

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Пензенский государственный университет»

На правах рукописи

Чепига Андрей Александрович

**МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ
УСЛОВИЙ ДИСТАНЦИОННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ГРУПП
ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ**

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика
(технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук

Петренко Сергей Владимирович

Пенза 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ И ВЫРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ ПО ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ.....	11
1.1 Современный взгляд на пути решения проблемы дистанционного обслуживания воздушных объектов.....	11
1.2 Анализ существующих технологий дистанционного обслуживания пространственно-распределенных групп воздушных объектов с использованием направленного луча.....	17
1.3 Использование методов теории множеств и кластеризации при оценке воздушной обстановки в различных информационных системах.....	31
1.4 Анализ существующих законов управления поворотным устройством комплекса дистанционного обслуживания.....	39
1.5 Выводы по первой главе.....	42
2. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА КОМПЛЕКСА ДИСТАНЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МНОЖЕСТВА ПРОСТРАНСТВЕННО- РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ	45
2.1 Разработка обобщенной модели формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства комплекса дистанционного обслуживания.....	45
2.2 Разработка алгоритма формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства комплекса дистанционного обслуживания множества пространственно-распределенных групп воздушных объектов.....	49
2.3 Выводы по второй главе.....	65
3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ПОВОРОТНЫМ УСТРОЙСТВОМ КОМПЛЕКСА ДИСТАНЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И МОДЕЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСА.....	67
3.1. Алгоритм управления поворотным устройством комплекса дистанционного обеспечения для реализации его траектории движения при обслуживании	

множества пространственно-распределенных групп воздушных объектов за минимальное время.....	67
3.2. Математическая модель определения оптимальных условий дистанционного обеспечения беспилотных летательных аппаратов и функционирования комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов	74
3.3. Результаты разработки модели и алгоритмов управления поворотным устройством и определения оптимальных условий функционирования комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов	79
3.4. Выводы по третьей главе.....	87
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	88
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	91
ПРИЛОЖЕНИЕ А	103
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	124
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	129
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	130

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Быстрое формирование и совершенствование способов применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в различных отраслях экономики, включая транспорт и сельское хозяйство, используемых как пространственно-распределенные группы воздушных объектов (ВО), становится доминирующим фактором развития критически важных промышленных и военных инфраструктур, что ставит в первый ряд проблему создания и совершенствования средств их обеспечения.

Использование воздушных объектов в промышленно развитых странах для оперативной и экономической доставки грузов на расстояния, превышающие сотни километров, становится рядовым способом регулирования логистических потоков и ограничивается дальностью и продолжительностью непрерывного полета. Чрезвычайно актуальным является развитие транспортной сети доставки с использованием воздушных объектов для Российской Федерации. Это вызвано значительной площадью территорий и отсутствием транспортной доступности в ряде регионов, особенно в районах Сибири, Дальнего Востока и Заполярья.

Одним из путей обеспечения непрерывности и оперативности движения транспортных потоков воздушных объектов является создание сети комплексов дистанционного обеспечения (КДО) процесса полета. В свою очередь, эффективность функционирования наземных комплексов дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов (ПРГВО) определяется математическими моделями и алгоритмами управления, учитывающими условия обеспечения пространственно распределенных групп воздушных объектов и особенности управления механическим перемещением поворотного устройства. Дистанционное обеспечение воздушных объектов происходит непосредственно в процессе полета с помощью комплексов, которые осуществляют слежение за перемещением БПЛА в воздушном пространстве. Важным компо-

нением таких комплексов является поворотное устройство, которое обеспечивает точное наведение и удержание диаграммы направленности КДО на движущемся воздушном объекте.

Эти факты подтверждают актуальность исследований, направленных на поиск моделей и алгоритмов управления КДО, в силу указанных особенностей и составляют **практическое противоречие**, заключающееся в необходимости применения комплекса дистанционного обеспечения полета воздушных объектов и низкой эффективности алгоритмов функционирования КДО по критерию минимума времени обслуживания ВО, в которых не учитываются особенности пространственного распределения воздушных объектов в процессе их полета.

Цель диссертации состоит в определении оптимальных условий функционирования комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов путем разработки и исследования модели и алгоритмов определения оптимальной траектории перемещения и математической модели управления поворотным устройством комплекса.

Степень разработанности темы исследования.

Результаты исследований в области построения моделей и алгоритмов КДО нашли отражение в работах таких отечественных ученых, как А.А. Галяев, В.Ю. Тугаенко, Т. Нугента, Д. Каре. Следует заметить, что центральными элементами, влияющими на оптимальность применения КДО, являются алгоритмы целераспределения и управления, которые часто являются узким местом в системе управления комплекса, и оптимизация их использования сегодня вызывает наибольший интерес. Изучение различных отечественных и зарубежных источников позволяет сделать вывод о том, что получение достоверной величины границ (пространства) оптимальных условий функционирования комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов позволит иметь объективную картину о возможностях по их обслуживанию, и приводит к заключению о необходимости вычисления оптимального местоположения комплекса в соответствии с законами, которые определены эмпирическим путем.

Необходимо отметить недостаточную изученность способов и форм информационной поддержки функционирования, поэтому разработка моделей и алгоритмов дистанционного обеспечения является актуальной **научной задачей**, которая обуславливается необходимостью разрешения **научных противоречий**: - между необходимостью научной организации обеспечения воздушных объектов и недостаточными исследованиями условий обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов; - между объективной потребностью оптимального управления комплексами дистанционного обеспечения и невозможностью ее реализации из-за отсутствия целостного научного подхода к адаптации алгоритмов управления комплексов дистанционного обеспечения в современных условиях.

Задачи исследования. Поставленная цель в диссертации достигается в результате решения следующих основных задач:

- анализ существующих методов и моделей определения оптимальных условий дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов;
- разработка алгоритма формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства комплекса дистанционного обеспечения множества пространственно-распределенных воздушных объектов по критерию минимума времени;
- разработка алгоритма управления поворотным устройством комплекса дистанционного обеспечения для реализации его траектории движения при обеспечении множества пространственно-распределенных групп воздушных объектов за минимальное время;
- разработка модели определения оптимальных условий дистанционного обеспечения воздушных объектов и функционирования комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов;
- разработка комплекса прикладных программ для проведения вычислительного эксперимента по определению оптимальных условий дистанционного

обеспечения беспилотных летательных аппаратов и функционирования комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов;

– оценка адекватности разработанных алгоритмов на основе данных вычислительных и натурных экспериментов.

Объектом исследования является система управления комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов.

Предмет исследования: модели, алгоритмы и методы оптимизации дискретных процессов.

Методы исследований. Выполненные в работе теоретические и экспериментальные исследования базируются на применении методов теории сложных систем, математического аппарата общей теории систем, теории статистики и математического моделирования. Общей методологической основой в диссертации является системный подход.

Научная новизна:

1. Предложен алгоритм формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределенных воздушных объектов, отличающийся формированием пространственной траектории из этапов с минимальными градусными значениями между кластерами воздушных объектов, что позволяет минимизировать время перемещения поворотного устройства комплекса. Кроме того, алгоритм отличается наличием вложенного алгоритма сортировки обслуживаемых воздушных объектов, что позволяет получить упорядоченный набор пространственных кластеров воздушных объектов и благодаря этому обеспечить максимум обслуживаемых воздушных объектов.

2. Алгоритм управления поворотным устройством комплекса дистанционного обеспечения, отличающийся применением адаптации закона управления по-

воротным устройством к изменению градусной величины его поворота, что позволяет реализовать кусочно-непрерывный закон управления поворотным устройством и минимизировать время обслуживания воздушных объектов.

3. Разработана модель определения оптимальных условий дистанционного обеспечения воздушных объектов и функционирования комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов, отличающаяся учетом динамики и нелинейного характера обеспечения, использованием многослойной нейронной сети прямого распространения и обеспечивающая увеличение количества успешно обслуженных воздушных объектов, по сравнению с эвристическим выбором.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. В соответствии с формулой специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)» разработаны модели и алгоритмы управления комплексом дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов, направленные на минимизацию времени обслуживания и максимизацию количества обслуженных воздушных объектов. Работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности: п. 2 «Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»; п. 3 «Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»; п. 4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта».

Положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства комплекса дистанционного обеспечения множества пространственно-распределенных воздушных объектов.

2. Алгоритм управления поворотным устройством комплекса дистанционного обеспечения для реализации его траектории движения при обслуживании

множества пространственно-распределенных групп воздушных объектов за минимальное время.

3. Модель определения оптимальных условий дистанционного обеспечения беспилотных летательных аппаратов и функционирования комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов.

Достоверность и обоснованность основных результатов и выводов, сформулированных в работе, подтверждается использованием фундаментальных теоретических положений, справедливость которых доказана ранее и подтверждена на практике, корректным применением математической статистики, адекватностью предложенной модели реальным процессам, совпадением теоретических результатов с данными, полученными экспериментальным путем.

Теоретическая значимость диссертации заключается в том, что создан упорядоченный набор в виде алгоритма формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства комплекса дистанционного обеспечения; алгоритма управления поворотным устройством комплекса дистанционного обеспечения для реализации его траектории движения за минимальное время; модели определения оптимальных условий дистанционного обеспечения воздушных объектов и функционирования комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов.

Практическая значимость диссертации состоит в прикладном характере проведенных исследований, направленных на определение оптимальных условий дистанционного обеспечения беспилотных летательных аппаратов и функционирование комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов. Разработанные в диссертации математическая модель и алгоритмы позволяют создать комплекс прикладных программ по определению оптимальной траектории перемещения поворотного устройства комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов.

Апробация результатов диссертации. Результаты диссертации докладывались на VIII Научно-технической конференции «Математическое моделирование инженерные расчеты и программное обеспечение для решения задач ВКО» (г. Москва, 2023 г.); XXXI Всероссийском научно-техническом семинаре «Актуальные вопросы электропривода» (г. Москва, 2024 г.); XXX Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика" (г. Москва, 2024 г.).

Внедрение.

Материалы диссертационной работы использованы:

- в рамках работ по разработке программного комплекса обработки радиолокационных данных (АО НПК «Барл»);
- в рамках разработки беспилотных летательных систем (ООО ЦИТМ «Экспонента»);
- в рамках работы по проектированию солнечных электростанций Полевая и Луговая в Забайкальском крае (ООО «Парус электро»);
- в учебном процессе ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»;
- в учебном процессе ФГБОУ ВО «ДонНТУ».

Публикации. Материалы диссертации достаточно полно отражены в 11 научных публикациях: из них: 5 статей опубликованы в журнале, входящем в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России для публикаций научных результатов диссертаций, 1 тезис доклада, 1 патент на изобретение и 4 свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ Роспатента.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, содержит 133 страницы машинописного текста, 26 рисунков, 7 таблиц, список использованных источников, включающий 115 наименований и приложений на 30 листах.

1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ И ВЫРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ ПО ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ

1.1 Современный взгляд на пути решения проблемы дистанционного обслуживания воздушных объектов

За последние два десятилетия область воздушных судов претерпела значительную эволюцию, превратившись из узкоспециализированной военной технологии в многогранный инструмент, применяемый в различных сферах деятельности человека. Активное развитие БПЛА (воздушных объектов) обусловлено их универсальностью, экономической эффективностью и возможностью выполнения задач в условиях, представляющих опасность для человека [1,2].

Рост рынка воздушных судов характеризуется впечатляющей динамикой [3], что наглядно отражено в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Динамика мирового рынка воздушных судов за 2000-2023 гг.

Год	Количество созданных единиц, млн шт.	Темп роста, %	Объем рынка, млрд долл. США
2000	1.2	0.03	-
2005	3.5	0.11	191.7
2010	6.8	0.38	94.3
2015	14.3	2.2	110.3
2020	22.5	13.2	57.3
2023	35.8	19.7	59.1

Анализ представленных данных свидетельствует о стабильно высоких темпах роста как стоимостного объема рынка воздушных объектов, так и количества используемых аппаратов. Особенно заметное ускорение наблюдается с 2010 года,

что связано с технологическим прогрессом в области миниатюризации электронных компонентов, увеличением емкости аккумуляторов и снижением стоимости производства.

Современный рынок воздушных судов представлен широким спектром аппаратов, отличающихся по размерам, назначению и характеристикам [1]. В таблице 1.2 приведена общепринятая классификация воздушных судов по массе.

Таблица 1.2 – Классификация воздушных объектов по массе и характеристикам

Категория	Масса, кг	Область применения	Дальность полета, км	Время полета, ч
Сверхлегкие (нано/микро)	< 0.25	Развлечение, видеосъемка, инспекция помещений	0.5-2	0.1-0.5
Легкие	0.25-2	Аэрофотосъемка, мониторинг небольших территорий	2-10	0.5-1.5
Малые	2-20	Доставка грузов, сельское хозяйство, разведка	10-70	1-6
Средние	20-150	Мониторинг протяженных объектов, патрулирование	70-200	6-12
Тяжелые	150-600	Перевозка грузов, военное применение	200-1000	12-24
Сверхтяжелые	> 600	Стратегическая разведка, специальные задачи	1000+	24+

В зависимости от назначения и требуемых характеристик воздушные объекты оснащаются различными типами силовых установок. Исторически сложились два основных направления: аппараты с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) и с электрическими двигателями [2].

Воздушные суда с бензиновыми и дизельными двигателями обладают большей дальностью полета и грузоподъемностью, однако имеют более сложную конструкцию, требуют регулярного технического обслуживания и характеризуются повышенным уровнем шума и вибрации. Такие аппараты преимущественно применяются в категориях средних, тяжелых и сверхтяжелых воздушных судах.

Электрические воздушные объекты, в свою очередь, отличаются простотой конструкции, низким уровнем шума, отсутствием вредных выбросов и меньшими эксплуатационными расходами. Однако их ключевым ограничением является относительно небольшое время полета, обусловленное ограниченной емкостью аккумуляторных батарей [1,2].

Согласно статистике, доля электрических воздушных судов на рынке составляет около 85% в количественном выражении и продолжает расти. Это связано с их доступностью, экологичностью и простотой эксплуатации [3].

Применение БПЛА (воздушных объектов) стремительно трансформирует различные сферы деятельности в Российской Федерации, от промышленного мониторинга до сельского хозяйства и логистики [4,5]. За последнее десятилетие российский рынок воздушных объектов показал значительный рост, обусловленный как технологическим прогрессом, так и изменениями в нормативно-правовой базе, регулирующей использование воздушных судов [6-10].

Эволюция воздушных объектов в России характеризуется не только увеличением их количества, но и существенным улучшением ключевых эксплуатационных характеристик – дальности и времени полета. Если еще недавно воздушные суда использовались преимущественно для решения локальных задач с ограниченным радиусом действия, то сегодня мы наблюдаем формирование полноценных маршрутных сетей, покрывающих значительные территории [11, 12].

Современные российские БПЛА (воздушные объекты) представляют собой сложные технические системы, интегрирующие передовые разработки в области материаловедения, энергетики, навигации и автономного управления. Расширение возможностей воздушных судов открывает новые перспективы для их

применения в условиях обширных территорий России, включая труднодоступные и малонаселенные регионы [13-15]. На данный момент можно выделить следующие ключевые маршруты, представленные на рисунке 1.1:

1. Мониторинг инфраструктуры:

- Маршруты вдоль нефте- и газопроводов (дальность до 150 км, время полета 4-6 часов);
- Обследование ЛЭП (дальность 50-100 км, время полета 2-4 часа);
- Мониторинг железнодорожных путей (дальность до 200 км, время полета до 8 часов).

2. Сельскохозяйственные маршруты:

- Мониторинг сельхозугодий (дальность 30-70 км, время полета 1-3 часа);
- Обработка полей (дальность 20-40 км, время полета до 2 часов).

3. Логистические маршруты:

- Экспериментальные маршруты доставки в труднодоступные районы (дальность до 100 км, время полета до 3 часов)
- Маршруты между логистическими центрами (дальность 50-70 км, время полета 1-2 часа)

4. Исследовательское применение:

- Маршруты экологического мониторинга (дальность до 300 км, время полета до 10 часов)
- Арктические исследовательские маршруты (дальность до 400 км, время полета до 12 часов)

Следует также отметить, что технологическая эволюция воздушных судов открывает горизонты для создания принципиально новых маршрутов [16,17]:

1. Транспортные маршруты:

- Межрегиональные грузовые коридоры (планируемая дальность 500-1000 км, время полета 12-24 часа);
- Маршруты для труднодоступных северных территорий (планируемая дальность до 1500 км, время полета до 30 часов).

2. Коммуникационные сети:

- Стратосферные воздушные объекты для обеспечения связи (планируемая высота до 20 км, время полета до нескольких месяцев);
- Маршруты для создания временных коммуникационных сетей (дальность до 500 км, время полета до 48 часов).

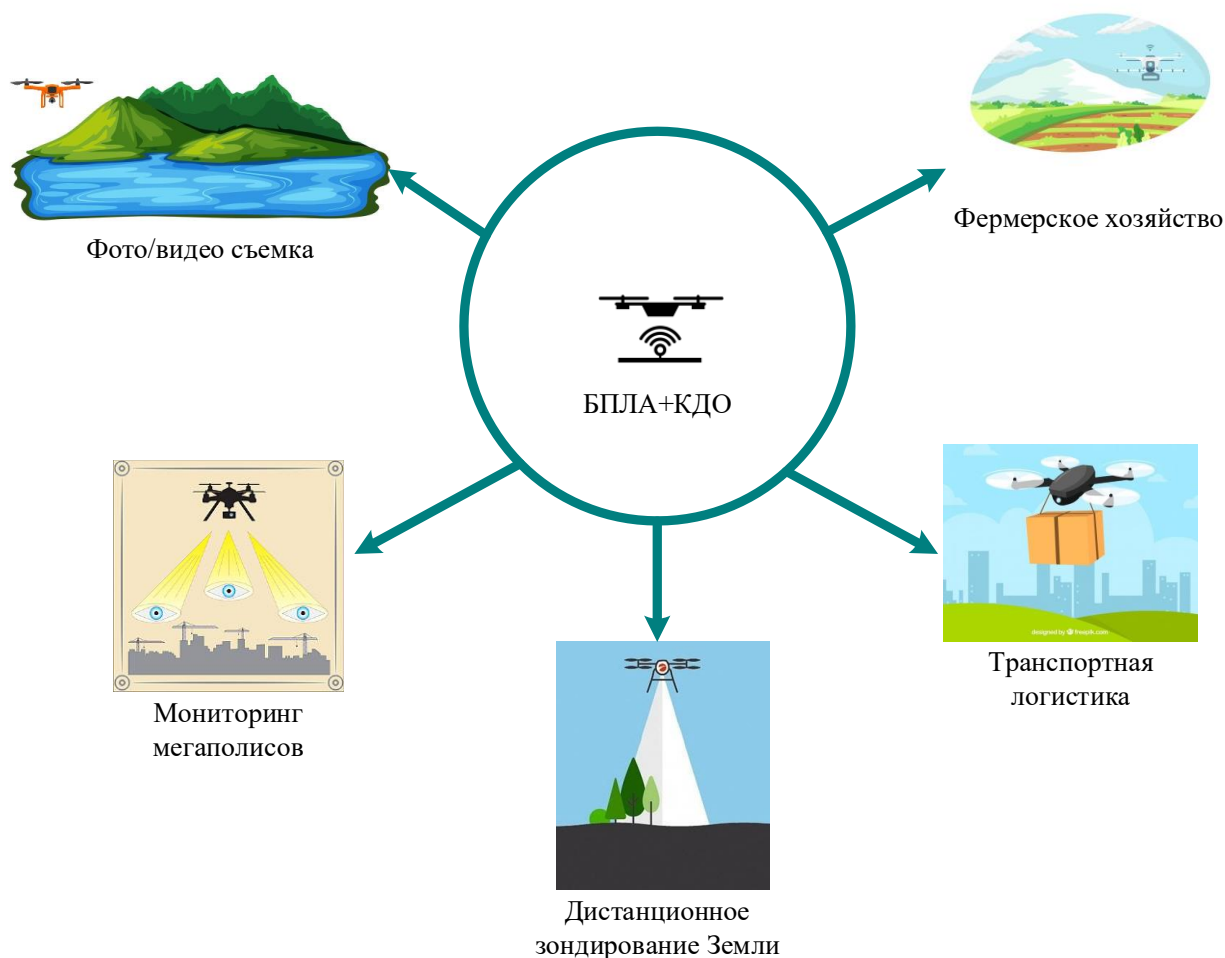


Рисунок 1.1 – Применение воздушных судов с дистанционной поддержкой в различных сферах

Анализ развития БПЛА (воздушных объектов) позволяет выделить тенденции в улучшении ключевых эксплуатационных характеристик. Особенно показательна динамика увеличения дальности и времени полета, представленная в таблице 1.3, которая напрямую влияет на эффективность и сферы применения воздушных судов [1 - 3].

Таблица 1.3 – Динамика увеличения дальности и времени полета воздушных судов

Временной горизонт	Дальность полета	Время полета
Текущая ситуация	50-300 км	2-8 часов
Краткосрочная перспектива (3-5 лет)	500-700 км	до 24 часов
Среднесрочная перспектива (5-10 лет)	1000-1500 км	до 72 часов
Долгосрочная перспектива (10+ лет)	свыше 2000 км	несколько недель

Одним из ключевых направлений развития воздушных объектов является расширение функциональных возможностей и увеличение дальности и длительности полета, что напрямую связано с проблемой комплексного обслуживания в процессе выполнения миссии [1, 2]. Данная проблема особенно актуальна для электрических воздушных судов, автономность которых ограничена как ёмкостью бортовых аккумуляторов, так и пропускной способностью каналов передачи данных [3].

Существует несколько подходов к решению данной проблемы:

1. Увеличение емкости и энергоплотности аккумуляторных батарей.
2. Использование гибридных силовых установок.
3. Применение альтернативных источников энергии (солнечные батареи).
4. Организация дистанционного обслуживания воздушных судов (включая восполнение энергетического ресурса и обмен данными в процессе выполнения миссии).

Последний подход представляется особенно перспективным, поскольку позволяет теоретически неограниченно увеличить время выполнения задачи, обеспечить непрерывный контроль состояния воздушного объекта и оперативную передачу телеметрии без значительного усложнения конструкции самого аппарата [11, 12].

Одним из наиболее инновационных решений в данном направлении является технология дистанционного обслуживания воздушных объектов с использованием направленного луча [4,5,16- 19].

1.2 Анализ существующих технологий дистанционного обслуживания пространственно-распределенных групп воздушных объектов с использованием направленного луча

Дистанционное обслуживание воздушных объектов в полёте с использованием направленного луча представляет собой инновационную технологию, позволяющую существенно расширить границы применения БПЛА за счёт устранения ключевых ограничений – малого времени автономной работы и недостаточной пропускной способности бортовых каналов связи [1–3]. Данная технология базируется на принципе дистанционной передачи энергии (WPT) и данных на значительные расстояния с использованием направленных лучей различной природы (рисунок 1.2).

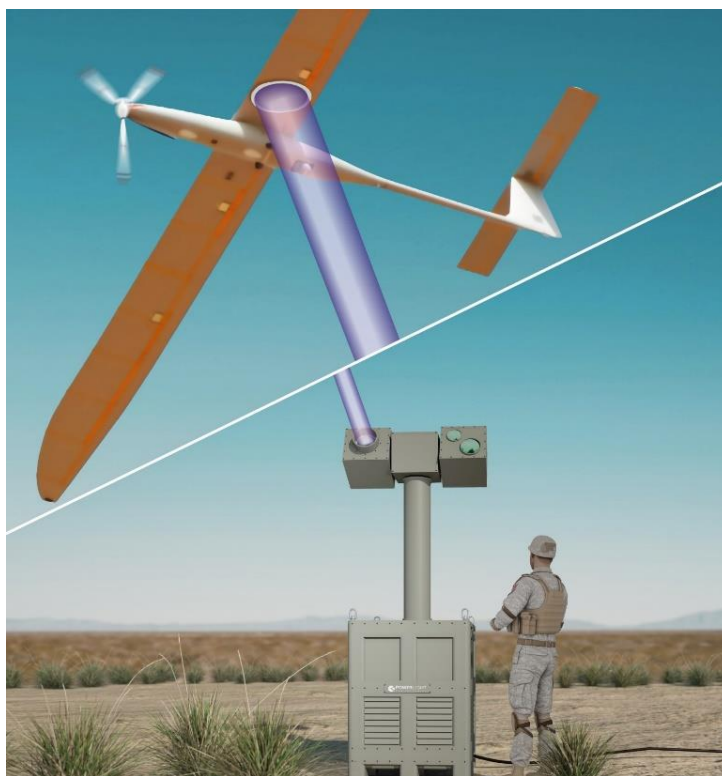


Рисунок 1.2 – Технология дистанционной передачи энергии воздушному объекту

В отличие от традиционных методов обслуживания, требующих посадки воздушных объектов и физического подключения к наземной инфраструктуре, дистанционное обслуживание в полёте позволяет поддерживать непрерывное функционирование БПЛА, что особенно важно для критически важных операций [4, 5].

По оценкам, к 2025 году общий объём продаж воздушных судов достигнет 43 миллиардов долларов при совокупном годовом росте 13,8%, а систем дистанционного обслуживания – 25 миллиардов долларов [1, 2], как показано на рисунке 1.3.

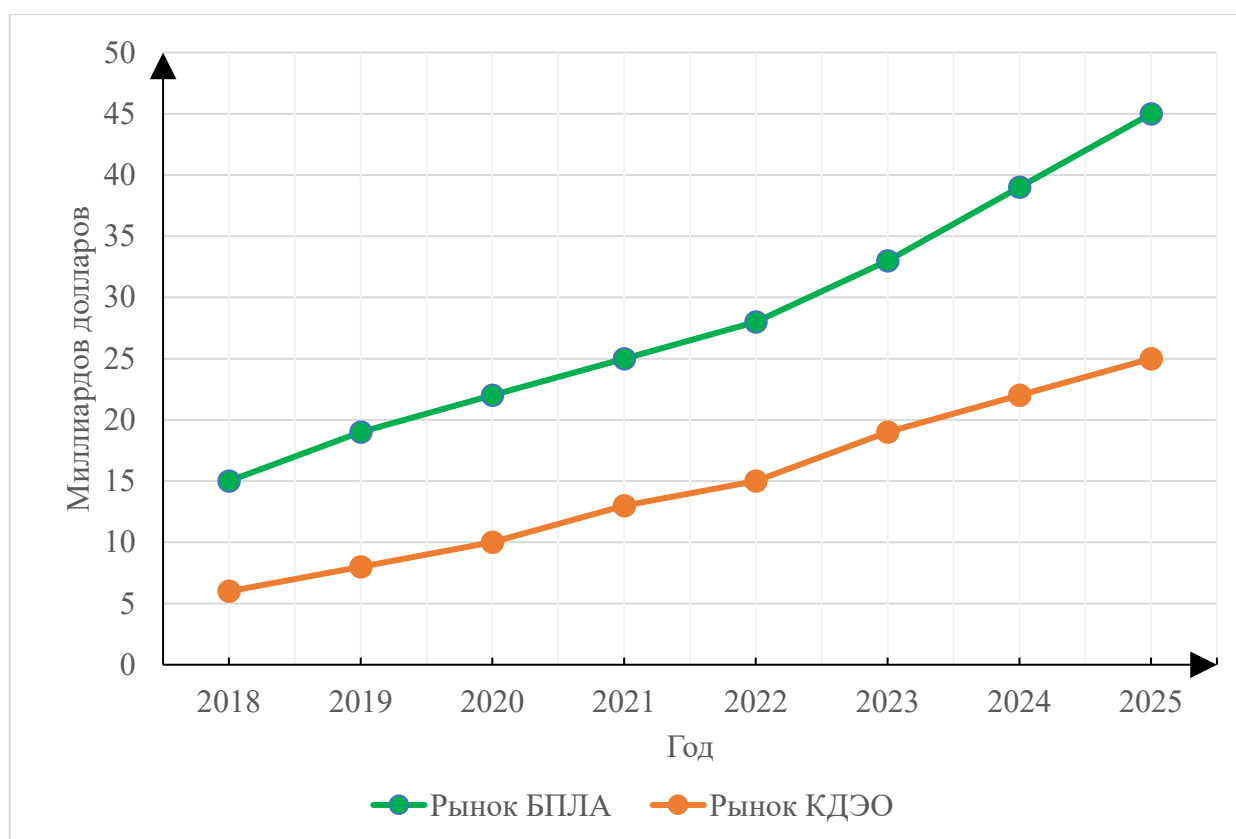


Рисунок 1.3 – Статистика роста рынка воздушных объектов и систем их дистанционного обслуживания

Основные технологии, используемые для реализации дистанционного обеспечения воздушных объектов в полете, включают:

1. Лазерную передачу энергии (Laser Power Beaming) – использование высокоэнергетического лазерного луча для передачи энергии на фотоэлектрические приемники, установленные на воздушные объекты [4 - 10, 16 - 19].

2. Микроволновую передачу энергии (Microwave Power Transmission) – передача энергии посредством направленного микроволнового излучения с последующим преобразованием в электрическую энергию ректенной на борту воздушного объекта [1 - 3].

3. Радиочастотную передачу энергии (RF Power Transmission) – использование радиочастотного излучения для дистанционной передачи энергии на малые и средние расстояния [3].

4. Двухнаправленный канал передачи данных (Data Link) – обеспечение обмена телеметрической информацией, командами управления и служебными данными между наземным комплексом и воздушными объектами в процессе дистанционного обслуживания.

Микроволновая технология представляет наибольший практический интерес для применения в системах дистанционного обслуживания БПЛА по следующим ключевым причинам:

1. Оптимальный баланс дальности и эффективности. Микроволновые системы обеспечивают эффективную передачу энергии на дистанциях до 2 км с КПД 50-60%, в то время как лазерные системы демонстрируют высокую эффективность лишь на малых дистанциях (КПД 25-30% на 200-500 м), а радиочастотные ограничены дальностью 50-200 м.

2. Всепогодность применения. Принципиальное преимущество микроволнового канала состоит в его устойчивости к атмосферным помехам: в отличие от лазерных систем, работоспособность которых напрямую определяется прозрачностью воздушной среды, микроволновое излучение сохраняет работоспособность при наличии облачности, тумана, осадков и ослабление сигнала при этом не превышает 15–30%.

3. Сниженные требования к точности наведения. Для уверенного захвата цели микроволновой системой достаточно обеспечить угловую точность порядка

0,1°, тогда как лазерные аналоги предъявляют на порядок более жёсткие требования около 0,01°, что на практике существенно осложняет их применение при работе с маневрирующими БПЛА.

4. Масштабируемость технологии. Диапазон передаваемой мощности перекрывает несколько порядков – от сотен ватт до десятков киловатт – при этом базовая архитектура комплекса не претерпевает принципиальных изменений, что открывает возможность применения единой платформы как для лёгких, так и для тяжёлых классов БПЛА.

5. Безопасность эксплуатации. Микроволновые системы с рабочей частотой 2,45 ГГц и 5,8 ГГц используют неионизирующее излучение с хорошо изученными биологическими эффектами и установленными нормами безопасности, что упрощает их сертификацию и внедрение.

6. Технологическая зрелость компонентов. Благодаря широкому использованию в телекоммуникационной отрасли компоненты микроволновых систем (магнетроны, фазированные антенные решётки, диоды Шоттки) имеют высокую степень технологической готовности и доступны на коммерческом рынке.

7. Конструктивная совместимость с БПЛА. Плоская конфигурация ректенн толщиной 1,2–2,5 мм позволяет интегрировать их в конструкцию крыльев и фюзеляжа БПЛА с минимальным влиянием на аэродинамические характеристики, тогда как фотоприёмники лазерного излучения требуют более сложных конструктивных решений.

8. Возможность одновременного обслуживания группы БПЛА. Микроволновая технология позволяет формировать несколько лучей или использовать расширенный луч для одновременного энергоснабжения и передачи данных группе БПЛА в зоне обслуживания, что особенно актуально при работе с пространственно-распределёнными группами воздушных объектов [21–24].

Совокупность указанных преимуществ определяет микроволновую технологию как наиболее перспективную для практической реализации систем дистанционного обслуживания БПЛА в полёте.

В ходе проведённого исследования для систематизации и научно-технического анализа основных параметров микроволновой технологии беспроводной передачи энергии была разработана комплексная классификационная таблица (таблица 1.4). Таблица обобщает верифицируемые характеристики передающей части, подсистем наведения/сопровождения и приёмной части (ректенны) по данным опубликованных натурных и стендовых демонстраций, что обеспечивает сопоставимость частотных диапазонов, уровней мощности, дальности передачи и энергетической эффективности в различных реализациях [1–3, 16].

Таблица 1.4 – Технические характеристики микроволновой системы передачи энергии для БПЛА

Параметр	Характеристика	Примечание
Параметры наземного передатчика		
Рабочая мощность	1-10 кВт	Успешные эксперименты: 1) 10 кВт: 2,45 ГГц (передача на 500 м, Япония, 2015 г.); 2) 1,8 кВт: 5,8 ГГц (55 м, Япония, 2015 г.); 3) 1,5 кВт: X-band (Корея, передающий массив); 3) 1 кВт: 35 ГГц (Китай, 2020)
Частотный диапазон	2,45 ГГц, 5,8 ГГц, 10 ГГц, 35 ГГц	Частоты приведены как рабочие в успешных экспериментах
КПД передающей части	DC→RF: 35,1%; средний КПД усилителей: 60,3%	Для ФАР 5,8 ГГц на GaN (Япония, 2015)
Тип генератора	1) Магнетрон; 2) Твердотельная ФАР на GaN; 3) Ламповый источник (35 ГГц); 4) ФАР на GaN MMIC (X-band)	1) Магнетронная система: Япония 10 кВт – 2,45 ГГц; 2) GaN-ФАР: Япония – 5,8 ГГц; 3) Лампа 35 ГГц: Китай; 4) GaN MMIC ФАР: Корея
Геометрия/габариты излучающей системы	1) 8 м × 8 м (массив); 2) Панель ФАР 60×60×2,5 см, 16,1 кг.	1) 8×8 м – в демонстрации 10 кВт 2,45 ГГц (Япония, 2015); 2) параметры панели – ФАР 5,8 ГГц (Япония)

Продолжение таблицы 1.4

Число усилителей / элементов ФАР	1) 304 GaN усилителя; 2) 2304 элемента.	1) 304 – Япония, 5,8 ГГц; 2) 2304 – Корея, X-band массив
Система наведения и отслеживания		
Принцип наведения/удержания луча	Ретродирективная подсистема + пилотные массивы 2,45 ГГц	Описано для ФАР 5,8 ГГц (Япония, 2015): пилотные массивы 2,45 ГГц и удержание наведения
Приемник энергии (ректенна)		
Тип/исполнение ректенны	1) Модульная ректенна-решётка; 2) Малогабаритная ректенна БПЛА на микрополосковых антеннах;	1) Япония (2015) – модульная; 2) Япония (2019) – БПЛА;
Габариты ректенны	1) 2,6×2,3 м; 2) 200×186 мм; 3) лист 18×19 см	1) 2,6×2,3 м – Япония (2015); 2) 200×186 мм – БПЛА (Япония, 2019); 3) 18×19 см – лист (Корея/США, 2019)
Число модулей	1) 36 модулей; 2) 17 круговых микрополосковых антенн; 3) 90 дипольных листов	1) Япония (2015); 2) Япония (2019); 3) Корея/США (2019).
КПД RF→DC	1) 59–62%; 2) 57,74%.	1) 59–62% – Schottky-выпрямители в ректенне (Япония, 2015); 2) 57,74% – 5,8 ГГц (Китай, 2018)
Плотность мощности на ректенне	4 кВт/м ²	Для БПЛА: 10 м дальность (Япония, 2019)
Выходная мощность DC	1) 335 Вт; 2) 60 Вт (10 м); 3) 42 Вт (30 м); 4) 7,1 Вт.	1) 335 Вт – Япония (2015); 2) 60 Вт – БПЛА (Япония, 2019); 3) 42 Вт – БПЛА (Япония, 2019); 4) 7,1 Вт – Китай 2,45 ГГц (2014).
Выходное напряжение DC	1) 24 В DC; 2) 36 В DC.	24 В/36 В – Китайские эксперименты (10 ГГц и 35 ГГц).

Технология дистанционного обслуживания воздушных объектов в полёте является ответом на фундаментальный вызов современной беспилотной авиации – противоречие между потребностью в продолжительном времени полёта и непрерывном информационном обмене, с одной стороны, и ограниченными возможностями бортовых систем с другой [1–3]. Реализация таких систем требует решения сложных технических задач, связанных с точностью наведения луча, эффективностью преобразования энергии, организацией канала передачи данных, обеспечением безопасности и минимизацией массогабаритных характеристик бортового приёмного оборудования [21–24].

В настоящее время существует несколько технологических решений для дистанционного обслуживания воздушных объектов с использованием направленного луча:

1) PowerLight Technologies (ранее LaserMotive)

PowerLight Technologies является американской инженерной компанией, основанной физиками Томом Нугентом и Джордином Каре в 2006-2007 годах (штаб-квартира в Кенте, штат Вашингтон). Компания разрабатывает системы дистанционной передачи энергии на основе лазерного излучения по двум направлениям: передача энергии через оптическое волокно и – в свободном пространстве через воздух или вакуум [11, 13-19].

Принцип работы системы основан на преобразовании электрической энергии в оптическое излучение лазером, формировании луча набором оптических элементов для определения геометрии в точке назначения, передаче световой энергии через воздушную или вакуумную среду и обратном преобразовании на фотоэлектрическом приёмнике в электрическую энергию, представленном на рисунке 1.4.

Современные лазерные источники излучения характеризуются электрооптическим КПД до 85%, однако в серийных полупроводниковых диодных лазерах этот показатель, как правило, не превышает 50%, что обусловлено технологическими ограничениями массового производства. Приёмная часть системы в свою очередь демонстрирует оптико-электрическое преобразование выше 50%, но

лишь при условии облучения монохроматическим светом: широкополосное излучение существенно снижает данный показатель [17–19]. [17-19].



Рисунок 1.4 – Принцип передачи энергии в свободном пространстве

Показательным примером практической реализации технологии служит эксперимент, проведённый 28 октября 2010 года: беспилотный квадрокоптер, оснащённый небольшой фотоэлектрической батареей и питаемый инфракрасными полупроводниковыми диодными лазерами с земли, находился в воздухе свыше 12 часов. Примечательно, что штатная бортовая батарея аппарата обеспечивала лишь несколько минут автономного полёта – то есть практически всё полётное время было обеспечено за счёт внешнего дистанционного источника [17, 19].

Ещё более весомые результаты получены в июле 2012 года в ходе совместных испытаний с Lockheed Martin. БПЛА Stalker, доработанный под интеграцию системы LaserMotive (рисунок 1.5), прошёл испытания в аэродинамической трубе. Зафиксированное время полёта превысило 48 часов против исходных показателей базовой конфигурации, что в пересчёте даёт прирост порядка 2400%.

По завершении испытания энергия, накопленная в батарее БАС, превышала начальный уровень, что подтверждает возможность не только поддержания, но и увеличения энергетического запаса в процессе полёта. Испытание было

прекращено после достижения поставленных целей по выносливости, а не из-за истощения энергоресурсов. 7 августа 2012 года Lockheed Martin Stalker UAS, оснащённая лазерным приёмником, была успешно продемонстрирована в полевых условиях пустыни при дневных и ночных операциях, что стало первым в истории наружным полётом БАС, работающей на лазерной энергии [12, 13, 17].



Рисунок 1.5 – Система дистанционного энергетического обеспечения для тактического воздушного судна Stalker XE

В конце 2024 года объявлено о начале программы PTROL-UAS в партнёрстве с Центральным командованием США и Директором по инновациям в области оперативной энергетики Министерства обороны США. Целью программы является демонстрация беспроводной передачи энергии БПЛА на расстояние

1524 м для обеспечения подзарядки в полёте. В декабре 2025 года завершена разработка и тестирование системы, представленной на рисунке 1.6. Архитектура системы включает наземный и бортовой сегменты [11, 17, 18].

Наземный сегмент состоит из:

- высокомощного лазерного передатчика класса киловатт для мобильного базирования;
- системы оптического слежения для захвата и удержания целей с поддержанием юстировки на высотах до 1524 м;
- многоуровневой системы безопасности с автоматическим отключением луча при обнаружении объектов на траектории;
- программного обеспечения управления в реальном времени с интерфейсами для интеграции с системами управления БПЛА.



Рисунок 1.6 – Опытный образец КДО PowerLight

Бортовой сегмент включает:

- лазерный приёмник энергии массой 2,7 кг для преобразования инфракрасного излучения в электричество;
- модуль управления преобразованием энергии и телеметрией;
- двунаправленную оптическую линию передачи данных "воздух-земля".

Технические характеристики системы обеспечивают [13-15]:

- непрерывную передачу энергии в полёте без необходимости посадки;
- увеличение полезной нагрузки за счёт сокращения массы аккумуляторных батарей;
- расширение радиуса действия и продолжительности миссий;
- применимость для стратосферных платформ связи и разведки.

Также PowerLight начала установку своих систем беспроводной передачи энергии на транспортных средствах (рисунок 1.7). Размещение комплекса на транспортном средстве принципиально меняет логику его применения: вместо стационарного объекта система становится мобильным ресурсом, который можно оперативно перебросить в нужный район: будь то труднодоступная территория, временный полевой лагерь или зона ликвидации аварии [11, 17].



Рисунок 1.7 – Пример размещения КДО на транспортном средстве

На рисунке 1.8 показан пример групповой работы: несколько БПЛА, сосредоточенных на разных высотах и удалениях, одновременно получают питание от единого наземного комплекса PowerLight в ходе одной операции [11, 17, 18].



Рисунок 1.8 – Комплекс дистанционного энергетического обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов

2) Aquila Earth

Другим примером коммерческой реализации служит система Sentry компании Aquila Earth (рисунок 1.9). Её рабочие параметры скромнее – 300 Вт на дистанции до 300 м, однако принципиальное отличие состоит в использовании дискретного инфракрасного излучения, что даёт совместимость с широким спектром типов БПЛА без доработки бортового оборудования [20].



Рисунок 1.9 – Система дистанционного энергетического обеспечения Lightway Sentry

Конструктивно система состоит из наземного передатчика Sentry и бортового приёмника Suncave. Среди технических характеристик передатчика следует выделить: мощность 6 кВт при системе охлаждения 4,5 кВт, питание от стандартных однофазных розеток 30 А или автономного генератора, точность слежения 2–3 мм, допустимую скорость обслуживаемого объекта до 10 м/с, а также три независимых контура целеуказания и резервирования безопасности [20].

Область применения систем Aquila Earth охватывает военный сектор, мониторинг протяжённой инфраструктуры, экологические исследования и поддержку коммуникационных платформ (рисунок 1.10) [20].

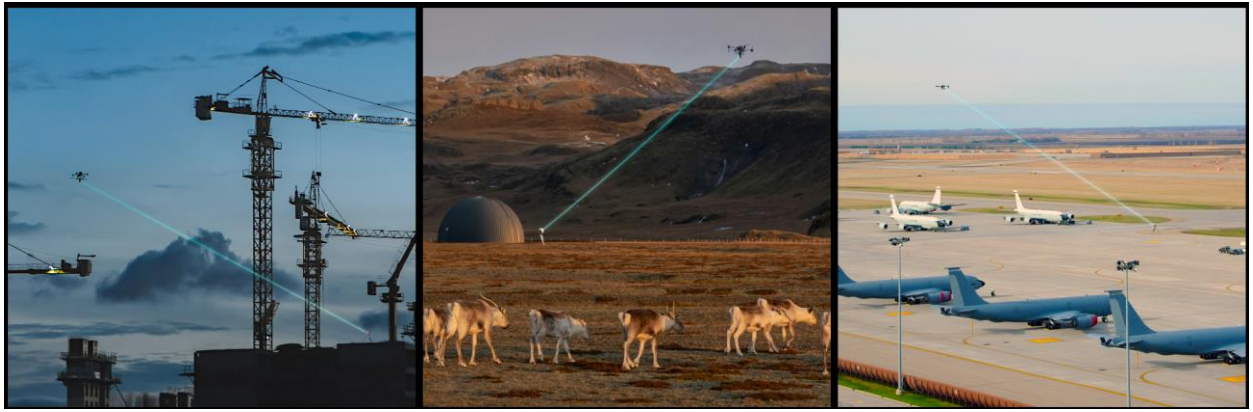


Рисунок 1.10 – Пример внедрения систем AQUILA EARTH в различные сферы промышленности

Вместе с тем за рамками активно развиваемых технических решений остаётся задача, которой уделяется явно недостаточно внимания: организация оптимального целераспределения при дистанционном обслуживании группировок воздушных объектов [21–28]. По мере того как количество одновременно задействованных БПЛА растёт: в военных операциях, логистике, мониторинге инфраструктуры. Именно этот вопрос становится определяющим для практической масштабируемости технологии.

Под целераспределением в данном контексте понимается выбор оптимальной последовательности, приоритетности и режимов обслуживания для пространственно-распределённых воздушных объектов с учётом ограниченных ресурсов наземной инфраструктуры. Задача приобретает особую сложность в динамических условиях, когда аппараты находятся в постоянном движении, выполняют различные миссии с неодинаковыми требованиями к энергии и каналам передачи данных, а также имеют разные приоритеты и уровни критичности.

В то время как технические аспекты дистанционной передачи энергии и данных активно развиваются, алгоритмическое обеспечение эффективного целераспределения при обслуживании пространственно-распределённых воздушных объектов остаётся недостаточно разработанным. Это формирует «узкое место» в масштабируемости технологии дистанционного обслуживания и сдерживает полную реализацию её потенциала [25–30].

1.3 Использование методов теории множеств и кластеризации при оценке воздушной обстановки в различных информационных системах

Оптимизация дистанционного обслуживания групп БПЛА является сложной многокритериальной задачей, для решения которой потенциально могут быть применены различные математические методы и алгоритмы кластеризации, такие как:

1) Метод k-средних (k-means)

Алгоритм k-means является одним из наиболее распространенных методов кластеризации. Его суть заключается в минимизации суммы квадратов расстояний от объектов до центров кластеров [29-32]:

$$J = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in S_i} \|x - \mu_i\|^2 \quad (1.1)$$

где k – число кластеров, S_i – полученные кластеры ($i=1, 2, \dots, k$), а μ_i – центры масс векторов, вычисляемые как:

$$\mu_i = \frac{1}{|S_i|} \sum_{x \in S_i} x \quad (1.2)$$

Алгоритм итеративно выполняет два шага:

1. Шаг назначения: каждая точка x_j назначается кластеру с ближайшим центроидом:

$$S_i^{(t)} = \left\{ x_j : \|x_j - \mu_i^{(t)}\|^2 \leq \|x_j - \mu_l^{(t)}\|^2 \quad \forall l \in \{1, 2, \dots, k\} \right\}, \quad (1.3)$$

где $S_i^{(t)}$ – множество точек, назначенных кластеру i на итерации t .

2. Шаг обновления: вычисляются новые центроиды каждого кластера как среднее арифметическое всех точек, назначенных этому кластеру:

$$\mu_i^{(t+1)} = \frac{1}{|S_i^{(t)}|} \sum_{x \in S_i^{(t)}} x \quad (1.4)$$

Метод k-means имеет ряд существенных ограничений для решения задачи оптимизации обеспечения групп БПЛА [31-39]:

а) Необходимость предварительного задания числа кластеров k , что затруднительно в условиях динамически меняющейся конфигурации воздушных объектов.

б) Предположение о сферической форме кластеров, что не соответствует форме диаграммы направленности, которая обычно имеет коническую форму с различными углами раскрытия в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

в) Отсутствие учета показателей потребности в обслуживании объектов при формировании кластеров, что критически важно для приоритизации обслуживания БПЛА с низким уровнем обслуживания.

г) Чувствительность к выбору начальных центроидов, что может приводить к субоптимальным решениям в задаче покрытия пространства диаграммой направленности.

2) Алгоритм DBSCAN

DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) – алгоритм кластеризации, основанный на плотности точек в пространстве, который эффективно выявляет кластеры произвольной формы и выделяет шумовые точки [40-44].

Алгоритм DBSCAN основан на следующих ключевых понятиях:

1. ϵ -окрестность точки p : множество всех точек, находящихся на расстоянии не более ϵ от точки p :

$$N_{\epsilon}(p) = \{q \in X : \|p - q\| \leq \epsilon\}. \quad (1.5)$$

2. Точка ядра: точка p называется точкой ядра, если в её ϵ -окрестности содержится не менее $MinPts$ точек:

$$|N_{\epsilon}(p)| \geq MinPts. \quad (1.6)$$

3. Прямая плотностная достижимость: точка q прямо плотностно достижима из точки p , если p является точкой ядра и:

$$q \in N_{\epsilon}(p) \quad (1.7)$$

4. Плотностная достижимость: точка q плотно достижима из точки p относительно параметров ε и $MinPts$, если существует последовательность точек $p_1, p_2, \dots, p_n$ с $p_1 = p$ и $p_n = q$ такая, что p_{i+1} прямо плотно достижима из p_i для всех $i \in \{1, 2, \dots, n-1\}$.

5. Плотностная связность: точки p и q плотно связаны относительно параметров ε и $MinPts$, если существует точка o такая, что и p , и q плотно достижимы из o .

Алгоритм DBSCAN выполняет следующие шаги:

Для каждой необработанной точки $p \in X$:

- а) Вычислить ε -окрестность $N_\varepsilon(p)$.
- б) Если $|N_\varepsilon(p)| < MinPts$, пометить p как шумовую точку (предварительно).
- в) Если $|N_\varepsilon(p)| \geq MinPts$, инициируется новый кластер C : точка p включается в него, а все точки из $N_\varepsilon(p)$ помещаются в очередь кандидатов N . Далее для каждой точки $q \in N$ проверяются два условия: если q ещё не обработана – вычисляется $N_\varepsilon(q)$, и при выполнении $|N_\varepsilon(q)| \geq MinPts$ её окрестность расширяет N ; если q не отнесена ни к одному кластеру – она включается в C .

Вычислительная сложность алгоритма в общем случае – $O(n^2)$, где n – число точек. Пространственные индексы типа R*-дерева позволяют снизить её до $O(n \log n)$ [38–42].

С точки зрения задачи дистанционного обслуживания групп БПЛА у DBSCAN есть очевидное достоинство: число зон обслуживания не задаётся заранее, что принципиально важно при динамически меняющемся составе группы. Способность выявлять области произвольной формы теоретически лучше соответствует реальным диаграммам направленности, а одиночные БПЛА, не попавшие ни в одну зону, идентифицируются как шумовые точки – сигнал о необходимости индивидуального обслуживания.

Практическое применение алгоритма в рассматриваемой задаче, однако, наталкивается на серьёзные затруднения [41–44]. Подбор ε и $MinPts$ требует предварительных знаний о характере распределения группы – на практике это

превращается в отдельную нетривиальную задачу. При неравномерной пространственной плотности БПЛА результаты кластеризации деградируют. Ещё существеннее то, что алгоритм в принципе не оперирует показателями потребности в обслуживании отдельных объектов – он ищет сгущения точек, а не минимизирует число наведений луча для покрытия всей группы. Именно это последнее ограничение делает DBSCAN непригодным в качестве самостоятельного решения для задачи планирования обслуживания.

3) Иерархическая кластеризация

Иерархические методы кластеризации строят дерево вложенных кластеров (дендрограмму), позволяя анализировать данные на разных уровнях детализации [45-47].

Иерархическая кластеризация может быть реализована двумя основными подходами:

1. Агломеративный подход (снизу-вверх): начинает с отдельных точек как одноэлементных кластеров и последовательно объединяет их.
2. Дивизимный подход (сверху вниз): начинает с одного кластера, содержащего все точки, и последовательно разделяет его.

Математически агломеративная иерархическая кластеризация может быть описана через расстояние между кластерами. Например, при использовании метода одиночной связи расстояние между кластерами определяется как:

$$d(A, B) = \min \{d(a, b) : a \in A, b \in B\}, \quad (1.8)$$

где A и B – кластеры, а $d(a, b)$ – расстояние между воздушными объектами x и y , принадлежащими кластерам A и B .

Агломеративный алгоритм стартует с n одноэлементных кластеров – по одному на каждый объект. Затем вычисляется матрица попарных расстояний и начинается итеративное слияние: на каждом шаге находится пара кластеров с минимальным расстоянием, они объединяются, после чего матрица пересчитывается. Так продолжается до достижения заданного числа кластеров либо порогового расстояния.

Вычислительная сложность в общем случае – $O(n^3)$: каждый шаг требует обновления матрицы. Для метода одиночной связи существуют оптимизированные реализации со сложностью $O(n^2 \log n)$ [45–47].

Из практически значимых свойств прежде всего стоит отметить, что число кластеров не задаётся заранее – дендрограмма строится полностью, а нужный уровень разбиения выбирается постфактум. Это удобно, когда структура данных заранее неизвестна. Гибкость в выборе метрики и метода связи позволяет подстраивать алгоритм под конкретную задачу.

Однако в динамических задачах проявляются принципиальные изъяны [45–47]:

1. Необратимость операций слияния или разделения кластеров, что может приводить к накоплению ошибок.
2. Чувствительность к выбросам и шуму в данных, что может исказить структуру дендрограммы.
3. Отсутствие прямого механизма учета характеристик необходимости обслуживания объектов при формировании кластеров.
4. Не оптимизирует направление диаграммы направленности для минимизации числа поворотов комплекса дистанционной поддержки.

4) Алгоритмы покрытия множества

Задача покрытия множества является NP-трудной комбинаторной задачей оптимизации, которая имеет прямое отношение к проблеме дистанционного обеспечения групп БПЛА [48-56].

Пусть $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ – универсальное множество из n элементов (в нашем случае, множество всех БПЛА), и пусть $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ – семейство подмножеств множества U (в нашем случае, каждое подмножество S_i представляет БПЛА, которые попадают в зону действия диаграммы направленности при его наведении на определенный объект).

Задача покрытия множества состоит в нахождении минимального по мощности подсемейства $C \subseteq S$ такого, что объединение всех подмножеств в C равно U :

$$\min |C| \text{ при условии } \bigcup_{S_i \in C} S_i = U. \quad (1.9)$$

В терминах целочисленного линейного программирования задача может быть формализована следующим образом:

$$\min \sum_{i=1}^m x_i \quad (1.10)$$

при ограничениях:

$$\sum_{i: u_j \in S_i} x_i \geq 1, \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, n\}, x_i \in \{0, 1\}, \forall i \in \{1, 2, \dots, m\}, \quad (1.11)$$

где $x_i=1$, если множество S_i выбрано в покрытие, и $x_i=0$ в противном случае.

Ввиду NP-трудности задачи покрытия множества, для её решения часто применяются приближенные алгоритмы. Один из наиболее эффективных – жадный алгоритм, который последовательно выбирает подмножества, максимизирующие число новых покрываемых элементов [48-56]:

1. Инициализировать множество еще не покрытых элементов $U'=U$ и множество выбранных подмножеств $C=\emptyset$.

2. Пока $U' \neq \emptyset$:

а. Для каждого подмножества $S_i \in S \setminus C$ вычислить $|S_i \cap U'|$ – количество еще не покрытых элементов, которые покрывает S_i .

б. Выбрать подмножество S_j с максимальным значением $|S_j \cap U'|$.

в. Добавить S_j в C : $C = C \cup \{S_j\}$.

г. Обновить множество непокрытых элементов: $U' = U' \setminus S_j$.

3. Вернуть C как приближенное решение.

Жадный алгоритм для задачи покрытия множества имеет гарантированный коэффициент аппроксимации $H(d) \leq \ln(n)+1$, где $H(d)$ – d-е гармоническое число, а d – максимальное количество элементов в любом подмножестве S_i . Это означает, что в худшем случае жадный алгоритм найдет решение, которое не более чем в $\ln(n)+1$ раз хуже оптимального [48-51].

Временная сложность жадного алгоритма составляет $O(mn)$, где m – количество подмножеств, а n – количество элементов в универсальном множестве [52-56].

Преимущества алгоритмов покрытия множества:

1. Прямая формализация задачи минимизации числа наведений диаграммы направленности, что соответствует основной цели оптимизации дистанционного обеспечения.

2. Теоретические гарантии качества решения, обеспечиваемые жадным алгоритмом.

Ограничения алгоритмов покрытия множества [48-56]:

1. Отсутствие прямого механизма учета приоритетов обслуживаемых объектов, что требует дополнительной модификации алгоритма.

2. Не учитывает угловые перемещения комплекса дистанционной поддержки при последовательном наведении диаграммы направленности на выбранные объекты.

3. Стандартная формулировка не предусматривает временную динамику системы, что ограничивает применение в условиях изменяющейся конфигурации БПЛА.

Для комплексной оценки применимости рассмотренных методов к задаче оптимизации дистанционного обеспечения групп БПЛА был проведен их сравнительный анализ (таблица 1.5).

При проведении сравнительного анализа использовались следующие критерии оценки:

1. Учет пространственной конфигурации объектов: способность метода учитывать форму и параметры диаграммы направленности.

2. Учет способность методов приоритизировать объекты с низким уровнем обслуживания.

3. Минимизация числа поворотов комплекса: эффективность в минимизации общего количества наведений луча для обслуживания всех объектов.

4. Адаптивность к динамическим изменениям: способность метода адаптироваться к изменениям в конфигурации группы БПЛА.

Таблица 1.5 – Сравнительный анализ алгоритмов и методов кластеризации

Метод	Учет пространственной конфигурации	Учет характеристик обслуживания	Минимизация числа поворотов	Адаптивность к изменениям
k-means	Низкая (предполагает сферические кластеры)	Низкая (не предусмотрено в стандартной формулировке)	Низкая (не оптимизирует количество кластеров)	Средняя (требуется перезапуск при изменении конфигурации)
DBSCAN	Средняя (выявляет кластеры произвольной формы)	Низкая (не предусмотрено в стандартной формулировке)	Низкая (не оптимизирует количество кластеров)	Высокая (не требует предварительного задания числа кластеров)
Иерархическая кластеризация	Средняя (гибкость в выборе метрики и метода связи)	Низкая (не предусмотрено в стандартной формулировке)	Средняя (можно выбрать оптимальный уровень разбиения)	Средняя (требуется перестроения дендрограммы при значительных изменениях)
Алгоритмы покрытия множества	Высокая (напрямую моделирует покрытие объектов лучами)	Средняя (можно модифицировать для учета приоритетов)	Высокая (напрямую минимизирует число наведений)	Высокая (можно адаптировать к изменениям в реальном времени)

Проведенный анализ показывает, что ни один из рассмотренных классических методов кластеризации не обеспечивает оптимального решения задачи дистанционного обеспечения групп БПЛА по всем критериям [31 - 74]. Наиболее перспективным представляется подход на основе алгоритмов покрытия множества, который напрямую соответствует цели минимизации числа наведений диаграммы направленности и обладает хорошими теоретическими гарантиями качества решения.

Однако для эффективного решения задачи требуется разработка гибридного алгоритма, который бы сочетал преимущества жадного алгоритма покрытия

множества с механизмами приоритизации объектов с низким уровнем обслуживания и оптимизации последовательности наведений луча для минимизации угловых перемещений комплекса дистанционного обслуживания [57-74].

1.4 Анализ существующих законов управления поворотным устройством комплекса дистанционного обслуживания

Эффективность системы дистанционного обеспечения групп беспилотных летательных аппаратов во многом определяется точностью и скоростью наведения диаграммы направленности на целевые объекты. Ключевым элементом такой системы является поворотное устройство, обеспечивающее прецизионное позиционирование луча в пространстве. Законы управления этим устройством непосредственно влияют на динамические характеристики процесса наведения, энергопотребление системы, точность позиционирования и, в конечном итоге, на эффективность обслуживания воздушных объектов [75 -77].

Типичное поворотное устройство комплекса дистанционного обеспечения БПЛА имеет двухосевую конструкцию с последовательной кинематической схемой [78 - 80]:

- азимутальный привод, обеспечивающий вращение вокруг вертикальной оси;
- угломестный привод, обеспечивающий вращение вокруг горизонтальной оси.

Такая конструкция создает эффект переменной инерционной нагрузки: при изменении угла места происходит перераспределение массы системы относительно оси азимутального вращения, что приводит к значительному изменению момента инерции [81, 82].

Момент инерции поворотного устройства относительно оси азимутального вращения может быть представлен как функция от угла места [83, 84]:

$$J_{az}(\theta) = J_0 + \Delta J \cdot \cos^2 \theta, \quad (1.12)$$

где $J_{аз}(\theta)$ – момент инерции относительно оси азимутального вращения; J_0 – минимальный момент инерции (при $\theta = 90^\circ$); ΔJ – диапазон изменения момента инерции; θ – угол места.

Экспериментальные исследования показывают, что отношение максимального момента инерции к минимальному может достигать 3-5 раз в зависимости от конструкции поворотного устройства и массогабаритных характеристик установленного оборудования [85].

Переменность момента инерции приводит к следующим проблемам при управлении поворотным устройством [86]:

1. Нелинейность динамики: Одинаковое управляющее воздействие вызывает различное угловое ускорение в зависимости от текущего угла места.
2. Изменение частотных характеристик: Собственные частоты колебаний и полоса пропускания системы изменяются при изменении угла места.
3. Переменность коэффициентов усиления: Оптимальные коэффициенты регуляторов для одного положения становятся неоптимальными для других.
4. Нестабильность качества переходных процессов: Переходные процессы при отработке одинаковых входных воздействий существенно различаются в зависимости от угла места.

Наиболее распространенным для поворотных устройств является ПИД-закон управления, который описывается следующим выражением [87-91]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (1.13)$$

где $e(t) = \theta_d(t) - \theta(t)$ – ошибка позиционирования; K_p , K_i , K_d – коэффициенты пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих регулятора; $\theta(t)$ – текущий угол поворота; $\theta_d(t)$ – желаемый угол поворота.

ПИД-регуляторы с фиксированными параметрами при управлении поворотным устройством с переменным моментом инерции наталкиваются на принципиальное противоречие [92].

Динамика азимутальной оси описывается уравнением (1.14), где момент инерции $J_{аз}(\theta)$ явно зависит от текущего угла места.

$$J_{az}(\theta)\ddot{\varphi} + B\dot{\varphi} = M_{az}, \quad (1.14)$$

Оптимальные коэффициенты регулятора, в свою очередь, определяются параметрами объекта управления – в частности, тем же моментом инерции [90, 96]. Для системы второго порядка эта зависимость выражается соотношением (1.15).

$$K_p \propto J_{az}(\theta), K_i \propto J_{az}(\theta), K_d \propto J_{az}(\theta). \quad (1.15)$$

Следствие очевидно: настройка, оптимальная при одном угле места, деградирует при других [90–92].

Стандартный выход – настройка на наихудший случай, то есть под максимальный момент инерции при $\theta = 0^\circ$. Устойчивость во всём диапазоне это обеспечивает, но за счёт заметных потерь в динамике. При больших углах места, где инерция мала, система реагирует вяло – быстродействие принесено в жертву запасу устойчивости. Демпфирование, подобранное под максимальную инерцию, при минимальной оказывается избыточным. Ни в одной рабочей точке возможности привода не используются полностью [90–92].

Экспериментальные данные дают конкретные цифры [90–92]. Время переходного процесса при переходе от $\theta = 90^\circ$ к $\theta = 0^\circ$ растёт в 2–3 раза. Перерегулирование, близкое к нулю на больших углах места, достигает 30–40% на малых. Полоса пропускания сужается в 1,5–2 раза, ошибка позиционирования при неоптимальных коэффициентах увеличивается на 50–100%.

Одной из наиболее критичных проблем применения ПИД-регуляторов в системах с переменным моментом инерции является чрезвычайная трудоемкость их настройки [90–92, 93, 94]:

- необходимость многократных экспериментов: для обеспечения приемлемого качества управления во всем диапазоне углов места требуется проведение множества экспериментов при различных положениях системы;

- итеративный процесс подбора параметров: настройка часто превращается в длительный итеративный процесс поиска компромиссных значений коэффициентов, приемлемых для всего диапазона углов;

- необходимость перенастройки при модификации системы: любые изменения в конструкции поворотного устройства или массе оборудования требуют полной перенастройки регулятора;

- зависимость от квалификации настройщика: качество настройки сильно зависит от опыта и квалификации специалиста, что затрудняет стандартизацию процесса.

Практический опыт показывает, что настройка ПИД-регулятора для поворотного устройства комплекса дистанционного обеспечения БПЛА может занимать от нескольких дней до нескольких недель, что неприемлемо для оперативного развертывания таких систем в полевых условиях [90, 91, 93, 94, 97–99].

1.5 Выводы по первой главе

1. Проведённый в первой главе анализ методологических подходов к оценке перспектив развития систем дистанционного обслуживания воздушных объектов выявил существенные пробелы в существующей теоретической базе. Текущие подходы характеризуются фрагментарностью, отсутствием системности и недостаточным учётом взаимосвязей между техническими, экономическими и эксплуатационными факторами, что в значительной степени снижает достоверность получаемых оценок и затрудняет стратегическое планирование в данной области.

2. В результате исследования установлено, что современные подходы не обеспечивают адекватного прогнозирования эффективности использования систем дистанционного обслуживания в условиях динамично меняющихся внешних факторов, включая метеорологические условия, разнообразие профилей полёта и переменные режимы энергопотребления различных типов воздушных объектов. Это создаёт значительные риски при принятии решений о направлениях технологического развития и инвестициях в данную сферу.

3. Наблюдаемые тенденции указывают на то, что перед специалистами по организации движения БПЛА стоит трудная задача по созданию единой интегрированной системы управления воздушным движением, способной эффективно координировать дистанционное обслуживание растущего количества беспилотных аппаратов в условиях увеличивающейся плотности полётов и диверсификации сфер применения.

4. Существует большой потенциал для повышения дальности и продолжительности полёта БПЛА, реализация которого возможна за счёт применения комплексов дистанционного обслуживания, при условии использования моделей и алгоритмов оптимального планирования дистанционного обслуживания.

5. Разработка моделей и алгоритмов дистанционного обслуживания пространственно-распределённых групп воздушных объектов и формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства КДО при обслуживании множества пространственно-распределённых групп воздушных объектов – один из способов повышения эффективности системы дистанционного обслуживания БПЛА в целом. Математическое обеспечение, то есть модели, методы и алгоритмы определения оптимальных условий дистанционного обслуживания БПЛА, развито недостаточно. Поэтому актуальной является научная задача по созданию моделей и алгоритмов дистанционного обслуживания пространственно-распределённых групп воздушных объектов и формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства КДО при обслуживании множества пространственно-распределённых групп воздушных объектов.

6. Был проведён аналитический обзор существующих методов кластеризации пространственно-распределённых объектов с точки зрения их применимости к задаче оптимизации дистанционного обслуживания групп БПЛА. Рассмотрены математические основы, алгоритмические аспекты, преимущества и ограничения методов k-means, DBSCAN, иерархической кластеризации и алгоритмов покрытия множества. Сравнительный анализ показал, что наиболее перспектив-

ным подходом является разработка гибридного алгоритма на основе жадного алгоритма покрытия множества с дополнительными механизмами учёта приоритетов обслуживания объектов и оптимизации последовательности наведений луча.

7. Теоретические данные убедительно демонстрируют, что ПИД-регуляторы с фиксированными параметрами принципиально не способны обеспечить адаптивное управление поворотными устройствами с переменным моментом инерции во всём диапазоне углов места. Для преодоления выявленных ограничений необходим переход к адаптивным системам управления, способным автоматически подстраивать свои параметры в зависимости от текущего момента инерции.

2. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА КОМПЛЕКСА ДИСТАНЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МНОЖЕСТВА ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ

2.1 Разработка обобщенной модели формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства комплекса дистанционного обслуживания

В современных условиях развития технологий дистанционного обслуживания особую актуальность приобретают задачи оптимального наведения и позиционирования КДО. Эффективность КДО напрямую зависит от точности и скорости перемещения поворотных устройств, обеспечивающих наведение диаграммы направленности на принимающие элементы. Усложнение условий эксплуатации, необходимость отслеживания движущихся объектов, требования к энергетической эффективности и минимизации времени передачи создают новые вызовы для систем управления поворотными устройствами.

Традиционные методы управления в условиях высокой динамики изменения положения целевых объектов, множественности потенциальных приемников энергии и ограниченности ресурсов поворотного устройства (скорость перемещения, точность позиционирования, энергопотребление) зачастую оказываются недостаточно эффективными. Требуется разработка новых адаптивных моделей, способных оперативно реагировать на изменения ситуации и обеспечивать оптимальное формирование траектории перемещения поворотного устройства.

Данная глава посвящена разработке моделей по формированию оптимальной траектории перемещения поворотного устройства КДО множества ПГВО. Разработано формализованное описание, в виде обобщенной математической

модели, представляющая собой циклический процесс формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства комплекса дистанционного обеспечения (КДО) для эффективного обслуживания множества пространственно-распределенных групп воздушных объектов (БПЛА).

Модель включает следующие основные компоненты:

1. Модель формирования множества пространственно-распределенных групп воздушных объектов.
2. Алгоритм кластеризации и приоритизации воздушных объектов.
3. Модель формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства.

Входными параметрами обобщенной модели являются:

1. Параметры воздушных объектов:
 - пространственные координаты БПЛА: $P = \{\mathbf{p}_i = (x_i, y_i, z_i) | i=1, 2, \dots, N\}$;
 - текущий уровень потребности в обслуживании (%): $C = \{c_i \in [0, 100] | i=1, 2, \dots, N\}$;
 - идентификаторы БПЛА: $ID = \{id_i | i=1, 2, \dots, N\}$.
2. Параметры комплекса дистанционного обеспечения:
 - пространственные координаты КДО: $\mathbf{p}_{\text{КДО}} = (x_{\text{КДО}}, y_{\text{КДО}}, z_{\text{КДО}})$;
 - характеристики диаграммы направленности: угол раскрытия в горизонтальной плоскости: α_h ; угол раскрытия в вертикальной плоскости: α_v ; максимальная дальность эффективного обслуживания: R_{max} .
3. Параметры поворотного устройства:
 - текущее положение (азимут и угол места): (φ_0, θ_0) ;
 - динамические характеристики:
 - максимальная скорость поворота по азимуту: $\omega_{\varphi \text{max}}$;
 - максимальная скорость поворота по углу места: $\omega_{\theta \text{max}}$;
 - максимальное ускорение по азимуту: $\alpha_{\varphi \text{max}}$;
 - максимальное ускорение по углу места: $\alpha_{\theta \text{max}}$.
4. Параметр оптимизации
 - время нахождения БПЛА в области диаграммы направленности.

Выходными параметрами обобщенной модели являются:

1. Структура пространственно-распределенных групп воздушных объектов:

– множество кластеров: $G=\{G_1, G_2, \dots, G_m\}$, где каждый кластер G_j содержит индексы БПЛА, попадающих в этот кластер;

– приоритеты кластеров: $Pr=\{pr_1, pr_2, \dots, pr_m\}$.

2. Оптимальная траектория перемещения поворотного устройства представляет собой упорядоченную последовательность наведений: $S=\{s_1, s_2, \dots, s_k\}$. Каждое наведение s_j включает три составляющих: пространственные координаты точки наведения (x_j, y_j, z_j) , соответствующие им углы поворотного устройства (φ_j, θ_j) , и список идентификаторов обслуживаемых в данном наведении БПЛА $\{id_{j,1}, id_{j,2}, \dots, id_{j,l}\}$.

3. Движение поворотного устройства между наведениями описывается четырьмя временными профилями изменения азимута: $\varphi(t)$ и угла места: $\theta(t)$, а также соответствующих угловых скоростей: $\omega_\varphi(t)$ и $\omega_\theta(t)$.

Обобщенная модель формирования оптимальной траектории реализована как циклический процесс, схема которого приведена на рисунке 2.1.

Обобщенная модель формирования оптимальной траектории состоит из следующих взаимосвязанных блоков:

1. Блок сбора и обработки данных:

– получение текущих координат и уровней потребности в обслуживании всех БПЛА;

– фильтрация и валидация входных данных;

– прогнозирование изменения координат и уровней обслуживания БПЛА на временной горизонт планирования.

2. Блок формирования пространственно-распределенных групп:

– построение матрицы пространственных пересечений диаграмм направленности луча;

– формирование кластеров БПЛА, которые могут быть обслужены одним наведением луча;

– оптимизация состава кластеров для максимального покрытия множества БПЛА.

3. Блок приоритизации групп:

- определение приоритетов сформированных групп БПЛА на основе их потребности в обслуживании;
- выявление групп с критически низким уровнем обслуживания;
- ранжирование групп по комплексному критерию приоритета.



Рисунок 2.1 – Обобщенная модель формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства комплекса дистанционного обеспечения

4. Блок формирования оптимальной траектории:

- формирование последовательности наведений луча на основе приоритетов групп;
- расчет оптимальной траектории перемещения поворотного устройства;
- минимизация времени перенаведения с учетом динамических характеристик поворотного устройства.

5. Блок исполнения и мониторинга:

- реализация вычисленной траектории перемещения поворотного устройства;
- мониторинг текущего состояния БПЛА и поворотного устройства;
- обнаружение отклонений от запланированной траектории и адаптация к ним.

Приведенное описание обобщенной модели (рисунок 2.1) должно составлять содержание алгоритмов специального программного обеспечения системы управления КДО.

2.2 Разработка алгоритма формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства комплекса дистанционного обслуживания множества пространственно-распределенных групп воздушных объектов.

Разработанный алгоритм учитывает динамический характер системы энергетического обеспечения пространственно-распределенных воздушных объектов. В отличие от статических методов кластеризации, предлагаемый подход ориентирован на работу в условиях непрерывного изменения пространственного положения объектов и их энергетических параметров. Алгоритм реализует адаптивную стратегию формирования кластеров, позволяющую оперативно корректировать решение при изменении конфигурации группировки [100-102].

Алгоритм кластеризации представляет собой гибридное решение, сочетающее жадный алгоритм покрытия множества, многокритериальную оптимизацию и стратегию приоритизации критических состояний. Данный подход учитывает, как пространственное расположение воздушных объектов, так и их энергетические потребности, а также характеристики системы передачи энергии.

Пусть имеется множество (рисунок 2.2) из N воздушных объектов $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, каждый из которых характеризуется следующими параметрами:

- $\mathbf{p}_i = (x_i, y_i, z_i)$: пространственные координаты воздушного объекта;
- $c_i \in [0, 100]$: текущий уровень потребности в обслуживании (в процентах);
- $\mathbf{p}_{target} = (x_{target}, y_{target}, z_{target})$: целевые координаты воздушного объекта;
- c_{crit} – критический порог обслуживания, требующий приоритетного обслуживания.

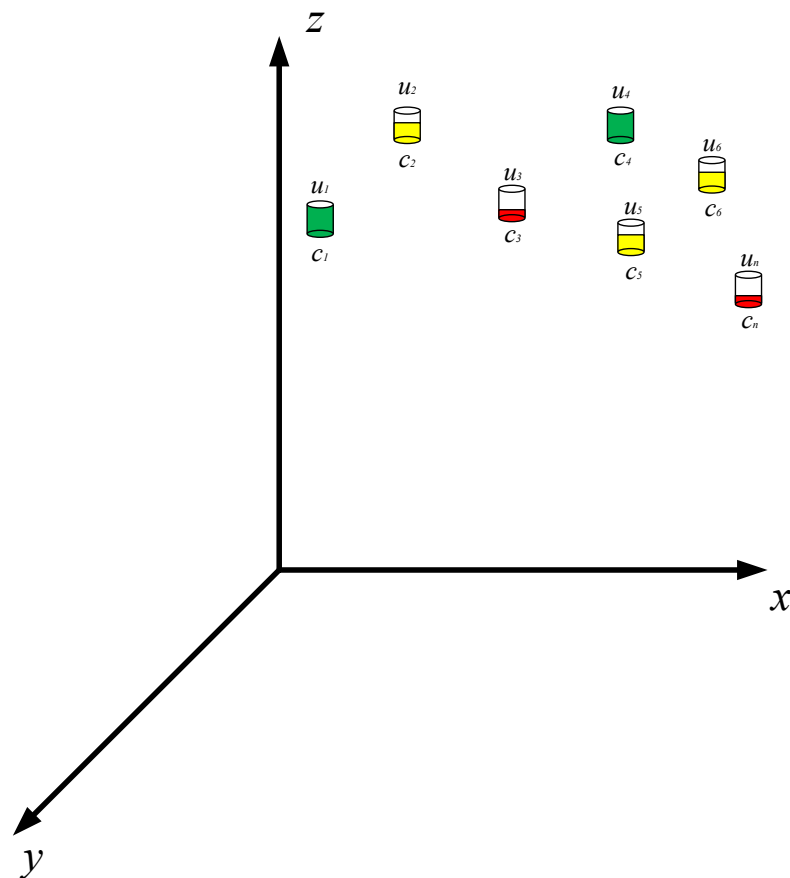


Рисунок 2.2 – Пространственное распределение ПГВО и наземных объектов

КДО размещается в точке $\mathbf{p}_{kep} = (x_{kep}, y_{kep}, z_{kep})$. Его диаграмма направленности задаётся углами раскрытия α_h и α_v в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а текущее положение луча в пространстве определяется парой угловых координат: азимутом φ и углом места θ .

Требуется определить последовательность наведения диаграммы направленности $S = (s_1, s_2, \dots, s_k)$, где $s_i \in U$, такую, что:

1. Все воздушные объекты обслуживаются за располагаемое время.
2. Количество поворотов КДО – k – минимальное.
3. При построении приоритета дистанционного обеспечения учитывается состояние воздушных объектов с критически низким уровнем обслуживания.
4. При каждом повороте КДО количество одновременно обслуживаемых объектов – максимальное.

Для формализации задачи определения воздушных объектов, попадающих в зону действия диаграммы направленности, вводится бинарная матрица пересечений:

$$\mathbf{I} = [i_{j,k}, j = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, n], \quad (2.1)$$

где $i_{jk} = 1$, если воздушный объект u_k попадает в диаграмму направленности КДО при нацеливании на него u_j , в противном случае $i_{jk} = 0$.

Для определения попадания воздушного объекта u_k в луч, направленный на воздушный объект u_j , разработан следующий алгоритм:

1. Вычисление единичного вектора направления от КДО к воздушному объекту u_j :

$$\mathbf{d}_j = \frac{\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_{kep}}{\|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_{kep}\|}, \quad (2.2)$$

где $p_j = (x_j, y_j, z_j)$ – пространственные координаты воздушного объекта; $p_{kep} = (x_{kep}, y_{kep}, z_{kep})$ – пространственные координаты КДО.

2. Вычисление расстояния от КДО до воздушного объекта u_j :

$$r_j = \|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_{kep}\|. \quad (2.3)$$

3. Для воздушного объекта u_k вычисление вектора направления:

$$\mathbf{d}_k = \mathbf{p}_k - \mathbf{p}_{kep}. \quad (2.4)$$

4. Вычисление проекции вектора $\mathbf{d}_k$ на направление $\mathbf{d}_j$:

$$proj_{jk} = \mathbf{d}_k \cdot \mathbf{d}_j. \quad (2.5)$$

5. Проверка, находится ли воздушный объект u_k за КДО относительно объекта u_j : если $proj_{jk} \leq 0$, то воздушный объект u_k находится вне зоны видимости КДО, и $i_{jk} = 0$.

6. Вычисление перпендикулярного отклонения воздушного объекта u_k от оси луча:

$$\mathbf{p}_{jk} = \mathbf{p}_k - (\mathbf{p}_{kep} + proj_{jk} \mathbf{d}_j). \quad (2.6)$$

7. Разделение перпендикулярного отклонения на горизонтальную и вертикальную составляющие:

$$\begin{aligned} h_{jk} &= \sqrt{p_{jk,x}^2 + p_{jk,y}^2}; \\ v_{jk} &= |p_{jk,z}|. \end{aligned} \quad (2.7)$$

8. Вычисление ширины луча на расстоянии проекции:

$$\begin{aligned} w_{h,jk} &= 2 proj_{jk} \tan\left(\frac{\alpha_h}{2}\right); \\ w_{v,jk} &= 2 proj_{jk} \tan\left(\frac{\alpha_v}{2}\right). \end{aligned} \quad (2.8)$$

9. Определение попадания воздушного объекта u_k в луч, направленный на объект u_j : $i_{jk} = 1$, если $h_{jk} < w_{h,jk}/2$ и $v_{jk} < w_{v,jk}/2$, а в противном случае $i_{jk} = 0$.

На рисунке 2.3 представлен процесс формирования кластеров воздушных объектов для оптимизации траектории перемещения поворотного устройства КДО.

Данный процесс основан на анализе пространственного положения ПГВО относительно зоны эффективного действия комплекса. Предлагаемая схема кластеризации позволяет декомпозировать сложную задачу оптимизации траектории на ряд более простых подзадач, что существенно снижает вычислительную сложность и повышает оперативность принятия решений системой управления КДО.

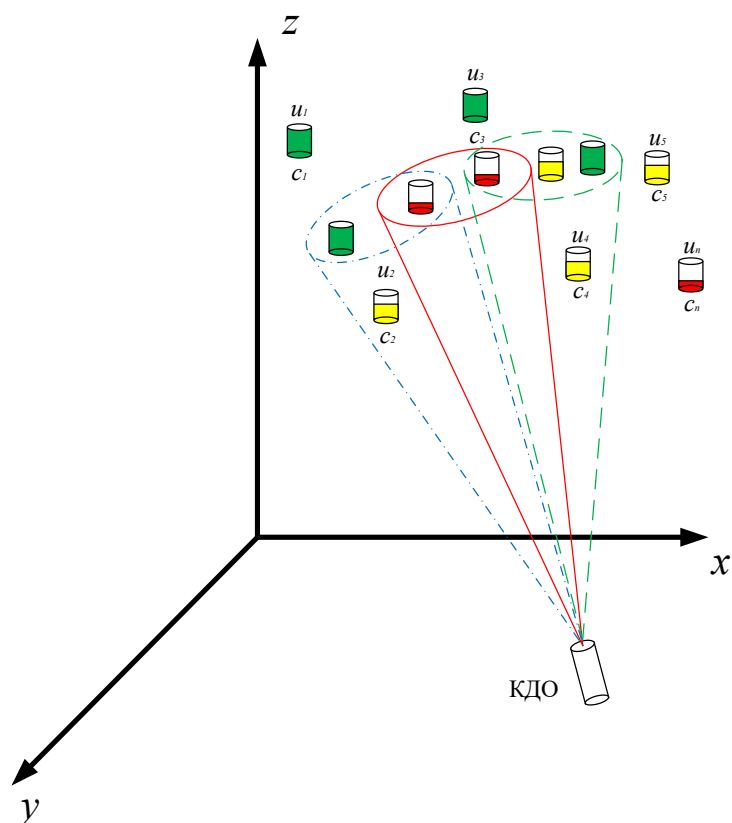


Рисунок 2.3 – Процесс формирования кластеров воздушных объектов, путем определения попадания воздушных объектов в диаграмму направленности КДО

На первом этапе число кластеров не задаётся вручную – алгоритм выводит его сам, исходя из текущего пространственного распределения ВО и ширины области поддержки КДО. Полученная матрица пространственных кластеров затем служит входными данными для построения траектории поворотного устройства.

Рисунок 2.3 поясняет логику объединения: объекты, одновременно попадающие в одну область поддержки, составляют единый кластер – это сокращает число поворотов и тем самым снижает непроизводительные затраты времени на перемещение между наведениями.

Важное практическое свойство этапа – матрица не фиксируется раз и навсегда. При появлении новых ВО или смещении уже отслеживаемых объектов она пересчитывается, не останавливая работу системы.

.В результате выполненного перебора в соответствии с разработанным первым этапом алгоритма, формируется матрица пересекающихся пространственных кластеров воздушных объектов – Таблица 2.1 (связный граф (рисунок 2.4)).

Матрица отражает степень пересечения различных кластеров воздушных объектов (ВО) в пространственной области и позволяет выявить оптимальные позиции поворотного устройства для максимально эффективного обеспечения нескольких объектов одновременно. Диагональные элементы матрицы указывают общее количество воздушных объектов в соответствующем кластере. Недиagonalные элементы матрицы характеризуют степень пересечения различных кластеров. Особенностью представленной матрицы является её симметричность относительно главной диагонали, что обусловлено свойством коммутативности операции пересечения множеств.

Таблица 2.1 - Матрица пересекающихся пространственных кластеров воздушных объектов

	ψ_1	ψ_2	ψ_3	...	ψ_{26}	ψ_q	
ψ_1	1						$\sum_{i=1}^q [s_i]$
ψ_2	0	1					$\sum_{i=1}^q [s_i]$
ψ_3	1	1	1				$\sum_{i=1}^q [s_i]$
...	...	...	...	...			...
ψ_{26}	1	0	1	...	1		$\sum_{i=1}^q [s_i]$
ψ_q	1	1	1	...	1	1	$\sum_{i=1}^q [s_i]$
	$\sum_{i=1}^q [z_i]$	$\sum_{i=1}^q [z_i]$	$\sum_{i=1}^q [z_i]$	...	$\sum_{i=1}^q [z_i]$	$\sum_{i=1}^q [z_i]$	

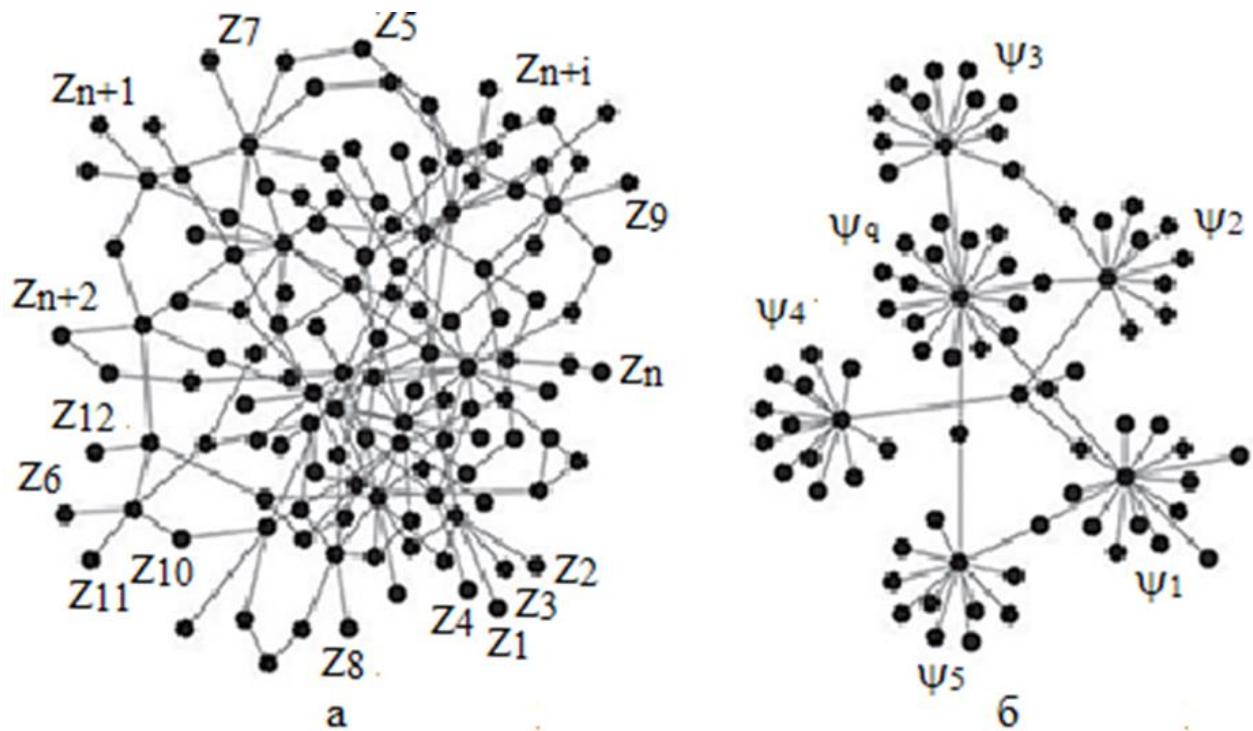


Рисунок 2.4 – Пример формирования пространственных кластеров воздушных объектов а) исходное множество Ψ ; б) кластеры $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4, \psi_5, \psi_q$, составляющие множество Ψ .

Анализ данной матрицы позволяет определить:

- степень пересечения кластеров (по недиагональным элементам);
- оптимальные позиции поворотного устройства для одновременного обслуживания максимального количества ВО.

Как видно из таблицы 2.1, кластеры могут иметь различную степень пересечения, что необходимо учитывать при формировании оптимальной траектории перемещения поворотного устройства КДО. Высокая степень пересечения кластеров указывает на возможность выбора такого положения поворотного устройства, при котором обеспечение может быть предоставлено нескольким воздушным объектам одновременно, что существенно повышает эффективность работы комплекса.

Матрица пересекающихся пространственных кластеров воздушных объектов используется в алгоритме формирования оптимальной траектории для определения последовательности обслуживания кластеров с учетом их взаимного расположения, приоритетности и потребностей в обслуживании.

На рисунке 2.5 представлен наглядный пример процесса формирования пространственных кластеров воздушных объектов для оптимизации работы поворотного устройства комплекса дистанционного обслуживания. Рисунок состоит из двух частей: а) и б), демонстрирующих преобразование исходного множества воздушных объектов в структурированные кластеры.

Между некоторыми кластерами наблюдаются зоны пересечения, что соответствует ненулевым недиагональным элементам в матрице пересекающихся пространственных кластеров (Таблица 2.1). Эти пересечения указывают на возможность оптимизации траектории поворотного устройства для последовательного обслуживания смежных кластеров с минимальными затратами на перемещение.

Таким образом, синтезированные алгоритм усечения (минимизации) множества Z и алгоритм формирования матрицы пространственных кластеров воздушных объектов, позволяют получить множество кластеров ВО и перейти к формированию оптимальной траектории перемещения поворотного устройства КДО.

Предполагается, что для реализации алгоритма необходимо построить оптимальную траекторию перемещения поворотного устройства КДО, которая может быть создана на основе кусочно-непрерывного закона управления (угла поворота антенной системы) – рисунок 2.5, причем, условием оптимальности такой траектории будет обеспечение максимально возможного количества воздушных объектов за минимальное (располагаемое) время.

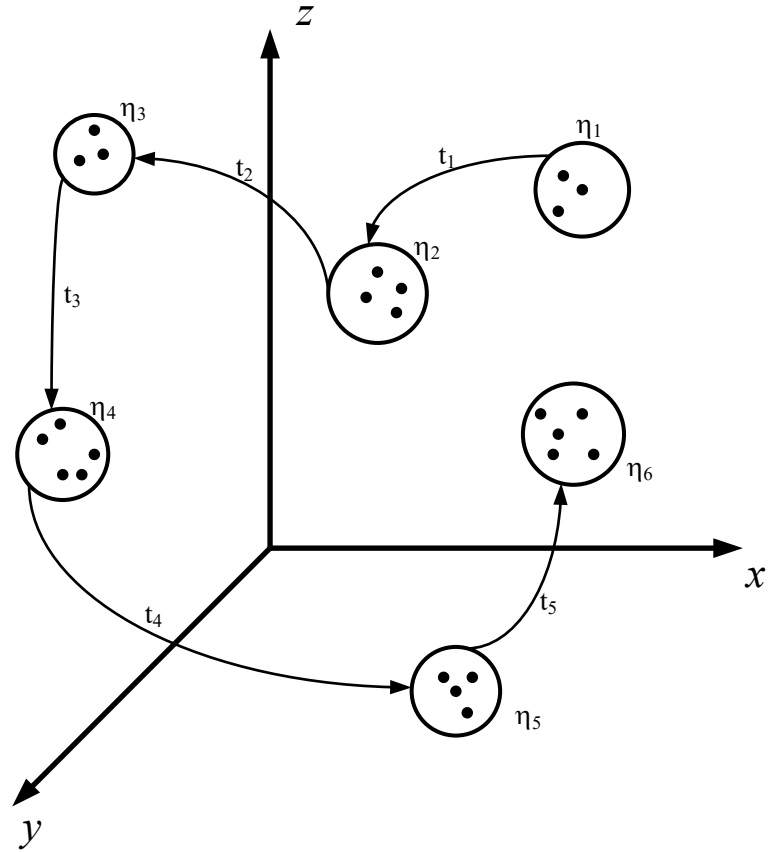


Рисунок 2.5 – Оптимальная траектория обхода кластеров воздушных объектов.

Решение задачи формирования оптимальной траектории, представляет собой оптимизационную задачу удаления связанных вершин графа за минимальное число шагов. При этом необходимо учитывать время на удаление вершины η_i и время на перемещение между вершинами, представленное нагруженностью ребер t_i (рисунок 2.5).

Сформулируем общую оптимизационную задачу:

$$\left\{ \begin{array}{l} |\Phi| = |\Psi \setminus \Omega| \rightarrow \max; \\ \left(\sum_{i=1}^q \eta_i + \sum_{i=1}^{q-1} t_i \right) \rightarrow \min; \\ \left(\sum_{i=1}^q \eta_i + \sum_{i=1}^{q-1} t_i \right) \leq \frac{S_{\text{марш}}}{V_{\text{BO}}}, \end{array} \right. \quad (2.9)$$

где Φ – множество обслуживаемых воздушных объектов, Ψ – исходное множество, Ω – множество необслуженных воздушных объектов, η_i – время обеспечения КДО ПГВО, t_i – время на перемещение поворотного устройства КДО, $S_{марш}$ – длина маршрута полета, $V_{во}$ – скорость воздушных объектов.

Второй этап алгоритма состоит из двух основных фаз:

Фаза 1: Приоритетная обработка критических объектов

1. Формирование множества воздушных объектов с критическим уровнем обслуживания:

$$U_{crit} = \{u_i \in U \mid c_i < c_{crit}\}. \quad (2.10)$$

2. Пока $U_{crit} \neq \emptyset$:

а) нахождение воздушного объекта с минимальным уровнем обслуживания:

$$u_{min} = \arg \min_{\{u_i \in U_{crit}\}} (c_i). \quad (2.11)$$

б) если существует несколько воздушных объектов с одинаковым минимальным уровнем обслуживания, то выбирается объект, при наведении на который количество покрываемых воздушных объектов максимально:

$$u_{selected} = \arg \max_{u_i \in U_{min}} \sum_{j=1}^N \left(i_{ij} [u_j \in U_{available}] \right), \quad (2.12)$$

где $[u_j \in U_{available}]$ – индикаторная функция, равная 1, если воздушный объект u_j еще не обслужен, и 0 в противном случае.

в) если по-прежнему существует несколько кандидатов (множество $U_{candidates}$), то осуществляется выбор кандидата, для наведения на который требуется минимальный угол поворота КДО:

$$u_{selected} = \arg \min_{u_i \in U_{candidates}} \Delta\Omega((\varphi, \theta), (\varphi_i, \theta_i)), \quad (2.13)$$

где $\Delta\Omega$ – функция вычисления углового расстояния между текущим положением КДО и требуемым для наведения на воздушный объект u_i .

г) добавление выбранного воздушного объекта $u_{selected}$ в последовательность S;

д) удаление из множества доступных воздушных объектов $U_{available}$ всех объектов, покрываемых лучом при наведении на $u_{selected}$:

$$U_{available} = U_{available} \setminus \{u_j \in U_{available} | i_{selected}, j = 1\}. \quad (2.14)$$

е) обновление множества критических объектов.

Фаза 2: Обработка оставшихся объектов

1. Пока $U_{available} \neq \emptyset$:

а) для каждого доступного воздушного объекта u_i вычисление параметров:

– количество одновременно покрываемых воздушных объектов:

$$cover_i = \sum_{j=1}^N (i_{ij} \cdot [u_j \in U_{available}]), \quad (2.15)$$

– доля воздушных объектов с низким уровнем обслуживания среди покрываемых объектов:

$$LP_i = \frac{\left(\sum_{j=1}^N (i_{ij} [u_j \in U_{available}]) [c_j < 50\%] \right)}{\left(\sum_{j=1}^N (i_{ij} [u_j \in U_{available}]) \right)}. \quad (2.16)$$

б) нахождение воздушного объекта с максимальным процентом покрытия объектов с низким уровнем обслуживания:

$$u_{\max LP} = \arg \max_{u_i \in U_{available}} LP_i. \quad (2.17)$$

в) если максимальный процент равен 0 (нет объектов с низким уровнем обслуживания), выбор объекта с максимальным покрытием:

$$u_{selected} = \arg \max_{u_i \in U_{available}} cover_i. \quad (2.18)$$

г) если существует несколько воздушных объектов с одинаковыми параметрами, выбор того, для которого требуется минимальный угол поворота:

$$u_{selected} = \arg \min_{u_i \in U_{candidates}} \Delta\Omega((\varphi, \theta), (\varphi_i, \theta_i)). \quad (2.19)$$

д) добавление выбранного объекта в последовательность S;

е) удаление из множества доступных воздушных объектов всех объектов, покрываемых лучом при наведении на выбранный объект.

Для каждого кластера G_j в сформированной последовательности обхода S базовое время обслуживания определяется как:

$$\eta_{base,j} = \max \left\{ \frac{(c_{target} - c_i) E_{total,i}}{100 P_{charge,i} \eta_{eff,i}} \mid i \in G_j \right\}, \quad (2.20)$$

где: c_{target} - целевой уровень необходимости обслуживания (единый для всех объектов или дифференцированный для критических); c_i - текущий уровень обслуживания ВО i ; $E_{total,i}$ - полная потребность в обслуживании ВО i ; $P_{charge,i}$ - мощность обслуживания ВО i ; $\eta_{eff,i}$ - коэффициент эффективности обслуживания ВО i .

Этот подход определяет время обслуживания кластера на основе максимального времени, необходимого для обслуживания любого из входящих в него объектов до целевого уровня.

После расчета базовых времен обслуживания для всех кластеров в последовательности необходимо проверить, не превышает ли суммарное время обхода располагаемое время полета:

$$\sum \eta_{base,j} + \sum t_i \leq \frac{S_{марш}}{V_{BO}}, \quad (2.21)$$

где: $\sum \eta_{base,j}$ - суммарное базовое время обслуживания всех кластеров; $\sum t_i$ - суммарное время на перемещение поворотного устройства между кластерами; $S_{марш}$ - длина маршрута полета; V_{BO} - скорость воздушных объектов.

Если суммарное время обхода превышает располагаемое время, необходимо скорректировать времена обслуживания кластеров. Для кластеров, содержащих объекты с критически высоким уровнем обслуживания, гарантированное минимальное время обслуживания:

$$\eta_{min,j} = \max \left\{ \frac{\max(c_{safe} - c_i, 0) E_{total,i}}{100 P_{charge,i} \eta_{eff,i}} \mid i \in G_j, c_i < c_{crit} \right\}, \quad (2.22)$$

где c_{safe} - минимально безопасный уровень обслуживания (например, 15-20%).

После выделения гарантированного времени для критических объектов, оставшееся время распределяется между всеми кластерами пропорционально:

$$T_{remaining} = \frac{S_{марш}}{V_{BO}} - \sum t_i - \sum \eta_{min,j}, \quad (2.23)$$

$$\eta_j = \eta_{min,j} + (\eta_{base,j} - \eta_{min,j}) \frac{T_{remaining}}{\sum_k (\eta_{base,k} - \eta_{min,k})} \quad (2.24)$$

для всех кластеров j , где $\eta_{min,j}$ – гарантированное минимальное время (может быть нулевым для некритических кластеров).

Таким образом, при формировании оптимальной траектории обхода кластеров алгоритм не только определяет последовательность наведений, но и оптимальное время обслуживания для каждого кластера, обеспечивая приоритетное энергетическое обеспечение критических объектов и максимально эффективное использование располагаемого времени.

Вычислительная сложность предложенного алгоритма определяется следующими параметрами

- N - количество воздушных объектов:
- построение матрицы пересечений имеет сложность $O(N^2)$;
- в худшем случае потребуется $O(N)$ итераций для обработки всех объектов.
- на каждой итерации требуется $O(N^2)$ операций для определения оптимального кандидата.

Дополнительные эвристики повышают качество решения для практических случаев, особенно в условиях неравномерного распределения энергетических уровней воздушных объектов.

В диссертации разработана структура системы управления КДО (рисунок 2.6), из которой видно, что центральным элементом в ней является подсистема моделирования, которая должна обеспечить формирование оптимальной траектории перемещения поворотного устройства КДО при энергетическом обеспечении множества ПГВО и определение параметров управляющих воздействий.

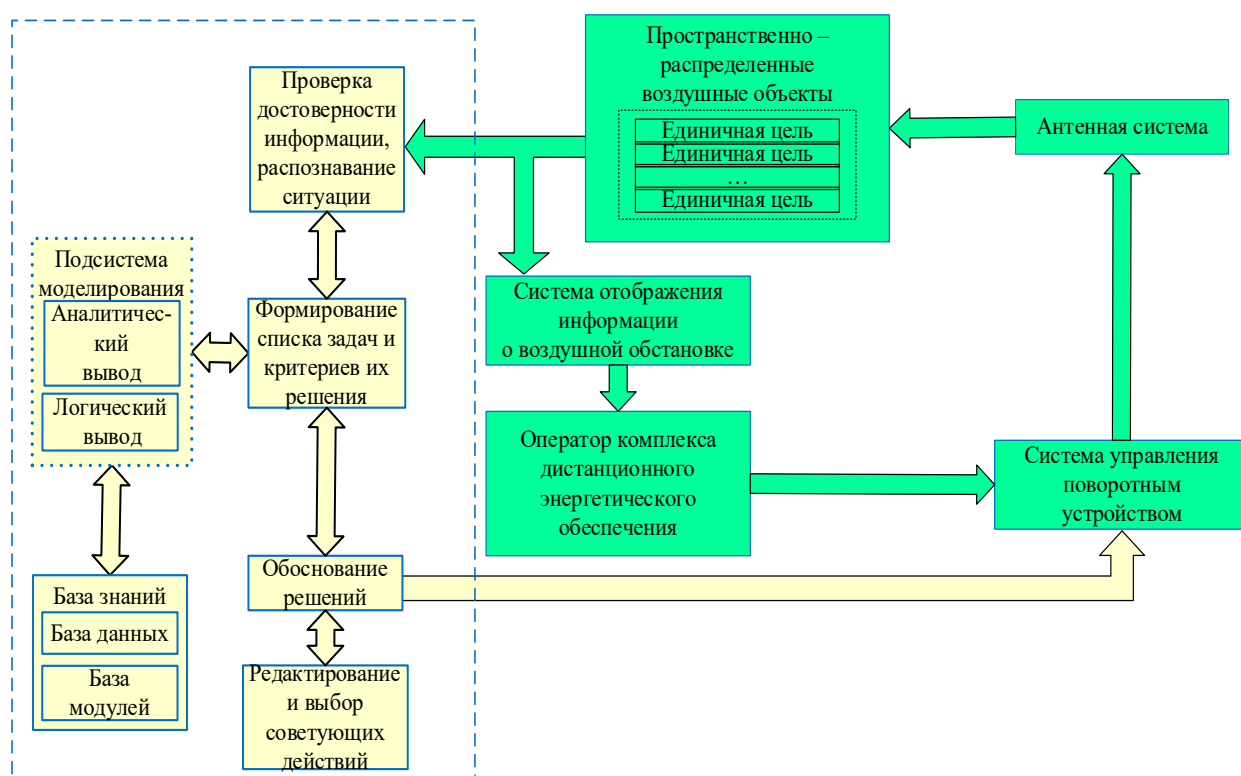


Рисунок 2.6 – Структура системы управления в составе комплекса дистанционного обеспечения

Система управления представляет собой многоуровневую структуру, включающую в себя как автоматические компоненты принятия решений, так и элементы интерактивного взаимодействия с оператором. Рассмотрим каждый из блоков схемы и их функциональные взаимосвязи:

1. Подсистема моделирования

Этот блок представляет собой интеллектуальное ядро системы управления, реализующее математические модели и алгоритмы для анализа текущей ситуации и прогнозирования её развития. Подсистема моделирования включает два основных компонента:

Аналитический вывод: осуществляет количественные расчеты параметров оптимальной траектории на основе математических моделей

Логический вывод: реализует процедуры принятия решений на основе правил и закономерностей, хранящихся в базе знаний

II. База знаний

Комплексная информационная система объединяет два взаимосвязанных компонента. База данных хранит структурированные сведения о технических характеристиках КДО, параметрах воздушных объектов, а также накопленную статистику по предыдущим сеансам обслуживания и эффективности различных стратегий управления – всё это обеспечивает быстрый доступ к фактографии в момент принятия решений. База моделей устроена иначе: она содержит математические, логические и имитационные модели, описывающие динамику движения воздушных объектов, распространение луча, поведение поворотного устройства и другие процессы в составе КДО. Назначение базы моделей – прогнозирование развития ситуации и сравнительная оценка вариантов управления.

III. Проверка достоверности информации, распознавание ситуации

Данный блок отвечает за валидацию входящих данных и отсеивание помех, после чего переходит к содержательной части – идентификации типовых ситуаций и классификации воздушных объектов. На выходе формируется структурированное представление текущей воздушной обстановки, пригодное для непосредственного использования в процедурах принятия решений.

IV. Формирование списка задач и критериев их решения

На основе распознанной ситуации и данных из подсистемы моделирования данный блок формирует упорядоченный список задач дистанционного обеспечения с соответствующими критериями оптимальности. Здесь определяются приоритеты обслуживания различных воздушных объектов и временные рамки для каждой задачи.

V. Обоснование решений

В этом блоке осуществляется сравнительный анализ возможных вариантов решений по выработанным критериям, расчет ожидаемой эффективности каждого варианта и формирование аргументированного обоснования предлагаемых действий.

VI. Редактирование и выбор советующих действий

Этот блок обеспечивает интерфейс для оператора комплекса, позволяя редактировать и утверждать предлагаемые системой решения. Здесь реализуются функции визуализации вариантов решений, их сравнения и выбора оптимального с учетом экспертной оценки оператора.

VII. Пространственно-распределенные воздушные объекты

Представляет собой совокупность целевых приемников, распределенных в пространстве. Этот блок является объектом воздействия КДО и источником обратной связи о результатах дистанционной поддержки через систему отображения информации.

VIII. Система отображения информации о воздушной обстановке

Осуществляет визуализацию текущего положения воздушных объектов, их траекторий и других параметров для оператора комплекса. Эта система принимает данные от пространственно-распределённых воздушных объектов и переводит их в форму, удобную для работы оператора.

IX. Оператор комплекса дистанционного обеспечения

Центральная фигура в контуре управления – оператор. В штатном режиме его роль сводится к контролю и утверждению предложений, формируемых автоматикой. Однако в нестандартных ситуациях оператор вправе напрямую вмешаться в работу системы управления поворотным устройством, полностью обойдя автоматические блоки принятия решений.

X. Система управления поворотным устройством

Этот блок замыкает цепочку: решение (будь то выработанное автоматикой или принятое оператором) преобразуется здесь в конкретные управляющие сигналы для привода. Иными словами, именно здесь абстрактное «куда навести» превращается в реальное механическое движение антенны.

XI. Антенная система

Финальное звено – антенная система. Она не принимает решений и не анализирует обстановку: её единственная задача – физически навести луч на указанный объект, исполнив команду от системы управления поворотным устройством.

В совокупности описанная структура решает задачу формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства КДО, не замыкая её ни на автоматику, ни на оператора в отдельности – оба контура работают совместно. Циклическая организация информационных потоков даёт системе возможность перестраиваться по мере изменения обстановки, не теряя непрерывности обслуживания пространственно-распределённых воздушных объектов.

2.3 Выводы по второй главе

Основные выводы можно сформулировать следующим образом:

1. Для формализации процесса наведения в условиях динамично меняющейся обстановки и множества обслуживаемых объектов построена обобщённая модель формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства КДО.

2. Разработан алгоритм построения матрицы пространственных кластеров воздушных объектов на основе их угловых координат относительно КДО и ширины области поддержки. Алгоритм самостоятельно определяет и число кластеров, и их состав под текущую конфигурацию группы.

3. Введено понятие матрицы пересекающихся пространственных кластеров воздушных объектов, которая предоставляет количественную информацию о степени взаимного пересечения различных кластеров. Анализ данной матрицы позволяет выявить оптимальные позиции поворотного устройства для одновременного обслуживания максимального количества воздушных объектов.

4. Разработанный алгоритм формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства КДО множества ПГВО, который обеспечивает:

- минимум времени на перемещение поворотного устройства КДО, за счет формирования пространственной траектории, состоящей из этапов с минимальными градусными значениями между кластерами воздушных объектов;

- максимум обслуженных воздушных объектов, который достигается за счет вложенного алгоритма их сортировки в общем алгоритме и поддержки кластеров воздушных объектов, начиная с кластеров наибольшей размерности μ
- позволяет перейти к определению эффективного и безопасного пространства функционирования КДО.

3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ПОВОРОТНЫМ УСТРОЙСТВОМ КОМПЛЕКСА ДИСТАНЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И МОДЕЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСА

3.1. Алгоритм управления поворотным устройством комплекса дистанционного обеспечения для реализации его траектории движения при обслуживании множества пространственно-распределенных групп воздушных объектов за минимальное время

Современные КДО воздушных объектов требуют эффективных систем наведения с возможностью быстрого перенацеливания на различные группы БПЛА. Ключевым элементом таких комплексов является поворотное устройство, обеспечивающее пространственную ориентацию диаграммы направленности.

Реализация перемещения поворотного устройства КДО множества пространственно-распределенных групп воздушных объектов возможна при передаче соответствующей последовательностью курсовых углов, в систему управления поворотным устройством.

Поворотное устройство представляет собой двухосевой механизм, обеспечивающий вращение по азимуту (горизонтальная плоскость) и углу места (вертикальная плоскость). Особенностью рассматриваемой системы является применение безредукторного привода на основе синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) по обеим осям, что позволяет:

- исключить люфты и упругие деформации в механической передаче;
- повысить быстродействие системы;
- увеличить точность позиционирования;
- снизить массогабаритные характеристики.

В результате проведенных имитационных экспериментов было определено, что универсальный закон управления поворотным устройством КДО по азимуту не является оптимальным во всем диапазоне углов от 0° до 40° . Это обусловлено зависимостью момента инерции азимутальной оси от текущего положения оси угла места, показанной на рисунке 3.1.

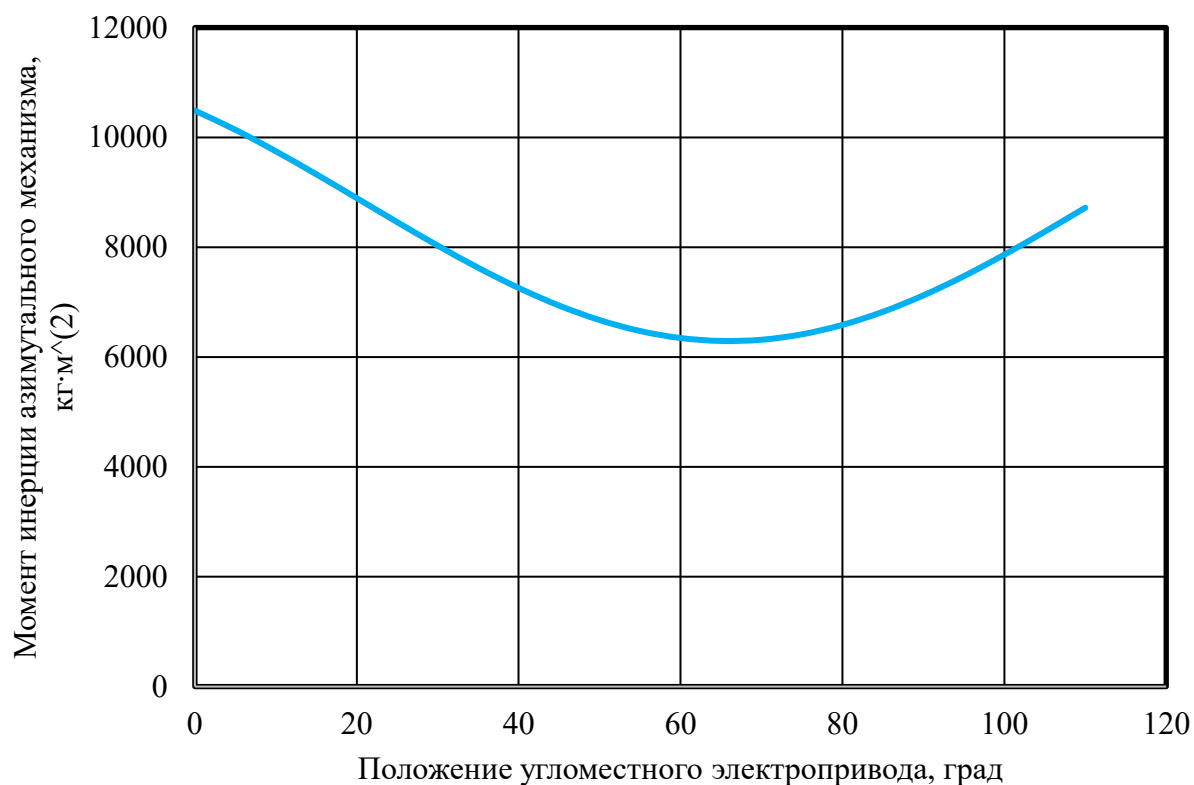


Рисунок 3.1 – Графическая зависимость момента инерции азимутального электропривода от положения угломестного электропривода

График носит нелинейный характер. При угле места 0° момент инерции достигает максимума – оборудование в этом положении максимально удалено от оси азимутального вращения. При переходе к 90° картина обратная: масса сосредотачивается компактно вблизи оси, и момент инерции принимает минимальное значение. Наиболее резкое изменение приходится на диапазон 30° – 70° , где скорость нарастания и спада наибольшая. В целом разброс момента инерции относительно номинального значения достигает 40%. Этот показатель имеет крити-

ческое значение для синтеза системы управления, поскольку такой существенный диапазон изменения динамических характеристик требует обязательного применения адаптивных алгоритмов управления.

Поэтому для минимизации времени перемещения КДО от одного обслуживаемого кластера воздушных объектов к другому была разработана математическая модель управления поворотным устройством КДО, структура которой представлена на рисунке 3.2 [103-105].

Разработанная система управления имеет иерархическую двухконтурную структуру (рисунок 3.2), включающую:

- внутренний контур регулирования токов статора;
- внешний контур регулирования положения.

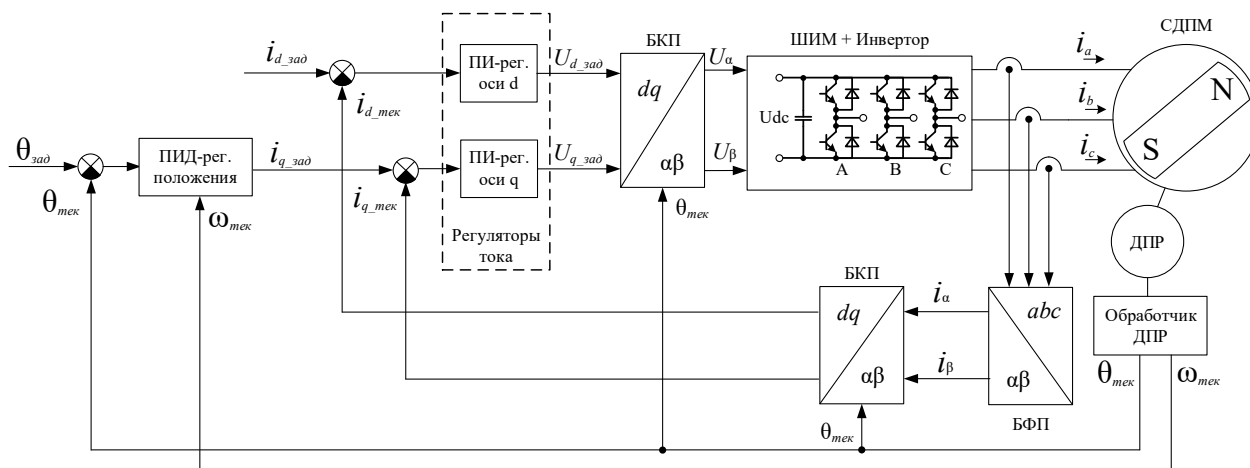


Рисунок 3.2 – Структура системы управления в составе комплекса дистанционного обеспечения

Внутренний контур регулирования токов построен на принципах векторного управления и предназначен для формирования электромагнитного момента двигателя. Ключевыми компонентами данного контура являются:

1. Регуляторы токов по осям d и q, выполненные на базе пропорционально-интегральных (ПИ) регуляторов, обеспечивающих нулевую статическую ошибку регулирования
2. Блок преобразования координат $ABC \rightarrow dq$, включающий:

- преобразователь трехфазной системы (a, b, c) в неподвижную двухфазную систему (α , β) по алгоритму Кларк;
- преобразователь из неподвижной системы (α , β) во вращающуюся систему координат (d, q), связанную с положением ротора, по алгоритму Парка;
- вход информации о положении ротора от датчика положения ротора (ДПР).

3. Блок преобразования координат $dq \rightarrow ABC$, включающий:

- Преобразователь вращающейся системы координат (d, q), связанной с положением ротора, в неподвижную систему (α , β) по алгоритму Парка;
- преобразователь неподвижной двухфазной системы (α , β) в трехфазную систему (a, b, c) по алгоритму Кларк;
- вход информации о положении ротора от датчика положения ротора (ДПР).

4. Блок ограничителя напряжения регуляторов токов, предотвращающий насыщение регуляторов и обеспечивающий корректную работу привода при ограниченном напряжении питания.

5. Блок ШИМ (широтно-импульсной модуляции), формирующий управляющие импульсы для силовых ключей преобразователя частоты на основе рассчитанных мгновенных значений фазных напряжений

Внешний контур системы управления реализует регулирование положения вала двигателя и включает:

- регулятор положения, выполненный на базе пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора с адаптивными коэффициентами, зависящими от текущего момента инерции или положения угломестной оси;
- блок ограничения задания тока, предотвращающий перегрузку двигателя и преобразователя частоты.

Для различных углов поворота необходимо получить адаптивный алгоритм управления, обеспечивающий минимальное время перемещения поворотного

устройства КДО за счет определения крутизны траектории изменения скорости перемещения при формировании управляющего момента, при этом необходимо производить постоянный контроль текущего положения поворотного устройства КДО и дополнительное регулирование в случае необходимости.

Для решения поставленной задачи предлагается применить адаптивный закон ПИД-управления, основанный на изменении коэффициентов регулятора в зависимости от текущего угла места, что позволяет компенсировать влияние переменной момента инерции на динамические характеристики системы.

Коэффициенты ПИД-регулятора азимутального привода представляются как функции от угла места:

$$\begin{aligned} K_{p,\varphi}(\theta) &= K_{p,\varphi,0} \cdot f_p(\theta); \\ K_{i,\varphi}(\theta) &= K_{i,\varphi,0} \cdot f_i(\theta); \\ K_{d,\varphi}(\theta) &= K_{d,\varphi,0} \cdot f_d(\theta). \end{aligned} \quad (3.1)$$

где $K_{p,\varphi}, K_{i,\varphi}, K_{d,\varphi}$ – базовые коэффициенты, настроенные для максимального значения момента инерции; $f_p(\theta), f_i(\theta), f_d(\theta)$ – функции коррекции, зависящие от угла места.

Для обеспечения инвариантности динамических характеристик системы к изменению момента инерции функции коррекции коэффициентов регулятора должны компенсировать эту зависимость. Исходя из теории автоматического управления, для системы второго порядка оптимальные коэффициенты пропорциональны моменту инерции:

$$f_p(\theta) = f_i(\theta) = f_d(\theta) = \frac{J_{\varphi,\max}}{J_{\varphi}(\theta)}, \quad (3.2)$$

где $J_{\varphi,\max}$ – максимальное значение момента инерции, для которого настроены базовые коэффициенты регулятора.

Подставляя модель зависимости момента инерции от угла места, получаем:

$$f_p(\theta) = f_i(\theta) = f_d(\theta) = \frac{J_{\varphi,\max}}{J_{\varphi,\min} + \Delta J_{\varphi} \cdot \cos^2(\theta)}, \quad (3.3)$$

где $J_{\varphi, \min}$ – минимальный момент инерции (при $\theta = 90^\circ$); ΔJ_{φ} – диапазон изменения момента инерции; $\cos^2(\theta)$ – функция, описывающая зависимость момента инерции от угла места.

Алгоритм управления поворотным устройством на основе адаптивного ПИД регулятора реализуется следующим образом:

1. Измерение текущих азимута φ и угла места θ .
2. Расчет коэффициента коррекции на основе зависимости момента инерции от угла места:

$$f(\theta) = \frac{J_{\varphi, \max}}{J_{\varphi, \min} + \Delta J_{\varphi} \cdot \cos^2(\theta)}. \quad (3.4)$$

3. Коррекция коэффициентов ПИД-регулятора азимутального привода:

$$\begin{aligned} K_{p, \varphi}(\theta) &= K_{p, \varphi, 0} \cdot f(\theta); \\ K_{i, \varphi}(\theta) &= K_{i, \varphi, 0} \cdot f(\theta); \\ K_{d, \varphi}(\theta) &= K_{d, \varphi, 0} \cdot f(\theta). \end{aligned} \quad (3.5)$$

4. Расчет ошибок позиционирования:

$$\begin{aligned} e_{\varphi} &= \varphi_{target} - \varphi; \\ e_{\theta} &= \theta_{target} - \theta, \end{aligned} \quad (3.6)$$

где φ_{target} и θ_{target} – заданные КДО азимут и угол места.

5. Формирование управляющих сигналов с использованием скорректированных коэффициентов:

$$\begin{aligned} u_{\varphi} &= K_{p, \varphi} \cdot e_{\varphi} + K_{i, \varphi} \cdot \int e_{\varphi} dt + K_{d, \varphi} \cdot \frac{de_{\varphi}}{dt}; \\ u_{\theta} &= K_{p, \theta} \cdot e_{\theta} + K_{i, \theta} \cdot \int e_{\theta} dt + K_{d, \theta} \cdot \frac{de_{\theta}}{dt}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Управление поворотным устройством заключается в достижении нуля разности углов требуемого положения и текущего положения поворотного устройства КДО.

Алгоритм реализации траектории движения поворотного устройства КДО для обеспечения множества пространственно-распределенных групп воздушных объектов включает следующие этапы:

1. Инициализация:

- определение начального положения поворотного устройства (φ_0, θ_0) ;
- настройка базовых коэффициентов регуляторов

$$K_{p,\varphi}, K_{i,\varphi}, K_{d,\varphi}, K_{p,\theta}, K_{i,\theta}, K_{d,\theta}.$$

2. Цикл обработки последовательности кластеров:

- получение текущего кластера из оптимальной последовательности $S = (s_1, s_2, \dots, s_k)$;
- определение целевых углов наведения $(\varphi_{target}, \theta_{target})$ для текущего кластера;
- определение времени обслуживания текущего кластера η_j .

3. Перемещение к текущему кластеру: реализация движения с использованием алгоритма управления на основе метода переключения параметров регулятора.

4. Обслуживание кластера: точное удержание поворотного устройства в целевом положении в течение времени обслуживания η_j .

5. Переход к следующему кластеру:

- обновление текущего положения;
- переход к следующему кластеру в последовательности.

Алгоритм и модель управления поворотным устройством КДО позволяют реализовать траекторию перемещения поворотного устройства при передаче соответствующей последовательности курсовых углов в систему управления за минимальное располагаемое время.

3.2. Математическая модель определения оптимальных условий дистанционного обеспечения беспилотных летательных аппаратов и функционирования комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов

В рамках исследования была разработана и проанализирована математическая модель, позволяющая определить количественные характеристики обеспечения за располагаемое время. Методика моделирования включает четыре этапа [106]: случайная генерация местоположений ВО в пространстве воздействия КДО; последовательный обход этого пространства с заданной дискретностью; автоматическое управление поворотным устройством; решение оператора сводится лишь к факту применения или неприменения КДО (инерционность взаимодействия в паре «оператор–КДО» не учитывается).

По результатам предварительного моделирования установлено, что на количество обслуживаемых ВО определяющее влияние оказывают три параметра.

Дальность D от КДО до пространства группы воздушных объектов (ПГВО). С ростом D зона потенциального охвата расширяется, однако плотность передаваемой энергии падает согласно закону обратных квадратов [1–3, 16]. На практике это означает существование оптимального расстояния, при котором покрытие ПГВО максимально при допустимой эффективности передачи. Кроме того, D непосредственно влияет на рабочие значения угловых параметров системы, поэтому при оптимизации режимов КДО этот параметр нельзя рассматривать изолированно [110].

Ширина зоны обслуживания β . Расширение зоны увеличивает число одновременно охватываемых объектов, но распределяет энергию между ними менее концентрированно – эффективность обслуживания каждого отдельного ВО при этом снижается [111]. Помимо энергетического аспекта, реальные системы имеют конструктивные ограничения на формирование диаграммы направленности [112], которые делают параметр β не произвольно регулируемым, а ограниченным техническими характеристиками конкретного КДО. Исследования [113,

114] подтверждают, что оптимальное β находится в точке баланса между этими двумя факторами.

Угловая величина пространства обслуживания в горизонтальной плоскости γ [107–109]. Воздушные объекты в группе редко распределены равномерно – они образуют конфигурации с выраженными сгущениями. Подбор γ под типичные конфигурации ПГВО позволяет сократить число перенацеливаний КДО, что напрямую сказывается на суммарном времени обслуживания группы [111]. В динамических сценариях, когда конфигурация группы меняется в ходе операции, γ выступает основным инструментом адаптации [112].

Угловая величина пространства в вертикальной плоскости α в модель не включена. Вертикальный разброс ВО в типичных сценариях заметно меньше горизонтального, а штатная диаграмма направленности КДО перекрывает характерные вариации высоты в группе с запасом. Статистический анализ экспериментальных данных [16] показал, что изменения α в технически достижимом диапазоне меняют эффективность обслуживания менее чем на 5% – это достаточное основание для исключения параметра из модели без значимой потери точности.

.Таким образом, выбор основных параметров модели (D , β , γ) обоснован как теоретическими соображениями, так и результатами экспериментальных исследований, что обеспечивает адекватность разработанной математической модели реальным условиям функционирования КДО [113,114].

В рамках данной модели не учитывается текущий уровень обслуживания БПЛА, поскольку основной задачей является оптимальное размещение КДО относительно ПГВО с целью обеспечения максимальной зоны видимости и попадания максимального количества БПЛА в диаграмму направленности. Это позволяет сократить количество обходов и минимизировать общее время обслуживания всех БПЛА в группе.

Включение уровня обслуживания БПЛА как дополнительного параметра существенно усложнило бы математическую модель и увеличило бы вычислительную сложность без пропорционального повышения точности результатов для поставленной задачи пространственной оптимизации [112]. В реальных

условиях эксплуатации КДО часто применяется бинарный принцип обслуживания, при котором система либо обслуживает БПЛА до определенного порогового уровня, либо не обслуживает вовсе.

Экспериментальные исследования показывают, что при количестве БПЛА в группе более 15 единиц распределение уровней обслуживания приближается к равномерному с коэффициентом вариации менее 0,2, что позволяет применить упрощенную модель при решении задачи пространственной оптимизации [110]. Таким образом, для решения поставленной задачи определения оптимальных условий функционирования КДО в пространственном аспекте, исключение уровня обслуживания БПЛА из модели является обоснованным и не приводит к существенному снижению точности полученных результатов.

Динамика количества обслуживаемых воздушных объектов (θ) имеет явно выраженный нелинейный характер, обусловленный неравномерным распределением объектов в пространстве и квадратичной зависимостью затухания энергетического потока от дистанции между КДО и целевыми воздушными объектами [111]. Для математического описания данной многопараметрической зависимости была разработана комплексная аппроксимирующая функция, основанная на многослойной структуре преобразований следующего вида:

$$\theta \begin{bmatrix} D \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = W_{1 \times 1}^4 \sigma \left(\mathbf{W}_{1 \times 3}^3 \tanh \left(\mathbf{W}_{3 \times 6}^2 \tanh \left(\mathbf{W}_{6 \times 3}^1 \frac{\left(\frac{\ln(\mathbf{X}_{3 \times 1}) - \mathbf{X}_{3 \times 1}}{\sigma L n} \right)}{\mathbf{X}_{3 \times 1}} + \mathbf{B}_{6 \times 1}^1 + \right) + \mathbf{B}_{3 \times 1}^2 \right) + \mathbf{B}_{1 \times 1}^3 \right) + \mathbf{B}_{1 \times 1}^4. \quad (3.8)$$

где $X_1 = \frac{D}{D_{max}}$; $X_2 = \frac{\beta}{\beta_{max}}$; $X_3 = \frac{\gamma}{\gamma_{max}}$; $X_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix}$; $\mathbf{W}^i$ - весовые матрицы преоб-

разований, определяющие нелинейную зависимость выхода от входа (матрицы коэффициентов, масштабирующие входные параметры); $\mathbf{B}^i$ – векторы смещений, корректирующие уровень активации на каждом слое.

Коэффициенты матриц $\mathbf{W}^i$ вычисляются методом градиентного спуска [114]. В первом приближении будем полагать, что исследуемый процесс линеен, тогда вектор получаемых значений $\mathbf{Y}$ имеет вид:

$$\mathbf{Y}=\mathbf{W}\mathbf{X} \quad (3.9)$$

где $\mathbf{W}=[w_{ij}, i=1,2 \dots n, j=1,2 \dots m]$, $\mathbf{X} = [x_j, j=1,2, \dots, m]$.

Данная модель представляет собой многослойную нейронную сеть прямого распространения [115], включающую:

1. Предобработку входных данных.

Перед подачей на вход нейронной сети исходные параметры подвергаются логарифмическому преобразованию и последующей стандартизации:

$$\mathbf{Z}_{3 \times 1} = \frac{\left(\ln(\mathbf{X}_{3 \times 1}) - \frac{\sum_{j=1}^{Ln} \ln(x_j)}{Ln} \right)}{\frac{\sum_{j=1}^{Ln} (\ln(x_j) - \bar{\ln})^2}{Ln}} \quad (3.10)$$

где $\ln(\mathbf{X}_{3 \times 1})$ – вектор логарифмов входных параметров; $\frac{\sum_{j=1}^{Ln} \ln(x_j)}{Ln}$ – вектор средних значений логарифмированных параметров; $\frac{\sum_{j=1}^{Ln} (\ln(x_j) - \bar{\ln})^2}{Ln}$ – вектор стандартных отклонений логарифмированных параметров.

Физический смысл логарифмического преобразования заключается в линеаризации экспоненциальных зависимостей, характерных для процессов энергопередачи [115]. Стандартизация приводит разнородные физические величины к безразмерным единицам с нулевым средним и единичной дисперсией, что обеспечивает корректное сопоставление их влияния в модели.

2. Входной слой.

Преобразование стандартизированных входных данных в промежуточные характеристики системы выполняется согласно формуле [115]:

$$\mathbf{H}_{6 \times 1}^1 = \tanh(\mathbf{W}_{6 \times 3}^1 \cdot \mathbf{Z}_{3 \times 1} + \mathbf{B}_{6 \times 1}^1), \quad (3.11)$$

где $\mathbf{W}_{6 \times 3}^1$ – матрица весовых коэффициентов первого слоя; $\mathbf{B}_{6 \times 1}^1$ – вектор смещений первого слоя; $\tanh(x)$ – функция активации гиперболический тангенс, применяемая поэлементно к вектору

Результатом данного преобразования является шестимерный вектор $\mathbf{H}_{6 \times 1}^1$, компоненты которого соответствуют промежуточным характеристикам системы,

таким как плотность потока энергии, геометрическая площадь охвата, время сканирования и другие производные физические параметры [78, 85].

3. Скрытый слой.

Агрегация промежуточных характеристик в обобщенные интегральные параметры осуществляется в соответствии с формулой:

$$\mathbf{H}_{3 \times 1}^2 = \tanh(\mathbf{W}_{3 \times 6}^2 \cdot \mathbf{H}_{6 \times 1}^1 + \mathbf{B}_{3 \times 1}^2), \quad (3.12)$$

где $\mathbf{W}_{3 \times 6}^2$ – матрица весовых коэффициентов второго слоя; $\mathbf{B}_{3 \times 1}^2$ – вектор смещений второго слоя.

Результатом данного преобразования является трехмерный вектор $\mathbf{H}_{3 \times 1}^2$, элементы которого можно интерпретировать как обобщенные интегральные параметры: общую энергетическую эффективность, пространственный охват и временную эффективность процесса энергообеспечения [110, 111].

4. Предвыходной слой с сигмоидной активацией.

Преобразование интегральных параметров в единый показатель эффективности осуществляется согласно формуле:

$$H_{1 \times 1}^3 = \sigma(\mathbf{W}_{1 \times 3}^3 \cdot \mathbf{H}_{3 \times 1}^2 + B_{1 \times 1}^3), \quad (3.13)$$

где $\mathbf{W}_{1 \times 3}^3$ – вектор весовых коэффициентов третьего слоя; $B_{1 \times 1}^3$ – скалярное смещение третьего слоя; $\sigma = \frac{1}{1 + e^{-x}}$ – сигмоидная функция активации.

Сигмоидная функция обеспечивает нормализацию выходного значения в диапазоне (0, 1) и моделирует пороговый эффект в обслуживании.

5. Выходной линейный слой.

Финальное масштабирование выходного сигнала для соответствия реальному количеству обслуживаемых ВО выполняется по формуле:

$$\theta = W_{1 \times 1}^4 \cdot H_{1 \times 1}^3 + B_{1 \times 1}^4, \quad (3.14)$$

где $W_{1 \times 1}^4$ – скалярный весовой коэффициент выходного слоя;

$B_{1 \times 1}^4$ – скалярное смещение выходного слоя.

Коэффициенты матриц $\mathbf{W}$ вычисляются методом градиентного спуска [115]. В первом приближении будем полагать, что исследуемый процесс линеен, тогда:

$$\hat{\mathbf{Y}}_m = \mathbf{W}_{n \times m} \mathbf{X}_n, \quad (3.15)$$

где $\hat{\mathbf{Y}}_m$ - вектор получаемых значений, а $\mathbf{X}_n$ - вектор параметров, $\mathbf{W}_{n \times m}$ - матрица весов.

Представленная математическая модель, реализованная в виде многослойной нейронной сети, позволяет описать сложные нелинейные зависимости между пространственными параметрами комплекса дистанционного обеспечения и результирующей эффективностью обслуживания воздушных объектов [78, 85]. Модель учитывает физические закономерности распространения и распределения энергии, пространственные характеристики системы и особенности взаимодействия комплекса с группой воздушных объектов.

Математическая формализация модели обеспечивает теоретическую основу для оптимизации пространственных параметров КДО и может быть использована для дальнейшего совершенствования методов повышения эффективности обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов [112, 114, 115].

3.3. Результаты разработки модели и алгоритмов управления поворотным устройством и определения оптимальных условий функционирования комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов

Представленные в диссертации математические модели и алгоритмы требуют верификации и оценки их эффективности в различных условиях функционирования комплекса дистанционного обеспечения. Для объективного анализа полученных результатов необходимо провести серию вычислительных экспериментов, позволяющих наглядно продемонстрировать основные закономерности и характеристики разработанных алгоритмов.

Получены: общий алгоритм формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства КДО и частные алгоритмы, реализующие его некоторые функциональные блоки. Их синтез основан на построенных математических моделях, а реализация обеспечивает максимальное количество обслуживаемых воздушных объектов за минимальное время.

Для оценки эффективности предложенного алгоритма кластеризации, представленным в приложении А, был проведен сравнительный анализ с традиционными методами кластеризации на синтетических и реальных наборах данных о воздушных объектах.

Для проведения экспериментов использовалась следующая конфигурация:

- группировка из 20 БПЛА с различными пространственными координатами;
- диаграмма направленности с углами раскрытия 10° в горизонтальной и вертикальной плоскостях;
- КДО, расположенный в фиксированной точке пространства;
- пороговое значение критического уровня обслуживания: 10%;
- пороговое значение низкого уровня обслуживания: 50%.

Для оценки качества решений введены четыре метрики. Коэффициент покрытия K_1 показывает, какая доля объектов вошла в итоговую последовательность обслуживания. Эффективность покрытия K_2 характеризует среднее число объектов, обслуживаемых за один поворот КДО, фактически это мера «полезности» каждого наведения. Приоритизация обслуживания K_3 отражает, какой процент объектов с критическим уровнем необходимости обслуживания был обслужен в первую очередь. Угловая эффективность K_4 – средний угол поворота КДО между последовательными наведениями, который характеризует механические затраты на переход между объектами.

В качестве базы для сравнения выбраны четыре алгоритма: классический жадный алгоритм покрытия множества (Greedy Set Cover), метод k-средних, DBSCAN и иерархическая кластеризация. Результаты сопоставления по введенным метрикам приведены в таблице 3.1:

Таблица 3.1 – Результаты сравнения разработанного алгоритма по ключевым метрикам

Алгоритм	K_1	K_2	K_3	K_4
Гибридный алгоритм	0,35	2,86	100%	28,7°
Классический жадный	0,4	2,50	85%	42,3°
k-means	0,60	1,67	60%	65,1°
DBSCAN	0,55	1,82	75%	52,4°
Иерархическая кластеризация	0,50	2	70%	48,6°

Гибридный алгоритм показал лучшие значения по всем рассматриваемым метрикам. Наиболее заметный выигрыш зафиксирован по показателям эффективности покрытия (K_2) и угловой эффективности (K_4) за счёт явного учёта пространственных характеристик воздушных объектов при формировании кластеров.

Проверка разработанных алгоритмов и моделей подтвердила их практическую реализуемость. На рисунке 3.3 видно, что время перемещения поворотного устройства КДО при использовании предложенного подхода сокращается относительно универсального закона перемещения.

Количественно выигрыш выглядит следующим образом: на интервале перемещения 1° – 5°, который встречается в работе комплекса наиболее часто, экономия времени составила 35%; на интервале 10° – 17° этот показатель достиг 40% (рисунок 3.4). При этом время перемещения поворотного устройства на интервале 1°-22° 35% практически не отличалось от времени перемещения с идеальным законом управления.

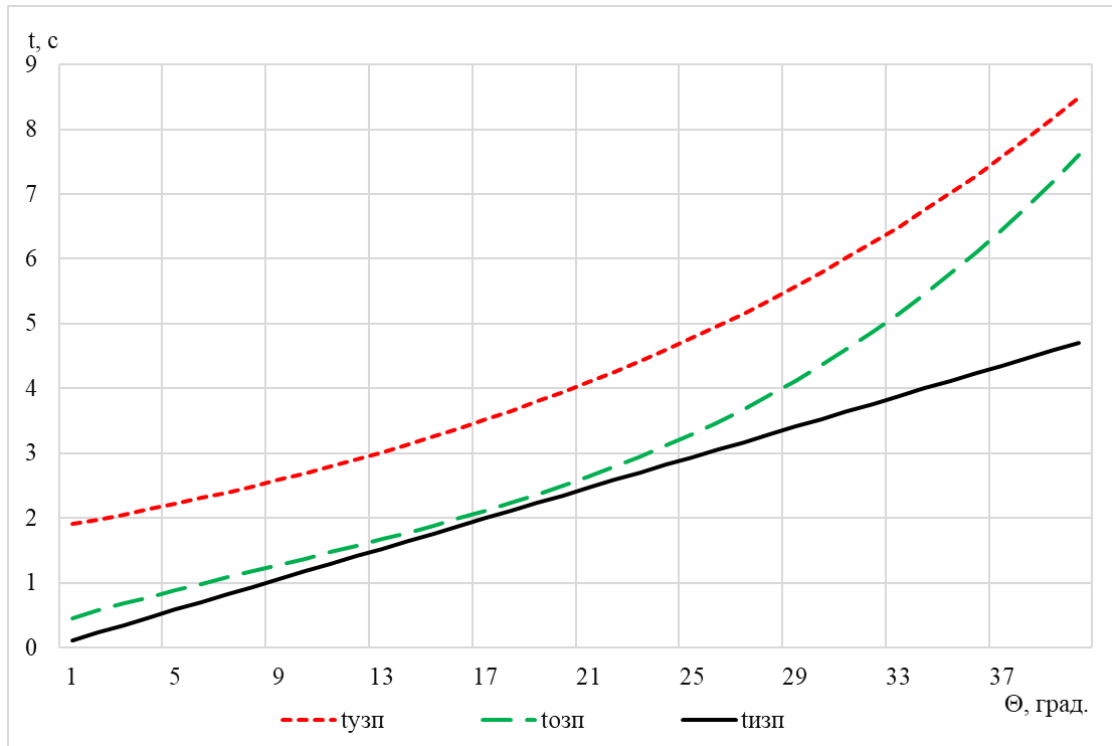


Рисунок 3.3 – Результаты моделирования времени перемещения поворотного устройства КДО ($t_{узн}$ – время поворота с универсальным законом поворота, $t_{опн}$ – с оптимальным законом поворота, $t_{изн}$ – с идеальным законом поворота)

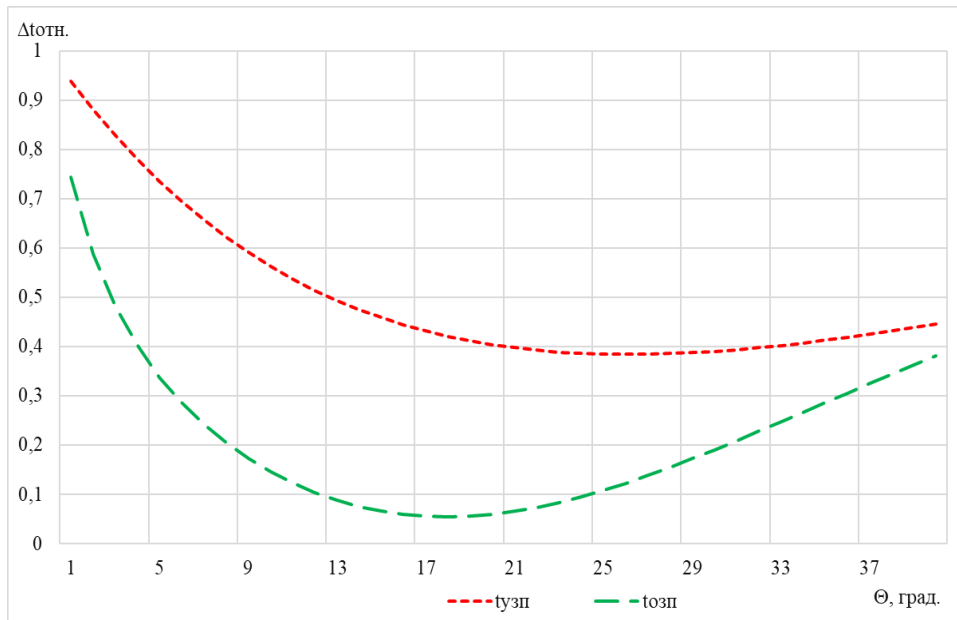


Рисунок 3.4 – Относительный выигрыш времени при замещении универсального закона перемещения поворотного устройства КДО оптимальным

Полученные результаты позволили перейти к проведению вычислительного эксперимента по определению условий эффективного функционирования КДО пространственно-распределенным группам воздушных объектов, в котором на первом этапе моделирования определялись численные значения коэффициентов описательной функции, для чего были выполнены 20 172 имитационных экспериментов с дискретностью перемещения КДО 100 м от 0:0 м до 4000:4000 м, изменением размера области обеспечения КДО от 0,5° до 6,5°, при оптимальном законе управления поворотным устройством КДО.

Для случая трёх аргументов: дальность (D) расположения КДО от пространственно-распределенных групп воздушных объектов; ширина области обеспечения КДО (γ); угловая величина пространства обеспечения в горизонтальной плоскости (β), путем варьирования размерности матриц и набора численных значений в них в процессе итерационного поиска с использованием метода градиентного спуска, были получены следующие значения:

$$\mathbf{W}_{1 \times 1} = 1,0668, \mathbf{W}_{1 \times 3} = (1,2425 \quad -0,9222 \quad 0,6432).$$

$$\mathbf{W}_{6 \times 3}^1 = \begin{pmatrix} 0,2071 & -0,4161 & 0,8182 \\ 0,1081 & 0,9191 & 0,5987 \\ -0,1815 & 0,5747 & 1,0125 \\ -0,0273 & 1,1459 & -1,3546 \\ 0,2258 & -0,0046 & -1,3239 \\ 0,8419 & -0,8196 & -0,5409 \end{pmatrix}.$$

$$\mathbf{W}_{3 \times 6}^2 = \begin{pmatrix} 0,1359 & -0,1995 & 0,5673 & -0,4810 & 0,1513 & 0,1440 \\ 0,5482 & -0,3453 & -0,9475 & 0,2469 & 1,1861 & -0,2329 \\ 0,3341 & 0,0120 & -0,2617 & 0,0752 & 1,0567 & -0,1880 \end{pmatrix}.$$

$$\ln \tilde{\mathbf{X}}_{3 \times 1} = \begin{pmatrix} 0,88946631 \\ 3,98387905 \\ 7,02026586 \end{pmatrix}, \boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{X}_{3 \times 1}} = \begin{pmatrix} 0,74139845 \\ 0,53140829 \\ 0,61970084 \end{pmatrix}.$$

$$\mathbf{B}_{6 \times 1}^1 = \begin{pmatrix} 0,4367 \\ 0,4499 \\ -0,3398 \\ 1,0966 \\ -0,6285 \\ 0,0487 \end{pmatrix}.$$

$$\mathbf{B}_{3 \times 1}^2 = \begin{pmatrix} 0,2336 \\ 0,4614 \\ -0,2308 \end{pmatrix}, B^3 = -0,1812, B^4 = 0,2996.$$

Средняя ошибка аппроксимации составила 3,162%. Проверка адекватности полученной модели с использованием критерия Пирсона показала, что $\chi_{\text{набл.}}^2 = 3.61056$, $\chi_{\text{крит.}}^2 = 30.57791$, при $\alpha=0,01$. Т.е. расхождение теоретических (полученных путем аппроксимации) и эмпирических (полученных путем имитационного моделирования) данных незначимое. p -уровень или вероятность получить для данной модели распределение случайной величины такое же, как и для данных имитационного моделирования, при условии того что нулевая гипотеза верна (сила доказательства нулевой гипотезы $p\text{-value} = P_{\text{пр.}}$) составляет $P_{\text{пр.}} = 0,9828$. На этом синтез аппроксимирующей функции на основе данных, полученных в результате имитационного моделирования, завершен.

На основе разработанных математических моделей и алгоритмов, создано программное обеспечение для системы управления КДО, которое реализует:

- определение и отображений зон, обеспечивающих оптимальные условия обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов;
- формирование пространственно-распределенных кластеров воздушных объектов и оптимальной траектории управления поворотным устройством КДО с определением точного места и последовательности обеспечения множества ПГВО, с учетом характеристик КДО;
- отображение информации о времени и последовательности обеспечения множества пространственно-распределенных групп воздушных объектов.

На рисунке 3.5 показано распределение количества обслуженных воздушных объектов при действиях оператора в пространстве размером 4000×4000 метров. Анализ данного распределения выявляет существенный недостаток традиционного подхода - наименьшее количество обслуженных объектов наблюдается в центральной части квадрата. Это объясняется тем, что оператор не может эффективно распределять ресурс обслуживания при сложной пространственной

конфигурации воздушных объектов, особенно когда множество – сконцентрировано в центральной зоне ответственности.

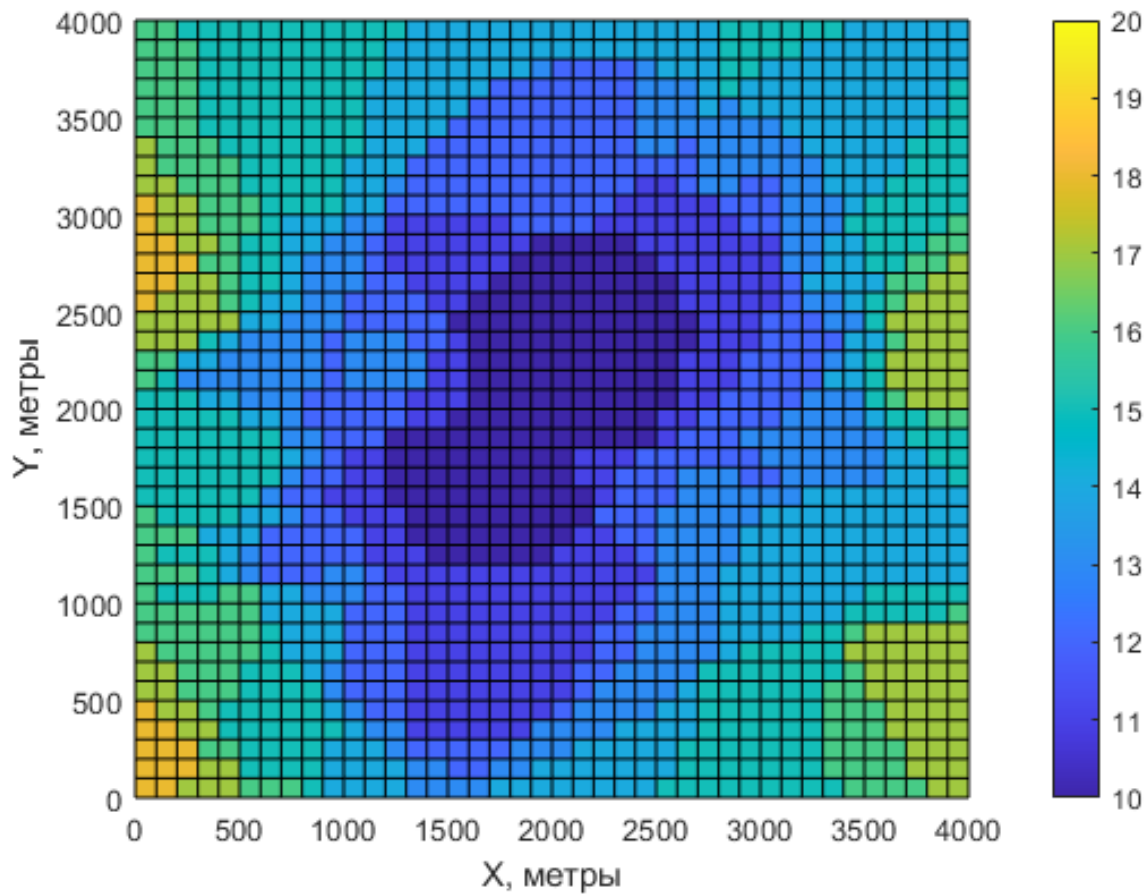


Рисунок 3.5 – Распределение количества обслуженных воздушных объектов при действиях оператора

В свою очередь, рисунок 3.6 демонстрирует распределение количества обслуженных воздушных объектов при использовании разработанных математических моделей и алгоритмов. Принципиальное отличие заключается в значительном повышении эффективности обеспечения по всей зоне ответственности. Наиболее существенный выигрыш наблюдается по углам квадрата 4000×4000 метров, где количество обслуженных объектов увеличивается в 1,3 раза по сравнению с ручным управлением.

Математическое ожидание выигрыша при пролете 20 воздушных объектов составило $\bar{X} = 3,218 \pm 0,074$, в относительных единицах $\bar{X}, \% = 16,091 \pm 0,371$. Максимальный выигрыш равен 7 воздушным объектам или 35%.

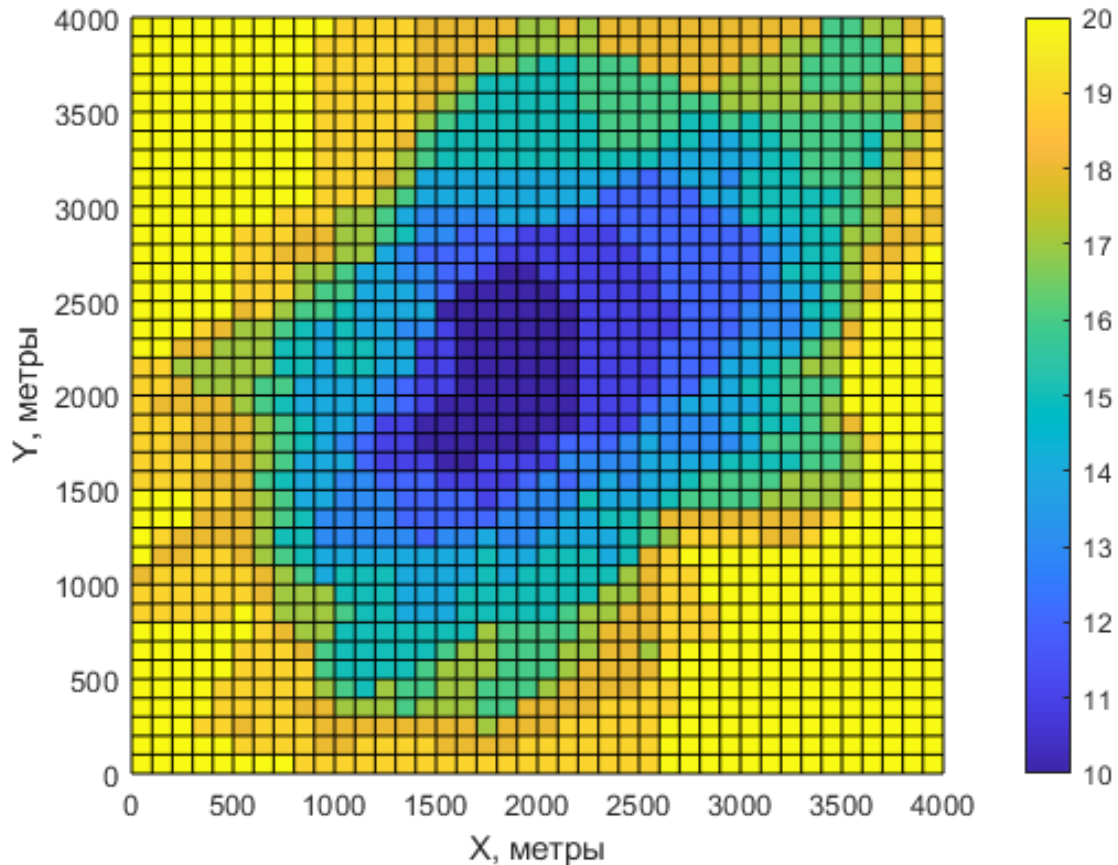


Рисунок 3.6 – Распределение количества обслуженных воздушных объектов при использовании разработанных моделей и алгоритмов.

Количество ВО, обслуженных в соответствии с разработанными алгоритмами, показало их увеличение, в среднем на 16%, в зависимости от дальности средства дистанционного обеспечения до воздушных объектов. Данный факт объясняется невозможностью оператора одновременно решить многомерную оптимизационную задачу, включающую: формирование иерархии воздушных объектов и очередности обхода полученной последовательности.

Данный результат имеет высокую практическую значимость, поскольку демонстрирует оптимальную стратегию размещения комплексов дистанционного обеспечения. Размещение комплексов по углам контролируемого квадрата позволяет максимизировать общую эффективность системы, обеспечивая наилучшее покрытие всей зоны ответственности. Разработанные алгоритмы особенно эффективно справляются с энергетическим обеспечением объектов именно в этих

критических зонах, оптимизируя траекторию движения поворотного устройства и распределение ресурсов обслуживания.

Увеличение общей эффективности КДО с учетом минимизации времени перемещения поворотного устройства составило, в среднем, $23,095 \pm 0,735\%$.

3.4. Выводы по третьей главе

1. Для подсистемы управления поворотным устройством, в составе комплекса дистанционного обслуживания, получена модель для реализации траектории движения комплекса дистанционного обеспечения по критерию минимума времени, адаптирующая закон управления в зависимости от градусной величины поворота.

2. Определена область условий эффективного функционирования комплекса дистанционного обслуживания пространственно-распределённых групп воздушных объектов, позволяющая обоснованно выбирать позицию размещения комплекса относительно обслуживаемой группы для достижения максимального охвата и эффективности дистанционного обслуживания.

3. Экспериментальная проверка эффективности разработанных модели и алгоритмов показала значительное повышение количества успешно обслуженных воздушных объектов. Математическое ожидание выигрыша при действиях по 20 воздушным объектам составило $\bar{X} = 3,218 \pm 0,074$, что в относительных единицах составляет $\bar{X}, \% = 16,091 \pm 0,371$. Максимальный зафиксированный выигрыш достиг 7 воздушных объектов или 35% от общего количества.

4. Комплексная оценка эффективности разработанных моделей и алгоритмов показала, что увеличение общей эффективности КДО с учетом минимизации времени перемещения поворотного устройства составило в среднем $23,095 \pm 0,735\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках диссертации была решена актуальная научная задача, имеющая существенное значение для развития теории и практики дистанционного обслуживания пространственно-распределённых воздушных объектов.

Современное развитие беспилотной авиации и возрастающая интенсивность применения групповых построений воздушных объектов выявили необходимость создания эффективных систем их дистанционного обслуживания, обеспечивающих продолжительное функционирование в различных условиях. Ограниченность энергетического ресурса бортовых источников питания, недостаточная пропускная способность каналов передачи данных и сложность оперативного обслуживания в ходе выполнения задач обуславливают актуальность разработки комплексов дистанционного обслуживания, способных осуществлять бесконтактную передачу энергии и данных. Однако эффективное функционирование таких комплексов требует решения многопараметрической оптимизационной задачи, учитывающей пространственно-временную динамику обслуживаемых объектов, характеристики передающих и принимающих устройств, а также ограничения, связанные с перемещением поворотных механизмов. Именно на решение этой сложной научно-технической задачи было направлено данное диссертационное исследование.

Проведённая работа позволила создать целостный математический аппарат, включающий математические модели и алгоритмы управления комплексом дистанционного обслуживания, обеспечивающие значительное повышение эффективности его функционирования. Полученные результаты имеют как теоретическую ценность для развития методов оптимального управления пространственно-распределёнными системами, так и практическую значимость для проектирования и эксплуатации перспективных комплексов дистанционного обслуживания воздушных объектов.

Цель диссертации достигнута в результате решения поставленных задач:

1. Проведен обзор предметной области, и установлено направление исследований, заключающееся в решении научной задачи по разработке моделей и алгоритмов для определения условий эффективного функционирования комплекса дистанционного обеспечения и формирования оптимальной траектории перемещения его поворотного устройства при обслуживании множества пространственно-распределенных групп ВО.

2. На основе заданных требований обслуживания ВО разработаны алгоритм формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства комплекса дистанционного обеспечения воздушных объектов и алгоритм управления поворотным устройством комплекса дистанционного обеспечения для реализации его траектории движения при обслуживании множества пространственно-распределенных групп воздушных объектов за минимальное время, позволяющие получить упорядоченное множество пространственных кластеров воздушных объектов, что обеспечивает превосходство над всеми существующими методами по ключевым метрикам: коэффициент покрытия – 12,5%, эффективность покрытия – 14,4%, приоритизация обслуживания – 100% и угловая эффективность – 32,2%.

3. Разработан алгоритм формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства при обеспечении множества пространственно-распределенных групп ВО, удовлетворяющий критериям минимума длительности обеспечения воздушных объектов и максимума количества обслуженных воздушных объектов, который в совокупности с математической моделью представляет собой математическое обеспечение системы управления КДО, обеспечивающий увеличение эффективности на 35%.

4. Для подсистемы управления поворотным устройством в составе комплекса дистанционного обеспечения получен алгоритм, реализующий траекторию движения комплекса дистанционного обеспечения по критерию минимума времени с учетом градусной величины перемещения поворотного устройства, что позволяет сократить время перемещения на 35-40% в зависимости от угла поворота.

5. Определена область условий эффективного функционирования КДО пространственно-распределенных групп ВО, позволяющая своевременно принять решение о выборе позиции размещения КДО для достижения максимального результата, что обеспечивает увеличение количества успешно обслуженных объектов на 3.218 ± 0.074 , по сравнению с эвристическим выбором.

6. Статистические исследования общего и частных алгоритмов определения оптимальных условий функционирования КДО пространственно-распределённых групп воздушных объектов подтвердили их достоверность через сходимость теоретических и экспериментальных данных, практическую реализуемость, эффективность применения и целесообразность включения в состав системы управления КДО.

7. Разработанный комплекс проблемно ориентированных программ, составляющих основу системы управления КДО, обеспечил увеличение количества успешно обслуженных воздушных объектов на 35% по сравнению с режимом ручного управления оператором.

8. Верификация разработанных моделей и алгоритмов на современных вычислительных средствах подтвердила их реализуемость в условиях реальной эксплуатации, что обосновывает возможность практического применения в составе существующих комплексов дистанционного обслуживания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chittoor P. K., Chokkalingam B., Mihet-Popa L. A Review on UAV Wireless Charging: Fundamentals, Applications, Charging Techniques and Standards // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 69235-69266. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3077041.
2. Rong C. Critical Review of Recent Development of Wireless Power Transfer Technology for Unmanned Aerial Vehicles // IEEE Access. 2023. Vol. 11. P. 132982-133003. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3332470.
3. Lu M., Bagheri M., James A. P., Phung T. Wireless Charging Techniques for UAVs: A Review, Reconceptualization, and Extension // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 29865-29884. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2841376.
4. Богушевская В. А., Заяц О. В., Масляков Я. Н. [и др.]. Разработка системы дистанционного энергоснабжения беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2012. № 51.
5. Мацак И. С., Воропаев Р. А., Тугаенко В. Ю. Исследование эффективности системы беспроводной передачи энергии лазерным излучением // XLVI Академические чтения по космонавтике : сб. тез. : в 4 т. Т. 1. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. С. 254-257.
6. Патент № 2663121 С1 Российская Федерация, МПК G01S 17/88, F41G 3/22. Оптическая система формирования и наведения лазерного излучения: № 2016146607: заявл. 28.11.2016: опубл. 07.08.2018 / В. А. Корнилов, И. С. Мацак, В. Ю. Тугаенко, Е. С. Сергеев; заявитель ПАО «РКК «Энергия» имени С.П. Королева».
7. Патент № 2788422 С1 Российская Федерация, МПК H02J 50/30, G01S 17/88. Оптическая система дистанционной передачи энергии на базе мощных волоконных лазеров: № 2021127145: заявл. 14.09.2021: опубл. 19.01.2023 / В. А. Корнилов, В. Ю. Тугаенко; заявитель ПАО «РКК «Энергия» имени С.П. Королева».

8. Патент № 2790198 С1 Российская Федерация, МПК G02В 27/09, G02В 17/06. Оптическая система формирования и наведения пучка лазерного излучения: № 2022106009: заявл. 04.03.2022: опубл. 15.02.2023 / В. А. Корнилов, В. Ю. Тугаенко; заявитель ПАО «РКК «Энергия» имени С.П. Королева».

9. Патент № 2715083 С1 Российская Федерация, МПК G02В 27/09, G02В 17/06, G01S 7/481. Оптическая система формирования и наведения лазерного пучка: № 2019110924: заявл. 11.04.2019: опубл. 25.02.2020 / В. А. Корнилов, В. Ю. Тугаенко; заявитель ПАО «РКК «Энергия» имени С.П. Королева».

10. Патент № 2699944 С1 Российская Федерация, МПК G01S 17/88, F41G 3/22. Оптическая система формирования и наведения лазерного излучения: № 2018141525: заявл. 26.11.2018: опубл. 11.09.2019 / В. А. Корнилов, В. Ю. Тугаенко; заявитель ПАО «РКК «Энергия» имени С.П. Королева».

11. PowerLight Technologies [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://powerlighttech.com/>

12. Lockheed Martin [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://www.lockheedmartin.com/>

13. Патент № 10770926 США, МПК H02J 50/30. Vehicle having a remote device powered by an energy beam / С. Olsson, Т. J. Nugent; заявитель и патентообладатель Lasermotive Inc. – № US16/445,600; заявл. 19.06.2019; опубл. 08.09.2020.

14. Патент № 11581953 США, МПК H04В 10/807. Dual-use power beaming system / Т. J. Nugent, R. Gustafson; заявитель и патентообладатель Lasermotive Inc. – № US17/087,198; заявл. 02.11.2020; опубл. 14.02.2023.

15. Патент № 12270630 США, МПК F41H 13/0062. Dual-use power beaming system / Т. J. Nugent, R. Gustafson; заявитель и патентообладатель Lasermotive Inc. – № US18/168,272; заявл. 13.02.2023; приоритет 02.11.2020, US17/087,198; опубл. 08.04.2025.

16. Jaffe P. Spooky Power at a Distance: Researchers have beamed substantial amounts of energy at distances over 1 kilometer // IEEE Spectrum. 2022. Vol. 59, № 6. P. 36-41. DOI: 10.1109/MSPEC.2022.9792185.

17. Nugent Jr. T., Bashford D., Bashford T., Sayles T. J., Kirby M. A. 15 years of laser power beaming demonstrations // Proc. SPIE 13359, Optical Power Delivery. 2025. 133590F. DOI: 10.1117/12.3043841.
18. Nugent Jr. T., Summers J., Gort J., Weinthal W. Low-latency enhanced light curtain for safe laser power beaming // Proc. SPIE 13359, Optical Power Delivery. 2025. 1335906. DOI: 10.1117/12.3042366.
19. Nugent Jr. T. J., Kare J. T. Laser power beaming for defense and security applications // Proc. SPIE 8045, Unmanned Systems Technology XIII. 2011. 804514. DOI: 10.1117/12.886169.
20. AQUILA EARTH [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://www.aquila.earth/>
21. Хорсик И. А., Митрофанов Д. В., Шатовкин Р. Р. Алгоритм выбора лидера в группе беспилотных летательных аппаратов при распределенном поиске наземных объектов в условиях нарушения связи // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2025. № 33. С. 139-152.
22. Гольдштейн В. Н., Шатовкин Р. Р. Алгоритм расчета оптимальных значений высоты полета беспилотного летательного аппарата по заданному маршруту с огибанием рельефа местности // Труды ГосНИИАС. Серия Авиационные системы. 2024. № 3(66). С. 47-56.
23. Коновалов А. Ю., Шатовкин Р. Р. Анализ основных способов сопровождения маневренного летательного аппарата // Научный альманах. 2019. № 9-1(59). С. 140-143.
24. Фалилеев В. Ю., Шатовкин Р. Р. Анализ существующих автоматизированных комплексов защиты от дронов // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2020. № 14. С. 130-140.
25. Соловьев А. Э., Ивутин А. Н., Прохорцов А. В., Чукова О. В. Роевые системы беспилотников: битва алгоритмов – биология vs физика // Защита и безопасность. 2025. № 1(112). С. 22-24.
26. Соловьев А. Э., Кравченко О. А., Ивутин А. Н., Шишлов М. Ю. Роевые системы беспилотных объектов: математическое описание поведения

группы мобильных объектов // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2025. № 2(137). С. 43-49.

27. Соловьев А. Э., Ивутин А. Н., Прохорцов А. В., Чукова О. В. Роевые системы беспилотных объектов: современное состояние и перспективы // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2024. № 4(134). С. 65-70. DOI: 10.53816/20753608_2024_4_65.

28. Соловьев А. Э., Ивутин А. Н., Шишлов М. Ю., Молодцова Т. В. Роевые системы беспилотных объектов: движение роя при наличии препятствий // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2025. № 3(138). С. 123-128. DOI: 10.53816/20753608_2025_3_123.

29. Медведев М.Ю., Костюков В.А., Бутенко М.Ю., Гисцов В.Г., Евдокимов И.Д. Аппаратно-алгоритмическое обеспечение перспективной системы энергосбережения автономной группы БПЛА // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 5(229). С. 230-243.

30. Даринцев О.В., Мигранов А.Б. Аналитический обзор подходов к распределению задач в группах мобильных роботов на основе технологий мягких вычислений // Информатика и автоматизация. 2022. Т. 21. № 4. С. 729-757.

31. Arthur D., Vassilvitskii S. k-means++: The advantages of careful seeding // Proceedings of the eighteenth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms. 2007. P. 1027-1035.

32. Elkan C. Using the Triangle Inequality to Accelerate k-Means // Proceedings of the 20th International Conference on Machine Learning. 2003. P. 147-153.

33. Bishop C. M. Pattern Recognition and Machine Learning. Springer, 2006. 738 p.

34. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. 2nd edition. Springer, 2009. 745 p.

35. Мандель И. Д. Методы кластерного анализа. М. : Наука, 1988. 136 с.

36. Jain A. K., Dubes R. C. Algorithms for Clustering Data. Prentice Hall, 1988. 320 p.

37. Xu R., Wunsch D. Survey of Clustering Algorithms // IEEE Transactions on Neural Networks. 2005. Vol. 16, № 3. P. 645-678.
38. Frey B. J., Dueck D. Clustering by Passing Messages Between Data Points // Science. 2007. Vol. 315, № 5814. P. 972-976.
39. Aggarwal C. C., Reddy C. K. Data Clustering: Algorithms and Applications. CRC Press, 2013. 652 p.
40. Ester M., Kriegel H. P., Sander J., Xu X. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise // Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 1996. Vol. 96, № 34. P. 226-231.
41. Campello R. J. G. B., Moulavi D., Sander J. Density-Based Clustering Based on Hierarchical Density Estimates // Advances in Knowledge Discovery and Data Mining. 2013. P. 160-172.
42. Ram A., Jalal S., Jalal A. S., Kumar M. DBSCAN: Past, Present and Future // 2010 5th International Conference on Information and Automation for Sustainability. 2010. P. 232-237.
43. Schubert E., Sander J., Ester M., Kriegel H. P., Xu X. DBSCAN Revisited, Revisited: Why and How You Should (Still) Use DBSCAN // ACM Transactions on Database Systems. 2017. Vol. 42, № 3. Article 19.
44. Gan J., Tao Y. DBSCAN Revisited: Mis-Claim, Un-Fixability, and Approximation // Proceedings of the 2015 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. 2015. P. 519-530.
45. Murtagh F., Contreras P. Algorithms for hierarchical clustering: an overview // Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery. 2012. Vol. 2, № 1. P. 86-97.
46. Ward J. H. Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function // Journal of the American Statistical Association. 1963. Vol. 58, № 301. P. 236-244.
47. Johnson S. C. Hierarchical Clustering Schemes // Psychometrika. 1967. Vol. 32, № 3. P. 241-254.

48. Chvatal V. A Greedy Heuristic for the Set-Covering Problem // *Mathematics of Operations Research*. 1979. Vol. 4, № 3. P. 233-235.
49. Feige U. A Threshold of $\ln n$ for Approximating Set Cover // *Journal of the ACM*. 1998. Vol. 45, № 4. P. 634-652.
50. Slavík P. A Tight Analysis of the Greedy Algorithm for Set Cover // *Journal of Algorithms*. 1997. Vol. 25, № 2. P. 237-254.
51. Caprara A., Toth P., Fischetti M. Algorithms for the Set Covering Problem // *Annals of Operations Research*. 2000. Vol. 98, № 1. P. 353-371.
52. Johnson D. S. Approximation Algorithms for Combinatorial Problems // *Journal of Computer and System Sciences*. 1974. Vol. 9, № 3. P. 256-278.
53. Vazirani V. V. *Approximation Algorithms*. Springer, 2001. 378 p.
54. Williamson D. P., Shmoys D. B. *The Design of Approximation Algorithms*. Cambridge University Press, 2011. 500 p.
55. Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R. L., Stein C. *Introduction to Algorithms*. 3rd edition. MIT Press, 2009. 1312 p.
56. Hochbaum D. S. *Approximation Algorithms for NP-Hard Problems*. PWS Publishing, 1997. 596 p.
57. Галяев А.А., Рябушев Е.А. Поиск субоптимального решения динамической задачи коммивояжёра методом Монте-Карло // *Автоматика и телемеханика*. 2024. № 2. С. 103-119.
58. Галяев А.А., Яхно В.П., Лысенко П.В., Берлин Л.М., Бузииков М.Э. Оптимизация плана перехвата прямолинейно движущихся целей // *Автоматика и телемеханика*. 2023. № 10. С. 18-36.
59. Галяев А.А., Медведев А.И., Насонов И.А. Нейросетевой алгоритм перехвата машиной Дубинса целей, движущихся по известным траекториям // *Автоматика и телемеханика*. 2023. № 3. С. 3-21.
60. Галяев А.А., Долгушин П.Д. О перераспределении целей между перехватчиками в динамической задаче коммивояжёра // *Управление большими системами: сборник трудов*. 2024. № 110. С. 87-112.

61. Галяев А.А., Лысенко П.В., Яхно В.П. Две задачи планирования оптимальных траекторий подвижного объекта в случае вырождения необходимых условий экстремума // Автоматика и телемеханика. 2022. № 7. С. 3-32.
62. Медведев М.Ю., Лазарев В.С. Метод формирования траектории для группы подвижных объектов с помощью кластеризации в двумерной среде // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2019. № 4(77). С. 45-54.
63. Костюков В.А., Медведев М.Ю., Пшихопов В.Х., Косенко Е.Ю. Децентрализованная система управления энергетической системой подзарядки группы БЛА // Известия ЮФУ. Технические науки. 2021. № 1(218). С. 175-189.
64. Костюков В.А., Медведев М.Ю., Пшихопов В.Х. Планирование движения наземных роботов в среде с препятствиями: алгоритмы построения траекторий в группе при заданном шаблоне // Мехатроника, автоматизация, управление. 2023. Т. 24. № 1. С. 33-45.
65. Медведев М.Ю., Лазарев В.С. Метод планирования движения группы подвижных объектов с использованием динамических репеллеров и целераспределения // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2017. № 1(66). С. 41-52.
66. Медведев М.Ю., Лазарев В.С. Алгоритм формирования траектории группы подвижных объектов в двумерной среде с использованием неустойчивых режимов // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2016. № 3(64). С. 17-29.
67. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Групповое управление движением мобильных роботов в неопределённой среде с использованием неустойчивых режимов // Труды СПИИРАН. 2018. № 5(60). С. 39-63.
68. Даринцев О.В., Мигранов А.Б. Модификация аппарата нейронной сети Хопфилда для решения задачи оптимального распределения заданий в группе мобильных роботов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2024. № 2. С. 169-182.

69. Богданов Д.Р., Даринцев О.В. Обеспечение эффективного использования энергоресурсов в группе мобильных роботов // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН. 2017. Т. 12. № 1. С. 96-100.
70. Моисеева Т.А., Леденева Т.М. Сравнительный анализ процедур кластеризации для обнаружения аномалий показателей, характеризующих функционирование контактной сети железных дорог // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2020. № 2. С. 115-126.
71. Моисеева Т.А., Леденева Т.М. Генерация базы знаний на основе нечёткой кластеризации // Информационные технологии и вычислительные системы. 2023. № 1. С. 97-108.
72. Семенов А.В., Леденева Т.М. Экспериментальное сравнение характеристик алгоритмов поиска кратчайшего пути // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики : сборник трудов Международной научной конференции. Воронеж, 2025. С. 719-723.
73. Васильев О.В., Леденева Т.М. Модифицированный алгоритм муравьиных колоний для решения задачи коммивояжёра // Системы управления и информационные технологии. 2011. № 3-2(45). С. 293-297.
74. Тарасова А.С. Моделирование обобщённых процедур кластеризации и анализ данных сложной структуры : дис. ... канд. техн. наук / Воронежский государственный технический университет. Воронеж, 2007.
75. Dorf R. C., Bishop R. H. Modern Control Systems. 13th edition. Pearson, 2016. 1104 p.
76. Franklin G. F., Powell J. D., Emami-Naeini A. Feedback Control of Dynamic Systems. 8th edition. Pearson, 2019. 910 p.
77. Phillips C. L., Harbor R. D. Feedback Control Systems. 5th edition. Prentice Hall, 2011. 624 p.
78. Leonhard W. Control of Electrical Drives. 3rd edition. Springer, 2001. 460 p.

79. Boldea I., Nasar S. A. Electric Drives. 3rd edition. CRC Press, 2016. 522 p.
80. Krishnan R. Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control. Prentice Hall, 2001. 626 p.
81. Борцов Ю. А., Соколовский Г. Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. 2-е изд., перераб. и доп. СПб. : Энергоатомиздат, 1992. 288 с.
82. Анучин А. С. Системы управления электроприводов : учебник для вузов. М. : Издательский дом МЭИ, 2015. 373 с.
83. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления. 4-е изд. СПб. : Профессия, 2003. 752 с.
84. Пупков К. А., Егупов Н. Д., Владимиров И. Г. [и др.]. Методы классической и современной теории автоматического управления : учебник : в 5 т. Т. 3 : Синтез регуляторов систем автоматического управления. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 783 с.
85. Калачев Ю. Н. Векторное регулирование (заметки практика). М. : ЭФО, 2013. 72 с.
86. Landau I. D., Lozano R., M'Saad M., Karimi A. Adaptive Control: Algorithms, Analysis and Applications. 2nd edition. Springer, 2011. 603 p.
87. Жмудь В.А., Димитров Л.В., Носек Я. Системы автоматического управления. Новые концепции и структуры регуляторов : учебник. М. : ИНФРА-М, 2023.
88. Жмудь В.А., Французова Г.А., Востриков А.С. Динамика мехатронных систем. М.-Берлин : Директ-Медиа, 2021.
89. Vilanova R., Visioli A. (Eds.). PID Control in the Third Millennium: Lessons Learned and New Approaches // Advances in Industrial Control. Springer, 2012. 595 p.
90. Åström K. J., Hägglund T. Advanced PID Control. ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. 460 p.

91. O'Dwyer A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules. 3rd edition. Imperial College Press, 2009. 624 p.
92. Visioli A. Practical PID Control. Springer, 2006. 310 p.
93. Жмудь В.А., Востриков А.С., Ивойлов А.Ю., Саблина Г.В. Синтез робастных ПИД-регуляторов методом двойной оптимизации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. Т. 21. № 2. С. 67-73.
94. Ивойлов А.Ю., Жмудь В.А., Трубин В.Г., Рот Г. Параметрический синтез системы управления балансирующим роботом методом численной оптимизации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20. № 6. С. 352-361.
95. Ogata K. Modern Control Engineering. 5th edition. Prentice Hall, 2010. 894 p.
96. Seborg D. E., Edgar T. F., Mellichamp D. A., Doyle III F. J. Process Dynamics and Control. 4th edition. Wiley, 2016. 512 p.
97. Фуртат И.Б., Жуков Ю.А., Коротков Е.Б., Пряничников Р.А. Адаптивное нейросетевое управление универсальным мехатронным модулем космического назначения // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2023. № 3. С. 41-50.
98. Фуртат И.Б., Жуков Ю.А., Слободзян Н.С. Обзор моделей и методов управления шаговыми двигателями // Мехатроника, автоматизация, управление. 2023. Т. 24. № 7. С. 352-363.
99. Furtat I.B., Zhukov Yu.A., Matveev S.A. Design of Optimal-Robust Control of Step Motors with Partially Unknown Parameters and Disturbances // Cybernetics and Physics. 2023. Vol. 12. № 1. P. 23-27.
100. Чепига А. А. Модель и алгоритм формирования пространственно распределенных групп воздушных объектов для оптимизации их энергетического обеспечения // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 4. С. 5–17. doi: 10.21685/2072-3059-2025-4-1.
101. Чепига А. А., Петренко С. В. Модель и алгоритм формирования множества пространственно-распределенных групп воздушных объектов // Перспективы науки. 2023. № 9(168). С. 60-63.

102. Патент № 2863150 С1 Российская Федерация, МПК G08G 5/57, G08G 5/56, H02J 50/00. Способ энергетического обеспечения беспилотных летательных аппаратов: № 2025129564: заявл. 28.10.2025: опубл. 29.05.2026, Бюл. № 16 / А. А. Чепига; заявитель Чепига Андрей Александрович.

103. Чепига А. А. Алгоритм управления поворотным устройством комплекса дистанционного энергетического обеспечения для реализации его траектории движения при энергетической поддержке множества пространственно-распределенных групп воздушных объектов за минимальное время // Перспективы науки. 2025. № 11(194). С. 70-75.

104. Чепига А. А., Петренко С. В. Математическая модель и алгоритм управления поворотным устройством комплекса обслуживания множества пространственно-распределенных групп воздушных объектов для реализации его траектории движения за минимальное время // Наука и бизнес: пути развития. 2023. № 9(147). С. 29-32.

105. Чепига А. А. Разработка модели и метода управления комплекса обслуживания пространственно-распределенных групп воздушных объектов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : тез. докл. Тридцатой междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Москва, 29 февраля – 02 марта 2024 года. М. : Центр полиграфических услуг "РАДУГА", 2024. С. 288.

106. Чепига А. А. Математическая модель определения оптимальных условий функционирования комплекса дистанционного энергетического обеспечения пространственно распределенных групп воздушных объектов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 3(75). С. 100-111. DOI: 10.21685/2072-3059-2025-3-7.

107. Агапов О. А., Балакин Д. А., Добродумов А. Б. Моделирование антенного радиоэлектронного комплекса средствами MATLAB и Simulink // Технологии разработки и отладки сложных технических систем : сб. материалов VI Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 27–28 марта 2019 года. М. : Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2019. С. 3-13.

108. Law A. M. Simulation Modeling and Analysis. 5th edition. McGraw-Hill, 2014. 800 p.

109. Семичастнов А. Е., Балакин Д. А. Моделирование сценариев работы радиолокационной системы для классификации беспилотных летательных аппаратов и птиц на основе микродоплеровских сигнатур в среде Engage // Электронные библиотеки. 2025. Т. 28, № 4. С. 943-952. DOI: 10.26907/1562-5419-2025-28-4-943-952.

110. Балакин Д. А., Семичастнов А. Е., Горбунов А. Р., Акмалов М. Р. Повышение эффективности обнаружения БПЛА на основе радиолокационных данных с использованием нейросетевых методов // Цифровая обработка сигналов и её применение DSPA - 2025 : докл. XXVII Междунар. конф., Москва, 26–28 марта 2025 года. М. : Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова, 2025. С. 135-140.

111. Bertsekas D. P. Nonlinear Programming. 3rd edition. Athena Scientific, 2016. 880 p.

112. Haykin S. Neural Networks and Learning Machines. 3rd edition. Pearson, 2008. 936 p.

113. Nocedal J., Wright S. J. Numerical Optimization. 2nd edition. Springer, 2006. 664 p.

114. Burden R. L., Faires J. D. Numerical Analysis. 9th edition. Brooks/Cole, 2010. 895 p.

115. Ehrgott M. Multicriteria Optimization. 2nd edition. Springer, 2005. 323 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Алгоритм формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства комплекса энергетического обеспечения множества пространственно- распределенных воздушных объектов

% Определение параметров для 20 БПЛА

clc

clear all;

close all;

% Критический уровень заряда БПЛА (в процентах), который требует приоритетной обработки

critical_charge_level = 10;

% Количество БПЛА

n_uavs = 20;

% Координаты комплекса энергетической поддержки

ker_pos = [250, 50, 0]; % [x, y, z]

% Исходные данные в формате координат [x, y, z, уровень_заряда]

uav_data = [

120, -10, 250, 10; % БПЛА 1

125, -12, 252, 45; % БПЛА 2

130, -8, 248, 5; % БПЛА 3

200, 15, 260, 60; % БПЛА 4

205, 18, 262, 25; % БПЛА 5

210, 12, 258, 30; % БПЛА 6

300, -5, 270, 75; % БПЛА 7

305, -7, 272, 40; % БПЛА 8

```

310, -3, 268, 85; % БПЛА 9
400, 20, 280, 35; % БПЛА 10
405, 22, 282, 50; % БПЛА 11
410, 18, 278, 65; % БПЛА 12
150, 0, 255, 55; % БПЛА 13
155, 2, 257, 20; % БПЛА 14
160, -2, 253, 70; % БПЛА 15
250, 25, 265, 25; % БПЛА 16
255, 27, 267, 80; % БПЛА 17
260, 23, 263, 5; % БПЛА 18
350, -45, 275, 40; % БПЛА 19
355, -17, 277, 15 % БПЛА 20
];

```

```

% Извлечение координат БПЛА

```

```

x_coords = uav_data(:, 1);
y_coords = uav_data(:, 2);
z_coords = uav_data(:, 3);
charge_level = uav_data(:, 4);

```

```

% Вычисление расстояний от КДО до каждого БПЛА

```

```

distances = zeros(n_uavs, 1);
for i = 1:n_uavs
    distances(i) = norm([x_coords(i), y_coords(i), z_coords(i)] - kep_pos);
end

```

```

% Параметры диаграммы направленности луча

```

```

beam_angle_horizontal = 10; % угол раскрытия луча в горизонтальной

```

ПЛОСКОСТИ

```
beam_angle_vertical = 10;    % угол раскрытия луча в вертикальной плос-
кости
```

```
% Поиск пересечений с учетом диаграммы направленности
```

```
intersection_matrix = zeros(n_uavs, n_uavs);
```

```
% Извлекаем параметры БПЛА
```

```
for i = 1:n_uavs
```

```
    % Каждый БПЛА пересекается сам с собой (главная диагональ = 1)
```

```
    intersection_matrix(i, i) = 1;
```

```
% Вектор направления от КДО к БПЛА i
```

```
dir_vector_i = [x_coords(i), y_coords(i), z_coords(i)] - kep_pos;
```

```
dir_vector_i = dir_vector_i / norm(dir_vector_i);
```

```
% Рассчитываем ширину луча для текущего БПЛА i на его расстоянии
```

```
beam_width_h_i = 2 * distances(i) * tand(beam_angle_horizontal/2);
```

```
beam_width_v_i = 2 * distances(i) * tand(beam_angle_vertical/2);
```

```
for j = 1:n_uavs
```

```
    if i ~= j
```

```
        % Вектор направления от КДО к БПЛА j
```

```
        dir_vector_j = [x_coords(j), y_coords(j), z_coords(j)] - kep_pos;
```

```
% Проецируем БПЛА j на луч, направленный к БПЛА i
```

```
projection_length = dot(dir_vector_j, dir_vector_i);
```

```
% Если проекция отрицательная, БПЛА j находится за КДО
```

```
if projection_length <= 0
```

```
    continue;
```

```

end

% Вычисляем вектор от оси луча к БПЛА j
projected_point = kep_pos + projection_length * dir_vector_i;
perpendicular_vector = [x_coords(j), y_coords(j), z_coords(j)] - projected_point;

% Разделяем перпендикулярный вектор на горизонтальную и вертикальную составляющие
% Предполагаем, что вертикаль - это ось Z
horizontal_deviation = sqrt(perpendicular_vector(1)^2 + perpendicular_vector(2)^2);
vertical_deviation = abs(perpendicular_vector(3));

% Рассчитываем ширину луча на расстоянии проекции
beam_width_h_at_projection = 2 * projection_length * tand(beam_angle_horizontal/2);
beam_width_v_at_projection = 2 * projection_length * tand(beam_angle_vertical/2);

% Проверяем, находится ли БПЛА j в пределах луча, направленного на БПЛА i
if horizontal_deviation < beam_width_h_at_projection/2 && vertical_deviation < beam_width_v_at_projection/2
    intersection_matrix(i, j) = 1;
end
end
end
end

```

```

% Выводим исходную матрицу пересечений
disp('ИСХОДНАЯ МАТРИЦА ПЕРЕСЕЧЕНИЙ:');
disp(intersection_matrix);

% Находим сумму по каждому столбцу (количество БПЛА, пересекаю-
щихся с данным)
column_sums = sum(intersection_matrix, 1);
disp('Количество пересечений по каждому столбцу:');
disp(column_sums);

% Алгоритм обхода с учетом заряда БПЛА
% Создаем вектор доступных БПЛА (1 = доступен, 0 = удален)
available_uavs = ones(1, n_uavs);
% Массив для хранения последовательности выбранных БПЛА
selected_uavs = [];

% Начальное положение комплекса энергетической поддержки
% По умолчанию, комплекс направлен вперед (0 градусов в сферических
координатах)
current_azimuth = 0; % текущий азимут (в градусах)
current_elevation = 0; % текущий угол места (в градусах)

disp(['АЛГОРИТМ ОБХОДА С ПРИОРИТЕТОМ БПЛА С ЗАРЯДОМ < '
num2str(critical_charge_level) '%:']);
disp('-----');

% Счетчик шагов
step = 0;

```

% Добавим обработку БПЛА с критическим зарядом перед основным алгоритмом

```
critical_charge_uavs = find(charge_level < critical_charge_level);
```

```
if ~isempty(critical_charge_uavs)
```

```
    disp(['ПРИОРИТЕТНАЯ ОБРАБОТКА БПЛА С ЗАРЯДОМ < '
num2str(critical_charge_level) '%:']);
```

% Пока есть доступные БПЛА с критическим зарядом

```
while sum(available_uavs(critical_charge_uavs)) > 0
```

% Получаем список доступных БПЛА с критическим зарядом

```
    available_critical = critical_charge_uavs(available_uavs(critical_charge_uavs) == 1);
```

% Если нет доступных БПЛА с критическим зарядом, выходим из цикла

```
    if isempty(available_critical)
```

```
        break;
```

```
    end
```

% Сначала выбираем БПЛА с наименьшим уровнем заряда

```
[min_charge, ~] = min(charge_level(available_critical));
```

```
min_charge_uavs = available_critical(charge_level(available_critical) ==
min_charge);
```

% Если несколько БПЛА с одинаковым минимальным зарядом, выбираем тот, у которого больше пересечений

```
if length(min_charge_uavs) > 1
```

% Получаем количество пересечений для каждого БПЛА

```
intersections_count = zeros(size(min_charge_uavs));
```

```
for i = 1:length(min_charge_uavs)
```

```

    idx = min_charge_uavs(i);
    intersections_count(i) = sum(intersection_matrix(:, idx) & available_uavs');
end

% Находим БПЛА с максимальным количеством пересечений
[max_intersections, ~] = max(intersections_count);
max_inters_uavs = min_charge_uavs(intersections_count == max_intersections);

% Если несколько БПЛА с одинаковым зарядом и количеством пересечений,
% выбираем тот, куда комплексу меньше всего поворачиваться
if length(max_inters_uavs) > 1
    % Рассчитываем углы поворота для каждого БПЛА
    rotation_angles = zeros(size(max_inters_uavs));
    for i = 1:length(max_inters_uavs)
        idx = max_inters_uavs(i);

        % Вычисляем угол поворота
        target_az = atan2d(y_coords(idx) - kep_pos(2), x_coords(idx) - kep_pos(1));

        horizontal_dist = sqrt((x_coords(idx) - kep_pos(1))^2 + (y_coords(idx) - kep_pos(2))^2);
        target_el = atan2d(z_coords(idx) - kep_pos(3), horizontal_dist);

        az_diff = abs(target_az - current_azimuth);
        el_diff = abs(target_el - current_elevation);

        if az_diff > 180

```

```

        az_diff = 360 - az_diff;
    end

    rotation_angles(i) = az_diff + el_diff;
end

% Выбираем БПЛА с минимальным углом поворота
[~, min_rotation_idx] = min(rotation_angles);
selected_col = max_inters_uavs(min_rotation_idx);

disp(['Найдено несколько БПЛА с одинаковым минимальным за-
рядом ' num2str(min_charge) ...
      '% и одинаковым количеством пересечений: '
num2str(max_intersections) ...
      '. Выбран БПЛА ' num2str(selected_col) ' с минимальным уг-
лом поворота: ' ...
      num2str(rotation_angles(min_rotation_idx)) ' градусов.']);
else
    selected_col = max_inters_uavs(1);
    disp(['Найдено несколько БПЛА с одинаковым минимальным за-
рядом ' num2str(min_charge) ...
          '%. Выбран БПЛА ' num2str(selected_col) ' с наибольшим ко-
личеством пересечений: ' ...
          num2str(max_intersections)]);
end
else
    selected_col = min_charge_uavs(1);
    disp(['Выбран БПЛА ' num2str(selected_col) ' с наименьшим
зарядом: ' num2str(min_charge) '%']);
end

```

```

step = step + 1;
disp(['ШАГ ' num2str(step) ':']);
disp(['Выбран ПРИОРИТЕТНЫЙ БПЛА ' num2str(selected_col) ' с
зарядом ' num2str(charge_level(selected_col)) '%']);

% Рассчитываем новый азимут и угол места для выбранного БПЛА
new_azimuth = atan2d(y_coords(selected_col) - kep_pos(2), x_coords(se-
lected_col) - kep_pos(1));
horizontal_dist = sqrt((x_coords(selected_col) - kep_pos(1))^2 +
(y_coords(selected_col) - kep_pos(2))^2);
new_elevation = atan2d(z_coords(selected_col) - kep_pos(3), horizon-
tal_dist);

disp(['Комплекс повернут на азимут: ' num2str(new_azimuth) '° и угол
места: ' num2str(new_elevation) '°']);

% Обновляем текущее положение комплекса
current_azimuth = new_azimuth;
current_elevation = new_elevation;

% Добавляем выбранный БПЛА в последовательность
selected_uavs = [selected_uavs, selected_col];

% Получаем список БПЛА, которые пересекаются с выбранным
intersecting_uavs = find(intersection_matrix(:, selected_col) == 1 & avail-
able_uavs' == 1);

% Выводим информацию о пересекающихся БПЛА и их зарядах
disp('Пересекающиеся БПЛА и их заряды:');

```

```

for j = 1:length(intersecting_uavs)
    uav_idx = intersecting_uavs(j);
    disp(['БПЛА ' num2str(uav_idx) ', заряд: '
num2str(charge_level(uav_idx)) '%']);
end

% Удаляем все БПЛА, которые пересекаются с выбранным (включая
его самого)
available_uavs(intersecting_uavs) = 0;

% Выводим оставшиеся доступные БПЛА
disp(['Оставшиеся доступные БПЛА: ' num2str(find(available_uavs))]);
disp('-----');
end
end

% Продолжаем с оставшимися БПЛА по стандартному алгоритму
disp('ПРОДОЛЖЕНИЕ ОБРАБОТКИ ОСТАВШИХСЯ БПЛА ПО СТАН-
ДАРТНОМУ АЛГОРИТМУ:');

% Пока остаются доступные БПЛА
while sum(available_uavs) > 0
    step = step + 1;
    disp(['ШАГ ' num2str(step) ':']);

    % Создаем и выводим текущую матрицу пересечений (с учетом доступ-
ных БПЛА)
    current_matrix = intersection_matrix;

```

% Маскируем недоступные БПЛА (устанавливаем их строки и столбцы в 0)

```
for i = 1:n_uavs
    if available_uavs(i) == 0
        current_matrix(i, :) = 0;
        current_matrix(:, i) = 0;
    end
end
```

disp('Текущая матрица пересечений (с учетом только доступных БПЛА):');

```
disp(current_matrix);
```

% Для каждого доступного столбца вычисляем процент БПЛА с зарядом менее 50%

```
low_charge_percentages = zeros(1, n_uavs);
low_charge_counts = zeros(1, n_uavs);
total_counts = zeros(1, n_uavs);
current_intersections = zeros(1, n_uavs);
```

```
for j = 1:n_uavs
```

```
    if available_uavs(j) == 1
```

% Находим индексы доступных БПЛА, которые пересекаются с j-м БПЛА

% Учитываем только доступные БПЛА для расчета фактического количества пересечений

```
        intersecting_indices = find(intersection_matrix(:, j) == 1 & available_uavs' == 1);
```

```

% Фактическое количество пересечений для данного БПЛА с уче-
том доступных БПЛА
current_intersections(j) = length(intersecting_indices);

% Если есть пересечения
if ~isempty(intersecting_indices)
    % Находим количество БПЛА с зарядом менее 50% среди пере-
секающихся
    low_charge_indices = intersecting_indices(charge_level(intersect-
ing_indices) < 50);
    low_charge_count = length(low_charge_indices);

    % Рассчитываем процент БПЛА с низким зарядом
    low_charge_percentages(j) = (low_charge_count / length(intersect-
ing_indices)) * 100;
    low_charge_counts(j) = low_charge_count;
    total_counts(j) = length(intersecting_indices);
end
end
end

% Выводим текущие проценты БПЛА с низким зарядом и количество
пересечений для всех доступных столбцов
disp('Текущие проценты БПЛА с низким зарядом (< 50%) и количество
пересечений для доступных столбцов:');
for j = find(available_uavs)
    disp(['БПЛА ' num2str(j) ': ' num2str(low_charge_percentages(j)) '% (' ...
        num2str(low_charge_counts(j)) ' из ' num2str(total_counts(j)) '), ' ...
        'пересечений: ' num2str(current_intersections(j))]);
end

```

% Находим максимальный процент БПЛА с низким зарядом среди доступных столбцов

```
available_percentages = low_charge_percentages .* available_uavs;
```

```
[max_percentage, ~] = max(available_percentages);
```

% Если максимальный процент равен 0, значит нет больше БПЛА с низким зарядом

% Но мы продолжаем алгоритм для обработки оставшихся БПЛА

```
if max_percentage == 0
```

```
    disp('Нет больше БПЛА с низким зарядом. Продолжаем обработку оставшихся БПЛА.');
```

% Обрабатываем оставшиеся БПЛА, выбирая тот, у которого больше пересечений

```
available_indices = find(available_uavs);
```

```
if isempty(available_indices)
```

```
    break; % Все БПЛА обработаны
```

```
end
```

% Получаем количество пересечений для оставшихся БПЛА

```
remaining_intersections = current_intersections(available_indices);
```

```
[max_remaining_intersections, max_idx] = max(remaining_intersections);
```

% Если есть несколько БПЛА с одинаковым количеством пересечений, выбираем тот,

% куда комплексу меньше всего поворачиваться

```
max_indices = find(remaining_intersections == max_remaining_intersections);
```

```

if length(max_indices) > 1
    % Вычисляем углы поворота для каждого кандидата
    rotation_angles = zeros(size(max_indices));
    for i = 1:length(max_indices)
        idx = available_indices(max_indices(i));

        % Вычисляем угол поворота
        target_az = atan2d(y_coords(idx) - kep_pos(2), x_coords(idx) -
kep_pos(1));
        horizontal_dist = sqrt((x_coords(idx) - kep_pos(1))^2 +
(y_coords(idx) - kep_pos(2))^2);
        target_el = atan2d(z_coords(idx) - kep_pos(3), horizontal_dist);

        az_diff = abs(target_az - current_azimuth);
        el_diff = abs(target_el - current_elevation);

        if az_diff > 180
            az_diff = 360 - az_diff;
        end

        rotation_angles(i) = az_diff + el_diff;
    end

    % Выбираем БПЛА с минимальным углом поворота
    [~, min_rotation_idx] = min(rotation_angles);
    selected_col = available_indices(max_indices(min_rotation_idx));

    disp(['Найдено несколько БПЛА с одинаковым количеством пересе-
чений: ' num2str(max_remaining_intersections) ...

```

```

        '. Выбран БПЛА ' num2str(selected_col) ' с минимальным углом
поворота: ' ...
        num2str(rotation_angles(min_rotation_idx)) ' градусов.']);
    else
        selected_col = available_indices(max_idx);
        disp(['Выбран БПЛА ' num2str(selected_col) ' с максимальным коли-
чеством пересечений: ' ...
            num2str(max_remaining_intersections)]);
    end
else
    % Находим все столбцы с таким же максимальным процентом
    equal_percentage_indices = find(available_percentages == max_percent-
age & available_uavs == 1);

    % Если таких столбцов несколько, выбираем тот, у которого больше
пересечений
    if length(equal_percentage_indices) > 1
        % Получаем текущее количество пересечений для каждого из этих
столбцов
        column_intersections = current_intersections(equal_percentage_indi-
ces);

        % Находим столбцы с максимальным количеством пересечений
        max_intersections = max(column_intersections);
        equal_intersections_indices = equal_percentage_indices(column_inter-
sections == max_intersections);

        % Если есть несколько столбцов с одинаковым процентом и одина-
ковым количеством пересечений,
        % выбираем тот, куда комплексу меньше всего поворачиваться

```

```

if length(equal_intersections_indices) > 1
    % Рассчитываем углы поворота для каждого БПЛА
    rotation_angles = zeros(size(equal_intersections_indices));
    for i = 1:length(equal_intersections_indices)
        idx = equal_intersections_indices(i);

        % Вычисляем угол поворота
        target_az = atan2d(y_coords(idx) - kep_pos(2), x_coords(idx) -
kep_pos(1));

        horizontal_dist = sqrt((x_coords(idx) - kep_pos(1))^2 +
(y_coords(idx) - kep_pos(2))^2);
        target_el = atan2d(z_coords(idx) - kep_pos(3), horizontal_dist);

        az_diff = abs(target_az - current_azimuth);
        el_diff = abs(target_el - current_elevation);

        if az_diff > 180
            az_diff = 360 - az_diff;
        end

        rotation_angles(i) = az_diff + el_diff;
    end

    % Выбираем БПЛА с минимальным углом поворота
    [~, min_rotation_idx] = min(rotation_angles);
    selected_col = equal_intersections_indices(min_rotation_idx);

    disp(['Найдено несколько БПЛА с одинаковым процентом '
num2str(max_percentage) ...

```

```

        '% и одинаковым количеством пересечений: '
num2str(max_intersections) ...
        '. Выбран БПЛА ' num2str(selected_col) ' с минимальным уг-
лом поворота: ' ...
        num2str(rotation_angles(min_rotation_idx)) ' градусов.']);
    else
        selected_col = equal_intersections_indices(1);

        disp(['Найдено несколько БПЛА с одинаковым процентом '
num2str(max_percentage) ...
        '%. Выбран БПЛА ' num2str(selected_col) ' с наибольшим ко-
личеством пересечений: ' ...
        num2str(max_intersections)]);
    end
else
    % Если такой столбец только один, выбираем его
    selected_col = equal_percentage_indices(1);

    disp(['Выбран БПЛА ' num2str(selected_col) ' с ' num2str(max_per-
centage) ...
        '% БПЛА с зарядом < 50% и ' num2str(current_intersections(se-
lected_col)) ' пересечениями']);
    end
end

% Рассчитываем новый азимут и угол места для выбранного БПЛА
new_azimuth = atan2d(y_coords(selected_col) - kep_pos(2), x_coords(se-
lected_col) - kep_pos(1));
horizontal_dist = sqrt((x_coords(selected_col) - kep_pos(1))^2 +
(y_coords(selected_col) - kep_pos(2))^2);

```

```
new_elevation = atan2d(z_coords(selected_col) - kep_pos(3), horizon-
tal_dist);
```

```
% Выводим информацию о повороте комплекса
disp(['Комплекс повернут на азимут: ' num2str(new_azimuth) '° и угол
места: ' num2str(new_elevation) '°']);
```

```
% Обновляем текущее положение комплекса
current_azimuth = new_azimuth;
current_elevation = new_elevation;
```

```
% Добавляем выбранный БПЛА в последовательность
selected_uavs = [selected_uavs, selected_col];
```

```
% Получаем список БПЛА, которые пересекаются с выбранным
intersecting_uavs = find(intersection_matrix(:, selected_col) == 1 & availa-
ble_uavs' == 1);
```

```
% Выводим информацию о пересекающихся БПЛА и их зарядах
disp('Пересекающиеся БПЛА и их заряды:');
for i = 1:length(intersecting_uavs)
    uav_idx = intersecting_uavs(i);
    disp(['БПЛА ' num2str(uav_idx) ', заряд: '
num2str(charge_level(uav_idx)) '%']);
end
```

```
% Удаляем все БПЛА, которые пересекаются с выбранным (включая
его самого)
available_uavs(intersecting_uavs) = 0;
```

```

% Выводим оставшиеся доступные БПЛА
disp(['Оставшиеся доступные БПЛА: ' num2str(find(available_uavs))]);
disp('-----');
end

% Выводим итоговую последовательность выбранных БПЛА
disp('ИТОГОВАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОБХОДА КЛАСТЕРОВ
(НОМЕРА ЛИДЕРНЫХ БПЛА):');
disp(selected_uavs);

% Подсчитываем, сколько БПЛА было обработано
disp(['Количество выбранных БПЛА для обхода: ' num2str(length(se-
lected_uavs))]);

% Визуализация трехмерного расположения БПЛА и КДО
figure;
scatter3(x_coords, y_coords, z_coords, 80, charge_level, 'filled');
hold on;
scatter3(kep_pos(1), kep_pos(2), kep_pos(3), 200, 'k', 'filled', 'MarkerEdgeCol-
or', 'k');
text(kep_pos(1), kep_pos(2), kep_pos(3), 'КДО', 'FontSize', 12);
colorbar;
colormap(jet);
title(['Трехмерное расположение БПЛА и комплекса энергетической под-
держки (критический заряд < ' num2str(critical_charge_level) '%)']);
xlabel('X координата (м)');
ylabel('Y координата (м)');
zlabel('Z координата (м)');
grid on;
axis equal;

```

```

% Отображение выбранной последовательности БПЛА
hold on;
for i = 1:length(selected_uavs)
    idx = selected_uavs(i);
    text(x_coords(idx), y_coords(idx), z_coords(idx), [num2str(i), ': БПЛА ',
num2str(idx)], 'FontSize', 10);

    % Рисуем линию от КДО к первому БПЛА, а затем между последова-
    % тельными БПЛА
    if i == 1
        % Линия от КДО к первому выбранному БПЛА
        plot3([kep_pos(1), x_coords(idx)], [kep_pos(2), y_coords(idx)],
[kep_pos(3), z_coords(idx)], 'k--', 'LineWidth', 1.5);
    else
        % Добавляем "виртуальное" возвращение луча к КДО для визуализа-
        % ции
        plot3([kep_pos(1), x_coords(idx)], [kep_pos(2), y_coords(idx)],
[kep_pos(3), z_coords(idx)], 'k--', 'LineWidth', 1.5);
    end
end

% Выделяем выбранные БПЛА
scatter3(x_coords(selected_uavs), y_coords(selected_uavs), z_coords(se-
lected_uavs), 100, 'ro', 'LineWidth', 2);

% Функция для вычисления угла поворота к БПЛА
function angle_diff = calculate_rotation_angle(current_az, current_el, target_x,
target_y, target_z, kep_x, kep_y, kep_z)
    % Рассчитываем азимут и угол места для цели

```

```
target_az = atan2d(target_y - kep_y, target_x - kep_x);
horizontal_dist = sqrt((target_x - kep_x)^2 + (target_y - kep_y)^2);
target_el = atan2d(target_z - kep_z, horizontal_dist);

% Рассчитываем разность углов
az_diff = abs(target_az - current_az);
el_diff = abs(target_el - current_el);

% Учитываем, что разность углов не может быть больше 180 градусов
if az_diff > 180
    az_diff = 360 - az_diff;
end

% Общий угол поворота
angle_diff = az_diff + el_diff;
end
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Экз. № 1

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ КОНЦЕРН «БАРЛ»

129226, г. Москва, ул. Докукина, д. 8, стр. 2
Тел./факс +7495 775 91 09 | mail@barl.ru

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный конструктор
АО НПК «Барл»



В.В. Лабутин

«04» июня 2026 г.

АКТ

о реализации результатов диссертации Чепиги Андрея Александровича в рамках работ по разработке программного комплекса обработки радиолокационных данных, получаемых в результате применения радиолокационной станции бокового обзора в X-диапазоне частот, установленной на самолёте-носителе.

Мы, нижеподписавшиеся, подтверждаем, что основные научные положения, выводы и рекомендации кандидатской диссертации Чепиги Андрея Александровича на тему: «Модель и алгоритмы определения оптимальных условий дистанционного обслуживания пространственно-распределённых групп воздушных объектов» реализованы в рамках работ по проектированию наземных комплексов управления и антенных систем дистанционного зондирования Земли.

В частности, в проектных работах использована модель определения оптимальных условий дистанционного обеспечения и функционирования комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределённых групп воздушных объектов. Данная модель применена при решении задачи выбора оптимального места размещения наземного комплекса с учётом пространственного распределения обслуживаемых воздушных объектов, зон радиовидимости и условий устойчивой связи. Результаты моделирования позволили обоснованно определить позиции размещения наземного оборудования, обеспечивающие минимальное время обслуживания и максимальный охват зоны действия комплекса.

Заместитель генерального конструктора



А.С. Петренко

Заместитель генерального конструктора
по информационным технологиям

Р.Н. Бунин

Утверждаю
Генеральный директор
ООО ЦИТМ «Экспонента»
Богославский Н.В.
«08» июня 2026 г.



АКТ

о реализации результатов диссертации Чепиги Андрея Александровича в рамках внутренних разработок компании ООО ЦИТМ «Экспонента».

Мы, нижеподписавшиеся, подтверждаем, что основные научные положения, выводы и рекомендации кандидатской диссертации Чепиги Андрея Александровича на тему: «Модель и алгоритмы определения оптимальных условий дистанционного обслуживания пространственно-распределенных групп воздушных объектов» реализованы в рамках внутренних разработок, в частности, отдел САУ активно использует полученный алгоритм управления поворотным устройством комплекса дистанционного энергетического обеспечения для моделей беспилотных летательных систем.

Лаборатория цифрового моделирования в электроэнергетики (ЦМиЭЭ) применяет разработанную модель определения оптимальных условий дистанционного энергетического обеспечения воздушных объектов для моделирования процессов в энергообеспечении.

Руководитель отдела САУ

 П.М. Кургуз

Руководитель лаборатории ЦМвЭЭ

 Д.М. Тимофеев

Общество с ограниченной
ответственностью
«Парус электро»
ИНН 7713724182
КПП 772401001
ОГРН 1117746147859

115404, г. Москва,
ул. 6-я Радиальная, д. 9
8 (495) 518 92 92
8 (800) 301 05 23
info@parus-electro.ru

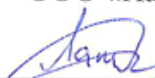


parus-electro.ru



УТВЕРЖДАЮ

Технический директор
ООО «Парус Электро»

 Д. Н. Лапкин

«29» мая 2026 г.



АКТ

о реализации результатов диссертации Чепиги Андрея Александровича в рамках работы по проектированию солнечных электростанций Полевая и Луговая в Забайкальском крае.

Мы, нижеподписавшиеся, подтверждаем, что основные научные положения, выводы и рекомендации кандидатской диссертации Чепиги Андрея Александровича на тему: «Модель и алгоритмы определения оптимальных условий дистанционного обслуживания пространственно-распределенных групп воздушных объектов» реализованы в рамках работы по проектированию солнечных электростанций Полевая и Луговая в Забайкальском крае, в части разработки адаптивного закона управления для поворотного привода динамического следящего устройства.

Руководитель направления ВИЭ

 И. П. Гавриленко

Руководитель проектов

 Г. Ф. Ахматханов

Руководитель группы схемотехники

 М. Э. Гайнуллин

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Чепиги Андрея Александровича на тему «Модель и алгоритмы определения оптимальных условий дистанционного обслуживания пространственно-распределенных групп воздушных объектов», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» в учебный процесс ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

В учебном процессе ФГБОУ ВО «ПГУ» используются разработанные автором положения, модели и алгоритмы дистанционного обслуживания беспилотных летательных аппаратов при чтении лекций и проведении лабораторных занятий по дисциплинам кафедр: «Автоматика и телемеханика» и «Автономные информационные и управляющие системы».

В рамках внедрения в учебный процесс используются следующие результаты диссертационного исследования:

1. Алгоритм формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства комплекса дистанционного обеспечения множества пространственно-распределённых воздушных объектов.

2. Модель определения оптимальных условий дистанционного обеспечения беспилотных летательных аппаратов и функционирования комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределённых групп воздушных объектов.

Перечисленные результаты используются при чтении лекций и проведении лабораторных занятий по дисциплинам:

– «Электромеханические системы» для студентов направления подготовки 27.03.04 «Управление в технических системах»;

– «Оружие и системы вооружения» для студентов направления подготовки 17.05.01 «Боеприпасы и взрыватели».

Заведующий кафедрой

«Автономные информационные и управляющие системы»

д.т.н., профессор

А.И. Сидоров

Заведующий кафедрой

«Автоматика и телемеханика»

д.т.н., профессор

М.А. Щербakov

Личную подпись	А.И. Сидорова, М.А. Щербак	
ЗАВЕРЯЮ		
Специалист по кадрам	Ю.Ю. Софич	
« 08 »	06	20 26г.





**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"
(ФГБОУ ВО "ДонНТУ")**

Артема ул., 58, г. Донецк, г.о. Донецкий, Донецкая Народная Республика, 283001 тел.: +7(856) 337-17-33, 301-07-69
e-mail: donntu.info@mail.ru ОКПО 95580141 ОГРН 1229300078633 ИНН/КПП 9303013012/930301001

08.06.2026 № 30-12/50

На № _____ от _____

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Чепиги Андрея Александровича на тему "Модель и алгоритмы определения оптимальных условий дистанционного обслуживания пространственно-распределенных групп воздушных объектов", представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» в учебный процесс ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»

В учебном процессе ФГБОУ ВО «ДонНТУ» используются разработанные автором модели и алгоритмы определения оптимальных условий дистанционного обслуживания пространственно-распределенных групп воздушных объектов при чтении лекций и проведении лабораторных занятий по дисциплинам:

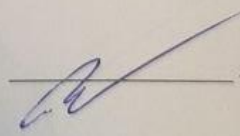
- «Специальные электроприводы и автоматизация технологических комплексов», «Моделирование и имитация мехатронных систем» для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»;
- «Специальные электроприводы в робототехнике» для студентов направления подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника».

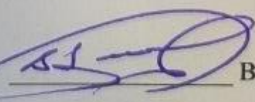
Проректор по научно-педагогической работе
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный
технический университет»,
д-р техн. наук, профессор

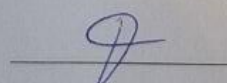
Начальник учебного отдела
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный
технический университет»,
канд. техн. наук, доцент

Заведующий кафедрой
электропривода и автоматизации промышленных установок
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный
технический университет»,
канд. техн. наук, доцент



 А.Б. Бирюков

 В.А. Попов

 П.И. Розкаряка

ПРИЛОЖЕНИЕ В
ПАТЕНТ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2863150

**СПОСОБ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Патентообладатель: **Чепига Андрей Александрович (RU)**

Автор(ы): **Чепига Андрей Александрович (RU)**

Заявка № **2025129564**

Приоритет изобретения **28 октября 2025 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **29 мая 2026 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **28 октября 2045 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Документ подписан электронной подписью
Сертификат 00a570e4f74d43d4531b4b8818e75f29506
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 04.03.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

СВИДЕТЕЛЬСТВА О ГОСУДАРСТВЕННОЙ
РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

КОПИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2023680857

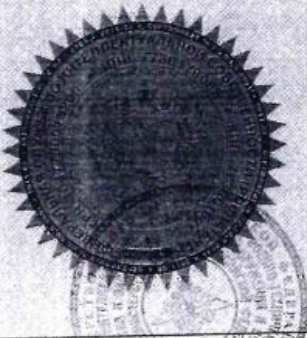
**«Программное обеспечение автоматизированной
системы контроля местоположения пространственно-
распределенных динамических объектов»**

Правообладатель: *Российская Федерация, от имени которой
выступает Министерство обороны Российской
Федерации (RU)*

Авторы: *Петренко Сергей Владимирович (RU), Чепига
Андрей Александрович (RU)*

Заявка № **2023669256**
Дата поступления **19 сентября 2023 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **05 октября 2023 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности




Ю.С. Zubov

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023681926

**«Программная реализация алгоритма оптимальной
редукции матрицы пространственно-распределенных
динамических объектов»**

Правообладатель: *Российская Федерация, от имени которой
выступает Министерство обороны Российской
Федерации (RU)*

Авторы: *Петренко Сергей Владимирович (RU), Чепига
Андрей Александрович (RU)*

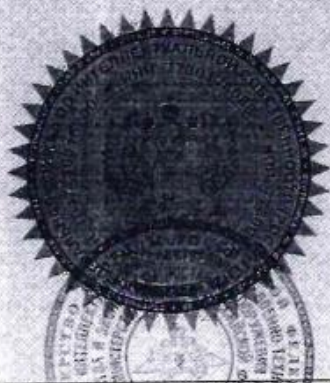
Заявка № 2023680563

Дата поступления 09 октября 2023 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 19 октября 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



КОПИЯ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023680342

**«Реализация оптимального алгоритма управления
скоростью поворота антенны системы наблюдения за
пространственно-распределенными динамическими
объектами»**

Правообладатель: *Российская Федерация, от имени которой
выступает Министерство обороны Российской
Федерации (RU)*

Авторы: *Петренко Сергей Владимирович (RU), Чепига
Андрей Александрович (RU)*

Заявка № 2023669295

Дата поступления 19 сентября 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 28 сентября 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю. С. Зубов

Начальник УИС, ВТС и ЭН ВВ МО РФ

«4» января 2025 г.

М.П.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025695093

**Программное обеспечение формирования оптимальной
траектории обслуживания групп БПЛА комплексом
дистанционной энергетической поддержки**

Правообладатель: **Чепига Андрей Александрович (RU)**

Автор(ы): **Чепига Андрей Александрович (RU)**



Заявка № **2025694209**

Дата поступления **27 ноября 2025 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **10 декабря 2025 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 00a570e4f7adcd8d531b4b8818e75f29506
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 04.09.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов