t_{\text{сф}} - (Q-q)\Delta t$ , где  $i = \overline{1, I}$ ,  $I = \lceil 2\Delta\alpha_{0,5} / (V_\alpha T_r) \rceil$  – число периодов повторения на длительности обрабатываемой реализации;  $Q$  – число анализируемых отсчетов на каждом периоде повторения;  $\Delta t$  – интервал дискретизации;  $T_r$  – период повторения,  $\tau_z = 2r_{\text{ц}} / c$  – время задержки ОС;  $t_{\text{сф}}$  – постоянная задержка в фильтре при ВПО, доступны векторы отсчетов результатов ВПО выходных сигналов ПК

$$\mathbf{y}_{i,q} = (\dot{Y}_0(t_{i,q}), \dot{Y}_1(t_{i,q}), \dots, \dot{Y}_L(t_{i,q}))^T = \mathbf{y}_{\text{сш},i,q} + \mathbf{y}_{\text{п},i,q} + \mathbf{y}_{\text{мо},i,q} + \mathbf{y}_{\text{с},i,q}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{y}_{\text{сш},i,q}, \mathbf{y}_{\text{п},i,q}, \mathbf{y}_{\text{мо},i,q}, \mathbf{y}_{\text{с},i,q}$  – векторы-столбцы отсчетов собственных шумов, внешних помех, МО и ОС;  $\mathbf{y}_{\text{сш},i,q} = (\dot{\xi}_{\text{ш},i,q}^{(0)}, \dot{\xi}_{\text{ш},i,q}^{(1)}, \dots, \dot{\xi}_{\text{ш},i,q}^{(L)})^T$ ;  $\dot{\xi}_{\text{ш},i,q}^{(\ell)}$  – отсчеты внутреннего шума  $\ell$ -го ПК для  $q$ -го отсчета в  $i$ -ом периода повторения;

$$\mathbf{y}_{\text{с},i,q} = \mathbf{K} \dot{\xi}_{\text{с},i,q} \sqrt{P_c} \dot{F}_0(\alpha_{ai} - \alpha_c) \mathbf{s}(\alpha_{ai} - \alpha_c) e^{j2\pi F_{DS} T_r i} (2); \mathbf{y}_{\text{п},i,q} = \mathbf{K} \sum_{m=1}^M \dot{\xi}_{\text{п},i,q}^{(m)} \sqrt{P_m} \mathbf{s}(\alpha_{ai} - \alpha_{\text{п}_m}) \quad (3)$$

$$\mathbf{y}_{\text{мо},i,q} = \mathbf{K} \sum_{k=1}^{K_{\text{мо}}} \mathbf{y}_{\text{мо},i,q}(k) = \mathbf{K} e^{j2\pi F_{DP} T_r i} \sum_{k=1}^{K_{\text{мо}}} \dot{\xi}_{\text{мо},i,q}(k) \sqrt{P_{\text{мо}_k}} \dot{F}_0(\alpha_{ai} - \alpha_{\text{мо}_k}) \mathbf{s}(\alpha_{ai} - \alpha_{\text{мо}_k}), \quad (4)$$

где  $\mathbf{K}$  – диагональная матрица, составленная из нормированных комплексных коэффициентов передачи  $K_n$  приемных каналов;  $\dot{\xi}_{\text{мо},i,q}^{(k)}$  – последовательность независимых по  $k$  и  $q$  комплексных гауссовских случайных величин с единичной дисперсией и коэффициентом корреляции  $\overline{\dot{\xi}_{\text{мо},i,q}^{(k)} \dot{\xi}_{\text{мо},j,q}^{*(k)}} = r_{\text{мо}}((i-j)T_r)$ ;  $P_{\text{мо}_k}$  – мощность МО от  $k$ -го участка при его облучении максимумом главного лепестка передающей антенны на выходе изотропной приемной антенны;  $K_{\text{мо}}$  – число угловых секторов с размером  $\delta\alpha \ll \Delta\alpha_{0,5}$ , на которые разбивается область МО.

Выполнена оценка энергетических соотношений между ОС, МО, МП и внутренними шумами. Показано, что типовые отношения сигнал/шум (ОСШ) и мешающий отражения/шум на выходе ПВО будут составлять по зоне действия РЛС соответственно 0...20 дБ, 10...50 дБ и до 60...70 дБ.

Проведен анализ известных алгоритмов обнаружения-измерения УК. Оптимальный (пространственно-временной) алгоритм предусматривает развертывание векторов  $\mathbf{y}_{i,q}$  в единый вектор-столбец, оценку КМ суммы внутренних шумов, внешних помех и МО по отсчетам, в которых отсутствует ОС, и максимизацию логарифма функции правдоподобия (ФП) по неизвестным параметрам ОС. Показано, что реализация оптимального алгоритма на практике крайне затруднена ввиду большой размерности получаемых матриц и необходимости многомерной максимизации. Квазиоптимальный алгоритм предполагает формирование ДН компенсационных каналов с провалами в области ГЛ ДН основного канала, характеризуется энергетическими потерями и не обеспечивает защиту от помех, воздействующих в области провала.

**Вторая глава** посвящена синтезу адаптивных квазиоптимальных алгоритмов обнаружения и оценивания УК воздушных объектов с многоканальными

ми АС. Приведен одноэтапный и двухэтапный алгоритмы для случая обнаружения и оценивания УК в свободном пространстве и при наличии МО [2, 3, 5, 7, 9, 16, 19].

Основные идеи построения квазиоптимальных алгоритмов заключаются в проведении пространственной обработки (ПО) принимаемой многоканальной реализации в каждом периоде повторения, «обелении» помехи во временной области с учетом сканирования антенной системы и связанного с этим изменения квадрата нормы вектора весовых коэффициентов приемных каналов, вычислении опорных сигналов для каждого возможного углового положения цели с учетом пространственного и временного обелений, оценки мощности ОС с использованием экономичного метода наименьших квадратов и накоплении измененного в результате пространственного и временного обеления ОС с построением и максимизацией логарифма ФОП по УК.

Для одноэтапного алгоритма имеем:

$$\hat{\Phi}_i = \frac{1}{Q-1} \sum_{q=1}^{Q-1} \mathbf{y}_{i,q} \mathbf{y}_{i,q}^+ \quad (5); \quad \boldsymbol{\omega}_i = \Phi_i^{-1} \mathbf{s}(0) \quad (6); \quad \dot{U}_i = \boldsymbol{\omega}_i^+ \mathbf{y}_{i,Q} \quad (7); \quad \hat{P}_{\text{ш+п}_i} = \boldsymbol{\omega}_i^+ \hat{\Phi}_i \boldsymbol{\omega}_i \quad (8);$$

$$\dot{Z}_i = \dot{U}_i / \sqrt{\hat{P}_{\text{ш+п}_i}} \quad (9); \quad \dot{Z}_{\text{оп}_i}(\alpha) = \dot{F}_0(\alpha_{\text{ai}} - \alpha) \boldsymbol{\omega}_i^+ \mathbf{s}(\alpha_{\text{ai}} - \alpha) / \sqrt{\hat{P}_{\text{ш+п}_i}} \quad (10),$$

где  $\hat{\Phi}_i$ ,  $\boldsymbol{\omega}_i$ ,  $\dot{U}_i$ ;  $\hat{P}_{\text{ш+п}_i}$ ;  $\dot{Z}_i$ ;  $\dot{Z}_{\text{оп}_i}(\alpha)$  – оценка КМ, ВВК, результат ПО, оценка мощности взвешенных шумов и остатков помех, результат обеления во временной области, опорный сигнал для истинного углового положения цели  $\alpha$  с учетом ПО и обеления для  $i$ -го периода повторения. Согласно (6) для каждого периода повторения реализуется критерий максимума ОСШ при условии нахождения ВО в направлении  $\alpha_{\text{ai}}$ . ВВК  $\boldsymbol{\omega}_i$  могут быть вычислены при непосредственном обращении матрицы (НОМ) или рекурсивно (алгоритмы *LMS*, *RLS*).

Выражения для решающей статистики детализируются для случаев нефлуктуирующего (нф), дружно- (дф) и быстрофлуктуирующего (бф) ОС:

$$\Psi_{\text{нф}}(\mathbf{z} / \alpha) = \left| \sum_{i=1}^I \dot{Z}_i Z_{\text{оп}_i}^*(\alpha) \right|^2 / \sum_{i=1}^I |\dot{Z}_{\text{оп}_i}(\alpha)|^2; \quad (11)$$

$$\Psi_{\text{дф}}(\mathbf{z} / \alpha) = \mathbf{z}^+ (\mathbf{E} - (\mathbf{E} + \mathbf{R}(\alpha, \hat{r}(\alpha), \hat{\sigma}_c^2(\alpha)))^{-1}) \mathbf{z} - \ln |\mathbf{E} + \mathbf{R}(\alpha, \hat{r}(\alpha), \hat{\sigma}_c^2(\alpha))|; \quad (12)$$

$$\Psi_{\text{бф}}(\mathbf{z} / \alpha) = \sum_{i=1}^I \ln \frac{1}{1 + \hat{\sigma}_c^2(\alpha) |\dot{Z}_{\text{оп}_i}(\alpha)|^2} + \sum_{i=1}^I \frac{\hat{\sigma}_c^2(\alpha) |\dot{Z}_{\text{оп}_i}(\alpha)|^2}{1 + \hat{\sigma}_c^2(\alpha) |\dot{Z}_{\text{оп}_i}(\alpha)|^2} |\dot{Z}_i|^2, \quad (13)$$

где  $\mathbf{z} = (\dot{Z}_1, \dots, \dot{Z}_I)^T$ ;  $\mathbf{E}$  – единичная  $I \times I$  матрица;  $\sigma_{\text{ш}}^2$  – мощность собственных шумов ПК;  $\mathbf{R}(\alpha, \hat{r}(\alpha), \hat{\sigma}_c^2(\alpha))$  – КМ отраженного сигнала с учетом ПО и временного обеления с элементами  $R_{k,m}(\alpha, \hat{r}, \hat{\sigma}_c^2) = \hat{\sigma}_c^2 \hat{r}^{k-m} \dot{Z}_{\text{оп}_k}(\alpha) Z_{\text{оп}_m}^*(\alpha)$ ;  $r = e^{-T_r/\tau_c}$  – междупериодный коэффициент корреляции флуктуаций ОС.

Условные оценки мощности ОС и коэффициента междупериодной корреляции при нахождении ВО в направлении  $\alpha$  получены методом наименьших квадратов (МНК) по обеленной выборке:

$$\hat{\sigma}_c^2(\alpha) = \sum_{i=1}^I (|\dot{Z}_i|^2 - \sigma_{ш}^2) |\dot{Z}_{оп_i}(\alpha)|^2 / \sum_{i=1}^I |\dot{Z}_{оп_i}(\alpha)|^4; \quad (14)$$

$$\hat{r}(\alpha) = \frac{\sum_{i=1}^{I-1} |\dot{Z}_i Z_{i+1} \dot{Z}_{оп_i}(\alpha) \dot{Z}_{оп_{i+1}}(\alpha)| \cos(-\varphi_i + \varphi_{i+1} + \varphi_{оп_i} - \varphi_{оп_{i+1}} + \varphi_r)}{\hat{\sigma}_c^2(\alpha) \sum_{i=1}^{I-1} |\dot{Z}_{оп_i}(\alpha)|^2 |\dot{Z}_{оп_{i+1}}(\alpha)|^2}, \quad (15)$$

где  $\varphi_i = \arg \dot{Z}_i$ ,  $\varphi_{оп_i} = \arg \dot{Z}_{оп_i}$ .

Использование МНК – оценок позволяет перейти к максимизации по одному параметру. Значение решающей статистики при обнаружении составляет  $\max_{\alpha} \Psi(\mathbf{z} / \alpha)$ , оптимальная оценка УК

$$\hat{\alpha} = \arg \max_{\alpha} \Psi(\mathbf{z} / \alpha). \quad (16)$$

При наличии МО качество компенсации внешних помех резко снижается. Основной идеей является разделение обработки на два этапа. На первом этапе выполняются операции компенсации внешних помех, оценки межпериодного набега фазы МО и их череспериодной компенсации (ЧПК):

$$\dot{U}_{i,q} = \boldsymbol{\omega}_{1i}^+ \mathbf{y}_{i,q} \quad (17)$$

$$\Delta \hat{\Phi}_{DP} = \arg \left( \frac{\sum_{i=1}^{I-1} \sum_{q=1}^{Q-1} \dot{U}_{i,q} e^{-j \cdot \arg(\boldsymbol{\omega}_i^+ \mathbf{s}(0))} U_{i+1,q}^* e^{j \cdot \arg(\boldsymbol{\omega}_{i+1}^+ \mathbf{s}(0))}}{\sum_{i=1}^{I-1} \sum_{q=1}^{Q-1} |\dot{U}_{i,q}| |\dot{U}_{i+1,q}|} \right) \quad (18)$$

$$\mathbf{u}_{i,q} = \sum_{k=1}^K h_k \mathbf{y}_{i-k+1,q} e^{-j \Delta \hat{\Phi}_{DP} (i-k+1)}, i = \overline{K, I}; q = \overline{1, Q}, \quad (19)$$

где  $\boldsymbol{\omega}_{1i}$  определяется (6);  $h_k$  – весовые коэффициенты схемы ЧПК. Множители  $e^{-j \cdot \arg(\boldsymbol{\omega}_i^+ \mathbf{s}(0))}$  и  $e^{j \cdot \arg(\boldsymbol{\omega}_{i+1}^+ \mathbf{s}(0))}$  в (18) компенсируют изменение фазы ДН адаптированного канала для соседних периодов повторения в процессе ПКП. В результате формируется последовательность векторов  $\mathbf{u}_{m,q}$ , содержащих измененные отсчеты шума, помеха и ОС при компенсированных МО.

На втором этапе обработка примет вид:

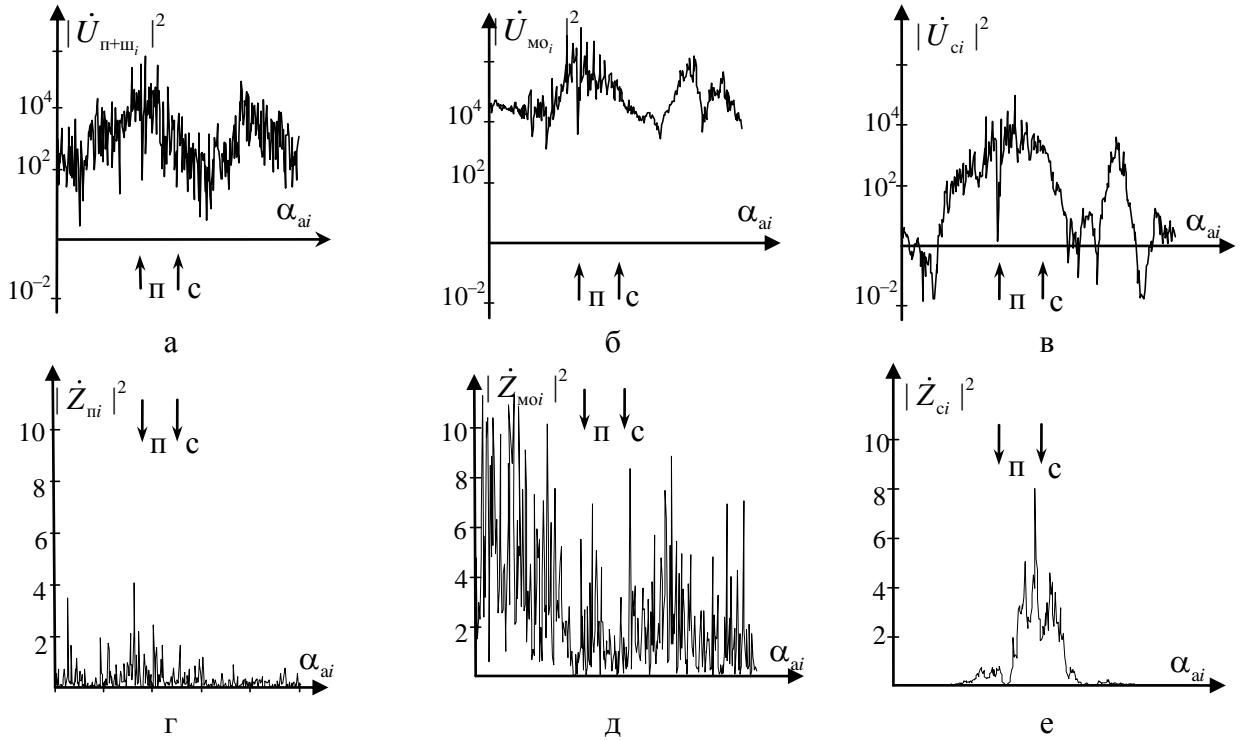
$$\hat{\Phi}_{2i} = \frac{1}{Q-1} \sum_{q=1}^{Q-1} \mathbf{u}_{i,q} \mathbf{u}_{i,q}^+ \quad (20); \quad \boldsymbol{\omega}_{2i} = \mathbf{\Phi}_{2i}^{-1} \mathbf{s}(0) \quad (21); \quad \hat{P}_{ш+\pi_i} = \boldsymbol{\omega}_{2i}^+ \hat{\Phi}_{2i} \boldsymbol{\omega}_{2i} \quad (22); \quad \dot{Z}_i = \frac{\boldsymbol{\omega}_{2i}^+ \mathbf{u}_{i,Q}}{\sqrt{\hat{P}_{ш+\pi_i}}} \quad (23);$$

$$\dot{Z}_{оп_i}(\alpha) = \boldsymbol{\omega}_i^+ \sum_{k=1}^K h_k \dot{F}_0(\alpha_{a_{i+1-k}} - \alpha) \mathbf{s}(\alpha_{a_{i+1-k}} - \alpha) e^{j 2\pi(i+1-k)(F_{DS} - F_{DP})T_r} / \sqrt{\hat{P}_{ш+\pi_i}} \quad (24)$$

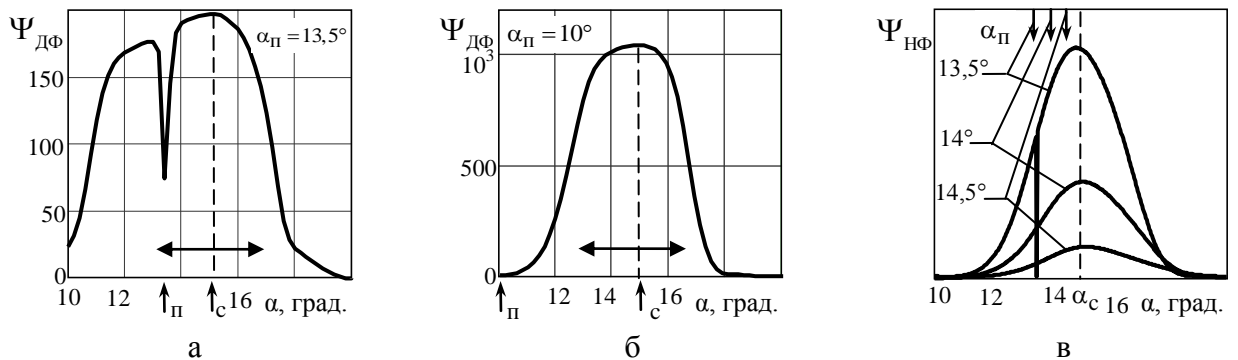
с решающей статистикой (12), (13).

На рисунке 2 приведена иллюстрация обработки двухэтапным алгоритмом. Характерными особенностями формы РС являются: формирование глубокого провала в направлении на источник помех, действующий в пределах ГЛ ДН основного канала; уменьшение максимума при приближении источника

помех к сигналу (рисунок 3); уплощение вершины при переходе от дружно-к быстрофлуктуирующему ОС.



а, б, в – после первого этапа; г, д, е – после второго этапа  
Рисунок 2. – Квадраты отсчетов после этапов обработки



а, б – когерентный флуктуирующий ОС; в – когерентный нефлуктуирующий ОС  
Рисунок 3. – Вид решающей статистики различных угловых положений источника помехи

В *третьей главе* получены аналитические соотношения для нижней границы Рао-Крамера дисперсии оценки УК и мощности ОС, приведена упрощенная методика расчета дисперсии оценки УК и результаты компьютерного и полунатурного моделирования функционирования обнаружителя-измерителя [4, 6, 8, 10, 11, 12, 17, 18, 20, 21, 22].

Для КМ ошибок оценки азимута и мощности ОС получено

$$\mathbf{K} = -\mathbf{I}_{\Phi}^{-1} = \frac{1}{B^2 - AC} \begin{pmatrix} C & -B \\ -B & A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{\alpha}^2 & r_{\alpha P} \sigma_{\alpha} \sigma_P \\ r_{\alpha P} \sigma_{\alpha} \sigma_P & \sigma_P^2 \end{pmatrix}. \quad (25)$$

где  $\sigma_{\alpha}^2$ ,  $\sigma_P^2$  – дисперсии и коэффициент корреляции ошибок оценивания азимута и мощности ОС;  $\mathbf{I}_{\Phi}$  – матрица Фишера с элементами

$$A = -\sum_i \sum_j H_{\alpha_{ij}}'' Q_{i,j} - \sigma_c^2 \text{tr} \left( \mathbf{H}'_{\alpha} \frac{\partial \mathbf{R}_H(\alpha)}{\partial \alpha} + \mathbf{H} \frac{\partial^2 \mathbf{R}_H(\alpha)}{\partial \alpha^2} \right); Q_{i,j} = \begin{cases} 1 + \sigma_c^2 b_i(\alpha) b_j^*(\alpha), i = j \\ r^{|i-j|} \sigma_c^2 b_i(\alpha) b_j^*(\alpha), i \neq j \end{cases};$$

$$B = -\sum_i \sum_j H_{\alpha_{ij}}'' Q_{i,j} - \left[ \text{tr} \left( \mathbf{H} \frac{\partial \mathbf{R}_H(\alpha)}{\partial \alpha} \right) + \sigma_c^2 \text{tr} \left( \mathbf{H}'_{\sigma_c^2} \frac{\partial \mathbf{R}_H(\alpha)}{\partial \alpha} \right) \right];$$

$$C = -\sum_i \sum_j H_{\alpha_{ij}}'' Q_{i,j} - \text{tr} \left( \mathbf{H}'_{\sigma_c^2} \mathbf{R}_H(\alpha) \right); \mathbf{H} = (\mathbf{E} + \sigma_c^2 \mathbf{R}_H(\alpha))^{-1}; \mathbf{D} = \ln |\mathbf{E} + \sigma_c^2 \mathbf{R}_H(\alpha)|,$$

$\mathbf{R}_H(\alpha) = \mathbf{b}(\alpha) \mathbf{b}^+(\alpha) \otimes \mathbf{R}_r$ ;  $\mathbf{b}(\alpha) = (\dot{Z}_{\text{оп}_1}(\alpha), \dots, \dot{Z}_{\text{оп}_r}(\alpha))^T$ ;  $\mathbf{R}_r$  – матрица, составленная из междупериодных коэффициентов корреляции ОС с элементами  $R_{r_{k,m}} = r^{|k-m|}$ ;  $\otimes$  – операция поэлементного перемножения матриц.

Для целей математического моделирования разработана упрощенная методика расчета дисперсии пеленгации, основанная на аппроксимации среднего значения РС вблизи истинного значения  $\alpha_c$  параболой, вычислении средних значений РС в точках  $\alpha_c$ ,  $\alpha_{\pm} = \alpha_c \pm \delta\alpha$  ( $\delta\alpha \approx \Delta\alpha_{0,5} / 10$ )

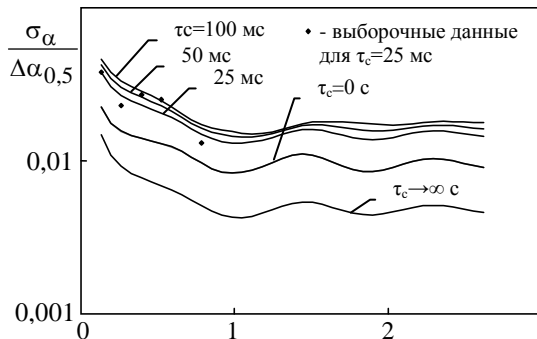
$$\Psi_{\pm} = \sigma_c^2 \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I H_{i,j}^{(\pm)} r^{|i-j|} \dot{Z}_{\text{оп}_i}(\alpha_{\pm}) Z_{\text{оп}_j}^*(\alpha_{\pm}) + \sum_{i=1}^I H_{i,i}^{(\pm)} - \ln |\mathbf{E} + \overline{\sigma_c^2}(\alpha_{\pm}) \mathbf{R}_H(\alpha_{\pm})|;$$

$$\Psi_0 = \sigma_c^2 \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I H_{i,j}^{(0)} r^{|i-j|} \dot{Z}_{\text{оп}_i}(\alpha_c) Z_{\text{оп}_j}^*(\alpha_c) + \sum_{i=1}^I H_{i,i}^{(0)} - \ln |\mathbf{E} + \overline{\sigma_c^2}(\alpha_c) \mathbf{R}_H(\alpha_c)|,$$

где  $\mathbf{H}^{(\pm)} = \mathbf{E} - (\mathbf{E} + \overline{\sigma_c^2}(\alpha_{\pm}) \mathbf{R}_H(\alpha_{\pm}))^{-1}$ ;  $\mathbf{H}^{(0)} = \mathbf{E} - (\mathbf{E} + \overline{\sigma_c^2}(\alpha_c) \mathbf{R}_H(\alpha_c))^{-1}$ ;  
 $\overline{\sigma_c^2}(\alpha_{\pm}) = \sigma_c^2 \sum_{i=1}^I |\dot{Z}_{\text{оп}_i}(\alpha_c)|^2 |\dot{Z}_{\text{оп}_i}(\alpha_{\pm})|^2 / \sum_{i=1}^I |\dot{Z}_{\text{оп}_i}(\alpha_{\pm})|^4$ ;  $\overline{\sigma_c^2}(\alpha_c) = \sigma_c^2$  и дисперсии ошибки пеленгации

$$\sigma_{\alpha}^2 = \delta\alpha^2 / (-\Psi_+ + 2\Psi_0 - \Psi_-). \quad (26)$$

Установлено практическое соответствие расчетов дисперсии пеленгации по точному (25) и приближенному (26) выражениям. На рисунке 4 приведен типичный характер зависимости СКО пеленгации от углового положения источника помех для различных моделей сигналов.



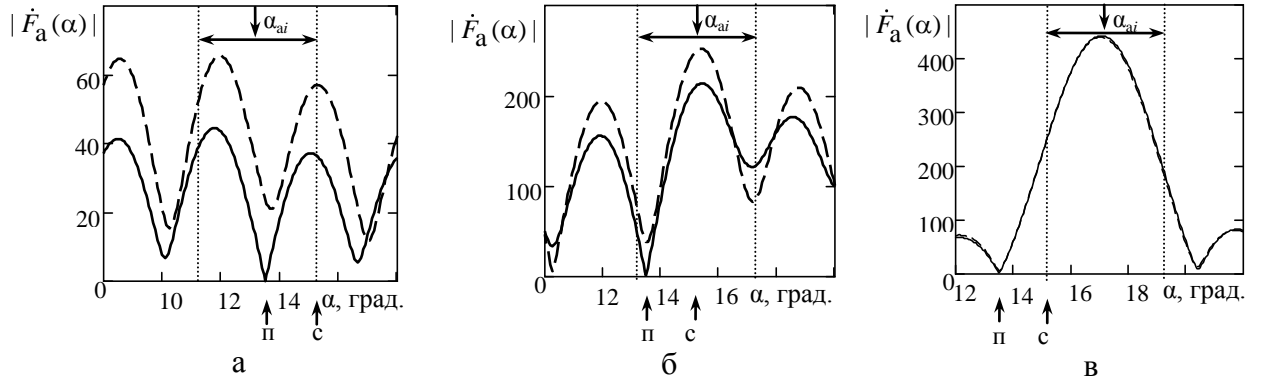
**Рисунок 4.** – Зависимости нормированной ошибки оценивания угловых координат цели от нормированного углового отклонения источника помехи

Важное значение имеют эффекты деградации ПК, когда из-за ошибок калибровки и неточности задания ДН  $\dot{K}_n \neq 1$  и вектор искаженных ДН будет равен  $\mathbf{s}_{\text{иск}}(\alpha) = \mathbf{Ks}(\alpha)$ .

Путем моделирования установлено, что выходе из строя (изменении коэффициента усиления на  $\pm 10$  дБ или фазы на  $90^\circ$  и более) до  $N - 1$  компенсационных каналов, обнаружитель-измеритель сохраняет свою работоспособность.

Причиной этого эффекта является сохранение формы ДН  $|\dot{F}_a(\alpha)|$  адап-

тированного ПК для части углов  $\alpha_{ai}$  ориентации АС (рисунок 5).



а – при  $\alpha_{ai}=13^\circ$ ; б – при  $\alpha_{ai}=15^\circ$ ; в – при  $\alpha_{ai}=17^\circ$

Рисунок 5. – Форма модуля ДН адаптированного приемного канала для различных положений антенной системы

При близком расположении максимума ГЛ основного ПК и помехи, реализуемая ДН (сплошная кривая) заметно отличается от модельной (пунктир). При увеличении отклонения различия между реализуемой и модельной ДН уменьшаются. Так как модельные значения адаптированной ДН используются для формирования опорного сигнала (10), то на части интервала наблюдения отсчеты принимаемой реализации будут резко отличаться от опорного сигнала, накапливаться некогерентно и с малым весом. Отсчеты для угловых положений, когда модельная и реализуемая адаптированные ДН близки, будут иметь большую амплитуду, весовой коэффициент и накапливаться когерентно. Выход из строя ПК сопровождается снижением максимума и искажением формы РС, но работоспособность обнаружителя-измерителя сохраняется.

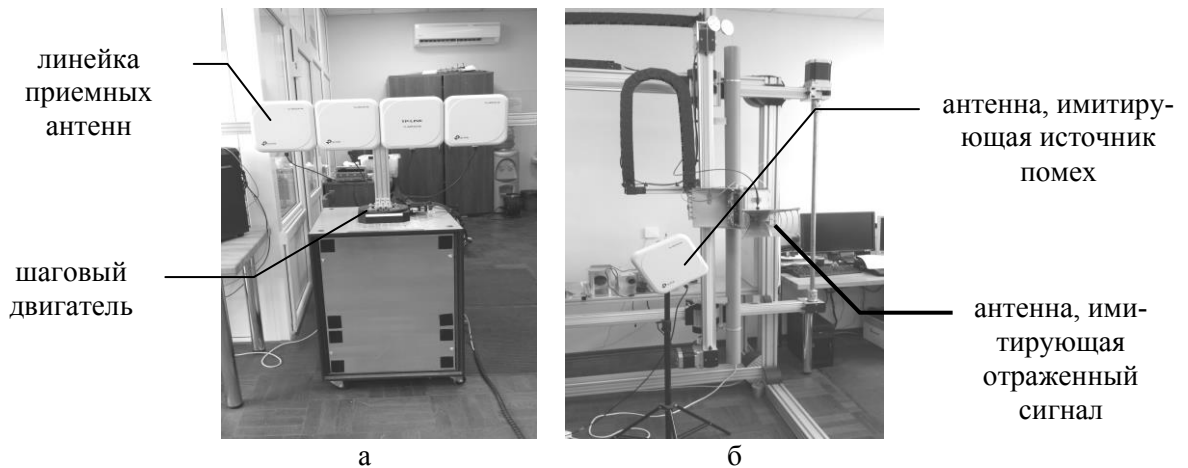
Для определения степени деградации использованы коэффициенты различия форм реальной  $\omega_i^+ s_{иск}(\alpha)$  и модельной  $\omega_i^+ s(\alpha)$  адаптированных ДН для всех  $i$ -х периодов повторения и среднее значение указанных коэффициентов:

$$\gamma_i = \int_{\alpha_{ai} - \frac{\Delta\alpha_{0,5}}{2}}^{\alpha_{ai} + \frac{\Delta\alpha_{0,5}}{2}} |\omega_i^+ s_{иск}(\alpha) - \omega_i^+ s(\alpha)| d\alpha \left( \int_{\alpha_{ai} - \frac{\Delta\alpha_{0,5}}{2}}^{\alpha_{ai} + \frac{\Delta\alpha_{0,5}}{2}} |\omega_i^+ s(\alpha)| d\alpha \right)^{-1} \quad (27); \quad \bar{\gamma} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \gamma_i. \quad (28)$$

Для случая малой степени деградации принималось  $\dot{K}_n = (1 + \xi_{An}) e^{j\xi_{\varphi n}}$ , где  $\xi_{An}$ ,  $\xi_{\varphi n}$  – независимые центрированные гауссовы с.в. со средними квадратическими отклонениями  $\sigma_A, \sigma_\varphi$  ( $\sigma_A < 0,3$ ). Методом моделирования установлено, что при наличии трех источников внешних помех и четырех компенсационных каналов при  $\sigma_A = 0,3$  и  $\sigma_\varphi = 30^\circ$  среднее значение  $\bar{\gamma} = 0,1 \dots 0,2$ , а дисперсия ошибки оценивания УК увеличивается не более чем в 3 раза в сравнении со случаем идентичных ПК. Ошибки измерения не превышают 10% от ширины главного лепестка ДН основного канала.

Работоспособность и эффективность алгоритмов подтверждалась в ходе полунатурного моделирования [12] с использованием лабораторной установки (рисунок б), в составе макета многоканальной приемной системы с механическим сканированием и имитатора ОС и помех. Макет приемной системы представлял собой линейную решетку из антенн TL-ANT2414A, устанавливаемых

на несущем кронштейне, и 4-х приемную систему с преобразованием сигнала в цифровой вид. Мощности излучения регулировалась аттенюаторами.

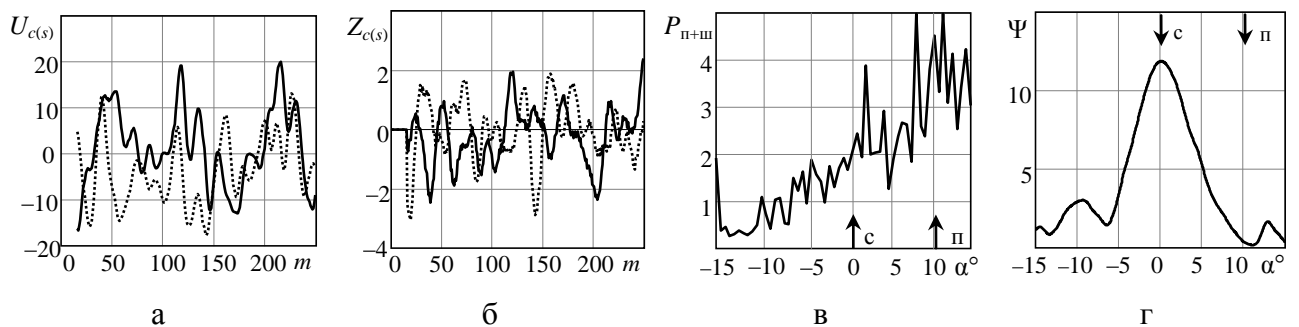


а – линейная решетка; б – расположение антенны ОС и источника помех

Рисунок 6. – Состав лабораторной установки

Несущий кронштейн через штангу присоединялся к валу шагового двигателя, обеспечивающего вращение по азимуту. Выходные сигналы четырехканальной приемной системы подвергались бесквадратурному аналогоцифровому преобразованию, записывались и далее обрабатывались программно. Приемные каналы калибровались в беспомеховых условиях с ошибкой калибровки порядка 0,1 по относительной амплитуде и единицы градусов по фазе.

Пример обработки для одной из реализаций ( $I=57$ , ОСШ по одному импульсу пачки и ОПШ  $-2,1$  дБ и 26 дБ) приведен на рисунке 7. Несмотря на то, что сигнал после компенсации визуально не наблюдается, сформирован максимум РС с малой ошибкой оценивания УК.



а – до компенсации; б – после компенсации; в – зависимости мощности остатков помех и взвешенных шумов от углового положения АС; г – форма решающей статистики

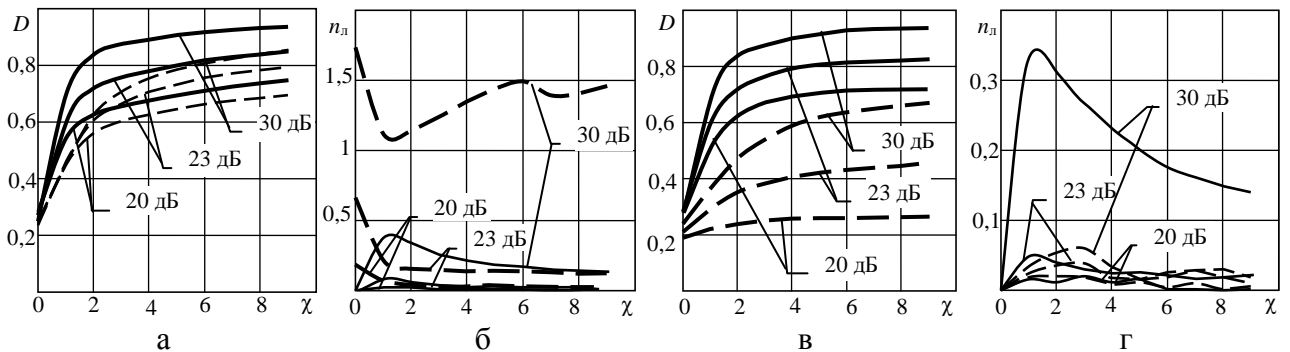
Рисунок 7. – Вид квадратурных компонент в одном из периодов повторения

Результаты полунатурного моделирования подтвердили возможность высокоточного измерения УК при практически достижимых ошибках калибровки в том числе при малых, 3...5 раз меньше ширины главного лепестка, угловых отклонения источника помехи от цели.

В *четвертой главе* представлен оценочно-компенсационный алгоритм обнаружения-измерения дальности элементов ГЦ для РЛС с относительно низкой разрешающей способностью по дальности [1, 15]. Основной идеей является последовательная компенсация ОС с различающимися амплитудами в прини-

маемой реализации. На каждом  $m$ -м шаге оценивается мощность шума  $\hat{\sigma}_m^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\dot{Y}(t_i)|^2$ , где  $\dot{Y}(t_i)$  – сигнал на входе СФ,  $N$  – число отсчетов, проверяется условие обнаружения  $\max_i |\dot{Y}_{out}(t_i)|^2 > \ell_n \hat{\sigma}_m^2$ , где  $\ell_n$  – нормированный порог, оценивается время задержки  $\hat{t}_m = \arg \max_t |\dot{Y}_{out}(t)|$  и комплексная амплитуда  $\hat{A}_m e^{j\hat{\varphi}_m} = \dot{Y}_{out}(\hat{t}_m)$  ОС и вычитается масштабная копия сигнала из принимаемых реализаций на входе СФ  $\dot{Y}(t) = \dot{Y}(t) - \hat{A}_m e^{j\hat{\varphi}_m} \dot{S}(t - \hat{t}_m) / K_{сж}$  и выходе  $\dot{Y}_{out}(t) = \dot{Y}_{out}(t) - \hat{A}_m e^{j\hat{\varphi}_m} \dot{S}_{out}(t - \hat{t}_m)$  СФ. Указанные шаги повторяются до тех пор, пока происходит обнаружение очередного сигнала.

Исследование эффективности алгоритма проводилось методом имитационного моделирования при сравнении результатов с традиционным алгоритмом, на основе параметрической стабилизации ложных тревог (ЛТ) без/и при использовании оконных функций (ОФ). Принимались допущения: времена задержки между соседними целями в составе групповой являются независимыми экспоненциально распределенными случайными величинами со средним значением  $\bar{x}$ ; сигналы, отраженные сигналы имеют релейевские амплитуды с одинаковым средним значением. Полученные при моделировании оценки времени задержки  $m = \overline{1, M}$  обнаруженных сигналов при наличии  $n = \overline{1, N}$  истинных разделялись на случаи правильного обнаружения и ЛТ путем оценки квадратов разности времен их задержки. На рисунке 8 приведены семейства зависимостей вероятности ПО и числа ЛТ (на одну ГЦ) от параметра  $\chi = \bar{x} \Delta f_0$  – нормированного к разрешающей способности РЛС по дальности среднего расстояния между элементами ГЦ.



а, б – без оконной обработки; в, г – с оконной обработкой

Рисунок 8. – Зависимость вероятности ПО и числа ЛТ от параметра  $\chi$

Установлено, что при среднем расстоянии между элементами ГЦ в 1...3 элемента разрешения и типовых ОСШ 20...30 дБ оценочно-компенсационный алгоритм обеспечивает повышение вероятности ПО в сравнении со штатным алгоритмом на 0,1..0,2 и 0,3...0,4 без и с использованием ОФ соответственно. Среднее число ЛТ на ГЦ из 4-х ВО при использовании алгоритм не превышает 0,2. Для штатного алгоритма без ОФ это число при больших ОСШ может составить до 1,5, а при использовании ОФ – до 0,35. Для случая наличия в составе групповой одной доминирующей (в 3...5 раз) по мощности ОС цели преимущества оценочно-



компенсационный алгоритма перед штатным проявляются еще более значимо.

В *пятой главе* приведена методика и результаты комплексного исследования эффективности алгоритмов на этапах обнаружения и сопровождения траектории ВО обзорной РЛС [13, 14]. Методика построена на моделировании процессов первичной и вторичной обработки информации и включала в себя блок пространственных соотношений, адаптивные алгоритмы первичной обработки, процедуры захвата и сброса целей с сопровождения и калмановской фильтрации для маневрирующей цели. Исследовалось влияние длительности интервала адаптации, вида алгоритма адаптации (НОМ или *LMS*), числа источников помех, плотности МО, траекторий ВО и ИП на показатели полноты – относительного числа сопровождаемых целей и точности (нормированной к ширине ГЛ ДН основного канала) выдаваемой информации. Рассматривались ТС-1 когда помехи воздействовали по БЛ ДН основного канала и сложная ТС-2 с воздействием помех преимущественно по ГЛ ДН основном канала. Результаты приведены на таблице 1.

Таблица 1. – Обобщенные показатели полноты и точности информации

Тип ТС	Известный обнаружитель-измеритель с формированием провалов в ДН компенсационных каналов при дальности				Предлагаемый обнаружитель-измеритель при дальности			
	50...100 км		100...200 км		50...100 км		100...200 км	
	Полнота	Точность	Полнота	Точность	Полнота	Точность	Полнота	Точность
ТС-1	>0,95	0,1...0,15	0,7...0,8	0,1...0,15	>0,95	0,1...0,15	<b>&gt;0,95</b>	0,1...0,15
ТС-2	0,8...0,9	0,15...0,2	0,1...0,2	0,3...0,4	>0,95	0,1...0,15	<b>0,7...0,8</b>	0,15...0,2

Таким образом, использование обнаружителя-измерителя угловых координат обзорной РЛС с обоснованными одно- и двухэтапными адаптивными алгоритмами обработки обеспечивает повышение полноты радиолокационной информации в наиболее сложных сигнально-помеховых ситуациях с уровня 0,1...0,2 до уровня 0,7...0,8. Нормированные к разрешающей способности по азимуту средние квадратические ошибки сопровождения по азимуту составят 0,15...0,2.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. На основе математических моделей принимаемых реализаций синтезированы квазиоптимальные одно- и двухэтапный алгоритмы совместного обнаружения и оценивания угловых координат ВО в условиях внешних помех. Одноэтапный алгоритм, реализуемый при отсутствии МО, включает операции пространственной компенсации помех в каждом периоде повторения с «обелением» результатов во временной области, вычисления измененного опорного сигнала, оценки мощности полезного сигнала методом наименьших квадратов, построения решающей статистики и ее максимизацию. Двухэтапный алгоритм реализуется при наличии МО и включает предварительный этап, на котором осуществляется пространственная компенсация помех, оценивание доплеровского сдвига частоты МО и их когерентная компенсация в каждом

приемном канале, и заключительный этап, аналогичный одноэтапному алгоритму с учетом изменения формы сигнала на первом этапе [2, 3, 5, 7, 9, 16, 19].

2. Получены точные и приближенные аналитические выражения для дисперсии ошибок оценивания УК, базирующиеся на построении матрицы Фишера при совместной оценке направления прихода и мощности флуктуирующего ОС и параболической аппроксимации среднего значения решающей статистики в окрестности направления на цель. Показана сходимость точных и приближенных аналитических оценок и результатов компьютерного моделирования. Получены результаты компьютерного и полунатурного моделирования, определяющие показатели эффективности функционирования обнаружителей-измерителей с многоканальными приемными системами с учетом ошибок калибровки приемных трактов [4, 6, 8, 10, 11, 12, 17, 18, 20, 21, 22].

3. Обоснован оценочно-компенсационный алгоритм обнаружения-измерения дальности элементов групповой цели, основанный на итерационном обнаружении, оценивании времени прихода и комплексной амплитуды доминирующего сигнала и вычитание его масштабной копии из принимаемой реализации и оценки уровня шумов для последующего шага. Показано, что применение алгоритма для характерного диапазона отношений сигнал/помеха+шум обеспечивает стабилизацию ложных тревог и повышение вероятности правильного обнаружения элементов групповой цели [1, 15].

4. Разработана методика и выполнено комплексное исследование эффективности функционирования обнаружителей-измерителей УК целей в составе обзорных РЛС с многоканальными АС в сложных сигнально-помеховых ситуациях. Определены количественные показатели повышения качества выдаваемой радиолокационной информации за счет применения разработанных алгоритмов [13, 14].

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

Разработанные адаптивные алгоритмы и методики исследования их эффективности могут быть использованы при создании перспективных и модернизации существующих радиолокационных станций обнаружения и сопровождения воздушных объектов с повышенными требованиями по помехоустойчивости на предприятиях и в организациях Республики Беларусь (ОАО «КБ Радар», ОАО «Алевкурп») и Социалистической Республики Вьетнам.

Результаты диссертации использованы (приложения Д) акционерной технологической компанией ОТП FLC Viet Nam (ОТП FLC Technologies Jsc.) при обосновании технического облика и практической разработке перспективных радиолокационных средств обнаружения воздушных объектов и УО БГУИР при выполнении НИР ГБ № 15-2028 «Разработка научных основ, принципов формирования и обработки сигналов в радиотехнических системах новых поколений, работающих в условиях больших динамических диапазонов сигналов», НИР ГБ № 20-2006 «Разработка способов обработки сигналов, принципов построения многоканальных и многочастотных радиотехнических средств и систем нового поколения с повышенными информационными возможностями и помехозащищенностью», а также внедрены в учебный процесс кафедры информационных радиотехнологий УО БГУИР.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Ву Тхань Ха. Совместное обнаружение- измерение дальности элементов групповой цели в обзорных радиолокационных станциях с использованием оценочно- компенсационного подхода / Ву Тхань Ха, С. В. Козлов // Доклады БГУИР. – 2018. – № 4(114). – С. 79–86.

2. Ву Тхань Ха. Оценивание угловых координат в обзорных радиолокационных станциях с подсистемами пространственной компенсации помех / Ву Тхань Ха, С. В. Козлов // Доклады БГУИР. – 2019. – № 4(122). – С. 48–56.

3. Ву Тхань Ха. Алгоритмы обработки сигналов в радиолокационных измерителях угловых координат со сканирующей многоканальной антенной системой / Ву Тхань Ха, С. В. Козлов // Журнал радиоэлектроники. – 2019. – № 11. – С. 1–29. DOI 10.30898/1684-1719.2019.11.10.

4. Ву Тхань Ха. Потенциальная точность квазиоптимальных радиолокационных измерителей угловых координат со сканирующей многоканальной антенной системой / Ву Тхань Ха, С. В. Козлов // Доклады БГУИР. – 2020. – № 3(T18). – С. 5–13. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-3-5-13>.

### Статьи в сборниках материалов научных конференций

5. Ву Тхань Ха. Алгоритмы оценивания угловых координат в обзорных РЛС с многоканальными приемными системами / Ву Тхань Ха, С. В. Козлов // Радиолокация, навигация и связь: материалы XXV междунар. науч.-техн. конф, Воронеж, Россия, 16–18 апр. 2019 г. – Воронеж, 2019. – Том. 3. – С. 102–115.

6. Ву Тхань Ха. Статистические характеристики обнаружения и оценивания угловых координат целей в обзорных РЛС с многоканальными приемными системами / Ву Тхань Ха, С. В. Козлов // Радиолокация, навигация и связь: материалы XXV междунар. науч.-техн. конф, Воронеж, Россия, 16–18 апр. 2019 г. – Воронеж, 2019. – Том. 3. – С. 345–355.

7. Ву Тхань Ха. Особенности оценивания угловых координат в радиолокационных средствах с коническим сканированием и пространственной компенсацией активных шумовых помех / Ву Тхань Ха, С. В. Козлов, А. Н. Мороз // Радиолокация, навигация и связь: материалы XXV междунар. науч.-техн. конф, Воронеж, Россия, 16–18 апр. 2019 г. – Воронеж, 2019. – Том. 3. – С. 253–260.

8. Ву Тхань Ха. Потенциальные возможности по оцениванию угловых ко-

ординат в обзорных РЛС с системами адаптивной пространственной компенсации помех / Ву Тхань Ха, С. В. Козлов // Системы радиолокации: материалы 8-й междунар. науч. конф. по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения, Минск, Беларусь, 16–18 мая. 2019 г. – Минск, 2019. – Часть. 2. – С. 33–38.

9. Ву Тхань Ха. Квазиоптимальный двухэтапный алгоритм функционирования радиолокационного измерителя угловых координат со сканирующей многоканальной антенной системой при наличии мешающих отражений и внешних помех / Ву Тхань Ха, С. В. Козлов // Радиолокация, навигация и связь: материалы XXVI междунар. науч.-техн. конф, Воронеж, Россия, 29 сен. – 01 окт. 2020 г. – Воронеж, 2020. – Том. 3. – С. 200–215.

10. Ву Тхань Ха. Статистические эквиваленты квазиоптимальных радиолокационных измерителей угловых координат со сканирующей многоканальной антенной системой / Ву Тхань Ха, С. В. Козлов // Радиолокация, навигация и связь: материалы XXVI междунар. науч.-техн. конф, Воронеж, Россия, 29 сен. – 01 окт. 2020 г. – Воронеж, 2020. – Том. 4. – С. 63–72.

11. Ву, Тхань Ха. Обоснование требований к точности калибровки приемных каналов радиолокационного измерителя угловых координат со сканирующей многоканальной антенной системой / Ву Тхань Ха, С. В. Козлов // Сборник открытой республиканской интернет-конференции «Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020». – Минск, 2020. – С. 141–145.

12. Ву, Тхань Ха. Результаты экспериментальных исследований адаптивных алгоритмов оценивания угловых координат целей в радиолокационном измерителе со сканирующей многоканальной антенной системой в условиях помех / Ву Тхань Ха, С. В. Козлов и др. // Сборник открытой республиканской интернет-конференции «Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020». – Минск, 2020. – С. 163–167.

13. Ву, Тхань Ха. Методика комплексного исследования эффективности функционирования обзорных РЛС обнаружения воздушных объектов с многоканальными приемными системами в сложных сигнально-помеховых ситуациях / Ву Тхань Ха // Сборник открытой республиканской интернет-конференции «Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020». – Минск, 2020. – С. 131–135.

14. Ву, Тхань Ха. Результаты комплексного исследования эффективности функционирования обзорных РЛС обнаружения воздушных объектов с многоканальными приемными системами в сложных сигнально-помеховых ситуациях / Ву Тхань Ха // Сборник открытой республиканской интернет-конференции «Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020». – Минск, 2020. – С. 158–162.

**Тезисы докладов в сборниках материалов научных конференций**

15. Ву Тхань Ха. Оценочно-компенсационный алгоритм обнаружения-измерения дальности элементов групповой цели в обзорных радиолокационных станциях / Ву Тхань Ха // Радиотехнические системы: материалы 54-й науч. конф. аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Минск, 23–27 апр. 2018 г. – Минск, 2018. – С. 31–32.

16. Ву Тхань Ха. Квазиоптимальные алгоритмы оценивания угловых координат в обзорных РЛС с многоканальными приемными системами / Ву Тхань Ха // Радиотехнические системы: материалы 55-й науч. конф. аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Минск, 22–26 апр. 2019 г. – Минск, 2019. – С. 36–37.

17. Ву Тхань Ха. Методика расчета статистических характеристик оценивания угловых координат целей в обзорных РЛС с многоканальными приемными системами / Ву Тхань Ха // Радиотехнические системы: материалы 55-й науч. конф. аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Минск, 22–26 апр. 2019 г. – Минск, 2019. – С. 38–39.

18. Ву Тхань Ха. Характеристики измерения угловых координат цели в обзорных РЛС с подсистемами пространственной компенсации помех / Ву Тхань Ха // Радиотехнические системы: материалы 55-й науч. конф. аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Минск, 22–26 апр. 2019 г. – Минск, 2019. – С. 40–41.

19. Ву Тхань Ха. Двухэтапный алгоритм оценивания угловых координат для РЛС со сканирующей многоканальной антенной системой / Ву Тхань Ха // Радиотехнические системы: материалы 56-й науч. конф. аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Минск, 22–26 апр. 2020 г. – Минск, 2020. – С. 121–122.

20. Ву Тхань Ха. Оценка точности квазиоптимальных радиолокационных измерителей угловых координат со сканирующей многоканальной антенной системой / Ву Тхань Ха // Радиотехнические системы: материалы 56-й науч. конф. аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Минск, 22–26 апр. 2020 г. – Минск, 2020. – С. 123–124.

21. Ву Тхань Ха. Оценка влияния деградации приемных каналов на эффективность радиолокационного измерителя угловых координат со сканирующей многоканальной антенной системой / Ву Тхань Ха, С. В. Козлов // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества: I Российскую науч. конф., Омск, Россия, 6–8 окт. 2020 г. – Омск, 2020. – С. 130–131.

22. Ву Тхань Ха. Особенности функционирования радиолокационного из-

мерителя угловых координат со сканирующей многоканальной антенной системой в условиях деградации характеристик приемных каналов / Ву Тхань Ха, С. В. Козлов // Современные средства связи: материалы XXV междунар. науч.-техн. конф, Минск, Беларусь, 22–23 окт. 2020 г. – Минск, 2020. – С. 58–60.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'S. V. Kozlov', located in the lower right quadrant of the page.

## РЭЗІЮМЭ

Бу Тхань Ха

Адаптыўныя алгарытмы апрацоўкі сігналаў у выяўляльніках-вымяральніках кутніх каардынатаў паветраных аб'ектаў са сканавальнай шматканальнай антэнай сістэмай

**Ключавыя словы:** адаптыўны алгарытм, паветраны аб'ект, вымяральнік, шматканальная антэнная сістэма, дэтэктар, радыёлакацыйная інфармацыя, вырашальная статыстыка, першасная апрацоўка, прыёмны канал, вуглавыя каардынаты, функцыя адносіны праўдападабенства.

**Мэта працы:** павышэнне верагоднасці выяўлення і дакладнасці вымярэння каардынатаў паветраных аб'ектаў за кошт рэалізацыі спецыялізаваных алгарытмаў першаснай апрацоўкі ў выяўляльніках-вымяральніках са сканавальнай шматканальнай антэнай сістэмай для складаных сігнала-перашкод сітуацый.

**Метады даследавання і выкарыстоўваная апаратура:** тэорыя аптымальнага прыёму, матэматычнае і камп'ютэрнае мадэляванне, статыстычны аналіз, полунатурное моделіраванне, модуль імітатара ATES TSM3 FPGA.

**Атрыманя вынікі і іх навізна:** прапанаваны адно- двухэтапныя алгарытмы сумеснага выяўлення і ацэньвання кутніх каардынатаў паветранага аб'екта ва ўмовах знешніх перашкод у вольнай прасторы і пры наяўнасці адлюстраванняў, якія адрозніваюцца аперацыямі аб'ялення прыманай рэалізацыі ў часовай вобласці ў кожным перыядзе паўтарэння, ацэнкі магутнасці і міждуперыяднага коэфіцыента карэляцыі адлюстраванага сігнала метадам най-меншых квадратаў і пабудовы ацэнкі яго карэляцыйнай матрыцы. Алгарытмы дазваляюць знізіць памернасць апрацоўваных матрыц і вектараў прапарцыя-нальна ліку перыядаў паўтарэння на інтэрвале назірання. Атрыманя аналітычныя суадносіны, якія вызначаюць ніжнюю мяжу Рао-Крамера для дысперсіі памылкі ацэнкі кутніх каардынат мэты пры апрыёры невядомай магутнасці адлюстраванага сігнала, і набліжаныя выразы для дысперсіі, якія ўлічваюць структуру адно- і двухэтапных алгарытмаў апрацоўкі і якія дазваляюць колькасна ацаніць магчымасці выяўляльніка-вымяральніка з шматканальнай антэнай сістэмай. Пацверджана працаздольнасць алгарытмаў пры дасягальных памылках каліброўкі прыёмных каналаў. Прапанаваны ацэначна-карэляцыйнай-кампенсатыўны алгарытм выяўлення-вымярэння далёкасці элементаў групавой мэты.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні:** алгарытмы апрацоўкі сігналаў і метадыкі даследавання іх эфектыўнасці могуць выкарыстоўвацца пры распрацоўцы пер-спектывных і мадэрнізацыі існуючых радыёлакацыйных сродкаў.

**Вобласць ужывання:** праектаванне і ацэнка эфектыўнасці радыёлакацыйных сродкаў выяўлення паветраных аб'ектаў.

**РЕЗЮМЕ**

Бу Тхань Ха

Адаптивные алгоритмы обработки сигналов в обнаружителях-измерителях угловых координат воздушных объектов со сканирующей многоканальной антенной системой

**Ключевые слова:** адаптивный алгоритм, воздушный объект, измеритель, многоканальная антенная система, обнаружитель, радиолокационная информация, решающая статистика, первичная обработка, приемный канал, угловые координаты, функция отношения правдоподобия.

**Цель работы:** повышение вероятности обнаружения и точности измерения координат воздушных объектов за счет реализации специализированных алгоритмов первичной обработки в обнаружителях-измерителях со сканирующей многоканальной антенной системой для сложных сигнально-помеховых ситуаций.

**Методы исследования и используемая аппаратура:** теория оптимального приема, математическое и компьютерное моделирование, статистический анализ, полунатурное моделирование, модуль имитатора ATES TSM3 FPGA.

**Полученные результаты и их новизна:** предложены одно- и двухэтапные алгоритмы совместного обнаружения и оценивания угловых координат воздушного объекта в условиях внешних помех в свободном пространстве и при наличии мешающих отражений, отличающиеся операциями обеления принимаемой реализации во временной области в каждом периоде повторения, оценки мощности и междупериодного коэффициента корреляции отраженного сигнала методом наименьших квадратов и построения оценки его корреляционной матрицы и позволяющие снизить размерность обрабатываемых матриц и векторов пропорционально числу периодов повторения на интервале наблюдения. Получены аналитические соотношения, определяющие нижнюю границу Рао-Крамера для дисперсии ошибки оценки угловых координат цели при априори неизвестной мощности отраженного сигнала, и приближенные выражения для дисперсии, учитывающие структуру одно- и двухэтапных алгоритмов обработки и позволяющие количественно оценить возможности обнаружители-измерители с многоканальной антенной системой. Подтверждена работоспособность алгоритмов при достижимых ошибках калибровки приемных каналов. Предложен оценочно-корреляционно-компенсационный алгоритм обнаружения-измерения дальности элементов групповой цели.

**Рекомендации по использованию:** алгоритмы обработки сигналов и методики исследования их эффективности могут использоваться при разработке перспективных и модернизации существующих радиолокационных средств.

**Область применения:** проектирование и оценка эффективности радиолокационных средств обнаружения воздушных объектов.



**RESUME**

Vu Thanh Ha

Adaptive algorithms processing signal in the detectors- meter of angular coordinates of airborne objects with scanning multi-channel antenna system

**Keywords:** adaptive algorithm, airborne object, meter, multichannel antenna system, detector, radar information, decision statistics, primary processing, receiving channel, angular coordinates, likelihood ratio function.

**The purpose of the work:** increasing the probability of detection and the accuracy of measuring the coordinates of air objects through the implementation of specialized algorithms for primary processing in detectors-meters with a scanning multi-channel antenna system for complex signal and noise situations.

**Research methods and equipment used:** theory of optimal reception, mathematical and computer modeling, statistical analysis, semi-natural modeling, simulator module ATES TSM3 FPGA.

**The results obtained and their novelty:** proposed one- and two-stage algorithms for joint detection and estimation of the angular coordinates of an airborne object under conditions of external interference in free space and in the presence of interfering reflections, differing in the operations of whitening the received implementation in the time domain in each repetition period, estimating the power and inter-period correlation coefficient of the reflected signal by the method of least squares and constructing an estimate of its correlation matrix and allowing to reduce the dimension of the processed matrices and vectors in proportion to the number of repetition periods in the observation interval. Analytical relations are obtained that determine the Rao-Cramer lower bound for the variance of the error in estimating the angular coordinates of the target with a priori unknown power of the reflected signal, and approximate expressions for the variance that take into account the structure of one- and two-stage processing algorithms and allow quantitatively assessing the capabilities of detectors-meters with multichannel antenna system. The operability of the algorithms was confirmed with achievable errors in the calibration of the receiving channels. An estimation-correlation-compensation algorithm for detecting-measuring the range of elements of a group target is proposed.

**Recommendations for use:** algorithms processing signal and methods for studying their effectiveness can be used in the development of advanced and modernization of existing radar facilities.

**Application field:** designing and evaluating the effectiveness of radar facilities detecting airborne objects.

*Научное издание*

**Ву Тхань Ха**

**АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В  
ОБНАРУЖИТЕЛЯХ-ИЗМЕРИТЕЛЯХ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ  
ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ СО СКАНИРУЮЩЕЙ  
МНОГОКАНАЛЬНОЙ АНТЕННОЙ СИСТЕМОЙ**

**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 12.02.2021.	Формат 60×84 <sup>1</sup> / <sub>16</sub> .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.	Заказ 90.

---

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.  
ЛИ №02330/264 от 14.04.2014  
220013, Минск, П. Бровки, 6