

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»



И.Ю. ГРИШИН
Р.Р. ТИМИРГАЛЕЕВА
И.И. ЛИННИК

МОНОГРАФИЯ

**МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ
БЕСПИЛОТНЫХ
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

2020

**ФГБОУ ВО «МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА»**

**ФГАОУ ВО «КРЫМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ В.И. ВЕРНАДСКОГО»**

Гришин И.Ю. Тимиргалеева Р.Р. Линник И.И.

**МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ
ДВИЖЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

МОНОГРАФИЯ

Майкоп
ЭлИТ
2020

УДК 004.032.2:681.518.3

ББК 39.575

М54

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ
в рамках научного проекта № 19-29-06081.*

Авторы:

ГРИШИН

Игорь Юрьевич

доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова»

ТИМИРГАЛЕЕВА

Рена Ринатовна

доктор экономических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет
имени В.И. Вернадского»

ЛИННИК

Иван Иванович

кандидат технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет
имени В.И. Вернадского»

Рецензенты:

Атрощенко В.А.,

доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»

Мицай Ю.Н.,

доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Крымский
федеральный университет имени В.И. Вернадского»

Гришин, И.Ю.

М54 Методология создания системы управления воздушным движением беспилотных транспортных средств [Электронный ресурс] : электронное научное издание (монография) / И.Ю. Гришин, Р.Р. Тимиргалеева, И.И. Линник – Электрон. дан. (2,6 Мб). – Майкоп: ЭЛИТ, 2020. – Режим доступа: <https://201824.selcdn.ru/elit-127/pdf/9785604474563.pdf>.

ISBN 978-5-6044745-6-3

Doi 10.34754/EP.2020.14.81.004

В настоящее время идеология использования и развития воздушного пространства современного «умного» города обусловлена тем, что в нем наряду с пилотируемыми летательными аппаратами (самолеты, вертолеты) все более активно начинают использоваться беспилотные летательные аппараты (БПЛА), которые решают или будут решать задачи перемещения грузов, людей, мониторинга территорий, обеспечения связи и т.д. Поэтому необходима надежная и безопасная среда для качества и стабильности работы БПЛА. В работе рассмотрены основные положения теории управления воздушным движением БПЛА для безопасной интеграции таких летательных аппаратов в воздушное движение «умного» города с существующими в нем пилотируемыми летательными аппаратами на основе мониторинга с применением разнородных средств локации, имеющихся на территории «умного» города и вновь создаваемых, которые объединяются в единую многопозиционную систему, являющуюся источником информации о воздушных объектах для оперативного уровня системы управления воздушным движением.

УДК 004.032.2:681.518.3

ББК 39.575

ISBN 978-5-6044745-6-3



9 785604 474563



- © Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 2020
- © Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, 2020
- © Гришин И.Ю., Тимиргалеева Р.Р., Линник И.И., 2020
- © Оформление электронного издания ООО «ЭЛИТ», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
Глава 1 ВОЗДУШНАЯ НАВИГАЦИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ	8
1.1 Анализ современного состояния исследований в сфере управления воздушным движением беспилотных летательных аппаратов.....	8
1.2 Классификация воздушных объектов в системе организации воздушного движения	12
1.3 Особенности тестирования программного обеспечения систем идентификации воздушных объектов.....	27
1.4 Комплексный метод тестирования систем идентификации воздушных объектов.....	41
Глава 2 СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ	56
2.1 Теоретические аспекты управления современными измерительными информационными системами.....	56
2.2 Перспективная локационная техника в мониторинге беспилотных летательных аппаратов	74
2.3 Современные методы оценки параметров траекторий беспилотных летательных аппаратов	91
Глава 3 ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ «УМНОГО» ГОРОДА.....	98
3.1 Концепция мониторинга движения беспилотных транспортных средств «умного» города на основе информации от разнородных датчиков	98
3.2 Программное обеспечение индивидуальных коммуникационных устройств в едином информационном поле обеспечения технологических процессов в аэропорту	101
3.3 Управление процессом использования единого информационного поля обеспечения технологических процессов в аэропорту	108
3.4 Метод расследования инцидентов в системах критической информационной инфраструктуры	116
Глава 4 ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	119
4.1 Адаптивное управление параметрами режима сопровождения многофункционального радиолокационного комплекса в условиях нестационарности канала измерения.....	119
4.2 Особенности мониторинга движения беспилотных летательных аппаратов на основе информации от разнородных датчиков в многопозиционном режиме.....	126

4.3	Поисковая система для решения задач управления на основе генетического алгоритма с оператором мутации k-средних.....	129
Глава 5 ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ «УМНОГО» ГОРОДА .		
5.1	Проблемы логистики беспилотных транспортных средств «умного» города	141
5.2	Технология построения подводных аппаратов на основе роботизированной платформы	144
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		149
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ		152

В настоящее время идеология использования и развития воздушного пространства современного «умного» города обусловлена тем, что в нем наряду с пилотируемыми летательными аппаратами (самолеты, вертолеты) все более активно начинают использоваться беспилотные летательные аппараты^{1 2 3}, которые решают или будут решать задачи перемещения грузов, людей, мониторинга территорий, обеспечения связи и т.д. Таким образом, анализ имеющихся публикаций показывает, к настоящему времени решаются частные вопросы навигации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в условиях «умного» города, однако комплексные, системные постановки задачи (и их решения) пока отсутствуют. В то же время бурное развитие беспилотных транспортных средств «умных» городов в странах Запада показывает, что проблема с течением времени приобретает значительную остроту и должна решаться как можно быстрее, поскольку в связи с принятием Национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» эти процессы в нашей стране пойдут значительно быстрее.

Целью исследования является разработка основных положений теории управления воздушным движением БПЛА для безопасной интеграции таких летательных аппаратов в воздушное движение «умного» города с существующими в нем пилотируемыми летательными аппаратами на основе мониторинга с применением разнородных средств локации, имеющихся на территории «умного» города и вновь создаваемых, которые объединяются в единую многопозиционную систему, являющуюся источником информации о воздушных объектах для оперативного уровня системы управления воздушным движением «умного» города.

Достижение цели исследования направлено на решение важной задачи – создание эффективных и устойчивых к внешним воздействиям сенсоров и сенсорных сетей, обеспечивающих распознавание БПЛА и мониторинг их движения с высокой точностью.

¹ Герасимов П.К., Егоров Д.А. Аспекты безопасности управления автономными беспилотными летательными аппаратами в городской среде // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*, МИРЭА, Москва, т. 14, № 5, 2014, С. 130–132. <https://elibrary.ru/item.asp?id=23466174>.

² Лебедев Г.Н., Малыгин В.Б. Интеллектуальная поддержка в задаче приоритетного обслуживания группы пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов при выборе маршрутов полета и контроля безопасности их движения // *Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации*. 2015. № 221 (11). С. 125-137. <https://elibrary.ru/item.asp?id=25382526>.

³ Бурый А.С., Фомичев И.Д. Модели и алгоритмы обеспечения безопасности движения группы беспилотных летательных аппаратов // *Проблемы управления безопасностью сложных систем*. Труды XXI Международной конференции. 2013. С. 241-243. <https://elibrary.ru/item.asp?id=21825783>.

В исследовании использованы следующие методы и подходы: методы теории систем и системного анализа, многомерный статистический анализ (факторный, кластерный), адаптивное экспоненциальное сглаживание, анализ трендов, скользящая медиана, скользящее среднее, модифицированный и субоптимальный фильтр Калмана, метод сопряженных функций, метод совместной оценки параметров и состояний, базовый и модифицированный метод группового учета аргументов, нечеткие методы теории принятия решений и теории управления, вычисление предикатов, методы теории множеств, метод статистического моделирования, принцип максимума в матричном виде, методы численного анализа, методы теории игр и нейронные сети.

Направления исследования соответствуют одному из направлений Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации «Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта».

Фундаментальная задача исследования состоит в создании теоретических основ формирования системы управления воздушным движением БПЛА на основе мониторинга, базирующегося на применении разнородных локационных средств (радиолокационных, радиотехнических, лазерных, систем с активным ответом), функционирующих в многопозиционном режиме и позволяющих обеспечить оценку параметров с точностью, необходимой для безопасного и надежного управления потоком БПЛА, а также идентификации опасных ситуаций.

ВОЗДУШНАЯ НАВИГАЦИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

- 1.1 Анализ современного состояния исследований в сфере управления воздушным движением беспилотных летательных аппаратов*
- 1.2 Классификация воздушных объектов в системе организации воздушного движения*
- 1.3 Особенности тестирования программного обеспечения систем идентификации воздушных объектов*
- 1.4 Комплексный метод тестирования систем идентификации воздушных объектов*

1.1 Анализ современного состояния исследований в сфере управления воздушным движением беспилотных летательных аппаратов

В работе⁴ сформулирована задача автоматического контроля сближения воздушных судов при попутном, встречном и поперечном движении на пересекающихся курсах. Предложен метод вычисления функции риска их столкновения на основе динамического программирования, что позволяет сформировать сигналы тревоги для принятия предупредительных мер по безопасному управлению боковым и продольным движением ВС. В статье⁵ авторы рассматривают вопросы обеспечения безопасности полетов в условиях внезапных отказов, повреждений в системе управления беспилотным летательным аппаратом и предлагается ее алгоритмическая защита. Для управления воздушным движением пилотируемых летательных аппаратов

⁴ Лебедев Г.Н., Малыгин В.Б. Интеллектуальная поддержка в задаче приоритетного обслуживания группы пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов при выборе маршрутов полета и контроля безопасности их движения // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2015. № 221 (11). С. 125-137. <https://elibrary.ru/item.asp?id=25382526>.

⁵ Полтавский А.В., Рякин А.В. Обеспечение безопасности полетов беспилотных летательных аппаратов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2007. № 119. С. 152-157. <https://elibrary.ru/item.asp?id=12846060>.

создана система управления воздушным движением, имеющая иерархическую структуру, а оперативное управление осуществляется на основе информации, получаемой в результате измерения параметров движущихся объектов радиолокационными станциями, работающими на принципах активной локации либо локации с активным ответом^{6 7}.

В указанных работах на основе методов теории оптимального управления, предложен подход к оптимизации функционирования средств измерений, обеспечивающих получение траекторной информации о параметрах движения воздушных судов системой управления воздушным движением. Результаты моделирования позволили сделать вывод о существенном повышении эффективности такой системы. Также решается задача и предлагается метод автоматизированного управления современными радиолокационными комплексами с фазированными антенными решетками, который позволит значительно сократить время поиска объектов в поле зрения таких комплексов. Решение основано на дискретизации процесса обнаружения объекта по времени и положению. Пространство, в котором движутся обнаруженные объекты, делится на ячейки, и каждая из ячеек идентифицируется с определенной позицией. Каждый объект может находиться в каждой ячейке в течение определенного промежутка времени, а затем перемещаться в другие ячейки. В результате получается динамический процесс с фиксированным количеством позиций и дискретным временем. Для оптимальных расчетов выбрано минимальное среднее время поиска и обнаружения объекта.

Задача оптимальной скорости имеет дело с элементами фазового пространства как экстраполированными вероятностями текущего объекта в ячейке области просмотра. Задача оптимизации решается с использованием дискретного аналога принципа максимума. Для численного решения задачи авторы используют модифицированный метод последовательных приближений. На основе предложенного метода авторами разработан алгоритм автоматического управления обнаружением движущихся объектов радиолокационным комплексом, а также имитационная модель обнаружения объектов.

Предложенный метод автоматического управления значительно сокращает среднее время поиска воздушных объектов. В работе⁸ предложена методика,

⁶ Grishin Igor Yu., Timirgaleeva Rena R. Air Navigation: Optimisation Control of Means Cueing of the Air-Traffic Control System // Proceedings of the 2017 21ST Conference of Open Innovations Association (FRUCT), Helsinki, Finland, Nov 06-10, 2017. IEEE. pp. 134-140.

https://apps.weobknowledge.com/full_record.do?product=UA&search_mode=GeneralSearch&qid=1&SID=C1C8GhRlbbfuPC3YLpl&page=1&doc=1&cacheurlFromRightClick=no

⁷ Grishin Igor Yu., Timirgaleeva Rena R. Air Navigation: Automation Method for Controlling the Process of Detecting Aircraft by a Radar Complex // Proceedings of the 2019 24th Conference of Open Innovations Association (FRUCT), Moscow, Russia, 8-12 April 2019, IEEE. pp. 110–115. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8711905>

⁸ Леньшин А.В., Попов С.А., Лебедев В.В. Оценка качества управления воздушным движением и безопасностью полетов в условиях помех с использованием беспилотных летательных аппаратов // Фундаментально-

развивающая методический аппарат исследования эффективности функционирования радиолокационных систем с активным ответом в условиях преднамеренных помех использованием показателя, отражающего оперативную эффективность и возможности постановщиков помех на информационно-техническом уровне; чувствительностью к параметрам, зависящих от заданных радиоэлектронной и оперативно-тактической ситуаций, учетом взаимного расположения и технических характеристик РЭС, участвующих в конфликтном взаимодействии, а также включает модели пространственно-временного воздействия помех и алгоритм обнаружения запросных сигналов радиолокационных систем с активным ответом. Следует отметить, что более активно над проблемой управления потоками с БПЛА в «умном» городе работают зарубежные исследователи: лидерами являются ученые из США (около 40 % всех публикаций по рассматриваемой тематике), Китая – 17 %, Австралии – 10%, Южной Кореи – 5%. Это те страны, в которых все проблемы «умных» городов (в частности, управления беспилотными транспортными средствами) уже перешли в практическую плоскость. В работе авторов из США⁹ отмечается, что работа БПЛА часто проводится в воздушном пространстве, населенном как гражданскими, так и военными пилотируемыми летательными аппаратами, что требует применения искусственного интеллекта для распознавания ситуаций и позволяет избежать возможных столкновений.

Перечень специальных мероприятий включает разработку операционных архитектур, спецификация характеристик воздушного пространства в определенных зонах полетов, детальный анализ потенциальных опасностей и разработку обоснования безопасности, также описываются инструменты и методы моделирования, которые поддерживают многие из этих видов деятельности, и показано, как эта инфраструктура моделирования используется в ряде связанных с безопасностью полетов исследований.

В работе¹⁰ отмечается, что рост авиаперевозок во всем мире и появление беспилотных авиационных систем увеличат плотность и сложность воздушного движения. Безопасная координация воздушного судна потребует более

прикладные проблемы безопасности, живучести, надежности, устойчивости и эффективности систем. Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию со дня рождения выдающегося учёного академика АН СССР (РАН) Всеволода Сергеевича Авдуевского. 2017. С. 254-259. <https://elibrary.ru/item.asp?id=29878909>

⁹ Lutz Robert R., Frederick Paul S., Walsh Patricia M., Wasson Kimberly S., Fenlason Norm L. Integration of Unmanned Aircraft Systems into Complex Airspace Environments // Johns Hopkins Apl Technical Digest, V. 33, Iss. 4, Apr 2017, pp. 291–302.

https://apps.webofknowledge.com/Search.do?product=WOS&SID=C1C8GhRlbbfuPC3YLpl&search_mode=GeneralSearch&prID=27c64804-d05e-4d7f-826d-6d65d950d2ab

¹⁰ Davis Paul, Boisvert Benjamin. Hyper-Spectral Networking Concept of Operations and Future Air Traffic Management // 2017 IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC) Simulations, St Petersburg, Sep 17-21, 2017. https://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=5&SID=C1C8GhRlbbfuPC3YLpl&page=1&doc=1

приспособленных технологий для связи, навигации и наблюдения. Проект HSCNA обеспечит основу для технологических и эксплуатационных концепций для размещения значительно большего числа сетевых самолетов. В статье описываются две технические проблемы проекта. Первая техническая задача заключается в разработке концепции операций в многополосных сетях для использования на нескольких этапах полета и на всех типах линий связи. Вторая заключается в проведении моделирования будущих операций организации воздушного движения с использованием многополосных сетей и технологий. Масштабное моделирование позволит оценить влияние новых интегрированных сетей и технологий по сравнению с сегодняшней системой на будущие потребности воздушного движения.

В работе австралийского автора¹¹ представлена новая аналитическая основа, учитывающая необходимость единого подхода к обеспечению разделения воздушных судов и принципу обнаружения и предотвращения столкновения ВПЛА. Приведен краткий обзор состояния исследований в технологиях разделения и предотвращения столкновений, чтобы осветить преимущества, предлагаемые унифицированным подходом. При таком подходе использование Adaptive Boolean Decision Logics (ABDL) позволяет автоматически выбирать датчики и системы, включая пассивные и активные датчики прямого обзора, систему предотвращения столкновений и автоматическое зависимое наблюдение. Значение этого подхода также обсуждается в контексте связи, навигации и управления воздушным движением и авионики, с акцентом на развивающиеся требования к управлению движением.

Применение рассмотренных источников траекторной информации для случая управления воздушным движением БПЛА часто становится неприемлемым вследствие более плотного потока таких объектов, меньшей ЭПР, невозможности разместить аппаратуру активного ответа на борту БПЛА. Поэтому целесообразно использовать всю имеющуюся совокупность информационных датчиков разнородных локационных средств (радиолокационных, радиотехнических, лазерных, систем с активным ответом) в многопозиционном режиме^{12 13}.

¹¹ Kapoor Rohan, Ramasamy Subramanian, Gardi Alessandro, Sabatini Roberto. UAV Navigation Using Signals of Opportunity in Urban Environments: An Overview of Existing Methods // 1st International Conference on Energy and Power (ICEP), DEC 14-16, 2016, RMIT Univ, Melbourne, Australia. Energy Procedia. V. 110, pp. 377-383. https://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=7&SID=C1C8GhRlbbfuPC3YLpl&page=1&doc=1

¹² Гришин И.Ю. Актуальные проблемы оптимизации управления в технических и экономических системах. – Ялта: РИО КГУ. 2010. - 252 с. <https://elibrary.ru/item.asp?id=26085028>

¹³ Гришин И.Ю., Тимиргалеева Р.Р. Воздушная навигация: концепция мониторинга движения беспилотных транспортных средств умного города на основе информации от разнородных датчиков // Информационные системы и технологии в моделировании и управлении. IV Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием). Симферополь, 2019. С. 183-186. <https://elibrary.ru/item.asp?id=37636118>

Вопросам многопозиционной радиолокации посвящено большое количество публикаций отечественных и зарубежных исследователей. В 80-90-х годах лидерами научной школы многопозиционной радиолокации были отечественные ученые Черняк В.С., Ширман Я.Д. и др., которым удалось решить задачу когерентной обработки сигналов различных позиций, были проведены эксперименты не только с малобазовыми, но и большебазовыми (несколько тысяч километров) системами, созданы рабочие экземпляры для оборонной сферы. В настоящее время активно продолжаются работы в США и западноевропейских странах, однако результаты исследований нечасто публикуются в открытой печати^{14 15}.

В работе¹⁶ описывается метод многоточечного определения местоположения на основе пассивной системы обнаружения, для измерения положения используется математическая модель и модель ошибок. Дана зависимость определения СКО положения и дальности от влияющих факторов. По результатам моделирования точность определения местоположения этой пассивной системы обнаружения достаточно высока. Но на что следует обратить внимание, что некоторые системные ошибки не входят в модель ошибок, на самом деле эти ошибки оказывают большое влияние на точность определения местоположения этой пассивной системы обнаружения. Системная ошибка может быть уменьшена, но от неё нельзя полностью избавиться.

1.2 Классификация воздушных объектов в системе организации воздушного движения

За последние годы резко выросло количество и типаж летательных аппаратов, которые используются разными государственными ведомствами, частными компаниями и физическими лицами для удовлетворения нужд государства, бизнеса, отдыха и т.п. И в первую очередь этот рост связан с появлением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Вместе с тем постоянно возрастает количество нарушений порядка

¹⁴ HOLLIS J., CRONK T. Measurement Techniques for the Performance of Multipoint Interpolators // Transactions of the Institute of Measurement and Control. V. 17, Iss. 2. pp. 59-62.

https://apps.webofknowledge.com/Search.do?product=WOS&SID=C1C8GhRlbbfuPC3YLpl&search_mode=GeneralSearch&prID=03967f05-806d-4811-a259-bcaacc9cb9a1

¹⁵ Liu F, Ping D, Zhang X, Wang Y, Tao R. Multipoint location and error analysis based on the passive detection system // 5th International Symposium on Instrumentation and Control Technology. Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) V. 5253 pp. 309-315.

https://apps.webofknowledge.com/Search.do?product=WOS&SID=C1C8GhRlbbfuPC3YLpl&search_mode=GeneralSearch&prID=6a2db77e-f548-4754-9876-544f22f9d0e8

¹⁶ Там же

использования воздушного пространства^{17 18}. На этом фоне появилась стойкая тенденция нанесения возможного вреда гражданским объектам воздушными средствами в мирное время, то есть возможное террористическое использование воздушных средств¹⁹. Особенно остро такая ситуация складывается в районах аэропортов.

Эксперты прогнозируют, что к 2035 году объем российского рынка БПЛА составит около \$35 млрд. Поэтому наибольшую угрозу для гражданской авиации в настоящее время представляют беспилотные летательные аппараты, владельцы которых стремятся сфотографировать аэропорт или полёт воздушного судна с необычного ракурса. При этом их не останавливает даже осознание того, что их действия представляют реальную угрозу для жизни и здоровья тысячам людей и могут нанести ущерб в десятки миллионов рублей.

Специалисты по защите объектов от воздушных угроз выделяют пять типов проблем, которые вызывают БПЛА на территориях, свободных от военных конфликтов²⁰. Первая проблема – это опасное сближение с авиационной техникой. Вторая проблема – полёты над участками, где применение авиационной техники запрещено или неуместно, например, над складами горюче-смазочных материалов. Третья проблема – криминальное применения БПЛА (переброска на территорию или с территории аэропорта наркотиков и контрабанды). Ещё одна угроза, это столкновение БПЛА с различными зданиями и сооружениями в аэропорту и прилегающей территории. Пятый тип угроз – это совершение террористических актов в районе аэропорта с использованием БПЛА.

Основной угрозой для гражданской авиации следует считать малоразмерные БПЛА, особенно мультикоптерного типа. Даже незначительная по массе целевая нагрузка в несколько сот граммов способна причинить значительный ущерб. Исходя из того, что вес полезной нагрузки составляет сегодня 10-30% общей массы БПЛА, можно сделать вывод, что основную угрозу в настоящий момент представляют БПЛА весом от трёх до двадцати килограммов.

Таким образом, маловысотная безопасность приобретает всё большую значимость в качестве элемента общего эффективного противодействия

¹⁷ Министерство транспорта Российской Федерации РОСТРАНСНАДЗОР, official website, Количество нарушений порядка использования воздушного пространства Российской Федерации в 2018 году, Web: <https://avia.rostransnadzor.ru/podnadzornye/aon/kolichestvo-narushenij-poryadka-isp>.

¹⁸ Министерство транспорта Российской Федерации РОСАВИАЦИЯ, official website, Информация о состоянии безопасности полётов воздушных судов авиации общего назначения в 2006 – 2015 годах, Web: <https://www.favt.ru/novosti-aktualnaja-informacija?id=2620>.

¹⁹ Н.С.Черемисов и Г.В.Якушин, Терроризм – угроза жизни и безопасности. СПб.: СПбГУ, 2005.

²⁰ С.Г.Федоров, Терроризм: реальность сегодняшнего состояния. Москва: Воениздат, 2000.

воздушным угрозам. Для этого в настоящее время в аэропорту используются различные технические средства: системы ограждений (заборы, барьеры), инженерные заграждения (колючая проволока, труднопреодолимые формы ограды), периметральная охранная сигнализация (пассивные и активные инфракрасные барьеры, радио-лучевые устройства, вибрационно-чувствительные системы), системы контроля и наблюдения (видеокамеры, приборы ночного видения). В особых случаях в качестве средств повышения безопасности и увеличения зоны контроля за пределами внешнего периметра аэропорта могут использоваться стационарные или мобильные пункты технического наблюдения.

Все перечисленные системы успешно выполняют свои задачи, но, на сегодняшний день, направлены исключительно на нейтрализацию угроз наземного характера. Комплекс периметральной охраны может быть полностью замкнутым, проходя даже через места труднодоступных природных образований (водные участки, овраги). Сигнализационные устройства могут обладать высокой чувствительностью и низким процентом ложных срабатываний. Радиолокационные станции и оптико-электронные модули высокого разрешения на пунктах технического наблюдения могут обнаруживать приближение БПЛА за несколько километров. Однако в настоящий момент этих мер уже недостаточно.

Технические решения проблемы вторжения БПЛА делятся на средства их обнаружения и средства подавления/перехвата. Наиболее эффективными средствами для обнаружения БПЛА представляются мультисенсорные датчики. Принцип их действия заключается в обработке сигнала от воздушной цели по оптическому, акустическому, тепловому и радиочастотному каналам. Комбинация характерных признаков БПЛА в каждом из этих каналов создаёт его сигнатуру, позволяющую системе отличить БПЛА от птиц или других типов воздушных судов. Как только в ближнем воздушном пространстве (до 1 км) вокруг объекта засекается цель, обладающая сигнатурой БПЛА, система включает оповещение, а также начинает запись инцидента вторжения.

План дальнейших действий разрабатывается службой безопасности аэропорта: это может быть увод людей в безопасное место, звонок в правоохранительные органы, подключение собственных групп быстрого реагирования или активная нейтрализация БПЛА. Аппаратура нейтрализации БПЛА представляет собой блоки постановки помех в диапазоне радиочастот, используемых для управления БПЛА с пульта оператора. Потеряв связь БПЛА либо возвращается на исходную точку вылета, либо зависает на месте до окончания заряда его батарей. Некоторые модели БПЛА могут летать автономно,

по заранее запрограммированному полётному заданию. В этом случае должна применяться аппаратура глушения сигнала от навигационных спутников (GLONASS, GPS, Galileo).

В настоящее время разрабатывается достаточно большое количество средств физической нейтрализации БПЛА. Это и БПЛА-перехватчики с сетями и пневматические гранатомёты с сетями внутри капсул. Перспективы использования подобных средств пока неясны, так как в первом случае требуется постоянное дежурство на объекте опытного пилота БПЛА-перехватчика, а во втором случае дальность стрельбы капсулами не превышает 100 метров. В независимости от того, какой метод нейтрализации окажется оптимальным с точки зрения закона и эффективности, обеспечение маловысотной безопасности зиждется на своевременном обнаружении БПЛА (БПЛА-детекции). Радиус БПЛА-детекции может быть существенно увеличен, если кроме мультисенсорных датчиков, прикрывающих внутренние участки территории, аэропорт оборудовать специальными радарными. Радары, настроенные на обнаружение исключительно БПЛА и обладающие дальностью действия от 1 до 5 км, могут эффективно защитить воздушное пространство в зоне аэропортов. Дооснащение таких систем радиочастотными сенсорами позволит не только засечь БПЛА, но и методом триангуляции локализовать месторасположение пилота БПЛА-нарушителя. Задержание пилота БПЛА является наиболее предпочтительным вариантом противодействия в зоне аэропорта, так как системы подавления сигналов радио- и GPS-сигналов являются излучающим оборудованием, и их использование в аэропорту может привести к нарушению работы навигационного оборудования служб управления воздушным движением.

Все рассмотренные нами проблемы указывают также на несовершенство нормативно-правовых актов в сфере использования воздушного пространства. Кроме того, причиной нарушений правил использования воздушного пространства является также проблема своевременной и правильной классификации воздушных объектов (ВО), в том числе БПЛА.

Достоверность идентификации и дальнейшей классификации ВО определяется степенью формализации и качеством информации о текущем поведении этих объектов, об их характеристиках, о процессе распознавания от экспертов, другой информации, которой руководствуются в системе организации воздушным пространством. Разнородные признаки характеризуются разными метрическими свидетельствами, достоверностью, темпом обновления, характером изменений, степенью взаимной зависимости и т.п. Качественный характер и неопределённость некоторой части признаков информации

устраняется путём детализации или преобразование по соответствующим шкалам²¹.

Признаковая информация характеризуется стохастической и лингвистической неопределённостью²². Стохастична неопределённость информации о ВО-нарушителе обусловлена его желанием припрятать замысел своих действий, использованием разного вида помех, неточностью измерений параметров ВО, плохим качеством каналов связи и др. Использование профессионального языка в службе организации воздушного движения является причиной лингвистической неопределённости фраз в процессе принятия решений по контролю воздушного пространства. Для описания множества разных ситуаций в воздухе оператор использует ограниченное количество слов и структур фраз, значение которых порой являются неточными, неоднозначными и неполными.

При формализации информации о воздушной обстановке традиционными методами часто игнорируется ситуационный динамизм, большое количество признаков, а соответственно, их возможные разногласия, неоднородность, неопределённость и неполнота при описании классов ВО, неоднородность данных и неопределённость самого процесса классификации²³.

Для выявления ВО, который представляет угрозу, используются когнитивные подходы, в частности, нечёткие меры и множества. Все признаки о ВО представляются базовой лингвистической или нечёткой переменной и обобщающей лингвистической переменной, что отвечает продукционной модели и формированию базы знаний в виде набора лингвистических переменных. Но указанный подход в большей степени свойственен для медленно меняющейся воздушной обстановки.

Попытки представить неслучайную информацию от случайных источников приводят к неопределённому решению о классификации ВО, так как большинство признаков ВО формализуется по принципу детерминированности. Там, где представление информации о ВО традиционными методами невозможно, применяют нечёткие множества. Нечёткость описывается функциями принадлежности. При достаточно неопределённом характере информации можно использовать метод мультисигнатуры ВО.

Принятая в настоящее время система классификации ВО не позволяет

²¹ А.И.Орлов, Теория принятия решений. М.: Экзамен, 2006.

²² А.П.Ротштейн, Интеллектуальные технологии идентификации: нечёткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети. Винница: УНИВЕРСУМ, 1999.

²³ В.Е.Ярушек и др., Теоретические основы автоматизации процессов выработки решений в системах управления. Харьков: ХВУ, 1993.

однозначно определить риски угрозы. Для этого необходимо определение уровней классификации, алфавита классов ВО, перечня и информативности признаков для каждого класса, т.е. формирование и формализация эталонных признаков ВО в специальной базе знаний.

Обработка информации о воздушной обстановке, оценка её достоверности, формирование текущих признаков ВО является этапом, который предшествует этапу классификации ВО. Поэтому эффективное решение задачи идентификации ВО возможно с использованием методов распознавания образов и экспертных систем на основе автоматизированного сбора и совместной обработки информации от различных источников:

- радиолокационных станций радиотехнических подразделений Вооружённых Сил Российской Федерации, в том числе обеспечивающие распознавание классов и типов ВО;

- обзорных трассовые радиолокационные комплексы Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации;

- средств Единой системы государственного радиолокационного опознавания Российской Федерации;

- средств вторичной радиолокации отечественной и международной систем управления воздушным движением;

- средства автоматического независимого наблюдения за воздушным пространством;

- комплексов радиотехнической и радиоэлектронной разведки;

- станций визирования и передачи команд, входящие в состав командных радиолиний управления авиацией;

- средства планирования использования воздушного пространства центров Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации;

- средств, комплексов и систем связи с ВО.

Перечисленные источники позволяют получить следующую информацию и идентификационные признаки:

- координаты ВО;

- данные о государственной принадлежности ВО, оборудованных ответчиками системы государственного опознавания;

- индивидуальные номера или номера рейсов;

- классы и типы ВО;

- данные о помеховой обстановке (нет помех; помехи активные; помехи пассивные; помехи комбинированные);

- данные о ситуации на борту ВО (не терпит бедствие; терпит бедствие; ранение лётчика; отказ техники; потеря ориентировки; пожар; боевое повреждение; нападение на экипаж);
- количественный состав ВО;
- данные о местоположении ВО относительно государственной границы Российской Федерации или границ режимных объектов (не нарушает; находится в опасной близости; нарушает);
- планово-диспетчерскую информацию.

Некоторые виды информации и идентификационные признаки могут присваиваться и вводиться в комплекс средств автоматизации контроля использования воздушного пространства непосредственно операторами этого комплекса.

Процедура классификации ВО по степени «опасности» включает в себя три этапа:

- формирование и динамическое обновление баз знаний системы контроля воздушного пространства, содержащих информацию, необходимую для определения категорий ВО, прежде всего, описание образов различных категорий ВО;
- совместная обработка и обобщение координатной, полётной, индивидуальной признаковой и другой информации о ВО, поступающей от источников различного назначения и физической природы;
- определение категорий ВО (собственно классификация ВО по степени «опасности»).

Формируемые на первом этапе базы знаний зависят от уровня системы контроля воздушного пространства и могут включать сведения о сводном суточном плане полётов, изменениях и дополнениях к нему, структуре воздушного пространства, запретах и ограничениях на его использование, об индивидуальных номерах ВО и соответствующих данных по каждому из них, о различных траекторных и сигнально-траекторных признаках, а также другую, необходимую для установления категорий ВО информацию.

Совместная обработка и обобщение информации от различных источников имеет целью формирование уникального интегрированного образа каждого ВО с соответствующими идентификационными признаками. Определение категории ВО осуществляется в соответствии с установленным регламентом по каждому объекту на основании поступающих о нем сведений и информации, хранящейся в базах знаний.

Первоначально производится отождествление полученной координатной и

полётной информации с суточным планом полётов. Этот процесс может занимать определённое время (в зависимости от степени его автоматизации и достоверности плановой информации). До принятия решения о принадлежности ВО к заявочным такой объект является неидентифицированным.

ВО, идентифицированные как заявочные, поступают на проверку выполнения установленного режима полёта. Данная проверка реализуется в алгоритмах комплексов средств автоматизации контроля использования воздушного пространства. При превышении величины контролируемых параметров полёта категория заявочного ВО изменяется на категорию «нарушитель режима полёта». По всем воздушным объектам, не отождествлённым с планом, производится анализ их принадлежности к внеплановым или контрольным ВО.

Для объектов, не отнесённых ни к одной из вышперечисленных категорий, проверяется наличие ответного сигнала по системе государственной принадлежности, оценивается возможность нарушения государственной границы или границы режимного объекта, устанавливается принадлежность летательных аппаратов к вооружённым силам иностранных государств. В зависимости от наличия или отсутствия этих признаков, воздушному объекту либо присваивается одна из категорий: «потенциально опасный ВО», «нарушитель границы», «воздушный противник», либо данный ВО считается неидентифицированным. ВО, полностью прошедшим все процедуры идентификации, присваивается индекс и единый номер в соответствии с уточнённой системы идентификации.

Основные требования, которые выдвигаются к классификации ВО²⁴:

- соответствие формализованного описания знаний о ВО математической модели классов;
- полнота и непротиворечивость формализованных знаний относительно классификации ВО;
- получение результатов за заданный интервал времени;
- открытость системы поддержки принятия решения;
- возможность использования данных от внешних источников информации.

Известные информационный и когнитивный подходы к формализации процессов принятия решений.

Информационный подход оправдан в системах, предназначенных для работы в типичных условиях, когда оператор имеет достаточное время для

²⁴ С.А.Королёв, Тактическая подготовка. Курс «Тактика войсковой ПВО ВС РФ». Москва: МИЭТ, 2001.

глубокого анализа обстановки и принятия решений, а компьютер сохраняет информацию и является вспомогательным средством для оценки вариантов решений²⁵.

В системах управления, которые определяются высокой степенью адаптивности к внешним условиям, применяется когнитивный подход. Так, для классификации объектов одной из основных задач является представления знаний²⁶. Для представления знаний используют формальные или неформальные модели. В основе формальных моделей лежит строгая математическая теория. Каждая неформальная модель разрабатывается для конкретной предметной области. Вывод в неформальных системах во многом есть субъективным. Основные методы представления знаний основаны на логических, фреймовых и продукционных моделях, нейронных или семантических сетях. Формализация задач принятия решений по классификации ВО характеризуется неполнотой или неточностью информации, то есть неопределённостью. Для учёта неопределённости информации предлагается использования теории нечётких множеств.

Анализ показал, что для задач классификации ВО наиболее подходят продукционные модели. В общем случае продукция – это тройка: <имя продукции> <условие (α)> <выражение (β)>. Продукции близки к логическим моделям и позволяют организовывать на них эффективные процедуры вывода. Они нагляднее отображают знания, чем другие модели. Отсутствие жёстких ограничений даёт возможность менять интерпретацию элементов продукции.

– Принятие решения на основе принципа причинно-следственной связи между информационными признаками и результатом может быть описано естественным языком и формализовано как совокупность логических высказываний. Класс объекта получается с помощью механизмов логического вывода, которые строятся на основе:

- нечётких продукционных правил;
- алгоритмов многокритериального выбора;
- прецедентов и выбора по аналогии (нечёткого распознавания ситуаций).

Принятие решения о классификации ВО является сравнением текущих значений свойств наблюдаемого объекта с эталонными. Для этого вычисляется степень похожести или расстояние между объектами. Соответствие ВО некоторому априорному классу выбирается по правилу – сумма расстояний от какого-то класса S^* ко всем другим классам S_i минимальная. При определении

²⁵ А.В.Бондарев и Ф.Г.Аде, Искусственный интеллект. – Севастополь: Издательство СевНТУ, 2002.

²⁶ Э.В.Попов, Искусственный интеллект. Москва: Радио и связь, 1990.

степени схожести используют меры схожести Лукасевича, Танимото и др. Но иногда использование метода выбора по аналогии для решения задачи классификации ВО с неполной информацией проблематично из-за изменения со временем количества получаемых признаков. Отличие в текущей размерности признаков от эталонной не позволяет осуществлять сравнение. Но метод выбора по аналогии в комбинации с другими методами при условии достаточности информации для принятия решения может давать хорошие результаты при классификации ВО.

Для формального представления знаний по классификации ВО предлагается использовать комбинированный подход: нечёткие продукционные модели с развитым аппаратом вывода, модели с детерминированным логическим выводом на основе обычной булевой логики и использование метода выбора по аналогии. Это требует разработки двух механизмов логического вывода – детерминированного и в условиях нечёткости, а именно:

- обосновать механизм логического вывода, который будет обеспечивать формирование предложений относительно автоматизированного принятия решения при недостаточном объёме информации;
- синтезировать математическое описание классов ВО путём сравнения эталонных и текущих значений признаков, определение класса ВО по избранному критерию близости или с помощью избранных механизмов логического вывода;
- оценить степень соответствия полученных классов ВО разработанных на этапе концептуализации.

Для описания поведения ВО предлагается использовать следующую группу признаков:

- пространственное положение объекта;
- состав планово-диспетчерской информации по данному ВО;
- управляемость ВО по командам с земли;
- наличие и состав визуальной информации о ВО;
- сигнальную информацию по данным первичной локации;
- траекторную информацию.

Каждый класс ВО будем описывать своим набором количественных и качественных признаков^{27 28}. Количественные признаки могут оцениваться и сравниваться количественно между собой. Качественные признаки определяют семантическое описание свойств объектов. По степени значимости признаки

²⁷ Дж.Ту и Р.Гонсалес, Принципы распознавания образов: пер с англ, Москва: Мир, 1978.

²⁸ Дж.Джарратано и Г.Райли, Экспертные системы. Принципы разработки и программирование, Вильямс, 2007.

будем разделять на группы, и ВО будем классифицировать отдельно для каждой группы на основе экспериментальных данных или экспертных оценок. В каждой группе признаки представляются в бинарном пространстве путём дихотомизации данных.

Дихотомизация – это последовательная декомпозиция обобщённого признака A_i на пространство частичных α_{ij} , когда каждый частичный признак представляется в бинарном виде («1» или «0»). Это отвечает единичному значению функции принадлежности (синглетонна). Частичные признаки α_{ij} поведения ВО собранные в группы A_i по типам или источникам. Такой подход позволяет перейти от лингвистических переменных в базе знаний к булевым, то есть определить их в единой безразмерной метрической базе знаний.

Информационные признаки, которые описывают поведение ВО:

– A_1 – пространственное положение (α_{11} на маршруте, α_{12} близ границы или запрещённой зоны, α_{13} в запрещённой зоне, α_{14} в не перечисленных выше зонах);

– A_2 – плановая-диспетчерская информация (α_{21} есть плановая информация о ВО, α_{22} нет плановой информации о ВО, α_{23} есть плановая информация с нарушением, α_{24} есть плановая информация от военного диспетчера);

– A_3 – управляемость за командами из земли (α_{31} есть связь, экипаж выполняет команды, α_{32} есть связь, экипаж не выполняет команды, α_{33} нет связи);

– A_4 – траекторные признаки (α_{41} скоростной ВО, α_{42} малоскоростной ВО, α_{43} маневрирующий ВО, α_{44} с постоянными параметрами движения, α_{45} ВО на малой высоте, α_{46} высотный ВО);

– A_5 – признаки постановки помех (α_{51} ВО ставит помехи, α_{52} ВО не ставит помехи).

Информационные признаки, узнавания и вторичной локации:

– A_6 – отвечает в системе RBS (α_{61} в режиме А, α_{62} в режиме С, α_{63} в 1 режиме, α_{64} в 2 режиме, α_{65} код ответа 7500, α_{66} код ответа 7600, α_{67} код ответа 7700, α_{68} отвечает в сигналом аварии, α_{69} отвечает кодами 7711-7717, 7721-7727, α_{610} не отвечает в системах RBS);

– A_7 – информация от системы ASDE (α_{71} решение непринятое, α_{72} неизвестный, α_{73} перехватчик, α_{74} особой важности, α_{75} свой, α_{76} условный противник, α_{77} постановщик помех условного противника, α_{78} враг, α_{79} постановщик помех, α_{710} подозрительный ВО).

Представим процедуру классификации ВО в виде графа, где α_{ij} – признаки, β_{mn} – класс ВО, i – группа признаки, j – очередной номер признака в группе, m – уровень классификации, n – очередной номер класса на этом уровне.

Бинарный признак пространства позволяет сформировать матрицу соответствия признаков и индексов принадлежностей ВО (матрицу знаний), а в дальнейшем перейти от лингвистических переменных в базе знаний к булевым.

Неполнота информации о ВО иногда не позволяет однозначно идентифицировать такие объекты. То есть необходимо расширить перечень индексов и автоматизировать процесс принятия соответствующих решений на основании имеющейся информации. Введём такую иерархическую систему уровней классификации ВО.

По степени угрозы, необходимости действий органов обслуживания воздушного движения по конкретному ВО (первый уровень):

- штатная ситуация – никакие дополнительные действия со стороны должностных лиц органов управления воздушным движением не нужны;
- мероприятия со стороны компетентных органов не нужны, необходимо дополнительное внимание или получение дополнительной информации;
- необходим немедленный комплекс мер, который предусматривает вмешательство компетентных органов.

На втором уровне ВО идентифицируются по принадлежности. На третьем уровне ВО идентифицируются по основными признаками (то есть им присваиваются текущие индексы принадлежностей). Четвёртый уровень – идентификация ВО по дополнительным признакам.

Часть классов β_{mn} определяется автоматически по детерминированным признакам, часть имеет вероятностный или нечёткий характер, часть формируется на основании неформализованной информации оператором:

- по степени угрозы (β_{11} воздушная цель, β_{12} воздушная опасность, β_{13} ВО нуждается во внимании, β_{14} обычный ВО, β_{15} неопределённый ВО);
- по принадлежностями (β_{21} свой, β_{22} чужой, β_{23} нейтральный, β_{24} военный, β_{25} гражданский, β_{26} не определённый);
- по основным признакам (β_{31} ВО с сигналом узнавания, β_{32} ВО нарушитель государственной границы, β_{33} ВО по заявке, β_{34} ВО нарушитель порядка использования воздушного пространства, β_{35} противник, β_{36} ВО без сигнала узнавания);
- по дополнительными признаками (β_{41} свой перехватчик, β_{42} наличие ответа в III режиме, β_{43} бортовой номер в системе RBS, β_{44} наличие ответа в

системе 40Д, $\beta 45$ наличие ответа в системе RBS, $\beta 46$ постановщик помех, $\beta 47$ учебная цель, $\beta 48$ контрольная цель, $\beta 49$ наличие ответа «свой», $\beta 410$ ВО правдоподобная угроза, $\beta 411$ ВО подтверждённая угроза, $\beta 412$ национальная принадлежности).

Таким образом, введённая иерархическая система классификации ВО позволяет:

- на первом уровне определить опасные ВО, которые требуют особого внимания;
- сопоставить законодательно существующую систему классификации ВО по индексам принадлежностей к современным требованиям по определению классов ВО;
- обеспечить однозначное преобразование информации о классах ВО при обмене информацией о воздушной обстановке с соседними государствами.

Для однозначного сопоставления имеющихся признаков предложенным классам ВО используется матрица большой размерности. Для уменьшения её размерности и сопоставления признаков поведения ВО индексам принадлежностей предложены соответствующие уравнения логического вывода для каждого из уровней классификации.

Признаки α_{ij} могут вводиться автоматически программой одновременно с формированием записи или после начальной обработки информации оператором:

- $\alpha 1j$ формируются по результатам вычисления расстояния к соответствующим зонам, линии границы и сравнение с предельными значениями;
- $\alpha 2j$ вводятся вручную или формируются по результатам сравнения введённой плановой информации с кодами ответа в системе RBS ($\alpha 21$) или сравнение плановой информации с текущей радиолокационной ($\alpha 23$);
- $\alpha 3j$ могут быть введены только вручную по данным оповещения органов организации воздушного движения ($\alpha 33$ формируется автоматически при условии поступления признака $\alpha 6b$);
- $\alpha 4j$ формируются автоматически по результатам анализа параметров движения по данным радиолокационного наблюдения;
- $\alpha 51$ вводится вручную или автоматически при сопровождении постановщика помех триангуляционным методом;
- $\alpha 6j$ формируются автоматически по результатам радиолокационного распознавания (признаки $\alpha 61$, $\alpha 62$, $\alpha 61$ - $\alpha 67$, $\alpha 69$ – по данным в системе RBS, признаки $\alpha 63$, $\alpha 64$, $\alpha 68$, $\alpha 610$ – по данным в системе 40Д).

Признаки для классификации воздушных объектов:

- полученные автоматически ($\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{13}, \alpha_{21}, \alpha_{22}, \alpha_{23}, \alpha_{24}$);
- введённые вручную ($\alpha_{31}, \alpha_{32}, \alpha_{33}, \alpha_{51}, \beta_{34}, \beta_{410}, \beta_{411}, \alpha_{41}, \alpha_{42}, \alpha_{43}, \alpha_{44}, \alpha_{45}, \alpha_{46}, \alpha_{51}, A_6, A_7$).

Признаки α_{7j} получаются по линиям обмена информацией с системой ASDE.

Для автоматического получения признаков используют такие методы:

- $\alpha_{11}, \alpha_{21}-\alpha_{23}$ – автоматизированная процедура «корреляция план – трек»;
- α_{12}, α_{13} – вычисление расстояния к областям, рубежам в пространстве;
- $\alpha_{41}-\alpha_{44}$ – по данным вторичной обработки радиолокационной информации;
- $\alpha_{45}, \alpha_{46}, A_6$ – по данным радиолокационного наблюдения по каналам первичной и/или вторичной радиолокации;
- α_{51} – при наличии источников активных помех пассивной системе радиолокации (относительно постановщиков пассивных помех признак может быть введённым лишь полуавтоматически);
- A_7 – преобразование форматов сообщений ASDE в соответствующие форматы классов.

Признаки несут объективную и детерминированную информацию с момента получения или нуждаются в дополнительных действиях, проверке во времени для обретения доверия.

Детерминированные признаки $\alpha_{31}-\alpha_{33}, A_6$ являются объективными и однозначными, $\alpha_{12}, \alpha_{41}-\alpha_{46}$ нуждаются в начальном определении пороговых показателей для них обозначения как детерминированных.

Признаки вероятностного доверия нуждаются в другой информации для её формирования: сопоставление текущей радиолокационной информации и плановой информации ($\alpha_{21}-\alpha_{24}$), чувствительности алгоритмов вторичной обработки к манёврам (α_{43}, α_{44}) и т.п. То есть принятие решения о ВО зависит от качества информации и степени доверия к ней.

Информация о воздушной обстановке за своим составом и содержанием содержит значение пространственных координат ВО и параметров их движения (координатная информация о ВО), а также семантическую (содержательную) информацию о ВО и о воздушной обстановке в целом.

К семантической информации о ВО относятся:

- признак определения государственной или ведомственной принадлежностей ВО;
- индекс принадлежности ВО;

- тип (класс) ВО;
- признаки действия ВО (наличие и вид манёвра, постановка и вид помех и т.п.);
- количественный состав отдельной группы объектов.

Обработка разного рода информации – траекторной (координатной), полученной по каналам государственного опознавания, вторичной локации (полётной), планово-диспетчерской, оповещение фактически создают семантику.

Вопрос оценивания качества информации, особенно семантической, для классификации ВО, как свидетельствует анализ публикаций, полностью не решён. Наиболее известными являются методы оценивания качества радиолокационной информации для определения местоположения воздушных целей²⁹. Качество радиолокационной информации, которая делится на координатную и некоординатную, обычно оценивается полнотой, точностью, достоверностью и оперативностью.

Для правильного определения местонахождения ВО координатная радиолокационная информация будет иметь такую точность, чтобы задача была решена с заданной вероятностью. Темп получения радиолокационной информации должен быть согласован с циклом управления и позволять решать задачу с учётом времени опоздания информации.

Некоординатная информация оценивается лишь одним качественным показателем – достоверностью, как мерой соответствия имеющейся информации такой, что соответствует действительности. Достоверность информации, используемой во время принятия решения, определяет вероятность правильного решения.

Для выявления угроз с воздуха необходима комплексная оценка качества радиолокационной информации на основе частичных показателей (полноты, точности, достоверности) и по временными показателями.

Самое сложное оценить полноту информации. Так, для принятия решения относительно распознавания ситуаций может быть использован показатель³⁰:

$$Y = \sum_{i=1}^Q \eta_i \cdot R_i \cdot T_i,$$

где Q – количество признаков;

η_i – коэффициент важности признака;

R_i – показатель достоверности результатов выявления ВО;

T_i – показатель оперативности выявления ВО.

²⁹ Ю.Н.Панасюк и А.П.Пудовкин, Обработка радиолокационной информации в радиотехнических системах, Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2016.

³⁰ В.П.Бердышев, Радиолокационные системы, Красноярск: СФУ, 2012.

Это выражение учитывает все признаки, используемые при распознавании. Но этот подход не может дать адекватную оценку полноты классификации ВО. Поэтому характеристикой полноты должно быть не общее количество признаков, а соответствие признаков характерным особенностям, которые позволяют однозначно классифицировать ВО. Поэтому, в дальнейших исследованиях, необходимо определить эталонный состав признаков для каждого класса ВО и меру близости имеющейся информации эталону.

Формализация описания признаков воздушного объекта базируется на принципе детерминированности. Предложенный метод формирования пространства признаков воздушного объекта включает определение обобщённых признаков поведения воздушных объектов, их дихотомизацию и определение эталонного набора признаков для каждого класса воздушных объектов. Матрица соответствия признаков и индексов принадлежностей воздушного объекта формируется в бинарном пространстве признаков. Это позволяет перейти от лингвистических переменных в базе знаний к булевым.

Предложенная иерархическая четырёхуровневая система классификации воздушных объектов, и введённая система классификации позволяет определить опасные воздушные объекты, которые нуждаются в особом внимании со стороны операторов, и сопоставить существующую систему классификации воздушных объектов по индексам принадлежности с современными требованиями к определению классов воздушных целей.

1.3 Особенности тестирования программного обеспечения систем идентификации воздушных объектов

Для эффективного решения вопросов предотвращения несанкционированного проникновения в воздушное пространство аэропорта необходимы новые подходы к оценке, анализу и выработке мер обеспечения безопасности полётов, которые позволили бы адекватно оценить степень влияния различных факторов, их наиболее опасные сочетания с учётом быстро возрастающих возможностей беспилотных летательных аппаратов.

Решение столь сложной задачи в настоящее время осуществляется в рамках функционирования единого информационного поля обеспечения технологических процессов в аэропорту³¹. Одним из элементов этого

³¹ Tamargazin A.A., Linnik I.I. Керування процесом використання єдиного інформаційного поля забезпечення технологічних процесів в аеропорту / Наукоємні технології: Наук. журнал – Київ: НАУ, 2019. – № 4 (44). – С.494-499. DOI: 10.18372/2310-5461.44.14326.

информационного поля является программное обеспечение классификации воздушных объектов³². При этом важным этапом его разработки является выявление слабых места в соответствующем программном обеспечении (тестирование) и поиск рациональных путей их устранения.

Для усовершенствования процесса тестирования программного обеспечения для классификации воздушных объектов на системном уровне должны быть решены задачи формализации процессов определения классов объектов в воздухе во время его контроля и верификации программного обеспечения нечёткой логической системы классификации воздушных объектов на основе требований к программному обеспечению предметной области. Как ни странно, именно эти вопросы на сегодняшний день недостаточно исследованы. В результате чего сложилась ситуация, которая характеризуется, с одной стороны, необходимостью проведения эффективного тестирования программного обеспечения для классификации воздушных объектов на системном уровне с учётом выдвинутых требований относительно корректности и адекватности используемых при этом тестовых наборов, с другой стороны, в отсутствии соответствующих методов формализации процессов классификации воздушных объектов и метода верификации программного обеспечения нечёткой логической системы классификации.

Анализ программного обеспечения для классификации воздушных объектов, показал, что система должна реализовывать так называемые логические решения, так как классификация воздушных объектов зависит, прежде всего, от принятия именно логических решений, которые реализуются специальным программным обеспечением³³.

Качественный программный продукт зависит от качества технологических процессов его создания, которые регулируются набором стандартов серии ISO 9000, среди которых основными являются:

– ISO 9001:2000 Quality management systems – Requirements. Стандарт определяет общие правила обеспечения качества результатов во всех процессах жизненного цикла изделия;

– ISO/IEC 9003:2004 Software engineering – Guidelines for the application of ISO 9001:2000 to computer software. Стандарт конкретизирует положение ISO 9001 для разработки программного обеспечения и определяет некоторый набор

³² Linnik I.I., Tamargazin A.A., Linnik E.P. Efficiency of controlling the production system at airports using the single information space for ensuring technological processes. CEUR Workshop Proceedings, 2019, pp.88-99.

³³ Кичигин Д.Ю. Метод редукции тестового набора для интеграционного тестирования. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Д.Ю. Кичигин. – М: Институт системного программирования РАН, 2010. – 24 с.

техники и процедур, которые рекомендуется применять для контроля и обеспечения качества программных продуктов, которые разрабатываются;

– ISO/IEC TR 90005:2008 Software engineering – Guidelines for the application of ISO 9001:2000 to system life cycle processes. Стандарт конкретизирует положение относительно применения ISO 9001:2000 для приобретения, снабжение, разработки, применение и сопровождения программных систем и использует ISO/IEC 15288 как отправную точку для формирования требований обеспечения качества при проектировании программных систем.

Качество программного обеспечения, которое регламентируется группой стандартов ISO 9126, определённое в виде совокупности характеристик: внутреннего качества, связанного с характеристиками самого программного обеспечения, без учёта его поведения, внешнего качества, которое характеризует программное обеспечение с точки зрения его поведения в системе, и качество программного обеспечения при использовании в разных сценариях работы.

Стандарт ISO 9126 предлагает использовать для описания качества программного обеспечения многоуровневую модель показателей качества. На верхнем уровне выделено шесть основных характеристик качества программного обеспечения, каждая из которых описывается с помощью набора атрибутов, которые позволяют оценить эту характеристику. Для каждого атрибута определяется набор метрических свидетельств, которые позволяют оценить этот атрибут. Для каждого метрического свидетельства определяется набор оценочных элементов, которые позволяют оценить это метрическое свидетельство. Построение модели качества позволяет системно описать требования к программному обеспечению.

Показатели качества, закреплённые в стандартах, не исчерпывают полностью понятия качества программного обеспечения. В зависимости от его назначения перечень показателей качества может быть расширен или сужен в рамках проекта по разработке конкретного программного обеспечения. Наиболее важными стандартами для контроля качества программного обеспечения:

- ISO/IEC 9126-1:2001 Software engineering – Product quality – Part 1: Quality model;
- ISO/IEC 9126-2:2003 Software engineering – Product quality – Part 2: External metrics;
- ISO/IEC 9126-3:2003 Software engineering – Product quality – Part 3: Internal metrics;
- ISO/IEC 9126-4:2004 Software engineering – Product quality – Part 4: Quality in use metrics.

Целью процедуры контроля качества является убедиться, что определённые характеристики качества программного обеспечения достигнуты. Эффективным образом оценки многих атрибутов качества является тестирование. Тестирование программного обеспечения – это проверка соответствия между реальным и ожидаемым поведением программы, осуществляемая на конечном наборе тестов, выбранных определённым образом³⁴. Организация тестирования программного обеспечения регламентируется стандартами:

- ISO/IEC 25051:2006 Software engineering – Software product Quality Requirements and Evaluation (Square) – Requirements for quality of Commercial Off-The-Shelf (COTS) software product and instructions for testing;
- IEEE 829-1998 Standard for Software Test Documentation;
- IEEE 829-2008 Standard for Software and System Test Documentation;
- IEEE 1008-1987 (R1993, R2002) Standard for Software Unit Testing.

Процесс оценки характеристик качества готовых программных средств и их компонентов на разных этапах жизненного цикла описан в международном стандарте ISO 14598. Для каждой характеристики качества рекомендуется формировать меры и шкалу измерений с выделением необходимых, допустимых и неудовлетворительных значений. Реализация процессов оценки должна коррелировать с этапами жизненного цикла конкретного проекта программного средства согласно употребляемой адаптированной версии стандарта ISO 12207. Наиболее важные стандарты в этом наборе следующие:

- ISO/IEC 14598-1:1999 Information technology – Software product evaluation – Part 1: General overview;
- ISO/IEC 14598-2:2000 Software engineering – Product evaluation – Part 2: Planning and management;
- ISO/IEC 14598-3:2000 Software engineering – Product evaluation – Part 3: Process for developers;
- ISO/IEC 14598-4:1999 Software engineering – Product evaluation – Part 4: Process for acquirers;
- ISO/IEC 14598-5:1998 Information technology – Software product evaluation – Part 5: Process for evaluators;
- ISO/IEC 14598-6:2001 Software engineering – Product evaluation – Part 6: Documentation of evaluation modules.

Основой создания программного обеспечения для классификации воздушных объектов, есть структурная и объектно-ориентированная

³⁴ IEEE Guide to Software Engineering Body of Knowledge, SWEBOOK, 2004.

технологии³⁵ ³⁶. Одна от одной эти технологии отличаются методами декомпозиции предметной области исследуемой системы.

Структурная технология предусматривает функциональную декомпозицию, то есть представление разрабатываемой системы как функции и последовательная разбивка её на подфункции, на подподфункции и т. д.³⁷. К сожалению, процессы и данные в структурном подходе существуют отдельно друг от друга, причём проектирование ведётся от процессов к данным, которые в сравнении с процессами редко меняются.

В объектно-ориентированной технологии основной единицей является класс объектов – операционная категория, которая объединяет конкретные значения данных и методы (операции) в программном коде, которые и манипулируют этими данными³⁸. Конструкция объектно-ориентированной технологии базируется на устойчивых формах. Поэтому объектно-ориентированные технологии более открытые и легче модифицируются, что позволяет системе развиваться постепенно, что не приводит к полной её переработке даже в случае довольно существенных изменений начальных требований к программному обеспечению.

В настоящее время за неофициальный стандарт разработки программного обеспечения фактически принята объектно-ориентированная технология. В связи с этим, в рамках нашей работы процессы разработки программного обеспечения для классификации воздушных объектов в целом, и его тестирования, в частности, рассматривались из позиций объектно-ориентированной технологии разработки программного обеспечения.

Жизненный цикл программного обеспечения в целом определяется как период времени, который начинается с момента принятия решения о необходимости создания именно этого программного обеспечения и заканчивается в момент его полного изъятия из эксплуатации³⁹. Одним из основных процессов жизненного цикла программного обеспечения является процесс разработки, который содержит действия и задачу разработчика по

³⁵ Ананьев П.И. Технология разработки программного обеспечения. Учебное пособие / П.И. Ананьев. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. – 221 с.

³⁶ Орлов С.А. Технологии разработки программного обеспечения: Учебник / С.А. Орлов. – СПб: Питер, 2002. – 464 с.

³⁷ Глухова Л.А. Основы алгоритмизации и структурного проектирования программ / Л.А. Глухова, В.В. Бахтизин. – Минск.: БГУИР, 2003. – 72 с.

³⁸ Booch G. et al. Object-oriented analysis and design with applications. Addison-Wesley, 2007. – 717 p.

³⁹ Балькин Г.Ф. Системный анализ в инфокоммуникациях (учебное пособие) / Г.Ф. Балькин, Ю.Г. Балькин, Л.А. Крапивянская. – К. : ГУТ, 2014. – 97 с.

созданию программного продукта^{40 41}:

- реализация процесса разработки R_S ;
- анализ и формирования системных требований A_{ST} ;
- проектирование архитектуры системы P_{AS} ;
- анализ и формирования требований к программному обеспечению A_{POT} ;
- проектирование архитектуры программного обеспечения P_{APO} ;
- разработка детального проекта программного обеспечения P_{DAPO} ;
- кодирование программного обеспечения C_{PO} ;
- тестирование отдельных модулей (компонентов) программного обеспечения T_{PO} (модульное (компонентное) тестирование);
- интеграция программного обеспечения I_{PO} ;
- квалификационное тестирование групп модулей (компонентов) программного обеспечения T_{KPO} (интеграционное тестирование);
- системная интеграция I_S ;
- квалификационное тестирование программного обеспечения и системы в целом T_{KS} (системное тестирование);
- инсталляция (установка) программного обеспечения I_{NSTPO} ;
- обеспечение принятия программного обеспечения A_{SPO} (приёмочное (приёмо-сдаточное) тестирование).

Каждому виду тестирования отвечают определённые уровни тестирования – component testing or unit testing, integration testing, system testing and acceptance testing⁴². Собственно, уровень тестирования определяет тем, над чем делаются тесты: над отдельным модулем, группой модулей или программным обеспечением, системой в целом.

На сегодняшний день наиболее распространёнными моделями разработки программного обеспечения являются: каскадная модель, поэтапная модель с промежуточным контролем (V-образная), спиральная модель⁴³.

Каскадная модель разработки программного обеспечения основана на постепенном увеличении меры детализации описания всей разрабатываемой системы. Каждый шаг детализации определяет переход к следующему состоянию разработки:

⁴⁰ Благодатских В.А. и др. Стандартизация разработки программных средств Учеб. пособие / В.А. Благодатских, В.А. Волнин, К.Ф. Посакалов; Под ред. О.С. Разумова. – М.: Финансы и статистика, 2005. – 288 с.

⁴¹ Buede D.M. The Engineering Design of Systems Models and Methods. John Wiley & Sons, 2009. – 516 p.

⁴² Котляров В.П. Основы тестирования программного обеспечения. Учебное пособие. / В.П. Котляров, Т.В. Коликова. – М.: Интернет-Университет Информационных технологий, 2006. – 246 с.

⁴³ Вендров А.М. Проектирование программного обеспечения экономических информационных систем / А.М. Вендров. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 352 с.

$$\{A_T \rightarrow P_A \rightarrow C_{PO} \rightarrow [T_{PO} \rightarrow T_{KPO} \rightarrow T_{KS} \rightarrow A_{S_{PO}}]\}.$$

В каскадной модели переход к следующей фазе происходит только после полного завершения всех предыдущих работ. Недостатки каскадной модели разработки программного обеспечения наиболее ярко проявляются в больших системах. Для таких систем работа на каждом этапе занимает значительное время, а внесение изменений в первичные документы или невозможно, или вызывает лавиноподобные изменения на всех других этапах. Если реализация тестовых наборов не отвечает требованиям, тогда причинами дефектов могут быть: неправильные тестовые наборы; дефекты кодирования; неверная архитектура системы или программного обеспечения; некорректности требований и т.п. Дефект устраняется принятием решения о том, на какую фазу каскадной модели нужно вернуться.

Классическая каскадная модель имеет модификацию – V-образную модель. Она содержит основные фазы разработки, аналогичные фазам каскадной модели (кроме тестирования), и фазы собственно тестирования и проверки, что является цепью обратной связи по отношению к основным фазам:

$$\left\{ A_T \rightarrow P_A \rightarrow C_{PO} \rightarrow \right. \\ \left. \rightarrow [\langle T_{PO} \rightarrow T_{KPO} \rangle_{C_{PO}} \rightarrow \langle T_{KS} \rangle_{P_A} \rightarrow \langle A_{S_{PO}} \rangle] \right\}.$$

В отличие от каскадной модели, где тестирование является завершающим этапом разработки программного обеспечения, в конце (часто и в процессе выполнения) каждой фазы модифицированной модели разработки осуществляется проверка или тестирование взаимной корректности требований разных уровней.

Данная модель позволяет более оперативно проверять корректность разработки программного обеспечения. Её недостатком является необходимость разработки на каждой фазе документов, которые описывают поведение всей системы в целом.

В спиральной модели разработка программного обеспечения происходит этапами, которые повторяются – витками спирали. Каждый виток – это один цикл согласно каскадной или V-образной модели. В конце каждого витка выходит прототип, который предъявляется пользователю и реализовывает некоторый набор функций. На каждом витку спирали функциональность программного обеспечения расширяется постепенно. Таким образом, спиральная модель объединяет преимущества предыдущих моделей, нивелирует их недостатки. В связи с этим, нами в качестве базовой моделью принята спиральная модель, а в

рамках выполнения одного цикла используется V-образная модель.

Известные четыре основных уровня тестирования программного обеспечения.

Компонентное (модульное) тестирование предназначено для проверки функциональности и отыскание дефектов в частях программного продукта, которые могут быть протестированы отдельно (модули программ, объекты, классы, функции). Наиболее эффективным подходом к компонентному тестированию является подготовка автоматизированных тестовых наборов к началу основного кодирования программного обеспечения.

Интеграционное тестирование предназначено для проверки связи между компонентами и взаимодействия с разными частями системы. Основными подходами к интеграционному тестированию являются методы тестирования снизу-вверх, сверху вниз и метод большого взрыва.

Основным заданием системного тестирования является проверка как функциональных, так и нефункциональных требований к программному обеспечению и системы в целом с выявлением отсутствия или неверной функциональности; непредвиденных сценариев использования; непредвиденных комбинаций данных предназначенного для пользователя уровня; неверного использования ресурсов системы и т.д. Выделяют два подхода к системному тестированию: на базе требований и на базе случаев использования, которые, в свою очередь, в объектно-ориентированном тестировании рассматриваются как собственное формальное представление тех самых требований. Нами эти два подхода рассматривались с единых позиций, а именно, как системное тестирование требований на основе случаев использования в рамках объектно-ориентированной технологии разработки программного обеспечения для классификации воздушных объектов.

Случаи использования – это концептуальные единицы объектно-ориентированной технологии, связанные блоками функциональности, определяемыми некоторым классификатором⁴⁴ ⁴⁵. Любой из случаев использования может быть подвергнут дальнейшей декомпозиции. Отдельный экземпляр случая использования принято называть сценарием. Сценарий используется для описания реализации случаев использования, взаимодействия между группами объектов, которые делают наблюдаемый результат, значащим для некоторого определённого актёра. Под актёром подразумевают любую

⁴⁴ Котляров В.П. Основы тестирования программного обеспечения. Учебное пособие. / В.П. Котляров, Т.В. Коликова. – М.: Интернет-Университет Информационных технологий, 2006. – 246 с.

⁴⁵ Вендров А.М. Проектирование программного обеспечения экономических информационных систем / А.М. Вендров. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 352 с.

внешнюю по отношению к моделируемой системе суть, которая взаимодействует с системой и использует её функциональные возможности для достижения определённой цели⁴⁶.

Приёмочное тестирование проверяет соответствие системы требованиям. Его целью является определение того, как удовлетворяет система приёмочным критериям, и вынесение постановления заказчиком о принятии программного продукта или непринятия. Приёмочное тестирование выполняется на основании тестовых наборов, разработанных на основании требований к этой системе и её программного обеспечения.

Наиболее затратными являются методы и средства системного тестирования. В этом случае рассматриваются следующие дефекты: отсутствующая или некорректная функциональность, неудобство использования, непредвиденные данные и их комбинации, непредвиденные или неподдерживаемые сценарии работы, ошибки совместимости, ошибки в документации пользователя, ошибки переносимости продукта на разные платформы, проблемы производительности, инсталляции и т. п.

Эффективность использования методов и средств модульного (компонентного) тестирования колеблется от 15 до 50% выявленных дефектов из общего числа дефектов, имеющих на данном уровне.

Эффективность использования методов и средств интеграционного тестирования колеблется от 25 до 35%. Для методов и средств системного тестирования эффективность может достигать 55%⁴⁷.

Таким образом, необходимо исследовать подходы к тестированию программного обеспечения для классификации воздушных объектов, которые обеспечивают повышение эффективности системного тестирования, с одной стороны, и минимизируют затраты на его выполнение, с другой.

Собственное тестирование программного обеспечения включает такие этапы^{48 49}:

- планирование работ, связанных с тестированием ТМ;
- проектирование тестовых наборов ТД;
- выполнение тестирования ТЕ;

⁴⁶ Буч Г. Язык UML. Руководство пользователя: Пер. с англ. / Г. Буч, Дж. Рамбо, А. Джекобсон. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 432 с.

⁴⁷ Благодатских В.А. и др. Стандартизация разработки программных средств Учеб. пособие / В.А. Благодатских, В.А. Волнин, К.Ф. Посакалов; Под ред. О.С. Разумова. – М.: Финансы и статистика, 2005. – 288 с.

⁴⁸ Майерс Г. Искусство тестирования программ / Г. Майерс, Т. Баджетт, К. Сандлер. – Диалектика-Вильямс, 2012. – 272 с.

⁴⁹ Блэк Р. Ключевые процессы тестирования. Планирование, подготовка, проведение, совершенствование / Р. Блэк. – М.: Лори, 2006. – 565 с.

– анализ полученных результатов ТА.

Этап проектирование тестовых наборов, на котором проецируются и создаются тестовые случаи, объединённые в тестовые наборы, являются наиболее ответственным:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_T \rightarrow P_A \rightarrow C_{PO} \rightarrow \\ TD_i \quad TD_i \quad TD_i \\ \rightarrow [\langle T_{PO} \rightarrow T_{KPO} \rangle_{C_{PO}} \rightarrow \langle T_{KS} \rangle_{P_A} \rightarrow \langle A^S_{PO} \rangle] \end{array} \right\}.$$

Тестовый случай – это артефакт, который описывает совокупность шагов, конкретных условий и параметров, необходимых для проверки реализации тестируемой функции (тестируемого требования) или её части⁵⁰.

При проектировании тестовых наборов, которые состояются из тестовых случаев, используют методы «чёрного ящика» и методы белого ящика». Методы «чёрного ящика» основанные на анализе документации (анализе требований) и не принимают во внимание внутреннюю структуру системы и программного обеспечения. Методы «белого ящика» основанные на анализе внутренней структуры системы и программного обеспечения и непосредственно направлены на тестирование кода программного продукта.

В настоящее время процесс тестирования программного обеспечения для классификации воздушных объектов довольно полно стандартизирован и основан, на использовании разных версий скриптового языка Testing and Test Control Notation (TTCN)⁵¹.

Основой для генерации тестовых скриптов является язык Specification and Description Language (SDL), предназначенный для формального представления описаний и спецификаций программного обеспечения при разработке событийно-ориентированных распределённых систем в виде конечных автоматов Мили, а в качестве описания данных для повторного использования язык Abstract Syntax Notation One (ASN.1), предназначенный для описания абстрактного синтаксиса данных в области классификации.

Анализ подходов к тестированию программного обеспечения для классификации воздушных объектов свидетельствует, что существующее семейство языков для представления тестовых скриптов направлено только на событийно-ориентированные распределённые системы, а для формального представления начальных требований к программному обеспечению для

⁵⁰ Блэк Р. Ключевые процессы тестирования. Планирование, подготовка, проведение, совершенствование / Р. Блэк. – М.: Лори, 2006. – 565 с.

⁵¹ TTCN-3 Test Code Developments - Request for Information, May 1, 2008, Open Mobile Alliance.

классификации воздушных объектов используется стандартный язык моделирования Unified Model Language (UML).

– Основными методами «чёрного ящика» при проектировании тестовых наборов и тестовых случаев являются⁵²:

- метод разбивки на классы эквивалентности;
- метод анализа предельных значений;
- метод всех пар;
- метод, основанный на использовании таблиц решений;
- метод, основанный на тестировании диаграмм состояний (конечных автоматов);
- метод, основанный на использовании сценариев пользователя, на основе опыта лиц, проводящих тестирование;
- метод, основанный на использовании сетей Петри.

Непосредственно тестовый случай составляется из некоторого набора предпосылок, стимулирующего действия и ожидаемого отклика, который содержит некоторую последовательность сценариев: нормальный случай, расширение и исключительные ситуации. Каждый сценарий предусматривает условия и действия, которые выполняются действующим субъектом, и требуют от системы отклика, который отвечает части действий тестового случая. Для построения тестового набора по совокупности сценариев случая использования, каждый сценарий конкретизируется путём установки точных значений для всех атрибутов и объектов.

Каждый сценарий является источником множества тестовых случаев, если выбрать разные значения для объектов, используемых в конкретном случае.

Тестовые наборы могут разрабатываться каскадно или независимо друг от друга. При каскадном подходе тестовые наборы основываются один на одном согласно взаимосвязанным сценариям случаев использования. Преимуществом каскадного подхода является то, что каждый следующий тестовый набор есть меньшим и более простым. Недостатком подхода является то, что при непрохождении тестового набора верхнего уровня вся цепочка становится неработающей и не используемой.

Независимые тестовые наборы не требуют успешного прохождения предыдущих, но их описание часто бывает очень громоздким. Это усложняет их разработку и дальнейшую поддержку.

⁵² Тамре Л. Введение в тестирование программного обеспечения: Пер. с англ. / Л. Тамре. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 386 с.

В ходе непосредственного тестирования могут использоваться комбинации методов проектирования тестовых наборов.

Так как классификация воздушных объектов зависит, прежде всего от принятия логических решений, поэтому эффективными для проектирования тестовых наборов и тестовых случаев могут быть таблицы решений. При этом структура таблицы решений является эквивалентной структуре тестового набора, имеет простоту и наглядность. К преимуществам таблицы решений, как средства формализованного описания тестовых наборов в процессе их проектирования, относится наличие образов автоматической проверки полноты и непротиворечивости такого описания и получение потока управления таблицей решений. Но нечёткость, размытость и качественный характер некоторых значений признаков не позволяют принять таблицы решений за базовый аппарат метода проектирования тестовых наборов на основе требований к программному обеспечению для классификации воздушных объектов.

В общем случае верификацию программного обеспечения нечёткой логической системы классификации воздушных объектов можно рассматривать как исследование динамических взаимодействующих процессов. Для них исследование вообще, так и непосредственно для верификации программного обеспечения нечёткой логической системы классификации воздушных объектов широкое применение нашли сети Петри.

Адекватность тестовых наборов и тестовых случаев можно измерить, воспользовавшись понятием тестового покрытия и понятием достоверности тестовых наборов⁵³.

Под тестовым покрытием принято понимать одну из метрических свидетельств оценки качества тестирования, которое представляет собой плотность покрытия тестовыми наборами требований или выполняемого кода. Чем выше необходимый уровень тестового покрытия, тем больше тестовых наборов будет выбрано для проверки. При этом сложность современного программного обеспечения для идентификации воздушных объектов делает невыполнимым задача проведения тестирования с 100% тестовым покрытием.

В настоящее время существуют следующие подходы к оценке и измерению тестового покрытия: покрытие требований, покрытие кода и тестовое покрытие на базе анализа потока управления. В наших исследованиях в качестве основного подхода использовалось покрытие требований, в качестве дополнительного – покрытие на базе анализа потока управления.

⁵³ Городнов В.П. Вища математика (популярно, із прикладами): Підручник для студ. екон. спец. вищ. навч. закл. / В. П. Городнов; Нар. укр. акад. [Каф. математики і мат. моделювання] – Х.: Вид-во НУА, 2005. – 384 с.

Покрытие требований – это оценка покрытия тестами функциональных и нефункциональных требований к программному обеспечению путём построения матриц трассирования:

$$T_{\text{cov}}^T = \frac{L_{\text{cov}}^T}{L_{\text{total}}^T},$$

где L_{cov}^T – количество требований, которые проверяются тестовыми случаями; L_{total}^T – общее количество требований, представленных случаями использования.

Тестовое покрытие на базе анализа потока управления – это оценка покрытия тестами путей выполнения кода программного модуля или графа потоков управления.

Расчёты полноты тестового покрытия на базе анализа потоков управления проводится согласно выражению:

$$T_{\text{cov}}^G = \frac{L_{\text{cov}}^G}{L_{\text{total}}^G},$$

где L_{cov}^G – количество элементов графа потоков управления, которые проверяются тестовыми случаями; L_{total}^G – общее количество элементов графа потоков управления, представленных случаями использования.

Достоверность разработанных тестовых наборов характеризует меру доверия к методу проектирования тестовых наборов. Согласно⁵⁴ значение показателя достоверности рассчитывается по формуле:

$$D = 1 - \sum_{j=1}^4 \beta_j \sum_{i \in q_j} \alpha_i,$$

где α_i – вес важности учёта разработанным методом в тестовых наборах i -го фактора в относительных единицах; q_j – множество факторов, которые учитываются в тестовых наборах j -м образом обобщения; β_j – относительное среднее значение погрешности, которое вносится в проектные решения вследствие неточного (обобщённого) учёта параметров (факторов).

Используя рассмотренные особенности тестирования программного обеспечения систем идентификации воздушных объектов можно сформулировать эту научную задачу следующим образом: разработать методы оценивания качества программного обеспечения для классификации воздушных объектов в автоматизированной системе управления воздушным движением в районе аэропорта. Для этого надо решить следующие частные задачи исследования:

⁵⁴ Городнов В.П. Вища математика (популярно, із прикладами): Підручник для студ. екон. спец. вищ. навч. закл. / В. П. Городнов; Нар. укр. акад. [Каф. математики і мат. моделювання] – Х.: Вид-во НУА, 2005. – 384 с.

1. Проанализировать направлений повышения эффективности процессов классификации воздушных объектов при решении задач порядка использования воздушного пространства в районе аэропорта.

2. Разработать методы формализации и оценки качества информации для классификации воздушных объектов в районе аэропорта.

3. Разработать метод верификации программного обеспечения нечёткой логической системы классификации воздушных объектов в районе аэропорта на основе нечётких раскрашенных сетей Петри.

4. Оценить эффективность применения метода верификации программного обеспечения нечёткой логической системы классификации воздушных объектов в районе аэропорта.

В ходе решения первой задачи требуется проанализировать особенности программного обеспечения для классификации воздушных объектов в районе современного аэропорта, процессов его разработки и непосредственного тестирования. При этом за базовую выбирается нечёткая раскрашенная сеть Петри.

По результатам решения второй задачи должен быть разработан метод формирования пространства признаков воздушных объектов в районе аэропорта и иерархическая многоуровневая система классификации, а также метод оценивания качества информации для классификации воздушных объектов в районе аэропорта.

Решение третьей задачи связано с разработкой базы нечётких продукционных правил нечёткой логической системы классификации воздушных объектов в районе аэропорта и метода верификации программного обеспечения нечёткой логической системы классификации воздушных объектов, которое обеспечивает преобразование базы нечётких продукционных правил в осуществимую модель.

Решение четвёртого уровня задачи позволит оценить экономический эффект от применения метода верификации программного обеспечения нечёткой логической системы классификации воздушных объектов в районе современного аэропорта.

1.4 Комплексный метод тестирования систем идентификации воздушных объектов

Поиск различных объектов представляет собой один из важнейших видов человеческой деятельности и встречается в самых разных областях науки и техники. Основной целью пространственного поиска, это обнаружение разнообразных объектов в обследуемом пространстве с определением их характера и местоположения. И особенно актуальна эта задача при решении проблемы защиты аэропортов от несанкционированного использования в их районе беспилотных летательных аппаратов. Что касается беспилотных летательных аппаратов, то особенностью их идентификации является то, что их режим полёта может меняться в широком диапазоне – от неподвижного висения в одной точке пространства до сверхзвукового полёта с перегрузками до 20 g. При этом основной задачей поиска объектов является выработка оптимального плана поиска, обеспечивающего обнаружение объекта при минимальных временных или ресурсных затратах⁵⁵. В настоящее время разработано большое число специализированного программного обеспечения обрабатывающего различную информацию от радиолокационных, оптических и акустических систем контроля воздушного пространства и являющегося составной частью единого информационного поля поддержания технологических процессов в аэропорту⁵⁶.

Использование таких систем, в первую очередь, направлено на выявление воздушных судов, незаконно находящихся в контролируемом воздушном пространстве. В качестве входной информации в первую очередь используется информация от радиолокационных систем, но в то же время может (и должна) использоваться акустическая и визуальная информация, а также информация, получаемая в результате контроля электромагнитной активности воздушного судна. Последнее особенно важно для выявления беспилотных летательных аппаратов.

Подавляющее большинство существующих в настоящее время программных систем комплексной обработки информации о воздушной обстановке, разработанных в развитых странах мира, созданы для применения в военном деле и носят закрытый характер, а целью цикла статей авторов является разработка методологии создания таких программных систем для гражданских

⁵⁵ Хеллман О. Введение в теорию оптимального поиска. – М.: Наука, 1985. 248 р.

⁵⁶ Tamargazin A.A., Linnik I.I. Керування процесом використання єдиного інформаційного поля забезпечення технологічних процесів в аеропорту / Наукоємні технології: Наук. журнал – Київ: НАУ, 2019. – № 4 (44). – С.494-499. DOI: 10.18372/2310-5461.44.14326

целей – более простых в использовании и более дешёвых. Одно из перспективных направлений применения таких систем - мониторинг воздушной обстановки в «умном» городе.

Одной из проблем разработки этого программного обеспечения является его тестирование.

В настоящее время процесс тестирования систем идентификации воздушных объектов довольно полно стандартизирован и основан, на использовании разных версий языка Testing and Test Control Notation.

Так как системы идентификации воздушных объектов представляют собой объектно-ориентированные распределённые базы знаний в виде конечных автоматов Мили, то в качестве описания данных чаще всего используется язык Abstract Syntax Notation One, предназначенный для описания абстрактного синтаксиса данных в области классификации разнообразных объектов.

Анализ подходов используемых при тестировании систем идентификации воздушных объектов свидетельствует, что существующее семейство языков для представления тестовых скриптов направлено только на объектно-ориентированные распределённые базы знаний, а для формального представления начальных требований к классификации воздушных объектов используется стандартный язык моделирования Unified Model Language.

Для лабораторного моделирования и накопления информации об объекте исследования использовался Fuzzy Logic Toolbox, одно из приложений Matlab/Simulink.

Основными методами при проектировании тестовых наборов и тестовых случаев являются⁵⁷:

- метод разбивки на классы эквивалентности;
- метод анализа предельных значений;
- метод всех пар;
- метод, основанный на использовании таблиц решений;
- метод, основанный на тестировании диаграмм состояний;
- метод, основанный на использовании сценариев пользователя на основе опыта тестирующего;
- метод, основанный на использовании сетей Петри.

Непосредственно тестовый случай составляется из некоторого набора предпосылок, стимулирующего действия и ожидаемого отклика, который

⁵⁷ Тамре Л. Введение в тестирование программного обеспечения: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 386 с.

содержит некоторую последовательность сценариев:

- нормальный случай;
- расширение;
- исключительные ситуации.

Каждый сценарий предусматривает условия и действия, которые выполняются действующим субъектом, и требует от системы отклика, который отвечает части действий тестового случая. Для построения тестового набора каждый сценарий конкретизируется путём установки точных значений для всех атрибутов и объектов, используемых в программе идентификации⁵⁸.

Каждый сценарий является источником множества тестовых случаев, если выбрать разные значения для объектов, используемых в конкретном случае.

Тестовые наборы могут разрабатываться каскадно или независимо друг от друга. При каскадном подходе тестовые наборы базируются один на одном согласно взаимосвязанным сценариям случаев использования. Преимуществом каскадного подхода является то, что каждый следующий тестовый набор есть меньшим и более простым. Недостатком подхода является то, что при не прохождении тестового набора верхнего уровня вся цепочка становится не работающей и не используемой. Независимые тестовые наборы не требуют успешного прохождения предыдущих, но их описание очень громоздко. Это усложняет их разработку и дальнейшую поддержку. В ходе непосредственного тестирования могут использоваться комбинации методов проектирования тестовых наборов.

Качество работы системы идентификации воздушных объектов зависит, прежде всего, от правил принятия логических решений. Поэтому эффективными для проектирования тестовых наборов и тестовых случаев могут быть таблицы решений. При этом структура таблицы решений есть эквивалентной структуре тестового набора, имеет простоту и наглядность. К преимуществам таблицы решений, как средства формализованного описания тестовых наборов в процессе их создания, относится наличие образов автоматической проверки полноты и непротиворечивости такого описания и получение потока управления таблицей решений. Но нечёткость, размытость и качественный характер некоторых значений признаков классификации воздушного объекта⁵⁹ не позволяют принять таблицы решений за базовый метод проектирования тестовых наборов для

⁵⁸ Макгрегор Д. Тестирование объектно-ориентированного программного обеспечения. Практическое пособие: Пер. с англ. /Д. Макгрегор, Д. Сайкс. – К.: ООО «ТИД ДС», 2002. 432 с.

⁵⁹ Linnik I.I., Tamargazin A.A., Linnik E.P. Efficiency of controlling the production system at airports using the single information space for ensuring technological processes. CEUR Workshop Proceedings, 2019, pp.88-99.

системы идентификации воздушных объектов.

В общем случае верификацию систем идентификации воздушных объектов можно рассматривать как систему с нечёткой логикой, что можно рассматривать как исследования динамически взаимодействующих процессов. Для них широкое применение нашли сети Петри.

Адекватность тестовых наборов и тестовых случаев можно измерить, воспользовавшись понятием тестового покрытия и понятием достоверности тестовых наборов⁶⁰.

Тестовое покрытие – это одно из метрических свидетельств оценки качества тестирования, которое представляет собой плотность покрытия тестовыми наборами требований или выполняемого кода. Чем выше необходимый уровень тестового покрытия, тем больше тестовых наборов будет выбрано для проверки. При этом сложность систем идентификации воздушных объектов делает невыполнимым задачу проведения тестирования с 100% тестовым покрытием.

В настоящее время используют следующие подходы к оценке и измерению тестового покрытия:

- покрытие требований;
- покрытие кода;
- тестовое покрытие на базе анализа потока управления.

В нашей работе в качестве основного подхода использован подход покрытия требований, а в качестве дополнительного – покрытия на базе анализа потока управления.

Покрытие требований – это оценка покрытия тестами функциональных и нефункциональных требований к программному продукту путём построения матриц трассирования:

$$M_c = \frac{N_c}{N_{\Sigma c}} 100\% ,$$

где M_c – полнота тестового покрытия требований;

N_c – количество требований, которые проверяются тестовыми случаями;

$N_{\Sigma c}$ – общее количество требований, представленных случаями использования.

Тестовое покрытие на базе анализа потока управления – это оценка покрытия тестами маршрутов выполнения кода программного модуля или графа потоков управления.

Расчёты полноты тестового покрытия на базе анализа потоков управления

⁶⁰ Котляров В.П. Основы тестирования программного обеспечения. Учебное пособие. / В.П. Котляров, Т.В. Коликова. – М.: Интернет-Университет Информационных технологий, 2006. 246 с.

проводится согласно выражению:

$$M_w = \frac{N_w}{N_{\Sigma w}} 100 \%$$

где M_w – полнота тестового покрытия на базе анализа потоков управления;
 N_w – количество элементов графа потоков управления, которые проверяются тестовыми случаями;

$N_{\Sigma w}$ – общее количество элементов графа потоков управления, представленных случаями использования.

Достоверность разработанных тестовых наборов характеризует меру доверия к методу проектирования тестовых наборов. Согласно⁶¹ значение показателя достоверности равняется:

$$D = 1 - \sum_{j=1}^4 \beta_j \sum_{i \in q_j} \alpha_i,$$

где α_i – вес важности учёта разработанного метода в тестовых наборах i -го фактора в относительных единицах;

q_j – множество факторов, которые учитываются в тестовых наборах j -м образом обобщения;

β_j – относительное среднее значение погрешности, которое вносится в расчётные решения вследствие неточного учёта факторов.

На сегодняшнее время известно большое количество работ, посвящённых вопросом тестирования систем разного назначения.

Так в работе⁶² разработаны алгоритмы для проведения динамического тестирования соответствия заранее определённой автоматной стохастической мультиагентной математической модели и модели, построенной в процессе работы системы.

В работе⁶³ исследуются модели, методы и алгоритмы тестирования объектно-ориентированных программ на граф-моделях переходов конечных автоматов с целью поиска ошибки в начальном коде программы.

Работа⁶⁴ посвящена разработке автоматизированной системы тестирования программных средств, основанной на стратифицированной и диагностической

⁶¹ Хеллман О. Введение в теорию оптимального поиска. – М.: Наука, 1985. 248 п.

⁶² Staroletov S., Dubko A. A Method to Verify Parallel and Distributed Software in C# by Doing Roslyn AST Transformation to a Promela Model. System Informatics, No. 15 (2019). P.13-43. DOI: 10.31144/si.2307-6410.2019.n15.p13-44.

⁶³ Малинин С.Н. Тестирование объектно-ориентированного программного обеспечения на основе моделирования конечными автоматами. Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет, 2010. 20 с.

⁶⁴ Волков Г.В. Модели и алгоритмы тестирования программных средств на основе их стратифицированного описания. Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет, 2010. 18 с.

моделях, что позволяет в реальном времени контролировать трудоспособность и надёжность разрабатываемого программного продукта. Но формализованное представление тестовых наборов и контроля их корректности в работе не рассматриваются.

В работе⁶⁵ исследуются критерии и временные показатели тестирования программных средств обработки данных, направленных на снижение риска отказов во время эксплуатации без рассмотрения задач проектирования тестовых наборов.

Кроме того, во многих работах рассматриваются вопросы повышения достоверности диагностирования программных продуктов за счёт идентификации скрытых ошибок путём повторного тестирования, а также стохастическое тестирование, тестирование разбивки, тестирование на основе сценариев, тестирование на основе состояний.

Из анализа этих работ можно сделать вывод, что модель программного обеспечения при использовании нечётких правил в базах знаний на основе нечёткой логики и сетей Петри, можно представить кортежем:

$$S(f) = \langle P, T, F, I, O, M \rangle,$$

где $P = \{p_j; \mu_{pj}\}$ – конечное множество нечётких позиций p_j , $\mu_{pj}(k)$, которым относятся в соответствие функции принадлежности $\mu_{pj}(k)$, k – некоторая переменная, что определяет значение функции $\mu_{pj}(k)$, $j = 1 \dots m$, $P \neq \emptyset$, $|P| = m$;

$T = \{t_i; \mu_{ti}\}$ – конечное множество нечётких переходов t_i , $\mu_{ti}(h)$, которым относятся в соответствие функции принадлежности $\mu_{ti}(h)$, h – некоторая переменная, которая определяет значение функции $\mu_{ti}(h)$, $i = 1 \dots n$, $T \neq \emptyset$, $|T| = n$;

$$F : (P \times T) \cup (T \times P) \rightarrow \{x_{ij}(v), y_{ij}(v)\}$$

нечёткая функция инцидентностей P и T , $x_{ij}(v)$, $y_{ij}(v)$ – функции принадлежности входной $I:(P \times T)$ и исходной $O:(T \times P)$ инцидентностей некоторых нечётких позиций $p_j \in P$ и нечётких переходов $t_i \in T$, v – некоторая переменная, которая определяет значение соответствующей функции;

$M:(P) \rightarrow N$ – функция, которая определяет маркирование позиций.

Такая структура отличается возможностью представления нечётких процессов и динамики их взаимодействия. Но в ней не учитывается множество параметров, показателей и характеристик, которые реально описывают физические процессы функционирования конкретной системы. Качество

⁶⁵ Коротун Т.М. Моделі і методи інженерії тестування програмних систем в умовах обмежених ресурсів. Автореферат дисертації на здобуття вченого ступеню кандидата фізико-математичних наук. – К: Інститут програмних систем НАН України, 2005. 21 с.

функционирования рассмотренной системы также ограничено возможностью формирования показателей нечёткости маркировки и компонент функции инцидентности.

Помимо этого, во многих работах рассматриваются подходы, основанные на использовании раскрашенных сетей Петри и раскрашенных нечётких сетей Петри. Они имеют широкий диапазон применения, но их внедрение в современные разработки без дальнейшего развития затруднено. Также в настоящее время отсутствуют методы непосредственной верификации программного обеспечения использующие нечёткую логику при идентификации воздушных объектов.

Для этого необходимо использовать новые классы расширенных нечётких раскрашенных сетей Петри, которые являются свободными от указанных выше недостатков и позволяют верифицировать системы с нечёткой логикой. Такие сети Петри характеризуются следующими свойствами:

- возможностью создания нечётких сетевых моделей, которые характеризуются естественной интерпретацией, простотой описания и моделирования взаимодействующих нечётких динамических процессов, представленных на множестве отношений «условие-действие» с учётом множества реальных параметров, характеристик, показателей и ограничений предметной области;

- адаптацией к классам задач и предметной области при решении комплекса поставленных задач верификации систем с нечёткой логикой системы классификации;

- решением комплекса поставленных задач как единой проблемы создания моделей, критериев, методов, интеллектуальных технологий и эффективных инструментальных средств с использованием современных информационных технологий.

Для усовершенствования процесса тестирования систем идентификации воздушных объектов должны быть решены задачи формализации процессов определения классов объектов в воздухе во время его контроля и верификации программного обеспечения нечёткой логической системы классификации воздушных объектов на основе требований к предметной области.

Таким образом, в науке и практике сложилась ситуация, которая характеризуется, с одной стороны, необходимостью проведения эффективного тестирования программного обеспечения для классификации воздушных объектов на системном уровне с учётом выдвинутых требований относительно корректности и адекватности используемых при этом тестовых наборов, с другой

стороны, в отсутствии соответствующих методов формализации процессов классификации воздушных объектов и метода верификации программного обеспечения нечёткой логической системы классификации.

Процесс идентификации воздушного объекта является многоэтапной процедурой:

- отбор и анализ информации о воздушной обстановке;
- определение степени достоверности информации от разнородных источников;
- превращение семантической информации признаков поведения воздушных объектов в бинарный набор функций принадлежности детальных признаков;
- построение базы знаний;
- расчёт качества информации;
- определение степени предпочтений;
- формирование аппарата логического вывода;
- автоматическое определение индекса принадлежности по совокупности признаков, которые позволяют принять однозначное решение;
- уточнение входных данных о воздушном объекте, по которым принятие решения затруднено, с помощью других источников или процедур распознавания;
- автоматизированное отождествление совокупности признаков с соответствующим индексом принадлежности;
- формирование возможной оценки индекса принадлежности с выдачей возможных вариантов решения;
- принятие конечного решения об индексе принадлежности воздушного объекта.

Принятие решения осуществляется с весовыми коэффициентами:

$$W_i = 1 - D_i(B_k, A_k),$$

где D_i – нормированное расстояние Кемени;

$B_k = \|b(i, j)\|$ – матрица текущих признаков воздушного объекта;

$A_k = \|a(i, j)\|$ – матрица эталонных признаков для i -го класса воздушного объекта.

Предложенный метод классификации включает:

- метод формализации признаков воздушного объекта для формирования базы знаний;
- метод отбора и анализа информации о воздушном объекте, проверки её

на соответствие основным критериям для принятия решений;

- метод оценивания качества информации о воздушном объекте;
- систему классификации воздушных объектов;
- метод логического вывода;
- метод оценивания качества классификации;
- уточнение входных данных о воздушном объекте, при которых принятия

решение осложнено;

– процедуры автоматизированного отождествления совокупности признаков с соответствующим индексом принадлежности, формирование возможной оценки индекса принадлежности с выдачей возможных вариантов решения.

Для усовершенствования процедур классификации воздушных объектов необходимо накапливать данные в ходе контроля порядка использования воздушного пространства и иметь соответствующий инструментарий оценивания качества классификации.

В качестве критерия эффективности идентификации можно использовать показатель качества работы систем управление. Так, эффективности алгоритмов распознавания можно оценить по формуле:

$$E = \frac{N^p - N}{N},$$

где N^p , N – количество целей, которые выявлены с системой распознавания и без неё.

Такой критерий неудобен в системах принятия решений или распознавания. Динамические ситуации в воздушном пространстве желательно анализировать с использованием многоэтапных процедур принятия решений на основе статистических закономерностей. Чаше всего такие процедуры используют байесовские алгоритмы, построенные на использовании функций правдоподобия. Расчёты условных вероятностей искажения воздушной ситуации позволяет определить усреднённую вероятность ошибочных решений. Недостатком такого метода распознавания воздушной обстановки является сложность формализации многомерной плотности распределения случайных значений компонентов многомерного вектора, который описывает признаки кризисной ситуации.

При оценивании качества распознавания воздушной обстановки используются следующие вероятностные показатели:

- вероятность распознавания

$$P = \sum_{k=1}^M (1 - P_y),$$

где P_y – условная вероятность правильного распознавания;

– средний риск ошибок распознавания

$$r = \sum_{i,k=1}^M r_{ij} P\left(\frac{A'_i}{A_k}\right),$$

где $\|r_{ik}\|$ – матрица стоимостей, $r_{ik} = r_{kk} = 0$.

Средний риск является обобщённым показателем качества распознавания при принятии решений. Но проблема заключается в определении коэффициентов стоимостей;

– количество информации, полученной при распознавании:

$$I = I_1 - I_0,$$

$$I_1 = - \sum_{i,k=1}^M P(A'_i A_k) \log P(A'_i A_k),$$

$$I_0 = - \sum_{k=0}^M P(A_k) \log P(A_k),$$

где $P(A_k) = P_k$ – априорная вероятность принадлежностей объекта к k -му классу;

$P(A'_i A_k) = P\left(\frac{A'_i}{A_k}\right) P(A_k)$ – вероятность принятия решения о принадлежности объекта классу i при принадлежности объекта классу k ;

$P\left(\frac{A'_i}{A_k}\right)$ – условная вероятность принятия соответствующего решения.

Количество получаемой информации используется для сравнения признаков, методов, алгоритмов безотносительно к задаче, которая решается. Но большое количество информации о воздушном объекте не всегда позволяет принять окончательное решение;

– матрица условных вероятностей распознавания при разных условиях наблюдения. Так например при радиолокационном распознавании воздушных объектов качество классификации характеризуется квадратной матрицей $M \times M$ условных вероятностей принятия правильных $i = k$ и ошибочных $i \neq k$ решений:

$$\left\| P\left(\frac{A'_i}{A_k}\right) \right\|, i, k = 1 \dots M;$$

– матрица стоимостей потерь от принятия неправильных решений;

– достоверность классификации воздушного объекта $F_{во}$ за каждым признаком $P_{во k}$:

$$F_{во} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N P_{во k} \cdot$$

Данный показатель усредняет достоверность выявления воздушного

объекта по каждому признаку, который позволяет компенсировать случайные выбросы $P_{во k}$.

Указанные критерии целиком обоснованы и оправданы при использовании статистических методов распознавания воздушных объектов. Но они освещают только вероятностные стороны процесса классификации.

Поэтому применим методы квалиметрии для разработки метода оценивания качества идентификации воздушных объектов. Квалиметрическая идентификация объекта содержит:

- а) анализ ситуации, когда необходимо определить:
 - характеристики качества классификации;
 - показатели качества;
 - метод оценки;
- б) построение дерева свойств (структурной схемы показателей качества);
- в) алгоритмы расчёты оценки.

Для оценивания качества классификации воздушных объектов применим комплексный критерий эффективности и средние величины частных показателей. Известно, что при оценке поведения сложной системы действует правило супераддитивного нелинейного суммирования. Согласно ему, функция эффективности не равняется сумме функций эффективности составляющих её частей:

$$F(x, y) \neq F(x) + F(y).$$

Средние оценки используются при учёте лишь одного типа связи между свойствами объектов и не отображают реальные связи между свойствами. Поэтому при разработке метода комплексной оценки необходимо учитывать причинно-следственные связи между элементами системы.

Представим функционал интегрального показателя качества как нормированную безразмерную величину:

$$E = \log_2 \left[1 + (-1)^m \prod_{i=1}^m (1 - 2^{-K_i^{r_i}}) \right]$$

или

$$E = \log_2 \left[1 + \prod_{i=1}^m (2^{-K_i^{r_i}} - 1) \right]$$

где K_i – значение показателя;

r_i – степень важности i -го показателя $\left(\sum_{i=1}^m r_i = 1 \right)$

Большее значение показателя эффективности E отвечает лучшему процессу классификации. Максимальное значение E может достигать единице. Такой

критерий инвариантный к внешним параметрам, имеет ясный смысл и может характеризовать результат эффективности идентификации воздушных объектов.

Весовые коэффициенты в этом выражении можно определить методом экспертных оценок. Значение коэффициентов могут меняться для разных индексов принадлежности воздушных объектов и сложности воздушной обстановки.

Требования к частичным показателям и порядок их расчётов определены в работе⁶⁶.

Для рассматриваемой нами задачи необходимо использовать такие частичные показатели K_i качества классификации всех выявленных и сопровождаемых воздушных объектов:

- достоверность классификации – $P_{кл}$;
- коэффициент оперативности принятия решения по каждому воздушному объекту – $T_{кл}$;
- полнота классификации воздушных объектов за допустимое время её проведения – $H_{кл}$.

Достоверность классификации воздушных объектов оценим за подходом, предложенным для оценки качества нечёткого логического вывода объекта с дискретным выходом⁶⁷.

Пусть Q – общее число ситуаций для описания нечёткой модели:

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_m,$$

где Q_j – число ситуаций, которые требуют решения d_j :

$$Q_j = Q_{j1} + Q_{j2} + \dots + Q_{jm}, \quad j = 1 \dots m,$$

где Q_{ij} – число ситуаций, в которых было нужное решение d_j , но принято решения d_i .

Необходимо распределить ситуации Q согласно дереву, которое может быть построено на основании алгоритма логического вывода.

Достоверность классификации оценивается как:

$$P_j = \frac{Q_{jj}}{Q_j}, \quad P_{ij} = \frac{Q_{ji}}{Q_j}, \quad P = \frac{1}{Q} \sum_{j=1}^m Q_{jj},$$

где P_j – достоверность правильного принятия решения d_j ;

P_{ij} – достоверность принятия решения d_i при условии объективной необходимости выбора решения d_j ;

⁶⁶ Чумаков Н.М. Оценка эффективности сложных технических устройств / Н.М. Чумаков, Е.И. Серебряный. – М.: Сов.радио, 1980. 192 с.

⁶⁷ Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечёткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети / А.П. Ротштейн. – Винница: УНИВЕРСУМ, 1999. 320 с.

P – усреднённая достоверность принятия правильного решения.

Оперативность K_t принятия решения по каждому воздушному объекту оценивается как:

$$K_t = \frac{1}{1 + \left(\frac{T_p}{T_d}\right)^2},$$

где T_d – допустимое время классификации воздушного объекта;

T_p – реальное время классификации воздушного объекта.

Нелинейная форма выражения для этого показателя делает его чувствительным к параметру T_p . Когда $T_p = T_d$, $K_t = 0,5$ и быстро уменьшается при дальнейшем повышении времени классификации.

Полнота классификации воздушных объектов $H_{\text{кл}}$ оценивается по формуле:

$$H_{\text{кл}} = \frac{M_{\text{кл}}}{M},$$

где M – общее количество выявленных объектов в воздухе;

$M_{\text{кл}}$ – количество классифицированных объектов.

Неопределённые воздушные объекты к классифицированным объектам не относятся.

Качество классификации каждого отдельного воздушного объекта оценивается глубиной классификации. Этот показатель учитывает важность цели:

$$H_{\text{гл кл}} = \sum_{i=1}^m r_{\text{кл } i} a_{\text{кл } i},$$

где $r_{\text{кл } i}$ – вес i -го класса в общем наборе за всеми уровнями;

$a_{\text{кл } i}$ ($1 - i$ -ий класс определён, 0 – не определён).

Максимальная глубина $H_{\text{гл}} = 1$. Значения m разное для разных воздушных объектов, как и распределение веса между всеми $r_{\text{кл } i}$.

Глубина классификации наглядно показывает априорное качество классификации воздушных объектов. Она достигается использованием разных источников информации о воздушном объекте и зависит от качества информационного обеспечения контроля воздушного пространства.

Метод оценивания качества классификации содержит следующие обобщённые этапы:

1) Построение дерева принятия решений для каждого индекса принадлежностей воздушного объекта.

2) Расчёты возможного количества ошибочных решений при определении каждого класса на всех уровнях классификации.

3) Оценка нормативов времени на классификацию.

4) Расчёты частных показателей качества классификации.

5) Определение весовых коэффициентов каждого показателя.

6) Расчёты интегрального показателя качества классификации при определении каждого класса и за всеми классами воздушных объектов.

Оценки качества классификации могут быть получены во время тестирования системы автоматизированной классификации воздушных объектов.

Ниже покажем, как можно провести оценку эффективности классификации воздушных объектов в условиях неполноты информации и неопределённости, путём сопоставления оценок, полученных экспертами – специалистами в области управления воздушными объектами, и результатов, полученных с помощью разработанного метода классификации.

В эксперименте было задано $N = 18$ воздушных объектов с полным набором признаков, которые априорно относились к разным классам. Датчик случайных чисел случайным путём из $K = 15$ из них изымал некоторые признаки. Оставленные признаки получались от разных источников информации. Набор этих признаков был выдан в виде анкеты $n = 9$ экспертам и массива данных для программы идентификации воздушных объектов.

Вероятность правильной классификации N целей экспертами составила около 0,59 и практически не менялась в ходе испытаний. Глубина классификации в начале испытаний равнялась в среднем 0,29, после тренировок экспертов глубина классификации возросла до 0,68, что обусловлено обращением внимания экспертов в основном на классификацию за высшими уровнями опасности целей. Глубина автоматической классификации при наличии набора соответствующих признаков составляла 1. В случае ограниченного набора имеющихся признаков глубина автоматической классификации равнялась коэффициенту полноты признаков (отношению количества имеющихся признаков к количеству нужных для каждого уровня классификации) – 0,81...0,92.

При изменении значений некоторых признаков, появлении новых и сохранении значений части признаков эксперты, как правило, не реагировали или реагировали с опозданием. Система принятия решения реагировала на любые изменения.

Продолжительность классификации экспертами составила от 90 до 260 с. Время классификации системой принятия решения составлял не больше 11 с.

Результаты экспертного оценивания классов целей по предлагаемой схеме показывают улучшение оперативности классификации в среднем на 82% и достоверности классификации – на 17% в случае её автоматизации. Высокий уровень глубины автоматической классификации, мгновенная реакция на смену признаков обусловлены исключением человеческого фактора.

Используя усовершенствованный иерархический метод классификации воздушных объектов, который отличается от известных формализацией признаков воздушных объектов на основе бинарных отношений и дивизимных процедур, особенностями структуры синглетонной базы знаний, был предложен усовершенствованный метод оценивания качества информации для классификации воздушных объектов, в котором в отличие от известных, в качестве критерия полноты принято минимальное расстояние имеющейся информации от эталонной.

Предложенный метод, построенный на аппарате нечёткой логики, позволяет оценивать достоверности информации о воздушном объекте, которая поступает от разнородных источников. В частности, было определено, что достоверность зависит от типа источника, образа выдачи и получение информации и времени её запаздывания.

Всё это должно позволить разработать формализованное представление баз правил для идентификации воздушных объектов на основе нечёткой продукционной модели и нечётких логических выводов Мамдани. Наиболее подходящей программной средой для решения этой задачи является Fuzzy Logic Toolbox.

Основным инструментом для мониторинга движения беспилотных летательных аппаратов в процессе воздушной навигации и управления воздушным движением являются статистические измерительные информационные системы, позволяющие с заданным уровнем точности определять составляющие вектора положения, скорости и других параметров летательного аппарата. Рассмотрим их в следующих разделах исследования.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

2.1 Теоретические аспекты управления современными измерительными информационными системами

2.2 Перспективная локационная техника в мониторинге беспилотных летательных аппаратов

2.3 Современные методы оценки параметров траекторий беспилотных летательных аппаратов

2.1 Теоретические аспекты управления современными измерительными информационными системами

Быстро растущие практические потребности народного хозяйства, науки и обороны вызывают необходимость создания таких инженерных комплексов, которые на значительных расстояниях могут осуществлять оценку пространственного состояния окружающей среды, обнаружение различных материальных объектов, измерение пространственных координат и параметров движения обнаруженных объектов и определение некоторых физических свойств этих объектов. Полученные при этом данные используются в больших технических системах, охватывающих самые разнообразные области человеческой деятельности, например, в системах управления воздушным движением и др.

Такие сложные инженерные комплексы включают в себя множество датчиков и устройств передачи и переработки информации и носят название измерительных информационных систем. При проектировании подобных систем и при их практическом использовании приходится сталкиваться с большим количеством специальных системных проблем, сильно отличающихся от проблем, возникающих при конструировании и эксплуатации отдельных элементов этих систем.

Назрела необходимость специального методологического рассмотрения этих проблем и возможных путей их решения. Между тем, в настоящее время

почти отсутствует научная литература, в которой была бы комплексно изложена теория измерительных информационных систем, позволяющая применять современные достижения системного подхода при их создании.

Среди так называемых «больших систем», которые в настоящее время подвергаются всестороннему исследованию, измерительные информационные системы занимают особое место ввиду их широкого распространения, большого практического значения и многообещающих перспектив развития. К измерительным информационным системам могут быть отнесены системы радиосвязи, радиолокационные системы, радионавигационные системы, системы исследования свойств земной коры, лазерные информационные системы и т. д.

У различных измерительных информационных систем много общего, они часто обладают аналогичными системными свойствами. Методы исследования и конструирования различных по назначению измерительных информационных систем оказываются сходными и имеют обширные области совпадения. Поэтому, применяемые и разработанные далее аппарат и методология исследования, могут иметь широкое применение, особенно в части общих идей и принципов.

В настоящее время наибольшую практическую ценность представляют работы, связанные с рассмотрением конкретных систем, с установлением количественных зависимостей между их параметрами и способов их оптимального конструирования и использования. Нельзя, однако, недооценивать и изучение проблем более общего характера, возникающих в связи с расширением и углублением человеческой деятельности в самых различных областях.

Основная задача теории измерительных информационных систем, как и всякой теории, состоит в исследовании не только количественных соотношений, но и внутренних свойств этих систем принципиального качественного характера. Осуществляется разбиение измерительных информационных систем на функциональные подсистемы и элементы с последующим рассмотрением функциональных связей между ними, общих для всех видов таких систем. Указанное обстоятельство вносит в теорию таких систем перспективность, плодотворность и наглядность.

Математическая формализация позволяет применить единую систему характеристик для различных измерительных информационных систем и построить единую методику их анализа и синтеза. При этом в процессе выявления сущности внутренних процессов могут быть найдены новые, ранее скрытые, свойства систем. Многие научные направления прикладного характера уже прошли такой этап теоретических обобщений. Этот этап становится чрезвычайно

актуальным и для современной стадии развития измерительных информационных систем.

Рассмотрение ключевых проблем управления ИИС целесообразно начать с определения предмета исследования. По всем признакам ИИС могут быть отнесены к категории «больших систем».

На текущий момент не существует единого общепринятого определения понятия «большой системы». Однако имеется большое число разнообразных определений этого понятия, диапазон этих понятий чрезвычайно широк – от самых общих и абстрактных до самых детальных и конкретных. Например, М. Месарович⁶⁸ определяет систему как «отображение входных объектов и объектов состояний в выходные объекты». Один из основателей общей теории систем Л. Берталанфи⁶⁹ считает, что система есть «комплекс элементов, находящихся во взаимодействии». По мнению Черчмена⁷⁰ «система — это то, что конструируется и синтезируется; то, что синтезируется по частям; ее компоненты — тоже системы; она замкнута, если ее оценка не зависит от окружающей среды».

С другой стороны, отечественный ученый Л. А. Петрушенко приводит следующее развернутое определение системы: «Система — это совокупность элементов или отношений, закономерно связанных друг с другом в единое целое, которое обладает свойствами, отсутствующими у элементов или отношений, его образующих. Основные признаки системы — наличие структуры, уровня организации, подсистем, входа и выхода, а также закономерной связи между системой и образующими ее подсистемами». Эти определения нельзя назвать ограниченными. Однако четкости и определенности в них также нет. Возможно, такую ограниченность следует внести.

Приведенные выше определения стремятся охватить все виды систем — математические, технические, биологические и социальные. Авторы общих определений большой системы стремятся создать основу для математического формализма. Однако именно ввиду общности, этот формализм оказывается далеким от практического применения.

Кроме того, представляется полезным подчеркнуть в определении еще одно свойство больших систем, связанное с их устойчивостью по отношению к внешним влияниям. В самом деле, конкретные большие системы, независимо от своего физического содержания обладают способностью функционировать при значительном изменении свойств внешней среды. Огромный запас

⁶⁸ Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. –М.: Мир, 1973, -344 с.

⁶⁹ Bertalanffy L. Das biologische Weltbild, Bd. 1. Bern, 1949.

⁷⁰ Введение в исследование операций. Черчмен У. Акоф Р., Арноф Л. 1968 г.

жизнедеятельности в широком смысле слова — главное отличие большой системы от совокупности сколь угодно большого числа элементов с любыми «отношениями» между ними.

Жизнедеятельность достигается при помощи целенаправленной адаптации к изменяющимся условиям функционирования, которая обеспечивается внешними и внутренними связями.

Измерительные информационные системы относятся к техническим системам. Для технических систем большое значение имеет конструктивность, т. е. практическая осуществимость отношений между элементами, а также ориентированность в пространстве, обеспечивающая охват определенной части физического пространства в соответствии с целевым назначением. Наконец, важно отметить целенаправленность технической системы, конкретность ее функционального назначения, из которого вытекает характер и смысл взаимоотношений с другими техническими системами и с внешней средой⁷¹.

Учтя эти соображения, будем понимать под технической системой конструктивную совокупность взаимосвязанных объектов, ориентированных в пространстве, предназначенную для целенаправленных действий с помощью адаптации. Таким образом, отличительными признаками системы по сравнению с произвольной совокупностью объектов или по сравнению с отдельным элементом являются конструктивность, ориентированность и взаимосвязанность составных элементов и целенаправленная адаптация. Академик Згуровский М.З в своей работе⁷² дает определение сложной системы, которое, по нашему мнению, наиболее полно учитывает все особенности сложной технической системы.

Вероятно, самая характерная структурная особенность большой системы состоит во взаимосвязанности ее элементов, которая обеспечивает системе возможность принимать большое число состояний, и, следовательно, приспосабливаться к изменению внешних условий, но одновременно приводит к сложности изучения поведения системы.

Столь большая сложность систем приводит к соответствующим трудностям при их анализе и синтезе.

Для того чтобы образовать достаточно эффективную систему, требуется либо создать ее с помощью другой значительно более сложной системы, либо, используя свойство адаптации, достичь в процессе постепенного самоусовершенствования требуемого уровня развития.

⁷¹ Дружинин В.В., Конторов Д.С. Вопросы военной системотехники. М.: Воен. Издат., 1976. - 224 с.

⁷² Згуровский, Михаил Захарович. Системный анализ: проблемы, методология, приложения [Текст] : [монография] / М. З. Згуровский, Н. Д. Панкратова ; Нац. акад. наук Украины, Ин-т приклад. систем. анализа. - 2-е изд., перераб. и доп. - К. : Наукова думка, 2011. - 727 с.

Можно представить приблизительное соотношение по сложности между создаваемой и создающей системами, если требуется получить конструкцию, близкую к оптимальной. Создающая система должна не только содержать в себе создаваемую систему, но и экстраполировать ее поведение в различных условиях и на длительное время вперед. Только при выполнении этих условий можно гарантировать успешный результат. Это означает, что если потребовать практически приемлемых интервалов времени созидания, то создающая система должна быть сложнее создаваемой в такое число раз, которое трудно себе представить.

В работе⁷³ показано, что эволюционный путь не требует столь же больших затрат времени. Во-первых, здесь не производится перебор всех вариантов. Поэтому эволюционный путь, строго говоря, не обеспечивает точного оптимума.

Во-вторых, хотя исходная простая система экстраполирует свое поведение на один шаг, приобретаемая в результате этого шага информация позволяет системе целенаправленно наращивать свою структуру, а, следовательно, и свои возможности, а одновременно и сложность, обеспечивающую перспективу. То обстоятельство, что исходная система может быть очень простой, например, может состоять из небольшого числа элементов, не меняет дела, так как даже очень простая система после большого числа проб может обладать достаточными возможностями для успешной эволюции. Особенно эффективна эволюция, если имеется множество простых систем. Практическое использование эволюционного пути ограничивается искусственным отбором в растительном и животном мире, а также построением обучаемых и самообучающихся автоматов. При создании технических систем этот путь сильно ограничен.

Возникает необходимость в разработке методов, которые позволяли бы получать если не оптимальные, то, по крайней мере, достаточно хорошие результаты без чрезмерно большого объема вычислений и в течение практически приемлемого времени. Решением таких задач занимается системотехника. Поэтому в математическом плане системотехника может рассматриваться как «наука об упрощении»⁷⁴.

Системная идея упрощения описания и эволюционного развития состоит в следующем. Первоначальный замысел построения системы формируется исходя из ее целевого назначения, т. е. места и роли в той большой системе более высокого порядка, внутри которой и в интересах которой будет функционировать создаваемая система. Это дает возможность сформулировать наиболее общее

⁷³ Дружинин В.В., Конторов Д.С. Конфликтная радиолокация. М.: Воен. Издат., 1982. - 124 с.

⁷⁴ Там же

описание создаваемой системы при помощи функционала эффективности. Эффективность служит исходной позицией для дальнейшей детализации описания. Детализация состоит в разукрупнении, в разбиении системы на подсистемы и элементы и в составлении описания подсистем и элементов.

Критерий первого уровня описания должен быть составлен так, чтобы освободить создаваемую систему от зависимости от системы более высокого порядка. Это достигается путем включения в функционал эффективности факторов, выражающих эту зависимость. Далее производится оптимизация элементов, подсистем и системы в целом с учетом конструктивных, экономических, организационных и других ограничений. Таким образом, упрощение состоит в выборе нескольких уровней описания, а эволюция — в последовательной оптимизации.

Для того чтобы на этой идейной основе построить конструктивную методологию, применимую для решения практических задач, необходимо обосновать математическую зависимость между группами показателей различных уровней.

С позиций системотехники можно сформулировать основное содержание высказанного выше определения технической системы. Для того чтобы система обладала свойством целенаправленной деятельности, необходимо качественно и количественно обосновать понятие полезности, эффективности системы и разработать способы ее определения и прогнозирования при различных условиях функционирования системы. Требуется точно определять понятия, что такое «хорошая» система и что такое «лучшая» система, уметь ответить на вопрос, «выживет» ли система, т. е. справится ли она со своими задачами в тех или иных условиях, включая условия соревнования и борьбы за существование против природы или против разумного противника. Требование ориентированности и взаимосвязи элементов вызывает необходимость решать проблему обоснования структуры системы, обеспечивающей ее функционирование в условиях изменяющейся внешней среды. Наконец, необходимость обеспечить свойство конструктивности заставляет решать проблему реализуемости системы в техническом и экономическом смысле.

Последовательность конструирования системы должна обеспечить такое решение этих проблем, которое приводило бы к созданию если не оптимальной (наилучшей) в некотором смысле, то, во всяком случае, работоспособной (достаточно хорошей) системы с требуемым временем существования. Ориентируясь на опыт разработки подобных систем, можно принять следующую последовательность разработки:

1. Обоснование функции эффективности системы, описывающей ее основную цель, ее функционирование и ее взаимосвязь с внешней средой;
2. Составление структурной схемы системы, т.е., определение составляющих ее подсистем и элементов, распределение функций между ними, определение взаимосвязей между ними и с внешней средой и установление внутренних потоков информации;
3. Разработка алгоритмов функционирования системы и ее элементов, в том числе алгоритма управления системой;
4. Обоснование технических требований к элементам системы.

Процесс конструирования системы может содержать несколько циклов, каждый из которых должен завершаться разработкой очередного последовательного приближения к оптимальному решению. Такая цикличность процесса конструирования оптимальных систем имеет своей причиной не только недостаточное развитие методов конструирования, математического аппарата и методов вычислений, но и специфические внутренние свойства систем, в частности ту их сложность, о которой говорилось выше.

Это соображение приводит к такой цикличности рассмотрения каждой из проблем, когда система сначала разукрупняется, т. е. расчленяется на подсистемы, затем задача решается для каждой из подсистем в отдельности с последующим укрупнением системы, уточнением результатов и повторением циклов последовательного приближения к желательному оптимуму.

Такая поэтапная оптимизация не равносильна оптимизации системы в целом. Однако после достаточно большого числа циклов она может привести к получению близкого к оптимальному варианту построения системы и организации ее функционирования.

Всякую целенаправленную систему, взаимодействующую со средой, внешней относительно нее, можно условно разбить по функциональному признаку на следующие три составные части:

- исполнительную;
- информационную;
- управляющую.

Взаимосвязь этих частей и их взаимодействие могут быть описаны следующим образом. Исполнительная часть располагает некоторыми возможностями или ресурсами, которые расходуются в соответствии с целевым назначением системы. Информационная часть доставляет в систему всю информацию о состоянии внешней среды и о результатах взаимодействия с ней, а также выводит вовне управляющую информацию, являющуюся результатом

функционирования системы. Управляющая часть перерабатывает информацию, доставляемую ей информационной частью, и распределяет возможности и ресурсы исполнительной части в соответствии с полученной информацией. Все эти три части целенаправленной системы действуют в тесном взаимодействии между собой и с внешней средой, и с этой точки зрения исследование системы требует комплексного подхода ко всем трем составным частям.

С другой стороны, в функциональном, а, следовательно, и в конструктивном отношении каждая из этих частей обычно представляет собой самостоятельное устройство со своими входами и выходами и со своими внутренними связями. Если входы и выходы некоторой части системы зафиксировать, то эта часть может быть рассмотрена в определенной степени автономно от остальных частей системы. Подобные субоптимальные методы широко применяются в системотехнике.

Все сказанное выше о сложных системах относится и к измерительным информационным системам.

Понятие «измерительная информационная система» возникло в пятидесятых годах прошлого столетия в связи с началом применения вычислительной техники, которая позволила резко повысить точностные характеристики, существенно расширить сферу применения измерительных систем. С этого периода начинается широкое проникновение ИИС в самые различные области науки, народного хозяйства и военного дела. Развитие ИИС в свою очередь дало толчок к новому этапу усовершенствования измерительных устройств и систем, а также средств обработки и передачи данных.

Измерительная информационная система может быть разделена на такие основные подсистемы: подсистему измерительных устройств, подсистему обработки измерительных данных и подсистему передачи данных. Каждая из этих подсистем сама по себе является достаточно «большой» системой, выполняющей самостоятельный комплекс задач и в известных пределах функционально независимой от других подсистем.

Любая измерительная информационная система в свою очередь является подсистемой более крупной системы — системы управления, которую можно считать системой высшего порядка относительно ИИС. Результат действий системы управления в значительной степени зависит от функционирования обслуживающей ее измерительной информационной системы.

Система управления, как правило, в свою очередь входит в состав еще более крупной системы — системы третьего порядка относительно измерительной информационной системы. Типичным примером такой иерархии систем может

служить система управления воздушным движением, обладающая своей системой управления (главный пункт управления воздушным движением на территории страны, совокупность диспетчерских пунктов и пунктов управления полетом воздушных судов), которая в свою очередь получает информацию о воздушной обстановке от измерительной информационной системы.

Имеют место три варианта взаимодействия ИИС с потребителями информации:

- без управления со стороны потребителя информации;
- с управлением потребителями измерительной информационной системой;
- с воздействием на внешнюю среду.

Выбор того или иного из этих вариантов определяется назначением и структурой конкретной системы высшего порядка.

Измерительные информационные системы позволяют решать задачи, которые не в состоянии решать единичные системы или средства измерения.

Возможность адаптации измерительной информационной системы при изменениях обстановки позволяет достичь высокой помехоустойчивости системы в целом.

Эксплуатационная надежность и функциональная живучесть системы также могут быть обеспечены достаточно высокими.

Современная измерительная техника является одним из наиболее динамичных отделов человеческих знаний. Имея многообразные области применения во всех видах современного научного и технического эксперимента, играя важнейшую роль в обеспечении высокого технического уровня различных видов производства, обеспечивая возможность перехода к комплексному управлению сложными производственными и техническими системами, измерительная техника, ее научный и промышленный потенциал характеризуют научно-технический уровень общества и его прогресс.

Огромно число измеряемых величин и параметров, необычайно разнообразно их поведение, им свойственны высокая динамичность и изменения в широких диапазонах, причем изменения эти в ряде случаев экстремальны.

Необходимость получения больших информационных потоков привела к интенсивному развитию информационных измерительных систем (ИИС). В свою очередь появление информационных измерительных систем привнесло ряд принципиально новых черт в саму измерительную технику. В современной измерительной технике при полном сохранении присущих ей индивидуальных черт органично применяются самые современные достижения смежных наук —

теории связи, теории информации, технической кибернетики, электроники, теории автоматического регулирования, теории систем, специальных разделов математики и т. п. И если многие появившиеся сравнительно недавно работы в области измерительной техники были в основном посвящены обоснованию целесообразности и необходимости привлечения результатов смежных наук, то сегодня известен уже целый ряд работ, в том числе отечественных авторов, активно и плодотворно развивающих эти направления, и прежде всего информационные аспекты развития измерительной техники.

К таким работам в первую очередь должны быть отнесены монографии Новицкого П. В., Рабиновича В.И., Цапенко М.П., Островского Л. А., Темникова Ф. Е., Афолина В.А., Дмитриева В.И., Ольховского Ю.Б., Новоселова О.Н., Мановцева А. П., Кавалерова Г.И., Мандельштама С. М.

Этими работами вносится существенный вклад в разработку современных теоретических основ измерительной техники. Тем не менее вся известная литература по этим вопросам свидетельствует о том, что имеющиеся здесь проблемы пока еще весьма далеки от разрешения. Как и в других развивающихся областях науки, здесь наблюдаются различные подходы и точки зрения, в том числе и по принципиальным вопросам, окончательно не установлена пока и общепринятая терминология.

В «классической» измерительной технике, в том виде как она развивалась во второй половине прошлого столетия, преобладали статические измерения. Прогресс определялся прежде всего достижениями в повышении чувствительности и точности измерений. Однако с 80-х годов этого столетия все большее значение приобретает измерение меняющихся во времени величин. Это вызвано растущей потребностью автоматизации комплексных процессов в самых различных областях науки и техники. Наряду с этим возникает задача измерения одновременно большого количества величин с дальнейшей передачей их к единому, часто централизованному месту обработки. Эта централизованная обработка данных измерений производится все более автоматизировано за счет применения средств цифровой электронной вычислительной техники.

Другая тенденция, связанная с развитием ИИС в настоящее время, относится к автоматизации самого измерения. Значительная часть анализа результатов измерения, проводившегося ранее человеком, начинает производиться самим измерительным устройством.

Такого рода измерительные информационные системы играют большую роль в современных процессах автоматизации. Они встречаются в любой автоматизированной системе, причем достигаемая точность автоматизации

существенным образом зависит от погрешностей измерений. Поэтому в дальнейшем в работе будут рассмотрены наиболее важные критерии качества, применяющиеся для оценки производительности подобных систем, а также методы, с помощью которых можно оптимизировать эти комплексные системы. Алгоритм для такой оптимизации чаще всего может быть реализован программно в имеющейся ЭВМ без каких-либо дополнительных аппаратных затрат.

ИИС предназначены для автоматического получения количественной информации непосредственно от изучаемого объекта путем процедур измерения и контроля, обработки этой информации и выдачи ее в виде совокупности именованных чисел, высказываний, графиков и т.д., отражающих состояние данного объекта. Измерительные информационные системы должны воспринимать изучаемые величины непосредственно от объекта, а на их выходе должна получаться количественная информация (и только информация) об исследуемом объекте; ИИС существенно отличаются от других информационных систем и систем автоматического управления. Так, системы вычислительные, связи и управления могут получать на входе информацию от других систем (в частности, от ИИС). Разумеется, информация, получаемая на выходе ИИС, используется для принятия каких-либо решений, однако использование информации обычно не входит в функции ИИС.

Будем считать, что в ИИС объединяются технические средства, начиная от датчиков и кончая устройствами выдачи информации, а также все программы, как необходимые для управления работой собственно системы, так и позволяющие решать в ИИС измерительные и вычислительные задачи, а также управлять конкретным экспериментом.

Таким образом, ИИС — обобщающее понятие. Под ним подразумевается класс средств ИИТ, объединяющий системы измерения, контроля, технической диагностики и распознавания.

Следует отметить, что понятие ИИС удовлетворяет содержанию более общего понятия «система». В теории систем под системами понимаются множества взаимосвязанных элементов, представляющих целостные образования. Системы при этом характеризуются структурами (совокупностью элементов и связей между ними, порядком элементов), функционированием (порядком процессов, совокупностью реакций системы на условия внешней и внутренней среды) и «историей» (необратимые изменения вследствие развития, старения, процессы обучения, адаптации, предварительно выполненные процедуры обработки информации и т. п.).

В соответствии со сказанным в дальнейшем рассматриваются в первую очередь структуры и алгоритмы функционирования ИИС и их элементов.

Основная концепция нового класса средств ИИТ — измерительных информационных систем — была сформулирована в начале 60-х годов прошлого века. В основу концепции ИИС уже в то время была положена системная организация совместной автоматической работы средств получения, обработки и передачи количественной информации. Тогда были созданы ИИС, которые можно отнести к первому поколению таких систем. Системы первого поколения характеризуются централизованным циклическим получением измерительной информации и обработкой ее в основном с помощью входящих в состав ИИС специализированных вычислительных устройств, использованием в качестве элементной базы дискретной полупроводниковой техники. Дальнейшая обработка информации при необходимости в большинстве случаев производилась вне ИИС, в универсальных ЭВМ, занятых обслуживанием и других источников информации. Однако сложные ИИС в то время имели в своем составе ЭВМ, выполняющие только задачи, стоящие перед этими системами.

Этот этап (конец 50-х — начало 60-х годов) может быть определен как период детерминизма, так как для анализа в ИИС использовался хорошо разработанный аппарат аналитической математики.

Измерительные информационные системы второго поколения (70-е годы) характеризуются адресным сбором измерительной информации, обработкой информации с помощью ЭВМ, входящих в состав систем, и в меньшей степени с помощью специализированных вычислительных устройств, использованием в качестве элементной базы микроэлектронных схем малой и средней степени интеграции. Этот период характерен решением ряда вопросов теории систем в рамках теории случайных процессов и математической статистики, поэтому его можно охарактеризовать как период стохастичности.

Широкое введение ЭВМ в состав ИИС стало возможным после организации промышленного выпуска управляющих вычислительных машин и комплексов, а также малых ЭВМ с достаточными вычислительными и логическими возможностями, гибким программным управлением, приемлемыми габаритами, потребляемой энергией и стоимостью.

Улучшение многих характеристик ИИС было достигнуто благодаря использованию больших интегральных микросхем, микропроцессоров, микропроцессорных наборов (включая устройства памяти с большим объемом запоминаемой информации) и микро-ЭВМ.

Измерительные информационные системы третьего поколения (80-е годы) характеризуются широким введением в ИИС больших интегральных схем (БИС), микропроцессоров и микропроцессорных наборов, микроЭВМ и промышленных функциональных блоков, совместимых между собой по информационным, метрологическим, энергетическим и конструктивным характеристикам, а также созданием распределенных ИИС. Этот период характерен тем, что появились адаптивные ИИС.

Измерительные информационные системы четвертого поколения (90-е годы) характеризуются появлением гибких перестраиваемых программируемых ИИС в связи с развитием системотехники и вычислительной техники. В элементной базе резко возрастает доля интегральных схем большой и сверхбольшой степени интеграции.

Измерительные информационные системы пятого поколения (2000-е годы) характеризуются тем, что это интеллектуальные и виртуальные ИИС, построенные на базе ПЭВМ, а также современного математического и программного обеспечения.

Качественно новые возможности при проектировании, изготовлении и эксплуатации ИИС были получены при применении стандартных цифровых интерфейсов и промышленных функциональных блоков, совместимых между собой по информационным, метрологическим, энергетическим и конструктивным характеристикам. Применение в ИИС ЭВМ и стандартных цифровых интерфейсов привело к необходимости формального описания алгоритмов действия систем и к резкому возрастанию роли программного обеспечения систем.

Измерительные информационные системы находят применение везде, где необходимо автоматическое получение опытным путем количественной информации о состоянии объектов исследования, причем это получение связано с выполнением массовых операций и осуществлением измерений в сложной форме, недоступной локальным измерительным приборам. Целесообразно охарактеризовать основные направления применения ИИС.

В измерительном оборудовании систем управления, жизнеобеспечения и научно-исследовательских работ космических кораблей, в наземных измерительно-управляющих комплексах все большую роль играют ИИС. Радиотелеметрические системы космических исследований являются важной разновидностью ИИС.

В области экспериментальной аэродинамики с помощью ИИС производится измерение аэродинамических сил, распределения давлений, температур, расходов газов и многих иных величин.

Современные системы управления воздушным движением (СКПР) имеют в качестве основных подсистем, обеспечивающих информацией для принятия решения, радиолокационные и радиотехнические системы, которые являются одной из разновидностей ВИС.

В составе систем обороны и нападения активно применяются различные виды ВИС для определения параметров движения своих средств и средств противника, осуществления наведения, а также управления системами.

Экспериментальная оценка прочности нуждается в измерении внешних сил, воздействующих на исследуемые объекты, и реакции на их действие (напряжения в материале, смещения и т. д.), характеристик самих объектов и т. п. В обширных областях тензометрии, динамометрии, термометрии и т. п. в качестве основных экспериментальных средств применяются ИИС.

Геофизические экспериментальные исследования оснащены многочисленными ИИС, в которых реализуются эффективные методы исследования строения земной коры. Особенно широко применяются различные типы ИИС при использовании геофизических методов разведки и оценки масштабов месторождений полезных ископаемых.

В океанографических исследованиях с помощью ИИС происходит измерение температур, химического состава, скоростей движения, давлений в водной среде и т.п.

Химические, физические, биологические экспериментальные исследования основаны на огромном количестве разнообразных методов и их реализаций с помощью ИИС. Это определение состава и характеристик объектов исследования и внешних воздействий, условий эксперимента и т.п.

Для применения в метеорологии, для охраны окружающей среды созданы многочисленные ИИС, позволяющие получать и обрабатывать измерительную информацию о состоянии воздушной и водной сред, о солнечной радиации и т.п.

Огромное поле для приложения ИИС представляют комплексные испытания машин, конструкций, приборов, оборудования. Испытания таких конструкций, как суда, летательные аппараты, двигатели (внутреннего сгорания, реактивные и др.), требуют создания сложных технических средств в целях получения необходимой, главным образом измерительной, информации. .

Медицина оснащается современными ИИС, позволяющими получать и оценивать ряд физиологических и психофизических параметров человека.

Современные тенденции свидетельствуют, что количество ИИС, применяемых в медицине, будет резко возрастать.

Как видно, в промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве довольно широко используются ИИС. В связи с применением микропроцессорных средств существенно расширяются возможности ИИС. Они становятся незаменимой составной частью роботов и др. Автоматизированный контроль и испытания продукции производятся в основном с помощью ИИС.

В ИИС широко осуществляется многофункциональная обработка измерительной информации благодаря рациональному сочетанию средств с жесткой структурой (аппаратная реализация) и гибкими перестраиваемыми структурами и программами работы. Созданы измерительные, контрольные и другие роботы. В быстродействующих ИИС, работающих в реальном времени, объединяются процедуры измерения и обработки информации. Существенно расширено применение устройств памяти. Широко используются выпускаемые промышленностью наборы функциональных устройств, объединяемых стандартными интерфейсами. Большое значение приобретают диалоговые режимы работы оператора с ИИС. В элементной базе резко увеличилась доля интегральных микросхем большой и сверхбольшой степени интеграции.

Следует отметить, что появление новых поколений ИИС базируется на существовании предыдущих, а все наиболее важное и рациональное и предыдущих поколений широко применяется в последующих поколениях.

С целью выявления общих закономерностей функционирования, конструирования и эксплуатации уже имеющихся видов изделий ИИС целесообразно рассмотреть различные подходы к классификации таких систем.

Это может оказаться полезным при создании новых видов однотипной продукции, указывая возможные направления решения поставленной задачи. Классификация может производиться по различным классификационным признакам, отражающим различные свойства классифицируемых изделий. Это приводит к появлению различных групп классов для изделий одного вида. Следует отметить, что всякая классификация условна и ее содержание может меняться по мере изменения свойств классифицируемых изделий, в частности в результате изменения, используемых при их изготовлении материалов, комплектующих и технологий. Все это в полной мере относится и к классификации ИИС.

Классификация ИИС производится в соответствии с различными классификационными признаками, отражающими область применения, функции

и конструкцию ИИС. Анализ известных источников позволил определить такие наиболее важные признаки:

- функциональное назначение;
- вид и характер входных величин;
- вид выходной информации;
- вид структурно-функциональной схемы ИИС;
- принцип построения.

Первый классификационный признак представляется наиболее важным. Он в первую очередь интересует потребителя (пользователя) ИИС. Этот признак не зависит от технических средств реализации ИИС. Не случайно, что этот вид классификации не менялся и не встречал возражений за более чем полувековую историю существования ИИС.

Целью функционирования всех сложных технических систем, к которым относятся ИИС, является либо исследование физических явлений, либо управление технологическим процессом. В последнем случае одной из функций всегда является определение значений физических величин, являющихся непременной частью любого технологического процесса. Таким образом, необходимой составляющей функционирования всех без исключения сложных технических систем является определение состава параметров физических процессов, которые эти системы должны обслуживать, их измерение, анализ полученных результатов и принятие на их основе определенных решений. Последняя функция в основном относится к управляющим системам. Однако в силу высокого уровня развития современных ИИС такие задачи могут решаться и ими.

С учетом обстоятельств, указанных выше, в зависимости от функционального назначения, то есть в зависимости от вида решаемых задач, ИИС могут подразделяются на следующие классы:

- измерительные системы;
- статистические измерительные системы;
- системы автоматического контроля;
- системы технической диагностики;
- системы распознавания образов;
- системы идентификации.

Часто многие исследователи, занимающиеся проблемами ИИС, выделяется еще один класс – выявления (обнаружения) событий. Однако этот класс столь неопределенен с точки зрения формулировки решаемой задачи (например,

выявление неопознанных летающих объектов или установление факта телепатической связи), что, не отрицая возможности постановки таких задач, трудно найти общие черты в методах их решения.

Таким образом, рассмотренная классификация является четкой по отношению к виду решаемых задач. Однако с терминологической и конструктивной точек зрения не всё четко и окончательно определено. Это выражается в следующих обстоятельствах.

Во-первых, выделение класса измерительных систем из измерительных информационных систем содержит некоторую тавтологию, особенно, если учесть, что в настоящее время в терминологических документах ИИС трактуется как подкласс измерительных систем.

Во-вторых, измерительные системы в подавляющем большинстве случаев составляют основу всех других систем, будучи дополнены соответствующими алгоритмами обработки измерительной информации. При этом важно подчеркнуть, что структура всех классов ИИС оказывается одинаковой. Терминологически было бы более правильным говорить об ИИС, предназначенных для решения только измерительных задач. Однако с точки зрения стилистики такой оборот был бы не совсем корректен.

Следует отметить, что другие классификационные признаки представляются менее существенными, прежде всего потому, что их содержательная сторона достаточно быстро изменяется с развитием и изменением используемых технических средств.

Вид входных величин определяется физическими свойствами исследуемого объекта. Если эти величины одинаковы по физической природе, то классификация по этому признаку информативна. Например, при измерении размеров детали используются ИИС для пространственных или геометрических измерений, при контроле напряжений в механических элементах машин используются механические ИИС, для контроля энергопотребления в электросети применяются ИИС для измерения электрических величин и т. д. Однако очень часто входные величины бывают различными по физической природе. С такими ситуациями сталкиваются при исследовании свойств материалов, при контроле окружающей среды и влияющих на нее факторов и др. Очевидно, что если величины разнородны, то такой признак классификации является малоинформативным.

Характер входных величин (без привязки к их физической природе) может быть отражен при помощи следующих признаков:

- количество величин;

- поведение во времени (неизменное или изменяющееся);
- расположение в пространстве (сосредоточенное или распределенное);
- представление величин (дискретное или непрерывное);
- энергетический признак (активность, пассивность);
- характер помех, суммирующихся с величиной (независимые помехи; помехи, зависимые от исследуемых величин).

Остальные признаки связаны в основном с конструкцией ИИС и практически не оказывают влияния на их функциональное назначение.

При классификации по видам выходной информации целесообразно рассматривать следующие классы ИИС:

- характер выходной информации: измерительная информация (именованные числа, их отношения, графики и т. п.), количественные суждения (выводы по результатам контроля, диагностики, идентификации);
- степень обработки выходной информации: результаты оценки одного показателя; показатели, характеризующие функциональные зависимости; статистические показатели и т. д.;
- потребитель информации: человек-оператор, ЭВМ, АСУ, система более высокого порядка.

В случае классификации по видам структурных схем могут быть выделены такие классы ИИС:

- последовательного действия (одноканальная система);
- параллельного действия (многоканальная система);
- параллельно-последовательного действия (с коммутатором на входе);
- мультиплицированная структура.

При классификации по принципам построения целесообразно применять следующие признаки:

- наличие специального канала связи;
- унификация состава системы;
- порядок выполнения операций: последовательный или параллельный;
- наличие или отсутствие структурной и информационной избыточности;
- наличие или отсутствие адаптации, характер адаптации;
- наличие или отсутствие информационной обратной связи;
- вид используемых сигналов: аналоговые или кодоимпульсные;
- наличие стандартного интерфейса.

Чаще всего в качестве отдельного класса рассматриваются телеметрические системы. По своим функциям они могут относиться к любому из перечисленных

выше классов. Специфика этих систем заключается в том, что они предназначены для телеизмерений — измерений на расстоянии и, следовательно, имеют более совершенные каналы связи, чем другие ИИС.

Рассмотренная система классификации может довольно широко использоваться. Однако ее значение в основном терминологическое, поскольку система проектируется исходя из решаемых задач и технико-экономических ограничений, а затем полученные результаты могут быть отнесены к конкретному классу.

Измерительные информационные системы существенно отличаются от других типов информационных систем и систем автоматического управления. Так, ИИС, входящая в структуры более сложных систем (вычислительных систем связи и управления), может быть источником информации для этих систем. Использование информации для управления не входит в функции ИИС, хотя информация, получаемая на выходе ИИС, может использоваться для принятия каких-либо решений, например, для управления конкретным экспериментом. Каждому конкретному виду ИИС присущи многочисленные особенности, определяемые узким назначением систем и их технологически конструктивным исполнением. Все более широкое развитие получают системы, предусматривающие автоматическую коррекцию своих характеристик — самонастраивающиеся (адаптивные) системы. Введение в такие системы свойств автоматического использования результатов самоконтроля — активного изучения состояния ИИС — и приспособляемости к изменению характеристик измеряемых сигналов или к изменению условий эксплуатации делает возможным обеспечение заданных параметров системы.

2.2 Перспективная локационная техника в мониторинге беспилотных летательных аппаратов

Развитие радиолокации в последние десятилетия шло под знаком резкого повышения требований к основным характеристикам радиолокационных станций (РЛС)⁷⁵. Это и увеличение дальности действия (при одновременном снижении радиолокационной «видимости» целей – любых наблюдаемых объектов), и значительное увеличение точности, пропускной способности (при обслуживании многих целей), эффективности защиты от разного рода помех и др. Возросли

⁷⁵ Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь 1993. – 416 с.

требования к так называемой «сигнальной» информации, используемой для распознавания целей. Возникла необходимость определять координаты и траектории источников излучения (в том числе источников помех), что привело к развитию пассивной радиолокации. Несмотря на значительный прогресс в технике основных элементов и устройств РЛС (антенн, передатчиков, приемников, устройств обработки информации), возросшие требования во многих случаях не удается удовлетворить в рамках традиционного построения РЛС. Необходимо совершенствовать принципы построения радиолокационных станций и систем.

Одно из перспективных направлений — переход от отдельных РЛС с одной передающей и одной приемной позициями (обычно совмещенными) к многопозиционным радиолокационным системам (МПРЛС), состоящим из разнесенных в пространстве передающих и приемных позиций (или однопозиционных РЛС), совместно ведущих радиолокационное наблюдение целей. Основная идея многопозиционной радиолокации состоит в том, чтобы более эффективно (чем в обычных однопозиционных РЛС) использовать информацию, заключенную в пространственных характеристиках электромагнитного поля. Как известно, при облучении цели поле рассеяния создается во всем пространстве (за исключением экранированных областей). Однопозиционная РЛС извлекает информацию только из одного малого участка поля, соответствующего апертуре приемной антенны. В МПРЛС информация извлекается из нескольких разнесенных в пространстве участков поля рассеяния цели (или поля излучения источников сигналов), что позволяет существенно повысить информативность, помехозащищенность и ряд других важных характеристик.

Развитие многопозиционной радиолокации соответствует общей тенденции в технике — объединению отдельных технических средств в системы, в которых благодаря совместному функционированию и взаимодействию элементов значительно улучшаются основные характеристики и появляются новые возможности.

В последнее десятилетие МПРЛС стали объектом интенсивных исследований во многих странах. Появилось большое число журнальных публикаций, докладов на различных конференциях и симпозиумах, в которых развивается теория МПРЛС, приводятся результаты проектных проработок и экспериментальных работ, сообщается о создании МПРЛС различного назначения. Анализируя перспективы радиолокации, многие авторы рассматривают многопозиционную радиолокацию как одно из основных

направлений развития на ближайшие годы. Это обосновывается не только повышением требований к радиолокационной информации, но и достижениями в технике, которые обеспечивают возможность технической реализации МПРЛС. Среди них наибольшее значение для МПРЛС имеют успехи в области многоканальных антенн с электронным сканированием, высокопроизводительных устройств цифровой обработки сигналов и универсальных вычислительных средств, линий передачи данных с большой пропускной способностью, высокоточных систем синхронизации и хранения времени.

Наиболее выдающимся ученым в этой области, пожалуй, можно назвать В.С. Черняка, который в своей монографии в систематическом виде изложил с единых позиций основы теории многопозиционной радиолокации. Основные алгоритмы и результаты их анализа доведены до такого вида, который позволяет непосредственно применять их в инженерной практике. В работе отмечена неразработанность вопросов оптимизации управления работой МПРЛС в условиях ограниченности ресурсов (энергетических, вычислительных и др.).

Рассмотрим основные преимущества МПРЛС, а также основные проблемы управления такими системами, вытекающие из названных преимуществ.

Чаще всего МПРЛС определяют, как радиолокационную систему, включающую несколько разнесенных в пространстве передающих, приемных или приемопередающих позиций, в которой получаемая ими информация о целях обрабатывается совместно.

Таким образом, МПРЛС отличают два основных признака: несколько разнесенных позиций, и совместная обработка информации об объектах наблюдения. Именно благодаря совместной обработке информации о каждой цели, получаемой в разнесенных точках пространства (а также при облучении целей из разнесенных точек), достигаются основные преимущества МПРЛС.

Рассматриваемые системы обычно классифицируют по следующим важнейшим признакам⁷⁶.

1. По характеру обслуживаемых целей МПРЛС можно разделить на активные, пассивные, активно-пассивные.

Неизлучающие цели обслуживаются активными МПРЛС, которые содержат хотя бы одну передающую позицию. Информация о целях извлекается из эхосигналов. Излучающие цели (например, источники активных помех) обслуживаются пассивными МПРЛС, которые состоят только из приемных

⁷⁶ Черняк В.С., Заславский Л.П., Осипов Л.В. Многопозиционные радиолокационные станции и системы // Зарубежная радиоэлектроника. – 1987. № 1. – С. 9 — 69.

позиций. Информация извлекается из принятого излучения. Наконец, активно-пассивные МПРЛС обслуживают как неизлучающие, так и излучающие цели. Информация извлекается как из эхосигналов, так и из принятого излучения. Если, например, источник активных помех (ИАП) маскирует собственный эхосигнал и эхосигналы от других целей, то МПРЛС в пассивном режиме определяет координаты и траекторию ИАП («принцип дополнительности» активного и пассивного режимов). В активно-пассивной МПРЛС должна быть хотя бы одна передающая позиция.

Важнейшими признаками, определяющими технические возможности МПРЛС, являются степень пространственной когерентности и уровень объединения информации. Эти два признака связаны между собой.

Под пространственной когерентностью МПРЛС понимают способность сохранять жесткую связь между высокочастотными фазами сигналов в разнесенных позициях, а значит, использовать информацию, содержащуюся в соотношениях этих фаз. Следует различать пространственную когерентность МПРЛС и пространственную когерентность сигналов на входах приемных позиций МПРЛС⁷⁷. Последняя зависит от размеров баз между позициями, длины волны и размеров объекта, а также флуктуации характеристик среды распространения радиоволн, в то время как пространственная когерентность МПРЛС характеризует, по существу, фазовую стабильность аппаратуры. Пространственную когерентность МПРЛС и сигналов на входах приемных позиций можно рассматривать как независимые характеристики.

2. По степени пространственной когерентности МПРЛС можно разделить на три класса.

В пространственно-когерентных МПРЛС фазовые сдвиги сигналов и помех в аппаратуре известны и сохраняются практически неизменными в течение времени, намного превышающего длительность используемых сигналов (обычно в течение нескольких часов или даже суток).

В пространственно-когерентной МПРЛС необходима взаимная привязка разнесенных позиций не только по времени, частоте (опорным частотам передатчиков и гетеродинов приемников), но и по высокочастотным фазам.

Пространственно-когерентную МПРЛС можно рассматривать как единую разреженную антенную решетку. Такие МПРЛС в принципе наиболее полно используют информацию, содержащуюся в пространственно-временной структуре электромагнитного поля, в том числе и в соотношении начальных фаз

⁷⁷ Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь 1993. – 416 с.

сигналов на входах разнесенных позиций. Однако для получения приемлемой характеристики пространственной избирательности (трехмерного аналога диаграммы направленности) требуется обычно много позиций. В связи с этим, а также из-за трудностей взаимной фазовой привязки разнесенных позиций пространственно-когерентные МПРЛС наиболее сложные и дорогостоящие. Очевидно, что создание таких МПРЛС не имеет смысла, если ожидаемые сигналы на входах разнесенных позиций пространственно-некогерентные. Поэтому для пространственно-когерентных активных МПРЛС характерны малые базы между позициями, при которых еще не нарушается пространственная когерентность эхосигналов. Чем меньше базы, тем проще техническая реализация МПРЛС, однако сокращение баз приводит к снижению информативности МПРЛС. Это уменьшает преимущества, доставляемые пространственной когерентностью.

Под кратковременной пространственной когерентностью понимается способность МПРЛС сохранять взаимную фазовую стабильность аппаратуры на интервалах времени, не меньших максимальной длительности обрабатываемых сигналов. Обычно это время не превышает долей секунд. При этом допускаются медленные неконтролируемые фазовые сдвиги. Можно считать, что к началу каждого интервала приема и обработки сигнала соотношение начальных фаз сигналов в разнесенных позициях случайно и не несет полезной информации.

При совместной обработке сигналов в МПРЛС с кратковременной пространственной когерентностью можно использовать всю информацию, заключенную в комплексных огибающих сигналов разных позиций, в том числе и в изменениях взаимных фаз на интервале длительности сигнала для измерения тангенциальной скорости целей разностно-доплеровским методом. Однако нельзя, например, измерять угловые координаты цели методом межпозиционной фазовой пеленгации, как в интерферометре.

Отказ от использования информации, которую может содержать соотношение начальных фаз сигналов на входах позиций, делает ненужной взаимную фазовую привязку позиций. Обычно требуются лишь временная и частотная привязки. Такая МПРЛС может состоять всего из нескольких позиций, так как характеристика пространственной избирательности формируется не соотношением фаз сигналов на входах позиций, а соотношением комплексных огибающих (в частности, взаимным запаздыванием сигналов), т. е. без неоднозначности, свойственной фазовым измерениям. Все это значительно упрощает техническую реализацию и снижает стоимость по сравнению с пространственно-когерентной МПРЛС. Правда, характеристики точности и пространственной избирательности МПРЛС определяются уже не несущей

частотой, а шириной спектра сигнала, но это во многих случаях компенсируется возможностью увеличения баз между позициями.

В пространственно-некогерентных МПРЛС не используются не только соотношения начальных фаз сигналов на входах разнесенных позиций, но и их изменения во времени. Взаимная фазовая информация полностью исключается, например, в результате детектирования сигналов до их объединения. Такие МПРЛС используют только информацию, заключенную в соотношении действительных огибающих сигналов разнесенных позиций. В связи с этим не требуется не только фазовая, но во многих случаях и частотная привязка позиций. Обычно необходима лишь временная привязка (синхронизация).

Пространственно-некогерентные МПРЛС проще, чем МПРЛС с кратковременной, а тем более с длительной пространственной когерентностью. Однако исключение фазовой информации приводит к определенным энергетическим, и особенно информационным, потерям. В частности, невозможна когерентная компенсация пространственно-коррелированных помех, действующих по главным лучам диаграмм направленности антенн разнесенных приемных позиций, прямое измерение разностно-доплеровского сдвига частоты сигналов в разнесенных позициях для определения тангенциальной скорости целей и ИАП и др.

Следует отметить, что пространственная некогерентность МПРЛС не исключает временную когерентность каждой позиции до совместной обработки. В пространственно-некогерентной МПРЛС, состоящей из нескольких приемопередающих позиций с временной когерентностью, можно, например, измерять доплеровское смещение частоты эхосигналов, а, следовательно, радиальную скорость цели относительно каждой позиции.

3. По уровню объединения информации МПРЛС можно разделить на четыре класса. В каждом классе для объединения информации могут применяться как аналоговые, так и цифровые линии передачи данных (ЛПД).

При объединении радиосигналов на совместную обработку передается вся совокупность сигналов, внешних помех и собственных шумов, поступающих на входы приемных позиций либо непосредственно, либо после предварительной линейной фильтрации в каждой позиции. Как правило, в таких МПРЛС требуются ЛПД, с большой пропускной способностью.

При объединении видеосигналов на совместную обработку также передается вся совокупность сигналов, внешних помех и собственных шумов, но только после детектирования в каждой позиции. Переход к объединению видеосигналов незначительно снижает требования к пропускной способности

ЛПД, но приводит к энергетическим и информационным потерям, связанным с отказом даже от кратковременной пространственной когерентности. Поэтому объединение видеосигналов применяется редко.

При объединении единичных замеров параметров сигналов (координат) резко снижаются требования к пропускной способности ЛПД. Вся первичная обработка, включая сравнение с порогом и измерение параметров обнаруженных сигналов, проводится в каждой позиции отдельно, а на совместную обработку поступает только информация, которая признана «полезной» в результате первичной обработки. При этом достигается частичная децентрализация обработки информации и управления в МПРЛС.

При объединении траекторий (трасс) в каждой позиции проводится не только первичная, но и вторичная обработка информации, которая завершается построением траекторий целей. Параметры траекторий сопровождаемых целей передаются для совместной обработки, в результате которой дополнительно отсеиваются «ложные» и уточняются «истинные» траектории. Требования к пропускной способности ЛПД здесь могут быть ниже, чем при объединении обнаруженных отметок и единичных замеров. При этом также реализуется частичная децентрализация обработки информации и управления.

В общем случае чем выше уровень объединения информации, т. е. чем меньше информация теряется в каждой позиции до совместной обработки, тем выше энергетические и информационные возможности МПРЛС, но тем сложнее система и выше требования, предъявляемые к пропускной способности ЛПД.

Как уже отмечалось, степень пространственной когерентности и уровень объединения информации МПРЛС связаны друг с другом. В пространственно-когерентных МПРЛС применяется, как правило, объединение радиосигналов на высокой или промежуточной частоте. В некоторых случаях возможно объединение единичных замеров при сохранении в этих замерах фазовой информации. Те же уровни объединения информации могут использоваться в МПРЛС с кратковременной пространственной когерентностью. В пространственно-некогерентных МПРЛС возможно объединение видеосигналов и единичных замеров, а также траекторий. Наиболее часто применяется объединение на уровне единичных замеров и на уровне траекторий.

Реальные МПРЛС могут быть «комбинированными» — с объединением информации на различных уровнях. Например, в отсутствие внешних помех в МПРЛС может применяться объединение единичных замеров, а при воздействии помех — объединение радиосигналов для взаимно корреляционной обработки и определения координат ИАП гиперболическим методом.

4. Еще один признак классификации МПРЛС можно назвать степенью автономности приема сигналов.

Если МПРЛС объединяет несколько РЛС, то каждая РЛС может быть рассчитана на прием и обработку эхосигналов от целей, облученных только той же РЛС. Это МПРЛС с автономным приемом сигналов. Каждая РЛС системы может быть, как однопозиционной, так и бистатической. Разные РЛС могут работать в различных частотных диапазонах.

Более высокими энергетическими и информационными характеристиками обладают МПРЛС с кооперативным приемом, в которых все приемные позиции рассчитаны на прием эхосигналов от целей, облученных любой передающей позицией. Частный случай таких МПРЛС — система с одной передающей (или приемопередающей) и несколькими приемными позициями.

В МПРЛС с автономно-кооперативным приемом сигналов часть приемных позиций рассчитана на прием и обработку эхо-сигналов от целей, облученных только «своими» передающими позициями, а остальные приемные позиции могут принимать и обрабатывать эхосигналы при облучении целей любыми передающими позициями.

Автономный прием сигналов применяется в пространственно-некогерентных МПРЛС с объединением информации на уровне единичных замеров или траекторий.

Степень пространственной когерентности МПРЛС с кооперативным приемом сигналов может быть любой при соответствующем уровне объединения информации.

5. По месту расположения и подвижности позиций в процессе работы целесообразно выделить пять классов; при этом МПРЛС с наземными приемными (ПРП), и передающими (ПРДП) позициями, размещенными на воздушных или космических носителях, объединены в один класс с МПРЛС, у которых ПРП — на воздушных или космических носителях, а ПРДП — на земле. Корабельные МПРЛС могут размещаться на одном или нескольких кораблях.

К наземным МПРЛС с неподвижными позициями относятся не только стационарные, но и перебазированные МПРЛС. Важно лишь, чтобы положение передающих и приемных позиций не изменялось в процессе работы. Иногда такие системы называют МПРЛС с неподвижными базами. Тогда все остальные перечисленные выше классы МПРЛС можно назвать системами с подвижными базами.

Очевидно, что размещение позиций МПРЛС на земле, воздушных или космических носителях, кораблях влияет не только на конструктивные, но и на

основные технические характеристики МПРЛС. Раньше других были предложены и исследованы наземные МПРЛС с неподвижными базами. Однако в последние годы большое внимание уделяется различным типам МПРЛС с подвижными базами. Это связано с достижениями техники точного местоопределения движущихся объектов (позиций МПРЛС), передачи данных и синхронизации.

Иногда используется понятие так называемой эффективной базы— проекции базы на плоскость, перпендикулярную к биссектрисе угла между направлениями от цели на соответствующие позиции.

Для практических целей иногда удобно грубо разделять МПРЛС на два класса: с «малыми» и «большими» базами. К МПРЛС с малыми базами можно отнести такие системы, у которых эффективные базы в основной части зоны действия МПРЛС значительно меньше дальности до целей (как неизлучающих, так и излучающих). Если же эффективные базы одного порядка или больше дальности до целей, то такие системы можно отнести к МПРЛС с большими базами. Техническая реализация малобазовых систем проще. Для них характерны более простые геометрические соотношения между измеряемыми параметрами сигналов и координатами целей. Проще и многие алгоритмы обработки информации. Однако МПРЛС с большими базами позволяют, например, получать более высокую точность измерения координат и параметров траекторий целей. Ясно, что четких границ между этими классами МПРЛС нет. Размер баз не включается в число основных признаков классификации.

Описанная классификация охватывает лишь некоторые основные отличительные признаки МПРЛС и, как всякая классификация, условна. Однако она позволяет систематизировать имеющиеся данные и рассматривать свойства и характеристики целых классов МПРЛС.

Благодаря совместной обработке информации, получаемой разнесенными позициями, МПРЛС обладает существенными преимуществами по сравнению как с однопозиционной РЛС, так и с совокупностью отдельных РЛС, не объединенных в многопозиционную систему. Здесь отметим кратко только наиболее важные из них.

1. Возможность создания зоны действия требуемой конфигурации с учетом ожидаемой радиолокационной обстановки. По сравнению с однопозиционной РЛС дополнительными параметрами, определяющими зону действия МПРЛС, являются геометрия системы позиций и алгоритм совместной обработки информации. Это позволяет, в частности, расширить зону действия в заданных

направлениях. В МПРЛС с подвижными позициями имеется возможность гибкой целенаправленной деформации зоны действия.

2. Энергетические преимущества. Очевидно, что добавление к однопозиционной РЛС любого числа передающих и (или) приемных позиций повышает общую энергетику системы. В МПРЛС появляются и дополнительные энергетические преимущества. Прежде всего существенный энергетический выигрыш дает кооперативный прием сигналов, при котором энергия излучения каждой передающей позиции используется всеми приемными позициями.

3. Высокоточное измерение пространственного положения цели.

В однопозиционной РЛС точность определения положения цели в картинной плоскости по измерениям угловых координат обычно значительно ниже точности измерения дальности, особенно для удаленных целей. В МПРЛС появляется возможность определения трех координат цели путем измерения дальности относительно нескольких разнесенных РЛС или суммарной дальности (передающая позиция — цель — приемная позиция) относительно нескольких разнесенных позиций.

В пространстве каждое тело ошибок обычно представляет собой сильно сплюснутый эллипсоид. Их пересечение образует тело ошибок при совместной обработке информации двух РЛС. Видно, что резко возрастает точность оценки местоположения цели, причем главным образом благодаря измерениям дальности. Можно считать, что измерения дальности в МПРЛС позволяют повысить точность оценки угловых координат цели по сравнению с однопозиционной РЛС.

Для ориентировочных расчетов угловой точности удобно пользоваться приближенным выражением среднеквадратической ошибки (СКО) определения угловой координаты цели (в бистатической плоскости, проходящей через цель и обе РЛС) по измерениям дальности в каждой паре РЛС:

$$\sigma_{\theta} \approx \sigma_R \sqrt{2} / L \sin \theta = \sigma_R \sqrt{2} / L_{\text{эф}},$$

где σ_R — СКО измерения дальности в каждой РЛС (предполагается, что ошибки независимы, а СКО одинаковы); L — база между РЛС; θ — угол, определяющий направление на цель; $L_{\text{эф}}$ — эффективная база. Если МПРЛС состоит не из двух РЛС, а из одной приемопередающей и одной приемной позиций или одной передающей и двух приемных позиций, то получим:

$$\sigma_{\theta} \approx \sigma_{R\Sigma} \sqrt{2} / L_{\text{эф}} = 2\sqrt{2}\sigma_R / L_{\text{эф}}$$

Здесь σ_{RS} — СКО измерения суммарной дальности «передающая позиция — цель — приемная позиция»; $\sigma_{RS} = c\sigma_\tau$, где c — скорость света; σ_τ — СКО измерения времени прихода сигнала ($\sigma_R = c\sigma_\tau/2$).

4. Возможность измерения вектора скорости и ускорения цели доплеровским методом. Измерение доплеровских смещений частоты сигналов в нескольких разнесенных позициях позволяет найти вектор скорости цели. В простейшей системе из двух РЛС, разнесенных на базе L , при автономном приеме сигналов измеряемые доплеровские сдвиги частоты (ДСЧ) равны $F_{Д1} = 2\mathbf{v}\mathbf{r}_1/\lambda$ и $F_{Д2} = 2\mathbf{v}\mathbf{r}_2/\lambda$, где \mathbf{v} — вектор скорости цели; $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ — орты в направлении от цели к РЛС1 и РЛС2. Если \mathbf{v} лежит в плоскости РЛС1, РЛС2 и цели (или если \mathbf{v} — проекция вектора скорости цели на эту плоскость), то легко получить простые формулы для СКО радиальной σ_{vR} и тангенциальной (в той же плоскости) $\sigma_{v\tau}$ составляющих \mathbf{v} . Эти формулы удобны для оценочных расчетов

$$\begin{aligned}\sigma_{vR} &= \left[\lambda/2\sqrt{2} \cos(\beta/2) \right] \sigma_F \approx (\lambda/2\sqrt{2}) \sigma_F; \\ \sigma_{v\tau} &= \left[\lambda/2\sqrt{2} \sin(\beta/2) \right] \sigma_F \approx (\lambda/\sqrt{2})(R/L_{\phi}) \sigma_F.\end{aligned}$$

Здесь σ_F — СКО измерения ДСЧ в каждой РЛС (считаем их одинаковыми); λ — длина волны; R — дальность цели. Приближенные равенства в правых частях соответствуют условию «малой базы»: $R/L \ll 1$, когда $\cos(\beta/2) \approx 1$, $\sin(\beta/2) \approx \beta/2 \approx L_{\phi}/2R$. Видно, что при одной и той же точности измерения частоты σ_F СКО тангенциальной скорости в $\operatorname{ctg}(\beta/2) \approx \beta/2 \approx L_{\phi}/2R$ раз больше, чем радиальной.

Если одну РЛС, например РЛС2, заменить приемной позицией, то $F_{Д2} = v(r_1 + r_2)/\lambda = 2v_R \cos(\beta/2)/\lambda$. При этом

$$\begin{aligned}\sigma_{vR} &= \left[\lambda/2 \cos(\beta/2) \right] \sigma_F \approx (\lambda/2) \sigma_F; \\ \sigma_{v\tau} &= \left[\lambda/\sqrt{2} \sin(\beta/2) \right] \sigma_F \approx (\lambda/\sqrt{2})(R/L_{\phi}) \sigma_F.\end{aligned}$$

Измеряя скорости изменения доплеровских смещений частоты или дифференцируя составляющие вектора скорости, можно получить вектор ускорения цели (рис.2.1). Использование доплеровских оценок скорости и ускорения повышает точность построения траекторий и качество сопровождения целей, особенно на участках где происходят резкие изменения скорости (маневр самолета или торможение баллистической цели при входе в атмосферу). При определенных условиях МПРЛС может сопровождать цели по результатам

измерения только доплеровских смещений частоты, а также производных дальности по времени более высоких порядков⁷⁸.

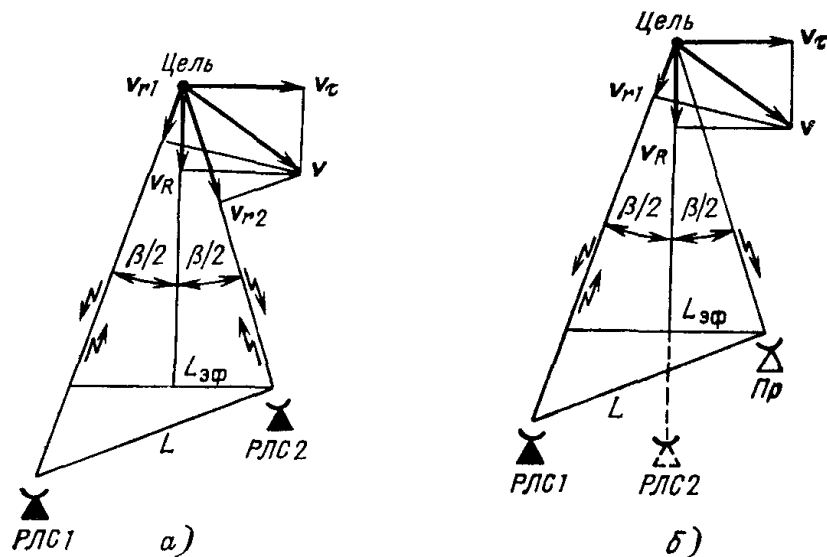


Рисунок 2.1 – Доплеровское измерение вектора скорости цели \mathbf{v} в плоскости базы L ⁷⁹: а - МПРЛС из двух РЛС с автономным приемом сигналов; б - МПРЛС из одной РЛС и одной приемной РР позиции (v_{r1} и v_{r2} - радиальные скорости относительно РЛС1 и РЛС2; v_r и v_τ — радиальная и тангенциальная скорости в МПРЛС)

5. Возможность измерения трех координат и вектора скорости источников излучения. В отличие от однопозиционной и бистатической РЛС, которые в пассивном режиме определяют только направления прихода сигналов, т. е. пеленги источников излучения, в МПРЛС можно получать три пространственные координаты, а также их производные.

6. Повышение разрешающей способности.

7. Увеличение пропускной способности.

8. Увеличение объема «сигнальной» информации.

9. Повышение защищенности от активных и пассивных помех.

10. Повышение живучести. Рассредоточенность в пространстве и избыточное число позиций значительно повышают живучесть МПРЛС по сравнению с однопозиционной РЛС и даже несколькими РЛС, не объединенными в МПРЛС. В отличие от однопозиционной и бистатической РЛС выход из строя одной или даже нескольких позиций МПРЛС не приводит к полному нарушению работоспособности, а вызывает лишь определенное ухудшение характеристик. Эту важную особенность (постепенное снижение характеристик при выходе из строя отдельных компонентов МПРЛС) в зарубежной литературе называют

⁷⁸ Конторов Д.С., Голубев-Новожилов Ю.С. Введение в радиолокационную системотехнику. – М.: Сов. радио, 1971, – 368 с.

⁷⁹ Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь 1993. – 416 с.

«изящной деградацией»⁸⁰. Выход из строя может происходить как в результате внешнего воздействия, так и из-за технических отказов аппаратуры, так что «изящная деградация» отражает повышение не только живучести, но и надежности МПРЛС. Этому способствует возможность изменения конфигурации МПРЛС при выходе из строя отдельных позиций.

Однако помимо достоинств МПРЛС имеют и определенные недостатки. Как правило, это — дополнительные трудности, которые приходится преодолевать при создании МПРЛС. Можно выделить следующие наиболее важные проблемы, которые должны быть непременно решены.

1. Необходимость совместного управления разнесенными позициями. В зависимости от типа МПРЛС совместное управление может либо ограничиваться распределением подлежащих обслуживанию целей между позициями, либо решать более сложные задачи согласованного сканирования пространства, выбора частот излучения и приема, типов зондирующих сигналов, использования тех или иных алгоритмов обработки информации⁸¹ и др. Для повышения живучести МПРЛС важное значение имеет децентрализация управления.

2. Необходимость передачи данных по линиям связи. Для передачи данных в центры обработки информации (ЦОИ) в составе МПРЛС должны быть межпозиционные линии связи. По ним передается также командная информация для управления МПРЛС.

Создание линий связи с требуемыми характеристиками не представляет принципиальных трудностей, но повышает сложность и стоимость МПРЛС.

3. Дополнительные требования по синхронизации, передаче опорных колебаний и сигналов, фазированию разнесенных позиций. Для организации совместной обработки информации и управления МПРЛС необходима синхронизация разнесенных позиций. Точные измерения координат целей эллиптическим или гиперболическим методами требуют точной синхронизации.

4. Повышение требований к устройствам обработки сигналов и производительности вычислительных средств. Этот недостаток является следствием одного из основных преимуществ МПРЛС — значительного увеличения объема информации по сравнению с однопозиционной РЛС. Нагрузка на вычислительные средства возрастает также из-за добавления операций, специфических для МПРЛС. Это — преобразование результатов измерений разными позициями в единую систему координат, отождествление данных,

⁸⁰ Barale G., Frascchetti G., Pardini S. The multiradar tracking in the ATC system of the Rome FIR // Proc. Intern. Radar Conf. "Radar'82". – London, 1982. – P. 296-299.

⁸¹ Гришин И.Ю., Можар М.К., Есин В.И. Оптимизация управления многопозиционным радиолокационным комплексом // Тезисы докладов 2-й Всесоюзной научно-технической конференции. – Туапсе, 1991. – С. 48-49.

получаемых разными позициями по каждой цели. Усложняются, алгоритмы сопровождения целей. Современное состояние техники обработки сигналов и вычислительной техники позволяет выполнять предъявляемые требования.

5. Необходимость геодезической или навигационной привязки и союстировки позиций. Для объединения координатной информации, получаемой разнесенными позициями, и построения результирующих траекторий объектов требуются знание местоположения и союстировка позиций. Ошибки определения местоположения позиций и ориентации осей местной системы координат каждой позиции непосредственно влияют на точность выходной информации МПРЛС. Поэтому разрабатываются специальные методы и алгоритмы для точной привязки и юстировки позиций.

Учитывая важность всех названных выше факторов для высокоэффективного функционирования МПРЛС, следует выделить первый, как оказывающий наибольшее влияние на эффективность функционирования рассматриваемых систем⁸². В МПРЛС существенным фактором, по сравнению с обычными РЛС, влияющим на точность измерения параметров целей, является структура (конфигурация) системы.

Рассмотрим далее те параметры обычных радиолокационных станций (чаще всего из них создается МПРЛС), которыми можно управлять для организации эффективной работы этих РЛС.

Для выявления управляемых параметров радиолокационных систем рассмотрим сначала управляемые параметры, которыми обладает отдельная РЛС. С этой целью запишем уравнение радиолокационного сигнала⁸³, выделив в нем те параметры, которые могут сравнительно быстро меняться в процессе работы РЛС и, следовательно, могут быть использованы для управления радиолокационной системой в целом:

$$\mathfrak{R}_{ij} = \sqrt{\frac{A_{0i}^2 G_i Q_j k_i (n_i) n_i N_{0i}}{(4\pi^2) R_{ji}^4 k T_0 F_{mi}}} b_{ji} \left(t - \frac{2R_{ji}}{c} \right) \text{rep}_{\tau_i} \left(\text{rect} \frac{t - \frac{2R_{ji}}{c}}{\tau_i} \right) \times$$

⁸² Barale G., Frascchetti G., Pardini S. The multiradar tracking in the ATC system of the Rome FIR // Proc. Intern. Radar Conf. "Radar'82". – London, 1982. – P. 296-299.

⁸³ Конторов Д.С., Голубев-Новожилов Ю.С. Введение в радиолокационную системотехнику. –М.: Сов. радио, 1971, -368 с.

$$\begin{aligned} & \times \cos \left\{ \omega_{0i} - \omega_{jid} \left(t - \frac{2R_{ji}}{c} \right) + \varphi_{0i} + \varphi_i \left(t - \frac{2R_{ji}}{c} \right) + \right. \\ & \left. + \left[\dot{\varphi}_i \left(t - \frac{2R_{ji}}{c} \right) \right] \left(t - \frac{2R_{ji}}{c} \right) \right\} \exp \left[j\beta_i \left(t - \frac{2R_{ji}}{c} \right) \right] \times \\ & \times \exp \left[j\varepsilon_i \left(t - \frac{2R_{ji}}{c} \right) \right] \operatorname{rad} \left(\frac{\beta_i - \beta_{ji}}{\Delta\beta_i} \right) \operatorname{rad} \left(\frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{ji}}{\Delta\varepsilon_i} \right). \end{aligned}$$

Здесь A_{0i} - амплитуда зондирующего сигнала i -го передатчика;

G_i - коэффициент усиления антенны i -й РЛС;

Q_j - эффективная поверхность рассеивания j -й цели, м²;

$k_i(n_i)$ - функция эффективности интегрирования импульсов;

n_i - число интегрируемых импульсов при одном зондировании цели;

R_{ji} - дальность от i -й РЛС до j -й цели;

$N_{0i} = N_i / \Delta f_{ni}$ - удельная плотность шумов, Вт/Гц;

N_i - мощность шумов на входе приемника i -ой РЛС, Вт;

Δf_{ni} - ширина полосы пропускания приемника i -ой РЛС, Гц;

k - постоянная Больсмана;

T_0 - температура среды, °К;

F_{ni} - коэффициент шума приемника i -ой РЛС;

$b_{ji}(t)$ - закон амплитудных флуктуаций сигнала, отраженного от j -ой цели и принятого i -ой РЛС;

$\operatorname{rect}(x)$ - прямоугольная функция, $\operatorname{rect}(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } |x| < 1/2, \\ 0, & \text{если } |x| \geq 1/2. \end{cases}$; $\operatorname{rep} v_i(t)$ - ряд

Фурье, $\operatorname{rep} v_i(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{ni} \exp(j2\pi nt)$;

a_{ni} - амплитуда n -й составляющей, $a_{ni} = \frac{1}{T_i} \int_{-\infty}^{\infty} v_i(t) \exp(-j2\pi nt) dt$;

c - скорость света; ω_{0i} - несущая частота излучаемого i -й РЛС сигнала;

ω_{jid} - доплеровский сдвиг частоты отраженного от цели сигнала;

φ_{0i} - начальная фаза высокочастотных колебаний, излучаемых i -й РЛС;

$\varphi_i(t)$ - закон фазовой модуляции колебаний, излучаемых i -й РЛС;

$\dot{\varphi}_i(t)$ - закон частотной модуляции колебаний, излучаемых i -й РЛС;

β_i, ε_i - направление центра диаграммы направленности i -й РЛС;

$\beta_{ji}, \varepsilon_{ji}$ - угловые координаты j -й цели;

$\Delta\beta_i, \Delta\varepsilon_i$ - ширина диаграммы направленности по азимуту и углу места i -й РЛС;

$$\text{rad}\left(\frac{\gamma_i - \gamma_{ji}}{\Delta\gamma_i}\right) = \begin{cases} f(\gamma_i - \gamma_{ji}), & \text{если } \left|\frac{\gamma_i - \gamma_{ji}}{\Delta\gamma_i}\right| < 1/2, \\ 0, & \text{если } \left|\frac{\gamma_i - \gamma_{ji}}{\Delta\gamma_i}\right| \geq 1/2, \end{cases} \quad \text{где } \gamma = \{\beta, \varepsilon\}, \quad f(\gamma_i - \gamma_{ji}) -$$

уравнение диаграммы направленного действия приемной антенны.

В результате анализа получим следующие управляемые параметры:

- длительность зондирующих импульсов τ_i ;
- период посылки импульсов T_i ;
- амплитуда зондирующих импульсов A_{0i} ;
- ширина диаграммы направленного действия антенны $\Delta\beta_i, \Delta\varepsilon_i$;
- число интегрируемых импульсов n_i ;
- закон частотной модуляции колебаний высокой частоты $\dot{\varphi}_i(t)$;
- закон фазовой модуляции колебаний высокой частоты $\varphi_i(t)$;
- закон изменения азимута оси излучения $\beta_i(t)$;
- закон изменения угла места оси излучения $\varepsilon_i(t)$.

Пусть имеется q таких k -х параметров $p_k, k=1,2,\dots,q$. Количественные значения параметров, как правило, изменяются не непрерывно, а дискретно. В общем случае каждый параметр p_k может принимать ρ_k дискретных π_k -х значений, $\pi_k=1,2,\dots,\rho_k$. Обозначим π_k -е дискретное значение параметра РЛС p_k символом $p_k^{\pi_k}$. Тогда u -м режимом РЛС S_u , будем называть некоторое частное сочетание конкретных π_k -х значений всех параметров p_k :

$$S_u = \{p_k^{\pi_k}\}_u, \quad u=1,2,\dots,U_0.$$

Общее число возможных режимов работы РЛС U_0 может быть очень большим и принимает максимальное значение в том случае, когда все p_k -е параметры могут изменяться независимо друг от друга. В этом случае

$$U_{0\max} = \prod_{k=1}^q \rho_k.$$

При объединении РЛС в МПРЛС к уже известным управляемым параметрам добавляются следующие новые⁸⁴:

- общее число v_j , i -х РЛС, привлекаемых для одновременного сопровождения j -и цели;
- различные сочетания i -х РЛС, привлекаемых для сопровождения j -й цели, $\{i_j\}$, $i_j = 1_j, 2_j, \dots, v_j$.

Следовательно, если j -я цель может одновременно сопровождаться v_j однотипными РЛС, каждая из которых может работать в одном из U_0 возможных режимов, то общее число состояний, которое может принимать радиолокационная система N_c , равно

$$N_c = \sum_{i=1}^{v_j} C_{v_j}^i U_0^i \leq \sum_{i=1}^{v_j} C_{v_j}^i \left(\prod_{k=1}^q \rho_k \right)^i,$$

где C_m^n — число сочетаний из m по n элементов.

На практике это число значительно больше, если вспомнить, что радиолокационная система обслуживает не одну, а большое число целей и что каждая РЛС имеет большой выбор величины интервала сопровождения каждой цели. В состав МПРЛС могут входить не только однотипные, но и разнотипные РЛС, что еще больше увеличивает общее число возможных состояний, принимаемых МПРЛС.

Таким образом, задача управления радиолокационной системой является, по существу, задачей выбора оптимального расписания работы элементов системы, в котором указаны:

- длительность интервала сопровождения каждой j -и цели каждой i -й РЛС, T_{nji} ;
- начало интервала сопровождения каждой j -и цели каждой i -й РЛС, $t_{ji}^{(H)}$;
- режим сопровождения каждой j -й цели каждой i -й РЛС, S_{ji} ;
- закон изменения положения луча каждой i -й РЛС по азимуту $\beta_i(t)$ и углу места $\varepsilon_i(t)$.

Любая МПРЛС создается и функционирует в интересах потребителя радиолокационной информации (системы более высокого порядка), например, системы управления движением, оборонной системы, навигационной системы и

⁸⁴ Конторов Д.С., Голубев-Новожилов Ю.С. Введение в радиолокационную системотехнику. –М.: Сов. радио, 1971, -368 с.

т.д. Поэтому важнейшим элементом любой МПРЛС является подсистема обработки радиолокационной информации, которая на выходе выдает информацию, необходимую потребителю.

2.3 Современные методы оценки параметров траекторий беспилотных летательных аппаратов

Существующие методы оценки параметров траектории на основе фиксированной выборки измеряемой координаты^{85 86} используются, как правило, на начальном участке (в процессе завязки) траектории обнаруженной цели. Применение этих методов в процессе сопровождения траектории нецелесообразно из-за сложности реализации на ЭВМ и ограниченной точности, определяемой малым (не более пяти) числом используемых измерений. В связи с этим возникает необходимость применения для фильтрации параметров рекуррентных алгоритмов, обеспечивающих последовательное (после каждого нового измерения координат) уточнение параметров траектории. На выходе рекуррентного фильтра получаются оценки параметров траектории, отнесенные к моменту получения последнего наблюдения. Поэтому процесс рекуррентного оценивания называется в дальнейшем последовательной фильтрацией, а соответствующие алгоритмы — алгоритмами последовательной фильтрации параметров траектории.

Впервые удобный для практической реализации рекуррентный фильтр для обработки информации о непрерывных системах был предложен в работе⁸⁷. Свое развитие для реализации на цифровых ЭВМ в системах обработки радиолокационной информации он получил в монографии отечественного ученого С.З. Кузьмина⁸⁸.

В общем случае задача синтеза алгоритма последовательной фильтрации совокупности (вектора) параметров ставится следующим образом. Пусть модель невозмущенной траектории объекта задана разностным уравнением

$$\mathbf{v}_n = \Phi_n \mathbf{v}_{n-1},$$

а наблюдаемая случайная последовательность представлена уравнением

⁸⁵ Брайсон А., Хо-юши. Прикладная теория управления. – М.: Мир, 1972. – 544 с.

⁸⁶ Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. – М.: Сов. радио, 1978. – 324 с.

⁸⁷ Kalman R., Bucy R. New results in linear filtering and prediction theory // J. Basic. Engr. (ASME Trans.) – 1961. –V. 83. –P. 95—108.

⁸⁸ Кузьмин С.З. Цифровая обработка радиолокационной информации. – М.: Сов. радио, 1967. – 400 с.

$$\mathbf{Y}_n = \mathbf{H}_n \mathbf{v}_n + \Delta \mathbf{Y}_n,$$

где \mathbf{v}_n - $(s+1)$ -мерный вектор фильтруемых параметров траектории;

\mathbf{Y}_n — l -мерный вектор наблюдаемых координат;

$\Delta \mathbf{Y}_n$ — l -мерный вектор погрешностей измерения; последовательность этих векторов является некоррелированной случайной последовательностью с математическим ожиданием, равным нулю, и известной ковариационной матрицей \mathbf{R}_n ;

Φ_n, \mathbf{H}_n — известные матрицы экстраполяции и наблюдения соответственно.

Пусть далее $\hat{\mathbf{v}}_{n-1}$ — вектор оценок значений параметров траектории цели, вычисленный по результатам $n-1$ измерений координат, а Ψ_{n-1} — соответствующая корреляционная матрица ошибок оценивания.

Требуется получить выражения для $\hat{\mathbf{v}}_n$, используя для этого вектор $\hat{\mathbf{v}}_{n-1}$ предыдущих оценок и результаты нового измерения \mathbf{Y}_n , а также выражение для корреляционной матрицы ошибок Ψ_n по известным матрицам Ψ_{n-1} и \mathbf{R}_n .

В соответствии с общей теорией оценивания оптимальное решение задачи рекуррентной фильтрации сводится, прежде всего, к определению апостериорной плотности вероятности фильтруемых параметров, так как она содержит всю информацию, полученную из априорных источников и результатов наблюдений. Дифференцируя апостериорную плотность вероятности, можно получить оптимальную оценку интересующих нас параметров по критерию максимума апостериорной вероятности. Именно в этом смысле и понимается оптимальная рекуррентная фильтрация в дальнейшем.

Основные соотношения оптимального алгоритма последовательной фильтрации можно представить в виде⁸⁹:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{v}}_{эн} &= \Phi_n \hat{\mathbf{v}}_{n-1}; \\ \Psi_{эн} &= \Phi_n \Psi_{n-1} \Phi_n^T; \\ \Psi_n^{-1} &= \Psi_{эн}^{-1} + \mathbf{H}_n^T \mathbf{R}_n^{-1} \mathbf{H}_n; \\ \mathbf{K}_n &= \Psi_n \mathbf{H}_n^T \mathbf{R}_n^{-1}; \\ \hat{\mathbf{v}}_n &= \hat{\mathbf{v}}_{эн} + \mathbf{K}_n (\mathbf{Y}_n - \mathbf{H}_n \hat{\mathbf{v}}_{эн}). \end{aligned}$$

Система уравнений представляет алгоритм оптимального рекуррентного линейного фильтра и обычно называется уравнениями фильтра Калмана⁹⁰. Эти уравнения могут быть преобразованы к более удобному для реализации виду:

⁸⁹ Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. – М.: Радио и связь, 1986. – 352 с.

⁹⁰ Брайсон А., Хо-юши. Прикладная теория управления. – М.: Мир, 1972. – 544 с.

$$\begin{aligned}\hat{\nu}_{эн} &= \Phi_n \hat{\nu}_{n-1}; \\ \Psi_{эн} &= \Phi_n \Psi_{n-1} \Phi_n^T; \\ \mathbf{K}_n &= \Psi_{эн} \mathbf{H}_n^T (\mathbf{H}_n \Psi_{эн} \mathbf{H}_n^T + \mathbf{R}_n)^{-1}; \\ \hat{\nu}_n &= \hat{\nu}_{эн} + \mathbf{K}_n (\mathbf{Y}_n - \mathbf{H}_n \hat{\nu}_{эн}); \\ \Psi_n &= \Psi_{эн} - \mathbf{K}_n \mathbf{H}_n \Psi_{эн}.\end{aligned}$$

Общая структурная схема фильтра, реализующего уравнения, представлена на рис. 2.2.

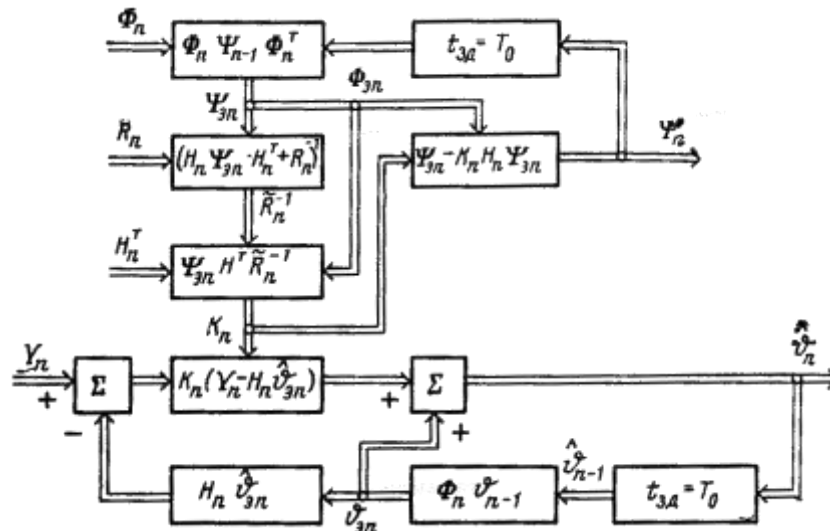


Рисунок 2.2 – Структурная схема рекуррентного фильтра

С увеличением количества измерений (при сопровождении реальных целей их количество может достигать 30-50) элементы матрицы \mathbf{K}_n асимптотически стремятся к нулю, что приводит к тому, что фильтр перестает реагировать на измерения координат цели, а это, в свою очередь, может привести к «расходимости» фильтра. Поэтому для практического использования рекуррентного фильтра в системах обработки радиолокационной информации должны применяться специальные меры коррекции.

В общем виде задача обеспечения устойчивости рекуррентного фильтра относится к проблеме решения некорректных задач⁹¹ — задач, в которых небольшие отклонения в исходных данных вызывает сколь угодно большие (но конечные) отклонения в решении. Для некорректных задач разработан метод устойчивого (приближенного) решения, который получил название метода регуляризации⁹². В соответствии с этим методом при построении

⁹¹ Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. — М.: Радио и связь, 1986. — 352 с.

⁹² Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. — М. Наука, 1979. — 285 с.

регуляризирующего алгоритма оптимальной фильтрации параметров невозмущенной динамической системы необходимо для \mathbf{K}_n к матрице погрешностей измерения \mathbf{R}_n добавить матрицу $\alpha\mathbf{I}$ (где \mathbf{I} — единичная матрица): $\mathbf{R}'_n = (\mathbf{R}_n + \alpha\mathbf{I})$, причем параметр α должен удовлетворять условию $\delta/\varepsilon(\delta) \leq \alpha \leq \alpha_0(\delta)$, где δ — точность задания матрицы \mathbf{R}_n ; $\varepsilon(\delta)$, $\alpha_0(\delta)$ — какие-либо убывающие функции, стремящиеся к нулю при $\delta \rightarrow 0$.

Таким образом, общий подход для получения устойчивых решений методом регуляризации состоит в данном случае в искусственном загроблении результатов измерений. Однако применение этого метода в чистом виде затруднительно, так как способ выбора параметра регуляризации α , вообще говоря, неизвестен. На практике устранение расходимости рекуррентного фильтра можно обеспечить эффективным ограничением его памяти.

Выше при рассмотрении методов и алгоритмов фильтрации параметров траекторий предполагалось, что уравнение модели траектории соответствует истинному движению цели. В реальных условиях такое соответствие, как правило, отсутствует из-за маневрирования целей. Учет возможного маневра является необходимым условием успешного решения задач фильтрации параметров реальных целей.

Уравнение состояния для маневрирующей цели имеет следующий вид:

$$\mathbf{v}_n = \Phi_n \mathbf{v}_{n-1} + \Gamma_n \mathbf{g}_{mn} + \mathbf{G}_n \boldsymbol{\eta}_n,$$

где $\Phi_n \mathbf{v}_{n-1}$ — уравнение невозмущенной траектории;

\mathbf{g}_{mn} — l -мерный вектор возмущений параметров траектории, обусловленных преднамеренным маневром цели;

$\boldsymbol{\eta}_n$ — p -мерный вектор возмущений, обусловленных влиянием внешней среды и неточности управления (шумов управления);

Γ_n , \mathbf{G}_n — известные матрицы.

В зависимости от точностных характеристик РЛС и предполагаемого характера маневрирования цели возможны, по крайней мере, три подхода к построению алгоритма фильтрации параметров реальных целей. Первый из них состоит в «загроблении» фильтра путем введения дополнительного члена в формулу пересчета Ψ_{zn} . Второй — в обнаружении начала и окончания маневра, а также оценке его интенсивности, с последующей фильтрацией с различными моделями движения цели. Третий — на основе байесовского подхода к

вычислению вероятности маневра цели⁹³. Результаты моделирования работы такого фильтра показывают его существенное преимущество перед другими.

Как видно, режим сопровождения целей оказывает наибольшее влияние на выходные параметры радиолокационной системы с точки зрения системы более высокого порядка. Рассмотрим более подробно обоснование показателя качества управления для указанного режима функционирования МПРЛС.

Для обоснования показателя качества управления МПРЛС необходимо использовать функцию эффективности системы высшего порядка, которая может быть представлена системой управления движением (воздушным, судов на море), навигационной системой, системой обороны и т.д. Рассмотрим этот вопрос на примере абстрактной системы обороны, для которых внешние условия изменяются наиболее быстро и неожиданно и для которых поэтому управление имеет первостепенное значение.

В качестве показателя эффективности примем математическое ожидание ущерба обороняемым объектам $M(U)$, который предотвращается в результате действий всей боевой системы или некоторой ее группировки. Воспользуемся одним из наиболее простых выражений этого показателя, который выведен в предположении, что противник назначает на каждый объект не более одного средства нападения, а обороняющаяся сторона выделяет на каждую цель не более одного канала обороны:

$$M(U) = \sum_{j=1}^{M_0} \sum_{J=1}^{J_0} \sum_{v=1}^Q V_v P_{ji} P_{jv} R_v P_{jd} \Pi_{jJv} P_{jJ} \pi_{jJ},$$

где V_v – важность v -го объекта, $v = 1, 2, \dots, Q$;

P_{ji} – вероятность обнаружения j -и цели i -й МПРЛС системы;

P_{jv} – вероятность атаки v -го объекта j -й целью;

R_v – вероятность уничтожения v -го объекта одной пропущенной целью;

P_{jd} – вероятность того, что j -я цель не является ложной целью;

Π_{jJv} – признак возможности защиты от j -и цели v -го объекта огневыми средствами J -й группировки, $\Pi_{jJv} = \{0, 1\}$;

P_{jJ} – вероятность поражения j -й цели при действии по ней огневых средств J -й группировки;

π_{jJ} – признак назначения на j -ю цель огневых средств J -й группировки;

J_0 – общее число группировок огневых средств.

⁹³ Лайниотис Д. Разделение – единый метод построения адаптивных систем. – ТИИЭР, 1976, т. 64, № 8, с. 8–27.

Для того чтобы использовать этот показатель для управления радиолокационной системой, произведем следующие упрощения. Положим, что:

- $P_{ji} = 1$, т. е. все цели, атакующие обороняемый район, обнаружены;
- $R_v = 1$, т. е. объект всегда разрушается при пропуске одной цели;
- $P_{jv} = 1$, т. е. всегда найдется хотя бы один огневой канал, который способен действовать по j -й цели;
- $\pi_{jj} = 1$, т. е. количество огневых средств таково, что всегда хватит огневых каналов для действий по j -й цели.

Эти упрощения вполне оправданы в условиях малого количества информации о целях в момент принятия решения по управлению радиолокационной системой. Тогда:

$$M(U) \approx \sum_{v \in Q_j} \sum_{J=1}^{J_0} \sum_{j=1}^{M_0} V_v P_{jv} P_{jd} P_{jj}$$

Здесь Q_j – множество объектов, которые могут быть атакованы j -й целью.

Три вероятности, входящие сомножителями в это выражение, являются основными аргументами функций вероятности правильного целераспределения, вероятности правильной селекции и вероятности успешного перехвата цели. Это позволяет рассматривать их как показатели качества выполнения трех основных задач системы управления – целераспределения, селекции и наведения.

В то же время известно, что эти вероятности функционально зависят от следа взвешенной корреляционной матрицы ошибок оценок параметров траекторий целей⁹⁴, которая полностью зависит от результатов вторичной обработки, поступающей в результате измерений радиолокационной информации.

Используя известные методы координации многоуровневых иерархических систем⁹⁵, можно легко показать, что показатель качества управления этапа сопровождения цели, согласованный с показателем эффективности системы вышестоящего уровня, имеет следующий вид⁹⁶:

$$J = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T tr[\mathbf{h}_i(t) \Psi_i(t)].$$

⁹⁴ Неупокоев Ф.К. Стрельба зенитными ракетами. – М. Воениздат, 1991. – 343 с.

⁹⁵ Mesarovic M.D., Multilevel concept for systems engineering, Proc. Systems Eng. Conf., Chicago, III, 1965.

⁹⁶ Гришин И.Ю., Можар М.К., Есин В.И. Оптимизация управления многопозиционным радиолокационным комплексом // Тезисы докладов 2-й Всесоюзной научно-технической конференции. – Туапсе, 1991. – С. 48-49.

Здесь $tr[\mathbf{h}_i(t)\Psi_i(t)] = \sum_{l=1}^k h_i^{ll}(t)\Psi_i^{ll}(t)$ – след произведения матриц $\mathbf{h}_i(t)$ и $\Psi_i(t)$,

характеризующий взвешенную величину ошибки фильтрации координат i -го объекта. При этом весовая матрица $\mathbf{h}_i(t)$ определяется в зависимости от способа сопровождения и до поиска целей в процессе сопровождения, а также от метода наведения ракет на цель (или способа принятия решения на управление воздушным движением, движением морских судов и т.п.).

Подобные задачи относятся к категории задач управления наблюдениями в автоматических системах. Впервые задача оптимального управления наблюдениями для линейных систем была решена М. Атансом⁹⁷, позднее в ряде работ предложенные идеи были развиты для ряда конкретных систем.

⁹⁷ Athans M. On the determination of optimal cost measurement strategies for linear stochastic systems. – Automatica. 1972, vol. 8, N 4, p. 397 — 412.

ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ «УМНОГО» ГОРОДА

- 3.1 Концепция мониторинга движения беспилотных транспортных средств «умного» города на основе информации от разнородных датчиков*
- 3.2 Программное обеспечение индивидуальных коммуникационных устройств в едином информационном поле обеспечения технологических процессов в аэропорту*
- 3.3 Управление процессом использования единого информационного поля обеспечения технологических процессов в аэропорту*
- 3.4 Метод расследования инцидентов в системах критической информационной инфраструктуры 1.2 Классификация воздушных объектов в системе организации воздушного движения*

3.1 Концепция мониторинга движения беспилотных транспортных средств «умного» города на основе информации от разнородных датчиков

В последнее время, благодаря своему повсеместному использованию, беспилотные летательные аппараты (БПЛА) играют важную роль в Интернете вещей (IoT) и умном городе, который представляет собой видение развития современных городов для интеграции информационно коммуникационных технологий (ИКТ) и IoT в безопасные технологии для управления городскими активами. Однако есть много проблем, которые необходимо преодолеть перед

развертыванием группировки БПЛА. Эти проблемы включают в себя не только технические вопросы, но и вопросы регулирования^{98 99}.

Ожидается, что БПЛА будут играть важную роль в будущих умных городах, например, доставляя товары и товары, выступая в качестве мобильных точек доступа для широкополосного беспроводного доступа и поддерживая наблюдение и безопасность¹⁰⁰. Поэтому необходима надежная и безопасная среда для качества и стабильности работы БПЛА. Для правительств также важно внедрить нормативные акты, обеспечивающие соблюдение стандартов безопасности и не позволяющие применять слабые меры кибербезопасности в реальных условиях. Федеральное авиационное управление (ФАУ) предсказало, что 30 000 беспилотников могут летать в небе США менее чем через 20 лет.

Для исследования безопасности движения беспилотников и разработки интеллектуальной транспортной системы нужны модели, которые описывают последовательно процессы движения беспилотников в потоке трафика¹⁰¹. Имеются исследования, направленные на обеспечение стабильных условий полета беспилотников в пределах ограниченного городского района с использованием модели ИКАО (Международная организация гражданской авиации), которая применяется для оценки устойчивости гражданских воздушных судов.

Результаты исследования обобщаются следующим образом.

Во-первых, для того, чтобы беспилотники летали стабильно, горизонтальное безопасное расстояние разноса между одним БПЛА и другим должно быть не менее 1852 м.

Во-вторых, если предположить, что в пределах 1852 м от горизонтального пространства нет препятствий, два беспилотника могут летать на разных эшелонах. При наличии таких препятствий, как здания, невозможно обеспечить расстояние в 1852 м между БПЛА.

⁹⁸ Lai Wei-Hsiang, Lai Ying-Chih, Lan Zao-Sin, Lin Hsiao-Hung, Ho WeiKuang. Development of an Internet of Things System Based on Unmanned Aerial Vehicles for the Application of Smart Security from Sky // Journal of Aeronautics Astronautics and Aviation, Jun 2018, v. 50, iss. 2, PP. 135–146. Doi 10.6125/JoAAA.201806_50(2).03.

⁹⁹ I.Y Grishin and R.R. Timirgaleeva “Air navigation: Optimisation control of means cueing of the air-traffic control system”, Conference of Open Innovation Association FRUCT, 2018, pp. 134-140.

¹⁰⁰ Guevenc, Ismail, Koohifar, Farshad, Singh, Simran, Sichitiu, Mihail, Matolak, David. Detection, Tracking, and Interdiction for Amateur Drones // IEEE Communications Magazine, Apr 2018, v. 56, iss. 4, PP. 75–81. Doi 10.1109/MCOM.2018.1700455.

¹⁰¹ Dung, Nguyen Dinh, Rohacs, Jozsef. The Drone-Following Models in Smart Cities // IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Nov 12-13, 2018.

В-третьих, анализ чувствительности указывает на то, что интервал эшелонирования беспилотной авиации оказывает наибольшее влияние на целевой уровень безопасности¹⁰².

В работе¹⁰³ китайских авторов утверждается, что для устранения задержек рейсов и рисков, связанных с прогнозируемым увеличением объема воздушного движения, необходимо увеличить пропускную способность систем управления воздушным движением. Это должно основываться на объективных измерениях сложности ситуации в воздушном пространстве. Авторами предложен новый подход для измерения сложности ситуации с воздушным движением. Этот подход учитывает влияние как воздушного пространства, так и транспортного потока, и объективно оценивает сложность ситуации с воздушным движением.

В работе¹⁰⁴ авторами статьи были рассмотрены основные аспекты оптимизации управления многопозиционными радиолокационными комплексами на этапе радиолокационного сопровождения воздушных судов на трассах полета либо в зоне аэропорта. Показано, что предложенные методы оптимизации управления позволяют существенно повысить пропускную способность радиолокационных комплексов, что позволяет сократить их требуемое количество в системе УВД.

Аналогичный подход предложено применить и для обеспечения безопасности полетов БПЛА, поскольку заданное стандартами ИКАО расстояние между БПЛА невозможно обеспечить, то необходимо значительно точнее измерять их траекторные параметры движения для обеспечения управления такими аппаратами в автоматическом режиме.

В качестве источников информации о параметрах движения БПЛА могут использоваться радиолокационные станции, лазерные локаторы, станции пассивной локации, размещенные в разных точках города и объединенные в единый многопозиционный локационный комплекс^{105 106}, позволяющий, при использовании соответствующих алгоритмов обработки получаемой

¹⁰² Kim, Hong-Bae. Identification of Key Elements for Stable Flight of Drones and Horizontal Space Compartment in Urban Area // Journal of Korea Planning Association, 2018, v. 53, iss. 7, PP. 39–48.

¹⁰³ H. Wang, Z. Song, and R. Wen “Modeling Air Traffic Situation Complexity with a Dynamic Weighted Network Approach”, Journal of Advanced Transportation, 2018, article number UNSP 5254289.

¹⁰⁴ I.Y. Grishin and R.R. Timirgaleeva “Air navigation: Optimisation control of means cueing of the air-traffic control system”, Conference of Open Innovation Association FRUCT, 2018, pp. 134-140.

¹⁰⁵ Теленик С.Ф., Гришин И.Ю. Анализ современных алгоритмов вторичной обработки информации в статистических измерительных информационных системах // Вестник Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля. – 2009. – № 1 (131). – Ч.2. – С.145– 155.

¹⁰⁶ Гришин И.Ю. Оптимизация управления многопозиционным радиолокационным комплексом / И.Ю. Гришин, М.К. Можар, В.И. Есин // Тезисы докладов 2-й Всесоюзной научно-технической конференции по распространению миллиметровых радиоволн. – Туапсе, 1991. – С. 48–49.

информации, оценить параметры движения с меньшими ошибками^{107 108} и обеспечить более плотный поток БПЛА, обладающий свойством безопасности.

Наиболее сложным районом регулирования воздушного движения в составе как пилотируемых, так и беспилотных летательных аппаратов, являются аэропортовые районы. Некоторые аспекты управления воздушным движением в этих районах рассмотрим далее.

3.2 Программное обеспечение индивидуальных коммуникационных устройств в едином информационном поле обеспечения технологических процессов в аэропорту

На практике должностные лица в аэропорту пользуются услугами, которые предоставляет единое информационное поле обеспечения технологических процессов (ЕИПОТП), с помощью программного обеспечения своих коммуникационных устройств (ПОКУ). Для них ПОКУ является своеобразным «окном» в это пространство, тем инструментом, с помощью которого они работают с необходимыми информационными ресурсами (ИР). Очевидно, что архитектура и логика построения ЕИПОТП в полной мере находят свое отражение в концепции ПОКУ. Рассмотрим эту концепцию на основе модели работы пользователей ЕИПОТП в аэропорту. Прежде чем перейти непосредственно к описанию этой модели, необходимо отметить, что технологичность ЕИПЗТП как среды реализации процессов управления ресурсами, определяется использованием независимых (от предоставляемых услуг) функционально ориентированных программных процедур, получивших в научно-технической литературе название «функциональные объекты» или «функциональные компоненты»¹⁰⁹. Эти компоненты, объединенные различными способами, предоставляют пользователю интеллектуальной сети возможность создавать и вводить в действие все новые и новые услуги, не прибегая каждый раз к разработке нового или модификации действующего программного обеспечения для всех ее элементов. При этом для каждой новой услуги пользователь создает свою программу логики обслуживания (ПЛО), объединяющая различные

¹⁰⁷ Радиозлектронные системы: основы построения и теория. Справочник / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО «Маквис», 1998. – 828 с.

¹⁰⁸ Гришин И.Ю. Актуальные проблемы оптимизации управления в технических и экономических системах: Монография / И.Ю. Гришин. – Ялта: РИО КГУ, 2010. – 252 с.

¹⁰⁹ Тамаргазін О.А., Ліннік І.І., Курбет Л.В. Стан, протиріччя й тенденції розвитку інформаційного поля забезпечення технологічних процесів в аеропорту / Наукоємні технології: Наук. журнал – Київ: НАУ, 2017. – № 1 (33). – С.65-70 doi:10.18372/2310-5461.33.11561.

функциональные компоненты и контролирующая порядок и последовательность их выполнения.

Анализ последних исследований и публикаций, проведенный в таких работах как^{110 111} показал, что ЕИПОТП должно гарантировать необходимость и достаточность существующего набора информационно-функциональных продуктов с возможностью осуществить корректировку информационно-функционального элемента на самом нижнем уровне, не затрагивая общей логики построения ПОКУ, при возникновении потребности в новой (незапланированной) услуге, или появлением новой задачи, или изменением условий и приемов ее решению.

Концепция «задача ОПР - услуги ЕИПОТП» призвана минимизировать затраты при решении внутренних противоречий реализации процессов управления в аэропорту, так как в этом случае неизбежна динамика роста задач ОПР, которые они решают на макроуровне, будут обеспечиваться стабильностью основ ЕИПОТП. Таким образом целью дальнейших исследований является, на основе концептуальной модели работы лица, принимающего решения в ЕИПОТП, выявление требований, предъявляемых к определяемым логическим элементам логической структуры ПОКУ.

Учитывая, что основным инструментом деятельности ОВД в ЕИПОТП является ПОКУ, в его архитектуре наиболее полно и концентрированно отражаются логические возможности по использованию ЕИПОТП. Исходя из этого, была синтезирована логическая структура типичного ПОКУ для работы в ЕИПОТП. Синтезированная логическая структура содержит модули пяти типов.

Первый тип – интерфейсный модуль (ИнМ) пользователя, он предназначен для создания и поддержки комфортного языкового и задаче-ориентированной среды должностного лица в аэропорту, а также организации его диалога с содержанием ЕИПОТП в различных формах. Данный модуль позволяет осуществлять внезадачное суперпозиционирование элементов функционального модуля на элементах информационного модуля и накопления опыта решения задач конкретным пользователем услуг ЕИПОТП.

Второй тип – функциональный модуль (ФМ), который определяет функциональные ресурсы (функциональную мощность) ПОКУ. Этот модуль может осуществлять обработку информации с целью решения следующих задач:

¹¹⁰ Ногин В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. – 2-е изд., испр. и доп. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 176 с.

¹¹¹ Катулев, А.Н. Математические методы в системах поддержки принятия решений: Учеб. пособие / А.Н. Катулев, Н.А. Северцев. М.: Высш. шк., 2005. 311 с.

- вычислительная работа (например, переборка и выбор наилучшего варианта действий) должностного лица;
- реализация функциональной системы (подсистемы) ЕИПОТП;
- выполнение алгоритмов производственного управления;
- формирование справок, докладов и отчетов моделирование объектов, процессов и среды.

Для этого ФМ содержит множество функций конкретного должностного лица по обработке информационных объектов, которые являются подмножеством функционального пространства ОВД.

Третий тип – информационный модуль (ИМ), он определяет ИР-ПОКУ должностного лица. Этот модуль является базой данных (БД) информационных объектов ЕИПОТП и поддерживает информационное пространство пользователя конкретного ПОКУ. Суперпозиция множеств ИМ содержит информационное пространство ОВД.

Четвертый тип – абонентский модуль (АМ) - обеспечивает реализацию всего множества услуг ЕИПОТП и идентификацию ПОКУ пользователей путем разграничения их доступа к информационно-функциональным ресурсам ЕИПОТП. Полученные границы определяют содержание ИМ и ФМ ПОКУ конкретного должностного лица.

Пятый тип – транспортный модуль (ТМ), предназначен для поддержания единства как информационном, так и функциональном пространстве путем транспортировки востребованных ИР и функций в любую точку ЕИПОТП. Множество точек, обслуживаемых ТМ, определяет границы ЕИПОТП и его потенциальных пользователей.

Если ИИМ, ФМ, ИМ и АМ, это модули которые реализуют в своей совокупности ПОКУ должностного лица и являются его необходимыми инструментами для работы в ЕИПОТП, то ТМ, выступая в качестве системообразующего элемента, является инструментом, достаточным для работы в ЕИПОТП в аэропорту.

Работа ОПР с ПОКУ заключается в информационно-функциональном обмене, который в общем случае происходит с использованием следующей логической цепочки. В процессе функциональной деятельности или ОПР формирует запрос на услугу, или ПОКУ запрашивает его о предоставлении услуги. Запрос попадает в так называемую регистрационную БД, которая обеспечивает включение ОПР в качестве абонента, а его ПОКУ – в качестве терминала ЕИПОТП, определяет коды засекречивания и признаки легальности

абонента, его функциональные и другие параметры, то есть осуществляет идентификацию ПОКУ и установление полномочий ОНР, работающих на ПОКУ¹¹². Затем зарегистрированный запрос на услугу поступает в контрольную БД и БД услуг ЕИПОТП. Контрольная БД обеспечивает автоматический контроль потребляемых ресурсов и услуг ЕИПОТП конкретным ОНР (ПОКУ) на соответствие установленным полномочиям, то есть блокирует абонентов, если они превышают свои полномочия при решении конкретной задачи. БД услуг обеспечивает полную информационно-функциональную поддержку ЕИПОТП в соответствии с запросами ОНР (ПОКУ) на ее услуги. БД услуг содержит в своей статической части все программы логического обслуживания (ПЛО), что практически является алгоритмическими сценариям обслуживания заявок и предоставления соответствующих услуг.

Запрос на услугу по регистрационной БД в сторону БД услуг активизирует в статической части необходимую ПЛО. Активизированная ПЛО поступает в модуль компоновки конечных услуг, в котором конечная услуга компоуется из одного или более модулей услуг, которые являются услугами нижнего уровня.

Если запрос на услугу не активизировал в статической части ни одну из ПЛО, тогда он передается в динамическую часть, которая организует диалог с ОНР на предмет построения (в интерактивном режиме) модели новой (для ЕИПОТП) услуги. Результатом моделирования является новая ПЛО, которая может компоноваться как из модулей, так и из набора функциональных компонентов –элементов, позволяющих оптимально формировать модули услуг. Каждый функциональный компонент содержит некоторое подмножество элементарных функций, выполняемых в ЕИПОТП.

Предоставляемая ЕИПОТП услуга обязательно поступает в ПОКУ только через контрольную БД для учета абонирования услуг, то есть учета всех действий ОВД при решении своих задач.

На сегодняшний день накоплен определенный опыт создания как регистрационных, так и контрольных БД, например, для интернета, и этот опыт может быть использован для построения ЕИПОТП, но уже с учетом принципиально нового подхода к обслуживанию ОНР, который в основном генерирует требования к БД услуг как носителю интеллекта технологической среды процессов управления технологическими процессами в аэропорту.

¹¹² Катулев, А.Н. Математические методы в системах поддержки принятия решений: Учеб. пособие / А.Н. Катулев, Н.А. Северцев. М.: Высш. шк., 2005. 311 с.

Согласно изложенной концепции и сформулированным требованиям БД услуг должна строиться на новых принципах, отличных от традиционных для сетевых БД:

– БД услуг должна быть интеллектуальной, то есть не просто хранить информацию об ИР и необходимые услуги, но и порождать в операционной среде ЕИПОТП процесс, обеспечивающий его абонентов необходимым обслуживанием в требуемой точке и в нужное время. В результате будут высвобождены вычислительные ресурсы ЕИПОТП, предназначенные для постоянного сканирования всей БД услуг с целью определения, кто из ОВД обслуживается в первую очередь;

– БД услуг должна строиться не только как БД, распределенная в пространстве, но и как БД, распределенная функционально. Она должна иметь возможность делегировать полномочия процессу-источнику в любой локальный узел этой БД. Такой подход позволит минимизировать сетевую нагрузку в процессе предоставления услуг, связанных с виртуализацией ПОКУ.

Процессы, порождаемые БД услуг, должны обладать способностью порождать дочерние процессы в любом узле ЕИПОТП, что позволит реализовать функции виртуализации услуг. БД услуг должна иметь открытую архитектуру для введения новых услуг и функций.

В процессе дальнейших исследований принципы построения БД услуг будут уточнены, но даже при первом рассмотрении видно, что она не может быть построена на основе стандартных СУБД, которые используются в настоящее время.

Для построения БД услуг, адекватной задачам и целям ЕИПОТП, в первую очередь должна быть проведена спецификация языкового интерфейса между ПОКУ и БД услуг. Разработка такой спецификации может быть осуществлена, в частности, с учетом современной теории распределенных БД и информационных хранилищ, ограничений и требований, вытекающих из инфологической модели распределенных БД и концепции самого ЕИПОТП.

Наличие спецификации позволит осуществлять совершенствование технических и программных средств, как информационно-вычислительных сетей, так и БД услуг ЕИПОТП. Согласно изложенной концепции БД услуг ЕИПОТП должна обеспечивать:

– возможность работы в реальном масштабе времени при большом количестве ОПР – участников процесса управления технологическими

процессами и высокой пиковой интенсивности обращения к информации на его отдельных этапах;

– категоризированный доступ при одновременной обработке вызовов многих ОПР – участников процесса управления технологическими процессами, находящихся на разных уровнях;

– возможность наращивания числа ОПР, числа и видов услуг в соответствии с целевыми установками;

– виртуализацию абонентов и услуг в широком смысле этого слова.

Необходимость обслуживания в ЕИПОТП большого количества абонентов в режиме реального времени и разделения ресурсов остро ставит вопрос о средствах – носителях новых информационных технологий с использованием которых, в частности, может быть реализована БД услуг. Поэтому важно определить основные направления, на которых необходимо сосредоточить финансовые и интеллектуальные ресурсы разработчиков и производителей аппаратных средств и программного обеспечения при реализации концепции ЕИПОТП в аэропорту.

Изложенные основные концептуальные положения и системные решения ЕИПОТП позволяют прогнозировать его высокую эффективность как технологической среды решения задач управления технологическими процессами в современном аэропорту.

Задачу детализации требований к ПОКУ как элемента ЕИПОТП предлагается решать с помощью последовательно-параллельного наложения свойств ЕИПОТП на элементы структуры ПОКУ. Свойства ЕИПОТП последовательно накладываются на все элементы сначала логической, затем программной и, наконец, физической структуры архитектуры ПОКУ.

Результатом параллельного наложения конкретного свойства на все элементы конкретной структуры является выявление определяющих элементов с последующим обоснованием уже конкретных требований к каждому из них в терминах ЕИПОТП. В этом случае определяющие элементы (их характеристики или параметры) выступают в качестве классификационных признаков требований к ПОКУ.

Таким образом, требования к ПОКУ конкретизируются в плоскости наложения свойств ЕИПОТП на элементы архитектуры ПОКУ (логической, программной и физической) и далее сопоставления логической структуры с программной структурой, а затем с физической структурой. Такой подход должен

обеспечить получение свойств ЕИПОТП, согласованных в рамках ЕИПОТП как в целом, так и поэлементно.

В процессе работ по созданию ПОКУ для ЕИПОТП возникает необходимость в обосновании и выборе того или иного конкретного варианта функционального (программного) модуля ПОКУ. Поэтому необходим соответствующий инструмент для оценки этого варианта, то есть инструмент, который должен ответить на вопрос о степени соответствия конкретной реализации модуля ПОКУ системе требований, изложенных в терминах ЕИПОТП. В качестве такого инструмента может быть использована методика, включающая четыре последовательные этапы.

Первый этап – формирование требований рассмотренным способом наложения свойств ЕИПОТП на модули логической архитектуры ПОКУ.

Второй этап – получение оценок модулей логической и программной архитектуры реального ПОКУ статистическими методами, методами экспертных оценок или экспериментальными методами – путем экспериментов с аналитическими и имитационными моделями этих модулей.

Содержание третьего этапа методики заключается в интерпретации полученной классификационной характеристики применительно к вновь разрабатываемому или модифицируемому образцу. Причем анализ, выполняемый для интерпретации проводится по цепочке «заложены свойства ЕИПОТП – реализуемость – обеспеченность».

Целью этапа является выявление элементов ПОКУ, которые не удовлетворяют требованиям, сформулированным на первом этапе, и формирование научно обоснованных рекомендаций по корректировке или варианта построения ПОКУ, или отдельных требований к ЕИПОТП.

Четвертый этап – выбор рационального варианта построения ПОКУ на основе сложившихся на втором этапе оценок модулей ПОКУ и признанного целесообразным критерия эффективности ПОКУ в ЕИПОТП.

Таким образом, использование гипотетической архитектуры ЕИПОТП в качестве инструмента формирования требований к ПОКУ позволяет предположить, что полученная совокупность отдельных требований к структурным элементам ПОКУ обеспечит их эффективное функционирование в ЕИПОТП процессов управления.

3.3 Управление процессом использования единого информационного поля обеспечения технологических процессов в аэропорту

Структура управления функционированием аэропорта, и непосредственно административная структура аэропорта разрабатывается и составляется в зависимости от большого количества факторов, как внешней, так и внутренней среды данного аэропорта. Нет такой модели административной структуры, которая была бы приемлема для любого аэропорта. Но управление такой сложной системой возможно с использованием единого информационного поля обеспечения технологических процессов (ЕИПОТП), как это было показано выше.

Учитывая определенные условия работы аэропорта, его администрация создает свою структуру исходя из того, какую она отводит себе роль во всей деятельности аэропорта. Администрация может решать различные общие задачи с минимальным вкладом в реализацию большинства внутренних задач аэропорта. Или наоборот, как это делается в большинстве отечественных и европейских аэропортах, административно модель строится на том, что администрация аэропорта сама решает большинство внутренних задач деятельности аэропорта. В зависимости от формы взаимодействия (информирования) персонала, производственных служб и компаний, которые сотрудничают с администрацией аэропорта, различаются структурные административные модели и поэтому очень важно иметь единый инструмент, позволяющий оценить эффективность управления в аэропорту и оптимизировать использование ЕИПОТП.

Анализ последних исследований и публикаций проведенных в таких работах как^{113 114 115} показал, что ЕИПОТП может надежно гарантировать передачу информации между субъектами производственной деятельности аэропорта и минимизировать количество и функциональность программных продуктов, используемых в ЕИПОТП. Поэтому целью дальнейших исследований является построение модели корректировки действий субъектов производственной деятельности аэропорта на основе концептуальной модели работы лица, принимающего решения в ЕИПОТП.

¹¹³ Тамаргазін О.А., Ліннік І.І., Курбет Л.В. Стан, протиріччя й тенденції розвитку інформаційного поля забезпечення технологічних процесів в аеропорту / Наукоємні технології: Наук. журнал – Київ: НАУ, 2017. – № 1 (33). – С.65-70 doi:10.18372/2310-5461.33.11561.

¹¹⁴ Халин В. Г., Чернова Г.В. Системы поддержки принятия решений. – М.: Юрайт, 2019. 494 с.

¹¹⁵ Бухтояров В.В. Поддержка принятия решений при проектировании систем защиты информации: Монография / Бухтояров В.В., Жуков В.Г., Золотарёв В.В. – М.: ООО "Научно-издательский центр ИНФРА-М", 2014. – 131 с.

С точки зрения математической модели управления процессом использования ЕИПОТП в аэропорту различными субъектами производственной деятельности аэропорта, можно применить подход, предложенный нами в работе¹¹⁶.

Всем процессом использования ЕИПОТП в аэропорту руководит группа лиц, которая называется «руководство аэропорта», поэтому согласно теории принятия решений эту группу будем называть лицами, принимающими решения (ЛПР). Другие субъекты производственной деятельности аэропорта будем называть подчиненными. К ним мы будем относить как отдельных лиц, выполняющих работы в интересах тех или иных служб и подразделений аэропорта по поручению ЛПР, так и отдельные фирмы, и организации, которые могут быть привлечены к выполнению задач по обеспечению бесперебойного функционирования аэропорта по отдельным договорам.

Модель согласования интересов при решении задач по функционированию аэропорта с использованием ЕИПОТП можно представить следующим образом:

$$J_v = \sum_{t=1}^T [g_v^t(p^t, q^t, u^t) - M_v \rho(u^t, U_v^t)] \rightarrow \max, \quad p^t \in P^t, \quad q^t \in Q^t;$$

$$J_u = \sum_{t=1}^T [g_u^t(p^t, u^t) - M_u \rho(u^t, U_u^t)] \rightarrow \max, \quad u^t \in U^t(q^t),$$

где

J_v – целевая функция для ЛПР;

g_v^t – показатель оптимальности для ЛПР на шаге t ;

p^t – вектор действий по экономическому стимулированию;

q^t – вектор действий, который имеет природу запретов и нормативов;

u^t – вектор действий по управлению нижнего уровня;

U_v^t – допустимые действия по управлению подчиненными;

$M_v \rho(\cdot)$ – штрафная функция;

J_u – целевая функция для подчиненного;

U_u^t – действия достижения цели подчиненного на шаге t ;

ρ – условная функция (равна нулю на шаге t , если состояние работ принадлежит множеству X или положительная в противном случае);

M_u – штрафная константа для ЛПР;

¹¹⁶ Тамаргазін О.А. Спосіб узгодження інтересів суб'єктів, які приймають участь у забезпеченні заданих значень тактико-технічних та експлуатаційних характеристик авіаційних транспортних систем / Тамаргазін О.А., Варюхно В.В., Салімов Р.М., Олег М.В. Сидоренко О.Ю. – Матеріали 17-ї Міжнародної науково-практичної конференції (04-08 вересня 2017 р., м. Одеса) – С.180-184.

M_i – штрафная константа для подчиненного;

P_t, Q_t – допустимые действия для ЛПР та подчиненного;

T – период времени влияния.

В предлагаемой модели, в отличие от общепринятых в теории принятия решений моделей, динамика иерархической системы управления явно не описывается. При этом условие согласования интересов формулируется в терминах действий по управлению процессом функционирования аэропорта.

Так как уравнение динамики системы управления теми или иными процессами в аэропорту можно считать известными – $x^t = f(x^{t-1}, u^t)$, $x^0 = x_0$, $t = \overline{1, T}$, то условие согласования интересов разных субъектов производственной деятельности аэропорта $x^t \in X_v^t, t = \overline{1, T}$ можно найти как множество действий по управлению для ЛПР:

$$U_v^t = \{u^t \in U^t(q^t): f(x^{t-1}, u^t) \in X_v^t\}, t = \overline{1, T}.$$

По такому же правилу определяется и множество действий, обеспечивающих достижение цели подчиненного на шаге t .

Поскольку иерархическое управление при решении задач по функционированию аэропорта с использованием ЕИПОТП осуществляется одним из способов «принуждение», «побуждение», «убеждение» или путем объединения этих методов, естественно принять как принципы оптимальности решения нашей модели выбор множества ситуаций, которые соответствуют содержанию указанных методов. Для этого введем обозначения:

$$\begin{aligned} p &= (p^1, \dots, p^T), \\ q &= (q^1, \dots, q^T), \\ u &= (u^1, \dots, u^T), \\ P &= (P^1 \times \dots \times P^T), \\ Q &= (Q^1 \times \dots \times Q^T), \\ U(q) &= U^1(q^1) \times \dots \times U^T(q^T), \\ U_v &= U_v^1 \times \dots \times U_v^T, \\ U_u &= U_u^1 \times \dots \times U_u^T, \end{aligned}$$

и назовем равновесием «принуждения» ситуацию когда $(p, q, u) \in P \times Q \times U(q)$.

Тогда $J_v(p, q, u) = \max_{q \in Q} \min_{z \in R(p, s)} J_v(p, s, z)$; $Q_v = \{q \in Q: U(q) \subseteq U_v\}$;

где

$$R(p, q) = \{u \in U(q): J_u(p, q, u) \geq J_u(p, q, z), \forall z \in U(q)\}$$

оптимальные реакции подчиненного на действия ЛПР. Анализируя эту

формулировку можно утверждать, что при «принуждении» ЛПР должно сначала сужать область допустимых действий подчиненного таким образом, чтобы последний вынужден был применять только такие стратегии, которые согласовывают его интересы с интересами ЛПР, а затем максимизирует свою целевую функцию.

Если у подчиненного есть несколько допустимых оптимальных ответов на выбор ЛПР q , тогда ЛПР должен рассчитывать на худший результат со своей точки зрения. Множество управлений p для «жесткого принуждения» считается обычно фиксированной. Равновесие «принуждение» достигается, если $\exists q \in Q: U(q) \subseteq U_v$.

Равновесие «принуждение», это ситуация, если $(p, q, u) \in P \times Q \times U(q)$. Тогда:

$$J_v(p, q, u) = \max_{r \in P_v(q)} \min_{z \in R(r, q)} J_v(r, q, z);$$

$$P_v(q) = \{p \in P^{U(q)} : R(p, q) \subseteq U_v\},$$

где $P^{U(q)}$ – множество всех отражений из $U(q)$ в P .

Из данного выражения «принуждение» задается как механизм с обратной связью:

$$p(u) = \begin{cases} p^+, u \in U_v; \\ p^-, \text{ иначе,} \end{cases}$$

$$\min_{p \in P} J_u(p, q, u) = J_u(p^+, q, u) \leq J_u(p^-, q, u) < J_u(p^+, q, u) \leq J_u(p^+, q, u) = \max_{p \in P} J_u(p, q, u),$$

где p^+ , p^- – стратегии «наказания» та «поощрения» ЛПР для подчиненного.

Таким образом, «поощрение» — это метод, который позволяет согласовать интересы, выгодные для подчиненного. При этом нужно иметь ввиду, что условие $R(p, q) \subseteq U_v$ выполняется не всегда, так как оптимальная реакция определяется как действиями подчиненного, так и управлением со стороны ЛПР. Условие существования равновесия «принуждение» для фиксированного q :

$$\exists p \in U(q): \forall y \in U(q) \setminus U_v;$$

$$\exists u \in U_v : J_u(p^+, q, u) > J_u(p^+, q, y).$$

Кроме чистых механизмов «принуждения» и «поощрения» возможны и комбинированные, при которых ЛПР влияет на подчиненного одновременно изменением p и q .

Равновесие «принуждение-поощрение» можно определить как ситуацию $(p, q, u) \in P \times Q \times U(q)$.

Тогда:

$$J_v(p, q, u) = \max_{S \in Q_v} \max_{r \in P^U(s)} \min_{z \in R(r, s)} J_v(r, s, z), \quad (1)$$

А равновесие «поощрение-принуждение» можно определить как ситуацию $(p, q, u) \in P \times Q \times U(q)$.

В этом случае:

$$J_v(p, q, u) = \max_{S \in Q} \max_{r \in P_v(s)} \min_{z \in R(r, s)} J_v(r, s, z)$$

Таким образом, в случае (1) выполнение условия согласования интересов обеспечивается за счет «принуждения» ($s \in Q_v$). Кроме того, дополнительно выбирается самый выгодный для ЛПР механизм управления $p(u)$. В случае (2), наоборот, согласование интересов обеспечивает механизм «побуждения» ($r \in P_v(s)$), но при этом осуществляется дополнительная максимизация целевой функции для ЛПР по q . В соответствии с принципом гарантированного результата в случаях (1) и (2) ЛПР должен рассчитывать на наилучшую для себя оптимальную реакцию подчиненного.

Равновесие «убеждение» в нашей модели выглядит следующим образом $(p, q, u) \in P \times Q \times U(q)$.

Тогда:

$$(J_v + J_u)(p, q, u) = \max_{r \in P} \max_{s \in Q} \max_{z \in U(s)} (J_v + J_u)(r, s, z)$$

То есть, при «убеждении» ЛПР и подчиненный объединяются для совместной максимизации совместной целевой функции. При этом полученный максимальный совместный выигрыш от их объединения распределяется между ЛПР и подчиненным в соответствии с принципом оптимальности. Размер по выражению (3) совпадает со значением характеристической функции коалиции ЛПР и подчиненного, которая определена по Нейману-Моргенштерну.

Чистые или комбинированные методы «принуждение» и «побуждение» очень часто дополняются манипуляциями со стороны ЛПР. В нашей модели манипуляции заключаются в намеренной передаче подчиненному информации о стратегии $p(u)$ и/или действия q в извращенной форме. Манипуляции необходимы для того, чтобы побудить подчиненного выбирать действия, которые бы максимально соответствовали согласованию интересов их коалиции.

При этом ЛПР приходится очень часто жертвовать некоторыми своими интересами. Применение стратегии «наказание» в механизме «побуждение» может привести к нулевому выигрышу для ЛПР. Так, например, введение квот в механизме «принуждение» требует затрат на контроль их выполнения.

В том случае, когда ЛПР выбирает выгодную для себя стратегию оптимальный ответ подчиненного может нарушить требования по согласованию интересов. Поэтому ЛПР вынужден в такой ситуации передавать подчиненному информацию о «фиктивном» механизме управления. Оптимальный ответ подчиненного в таком случае будет удовлетворять условию согласования интересов, и после реализации подчиненным этого оптимального ответа ЛПР выбирает в действительности более выгодное для себя управление. В свою очередь, контригра подчиненного состоит в невыполнении наложенных ЛПР ограничений.

Предотвращение контригры требует от ЛПР дополнительных затрат на контроль за соблюдением наложенных им ограничений. Величина этих расходов должна быть тем больше, чем более жестким является ограничения. Метод «убеждения» в силу своей кооперативной природы исключает возможность манипуляции со стороны ЛПР и соответственно необходимость контригры со стороны подчиненного.

Можно вести следующие предположения:

1. Цели ЛПР и подчиненного достижимы и согласуются:

$$U_v \cap U_u \neq \emptyset.$$

2. Достижение максимума целевой функции подчиненного несовместимо с требованием согласования интересов:

$$\arg \max_u J_u \subset U_u \setminus U_v \neq \emptyset.$$

3. Значение целевых функций ЛПР и подчиненного не уменьшается с ростом значения каждого компонента вектора действий подчиненного:

$$\frac{\partial g_v^t}{\partial u_j^t} \geq 0, \frac{\partial g_u^t}{\partial u_j^t} \geq 0, j = \overline{1, n}, t = \overline{1, T}.$$

4. Функцию для ЛПР можно представить в виде:

$$g_v^t(p^t, q^t, u^t) = g_1^t(p^t, u^t) - g_2^t(p^t, q^t),$$

где g_1^t – функция «выигрыша»;

g_2^t – функция «затрат» на преодоление контригры со стороны подчиненного.

При этом:

$$\frac{\partial g_1^t}{\partial p_i^t} \geq 0, \frac{\partial g_2^t}{\partial p_i^t} \geq 0, i = \overline{1, m};$$

$$\frac{\partial g_2^t}{\partial q_j^t} \geq 0, t = \overline{1, T}.$$

Таким образом, «выигрыш» ЛПР уменьшается с ростом «жесткости» ограничений в методе принуждения.

5. Если p_n, p_n – соответственно функции «поощрения» и «наказания» подчиненного со стороны ЛПР в методе «побуждение», а q_n, q_n – те же функции в методе «принуждение»:

$$\forall q \in Q \quad U(q^n) \subseteq U(q) \subseteq U(q^n),$$

тогда:

$$\forall t = \overline{1, T}, \quad q_2^t(p^n, q^n) = 0, \quad \lim_{p_i^t \rightarrow p_i^n} g_2^t(p^t, q^t) = \lim_{q_j^t \rightarrow q_j^n} g_2^t(p^t, q^t) = \infty.$$

Во всех рассмотренных ситуациях возникает задача кооперации субъектов с целью достижения главной цели – оптимальной эффективности аэропорта, в состав которого они входят. Поэтому целесообразно исследовать возможные пути реализации различных действий по управлению ЛПР при выполнении работ по обеспечению производственной деятельности аэропорта с использованием ЕИПОТП.

Считаем, что в процесс обеспечения производственной деятельности аэропорта вовлечены N субъектов, их структурные подразделения или отдельные сотрудники. Будем рассматривать различные коалиции, то есть подмножества $K \subseteq N$, в том числе одноэлементные коалиции $\{i\}$ и максимальную коалицию N .

Определим функцию $v: 2^N \rightarrow R$, которая удовлетворяет условиям:

$$v(\emptyset) = 0 \text{ и } \forall K, L \subseteq N, \\ (K \cap L = \emptyset),$$

$$v(K) + v(L) \leq v(K \cup L)$$

и называется характеристичной функцией и к тому же порождает игру:

$$\Gamma_v = \langle N, v \rangle.$$

Значение функции $v(K)$ (для одноэлементных коалиций будем использовать значение $v(i)$) интерпретируется как «прибыль» коалиции K . Так как основной целью теории игр является распределение «прибыли» максимальной коалиции $v(N)$ между всеми игроками, потому что распределение $x = (x_1, \dots, x_n)$ удовлетворяет условиям:

$$\forall i \in N, \quad x_i \geq v(i) \text{ (индивидуальная рациональность);}$$

$$\sum_{i \in N} x_i = v(N) \text{ (оптимальность по Паретто),}$$

тогда x называется распределением «прибыли». Выполнение условий распределения считается минимальным требованием рациональности распределения $v(N)$. Поскольку множество распределений $I(v)$ кажется слишком

широким, необходимы дополнительные принципы оптимальности, которые бы позволили усилить требования к выбору наиболее рациональных распределений. Распределение x доминирует над распределением y в коалиции K , если проявляются следующие свойства:

$$\begin{aligned} \forall i \in K \quad x_i > y_i; \\ \sum_{i \in K} x_i \leq v(K) \end{aligned}$$

В этом случае говорят просто, что распределение x доминирует над распределением y . Множество всех недоминирующих распределений $C(v)$ игры Γv называют ее C -ядром:

$$x \in C(v) \Leftrightarrow \forall K \subseteq N, \sum_{i \in K} x_i \geq v(K)$$

Другой принцип оптимальности позволяет выделить как решение игры единой распределение (вектор Шепли)

$$\Phi(v) = (\Phi_1(v), \dots, \Phi_n(v)),$$

Компоненты которого вычисляются по формуле:

$$\begin{aligned} \Phi_i(v) &= \sum_{i \in K} \gamma(k) [v(K) - v(K \setminus \{i\})] \\ \gamma(k) &= \frac{(n-k)!(k-1)!}{n!}, \quad k = |K|, n = |N| \end{aligned}$$

Значительное количество аэропортов в мире уже работают на пределе своих возможностей, и в большинстве случаев ситуация в дальнейшем будет только ухудшаться. Но, как показали исследования, расширить узкие места в работе аэропорта и тем самым увеличить его пропускную способность можно при использовании ЕИПОТП в качестве инструмента решения задач по функционированию аэропорта.

Для оптимизации использования ЕИПОТП руководство аэропорта может применять по отношению к «подчиненным» различные методы «принуждение», «побуждение», «убеждение» или их объединения. При этом одной из основных целей руководства аэропорта является создание оптимального механизма использования ЕИПОТП с целью минимизации информации, которая в ней функционирует, что в свою очередь связано с минимизацией материальных и финансовых затрат на единицу выполненной работы.

Система управления воздушным движением, включающая в себя модуль мониторинга беспилотных транспортных средств относится к критической информационной инфраструктуре, в которой особое значение придается

решению вопросов информационной безопасности, в частности, расследованию инцидентов в таких системах.

3.4 Метод расследования инцидентов в системах критической информационной инфраструктуры

Обнаружение случаев нарушения безопасности и отслеживание всех действий злоумышленника после обнаружения может являться сложной задачей¹¹⁷. Однако, такой продукт, как Elastic Stack, может быть использован для обнаружения нарушений безопасности и проведения расследования того, кто, когда и как получил несанкционированный доступ к информационной системе организации. Elastic Stack может определить источник угроз нарушений безопасности.

Первый этап: сбор данных. Сбор информации из журналов можно осуществить с помощью специальных систем доставки данных, называемых Beats (в частности, Winlogbeat для журналов событий Windows и Packetbeat для сетевых данных).

На втором этапе Kibana предоставляет слои визуализации и исследования данных для выявления потенциальной злонамеренной активности, позволяя аналитикам безопасности анализировать и «развертывать» данные по мере необходимости, чтобы отслеживать потенциальную угрозу.

Используя модуль «anomaly explorer», аналитики безопасности могут детальнее изучить аномалии: увидеть, где они произошли, когда они произошли, и серьезность проблемы. Используя модуль машинного обучения (machine learning influencer) можно увидеть, как аналитик безопасности может определить: какие хосты и домены принимали участие во время инцидента. Функции визуализации временных рядов в Kibana могут создавать динамические представления помеченных событий, таких как успешные входы анонимных пользователей. Оттуда Аналитики безопасности также могут получить информацию о том, был ли получен доступ к файлам honey (конфиденциальным или критическим файлам в системе), анализировать сетевой трафик на предмет

¹¹⁷ Гришин И.Ю., Тимиргалеева Р.Р., Чертоганов К.А. Технологии комплексного информационно-навигационного обеспечения и мониторинга рекреационных территорий юга России // Материалы V Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2018. С. 757–760.

взаимодействия между хостами, определять, какие пользователи осуществляли эту деятельность, и находить потенциального нарушителя.

Для аналитиков безопасности, работающих над обнаружением вторжений, скорость расследования инцидента является ключевой¹¹⁸. Используя вместе, такие продукты как: Elasticsearch, Kibana, Beats и Logstash можно получать детальные отчеты об аномалиях, в краткие сроки расследовать инцидент и вести мониторинг сетевой инфраструктуры критической информационной системы в режиме реального времени.

Обнаружение реальной активности злоумышленников в КИИ является довольно кропотливой работой. Elastic Stack может использоваться для обнаружения инцидентов информационной безопасности, и также позволяет сделать расследование инцидента после обнаружения так, чтобы увидеть, как злоумышленник вошел в систему и какой вектор атаки хочет использовать.

Архитектура мониторинга безопасности представлена сетевыми устройствами (серверы и АРМ станции), на которых установлены специальные системы доставки данных Beats, в частности WinLogBeat (собирает все события Windows журналы) и Packetbeat (собирает все сетевые пакеты). Все эти данные поступают в Logstash, где они преобразуются в вид доступный для получателя, индексируются в системе Elasticsearch (база данных), а затем как следствие, визуализируются в системе Kibana. Различные графические диаграммы позволяют вести оперативно расследование инцидента. Это происходит следующим образом: например, аналитик безопасности получает сообщение из модуля машинного обучения системы Kibana (machine learning influencer), которое предупреждает, что возможна попытка эксфильтрации DNS в домен.

Для более детального исследования инцидента можно перейти по ссылке тревожного сообщения. В это время модуль машинного обучения ищет необычно высокое содержание информации на фиде субдомена трафика DNS. Чтобы узнать, что еще происходило на конкретном хосте (HR02), нужно переключиться на приборную панель Kibana, которая настроена на просмотр событий журнала Windows. На аналитической панели Kibana следует отфильтровать данные по двум влияющим факторам, которые были обнаружены в ходе исследования аномалии, в результате расследования инцидента (covert.com и HR02).

Продолжая просматривать аналитическую панель Kibana можно получить представление о том, что происходит на машине CEO. В ходе данного

¹¹⁸ Grishin I., Timirgaleeva R. The application of artificial intelligence methods for forming industry management systems // CEUR Workshop Proceedings. 1. Сер. "Selected Papers of the 1st International Scientific Conference Convergent Cognitive Information Technologies, Convergent 2016. 2016. P. 115-120.

исследования были замечены множество активности получения доступа, а также то, что критический файл, был доступен на хосте CEO пользователю wgrimes. Таким образом, приходим к выводу, что ELK Stack может быть использованы для сбора всех журналов безопасности, а затем загрузить их и в одно место, чтобы в дальнейшем оперативно расследовать инцидент информационной безопасности в сети КИИ. Аналитик безопасности получает возможность взаимодействовать с данными и делать выводы в краткие сроки делать это быстро, что может быть важно для обеспечения безопасности КИИ, где время при наступлении инцидента имеет существенное значение.

ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

- 4.1 Адаптивное управление параметрами режима сопровождения многофункционального радиолокационного комплекса в условиях нестационарности канала измерения*
- 4.2 Особенности мониторинга движения беспилотных летательных аппаратов на основе информации от разнородных датчиков в многопозиционном режиме*
- 4.3 Поисковая система для решения задач управления на основе генетического алгоритма с оператором мутации k -средних*

4.1 Адаптивное управление параметрами режима сопровождения многофункционального радиолокационного комплекса в условиях нестационарности канала измерения

Радиолокационная система обладает ограниченными возможностями по получению и преобразованию информации о потоках объектов (целей). Эти ограничения определяются в основном конечными значениями ее энергетических и информационных ресурсов. Существенным резервом повышения эффективности работы многофункционального радиолокационного комплекса (МФ РЛК) является оптимизация управления ее параметрами при реализации каждого функционального режима¹¹⁹. Применительно к режиму сопровождения целью управления обычно служит повышение точности оценки координат сопровождаемых объектов, а также снижение временных и энергетических затрат, что, в свою очередь, приводит к повышению пропускной способности РЛК.

¹¹⁹ Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Радио и связь, 1986. 352 с.

В ряде работ^{120 121} рассмотрены основные подходы к организации сопровождения объектов, которые учитывают нестационарность модели движения объектов или статистических характеристик канала измерения координат, однако комплексного решения проблемы авторами предложено не было.

В работе¹²² рассмотрена задача управления ресурсами в многопозиционных радиолокационных системах. На основе иерархической системы управления авторы рассматривают уровень управления, на котором осуществляется перераспределение активных радиолокаторов, в зависимости от рабочей ситуации в зоне ответственности системы, и предлагают неоптимальное решение задачи оптимизации для минимизации использования радиолокационного ресурса.

Применению многопозиционной системы для обнаружения космического мусора посвящена работа¹²³, в которой авторы предлагают решать указанную задачу путем применения расширенных антенных полей. Следует отметить, что авторами опубликована серия статей, направленных на решение рассматриваемой проблемы, однако в них изучены проблемы обнаружения частиц космического мусора, обладающих малыми ЭПР (эффективными поверхностями рассеивания), при этом вопросам управления энергетическими ресурсами комплекса уделено недостаточно внимания.

Вопросам управления функционированием радиолокационного комплекса посвящен ряд работ, в которых были получены результаты, позволяющие синтезировать алгоритмы управления такими, базирующиеся на оптимальных методах, однако их применение в системах управления реального времени очень затруднено поскольку они требуют значительных вычислительных ресурсов, которыми управляющие ЭВМ обычно не обладают.

¹²⁰ Конторов Д.С., Голубев-Новожилов Ю.С. Введение в радиолокационную системотехнику. М.: Сов. радио, 1971. 368 с.

¹²¹ S.F. Telenik and I.Yu. Grishin "Analysis of modern algorithms for secondary information processing in statistical measurement information systems", News of the Volodymyr Dahl Ukrainian National National University, vol. 1(131), part 2, 2009, pp. 145-155.

¹²² I. Prokopenko, V. Vovk and K. Prokopenko, "Fast resource management algorithm for multi-position radar systems," 2015 16th International Radar Symposium (IRS), Dresden, 2015, pp. 1045-1051.

¹²³ A.I. Baskakov, A.A. Komarov, and A.V. Ruban, "Estimation of the energy characteristics of a multi-position radar system for the control of small-sized space debris for various orbital zones," 2018 Progress in electromagnetics research symposium, pp. 470-475, August 01-04, 2018.

В фундаментальной работе¹²⁴, а также ей предшествующей¹²⁵, рассмотрены все основные проблемы, которые возникли при переходе к цифровым методам радиолокации (первичная, вторичная и третичная обработка информации, управление, передача информации и т.п.), а также направления их решения. Однако здесь больше уделено вниманию теоретическим подходам к решению фундаментальных проблем цифровой радиолокации, а направлениям практического применения предложенных методов уделено недостаточно внимания.

Вопросам анализа существующих подходов к построению алгоритмов управления радиолокационными ресурсами уделено внимание в работе¹²⁶, однако следует отметить, что случаи нестационарности в каналах измерения почти не рассматривались авторами.

Целью данной части исследования является разработка метода адаптивного управления темпом локации сопровождаемых объектов в зависимости от степени неопределенности в знании динамики движения, уровня шумов в канале измерения, а также временного ресурса, выделенного на сопровождение.

В качестве параметров режима сопровождения примем длительность такта измерения положения i -той сопровождаемой цели τ_i и частоту повторения этих тактов F_i .

Распределение времени работы МФ РЛК при сопровождении N целей с одновременной реализацией одного или нескольких других функциональных режимов представимо в виде:

$$\sum_{i=1}^N E_i = E_c \quad (1)$$

где E_i ресурс времени (т.е. часть времени в течение интервала $[0, T]$), выделяемый на измерение координат i -той сопровождаемой цели;

E_c - ресурс времени РЛС, выделяемый на реализацию функционального режима сопровождения.

Ресурс времени E_i состоит из тактов измерения положения i -той сопровождаемой цели длительностью τ_i , которые повторяются с частотой F_i :

$$E_i = \tau_i F_i \quad (2)$$

¹²⁴ Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. Киев: КВЦ, 2000. - 428 с.

¹²⁵ S.Z. Kuzmin, T.V. Baringoltz, Iu.V. Datsenko, "The strategy of distribution of the energy resource in multipurpose radar systems with FAR", Int. sci. tech. conf Modern radiolocation, 1994.

¹²⁶ Zhen Ding, "A survey of radar resource management algorithms", Electrical and Computer Engineering 2008. CCECE 2008. Canadian Conference on, no. 4-7, pp. 1559-001564, May 2008.

Будем полагать, что процесс изменения измеряемой координаты сопровождаемой цели описывается линейным стохастическим дифференциальным уравнением вида:

$$\dot{x}(t) = ax(t) + \omega(t), \quad (3)$$

где $x(t)$ - измеряемая координата;

$\omega(t)$ - белый центрированный гауссовский шум с дисперсией σ_0^2 .

При реализации процесса сопровождения проводятся измерения фазовой координаты x , уравнение измерений представимо в виде:

$$z(t) = x(t) + v(t), \quad (4)$$

где $v(t)$ - белый центрированный гауссовский шум с дисперсией σ_v^2 .

Условимся, что основные временные соотношения исследуемого процесса таковы, что интервал времени длительностью является тактом измерения, а величина определяется через частоту повторения тактов измерения как $T_s = 1/F$.

В результате измерения в конце такта образуется дискретное измерение фазовой переменной, которое запишем в виде:

$$z_n = x_n + \Delta z_n, \quad (5)$$

где n - номер такта измерения;

Δz_n - белый центрированный гауссовский шум с дисперсией $\sigma_z^2 = \sigma_v^2 / \Delta\tau$, $\Delta\tau = \tau_T - \tau_0$, а величина τ_0 является непроизводительными (с точки зрения процесса определения параметров положения сопровождаемого объекта) потерями в такте измерения.

Традиционным способом управления РЛК в режиме сопровождения является априорный расчет τ_i и F_i (а следовательно, и E_i), удовлетворяющих принятым критериям качества управления, и сопровождение объекта в зоне ответственности РЛК с выбранными постоянными значениями τ_i и F_i . Такой способ функционирования неэффективен, так как оптимальное соотношение между длительностью тактов τ_i и частотой их повторения F_i при фиксированном значении E_i зависит от соотношения между уровнем шумов в канале измерений и динамическими характеристиками цели (уровнем шумов в модели объекта), которые могут существенно меняться по мере движения объекта в зоне обзора РЛК. Действительно, при больших уровнях шумов в канале измерений ошибки сопровождения можно уменьшить, увеличивая длительность излучаемых сигналов (или, что тоже самое, увеличивая длительность такта измерения). С другой стороны, при больших уровнях шумов в модели сопровождаемой цели

уменьшение ошибки сопровождения может быть достигнуто за счет проведения более частых измерений¹²⁷ (т.е. путем повышения частоты повторения тактов за счет уменьшения их длительности).

Кроме того, выбор постоянных значений τ_i и F_i означает применение постоянного темпа локации сопровождаемых объектов, что в ряде случаев не обеспечивает полного использования информационных возможностей РЛК.

Таким образом, задача состоит в выборе оптимальных значений длительности такта измерения τ_T и частоты повторения F , связанных между собой условием (2) (здесь и далее индексы « i » для сокращения записи опущены). Критерием качества управления будем считать величину экстраполированной ошибки оценки положения сопровождаемой цели.

Уравнение динамики системы (3) и уравнение дискретных измерений (5) соответствуют условиям проведения оптимальной линейной фильтрации случайных процессов¹²⁸. Следовательно, связь между дисперсиями ошибок априорной и апостериорной оценок в n -том такте измерения определяется как:

$$\Sigma_n^+ = (1 - K_n) \Sigma_n^- , \quad (6)$$

где Σ_n^+ - дисперсия ошибки апостериорной оценки фазовой координаты;

Σ_n^- - дисперсия ошибки априорной оценки;

K_n - коэффициент усиления фильтра, причем

$$K_n = \Sigma_n^- [\Sigma_n^- + \sigma_z^2]^{-1} , \quad (7)$$

Подставив (7) в (6), получим зависимость апостериорной ошибки от ее априорного значения и дисперсии шума дискретных измерений:

$$\Sigma_n^+ = (\Sigma_n^- \sigma_z^2) / (\Sigma_n^- + \sigma_z^2) . \quad (8)$$

Выбор оптимального темпа локации сводится к выбору момента проведения следующего измерения. Примем за время экстраполяции интервал между измерениями T . Тогда дисперсия экстраполированной оценки будет равна дисперсии априорной ошибки оценки перед проведением $(n+1)$ -го измерения Σ_{n+1}^- , которая, в свою очередь, для системы (3), (5) рассчитывается как¹²⁹:

$$\Sigma_{n+1}^- = \Sigma_n^+ \exp(2aT) + (\sigma_0^2 / 2a) [\exp(2aT) - 1] \quad (9)$$

¹²⁷ Кузьмин С.С. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Радио и связь, 1986. 352 с.

¹²⁸ I. Prokopenko, V. Vovk and K. Prokopenko, "Fast resource management algorithm for multi-position radar systems," 2015 16th International Radar Symposium (IRS), Dresden, 2015, pp. 1045-1051.

¹²⁹ A.I. Baskakov, A.A. Komarov, and A.V. Ruban, "Estimation of the energy characteristics of a multi-position radar system for the control of small-sized space debris for various orbital zones," 2018 Progress in electromagnetics research symposium, pp. 470-475, August 01-04, 2018.

В качестве дополнительного условия используем требование устойчивости сопровождения объектов (стационарности режима сопровождения), т.е. требование равенства величины дисперсии априорных ошибок перед каждым измерением:

$$\Sigma_n^- = \Sigma_{n+1}^- = \Sigma_s. \quad (10)$$

С учетом (8) и (9) может быть найдено решение уравнения (10) относительно Σ_s и записано выражение для критерия качества сопровождения в виде:

$$\begin{aligned} \Sigma_s = & 0.5 [\exp(2a/F) - 1] [\sigma_z^2 + \sigma_0^2 / 2a] + \\ & + [\exp(2a/F) - 1]^2 [\sigma_z^2 + \sigma_0^2 / 2a]^2 + \\ & + (2\sigma_z^2 \sigma_0^2 / a) [\exp(2a/F) - 1]^{1/2}. \end{aligned} \quad (11)$$

Выражение (11) можно существенно упростить в предположении, что интервал между измерениями T много меньше постоянной времени системы a , т.е. $F \gg a$. При этом, используя представление экспоненциальной функции степенным рядом, получим:

$$\begin{aligned} \Sigma_s = & (2\sigma_z^2 a + \sigma_0^2) / 2F + \\ & + \left[(2\sigma_z^2 a + \sigma_0^2)^2 / 4F^2 + \sigma_z^2 \sigma_0^2 / F \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (12)$$

ИЛИ

$$\begin{aligned} \Sigma_s = & \frac{2\sigma_v^2 a \tau + \sigma_0^2 (\tau - \tau_0) \tau}{2E (\tau - \tau_0)} + \\ & \left[\frac{(2\sigma_v^2 a \tau + \sigma_0^2 (\tau - \tau_0) \tau)^2}{4E (\tau - \tau_0)^2} + \frac{\sigma_v^2 \sigma_0^2 \tau}{E (\tau - \tau_0)} \right]^{1/2}. \end{aligned} \quad (13)$$

Зависимость дисперсии априорных ошибок перед измерениями от величины длительности зондирующего сигнала τ_T приведена на рис. 4.1.

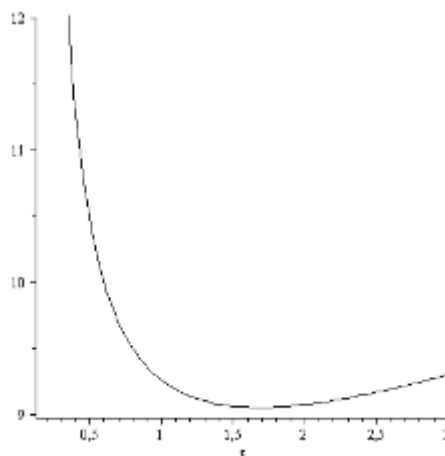


Рисунок 4.1 – Зависимость дисперсии априорных ошибок перед измерениями от величины длительности зондирующего сигнала ($E = 20$; $\tau_0 = 0,1$; $\sigma_v = 5$; $\sigma_0 = 2$; $a = 1$)

Из анализа рис.4.1 делаем вывод о наличии оптимальной длительности зондирующего сигнала. Для поиска значения оптимальной величины τ_T , доставляющей *min* критерию (13), продифференцируем это выражение по τ_T . В результате получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} \frac{d\Sigma_2}{d\tau} = & -\frac{1}{2E(\tau-\tau_0)^3} \left(-\sigma_0^4 \tau^4 + \right. \\ & + (3\sigma_0^4 \tau_0 - 2a\sigma_v^2 \sigma_0^2 - \sigma_0^2) \tau^3 + \\ & + 3(\sigma_0^2 \tau_0 - \sigma_0^4 \tau_0^2 + 2a\sigma_v^2 \sigma_0^2 \tau_0) \tau^2 + \\ & + (-3\sigma_0^2 \tau_0^2 + 2a\sigma_v^2 \tau_0 + 2\sigma_v^2 \sigma_0^2 \tau_0 - \\ & - 4a\sigma_v^2 \sigma_0^2 \tau_0^2 + \sigma_0^4 \tau_0^3 + 4a^2 \sigma_v^4 \tau_0) \tau - \\ & \left. - 2a\sigma_v^2 \tau_0^2 - 2\sigma_v^2 \sigma_0^2 \tau_0^2 + \sigma_0^2 \tau_0^3 \right). \end{aligned} \quad (14)$$

Графически зависимость (14) представлена на рис. 4.2. Из анализа видно, что физически реализуемым значениям τ_T ($\tau_T \geq \tau_0$) соответствует только одно нулевое значение производной.

Приравняв значение производной к нулю и решив полученное уравнение $\frac{d\Sigma_2}{d\tau} = 0$ при заданных значениях дисперсий шумов в модели динамики сопровождаемой цели σ_0^2 и канале измерений σ_v^2 , выделенного на сопровождение конкретной цели временного ресурса E и величины непроизводительных потерь времени τ_0 в такте измерения, можно получить значение оптимальной длительности такта измерения τ_T и через уравнение (2) - оптимальную частоту повторения измерений F . Например, при рассматриваемых ранее значениях указанных параметров $\tau^{opt} = 1,68$ с.

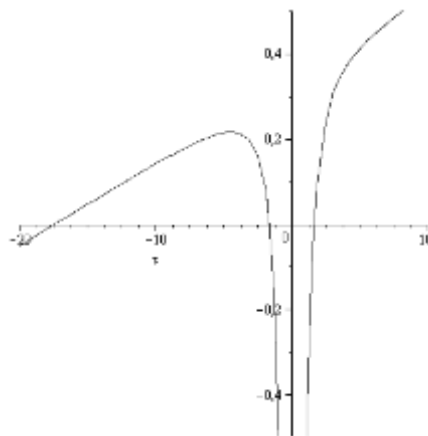


Рисунок 4.2 – Зависимость производной $\frac{d\Sigma_2}{d\tau}$ от величины длительности зондирующего сигнала ($E = 20$; $\tau_0 = 0,1$; $\sigma_v = 5$; $\sigma_0 = 2$; $a = 1$)

В результате проделанной работы получено решение задачи оптимизации параметров режима сопровождения радиолокационного комплекса, которое сводится к выбору оптимальных моментов проведения измерений и оптимальной длительности каждого измерения, т.е. к выбору оптимального (в общем случае переменного) темпа локации. Отличие полученных результатов от ранее известных заключается в том, что предложенный подход определяет (с учетом принятой терминологии) адаптивное управление темпом локации (частотой повторения и длительностью тактов измерения положения сопровождаемой цели) в зависимости от степени неопределенности в знании динамики цели и уровня шумов в канале измерений, а также временного ресурса, выделенного на сопровождение цели.

4.2 Особенности мониторинга движения беспилотных летательных аппаратов на основе информации от разнородных датчиков в многопозиционном режиме

В последнее время, благодаря своему повсеместному использованию, беспилотные летательные аппараты (БПЛА) играют важную роль в Интернете вещей (IoT) и умном городе, который представляет собой видение развития современных городов для интеграции информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) и IoT в безопасные технологии для управления городскими активами. Однако есть много проблем, которые необходимо преодолеть перед развертыванием группировки БПЛА. Эти проблемы включают в себя не только технические вопросы, но и вопросы регулирования^{130 131}.

Ожидается, что БПЛА будут играть важную роль в будущих «умных» городах, например, поставляя товары и товары, выступая в качестве мобильных точек доступа для широкополосного беспроводного доступа и поддерживая наблюдение и безопасность¹³². Поэтому необходима надежная и безопасная среда для качества и стабильности работы БПЛА.

¹³⁰ Lai Wei-Hsiang, Lai Ying-Chih, Lan Zao-Sin, Lin Hsiao-Hung, Ho Wei-Kuang. Development of an Internet of Things System Based on Unmanned Aerial Vehicles for the Application of Smart Security from Sky // Journal of Aeronautics Astronautics and Aviation, Jun 2018, v. 50, iss. 2, PP. 135–146. Doi 10.6125/JoAAA.201806_50(2).03.

¹³¹ Grishin I.Y and Timirgaleeva R.R. “Air navigation: Optimisation control of means cueing of the air-traffic control system”, Conference of Open Innovation Association FRUCT, 2018, pp. 134–140.

¹³² Guevenc, Ismail, Koohifar, Farshad, Singh, Simran, Sichitiu, Mihail, Matolak, David. Detection, Tracking, and Interdiction for Amateur Drones // IEEE Communications Magazine, Apr 2018, v. 56, iss. 4, PP. 75–81. Doi 10.1109/MCOM.2018.1700455.

Для правительств также важно внедрить нормативные акты, обеспечивающие соблюдение стандартов безопасности и не позволяющие применять слабые меры кибербезопасности в реальных условиях. Федеральное авиационное управление (ФАУ) предсказало, что 30 000 беспилотников могут летать в небе США менее чем через 20 лет. Для исследования безопасности движения беспилотников и разработки интеллектуальной транспортной системы нужны модели, которые описывают последовательно процессы движения беспилотников в потоке трафика¹³³.

Имеются исследования, направленные на обеспечение стабильных условий полета беспилотников в пределах ограниченного городского района с использованием модели ИКАО (Международная организация гражданской авиации), которая применяется для оценки устойчивости гражданских воздушных судов. Результаты исследования обобщаются следующим образом.

Во-первых, для того, чтобы беспилотники летали стабильно, горизонтальное безопасное расстояние разноса между одним БПЛА и другим должно быть не менее 1852м.

Во-вторых, если предположить, что в пределах 1852 м от горизонтального пространства нет препятствий, два беспилотника могут летать на разных эшелонах. При наличии таких препятствий, как здания, невозможно обеспечить расстояние в 1852 м между БПЛА.

В-третьих, анализ чувствительности указывает на то, что интервал эшелонирования беспилотной авиации оказывает наибольшее влияние на целевой уровень безопасности¹³⁴.

В работе¹³⁵ китайских авторов утверждается, что для устранения задержек рейсов и рисков, связанных с прогнозируемым увеличением объема воздушного движения, необходимо увеличить пропускную способность систем управления воздушным движением. Это должно основываться на объективных измерениях сложности ситуации в воздушном пространстве. В статье предложен новый подход для измерения сложности ситуации с воздушным движением. Этот подход учитывает влияние как воздушного пространства, так и транспортного потока, и объективно оценивает сложность ситуации с воздушным движением.

¹³³ Kim, Hong-Bae. Identification of Key Elements for Stable Flight of Drones and Horizontal Space Compartment in Urban Area // Journal of Korea Planning Association, 2018, v. 53, iss. 7, PP. 39–48.

¹³⁴ Там же

¹³⁵ H. Wang, Z. Song, and R. Wen. Modeling Air Traffic Situation Complexity with a Dynamic Weighted Network Approach. Journal of Advanced Transportation, 2018, article number UNSP 5254289.

В работе¹³⁶ авторов данного исследования были рассмотрены основные аспекты оптимизации управления многопозиционными радиолокационными комплексами на этапе радиолокационного сопровождения воздушных судов на трассах полета либо в зоне аэропорта. Показано, что предложенные методы оптимизации управления позволяют существенно повысить пропускную способность радиолокационных комплексов, что позволяет сократить их требуемое количество в системе УВД.

Аналогичный подход предложено применить и для обеспечения безопасности полетов БПЛА, поскольку заданное стандартами ИКАО расстояние между БПЛА невозможно обеспечить, то необходимо значительно точнее измерять их траекторные параметры движения для обеспечения управления такими аппаратами в автоматическом режиме.

В качестве источников информации о параметрах движения БПЛА могут использоваться радиолокационные станции, лазерные локаторы, станции пассивной локации, размещенные в разных точках города и объединенные в единый многопозиционный локационный комплекс^{137 138}, позволяющий, при использовании соответствующих алгоритмов обработки получаемой информации, оценить параметры движения с меньшими ошибками^{139 140} и обеспечить более плотный поток БПЛА, обладающий свойством безопасности. Авторами предложен метод объединения информации от разнородных источников, позволяющий существенно снизить ошибки оценивания параметров движения БПЛА.

Для выделения опасных БПЛА могут быть использованы методы и модели кластеризации. Один из таких методов рассмотрен далее.

¹³⁶ Grishin I.Y and Timirgaleeva R.R. “Air navigation: Optimisation control of means cueing of the air-traffic control system”, Conference of Open Innovation Association FRUCT, 2018, pp. 134–140.

¹³⁷ Теленик С.Ф., Гришин И.Ю. Анализ современных алгоритмов вторичной обработки информации в статистических измерительных информационных системах // Вестник Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля. 2009. № 1 (131). Ч.2. С.145–155.

¹³⁸ Гришин И.Ю. Оптимизация управления многопозиционным радиолокационным комплексом // Тезисы докладов 2–й Всесоюзной научно–технической конференции по распространению миллиметровых радиоволн. Туапсе, 1991. С. 48–49.

¹³⁹ Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник / Под ред. Я.Д. Ширмана. М.: ЗАО «Маквис», 1998. 828 с.

¹⁴⁰ Гришин И.Ю. Актуальные проблемы оптимизации управления в технических и экономических системах: Монография / И.Ю. Гришин. Ялта: РИО КГУ, 2010. 252 с.

4.3 Поисковая система для решения задач управления на основе генетического алгоритма с оператором мутации k-средних

В современном мире одним из наиболее важных ресурсов является информация, а информационный поиск является неотъемлемой частью жизнедеятельности миллиардов людей. Однако сегодня объемы информации, хранимой в цифровом формате, настолько велики, что использование классических методов поиска может отнимать достаточно большое количество времени. Примером может послужить часть работы менеджеров: поиск клиентов с помощью сети Интернет, навигация по неструктурированной документной базе, поиск наиболее опасных по определенным критериям летательных аппаратов.

В виде проблемы информационный поиск начал оформляться еще в XIX веке. При этом, несмотря на современное техническое обеспечение, проблема до сих пор не решена окончательно, особенно, когда речь идет о потребности в больших объемах информации. Само по себе наличие проблемы свидетельствует об актуальности исследований в рассматриваемой области.

Сегодня проблемы обработки, хранения и использования информации решаются на уровне государства, о чем свидетельствует принятие и реализация национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации»^{141 142}. Программа направлена на осуществление комплексной цифровой трансформации экономики и социальной сферы России, в связи с чем многократно возрастут объемы обрабатываемых данных. Данный тезис формулирует еще один аргумент в подтверждение актуальности данной части исследования.

Теоретическая ценность данной части исследования состоит в синтезе модифицированного генетического алгоритма, в котором оператор мутации построен на основе метода k-средних. В ходе исследования было установлено, что на данный момент существует лишь одна свободно распространяемая система, работающая аналогичным образом – «Yipru». Однако она не всегда работает корректно с русским языком. Исследование направлено на построение русскоязычной системы, в чём и заключается практическая ценность.

¹⁴¹ Тимиргалеева Р.Р., Гришин И.Ю. Цифровые технологии в организации эффективной деятельности финансово-кредитных учреждений // Развитие финансов, бухгалтерского учёта и аудита в современных концепциях управления. Материалы I международной научно-практической конференции. 2018. С. 86-88.

¹⁴² Grishin I., Timirgaleeva R. The Digital Economy of the Region: a Distributed Infrastructure of the Industry Ecosystem // Conference of Open Innovations Association, FRUCT. 2019. V. 24. P. 624-631.

Анализ литературы показал, что на данный момент существует достаточно много алгоритмов кластеризации данных^{143 144 145}, однако каждый из них обладает собственным недостатком (необходимость задания количества кластеров, соотношение сложность/качество, недетерминированная реакция на различную топологию данных). По мнению авторов, генетический алгоритм¹⁴⁶, как эвристический метод, поможет сгладить некоторые из них. В качестве основы был выбран гибрид генетического алгоритма и метода k-средних¹⁴⁷.

Нашим направлением информационного поиска является кластеризация типов летательных аппаратов, цель которой – их автоматическое разбиение на похожие группы. В отличие от классификации, никакие признаки этих групп не известны заранее. С другой стороны, кластеризация, известная также как задача кластерного анализа, относится к классу проблем обучения без учителя.

Применяя методы кластерного анализа можно решать такие задачи, как построение типологий или классификаций, исследование зависимостей в данных для группировки по общим признакам, проверка истинности утверждений относительно выделенных групп в данных¹⁴⁸.

Существуют различные типологии методов кластеризации. По типу входных данных можно выделить алгоритмы, принимающие признаковое описание объектов, матрицу сходства или матрицу расстояний между объектами. Относительно используемых методов бывают алгоритмы, основанные на вероятностном подходе (K-средних, EM-алгоритм, семейство FOREL, дискриминантный анализ), использующие в качестве основы средства искусственного интеллекта (нейронные сети, генетический алгоритм, нечеткая

¹⁴³ Бондарев Я. А. Кластеризация текстовых документов на основе генетического алгоритма // Материалы XXVI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов - 2019". Севастополь: 2019.

¹⁴⁴ Картиев С.Б., Курейчик В.М. Разработка и исследование алгоритма решения задачи кластеризации для осуществления вопросно-ответного поиска в информационно-аналитической системе прогнозирования // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 7 (180). С. 18-28.

¹⁴⁵ Чекина А.В. Генетическая кластеризация технической документации в проектной репозитории САПР // Тринадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием. Труды конференции. 2012. С. 82-89.

¹⁴⁶ Бондарев Я. А. Кластеризация текстовых документов на основе генетического алгоритма // Материалы XXVI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов - 2019". Севастополь: 2019.

¹⁴⁷ Krishna K., Narasimha M. Murty Genetic K-Means Algorithm // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1999. V. 3.

¹⁴⁸ Картиев С.Б., Курейчик В.М. Разработка и исследование алгоритма решения задачи кластеризации для осуществления вопросно-ответного поиска в информационно-аналитической системе прогнозирования // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 7 (180). С. 18-28.

кластеризация С-средних) или логический подход (деревья решений). Также известны иерархические и теоретико-графовые подходы¹⁴⁹.

К возможным целям кластеризации относятся проблемы сжатия данных, обнаружения нетипичных объектов или выбросов, понимания данных с помощью выделения кластерной структуры. Для решения данного вопроса сформулируем основные этапы решения. К ним относятся: получение результатов множественного поиска в различных системах, проведение кластеризации и автоматизации определения наиболее подходящих кластеров.

Для кластеризации типов летательных аппаратов предлагаем использовать методы машинного обучения без учителя, в частности, генетический алгоритм. Классический генетический алгоритм (ГА) является мощным инструментом оптимизации, поэтому необходимо представить задачу кластеризации в виде поиска глобального оптимума некоторой целевой функции. Этот метод заключается в итеративном применении генетических операторов. В качестве начального приближения формируется исходная популяция – множество предлагаемых решений. Подобно методу Монте-Карло исходная популяция формируется случайно. Генетические операторы – это операторы селекции, скрещивания и мутации. Процесс останавливается при выполнении некоторого критерия останова^{150 151}.

Будем считать задачу успешно решенной, в случае, когда значение метрики V-measure¹⁵² превышает значение 0,75 и кластеризация выполняется за время меньше $O(N^2)$, где N – количество типов летательных аппаратов.

Так как основой поиска в соответствии с постановкой задачи является алгоритм кластеризации типов летательных аппаратов, то рассмотрим ключевые подходы к решению задачи кластеризации^{153 154}.

Отметим основные критерии оценки пригодности методов для решаемой задачи. С точки зрения конечного пользователя в первую очередь следует

¹⁴⁹ Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. Москва, ООО Издательская фирма "Физико-математическая литература", 2010. 366 с.

¹⁵⁰ Зенкина О.Н., Симонов Н.А. Применение генетических алгоритмов в вопросах оптимизации информационных процессов // Актуальные проблемы гидросферы (диагностика, прогноз, управление, оптимизация и автоматизация). Сборник докладов. 2015. С. 315-323.

¹⁵¹ Семенихин С.В., Денисова Л.А. Автоматизация информационного поиска на базе многокритериальной оптимизации и генетических алгоритмов // Динамика систем, механизмов и машин. 2014. № 3. С. 224-227.

¹⁵² Там же

¹⁵³ Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. Москва, ООО Издательская фирма "Физико-математическая литература", 2010. 366 с.

¹⁵⁴ Тимиргалеева Р.Р., Гришин И.Ю. Цифровые технологии в организации эффективной деятельности финансово-кредитных учреждений // Развитие финансов, бухгалтерского учёта и аудита в современных концепциях управления. Материалы I международной научно-практической конференции. 2018. С. 86-88.

отметить соотношение скорости и точности. Данные параметры являются конкурирующими величинами. Идеальный вариант – возможность выбора соотношения скорости и точности. Также может возникнуть вопрос о «пересекаемости». Достаточно важное условие – количество предварительной информации. Чем меньше входных параметров нужно для кластеризации, тем лучше. Например, необходимость указания количества кластеров.

С другой стороны, необходимо учесть особенности реализации алгоритмов. Будем обращать внимание на возможность использования входных данных разного типа и необходимость обучения алгоритмов.

Необходимо также понимать различия между классификацией и кластеризацией. Классификация – отнесение каждого объекта к классу с заранее известными характеристиками, полученными на этапе обучения, более того, число классов строго ограничено. Кластеризация – разбиение множества типов летательных аппаратов на кластеры – некоторые подмножества исходного множества объектов, количество и свойства которых заранее неизвестны. Из вышеперечисленных алгоритмов, STC разбивает типы летательных аппаратов на неопределенное число кластеров, остальные – требуют задания количества кластеров.

Следующим свойством, в соответствии с которым будем различать алгоритмы, является тип используемых характеристик типов летательных аппаратов.

Введем понятие центроида кластера – вектора, который вычисляется как среднее арифметическое векторов всех типов летательных аппаратов.

Метод LSA/LSI известен достаточно давно как способ поиска латентных связей и применяется в различных сферах науки, основан на принципах факторного анализа и может помочь выявить латентную структуру явлений или объектов. К достоинствам LSA/LSI можно отнести ненадобность обучения. Недостатками являются значительная вычислительная сложность и, в общем случае, отсутствие имен главных факторов, то есть названий кластеров.

На сегодняшний день K-means – самый популярный алгоритм, основанный на последовательной стабилизации центроидов кластеров. Метод состоит из нескольких шагов: выбор начальных центроидов, распределение всех типов летательных аппаратов по кластерам в зависимости от ближайшего центроида, пересчет центроидов кластеров согласно новому разбиению. Алгоритму требуется время порядка $O(n)$, где n – количество летательных аппаратов. Это и является основным достоинством метода K-средних. Также, алгоритм не

нуждается в обучении и достаточно универсален. Недостатком является необходимость задания числа кластеров.

Таким образом, можно сформулировать основные требования к алгоритму кластеризации типов летательных аппаратов:

- сложность не выше $O(n)$;
- отсутствие потребности предопределять количество кластеров;
- возможность работы без предварительного обучения;
- интерпретируемость результатов.

Поставленная задача не может быть решена за полиномиальное время, поэтому применение классических алгоритмов не является целесообразным. В то же время сложность проблемы позволяет прибегнуть к методам машинного обучения. В данной работе предложено использовать генетический алгоритм для решения проблемы кластеризации в указанной выше постановке.

Генетический алгоритм – эвристический алгоритм поиска, который эффективно применяется для решения задач оптимизации и моделирования путем случайного подбора, комбинирования и вариации искомым параметров с использованием механизмов, аналогичных естественному отбору в природе. Этот метод был предложен Дж. Холландом в качестве мощного инструмента оптимизации. Генетический алгоритм относится к классу методов машинного обучения без учителя.

Для применения генетического алгоритма задача должна быть поставлена так, чтобы возможно было представить решение в виде вектора генов – генотипа. Классический генетический алгоритм обычно работает с генотипами фиксированной длины.

Существуют различные методики построения начальной популяции (множества решений). К ним относятся так называемые, стратегия «одеяла», стратегия «дробовика» и фокусировки. Способ «одеяла» представляет собой формирование популяции, которая содержит все возможные решения. Для использования стратегии «дробовика» необходимо рассматривать достаточно большое случайное подмножество решений. Фокусировка заключается в вариации одного наиболее вероятного решения.

Степень приспособленности каждого генотипа, также называемого особью, оценивается с помощью фитнес-функции. Данный механизм показывает, насколько хорошо объект, описываемый генотипом, решает предложенную

задачу. Таким образом, генетический алгоритм направлен на оптимизацию фитнес-функции (функции приспособленности, целевой функции)¹⁵⁵.

Далее популяция подвергается преобразованиям с помощью генетических операторов. В первую очередь, для отбора наиболее приспособленных особей применяется оператор селекции. Существуют различные вариации: селекция с помощью рулетки, турнирная селекция, ранжирование. Для использования метода рулетки необходимо построить распределение вероятности выбора конкретной особи для селекции. Обычно используется отношение фитнес-функции выбранной особи к суммарному значению фитнес-функции на всей популяции.

Следующий этап классического генетического алгоритма – применение оператора мутации. Идея данного шага заключается в предотвращении сходимости алгоритма к локальному оптимуму. По аналогии с миром животных, вероятность мутации, как правило, довольно низка. Самый распространенный вариант описываемого оператора – вариация случайного гена особи. Например, при двоичном кодировании – инверсия случайного бита.

Последним шагом является проверка критерия останова. В качестве такого условия можно выбрать, например, количество итераций, или поколений. Если известна какая-либо информация об исследуемом объекте, рабочим вариантом является сравнение фитнес-функции с какой-либо предварительной оценкой.

Самой сложной с точки зрения объема вычислений частью генетического алгоритма является нахождение фитнес-функции. Однако, принимая во внимание факт независимости вычисления функции приспособленности на разных особях, стоит отметить, что использование параллельных вычислений на данном этапе весьма рационально.

Итак, поскольку одной из задач данной части исследования является оптимизация классического генетического алгоритма, перейдем к рассмотрению внесенных модификаций и синтезу алгоритма, соответствующего основным требованиям, предъявленным выше.

Для четкого понимания необходимости изменения классической структуры генетического алгоритма (ГА) рассмотрим положительные и отрицательные стороны ГА и сравним с требованиями, выдвинутыми выше.

К достоинствам ГА можно отнести использование сочетания вероятностного и детерминированного подходов, рассмотрение сразу нескольких

¹⁵⁵Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. Москва, ООО Издательская фирма "Физико-математическая литература", 2010. 366 с.

точек пространства поиска, а также робастность и устойчивость к локальным оптимумам^{156 157}.

Основными недостатками являются высокая сложность в случае использования нетривиальной фитнес-функции и возможность отсутствия критически точного результата.

Нетрудно заметить соответствие требованиям к алгоритму кластеризации, указанным выше. Среди рассмотренных алгоритмов сложность $O(n)$ имеет алгоритм k -средних, поэтому для снижения сложности генетического алгоритма будем строить гибрид классического генетического алгоритма и метода K -means – генетический алгоритм k -средних (ГКА)¹⁵⁸.

Пусть $\{x_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ – множество объектов и x_{ij} – j -й признак объекта x_i . Для $i = 1, 2, \dots, n$ и $k = 1, 2, \dots, K$ определим

$$w_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{если объект } i \text{ принадлежит кластеру } k; \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

Таким образом, матрица $W = ||w_{ik}||$ обладает следующим свойством:

$$w_{ik} \in \{0,1\} \text{ и } \sum_{k=1}^K w_{ik} = 1 \quad (1)$$

Пусть $c_k = (c_{k1}, c_{k2}, \dots, c_{kd})$ – центроид k -го кластера (d – размерность пространства), причем

$$c_{kj} = \frac{\sum_{i=1}^n w_{ik} x_{ij}}{\sum_{i=1}^n w_{ik}} \quad (2)$$

Далее, введем такие понятия как внутрикластерное расстояние (3) и совокупное внутрикластерное расстояние (4):

$$S^{(k)}(W) = \sum_{i=1}^n w_{ik} \sum_{j=1}^d (x_{ij} - c_{kj})^2, \quad (3)$$

$$S(W) = \sum_{k=1}^K S^{(k)}(W). \quad (4)$$

Величина (4) также известна как квадратичная ошибка. Согласно построению, основной задачей является нахождение матрицы $W^* = ||w_{ik}^*||$, минимизирующей $S(W)$, то есть

$$W^* = \arg \min_W S(W). \quad (5)$$

¹⁵⁶ Щербатов И.А., Беляев И.О. Применение кластерного анализа для обработки документов в информационно-поисковой системе // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2012. № 2. С. 161-166.

¹⁵⁷ Das A.K., Pratihari D.K. A Directional Crossover (DX) Operator for Real Parameter Optimization Using Genetic Algorithm // Applied Intelligence. 2019. V. 49, Iss. 5, P. 1841-1865. DOI: 10.1007/s10489-018-1364-2.

¹⁵⁸ Бондарев Я. А. Кластеризация текстовых документов на основе генетического алгоритма // Материалы XXVI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов - 2019". Севастополь: 2019.

Такой выбор меры обусловлен тем, что алгоритм k -средних является наиболее популярным методом минимизации именно квадратичной ошибки.

Теперь рассмотрим способ кодирования объектов, формирование начальной популяции и генетические операторы.

Кодирование. В нашем случае пространством поиска являются все матрицы W , удовлетворяющие условию (1). Будем использовать K -арный код, то есть представление в виде строки s_W длины n , содержащую числа из множества $\{1, 2, \dots, K\}$. Согласно построению, каждый символ строки присваивает метку кластера объекту x_i . Такой код однозначно декодируем благодаря (1).

Инициализация. Предлагается начальную популяцию P_0 строить случайно. То есть для каждой особи каждый ген выбирается случайно из $\{1, 2, \dots, K\}$. Однако, необходимо учитывать корректность полученных строк. Например, код «111122223333» для $K=4$, то есть кластер с меткой «4» остался пустым. В таком случае необходимо корректировать неверные строки – заменять случайные символы на отсутствующие метки кластеров.

Селекция. Для проведения селекции будем использовать стратегию колеса рулетки. Формально распределение вероятности выглядит следующим образом:

$$P(s_i) = \frac{F(s_i)}{\sum_{j=1}^N F(s_j)}, \quad (6)$$

где $F(s_i)$ – значение фитнес-функции на особи s_i .

Поскольку задачей является минимизация $S(W)$, а реализация метода рулетки подразумевает максимизацию целевой функции, определим некоторые вспомогательные функции.

Пусть $f(s_W) = -S(W)$, $g(s_W) = f(s_W) - (\bar{f} - c \cdot \sigma)$, где \bar{f} и σ – среднее значение и среднеквадратическое отклонение $f(s_W)$ на текущей популяции соответственно, а $c \in [1, 3]$ – константа. Таким образом, мера приспособленности особи s_W выражается как:

$$F(s_W) = \begin{cases} g(s_W), & \text{если } g(s_W) \geq 0, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (7)$$

Мутация. В общем случае – мутация исключительно стохастический процесс, однако, учитывая особенности задачи, можно повысить степень сходимости алгоритма, добавив некоторую долю детерминизма. Основываясь на этой идее, определим оператор мутации так, чтобы вероятность присвоения гену метки определенного кластера была тем выше, чем ближе описываемый данным геном объект к центроиду кластера:

$$p_j = P\{s_W(i) = j\} = \frac{c_m d_{\max} - d_j}{\sum_{i=1}^K (c_m d_{\max} - d_i)}, \quad (8)$$

где, $d_j = d(x_i, c_j)$ – эвклидово расстояние от объекта x_i до центроида j -го кластера, $d_{\max} = \max_j d_j$, а $c_m \geq 1$ – константа, назначение которой мы рассмотрим позже.

В процессе работы алгоритма могут возникать ситуации, когда кластер состоит из одного и только одного объекта. В таких случаях существует ненулевая вероятность, что описанный выше способ мутации переназначит метку кластера данному объекту, а старый кластер, как следствие, останется пустым. Быстро распознать такие ситуации можно с помощью расстояния от объекта до центроида кластера. Если $d_{s_W(i)} = 0$, то, во избежание появления пустых кластеров, оператор мутации к текущему гену применять нельзя.

Оператор K-Means. Алгоритм, использующий описанные выше операторы селекции и мутации требует большего количества поколений, чем классический генетический алгоритм. Более того, высокая степень возможности мутации способствует приобретению колебательного характера поведения алгоритма. Для улучшения ситуации, вместо оператора рекомбинации, предлагается использование одного шага метода k -средних¹⁵⁹. Данный этап состоит из двух шагов:

1. Вычисление центроидов кластеров для W , используя (3);
2. Переопределение принадлежности объекта кластеру путем присвоения объекту метки кластера, центроид которого находится ближе всего. В результате образуется матрица \tilde{W} .

Однако из-за простоты оператора K -средних появляется возможность возникновения пустых кластеров. Возьмем кластер с максимальным внутрикластерным расстоянием и отнесем объект, находящийся дальше всего от центроида, к пустому кластеру, таким образом, решая проблему.

Критерий останова. Эмпирическим путем было установлено, что для сходимости построенного алгоритма необходимо от 8 до 15 поколений. Поэтому в качестве критерия останова предлагается использовать количество поколений, прошедших с момента начала работы алгоритма. Это не снизит качества кластеризации в критических масштабах, но позволит редуцировать необходимое количество вычислений.

¹⁵⁹ Бондарев Я. А. Кластеризация текстовых документов на основе генетического алгоритма // Материалы XXVI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов - 2019". Севастополь: 2019.

Итак, рассмотрена модель классического генетического алгоритма и предложена его модификация для максимального приближения к свойствам идеального алгоритма кластеризации.

Для реализации построенной системы использовались язык программирования Python 3.7 и фреймворк PyQt для разработки пользовательского интерфейса. Разработка программы происходила в два этапа: на первом решена задача сбора и предобработки данных, второй этап предполагает построение алгоритма кластеризации типов летательных аппаратов и его интеграции в графический интерфейс.

Стоит отметить, что используемые технологии нацелены на реализацию кроссплатформенной программы.

Первой частью этапа получения данных является получение текста поискового запроса от пользователя. После этого формируются ссылки для поисковых сервисов.

Последним шагом этапа сбора данных является построение матрицы объекты-признаки.

Согласно описанию генетического алгоритма k -средних, пространством поиска являются все матрицы W , удовлетворяющие условию (1).

Рассмотрим оператор селекции, однако для этого потребуется фитнес-функция. Как уже упоминалось, в качестве основы функции приспособленности было выбрано суммарное внутрикластерное расстояние. Более того, было отмечено, что данный этап является наиболее сложным с точки зрения вычислений, поэтому рациональным подходом будет использование технологий параллельных вычислений.

Существует две наиболее распространенных модели параллельных вычислений – использование нескольких потоков (нитей, threads) и нескольких отдельных процессов. Так как для реализации был выбран язык программирования Python 3, то разумно будет рассмотреть особенность работы интерпретатора при выполнении параллельных программ.

В классическом интерпретаторе языка Python 3, CPython, заложен механизм под названием Global Interpreter Lock (GIL). GIL – способ синхронизации потоков, который является самым простым лекарством против конфликтов при одновременном обращении разных потоков к одним и тем же участкам памяти. Когда один поток захватывает область памяти, GIL блокирует остальные. Сама блокировка происходит по принципу мьютекса. Таким образом, при использовании потоков происходит достаточно сильное ограничение

параллельности вычислений, поэтому будем использовать потоки с помощью объекта Pool пакета multiprocessing ЯП Python 3. Данный инструмент позволяет выполнять параллельно функцию высшего порядка map.

После нахождения фитнес-функции можно приступить к реализации оператора селекции. Селекция производится на основе метода рулетки.

Реализация оператора мутации. Данный шаг алгоритма был модифицирован таким образом, что в каждой мутирующей особи меняется каждый ген в зависимости от расстояния между объектом, соответствующим гену, и ближайшим центроидом кластера. При этом возрастает количество вычислений. Было принято решение выполнять мутацию с использованием нескольких процессов. Пусть $d_{s_W(i)}$ – расстояние от i -го объекта (x_i) до центроида кластера $s_W(i)$, где s_W – особь популяции.

Рассмотрим теперь оператор k -средних. Он состоит из двух шагов: нахождение центроидов кластеров и переназначение меток объектов в случае, если центроид текущего кластера не является ближайшим для выбранной точки. На данном этапе некорректные строки возникают наиболее часто. Более того, оператор k -средних является завершающим в итерации вычислений. Поэтому исправлять некорректные строки будем после применения оператора. Для этого определим множество кластеров, которые остались пустыми и присвоим объектам из кластера с наибольшим внутрикластерным расстоянием метки пустых кластеров.

Оценим результаты работы кластеризации. Для сравнения скорости сходимости классического ГА и ГКА был проведен эксперимент. В результате была установлена следующая зависимость квадратичной ошибки от количества итераций (рис. 4.3)¹⁶⁰.

Интерфейс построенной системы состоит из окна, в котором есть поле для ввода запроса, названия групп – результатов кластеризации и, непосредственно, ссылки – результаты поиска в сети интернет. С помощью панели меню окна можно установить параметры (количество кластеров, вероятность мутации, размер исходной популяции), сохранить результаты поиска в формате JSON.

¹⁶⁰ Бондарев Я. А. Кластеризация текстовых документов на основе генетического алгоритма // Материалы XXVI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов - 2019". Севастополь: 2019.

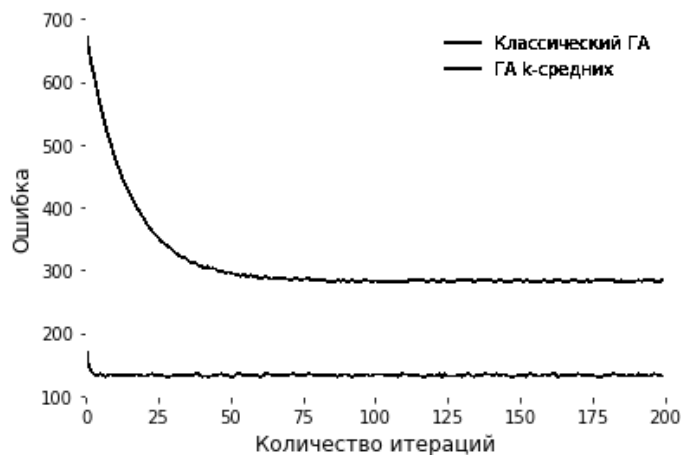


Рисунок 4.3 – Численная демонстрация глобальной сходимости ГА и ГКА

Таким образом, рассмотрена процедура построения программной реализации предложенного алгоритма и интеграции его в единую систему. Программа имеет графический интерфейс, проста в настройке и использовании. Результаты кластеризации оценены и удовлетворяют требованиям исследуемой задачи. В качестве важнейшей задачи дальнейших исследований в данном направлении целесообразно предложить методику формирования оптимального количества кластеров типов летательных аппаратов в зависимости от конкретной решаемой задачи. Сформулирована проблема кластеризации, рассмотрены возможные пути её решения. Произведен обзор и сравнительный анализ существующих методов кластеризации типов летательных аппаратов.

В работе модифицирован генетический алгоритм К-средних для проведения кластеризации типов летательных аппаратов.

ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ «УМНОГО» ГОРОДА

5.1 Проблемы логистики беспилотных транспортных средств «умного» города

5.2 Технология построения подводных аппаратов на основе роботизированной платформы

5.1 Проблемы логистики беспилотных транспортных средств «умного» города

Современные города переживают сегодня глобальную трансформацию, вызванную цифровой экономикой. Развитие современного города невозможно без создания цифровой экосистемы, формируемой на основе интеллектуальных сетей. Кроме того, современные информационно-коммуникационные технологии должны стать не просто основой для построения новых городов, которые уже получили название «умных» городов, но и органично интегрироваться в существующие технологии и системы. Одним из вариантов решения данной проблемы является реализация концепции комплексного подхода к формированию и развитию «умного» города.

О важности и актуальности рассматриваемого вопроса говорят и исследования, проведенные экспертами компании McKinsey. Так по их подсчетам, к 2020 году в мире будет около 600 «умных» городов, которые уже через пять лет будут генерировать почти две трети мирового ВВП. Похожую оценку дает, и консалтинговая компания Arup, утверждая, что к 2020 году мировой рынок «умных» городских услуг составит \$400 млрд. в год. Говоря о количестве создаваемых и уже действующих «умных» городов, предлагаем воспользоваться данными, полученными консалтинговым агентством Jones Lang LaSalle, представившим рейтинг тридцати наиболее динамично развивающихся городов и агломераций мира, более половины из которых расположены в Азиатско-Тихоокеанском регионе.

Цель данной части исследования заключается в выявлении и анализе основных проблем и перспектив развития логистических методов управления потоками разнородных беспилотных транспортных средств «умного» города, определении направления развития математических методов логистики таких транспортных систем.

Анализ ряда публикаций по рассматриваемой проблеме показал, что Industry 4.0 характеризуется передовой цифровизацией и интеграцией процессов промышленного производства и логистики, а также использованием Интернета и «умных» объектов (машин и продуктов) и слиянием физического и виртуального миров путем внедрения информационно-коммуникационных технологий (ИКТ), что способствует созданию новых человеческих и производственных организационных систем и новых организационных бизнес-моделей, влияющих на общую цепочку создания стоимости, общество и окружающую среду. Различным аспектам интернета вещей и перспективам их применения в отраслях промышленности, перспективам развития в различных странах также посвящен ряд работ^{161 162 163}.

Так, в рассматриваемых работах отмечено, что компании должны серьезно относиться к Industry 4.0, поскольку они разрабатывают свои будущие инициативы, а традиционные модели бизнес-процессов не соответствуют новым технологиям Industry 4.0. Анализ литературных источников по рассматриваемой проблеме показал, что понятие «умный город» уже активно используется специалистами в сфере цифровой экономики. Что же касается конкретных определений данного понятия, то в целом они схожи.

В рамках данного исследования, обобщая имеющиеся определения, предлагаем опираться на определение, которое рассматривает данное понятие с точки зрения концептуального подхода: «умный город» - это концепция интеграции информационных и коммуникационных технологий для управления городом с целью оптимизации всей жизни города (повышения уровня комфорта, качества и эффективности обслуживания, сокращения расходов и потребления ресурсов).

¹⁶¹ Molano J.I.R.; Lovelle J.M.C.; Montenegro C.E.; Granados J.J.R.; Crespo R.G. Ruben Metamodel for integration of Internet of Things, Social Networks, the Cloud and Industry 4.0 // Journal of ambient intelligence and humanized computing. – 2018. Vol. 9 (3). – P. 709–723.

¹⁶² Mozzaquatro B. A., Agostinho C., Goncalves D., Martins J., JardimGoncalves R. An Ontology-Based Cybersecurity Framework for the Internet of Things // Sensors (Basel, Switzerland). – 2018. Vol.18 (9).

¹⁶³ Sung T.K. Industry 4.0: A Korea perspective // Technological forecasting and social change. – 2018. Vol. 132. – P. 40–45.

Важным вопросом реализации концепции «умного» города является построение его структуры. Опираясь на опыт агломераций, успешно реализующих данную концепцию, выделим следующие составляющие структуры:

– «умная» энергия (цифровые решения в областях энергопоставки и энергосбережения, программы управления спросом, энергоэффективность и интеграция возобновляемых источников энергии);

– «умная» вода (управление водными ресурсами: модернизация водных систем, мониторинг потребления, системы экологической безопасности и управление наводнениями);

– «умные» здания (здания, в которых все инженерные и информационные системы интегрированы в единую систему управления), «умное» руководство агломерацией (использование информационных технологий для предоставления государственных услуг широкому кругу лиц и оптимизации работы различных департаментов);

– «умный» транспорт и логистика (интеллектуальные транспортные и логистические системы, мониторинг и управление трафиком, оплата дорожных сборов, реагирование на чрезвычайные ситуации, интеллектуальная парковка и интегрированное управление светофором, построение «умных» сетей логистики).

Что касается «умного» транспорта и логистики, то сегодня актуальным направлением развития является беспилотный транспорт, который играет большую роль в Интернете вещей и «умном» городе. В данном сегменте рынка уже работают новые решения, среди которых система tube logistics, которая используется для доставки товаров. Флагманом развития воздушной доставки в мире является Amazon и его проект Prime Air. Он находится в стадии тестирования пилота – в 2016 году был доставлен первый заказ (в сельской местности Британии). На данный момент Prime Air использует беспилотные летательные аппараты (БПЛА) длиной около 1 м, масса груза может достигать до 2,4 кг. Полет полностью автономен – БПЛА управляет интегрированная электроника.

Несмотря на вполне успешные испытания, компания сталкивается с регулярными проблемами со стороны властей (запрет автономных полетов). Скептики уверены, что полеты в городских условиях небезопасны: БПЛА может упасть или врезаться в препятствие. Кроме того, есть вероятность, что за БПЛА может начаться «охота» - их могут дистанционно взламывать. А БПЛА на

батареях пока не могут преодолевать расстояния свыше 15-20 км. Успешное тестирования проходят и наземные беспилотные транспортные средства.

В России успешные испытания осуществляет компания Яндекс, а также лаборатории ведущих университетов страны. В приморских городах (к примеру, Санкт-Петербург, Севастополь) испытываются беспилотные водные транспортные средства. Данное направление «умного» города необходимо развивать, так как оно позволяет решать социальные задачи жизнеобеспечения мест поселения, обеспечивает поставки товаров в торговые точки, снабжения медицинских учреждений, территориального размещения пунктов приема для обслуживания населения.

Таким образом, основная проблема заключается в поиске оптимальных логистических решений для разнородных беспилотных транспортных средств. Необходим также контроль и регулирование, рассмотренные нами в работе¹⁶⁴. Авторами уже начаты работы в данном направлении и, в частности, предлагается в качестве математического аппарата использовать теорию решения многоиндексных задач линейного программирования на основе авторского метода главных граней¹⁶⁵.

5.2 Технология построения подводных аппаратов на основе роботизированной платформы

Технология управления и мониторинга движения беспилотных летательных аппаратов может быть одним из элементов построения систем управления беспилотными подводными аппаратами. О важности и перспективах данного направления исследований является тот факт, что развитие автоматических подводных аппаратов может избавить людей от риска, которому они могут подвергнуться при работе под водой, а также помочь в изучении и освоении подводного мира.

При этом имеется несколько важнейших аспектов данной проблемы:

- фундаментальный – получение новых знаний;
- экономический – разработка природных ресурсов (биологических, геологических и пр.);

¹⁶⁴ Grishin I., Timirgaleeva R. Air navigation: optimisation control of means cueing of the air-traffic control system, Conference of Open Innovations Association FRUCT, 2018, pp. 134-140.

¹⁶⁵ Grishin I., Timirgaleeva R., Potapov G. Linear programming: a new polynomial-time algorithm // Вестник Восточноевропейского национального университета имени Владимира Даля. – 2007. – № 1 (131). – С.113-119.

- социальный – подготовка высококвалифицированных научных и технических кадров;
- геополитический и военные аспекты.

С помощью таких аппаратов можно будет, к примеру, изучить систему рек и водоёмов, находящуюся под ледяным панцирем Антарктиды. Так же они могут облегчить обслуживание подводных объектов (газопроводов, нефтяных платформ в Арктике).

Одна из проблем исследования водной среды состоит в том, что эта среда является достаточно агрессивной, не только для пребывания человека, но и для технических устройств.

Если рассматривать всё множество существующих подводных аппаратов, то в нём можно выделить категорию телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов. Эта категория технических средств появилась и стала развиваться относительно недавно и появление таких аппаратов стало возможным благодаря существующим технологическим достижениям в области электромеханики, электроники и сенсорики^{166 167 168}.

Из проведённого анализа имеющихся публикаций можно сделать вывод, что подавляющее большинство конструкций — это высокотехнологичные и дорогие устройства, которые требуют наличия бортовых или наземных управляющих измерительных комплексов, систем погружения и подъёма. В данной части исследования ставим целью разработку основных принципов построения роботизированной платформы для осуществления подводных исследований.

Итак, рассмотрим предлагаемую структуру роботизированной платформы. Существующие конструктивные решения не могут быть приняты в основу концепции проектируемого аппарата, т.к. создание подобных объектов требует использования высокотехнологичной производственной базы и высокобюджетного технологического оборудования, поэтому на этапе разработки концепции рассматривались конструктивные исполнения аппаратов, в которых большая часть объёма подводной платформы заполняется водой. Это аппараты типа роботов «Мир». Конструкция этих аппаратов представляет собой сложную трубчатую раму, на которую навешиваются приводные электродвигатели в

¹⁶⁶ Агеев М. Автономные подводные роботы. Системы и технологии. - Москва: Наука, 2005. – 398 с.

¹⁶⁷ Юревич Е. Основы робототехники - Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2010. – 420 с.

¹⁶⁸ Гришин И.Ю. Актуальные проблемы оптимизации управления в технических и экономических системах. – Ялта.: РИО КГУ, 2010. – 252 с.

совокупности с гребными винтами. На эту же раму устанавливаются блоки интерфейсные, блоки исследовательские и блоки, предназначенные для управления двигательными установками. При этом в большинстве проанализированных конструкций наблюдаются две категории устройств.

В первой категории используется жёстко закреплённые двигатели, создающие как горизонтальную, так и вертикальную тягу подводного аппарата. Такой конструктивный подход влечёт за собой использование большого количества приводных электродвигателей, а также ставит вопросы по обеспечению стабилизации положения аппарата в водной среде.

Вторая категория конструкций предполагает использование ограниченного количества приводных двигателей, которые, однако, выполняются в виде поворотных пилонов и собственно управление такими аппаратами осуществляется за счёт изменения направления тяги каждого из приводных двигателей.

Недостатком этих конструкций можно считать то, что усложняется кинематическая схема всего аппарата, требуется герметизация большого числа подводных узлов, герметизация кабелей и т.д. что в целом снижает надёжность подобного рода конструкций и увеличивает их финансовую характеристику^{169 170}.

Следующим является выбор движителей. В этом направлении можно назвать: реактивные двигатели, которые не могут быть приняты в основу концепции, двигатели внутреннего сгорания, также не удовлетворяют цели проектирования по целому ряду причин. Поэтому для выбора типа движителя остаётся следующее: электродвигатели и регулируемая плавучесть со смещением центра масс.

Заслуживают внимания оба приведенных направления для текущей реализации платформы. Тем не менее выберем использование электродвигателей т.к. этот вопрос является наиболее глубоко исследован, в то время как использование изменяемой плавучести весьма перспективное направление, но требует значительных предварительных исследований, моделирования и выяснение свойств подобных систем.

В результате рассмотрения этих вопросов приходим к пониманию конструкции обитаемой роботизированной платформы, в которой несущий каркас изготавливается не из пустотелых трубчатых элементов, а из резьбовых шпилек, которые необходимы для закрепления других блоков платформы и прежде

¹⁶⁹ Тимиргалеева Р.Р., Гришин И.Ю., Потапов Г.Г. Методы оптимизации в управлении организационно-экономическими и техническими системами. Монография. – Симферополь: ИТ «Ариал», 2011. 224 с.

¹⁷⁰ Grishin I.Yu., Potapov G. Linear programming: a new polynomial-time algorithm // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2007. № 1. С. 113-119.

всего для установки тяговых электродвигателей и гребных винтов, при этом все элементы конструкции не являются пустотелыми, представляют собой монолитные структуры, а, следовательно, фактор давления на эти элементы можно не учитывать. Единственным элементом, который имеет внутренний защищённый объем, является коллекторный электродвигатель непрерывного вращения.

В связи с принятием этой концепции производился анализ конструктивного исполнения коллекторных двигателей. И в результате была выбрана конструкция электродвигателя, корпус которого выполняется методом глубокой штамповки из стали толщиной 1.5 мм и этот корпус не содержит ни каких технологических или вентиляционных отверстий. Единственное место, где возможно проникновение воды – это привальный фланец к редуктору двигателя, который легко герметизируется с помощью прокладки из бескислородной резины. Доступ воды через вал двигателя легко блокируется дейдвудным устройством, внутри которого в качестве герметика используется технологический солидол.

В результате отработки этих вопросов появляется возможность разработать конструкцию аппарата, удовлетворяющего заданным требованиям.

Созданная роботизированная платформа включает в себя следующие элементы: набор аппаратуры, который используется оператором роботизированной платформы; модуль автономного блока питания; элементы управления, двигателя, системы технического зрения.

В качестве элементной базы использованы:

РIS16F84 – 8-разрядный микроконтроллер с RISC архитектурой, производимые фирмой Microchip Technology, это семейство микроконтроллеров отличается низкой ценой, низким энергопотреблением и высокой производительностью;

MAX232 СРЕ – интегральная схема, преобразующая сигналы последовательного порта RS-232 в сигналы, пригодные для использования в цифровых схемах на базе ТТЛ или КМОП технологий; IR4428 – драйвер двух ключей нижнего уровня; LM2940 СТ – стабилизатор напряжения.

Для обеспечения манёвренности и мобильности подводной роботизированной платформы, было принято решение использовать промежуточный блок между бортовым или береговым оборудованием с помощью которого обеспечивается радио канальный интерфейс между подводной платформой и береговым или бортовым оборудованием и соответственно

оператором подводной платформы¹⁷¹. Таким образом, предложена концепция построения роботизированной платформы для подводных исследований, на основании которой разработана конструкция аппарата и изготовлен пробный, полностью работоспособный аппарат для подводных исследований.

¹⁷¹ Гришин И.Ю. Эвристический алгоритм определения главных граней при решении задачи линейного программирования // Вестник Национального технического университета Харьковский политехнический институт. Серия: Информатика и моделирование. 2008. № 49. С. 33-41.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило решить актуальную научно практическую задачу разработки теоретических основ формирования системы управления воздушным движением беспилотных летательных аппаратов на основе мониторинга, базирующегося на применении разнородных локационных средств, функционирующих в многопозиционном режиме и позволяющих обеспечить оценку параметров с точностью, необходимой для безопасного и надежного управления потоком беспилотных летательных аппаратов, а также идентификации опасных ситуаций.

Выявлено, что существующие проблемы в организации и управлении воздушным движением связаны с несовершенством нормативно-правовых актов в сфере использования воздушного пространства. Кроме того, причиной нарушений правил использования воздушного пространства является проблема своевременной и правильной классификации воздушных объектов, в том числе беспилотных летательных аппаратов.

Для формального представления знаний по классификации воздушных объектов предложено использовать комбинированный подход, включающий нечёткие продукционные модели с развитым аппаратом вывода, модели с детерминированным логическим выводом на основе обычной булевой логики и использование метода выбора по аналогии. Предложенная иерархическая система классификации воздушных объектов и их система классификации позволяет определять опасные воздушные объекты, которые нуждаются в особом внимании со стороны операторов, и сопоставлять существующую систему классификации воздушных объектов по индексам принадлежности с современными требованиями к определению классов воздушных целей.

Доказано, что для усовершенствования процесса тестирования систем идентификации воздушных объектов необходимо решить задачи формализации процессов определения классов объектов в воздухе во время его контроля и верификации программного обеспечения нечёткой логической системы классификации воздушных объектов на основе требований к предметной области. Приведена технология оценки эффективности классификации воздушных объектов в условиях неполноты информации и неопределённости, путём сопоставления оценок, полученных экспертами – специалистами в области

управления воздушными объектами, и результатов, полученных с помощью разработанного метода классификации.

Предложен усовершенствованный метод оценивания качества информации для классификации воздушных объектов, в котором в отличие от известных, в качестве критерия полноты принято минимальное расстояние имеющейся информации от эталонной. Метод построен на аппарате нечёткой логики и позволяет оценивать достоверности информации о воздушном объекте, которая поступает от разнородных источников. В качестве основного инструмента для мониторинга движения беспилотных летательных аппаратов в процессе воздушной навигации и управления воздушным движением предложено использовать статистические измерительные информационные системы, позволяющие с заданным уровнем точности определять составляющие вектора положения, скорости и других параметров летательного аппарата.

Выявлено, что наиболее сложным районом регулирования воздушного движения в составе как пилотируемых, так и беспилотных летательных аппаратов, являются аэропортовые районы. Доказано, что система управления воздушным движением, включающая в себя модуль мониторинга беспилотных транспортных средств относится к критической информационной инфраструктуре, в которой особое внимание необходимо уделять решению вопросов информационной безопасности, в частности, расследованию инцидентов в таких системах. Для обнаружения нарушений безопасности и проведения расследования того, кто, когда и как получил несанкционированный доступ к информационной системе организации предложено использовать продукт, как Elastic Stack. Разработан метод адаптивного управления темпом локации сопровождаемых объектов в зависимости от степени неопределенности в знании динамики движения, уровня шумов в канале измерения, а также временного ресурса, выделенного на сопровождение.

Получено решение задачи оптимизации параметров режима сопровождения радиолокационного комплекса, которое сводится к выбору оптимального темпа локации и, в отличие от ранее известных результатов определяет адаптивное управление темпом локации в зависимости от степени неопределенности в знании динамики цели и уровня шумов в канале измерений, а также временного ресурса, выделенного на сопровождение цели.

Авторами также предложен метод объединения информации от разнородных источников, позволяющий существенно снизить ошибки оценивания параметров движения беспилотных летательных аппаратов. Для

выделения опасных из них предложено использовать методы и модели кластеризации типов летательных аппаратов. Проведен синтез модифицированного генетического алгоритма, в котором оператор мутации предложено строить на основе метода k-средних. Предложена модификация модели классического генетического алгоритма для максимального приближения к свойствам идеального алгоритма кластеризации типов летательных аппаратов.

Дальнейшим направлением исследования определена разработка методики формирования оптимального количества кластеров типов летательных аппаратов в зависимости от конкретной решаемой задачи. Сформулирована проблема кластеризации и рассмотрены возможные пути её решения. Произведен обзор и сравнительный анализ существующих методов кластеризации типов летательных аппаратов.

Выявлены и проанализированы основные проблемы и перспективы развития логистических методов управления потоками разнородных беспилотных транспортных средств «умного» города, определены направления развития математических методов логистики данных транспортных систем. Доказано, что технология управления и мониторинга движения беспилотных летательных аппаратов может быть одним из элементов построения систем управления беспилотными подводными аппаратами. Предложена концепция построения роботизированной платформы для подводных исследований, на основании которой разработана конструкция аппарата и изготовлен пробный, полностью работоспособный аппарат для подводных исследований.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Агеев М. Автономные подводные роботы. Системы и технологии. - Москва: Наука, 2005. – 398 с.
2. Ананьев П.И. Технология разработки программного обеспечения. Учебное пособие / П.И. Ананьев. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. – 221 с.
3. Балькин Г.Ф. Системный анализ в инфокоммуникациях (учебное пособие) / Г.Ф. Балькин, Ю.Г. Балькин, Л.А. Крапивянская. – К. : ГУТ, 2014. – 97 с.
4. Бердышев В.П., Радиолокационные системы, Красноярск: СФУ, 2012.
5. Благодатских В.А. и др. Стандартизация разработки программных средств Учеб. пособие / В.А. Благодатских, В.А. Волнин, К.Ф. Посакалов; Под ред. О.С. Разумова. – М.: Финансы и статистика, 2005. – 288 с.
6. Блэк Р. Ключевые процессы тестирования. Планирование, подготовка, проведение, совершенствование / Р. Блэк. – М.: Лори, 2006. – 565 с.
7. Бондарев А.В. и Аде Ф.Г., Искусственный интеллект. – Севастополь: Издательство СевНТУ, 2002.
8. Бондарев Я. А. Кластеризация текстовых документов на основе генетического алгоритма // Материалы XXVI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов - 2019". Севастополь: 2019.
9. Брайсон А., Хо-юши. Прикладная теория управления. – М.: Мир, 1972. – 544 с.
10. Бурый А.С., Фомичев И.Д. Модели и алгоритмы обеспечения безопасности движения группы беспилотных летательных аппаратов // Проблемы управления безопасностью сложных систем. Труды XXI Международной конференции. 2013. С. 241-243. <https://elibrary.ru/item.asp?id=21825783>.
11. Бухтояров В.В. Поддержка принятия решений при проектировании систем защиты информации: Монография / Бухтояров В.В., Жуков В.Г., Золотарёв В.В. – М.: ООО "Научно-издательский центр ИНФРА-М", 2014. – 131 с.
12. Буч Г. Язык UML. Руководство пользователя: Пер. с англ. / Г. Буч, Дж. Рамбо, А. Джекобсон. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 432 с.
13. Введение в исследование операций. Черчмен У. Акоф Р., Арноф Л. 1968 г.
14. Вендров А.М. Проектирование программного обеспечения экономических информационных систем / А.М. Вендров. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 352 с.
15. Волков Г.В. Модели и алгоритмы тестирования программных средств на основе их стратифицированного описания. Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. – Нижний

- Новгород: Нижегородский государственный технический университет, 2010. 18 с.
16. Герасимов П.К., Егоров Д.А. Аспекты безопасности управления автономными беспилотными летательными аппаратами в городской среде // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*, МИРЭА, Москва, т. 14, № 5, 2014, С. 130–132. <https://elibrary.ru/item.asp?id=23466174>.
 17. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. Москва, ООО Издательская фирма "Физико-математическая литература", 2010. 366 с.
 18. Глухова Л.А. Основы алгоритмизации и структурного проектирования программ / Л.А. Глухова, В.В. Бахтизин. – Минск.: БГУИР, 2003. – 72 с.
 19. Городнов В.П. Вища математика (популярно, із прикладами): Підручник для студ. екон. спец. вищ. навч. закл. / В. П. Городнов; Нар. укр. акад. [Каф. математики і мат. моделювання] – Х.: Вид-во НУА, 2005. – 384 с.
 20. Гришин И.Ю. Актуальные проблемы оптимизации управления в технических и экономических системах. – Ялта: РИО КГУ. 2010. - 252 с. <https://elibrary.ru/item.asp?id=26085028>
 21. Гришин И.Ю. Оптимизация управления многопозиционным радиолокационным комплексом / И.Ю. Гришин, М.К. Можар, В.И. Есин // Тезисы докладов 2-й Всесоюзной научно-технической конференции по распространению миллиметровых радиоволн. – Туапсе, 1991. – С. 48–49.
 22. Гришин И.Ю. Эвристический алгоритм определения главных граней при решении задачи линейного программирования // Вестник Национального технического университета Харьковский политехнический институт. Серия: Информатика и моделирование. 2008. № 49. С. 33-41.
 23. Гришин И.Ю., Можар М.К., Есин В.И. Оптимизация управления многопозиционным радиолокационным комплексом // Тезисы докладов 2-й Всесоюзной научно-технической конференции. – Туапсе, 1991. – С. 48-49.
 24. Гришин И.Ю., Тимиргалеева Р.Р. Воздушная навигация: концепция мониторинга движения беспилотных транспортных средств умного города на основе информации от разнородных датчиков // Информационные системы и технологии в моделировании и управлении. IV Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием). Симферополь, 2019. С. 183-186. <https://elibrary.ru/item.asp?id=37636118>
 25. Гришин И.Ю., Тимиргалеева Р.Р., Чертоганов К.А. Технологии комплексного информационно-навигационного обеспечения и мониторинга рекреационных территорий юга России // Материалы V Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2018. С. 757–760.
 26. Джарратано Дж. и Райли Г., Экспертные системы. Принципы разработки

- и программирование, Вильямс, 2007.
27. Дружинин В.В., Конторов Д.С. Вопросы военной системотехники. М.: Воен. Издат., 1976. - 224 с.
 28. Дружинин В.В., Конторов Д.С. Конфликтная радиолокация. М.: Воен. Издат., 1982. - 124 с.
 29. Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. – М.: Сов. радио, 1978. – 324 с.
 30. Згуровский, Михаил Захарович. Системный анализ: проблемы, методология, приложения [Текст] : [монография] / М. З. Згуровский, Н. Д. Панкратова ; Нац. акад. наук Украины, Ин-т приклад. систем. анализа. - 2-е изд., перераб. и доп. - К. : Наукова думка, 2011. - 727 с.
 31. Зенкина О.Н., Симонов Н.А. Применение генетических алгоритмов в вопросах оптимизации информационных процессов // Актуальные проблемы гидролитосферы (диагностика, прогноз, управление, оптимизация и автоматизация). Сборник докладов. 2015. С. 315-323.
 32. Картиев С.Б., Курейчик В.М. Разработка и исследование алгоритма решения задачи кластеризации для осуществления вопросно-ответного поиска в информационно-аналитической системе прогнозирования // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 7 (180). С. 18-28.
 33. Катулев, А.Н. Математические методы в системах поддержки принятия решений: Учеб. пособие / А.Н. Катулев, Н.А. Северцев. М.: Высш. шк., 2005. 311 с.
 34. Кичигин Д.Ю. Метод редукции тестового набора для интеграционного тестирования. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Д.Ю. Кичигин. – М: Институт системного программирования РАН, 2010. – 24 с.
 35. Конторов Д.С., Голубев-Новожилов Ю.С. Введение в радиолокационную системотехнику. –М.: Сов. радио, 1971, -368 с.
 36. Королёв С.А., Тактическая подготовка. Курс «Тактика войсковой ПВО ВС РФ». Москва: МИЭТ, 2001.
 37. Коротун Т.М. Моделі і методи інженерії тестування програмних систем в умовах обмежених ресурсів. Автореферат дисертації на здобуття вченого ступеню кандидата фізико-математичних наук. – К: Інститут програмних систем НАН України, 2005. 21 с.
 38. Котляров В.П. Основы тестирования программного обеспечения. Учебное пособие. / В.П. Котляров, Т.В. Коликова. – М.: Интернет-Университет Информационных технологий, 2006. – 246 с.
 39. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Радио и связь, 1986. 352 с.
 40. Кузьмин С.З. Цифровая обработка радиолокационной информации. – М.: Сов. радио, 1967. – 400 с.
 41. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. Киев: КВЦ, 2000. - 428 с.
 42. Лайниотис Д. Разделение – единый метод построения адаптивных систем. – ТИИЭР, 1976, т. 64, № 8, с. 8—27.

43. Лебедев Г.Н., Малыгин В.Б. Интеллектуальная поддержка в задаче приоритетного обслуживания группы пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов при выборе маршрутов полета и контроля безопасности их движения // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2015. № 221 (11). С. 125-137. <https://elibrary.ru/item.asp?id=25382526>.
44. Леньшин А.В., Попов С.А., Лебедев В.В. Оценка качества управления воздушным движением и безопасностью полетов в условиях помех с использованием беспилотных летательных аппаратов // Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надежности, устойчивости и эффективности систем. Материалы международной научно-практической конференции, посвящённой 95-летию со дня рождения выдающегося учёного академика АН СССР (РАН) Всеволода Сергеевича Авдуевского. 2017. С. 254-259. <https://elibrary.ru/item.asp?id=29878909>
45. Майерс Г. Искусство тестирования программ / Г. Майерс, Т. Баджетт, К. Сандлер. – Диалектика-Вильямс, 2012. – 272 с.
46. Макгрегор Д. Тестирование объектно-ориентированного программного обеспечения. Практическое пособие: Пер. с англ. /Д. Макгрегор, Д. Сайкс. – К.: ООО «ГИД ДС», 2002. 432 с.
47. Малинин С.Н. Тестирование объектно-ориентированного программного обеспечения на основе моделирования конечными автоматами. Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет, 2010. 20 с.
48. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Мир, 1973, -344 с.
49. Министерство транспорта Российской Федерации РОСАВИАЦИЯ, official website, Информация о состоянии безопасности полётов воздушных судов авиации общего назначения в 2006 – 2015 годах, Web: <https://www.favt.ru/novosti-aktualnaja-informacija?id=2620>.
50. Министерство транспорта Российской Федерации РОСТРАНСНАДЗОР, official website, Количество нарушений порядка использования воздушного пространства Российской Федерации в 2018 году, Web: <https://avia.rostransnadzor.ru/podnadzornye/aon/kolichestvo-narushenij-poryadka-isp>.
51. Неупокоев Ф.К. Стрельба зенитными ракетами. – М. Воениздат, 1991. – 343 с.
52. Ногин В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. – 2-е изд., испр. и доп. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 176 с.
53. Орлов А.И., Теория принятия решений. М.: Экзамен, 2006.
54. Орлов С.А. Технологии разработки программного обеспечения: Учебник / С.А. Орлов. – СПб: Питер, 2002. – 464 с.
55. Панасюк Ю.Н. и Пудовкин А.П., Обработка радиолокационной

- информации в радиотехнических системах, Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2016.
56. Полтавский А.В., Рякин А.В. Обеспечение безопасности полетов беспилотных летательных аппаратов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2007. № 119. С. 152-157. <https://elibrary.ru/item.asp?id=12846060>.
 57. Попов Э.В., Искусственный интеллект. Москва: Радио и связь, 1990.
 58. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО «Маквис», 1998. – 828 с.
 59. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечёткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети / А.П. Ротштейн. – Винница: УНИВЕРСУМ, 1999. 320 с.
 60. Семенихин С.В., Денисова Л.А. Автоматизация информационного поиска на базе многокритериальной оптимизации и генетических алгоритмов // Динамика систем, механизмов и машин. 2014. № 3. С. 224-227.
 61. Тамаргазін О.А. Спосіб узгодження інтересів суб'єктів, які приймають участь у забезпеченні заданих значень тактико-технічних та експлуатаційних характеристик авіаційних транспортних систем / Тамаргазін О.А., Варюхно В.В., Салімов Р.М., Олег М.В. Сидоренко О.Ю. – Матеріали 17-ї Міжнародної науково-практичної конференції (04-08 вересня 2017 р., м. Одеса) – С.180-184.
 62. Тамаргазін О.А., Ліннік І.І., Курбет Л.В. Стан, протиріччя й тенденції розвитку інформаційного поля забезпечення технологічних процесів в аеропорту / Наукоємні технології: Наук. журнал – Київ: НАУ, 2017. – № 1 (33). – С.65-70 doi:10.18372/2310-5461.33.11561.
 63. Тамре Л. Введение в тестирование программного обеспечения: Пер. с англ. / Л. Тамре. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 386 с.
 64. Теленик С.Ф., Гришин И.Ю. Анализ современных алгоритмов вторичной обработки информации в статистических измерительных информационных системах // Вестник Восточнoукраинского национального университета имени Владимира Даля. – 2009. – № 1 (131). – Ч.2. – С.145– 155.
 65. Тимиргалеева Р.Р., Гришин И.Ю. Цифровые технологии в организации эффективной деятельности финансово-кредитных учреждений // Развитие финансов, бухгалтерского учёта и аудита в современных концепциях управления. Материалы I международной научно-практической конференции. 2018. С. 86-88.
 66. Тимиргалеева Р.Р., Гришин И.Ю., Потапов Г.Г. Методы оптимизации в управлении организационно-экономическими и техническими системами. Монография. – Симферополь: ИТ «Ариал», 2011. 224 с.
 67. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М. Наука, 1979. –285 с.
 68. Ту Дж. и Гонсалес Р., Принципы распознавания образов: пер с англ, Москва: Мир, 1978.

69. Федоров С.Г., Терроризм: реальность сегодняшнего состояния. Москва: Воениздат, 2000.
70. Халин В. Г., Чернова Г.В. Системы поддержки принятия решений. – М.: Юрайт, 2019. 494 с.
71. Хеллман О. Введение в теорию оптимального поиска. – М.: Наука, 1985. 248 р.
72. Чекина А.В. Генетическая кластеризация технической документации в проектном репозитории САПР // Тринадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием. Труды конференции. 2012. С. 82-89.
73. Черемисов Н.С. и Якушин Г.В., Терроризм – угроза жизни и безопасности. СПб.: СпбГУ, 2005.
74. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь 1993. – 416 с.
75. Черняк В.С., Заславский Л.П., Осипов Л.В. Многопозиционные радиолокационные станции и системы // Зарубежная радиоэлектроника. – 1987. № 1. – С. 9 — 69.
76. Чумаков Н.М. Оценка эффективности сложных технических устройств / Н.М. Чумаков, Е.И. Серебряный. – М.: Сов.радио, 1980. 192 с.
77. Щербатов И.А., Беляев И.О. Применение кластерного анализа для обработки документов в информационно-поисковой системе // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2012. № 2. С. 161-166.
78. Юревич Е. Основы робототехники - Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2010. – 420 с.
79. Ярушек В.Е. и др., Теоретические основы автоматизации процессов выработки решений в системах управления. Харьков: ХВУ, 1993.
80. A.I. Baskakov, A.A. Komarov, and A.V. Ruban, “Estimation of the energy characteristics of a multi-position radar system for the control of small-sized space debris for various orbital zones,” 2018 Progress in electromagnetics research symposium, pp. 470-475, August 01-04, 2018.
81. Athans M. On the determination of optimal cost measurement strategies for linear stochastic systems. – Automatica. 1972, vol. 8, N 4, p. 397 — 412.
82. Barale G., Frascchetti G., Pardini S. The multiradar tracking in the ATC system of the Rome FIR // Proc. Intern. Radar Conf. “Radar’82”. – London, 1982. – P. 296-299.
83. Bertalanffy L. Das biologische Weltbild, Bd. 1. Bern, 1949.
84. Booch G. et al. Object-oriented analysis and design with applications. Addison-Wesley, 2007. – 717 p.
85. Buede D.M. The Engineering Design of Systems Models and Methods. John Wiley & Sons, 2009. – 516 p.
86. Das A.K., Pratihar D.K. A Directional Crossover (DX) Operator for Real Parameter Optimization Using Genetic Algorithm // Applied Intelligence. 2019. V. 49, Iss. 5, P. 1841-1865. DOI: 10.1007/s10489-018-

- 1364-2.
87. Davis Paul, Boisvert Benjamin. Hyper-Spectral Networking Concept of Operations and Future Air Traffic Management // 2017 IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC) Simulations, St Petersburg, Sep 17-21, 2017. https://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=5
 88. Dung, Nguyen Dinh, Rohacs, Jozsef. The Drone-Following Models in Smart Cities // IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Nov 12-13, 2018.
 89. Grishin I., Timirgaleeva R. Air navigation: optimisation control of means cueing of the air-traffic control system, Conference of Open Innovations Association FRUCT, 2018, pp. 134-140.
 90. Grishin I., Timirgaleeva R. The application of artificial intelligence methods for forming industry management systems // CEUR Workshop Proceedings. 1. Сер. "Selected Papers of the 1st International Scientific Conference Convergent Cognitive Information Technologies, Convergent 2016. 2016. P. 115-120.
 91. Grishin I., Timirgaleeva R. The Digital Economy of the Region: a Distributed Infrastructure of the Industry Ecosystem // Conference of Open Innovations Association, FRUCT. 2019. V. 24. P. 624-631.
 92. Grishin I., Timirgaleeva R., Potapov G. Linear programming: a new polynomial-time algorithm // Вестник Восточноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2007. – № 1 (131). – С. 113-119.
 93. Grishin I.Y and Timirgaleeva R.R. “Air navigation: Optimisation control of means cueing of the air-traffic control system”, Conference of Open Innovation Association FRUCT, 2018, pp. 134–140.
 94. Grishin I.Yu., Potapov G. Linear programming: a new polynomial-time algorithm // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2007. № 1. С. 113-119.
 95. Grishin Igor Yu., Timirgaleeva Rena R. Air Navigation: Automation Method for Controlling the Process of Detecting Aircraft by a Radar Complex // Proceedings of the 2019 24th Conference of Open Innovations Association (FRUCT), Moscow, Russia, 8-12 April 2019, IEEE. pp. 110–115. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8711905>
 96. Grishin Igor Yu., Timirgaleeva Rena R. Air Navigation: Optimisation Control of Means Cueing of the Air-Traffic Control System // Proceedings of the 2017 21ST Conference of Open Innovations Association (FRUCT), Helsinki, Finland, Nov 06-10, 2017. IEEE. pp. 134-140. https://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=UA&search_mode=GeneralSearch&qid=1&
 97. Guevenc, Ismail, Koohifar, Farshad, Singh, Simran, Sichitiu, Mihail, Matolak, David. Detection, Tracking, and Interdiction for Amateur Drones // IEEE Communications Magazine, Apr 2018, v. 56, iss. 4, PP. 75–81. Doi

- 10.1109/MCOM.2018.1700455.
98. Guevenc, Ismail, Koohifar, Farshad, Singh, Simran, Sichitiu, Mihail, Matolak, David. Detection, Tracking, and Interdiction for Amateur Drones // IEEE Communications Magazine, Apr 2018, v. 56, iss. 4, PP. 75–81. Doi 10.1109/MCOM.2018.1700455.
99. H. Wang, Z. Song, and R. Wen “Modeling Air Traffic Situation Complexity with a Dynamic Weighted Network Approach”, Journal of Advanced Transportation, 2018, article number UNSP 5254289.
100. HOLLIS J., CRONK T. Measurement Techniques for the Performance of Multipoint Interpolators // Transactions of the Institute of Measurement and Control. V. 17, Iss. 2. pp. 59-62. https://apps.webofknowledge.com/Search.do?product=WOS&SID=C1C8GhRlbbfuPC3YLpl&search_mode=
101. Prokopenko, V. Vovk and K. Prokopenko, "Fast resource management algorithm for multi-position radar systems," 2015 16th International Radar Symposium (IRS), Dresden, 2015, pp. 1045-1051.
102. I.Y Grishin and R.R. Timirgaleeva “Air navigation: Optimisation control of means cueing of the air-traffic control system”, Conference of Open Innovation Association FRUCT, 2018, pp. 134-140.
103. IEEE Guide to Software Engineering Body of Knowledge, SWEBOK, 2004.
104. Kalman R., Bucy R. New results in linear filtering and prediction theory // J. Basic. Engr. (ASME Trans.) – 1961. –V. 83. –P. 95—108.
105. Kapoor Rohan, Ramasamy Subramanian, Gardi Alessandro, Sabatini Roberto. UAV Navigation Using Signals of Opportunity in Urban Environments: An Overview of Existing Methods // 1st International Conference on Energy and Power (ICEP), DEC 14-16, 2016, RMIT Univ, Melbourne, Australia. Energy Procedia. V. 110, pp. 377-383. https://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=7
106. Kim, Hong-Bae. Identification of Key Elements for Stable Flight of Drones and Horizontal Space Compartment in Urban Area // Journal of Korea Planning Association, 2018, v. 53, iss. 7, PP. 39–48.
107. Krishna K., Narasimha M. Murty Genetic K-Means Algorithm // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1999. V. 3.
108. Lai Wei-Hsiang, Lai Ying-Chih, Lan Zao-Sin, Lin Hsiao-Hung, Ho WeiKuang. Development of an Internet of Things System Based on Unmanned Aerial Vehicles for the Application of Smart Security from Sky // Journal of Aeronautics Astronautics and Aviation, Jun 2018, v. 50, iss. 2, PP. 135–146. Doi 10.6125/JoAAA.201806_50(2).03.
109. Linnik I.I., Tamargazin A.A., Linnik E.P. Efficiency of controlling the production system at airports using the single information space for ensuring technological processes. CEUR Workshop Proceedings, 2019, pp.88-99.
110. Liu F, Ping D, Zhang X, Wang Y, Tao R. Multipoint location and error analysis based on the passive detection system // 5th International Symposium

- on Instrumentation and Control Technology. Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) V. 5253 pp. 309-315. https://apps.webofknowledge.com/Search.do?product=WOS&SID=C1C8GhRlbbfuPC3YLpl&search_mode=
111. Lutz Robert R., Frederick Paul S., Walsh Patricia M., Wasson Kimberly S., Fenlason Norm L. Integration of Unmanned Aircraft Systems into Complex Airspace Environments // Johns Hopkins Apl Technical Digest, V. 33, Iss. 4, Apr 2017, pp. 291–302. https://apps.webofknowledge.com/Search.do?product=WOS&SID=C1C8GhRlbbfuPC3YLpl&search_mode=
 112. Mesarovic M.D., Multilevel concept for systems engineering, Proc. Systems Eng. Conf., Chicago, Ill, 1965.
 113. Molano J.I.R.; Lovelle J.M.C.; Montenegro C.E.; Granados J.J.R.; Crespo R.G. Ruben Metamodel for integration of Internet of Things, Social Networks, the Cloud and Industry 4.0 // Journal of ambient intelligence and humanized computing. – 2018. Vol. 9 (3). – P. 709–723.
 114. Mozzaquatro B. A., Agostinho C., Goncalves D., Martins J., JardimGoncalves R. An Ontology-Based Cybersecurity Framework for the Internet of Things // Sensors (Basel, Switzerland). – 2018. Vol.18 (9).
 115. S.F. Telenik and I.Yu. Grishin “Analysis of modern algorithms for secondary information processing in statistical measurement information systems”, News of the Volodymyr Dahl Ukrainian National National University, vol. 1(131), part 2, 2009, pp. 145-155.
 116. S.Z. Kuzmin, T.V. Baringoltz, Iu.V. Datsenko, “The strategy of distribution of the energy resource in multipurpose radar systems with FAR”, Int. sci. tech. conf Modern radiolocation, 1994.
 117. Staroletov S., Dubko A. A Method to Verify Parallel and Distributed Software in C# by Doing Roslyn AST Transformation to a Promela Model. System Informatics, No. 15 (2019). P.13-43. DOI: 10.31144/si.2307-6410.2019.n15.p13-44.
 118. Sung T.K. Industry 4.0: A Korea perspective // Technological forecasting and social change. – 2018. Vol. 132. – P. 40–45.
 119. Тамаргазин А.А., Линник І.І. Керування процесом використання єдиного інформаційного поля забезпечення технологічних процесів в аеропорту / Наукоємні технології: Наук. журнал – Київ: НАУ, 2019. – № 4 (44). – С.494-499. DOI: 10.18372/2310-5461.44.14326.
 120. TTCN-3 Test Code Developments - Request for Information, May 1, 2008, Open Mobile Alliance.
 121. Zhen Ding, “A survey of radar resource management algorithms”, Electrical and Computer Engineering 2008. CCECE 2008. Canadian Conference on, no. 4-7, pp. 1559-001564, May 2008.

текстовое научное электронное издание

**ГРИШИН И.Ю.
ТИМИРГАЛЕЕВА Р.Р.
ЛИННИК И.И.**

**МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ
БЕСПИЛОТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

монография

Верстка А. Дубровин

Дизайн обложки: new7ducks / Freepik

Изображение на обложке: by macrovector / Freepik

Оформление электронного издания ООО «ЭЛИТ»

elit-publishing@yandex.ru

Объем издания 161 с (10,1 усл. п. л.)

Подписано к использованию 05.08.2020 г.