

**Национальная академия наук Кыргызской Республики
Институт машиноведения и автоматике**

Кыргызско-Российский Славянский университет им. Б.Н. Ельцина

Диссертационный совет Д 05.23.686

На правах рукописи
УДК: 681.5.032:004(575.2) (043.3)

Исабаев Кайыргай Жулдызтаевич

**Исследование и разработка интеллектуальной аппаратно-программной
платформы анализа радиолокационных сигналов и обработки
радиолокационной информации**

05.13.05 - элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Бишкек – 2024

Работа выполнена в Институте машиноведения, автоматике и геомеханики Национальной академии наук Кыргызской Республики

Научный руководитель: **Брякин Иван Васильевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией информационно-измерительных систем Института машиноведения, автоматике и геомеханики Национальной академии наук Кыргызской Республики

Официальные оппоненты: **Галбаев Жалалидин Токтобаевич**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электромеханики Энергетического института Кыргызского Государственного технического университета им. И.Раззакова
Ибрагимова Озода Абдулхаковна, доктор технических наук, доцент кафедры электроснабжения Ташкентского государственного транспортного университета

Ведущая организация: кафедра электроники, телекоммуникации и космических технологий, института автоматике и информационных технологий Казахского Национального исследовательского технического университета им. К.И. Сатпаева, адрес: 050000, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева 22.

Защита диссертации состоится 21 июня 2024 года в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 05.23.686 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора (кандидата) физико-математических и технических наук при Институте машиноведения и автоматике Национальной академии наук Кыргызской Республики и Кыргызско-Российском Славянском университете им. Б.Н. Ельцина по адресу: 720071, г. Бишкек, пр. Чуй, 265, ауд. 349. Идентификационный код онлайн трансляции защиты диссертации <https://vc.vak.kg/b/052-lto-twi-0js>.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках Национальной академии наук Кыргызской Республики (720071, г. Бишкек, пр. Чуй, 265), Кыргызско-Российского Славянского университета им. Б.Н. Ельцина 9720000, г. Бишкек, ул. Киевская 44) и на сайте Национальной аттестационной комиссии при Президенте Кыргызской Республики: https://vak.kg/diss_sovety/d-05-23-686/

Автореферат разослан 17 мая 2024 году.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Д 05.23.686, к.ф.-м.н., с.н.с.



Керимкулова Г.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Системы управления войсками (СУВ) является ключевым элементом в обеспечении эффективности и координации всех операций, где одним из важнейших функциональных компонентов является средства управления. Оптимизация средств управления является важной задачей для обеспечения эффективного функционирования различных систем. Это позволяет повысить производительность, снизить расходы и улучшить качество обслуживания. В контексте современного развития технологий (цифровизация процессов, использование алгоритмов машинного обучения, искусственного интеллекта и обработки больших данных), оптимизация средств управления является ключевым элементом успешного управления любым процессом или системой и должна быть постоянно находиться в центре внимания специалистов по управлению.

Связь темы диссертации с приоритетными научными направлениями, крупными научными программами (проектами), основными научно-исследовательскими работами, проводимыми образовательными и научными учреждениями. Диссертационная работа выполнена в порядке личной инициативы.

Цель и задачи исследования. Целью диссертации является повышение эффективности работы системы управления войсками за счет разработки и применения интеллектуальной аппаратно-программной платформы (ИАПП).

Основными **задачами** исследования являются:

1. Исследование существующих методов и технологий анализа радиолокационных сигналов и обработки радиолокационной информации.
2. Разработка ИАПП для проведения анализа радиолокационных сигналов.
3. Создание алгоритмов и программного обеспечения для обработки радиолокационной информации на разработанной платформе.
4. Проведение экспериментов и тестирование разработанной платформы на реальных радиолокационных данных.
5. Оценка эффективности и точности работы ИАПП в сравнении с существующими методами и технологиями.
6. Формулирование выводов и рекомендаций по дальнейшему развитию и применению разработанной платформы в радиолокационных системах.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

- получены новые результаты экспериментальных исследований тропосферного распространения радиоволн, как на равнинных, так и на горных трассах в диапазоне ультракоротких волн (УКВ) для различных сезонов и времен суток;

– разработан прототип нового полигона для радиофизических исследований на базе ИАПП радиолокатора Военно-инженерного института радиоэлектроники и связи (ВИИРЭиС);

– обоснован новый физический эффект в виде многопутности распространение радиоволн (РРВ) при тропосферном и стратосферном распространении;

– предложен способ передачи цифровых данных в радиолокационном сигнале ИАПП радиолокатора;

– разработан новый метод обработки радиолокационной информации с использованием свёрточной нейронной сети, позволяющий снизить порог обнаружения в ИАПП радиолокатора.

Практическая значимость полученных результатов:

1. Передача информации об обнаруженных целях в радиолокационном сигнале позволит повысить надёжность и оперативность передачи данных на командный пункт.

2. Предложенный способ обработки радиолокационной информации с использованием нейронной сети позволяет обнаруживать малоразмерные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и увеличить дальность обнаружения воздушных целей.

3. Внедрение обнаружителя на базе нейронной сети можно осуществить без существенных аппаратных доработок в ИАПП радиолокатора.

Экономическая значимость полученных результатов. Предложенные новые технические решения позволяют улучшить ИАПП радиолокатора без больших затрат на модернизацию или замену радиолокаторов.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

– эффект тропосферного прохождения радиоволн обеспечивает устойчивую передачу информации радиолокационного сигнала РЛС П-18М метрового диапазона радиоволн на дистанциях до 266 км;

– использование импульсной модуляции обеспечивает скорость передачи данных в тропосферном канале в метровом диапазоне радиоволн не менее 6000 бод;

– применение свёрточной нейронной сети в составе обнаружителя обеспечивает скорость его работы, достаточную для его использования в РЛС П-18М;

– применение свёрточной нейронной сети увеличивает коэффициент проводки маневрирующих целей на 30%.

Личный вклад соискателя. Все представленные в диссертации результаты исследований получены лично автором либо при его непосредственном участии. Автор лично участвовал в проведении всех экспериментальных исследований и обработке их результатов.

В работе [1] Исабаеву К.Ж. принадлежит анализ применения технологии космической радарной интерферометрии и получения результирующего раstra превышений с помощью растрового анализа. В работах [2-3] Исабаеву К.Ж. принадлежит анализ и расчет дальности распространения тропосферных станции. В работе [5] Исабаеву К.Ж. принадлежит исследования прохождения радиосигнала и практическая проверка возможности уменьшения интерференционных помех. В работах [6-7] Исабаеву К.Ж. принадлежит калибровка радиолокатора, прием и обработка результатов принятых сигналов. В работах [8-10] Исабаеву К.Ж. принадлежит проведения теоретического расчета измерения высоты в РЛС П-18М, разработка по защите информации на технических средствах и анализ применения и постановка задач по применению и внедрению сверточных нейронных сетей в радиолокатор. В работах [11] и [13] Исабаеву К.Ж. принадлежит расчет коэффициента затухания разными методами и практический расчет коэффициента затухания по методу Введенского. В работах [14-15] Исабаеву К.Ж. принадлежит постановка задачи и проверка практического применения на радиолокаторах.

Апробации результатов диссертации. Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих научных конференциях:

– Международной научно-практической конференции, посвященный 100-летию войск связи «Инфокоммуникационные технологии: Современное состояние и пути развития» (2019 г.) и на межкафедральной научной конференции «Актуальные вопросы развития тактики, боевой техники войск противовоздушной обороны (ПВО). Пути их решения» (28 апреля 2023 г.), г. Алматы, Казахстан.

– V Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства» (27-29 ноября 2020 г.) и на IV Международном научно-техническом форуме (2021 г.), г. Рязань, Россия.

– I Международных научных конференциях «Академики и материалы научных обзоров» (10-11 ноября 2022 г.), г. Хельсинки, Финляндия и «Мировые научные доклады» (17-18 ноября 2022 г.), г. Париж, Франция.

Полнота отражения результатов диссертации в публикациях. По результатам диссертации опубликовано более 17 научных работ – из них в журналах: входящих в базу РИНЦ «Проблемы автоматизации и управления» (4 статьи); «The scientific heritage», «Sciences of Europe», «Маркшейдерия и недропользование» и вестник «Алмаз-Антей» по 1 статье; «Научный аспект» (2 статьи); в военный научно-технический журнал «Научные труды ВИИРЭиС» (1 статья); в научный журнал «Известия НАН. Серия физико-математическая» входит в ВАК РК (1 статья); в журнал «Научный вестник национального горного университета» входит в базу Scopus (1 статья), а также подтвержден

патентом (1 патент на полезную модель) и подана заявление на изобретение (1 патент на изобретение).

Структура и объём диссертации. Диссертация содержит перечень сокращений и обозначений, введение, четыре главы, заключение, практические рекомендации, список использованных источников и приложения.

Полный объём диссертации содержит 149 страниц, в том числе 47 рисунков и 45 таблиц. Список используемых источников содержит 98 наименований.

Диссертант выражает искреннюю благодарность научному руководителю доктору технических наук, профессору Брякину Иван Васильевичу и 5 Департаменту ТОО «Специальное конструкторско-технологическое бюро (СКТБ) «Гранит», в том числе кандидату физико-математических наук Васильеву Иван Вениаминовичу и Проценко Владимир Александровичу, за оказанное содействие и консультации при выполнении диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, приводятся цели и задачи исследований, научная новизна, практическая значимость и представлены основные положения, выносимые на защиту, сформулирована практическая и теоретическая значимость полученных результатов, а также личный вклад автора. Отражены экономическая значимость исследований, результаты апробации и публикации по теме диссертации.

В первой главе, состоящей из двух разделов, приводится «Обзор литературы», общий аналитический обзор современной системы управления войсками и их ключевые аспекты приводится, также обзор литературы по тропосферному распространению радиоволн. По этим результатам издано большое количество научных трудов, например, Давыденко Юрий Ильич (1968), Калинин Анатолий Иванович (1971), Введенский Борис Алексеевич, Колосов Михаил Александрович и Шифрин Яков Соломонович (1965), Гусятинский Игорь Александрович, Немировский Александр Соломонович, Соколов Аркадий Васильевич и Троицкий Владимир Николаевич (1968), Черенкова Елена Лазаревна (1965), Шур Анатолий Абелевич (1972), Долуханов Марк Павлович (1972), а в Российской Федерации – Клиот Евгений Исаакович и Козлов Дмитрий Георгиевич (1994), Серов Всеволод Владимирович (2012), Мацков Александр Александрович, Муха Рэм Николаевич и Цодикова Мая Исаковна (2012), Сандулов Николай Васильевич, Шлома Владимир Иванович, Кожурякин Дмитрий Александрович и Макаров Сергей Викторович (2017), Мандель Аркадий Евсеевич и Замотринский Владимир Алексеевич (2006).

Также зарубежными учеными в 50-х годах были созданы методы расчета, которые вносились в рекомендации в Международный союз электросвязи (МСЭ – ITU International Telecommunications Union) (2020). Рассмотрена обобщенная структура и особенности организации системы управления войсками.

В первом разделе анализируется информация о системе управления войсками, которая рассматривается как организационно-техническая основа управления. Рассматривается ее обобщенная структурная схема, основные ее компоненты и их функциональные назначения.

Во втором разделе приводятся основные сведения об организации и функционировании средств управления для систем управления войсками, а также требования к самим средствам управления. Предлагается вариант обобщенной структурной схемы системы управления войсками с одним многофункциональным средством управления (рисунок 1.1), вместо используемого в настоящее время набора технических систем, каждая из которых обладает лишь одним конкретным функциональным назначением.



Рисунок 1.1 – Обобщенная структурная схема системы управления войсками с одним многофункциональным средством управления

Во второй главе, состоящей из четырех разделов, представлена «Методология и методы исследования» разработки концепция ИАПШ и приводятся основные составляющие такой платформы (рисунок 2.1). Показаны и проанализированы особенности взаимодействия между основными компонентами, а также рассмотрены их функциональные возможности и приведен анализ основных тактико-технических характеристик (ТТХ) РЛС.



Рисунок 2.1 – Основные составляющие ИАПП

Объект исследования. Объектом исследования является система управления войсками.

Предмет исследования. Предметом исследования в диссертационной работе являются функциональные компоненты РЛС П-18М.

Методы исследования. В диссертационной работе применялись методы статистической радиофизики, системный анализ, моделирование и эксперименты на натуральных образцах.

В первом разделе обосновывается роль ИАПП РЛС для оперативной передачи информации в системе управления войсками, а также ее возможности в этой системе.

Во втором разделе представлены структурная блок-схема (рисунок 2.2) и алгоритм функционирования ИАПП (рисунок 2.3), а также рассмотрены взаимодействия между ее компонентами и алгоритм ее функционирования.

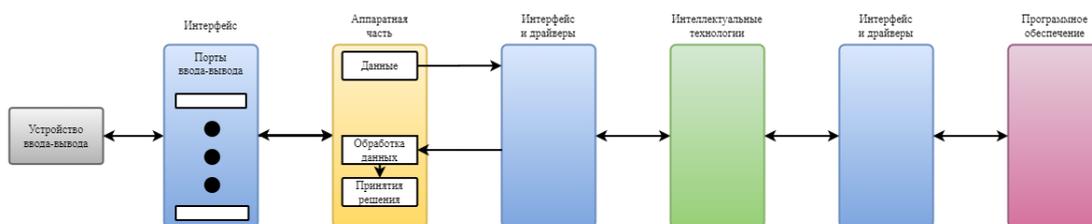


Рисунок 2.2 – Структурная блок-схема ИАПП

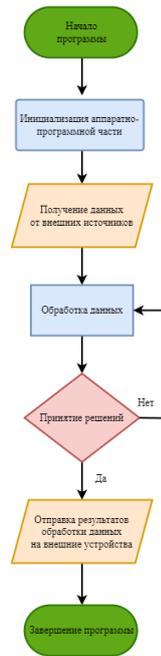


Рисунок 2.3 – Структурная блок-схема функционирования ИАПП

В третьем разделе анализируются особенности условий основных компонентов и режимов работы ИАПП.

В четвертом разделе представлен анализ основных тактико-технических характеристик радиолокационной станции семейства П-18 и особенностей их функционирования, а также приводится обзор направлений модернизации радиолокатора с шифром П-18М. Обосновываются цель и формулируются задачи диссертационной работы.

В третьей главе, состоящей из шести разделов, рассматриваются проблемные вопросы обеспечения оперативной связью аппаратного компонента РЛС П-18М с командным пунктом для передачи целеуказаний на обнаруженные воздушные цели. Обосновывается перспективность использования тропосферной связи для организации передачи целеуказаний.

В первом разделе, обосновывается необходимость создания экспериментального полигона для радиофизических измерений, основанная на наблюдении за радиоизлучением РЛС контроля воздушного пространства, круглосуточно работающих на всей территории Казахстана.

Во втором разделе представлены работы по созданию стенда для регистрации тропосферного РРВ на базе аппаратного компонента радиолокатора П-18М, принадлежащего ВИИРЭиС. Калибровка стенда производилась с помощью специально разработанного в ТОО СКТБ «Гранит» выносного гетеродина. Результаты калибровки приведены на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 - Чувствительность радиоприёмного тракта РЛС П-18М

После калибровки стенда, на радиолокационной станции вместо рабочей программы радиолокатора устанавливалось специальное программное обеспечение, предназначенное для регистрации и обработки принятых радиосигналов от территориально удалённых радиолокаторов.

В состав программно-аппаратного комплекса для регистрации сигналов на РЛС П-18М входят: выносной гетеродин с измерительным приёмником; программы SendBufr, OcsAS, RecBufr_3, KorrRecData_3, SyntAS.

В связи с тем, что объективно существуют ограничения в выборе идеальной позиции для радиолокационной измерительной станции, были измерены углы закрытия для уже существующей позиции в учебном центре с целью определения направлений, с которых исследуемые сигналы, возможно, не будут приниматься. Углы закрытия измерялись с помощью перископической артиллерийской буссоли ПАБ-2М.

В третьем разделе приведены результаты работ по выбору и обоснованию измерительных трасс для мониторинга радиосигналов. Показано, что тропосферное распространение радиоволн во многом зависит от метеорологических условий и рельефа местности, а сезонные, так же, как и суточные, изменения потерь рассеяния зависят от длины радиолинии. Поэтому влияние погодных условий более отчетливо проявляется на трассах малой протяженности (до 300 км).

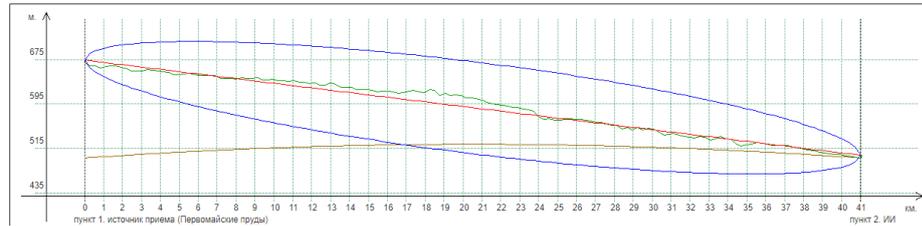
Для измерительных трасс были выбраны как трассы различной протяженности, так и трассы одинаковой протяженности, но с различным рельефом местности. Характеристики трасс приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Характеристики трасс

Номер трассы	Ориентация	Протяженность, км	Рельеф
1	север	41	равнина
2	северо-восток	265	равнина
3	восток	225	гористый
4	юго-восток	266	гористый

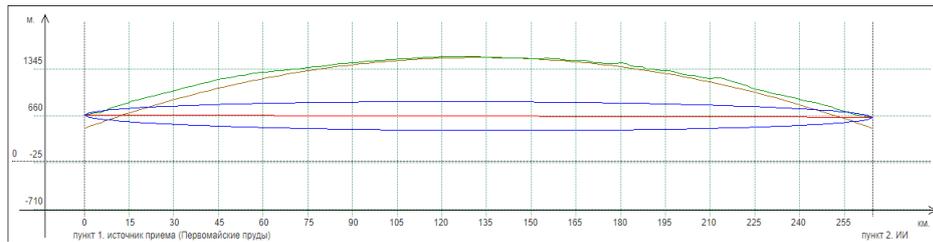
На рисунке 3.2 приведены примеры рельефа испытательных трасс.

Длина интервала, км: 41.02
 Потери в свободном пространстве, дБ: 108.22
Внимание: полузакрытый интервал.



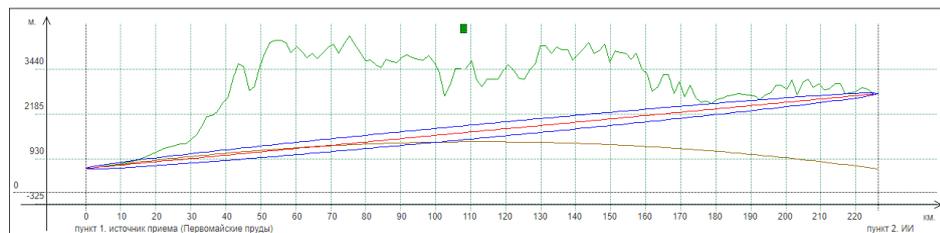
Трасса № 1

Длина интервала, км: 264.53
 Потери в свободном пространстве, дБ: 124.41
Внимание: закрытый интервал.



Трасса № 2

Длина интервала, км: 226.37
 Потери в свободном пространстве, дБ: 123.06
Внимание: закрытый интервал.



Трасса № 3

- | | |
|--|---------------------------------|
| - линия кривизны земной поверхности | - профиль радиолинии |
| - первая зона Френеля | - линия прямой видимости |
| - мачты антенн | - обозначение границ радиолинии |
| - просвет между поверхностью земли и нижней границей первой зоны Френеля | - диаметр первой зоны Френеля |

Рисунок 3.2 - Рельеф местности на измерительных трассах

Для точного наведения антенны аппаратного компонента измерительной РЛС на азимут наблюдаемого радиолокатора было изготовлено специальное устройство для обеспечения точного (до 1 градуса) позиционирования антенны по азимуту.

В четвёртом разделе приводятся результаты наблюдений и регистрации сигналов аппаратного компонента РЛС, а также данные о датах и времени регистрации радиолокационной информации. Показаны типичные виды принятых радиолокационных сигналов с многопутным (многомодовым) характером РРВ (рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 - Принятый сигнал РЛС П-18М учебного центра от РЛС П-18М контрольного пункта №1

Выполнены расчёты высот рассеивающих областей (рисунок 3.4), ряд из которых находится в стратосфере.

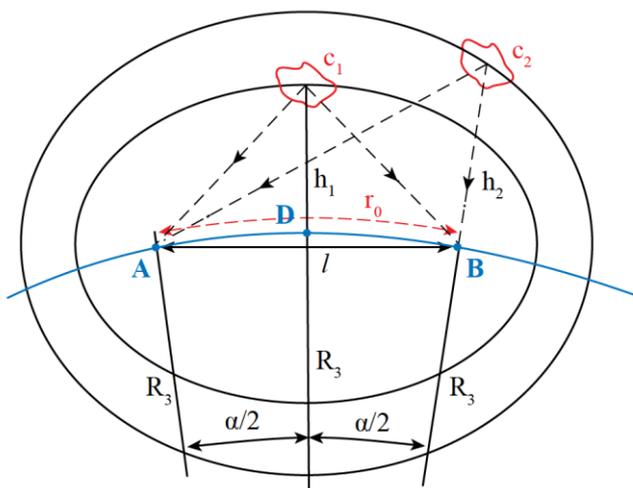


Рисунок 3.4 - Распространение радиоволн, рассеивающихся на неоднородностях атмосферы

Минимальная и максимальная возможные высоты расположения рассеивающих областей рассчитываются по формулам (1) и (2), соответственно:

$$h_1 \approx \sqrt{\frac{(\Delta t_1 c + r_0)^2 - 8R_3^2 \left(1 - \cos\left(\frac{r_0}{2R_3}\right)\right)}{2}} \quad (1)$$

$$h_2 \approx \frac{(r_0 + \Delta t_2 c)^2 - 2R_3^2 \left(1 - \cos\frac{r_0}{R_3}\right)}{2(r_0 + \Delta t_2)} \quad (2)$$

Выполнены расчёты времени приёма множественных переотражений из-за многопутного прохождения сигналов (таблица 3.2).

Таблица 3.2– Расчет времени приема множественных переотражений

Время, дата	t_{\max}	t_{\min}	t_{cp}	СКО
	мкс			
11:55 29.04.2021	74	72	73,94	0,12
10:55 05.05.2021	166	30	74,92	37,88
12:24 28.05.2021	124	120	120,74	1
17:15 07.06.2021	56	42	44,87	1,85
15:49 24.06.2021	48	44	45,47	0,93
10:53 12.02.2022	36	4	10,88	3,06
06:31 31.03.2022	46	14	23,28	5,31
15:53 13.05.2022	32	16	25,35	3,11
23:12 27.05.2022	26	6	15,48	6,76
08:42 28.05.2022	26	20	22,67	1,52
09:02 28.05.2022	28	6	14,22	3,9
13:32 02.06.2022	24	20	22,4	1,92
13:50 02.06.2022	26	6	20	4,86
17:15 03.08.2022	84	68	74,64	6,75
16:12 23.09.2022	26	8	18,33	5,41

При типовом периоде зондирования РЛС П-18М равном 6 миллисекундам, возможна передача информации со скоростью не менее $6000\text{мкс}/166\text{мкс}=36$ бит в секунду даже при обычной импульсной модуляции.

В пятом разделе анализируется структурная схема прототипа синхронизирующего устройства аппаратного компонента РЛС П-18М и предлагается новое техническое решение по её изменению для введения режима передачи данных об обнаруженных целях (рисунок 3.5), где 1 - блок синхронизации (СБХ), 2 - блок синтезатора (СБС), 3 - усилитель мощности (УМ), 4 - блок защиты - антенный коммутатор (БЗАК), 5 - антенно-мачтовое устройство (АМУ), 6 - приёмное устройство (ПРМ), 7 - аппаратура предварительной обработки информации (АПОРЛИ), 8 - автоматизированное рабочее место (АРМ); 10 и 11 – соответственно кодер и переключатель (добавлены в схему прототипа вместо автоматизированной системы управления (АСУ) 9, которая исключена из схемы прототипа).

Данное техническое решение защищено патентом на полезную модель № 7426 Республики Казахстан.

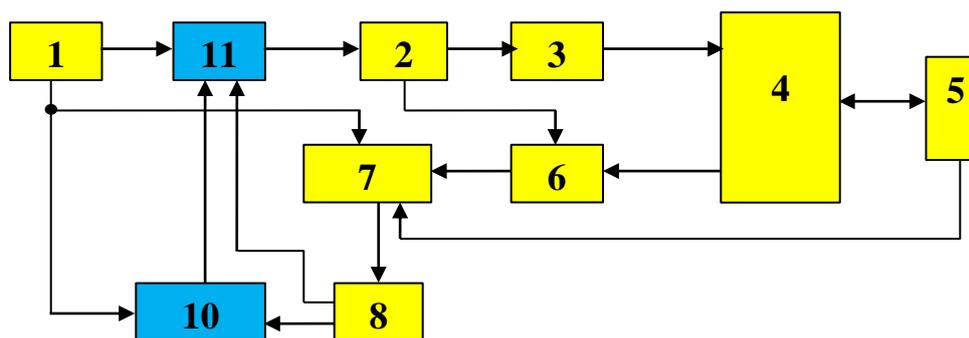


Рисунок 3.5 - Блок-схема аппаратного компонента РЛС П-18М кругового обзора метрового диапазона с функцией передачи данных

В шестом разделе анализируется характеристика антенны аппаратного компонента РЛС П-18М и предлагается техническое решение по её изменению в зигзагообразную сжатую антенну по вертикали (рисунок 3.6). На данное техническое решение подана заявление №2024/0399.2 о выдаче патента Республики Казахстан на изобретение.

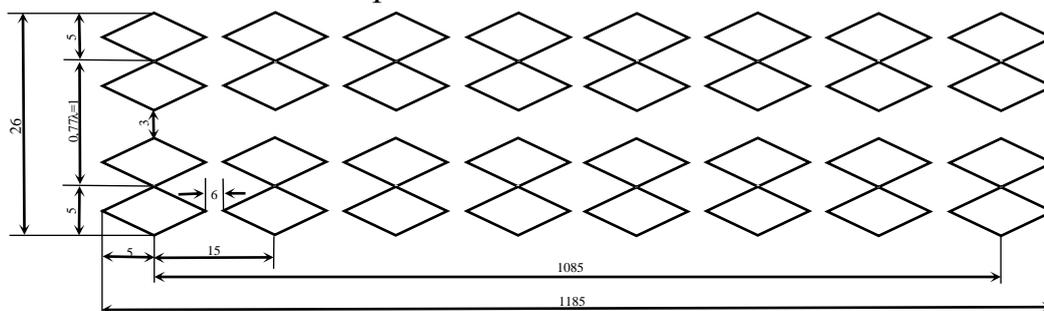


Рисунок 3.6 – Общий вид рассчитанной антенной решетки

В четвертой главе, состоящей из двух разделов, представлены результаты, полученные при применении искусственного интеллекта для обнаружения целей.

В первом разделе обосновывается выбор типа нейронной сети, размеров изображений, описывается ход экспериментов и полученные результаты по скорости обработки.

В программном компоненте радиолокатора П-18М для обнаружения целей предложен алгоритм рангового обнаружителя со стабилизацией уровня ложной тревоги на уровне 10^{-6} . Этот алгоритм обеспечивает достижение вероятности правильного обнаружения 0,8 при превышении сигнала над шумом не менее чем на 10 дБ. На аналоговых же радиолокаторах П-18 опытный оператор обязан был обнаруживать цели при соотношении сигнал/шум 1 дБ. На рисунке 4.1 приведён типовой вид эхосигнала, отражённого от цели, при котором обеспечивается автоматическое обнаружение.

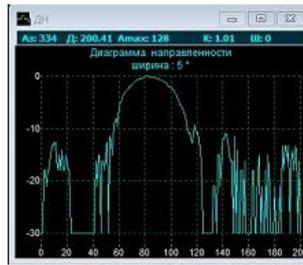


Рисунок 4.1 – Эхосигнал от цели, принятый радиолокатором П-18М

Входными данными для нейронной сети был информационный массив, получаемый радиолокатором за один оборот. Хотя изображение рисуется на экране компьютера в виде экрана кругового обзора круглой формы, но, по сути, это двумерный информационный массив азимут-дальность, в который записывается информация об уровне сигнала. Массивы данных сохранялись в формате «*.dat», в виде матриц с размерностью 2048 (по количеству угловых дискретов азимута) на 1200 (число отсчётов по дальности).

Для обучения сверточной сети было необходимо выделить из матриц с размерами 2048*1200 изображения целей (подматрицы) в графическом формате, который может быть использован для обучения нейронной сети. Был использован графический формат «*.jpg». Для конвертации использована градиентная цветовая модель из библиотеки «matplotlib» с диапазоном цветов от 0 (чёрный) до 255 (жёлтый).

Размеры подматриц были выбраны равными 256*240, что соответствует пространству, которое может преодолеть скоростная воздушная цель за один оборот локатора (зона допоиска цели). По многочисленным записям радиолокационной обстановки, были сформированы буферы эталонных изображений. Примеры подматриц со «стандартными» размерами, использованных для обучения нейронной сети, приведены на рисунке 4.2.

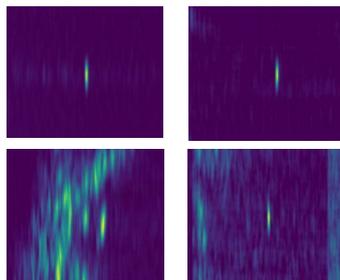


Рисунок 4.2 - Примеры обучающих изображений

Данные о каждом эталоне сохранялись в базе данных для возможности их многоразового использования. Подматрицы, исходные матрицы и известные заранее координаты целей сохранялись в специальном формате в виде файлов «*.пру». Это расширение файлов стандартно для библиотеки программ «numpy» на языке программирования python, используемой в экспериментах.

Для разметки данных использовался инструмент roboflow (рисунок 4.3), с помощью которого на типовых изображениях выделялась область, в которой находился эхосигнал от цели.

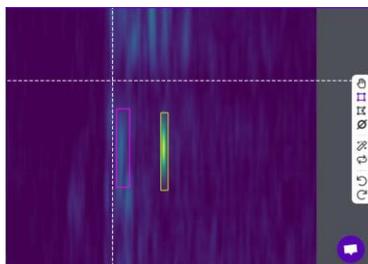


Рисунок 4.3 - Разметка данных

С помощью инструмента «bounding box» были созданы два класса объектов: strays (помехи) и target (цели). Все полученные подмассивы были разделены на 3 группы в пропорции training (обучение) - 70%, validation (проверка) - 20% и testing (тестирование) - 10%. При этом в проверочную группу включались изображения, использованные на этапе обучения, а в тестовую группу изображения, ранее неизвестные нейронной сети.

Компьютер, на котором работала нейронная сеть при экспериментах, имеет следующие характеристики:

1. Windows 10 Корпоративная 64 бита;
2. Процессор: Intel Core i7-10700 CPU @ 2.90GHz; ОЗУ: 32 Гб.

Нейронная сеть была реализована на базе фреймворков Tensorflow, YOLOv, Pytorch. Фреймворк YOLOv был модифицирован для снижения его зависимости от обновлений, входящих в него компонентов. Была использована модели нейросети -157 слоев, 7015519 параметров, 0 градиентов, скорость обработки составила 15,8 гигафлопс.

Для ускорения обработки был оптимизирован алгоритм преобразования файла «*.dat» в изображение, что позволило сократить время обработки одного файла «*.dat» получаемого за каждый оборот антенны.

По результатам обработки 151 радиолокационных изображений, были полученные следующие данные о скорости обработки массивов формата «*.dat».

1. Максимальное время обработки – 212 мс;
2. Минимальное время обработки – 191 мс;
3. Среднее значение обработки – 198 мс;
4. Среднеквадратичное отклоненное – 3,44 мс.

Так как для испытуемой сверточной нейронной сети требуется не более 212 мс для обработки радиолокационного изображения одного оборота, то такая нейронная сеть может применяться не только в РЛС П-18М, имеющей максимальную скорость обзора пространства 6 оборотов в минуту (один оборот

за 10 секунд), но и в других радиолокаторах с большей скоростью обзора пространства.

Во втором разделе приводятся результаты экспериментов по сравнению работ рангового обнаружителя программного компонента РЛС П-18М и обнаружителя на основе искусственного интеллекта.

Для сравнения использовались файлы с записями радиолокационной обстановки, используемые в ТОО СКТБ «Гранит» для отладки алгоритмов первичной и вторичной обработки. В частности, в файле «P18_20130507_1247.pkt», использованном для сравнения, содержится информация о воздушной обстановке, когда в зоне видимости РЛС находится 4 воздушных объекта (2 гражданских борта, следующих по воздушным коридорам, и два истребителя, совершающих крутые развороты). На рисунке 4.4, для примера, приведён вид экрана кругового обзора на 9 обороте антенны РЛС после начала записи воздушной обстановки. Ранговый обнаружитель программы АРМ был настроен на обеспечение вероятности ложной тревоги 10^{-8} .

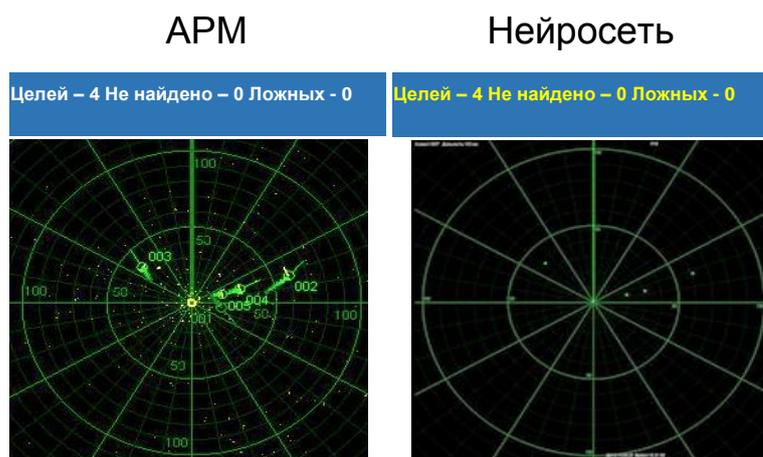


Рисунок 4.4 - Вид экрана кругового обзора

Маневрирующие цели являются сложными объектами для обнаружения и сопровождения. Для целей, летящих прямолинейно и равномерно существуют эффективные алгоритмы пролонгации траектории, с помощью которых определяется область пространства, в которой должна находиться цель, если даже она не была обнаружена пороговым обнаружителем из-за флуктуации ЭПР цели. В этой ограниченной области производится повторный поиск цели с меньшим пороговым уровнем. Такую процедуру называют «допоиском» цели. В случае не обнаружения цели после понижения порога, программное обеспечение перемещает отметку цели на индикаторе кругового обзора, меняя её цвет. Программа АРМ РЛС П-18М не фиксирует факты «допоиска» цели при её сопровождении, также, как и информацию о реальном соотношении сигнал/шум при обнаружении. Поэтому отсутствовала возможность получить

объективную информацию для сравнения о реальных энергетических характеристиках обнаружителей.

В связи с этим, в качестве критерия для сравнения эффективности двух различных обработок выбран параметр - коэффициент проводки. В общем виде коэффициент проводки определяется как отношение времени сопровождения цели t , к сумме времён сопровождения и пропусков цели $t+\tau$ при проведении трассы (3).

$$K_{np} = \frac{t}{t + \tau} \quad (3)$$

Так как антенна радиолокатора вращалась равномерно со скоростью 4 оборота в минуту, то время каждого оборота составляло 15 секунд. Контрольная запись содержала информацию о 102 оборотах антенны РЛС, из которых были выбраны 36 оборотов, в течении которых в зоне обнаружения были маневрирующие истребители.

Сравнительные данные по обнаружению целей, приведены в таблице 4.1. Для сокращения размера таблицы, информация о части оборотов, на которых цели обнаруживались обоими обнаружителями, не приведена.

Таблица 4.1 – Данные по обнаружению целей

обороты	№ цели			
	1		2	
	Нейросеть	АРМ	Нейросеть	АРМ
1	12	-	-	-
2	12	*	18	-
3	-	*	20	-
4	12	12	22	-
5	13	13	24	*
6	14	14	26	*
18	34	34	28	-
22	34	34	25	-
23	33	33	24	-
27	29	29	-	22**
28	28	28**		21**
29	27	27**		21**
30	25	25**		20**
31	24	24**		-
32	24	-		
33	23			
34	22			
35	22			
36	-			

«-» - цель не обнаружена

«*» - предобнаружение

«**» - пролонгация потерянной цели

При обработке информации учитывалось, что программа автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора серийного изделия заводит трассу на третьем подряд обнаружении, и только в это время цели присваивается номер, и она отображается на экране. Данная ситуация помечается в таблице символом «*». Символом «**» обозначен факт нахождения отметки цели на экране, но не обнаружении её алгоритмом «допоиска». Для сравнения использовалась программа АРМ версии ArmP18mk2_31 от 06 октября 2023 года.

Цель №1 фиксировалась в воздухе хотя бы одним обнаружителем 35 раз, из них была обнаружена программой АРМ 26 раз, а нейронной сетью 34 раза. Коэффициенты проводки составили для программы АРМ 0,74, а для нейронной сети – 0,97. Цель №2 фиксировалась в воздухе хотя бы одним обнаружителем 25 раз, из них была обнаружена программой АРМ 19 раз, а нейронной сетью 25 раз. Коэффициенты проводки составили для программы АРМ 0,76, а для нейронной сети – 1.

Таким образом, улучшение коэффициента проводки при использовании нейросети для обнаружения сложноманеврирующих целей составило в первом случае $0,97/0,74=1,3$ раза и для второй цели $1/0,76=1,3$ раза.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В заключении сформулированы основные результаты работы и сделаны следующие выводы:

1. Исследован и предложен метод обработки радиолокационной информации с использованием свёрточной нейронной сети, позволяющий снизить порог обнаружения РЛС;

2. Разработан способ передачи цифровых данных в радиолокационном сигнале радиолокатора П-18М;

3. Создан алгоритм и программное обеспечение, где свёрточную нейронную сеть можно использовать для первичной обработки в радиолокаторах с темпом обзора пространства менее 1 секунды;

4. Проведены экспериментальные исследования тропосферного РРВ, как на равнинных, так и на горных трассах в диапазоне УКВ для различных сезонов и времен суток;

5. Оценка эффективности и точности работы интеллектуальной аппаратно-программной платформы показала, что обнаружила эффект многопутности РРВ при тропосферном и стратосферном распространении;

6. Внедрение обнаружителя на базе нейронной сети можно осуществить без аппаратных переделок в РЛС П-18М.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Разработки можно использовать на других радиолокационных станциях разведки, например, на РЛС 5Н84АМ, для повышения эффективности обнаружения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов, а также в РЛС для обнаружения БПЛА.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

По материалам диссертации были опубликованы следующие работы:

1. Повышение эффективности мониторинга земной поверхности на территории Анненского месторождения с использованием космической радарной интерферометрии (КРИ) [Текст] / А. В. Чернов, **К. Ж. Исабаев**, Б. И. Кидирбаев, Е. Х. Какимжанов // Маркшейдерия и недропользование. – 2019. – № 2 (100). С. 49–50. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bik.sfu-kras.ru/elib/view?id=PRSV-mrkn/2019/2-271493095>

2. Перспективы малоканальных тропосферных станций метрового диапазона [Текст] / И. В. Васильев, О. С. Атыкенов, В. Г. Петровский, М. М. Калипанов, **К. Ж. Исабаев** // Сборник трудов Международной научно-практической конференции, посвященный 100-летию войск связи «Инфокоммуникационные технологии: Современное состояние и пути развития» – 2019. – С. 63-69.

3. Перспективы развития тропосферной станции. От аналоговой до нейронных сетей [Текст] / Б. Т. Жумабаев, **К. Ж. Исабаев**, В. Г. Петровский, А. А. Ковтун // Актуальные проблемы современной науки и производства. Материалы V Всероссийской научно-технической конференции. Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина. – 2020. С. 3-12. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=yupiul>

4. **Исабаев К. Ж.** Опыт калибровки приёмного устройства РЛС П-18М для проведения научных измерений [Текст] / **К. Ж. Исабаев** // В сборнике: Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2021. Сборник трудов IV Международного научно-технического форума: в 10 т. – 2021. С. 66-69. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/ukbyfi>

5. Investigation of the possibility of reducing errors in determining the coordinates of objects indoors by multi-frequency method [Text] / Zh. K. Mendakulov, S. Morosi A. Martinelli **K. Zh. Isabaev** // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2021. – № 1. – P. 137–144. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/349854017_Investigation_of_the_possibility_of_reducing_errors_in_determining_the_coordinates_of_objects_indoors_by_multi-frequency_method

6. Новый полигон для радиофизических исследований в Казахстане [Текст] / Б. Т. Жумабаев, И. В. Васильев, В. Г. Петровский, **К. Ж. Исабаев** // Известия НАН РК. Серия физико-математическая. – 2021. – № 6. С. 6–14. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://journals.nauka-nanrk.kz/physics-mathematics/article/view/2910>

7. Васильев, И. В. Обнаружение неоднородностей в стратосфере радиолокаторами метрового диапазона волн [Текст] / И. В. Васильев, Б. Т. Жумабаев, А. Д. Мустабеков, В. Г. Петровский, **К. Ж. Исабаев** // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». – 2022. – №3. С. 32–40. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://journal.almaz-antey.ru/jour/article/view/865>

8. Обоснование использования устройств измерения высоты в РЛС П-18 [Текст] / **К. Ж. Исабаев**, С. М. Салий, Г. К. Джангулова, Г. П. Рысбаева // Научный аспект. – 2022. – Т. 1. № 3. – С. 97–104. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://na-journal.ru/3-2022-tehnika/3495-obosnovanie-ispolzovaniya-ustroystv-izmereniya-vysoty-v-rls-p-18>

9. Иерархическая модель классификации технических средств защиты информации в вычислительных системах [Текст] / С. М. Салий, **К. Ж. Исабаев**, Р. М. Алтынбеков, С. А. Муратов, С. И. Крохмаль // Научный аспект. – 2022. – Т. 1. № 3. – С. 87–96. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://na-journal.ru/3-2022-tehnika/3494-ierarhicheskaya-model-klassifikacii-tekhnicheskih-sredstv-zashchity-informacii-v-vychislitelnyh-sistemah>

10. Применение и внедрение сверточных нейросетей в радиолокационную станцию [Текст] / **К. Ж. Исабаев**, Н. Б. Имансакипова, Г. С. Шакиева, Д. Демин // The Scientific Heritage. – 2022. – № 102 (102). – С. 46–55. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-i-vnedrenie-svertochnyh-neyrosetey-v-radiolokatsionnuyu-stantsiyu>

11. **Исабаев, К. Ж.** Сравнительный анализ методов расчета коэффициента затухания тропосферной радиосвязи [Текст] / К. Ж. Исабаев Н. Б. Имансакипова, Г. К. Джангулова // Sciences of Europe. – 2022. – № 106 (106). С. 92–106. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-metodov-rascheta-koeffitsienta-zatuhaniya-troposfernoy-radiosvyazi>

12. **Issabayev, K.** Features of measuring the radiation pattern at the P-18M radar [Text] / K. Issabayev // Proceedings of the 1st International Scientific Conference «Academics and Science Reviews Materials». – 2022. – № 1. – P. 25 – 29. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ojs.publisher.agency/index.php/ASCRM/article/view/280>

13. **Issabayev, K.** Overview of the method for calculating the attenuation coefficient (attenuation) of a signal in the troposphere (the method of Vvedensky B.A.) [Text] / K. Issabayev, M. Kalipanov, N. Imansakipova // Proceedings of the 1st International Scientific Conference «World Scientific Reports». – 2022. – P. 281 – 288. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ojs.publisher.agency/index.php/WSR/article/view/361>

14. Способы и средства обнаружения грозовой активности в воздушном пространстве [Текст] / М. К. Олжабаев, **К. Ж. Исабаев**, Н. Б. Имансакипова, И. В. Брякин // Проблемы автоматики и управления. Информационные технологии в системах мониторинга природных и техногенных катастроф. – 2022. – № 3 (45). – С. 84–95. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pau.imash.kg/index.php/pau/issue/view/27>

15. Анализ имеющихся радиолокационных станций и комплексов обнаружения и регистрации грозовой активности [Текст] / М. К. Олжабаев, **К. Ж. Исабаев**, С. А. Фомичев, Б. Б. Имансакипова // Проблемы автоматики и управления. Устройства и системы автоматики. – 2023. – № 2 (47). – С. 62–69. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pau.imash.kg/index.php/pau/article/view/418>

16. **Исабаев, К. Ж.** Использование тропосферного канала радиосвязи в мобильных радиолокаторах метрового диапазона волн для передачи информации об обнаруженных целях [Текст] / К. Ж. Исабаев // Проблемы автоматики и управления. Технические средства систем контроля, диагностики и управления. – 2023. – № 3. – С. 138–145. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pau.imash.kg/index.php/pau/article/view/427>

17. **Исабаев, К. Ж.** Оценка времени обработки радиолокационной информации свёрточной нейронной сетью [Текст] / К. Ж. Исабаев // Проблемы автоматики и управления. Технические средства систем контроля, диагностики и управления. – 2024. – № 1. – С. 70 – 77. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pau.imash.kg/index.php/pau/article/view/429>

18. Пат. 7426 Республика Казахстан, МПК U (11) 7426, G 01 S 13/04 (2006.01). Радиолокационная станция кругового обзора метрового диапазона волн с функцией передачи данных [Текст] / И. В. Васильев, Б. Т. Жумабаев, **К. Ж. Исабаев**, А. Д. Мустабеков, В. Г. Петровский; Алматы. ВИИРЭИС. заявл. 2022/0348.2; опубл. 25.04.2022. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://qazpatent.kz/kz/content/poleznaya-model-09092022>

19. Мобильная зигзагообразная антенная решетка [Текст]. заяв. № 2024/0399.2 о выдаче патента Республики Казахстан на изобретение.

Исабаев Кайырмай Жылдызтаевичтин «Радар сигналдарын талдоо жана радар маалыматын иштетүү үчүн интеллектуалдык аппараттык жана программалык платформаны изилдөө жана иштеп чыгуу» деген темадагы 05.13.05 - эсептөө техникасынын жана башкаруу системаларынын элементтери жана түзүлүштөрү адистиги боюнча техника илимдеринин кандидаты илимий даражасын изденип алууга диссертациясынын

РЕЗЮМЕСИ

Негизги сөздөр: аскерлерди башкаруу системасы, интеллектуалдык аппараттык жана программалык платформа, башкаруу каражаттары, радар, П-18М радары, конволюциялык нейрон тармагы, антенна, тропосфера, стратосфера, гетерогендүүлүк, жасалма интеллект, ультра кыска толкун байланышы.

Изилдөөнүн объектиси: аскерлерди башкаруу системасы.

Изилдөө предмети: П-18М радар станциясынын функционалдык компоненттери.

Изилдөөнүн максаты: башкаруу системасынын эффективдүүлүгүн жогорулатуу.

Изилдөө методдору жана жабдуулары: иштин жүрүшүндө статистикалык радиофизика, системалык анализ, моделдөө жана толук масштабдуу үлгүлөр боюнча эксперименттер колдонулган. Изилдөө үчүн П-18М радиолокация станциясынын интеллектуалдык аппараттык-программалык платформасы, тышкы локалдык осциллятор, өлчөөчү приборлор жана компьютер колдонулган.

Алынган натыйжалар жана алардын жаңылыгы: конволюциялык нейрон тармагын колдонуу менен радар маалыматын иштетүү ыкмасы сунушталды, бул радиолокация станциясынын ИАППнын аныктоо босогосун төмөндөтүүгө жана маневр жасоочу буталарды көзөмөлдөө ылдамдыгын 30% га жогорулатууга мүмкүндүк берет. 266 кмге чейинки аралыкта П-18М радарынын ИАПП радар сигналында санариптик маалыматтарды туруктуу берүү ыкмасы сунушталды.

Колдонуу даражасы: Эксперименттерде колдонулган П-18М радиолокация станциясынын ИАПП ВИИРЭиС окуу борборунда окуу максатында колдонулат. Алынган натыйжалар Р-18М радарын иштеп чыгуучу жана чыгаруучу «СКТБ Гранит» ЖЧКсына (Алматы) өндүрүшкө киргизүү үчүн өткөрүлүп берилди.

Колдонуу боюнча сунуштар: иштеп чыгуулар башка чалгындоо радиолокациялык станцияларында, мисалы, 5Н84АМ радиолокация станциясынын интеллектуалдык аппараттык-программалык платформасында, чакан учкучсуз учуучу аппараттарды аныктоонун эффективдүүлүгүн жогорулатуу үчүн, ошондой эле радар станцияларында учкучсуз учуучу аппараттарды аныктоодо колдонулушу мүмкүн.

Колдонуу чөйрөсү: абадан коргонуу системалары.

РЕЗЮМЕ

диссертации Исабаева Кайыртай Жулдызтаевича на тему: «Исследование и разработка интеллектуальной аппаратно-программной платформы анализа радиолокационных сигналов и обработки радиолокационной информации» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 - элементы и устройства вычислительной техники и систем управления.

Ключевые слова: система управления войсками, интеллектуальная аппаратно-программная платформа, средства управления, радиолокация, радиолокационная станция П-18М, сверточная нейронная сеть, антенна, тропосфера, стратосфера, неоднородность, искусственный интеллект, ультракоротко волновая связь.

Объект исследования: система управления войсками.

Предмет исследования: функциональные компоненты радиолокационной станции П-18М.

Цель исследования: повышение эффективности работы системы управления войсками.

Методы исследования и аппаратура: в процессе работы были использованы методы статистической радиофизики, системный анализ, моделирование и эксперименты на натуральных образцах. Были использованы для исследования интеллектуальная аппаратно-программная платформа радиолокационной станции П-18М, выносной гетеродин, измерительные приборы, компьютер.

Полученные результаты и их новизна: предложен метод обработки радиолокационной информации с использованием свёрточной нейронной сети, позволяющий снизить порог обнаружения ИАПП радиолокационной станции и увеличивающий коэффициент проводки маневрирующих целей на 30%. Предложен способ устойчивой передачи цифровых данных в радиолокационном сигнале ИАПП радиолокатора П-18М на дистанциях до 266 км.

Степень использования: ИАПП радиолокационной станции П-18М, использованная в экспериментах, применяется в учебных целях в учебном центре ВИИРЭиС. Полученные результаты переданы в ТОО «СКТБ «Гранит» (г. Алматы), разработчик и изготовитель РЛС П-18М, для внедрения в производство.

Рекомендации по использованию: разработки можно использовать на других радиолокационных станциях разведки, например, на интеллектуальной аппаратно-программной платформе радиолокационной станции 5Н84АМ, для повышения эффективности обнаружения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов, а также в РЛС для обнаружения БПЛА.

Область применения: системы противовоздушной обороны.

SUMMARY

dissertations of Kayyrtay Zhuldzytayeovich Issabaev on the topic: "Research and development of an intelligent hardware and software platform for analyzing radar signals and processing radar information" for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.13.05 - elements and devices of computer technology and control systems.

Keywords: military control system, intelligent hardware and software platform, controls, communication system, radar, radar station P-18M, convolutional neural network, antenna, troposphere, stratosphere, heterogeneity, artificial intelligence, VHF communication.

Object of research: the command and control system.

Subject of research: functional components of the P-18M radar.

The purpose of the research: improving the efficiency of the military command and control system.

Research methods and equipment: in the course of the work, methods of statistical radiophysics, system analysis, modeling and experiments on full-scale samples were used. The intelligent hardware and software platform of the P-18M radar, a remote heterodyne, measuring instruments, and a computer were used for the study.

The results obtained and their novelty: a method for processing radar information using a convolutional neural network is proposed, which reduces the detection threshold of an intelligent radar hardware and software platform and increases the wiring coefficient of maneuvering targets by 30%. A method for stable transmission of digital data in the radar signal of the intelligent hardware and software platform of the P-18M radar at distances up to 264 km is proposed.

Degree of use: the intelligent hardware and software platform of the P-18M radar, used in experiments, is used for educational purposes at the training center of the Military Engineering Institute of Radioelectronics and Communications. The results obtained were transferred to the Granit Special Design and Technology Bureau LLP (Almaty), the developer and manufacturer of the P-18M radar, for implementation into production.

Recommendations for use: the developments can be used on other reconnaissance radar stations, for example, on the intelligent hardware and software platform of the 5N84AM radar, to increase the effectiveness of detecting small-sized unmanned aerial vehicles, as well as in the radar for detecting UAVs.

Scope of application: air defense systems.

Исабаев Кайыртай Жулдызтаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ АППАРАТНО-
ПРОГРАММНОЙ ПЛАТФОРМЫ АНАЛИЗА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ
СИГНАЛОВ И ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Автореферат диссертации

Подписано в печать 10.05.2024
Формат 60x90/16. Объём 1,25 п.л.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Тираж 30 экз. Заказ 113

Отпечатано в типографии «PrintProfi»
г. Бишкек, ул. Абдрахманова, 182