

На правах рукописи



Киселев Виктор Юрьевич

**ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТРАЕКТОРНОЙ ОБРАБОТКИ
В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ
УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ**

Специальность 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена на кафедре № 22 Радиотехнических систем Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Монаков Андрей Алексеевич

Официальные оппоненты: **Синицын Евгений Александрович**
доктор технических наук, профессор, начальник
НИО-50811000 Акционерного общества «Ордена
Трудового Красного Знамени Всероссийский на-
учно-исследовательский институт радиоаппара-
туры» (АО «ВНИИРА»)

Коновалов Александр Анатольевич
кандидат технических наук, научный сотрудник
кафедры Радиотехнических систем Федерального
государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования «Санкт-
Петербургский государственный электротехниче-
ский университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова
(Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

Ведущая организация: **Открытое акционерное общество «Централь-
ное научно-производственное объединение
«ЛЕНИНЕЦ» (ОАО «ЦНПО «ЛЕНИНЕЦ»)**

Защита состоится «27» июня 2017 г. в 14:00 на заседании диссертационного со-
вета Д 212.233.05 в Федеральном государственном автономном образователь-
ном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического приборостроения» по адресу:
г. Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 67, ауд. 53-01.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государствен-
ного автономного образовательного учреждения высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического прибо-
ростроения» и на сайте университета www.guap.ru.

Автореферат разослан «18» мая 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Овчинников Андрей Анатольевич
к.т.н., доцент

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В автоматизированных системах управления воздушным движением (АС УВД) точность оценивания траекторий воздушных судов (ВС), находящихся под управлением, имеет первостепенное значение. Траекторная обработка (ТО) является заключительным этапом обработки радиолокационной и радионавигационной информации. Ее результаты служат основой для принятия управленческих решений и предназначены непосредственно для отображения на рабочих местах диспетчеров УВД. Достоверность траекторной информации напрямую влияет на качество аэронавигационного обслуживания и безопасность полетов в зонах ответственности АС УВД.

В ТО принято выделять следующие этапы: обнаружение, ассоциация, фильтрация, объединение. Результатом ТО является формирование треков – оценок реальных траекторий наблюдаемых ВС. На этапе обнаружения треков принимается решение о принадлежности множества последовательных измерений траектории наблюдаемого объекта. На этапе ассоциации множество измерений разделяется на подмножества принадлежащих и не принадлежащих обнаруженным траекториям. На этапе фильтрации треки сглаживаются, и параметры движения наблюдаемого объекта уточняются согласно принятой модели движения. На этапе совместной обработки данных происходит объединение информации, поступающей от разных средств наблюдения.

На сегодняшний день в условиях устойчивого развития воздушного транспорта и средств наблюдения многие теоретические вопросы синтеза систем ТО (СТО) глубоко разработаны. Этого нельзя сказать о проблеме оценки качества этих систем. Очевидно, что для объективного определения эффективности СТО необходимо осуществить выбор соответствующих показателей качества (ПК) и способов их количественной оценки.

Степень разработанности темы. Вопросу разработки алгоритмов ТО посвящено большое количество работ таких отечественных и зарубежных авторов как С. З. Кузьмин, Я. Д. Ширман, П. А. Бакут, В. Е. Фарбер, В. С. Черняк, В. И. Меркулов, А. А. Коновалов, Я. Бар-Шалом, С. Блэкмен, А. Фарина, Ф. Студер, К. Р. Ли, В. П. Жилков, Т. Кирубарян, В. Д. Блэр. При этом авторы работ, посвященных разработке алгоритмов ТО, уделяют недостаточно внимания вопросам оценки качества алгоритмов и часто ограничиваются кратким обзором ПК, причем основное внимание отдано показателям обнаружения и фильтрации траекторий.

Наиболее авторитетным источником по оценке качества ТО является стандарт (*EUROCONTROL Standard document for radar surveillance in en-route airspace and major terminal areas, SUR.ET1.ST01.1000-STD-01-01, March 1997*) Европейской организации по безопасности воздушной навигации «*EUROCONTROL*», содержащий требования к качеству ТО в системах радиолокационного наблюдения УВД. Требования стандарта представляют собой предельные значения ПК ТО при заданных тестовых сценариях наблюдения ВС. Большинство перечисленных в стандарте показателей относится к этапу фильтрации треков.

Для того чтобы считать вопрос оценки качества ТО проработанным, необходимо предъявить четкие требования к показателям, осуществить их выбор, определить методики их количественной оценки, провести исчерпывающий анализ возможных значений. На сегодняшний день ни в одном из литературных источников все эти вопросы не проработаны в достаточной степени.

В настоящее время в АС УВД используются несколько видов систем радиотехнического наблюдения за воздушным пространством: первичные и вторичные радиолокационные станции (РЛС), а также системы на основе технологий *multilateration (MLAT)* и автоматического зависимого наблюдения (*ADS*). Несмотря на то, что современные системы обладают рядом преимуществ, традиционные РЛС не только не утратили свою актуальность, но и остаются обязательными и приоритетными средствами наблюдения в АС УВД. По этой причине в работе рассматриваются только радиолокационные источники наблюдения. Тем не менее, полученные результаты верны для всех радиотехнических средств наблюдения.

Цель и задачи. Целью диссертационной работы является выбор ПК траекторного сопровождения в радиолокационных комплексах (РЛК) АС УВД и разработка методики оценивания выбранных ПК.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать имитатор воздушной обстановки. Имитатор должен позволять моделировать траектории движения ВС в соответствии с заданным сценарием, а также истинные и ложные радиолокационные измерения в соответствии с заданными параметрами первичной обработки.

2. Разработать компьютерную модель модульной СТО. Модель должна позволять независимо менять алгоритмы работы каждого из этапов ТО.

3. Рассмотреть ПК для всех этапов ТО и предложить такую систему показателей, которая имеет ясный физический смысл и позволяет выполнить полноценный и достоверный сравнительный анализ различных алгоритмов ТО.

4. Синтезировать алгоритмы статистического оценивания предложенных ПК.

5. Разработать алгоритм получения интегрального ПК системы ТО в целом.

Научная новизна. Среди результатов исследования новыми являются следующие:

1. Разработаны наборы показателей, характеризующих качество следующих этапов ТО: обнаружения треков (ОТ), ассоциации измерений (АИ), фильтрации треков (ФТ) и совместной обработки данных (СОД), поступающих от сети радиолокационных источников информации.

2. Предложена методика статистического оценивания выбранных ПК.

3. На основе имитационного моделирования и предложенного набора показателей произведен анализ наиболее часто используемых алгоритмов ТО в условиях, характерных для задач УВД.

4. На основе аппарата нечеткой логики разработан алгоритм получения интегрального ПК СТО.

Теоретическая значимость полученных результатов. Теоретический интерес представляют наборы показателей, характеризующих качество этапов ТО, методики их статистической оценки, а также способ получения интегрального ПК ТО на основе аппарата нечеткой логики.

Практическая значимость полученных результатов. Разработанные методики оценки качества ТО и алгоритм получения интегрального ПК на основе экспертных оценок могут быть использованы для автоматизации решения следующих практических задач, возникающих при проектировании и сертификации АС УВД:

1. Принятие решения о соответствии исследуемой СТО заданным требованиям к качеству ТО, в частности требованиям стандарта, разработанного организацией «*EUROCONTROL*».

2. Получение сравнительной характеристики различных СТО с последующей оптимизацией структуры СТО.

3. Реализация алгоритмов оценки показателей качества в системах мониторинга АС УВД и сетей РЛС.

Проведенный в работе анализ позволил также выявить важные с точки зрения практического применения различия часто используемых на практике алгоритмов ТО.

Методология и методы исследования. В основу исследований положены методы теории вероятностей и математической статистики, методы математического моделирования, методы построения экспертных систем на основе нечеткой логики.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие положения:

1. Система из 39 показателей, характеризующих качество ТО, которые позволяют произвести полноценный и достоверный сравнительный анализ алгоритмов всех этапов ТО.

2. Методика статистического оценивания ПК по результатам математического моделирования процесса автоматического траекторного сопровождения ВС.

3. Алгоритм получения интегрального ПК ТО, который позволяет автоматизировать процесс принятия решения о соответствии СТО заданным требованиям.

4. Имитатор воздушной обстановки, который учитывает реальные характеристики ВС гражданской авиации и реализует сценарии наблюдения ВС, рекомендованные организацией «*EUROCONTROL*».

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов, полученных в работе, подтверждается корректным применением методов математической статистики, математического моделирования, соответствием предложенных моделей полета ВС и радиолокационной обстановки реальным физическим процессам. Для апробации предложенных ПК и методик их

оценивания используются наиболее часто применяемые в задачах УВД алгоритмы ТО. Кроме того, основные результаты диссертационной работы в период с 2013 по 2016 гг. обсуждались на конференциях: на научных сессиях СПбГУ-АП (г. Санкт-Петербург), на всеукраинской научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Проблемы навигации и управления движением» (г. Киев), на 20-й, 21-й и 22-й международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» RLNC (г. Воронеж), 69-й научно-технической конференции Санкт-Петербургской организации Общероссийской общественной организации «Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи» им. А. С. Попова, посвященной Дню радио (г. Санкт-Петербург).

Публикации. Основные результаты диссертации отражены в двенадцати научных публикациях, среди которых четыре статьи в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК.

Внедрение результатов исследования. Результаты работы используются в АО «Научно-производственное предприятие «Калужский приборостроительный завод «Тайфун» и ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», что подтверждается актами о внедрении.

Личный вклад. Все результаты, представленные в тексте диссертации, получены автором самостоятельно.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и трех приложений. Работа содержит 200 страниц машинописного текста, 70 рисунков, 10 таблиц, список использованных источников, включающий 159 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность работы, представлены цели и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава вводит в задачу ТО в АС УВД. Представлено описание работы однопозиционной СТО. Модульная архитектура СТО на рисунке 1 является канонической, а выделенные этапы ТО (обнаружение треков, ассоциация измерений, фильтрация треков, совместная обработка данных) в той или иной степени присущи любой СТО. Каждый из перечисленных этапов выполняется с помощью некоторого алгоритма обработки информации. Качество работы СТО, реализующих данную архитектуру, исследуется в диссертации. Рассмотрим представленную на рисунке 1 структурную схему однопозиционной СТО. Пусть *траектория цели* – четырехмерная (время + пространственные координаты) линия, соответствующая полету ВС в зоне ответственности АС УВД. Назовем *треком* оценку траектории, получаемую по результатам наблюдений.

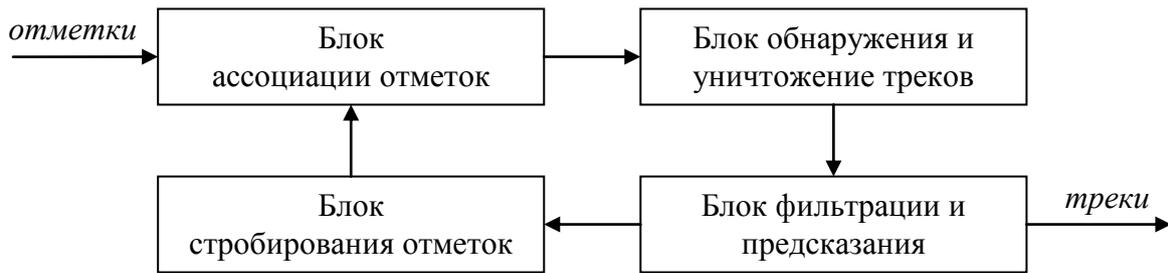


Рисунок 1 – Структурная схема однопозиционной СТО

Поток отметок от РЛК УВД поступает в блок ассоциации отметок с существующими в СТО на текущий момент времени треками. *Радиолокационная отметка* представляет собой объединенный вектор оценок координат обнаруженной цели и момента времени измерения. Ассоциация осуществляется на основании некоторого алгоритма, который оценивает расстояние между полученными отметками и существующими треками, и по полученной матрице расстояний производит ассоциирование. В результате ассоциирования множество отметок разделяется: ассоциированные отметки используются для обнаружения, подтверждения и продолжения (обновления) треков, а неассоциированные отметки для инициирования (завязки) новых треков. Ассоциированные отметки поступают в блок обнаружения и уничтожения треков. Обнаружение трека происходит на множестве ассоциированных отметок, полученных в нескольких последовательных периодах обзора, включая и текущий. Первой отметкой в этом множестве является отметка, породившая трек. Количество элементов в этом множестве обычно фиксировано и равно количеству периодов обзора, которое отводится на обнаружение трека. Обнаружение трека – это принятие решения о том, что полученное множество ассоциированных с завязанным треком отметок, действительно порождено сопровождаемой целью. В дальнейшем это множество динамически изменяется: в каждом текущем периоде обзора из него удаляется наиболее старая отметка и включается новая, только что полученная, если, конечно, такая есть. Треки, множества ассоциированных отметок которых не достаточны (например, пусты) для подтверждения факта его существования, уничтожаются. Если в текущем периоде обзора в блоке обнаружения и уничтожения было принято решение об обнаружении или подтверждении трека, то в блоке фильтрации и предсказания происходит вычисление оценки текущего и экстраполированного (предсказанного на следующий период обзора) положения цели. Экстраполированная оценка поступает в блок стробирования, где используется для построения строба трека.

Таким образом, СТО представляет собой замкнутую автоматическую систему управления, входным процессом которой является поток отметок от РЛК УВД, а выходным – множество треков. Каждый из перечисленных блоков реализует некоторый алгоритм обработки поступающей на его вход информации. В настоящее время предложено большое количество алгоритмов реализации рассмотренных этапов ТО.

Поскольку вышеперечисленные блоки в составе СТО (рисунок 1) выполняют различные задачи, то и ПК их работы также будут различны. Система показателей по каждому блоку должна давать объективную оценку качества для любого из алгоритмов обработки информации возможных для его реализации. Выбор ПК должен осуществляться на единой основе, руководствуясь следующими общими положениями:

1. Количество показателей должно быть минимальным, но достаточным для оценки качества и выбора на основе этой оценки соответствующих алгоритмов для реализации в СТО;
2. ПК должны быть универсальными, т.е. в равной степени применимыми ко всем сравниваемым алгоритмам;
3. Для всех выбранных показателей должна существовать возможность получения их статистических оценок;
4. В номенклатуру показателей не должны входить показатели, между которыми существует тесная корреляционная связь;
5. Используемые показатели должны быть критичны по отношению к варьируемым параметрам алгоритмов.

В общем случае значения ПК СТО зависят от местоположения ВС, параметров движения, а также от характеристик первичной обработки РЛС (вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги; точностей измерения дальности и азимута). Для проведения статистического эксперимента каждое испытание по исследованию алгоритмов должно проводиться при одинаковых параметрах траектории и измерителя. Методика проведения эксперимента по оценке ПК ТО включает в себя:

1. Определение требований к условиям сопровождения ВС, а именно выбор исследуемых алгоритмов ТО, динамических параметров ВС, точностных и вероятностных характеристик РЛС;
2. Проведение имитационного моделирования заданного сценария статистически достаточное количество раз и получение массивов выходных данных от исследуемых алгоритмов;
3. Расчет на основе полученных данных зависимостей оценок показателей от характеристик РЛС.

Результатом выполнения приведенной последовательности действий для различных показателей является набор эмпирических зависимостей значений ПК от характеристик первичной обработки РЛС. Полученные данные являются основой для проведения сравнительного анализа различных алгоритмов и последующего выбора лучшего алгоритма ТО.

Для моделирования воздушной обстановки в работе создан программный комплекс моделирования, включающий в себя имитатор траектории движения ВС, который позволяет моделировать полет ВС в соответствии с заданным сценарием; и имитатор радиолокационных измерений, который позволяет генерировать истинные и ложные отметки в соответствии с заданными параметрами первичной обработки.

Моделирование траектории движения ВС основывается на методике предсказания траектории ВС, разработанной организацией «EUROCONTROL», и предполагает имитацию работы бортовой системы управления полетом ВС. При моделировании траектории полета полагается, что ВС выполняет полет строго по заданному маршруту, соблюдая при этом оптимальные для ВС параметры полета.

Во второй главе рассматриваются вопросы оценки качества алгоритмов обнаружения треков ВС. Первоначально предложена система из шести показателей. По результатам моделирования предложенные шесть показателей были рассмотрены на наличие корреляционных связей и их информативности; в результате чего набор значимых ПК алгоритмов обнаружения треков был ограничен следующими тремя: вероятность обнаружения истинного трека (ИТ) $P_{ИТ}^{ОТ}(0 \leq t \leq T_{обн})$, среднее время обнаружения ИТ $\tau_{обн}^{ОТ}$, среднее количество ложных треков $\lambda_{ЛТ}^{ОТ}$. Для всех показателей качества были получены соответствующие статистические оценки. Например, вероятность обнаружения ИТ рассчитывается как среднее значение частот обнаружения моделируемых треков:

$$P_{ИТ}^{ОТ}(0 \leq t \leq T_{обн}) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{M_k(0 \leq t \leq T_{обн})}{N_k(0 \leq t \leq T_{обн})}.$$

Здесь надстрочный индекс «ОТ» указывает на принадлежность показателя к этапу обнаружения треков, K – количество испытаний, $M_k(0 \leq t \leq T_{обн})$ – количество успешных обнаружений истинных треков, $N_k(0 \leq t \leq T_{обн})$ – количество истинных траекторий, существовавших в течение интервала времени $0 \leq t \leq T_{обн}$. ПК обнаружения треков зависят как от самого алгоритма обнаружения, так и от параметров первичной обработки РЛС: вероятности правильного обнаружения сигнала D и вероятности ложной тревоги F . Поэтому для анализа алгоритма обнаружения следует рассматривать зависимость $P_{ИТ}^{ОТ}(0 \leq t \leq T_{обн})$ от D при заданной F .

В главе получены экспериментальные зависимости для двух алгоритмов обнаружения, основой которых являются метод серийных испытаний (СИ, критерий « m из n ») и преобразования Хафа (ПХ). Проведен сравнительный анализ обнаружителей треков. Набор показателей апробирован для сценария, характерного для задач радиолокационного сопровождения ВС в АС УВД. В качестве примера проведенных исследований на рисунке 2 приведены полученные зависимости $P_{ИТ}^{ОТ}(0 \leq t \leq T_{обн})$ от D при вероятности ложной тревоги $F = 10^{-6}$.

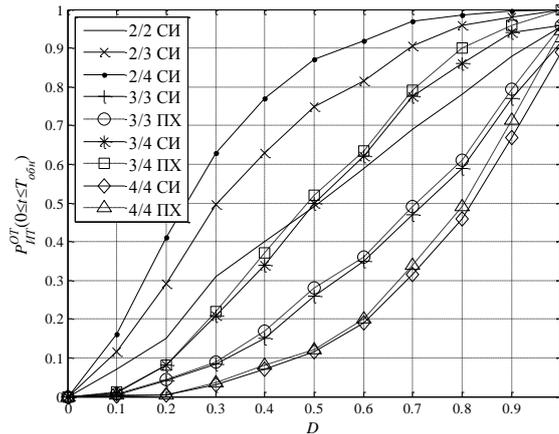


Рисунок 2 – Зависимости вероятности обнаружения ИТ $P_{ИТ}^{ОТ}(0 \leq t \leq T_{обн})$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D при $F = 10^{-6}$

Из рисунка 2 видно, что значение $P_{ИТ}^{ОТ}(0 \leq t \leq T_{обн})$ для всех рассмотренных алгоритмов монотонно возрастает с ростом D . При заданном количестве обзоров n скорость роста вероятности увеличивается с ослаблением критерия обнаружения, т.е. с уменьшением m – количества обзоров, в которых произошло попадание истинной отметки в строб сопровождения. Эта закономерность наблюдается как для алгоритмов СИ, так и для алгоритмов на основе ПХ. Причина отмеченного явления состоит в том, что при заданном временном ресурсе n с уменьшением m растет вероятность совместного попадания в строб трека отметок, принадлежащих этому треку. Незначительный выигрыш алгоритма ПХ по сравнению с алгоритмом СИ при одних и тех же m и n обусловлен тем, что первый согласован, а второй не использует никакой априорной информации о прямолинейном характере движения ВС.

Таким образом, сделанный в работе анализ алгоритмов обнаружения треков по выбранным ПК выявил различия между рассмотренными алгоритмами обнаружения по степени использования априорной информации о характере движения ВС. В среднем алгоритмы, использующие более слабые критерии обнаружения, имеют показатели обнаружения ИТ выше, чем алгоритмы, использующие сильные критерии обнаружения. Однако этот выигрыш достигается за счет ухудшения показателей обнаружения ложных треков.

В третьей главе рассматриваются вопросы оценки качества алгоритмов ассоциации измерений. Первоначально предложена система из 13 показателей и методика их оценивания. По результатам апробации набор значимых показателей эффективности алгоритмов ассоциации измерений ограничен следующими шестью: вероятность правильной ассоциации истинной отметки $P_{ИТ}^{АИ}$, вероятность перепутывания истинных треков $S_{ИТ}^{АИ}$, вероятность потери ИТ $L_{ИТ}^{АИ}$, средняя длительность ИТ $\tau_{ИТ}^{АИ}$, частота появления ложных треков $\nu_{ЛТ}^{АИ}$. Для всех ПК были получены соответствующие оценки. Например, вероятность правильной ассоциации рассчитывается следующим образом:

$$P_{ИТ}^{АИ} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{M_k(ИО \in ИТ)}{N_k(ИО \in ИТ)}.$$

Надстрочный индекс «АИ» указывает на принадлежность показателя к этапу ассоциации измерений. Оценка этой вероятности формируется как выборочное среднее по ансамблю испытаний $k=1, \dots, K$ отношения количества истинных отметок (ИО), правильно ассоциированных с ИТ $M_k(ИО \in ИТ)$ к общему количеству истинных отметок $N_k(ИО \in ИТ)$ соответствующего ИТ.

Набор ПК и методики их оценивания апробированы на примере анализа эффективности ассоциации измерений с использованием алгоритмов ближайшего соседа (БС), глобального БС (ГБС), вероятностной ассоциации данных (ВАД) и совместной ВАД (СВАД). В качестве примера проведенных исследований на рисунке 3 приведены зависимости $P_{ИТ}^{АИ}$ от D при $F = 10^{-6}$.

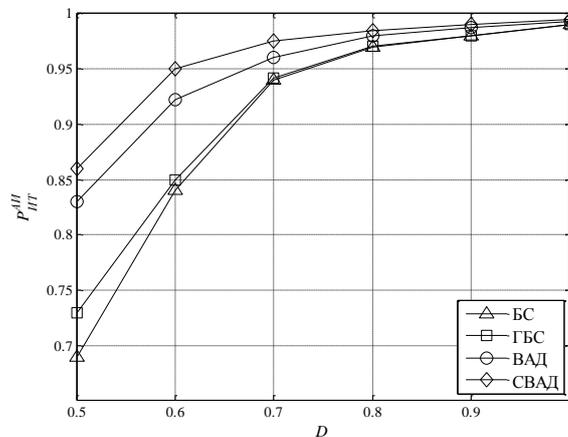


Рисунок 3 – Зависимости вероятности правильной ассоциации истинной отметки $P_{ИТ}^{АИ}$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D при $F = 10^{-6}$

Из рисунка 3 видно, что байесовские алгоритмы (ВАД, СВАД) превосходят по данному показателю эмпирические алгоритмы (БС, ГБС). Такой результат является естественным следствием того факта, что в алгоритмах ВАД и СВАД все попавшие в строб измерения участвуют в синтезе отметки, которая ассоциируется с данным треком. Алгоритмы, реализующие стратегию глобальной ассоциации (ГБС, СВАД), незначительно превосходят соответствующие алгоритмы, использующие стратегию локальной ассоциации (БС, ВАД). Это объясняется стратегией глобальной ассоциации, в основе которой лежит решение оптимизационной задачи.

Проделанный анализ алгоритмов ассоциации измерений по выбранным ПК выявил различия между байесовским и эмпирическим подходом, стратегиями глобальной и локальной ассоциации измерений. В среднем алгоритмы, реализующие байесовский подход, имеют лучшие ПК ассоциации измерений, чем эмпирические алгоритмы.

В четвертой главе рассматриваются вопросы оценки качества алгоритмов фильтрации треков. Предложенная система ПК фильтрации треков состоит из двух наборов. Первый набор включает в себя 10 показателей, характери-

зующих флуктуационную составляющую ошибки оценивания траектории ВС. Второй набор включает 8 показателей, характеризующих динамическую составляющую ошибки оценивания траектории ВС. По результатам апробации набор значимых ПК фильтрации треков ограничен следующими 8 показателями, характеризующими флуктуационную составляющую ошибки: смещения $b_X^{\Phi T}$, $b_Z^{\Phi T}$ и СКО $s_X^{\Phi T}$, $s_Z^{\Phi T}$ оценки положения в тангенциальном (X) и нормальном (Z) направлениях, смещение $b_V^{\Phi T}$ и СКО $s_V^{\Phi T}$ оценки путевой скорости ВС, смещение $b_\Phi^{\Phi T}$ и СКО $s_\Phi^{\Phi T}$ оценки курса ВС; и 4 показателями, характеризующими динамическую составляющую ошибки: пиковые значения ошибки (ПЗО) $m_X^{\Phi T}$, $m_Z^{\Phi T}$ оценки положения в тангенциальном (X) и нормальном (Z) направлениях, ПЗО оценки путевой скорости ВС $m_V^{\Phi T}$, ПЗО оценки курса ВС $m_\Phi^{\Phi T}$.

Для всех ПК были получены соответствующие оценки. Показатели первого набора, например, смещения $b_X^{\Phi T}$, $b_Z^{\Phi T}$ и СКО $s_X^{\Phi T}$, $s_Z^{\Phi T}$ оценки положения представляют собой выборочные статистические характеристики ошибки оценки положения ВС по ансамблю испытаний $k=1, \dots, K$:

$$b_X^{\Phi T} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^{N_k} X(n), \quad b_Z^{\Phi T} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^{N_k} Z(n),$$

$$s_X^{\Phi T} = \left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N_k - 1} \sum_{n=1}^{N_k} (X(n))^2 \right]^{1/2}, \quad s_Z^{\Phi T} = \left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N_k - 1} \sum_{n=1}^{N_k} (Z(n))^2 \right]^{1/2},$$

где N_k – количество истинных траекторий в k -м испытании; $X(n)$, $Z(n)$ – выборочные средние значения по длине n -го трека ошибки оценки положения ВС. Надстрочный индекс «ФТ» указывает на принадлежность к блоку фильтрации траекторий. Все показатели оцениваются в скоростной системе координат ВС.

Показатели второго набора, например, ПЗО оценок положения равны среднему максимальному значению СКО соответствующего параметра трека относительно истинной траектории, которые наблюдаются во время перехода ВС от одной модели движения к другой.

Предложенные показатели позволяют судить о точности оценки параметров движения ВС на участках траектории без изменения модели движения и со сменой типа движения. Поскольку показатели имеют смысл только для ИТ, следует рассматривать зависимости показателей первой группы от СКО оценки местоположения ВС $\sigma_{МП} = \sqrt{\sigma_R^2 + R^2 \sigma_\phi^2}$ (R – дальность до ВС, σ_R – СКО оценки дальности; σ_ϕ – СКО оценки азимута), а показателей второй группы – от вероятности правильного обнаружения сигнала D при заданной вероятности ложной тревоги F . Такой выбор связан с ориентацией показателей: в первой группе они характеризуют флуктуационную ошибку оценки траектории, во второй – динамическую ошибку.

Набор ПК и методики их оценивания апробированы на примере анализа эффективности оценивания параметров движения ВС с использованием сле-

дующих одномодельных алгоритмов, согласованных с моделью равноускоренного движения: фильтр Калмана (ФК), расширенный ФК (РФК), сигматочечный ФК (СТФК), фильтр частиц (ФЧ); и следующих многомодельных алгоритмов (ММА), согласованных с моделями равномерного прямолинейного движения (РПД), правым и левым стандартным разворотом (СР) с известной угловой скоростью: интерактивный многомодельный (ИММ) ФК, ИММ РФК, ИММ СТФК и ИММ ФЧ. В качестве примера проведенных исследований на рисунке 4 приводятся зависимости $b_X^{\Phi T}$ и $s_X^{\Phi T}$ от $\sigma_{МП}$. Моделировалось РПД ВС.

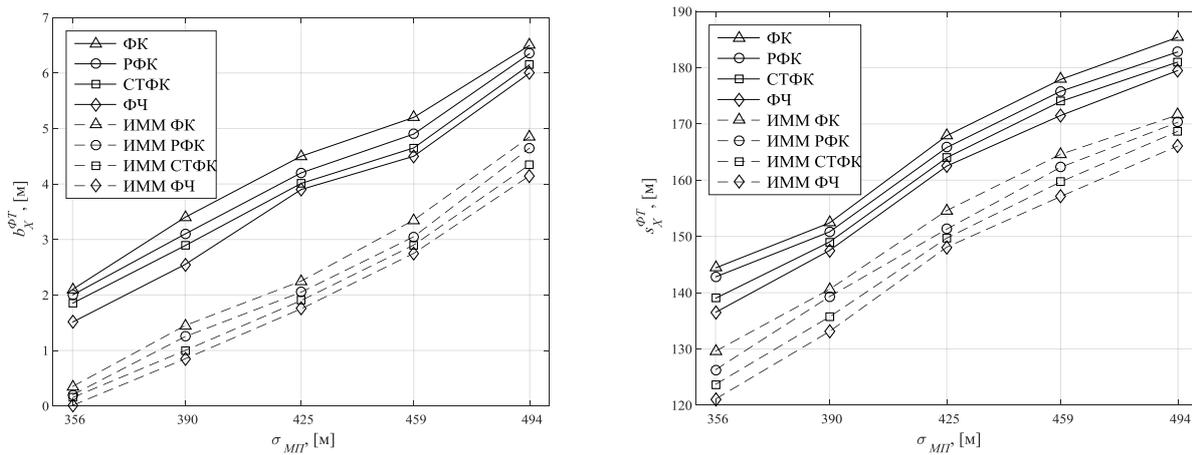


Рисунок 4 – Зависимости смещения $b_X^{\Phi T}$ и СКО $s_X^{\Phi T}$ оценки положения ВС в тангенциальном направлении от СКО оценки местоположения $\sigma_{МП}$

В отсутствие систематических погрешностей в РЛС шум измерений аппроксимируется процессом типа дискретный белый гауссовский шум с нулевым средним и постоянной дисперсией. Согласованный с истинным типом движения ВС траекторный фильтр минимизирует СКО оценок. Смещение оценки на его выходе равно нулю. В случае неточного согласования оценка приобретает смещение. Из рисунка 4 видно, что значения $b_X^{\Phi T}$ и $s_X^{\Phi T}$ действительно монотонно и линейно увеличиваются с ростом СКО оценки местоположения ВС $\sigma_{МП}$ для всех рассматриваемых фильтров. ММА включают в себя банки фильтров, в которых присутствуют настроенные на модель РПД фильтры. Поэтому смещение и СКО оценок для ММА, хоть и незначительно, но меньше, чем у одномодельных алгоритмов.

Анализ алгоритмов фильтрации и экстраполяции треков по выбранным показателям выявил различия между линейным алгоритмом фильтрации Калмана и его нелинейными модификациями, а также преимущества использования адаптивного подхода (на примере многомодельных фильтров). В среднем алгоритмы, реализующие адаптивный подход, имеют ПК фильтрации выше, чем алгоритмы, согласованные с единственной обобщенной моделью движения ВС – моделью равноускоренного движения. Поэтому применение ММА может дать значительный эффект для повышения качества ТО.

В пятой главе рассматриваются вопросы оценки качества алгоритмов ТО в многопозиционных радиолокационных системах. В случае многопозицион-

ных систем предполагается наличие некоторого алгоритма совместной обработки данных (СОД). СОД – процесс объединения отметок и треков от разных РЛС с целью формирования единого трека для каждого наблюдаемого объекта. Монотреком назовем трек, полученный в результате ТО в одной отдельно взятой РЛС. Объединенный трек – это трек, синтезированный в результате совместной обработки данных нескольких РЛС.

Предложенные показатели можно разделить на две категории: универсальные показатели, которые применимы одновременно для оценки качества монотреков и объединенных треков, и специальные показатели, которые характеризуют исключительно качество СОД. Первый набор включает в себя наиболее важные показатели из числа отмеченных в предыдущих главах. Вторым набором состоит из показателей, характеризующих качество собственно процесса СОД, а именно: вероятность правильного объединения данных $P_{ИТ}^{СОД}$, вероятность правильного обнаружения истинной траектории $E_{ИТ}^{СОД}$, вероятность мультипликации истинной траектории $M_{ИТ}^{СОД}$ и 16 показателей улучшения качества объединенного трека по сравнению с монотреком.

Выражения для оценок показателей первого набора приводятся в соответствующих главах. Для ПК второй группы в работе также были получены соответствующие статистические оценки. Показатели улучшения качества объединенного трека по сравнению с монотреком рассчитываются по идентичным формулам. В качестве примера рассмотрим коэффициент увеличения вероятности обнаружения ИТ $R^{СОД/ОТ}(P_{ИТ})$, который представляет собой выборочное среднее по ансамблю испытаний $k=1, \dots, K$ отношения вероятности обнаружения объединенного трека $P_{ИТ}^{СОД/ОТ}$ к вероятности обнаружения монотрека $P_{ИТ}^{ОТ}$:

$$R^{СОД/ОТ}(P_{ИТ}) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{P_{ИТ}^{СОД/ОТ}(k)}{P_{ИТ}^{ОТ}(k)}.$$

Анализ качества объединенного трека произведен по результатам моделирования процесса автоматического сопровождения ВС в трассовой зоне по данным двух вторичных радиолокаторов. Набор ПК и методики их оценивания апробированы на примере анализа эффективности объединения данных с использованием трех схем СОД: объединение на уровне отметок (СОД-1), объединение на уровне монотреков (СОД-2), гибридное объединение (СОД-3). В качестве примера проведенных исследований на рисунке 5 приводятся зависимости $P_{ИТ}^{СОД/ОТ}(0 \leq t \leq T_{обн})$ и $R^{СОД/ОТ}(P_{ИТ})$ от D при $F = 10^{-6}$.

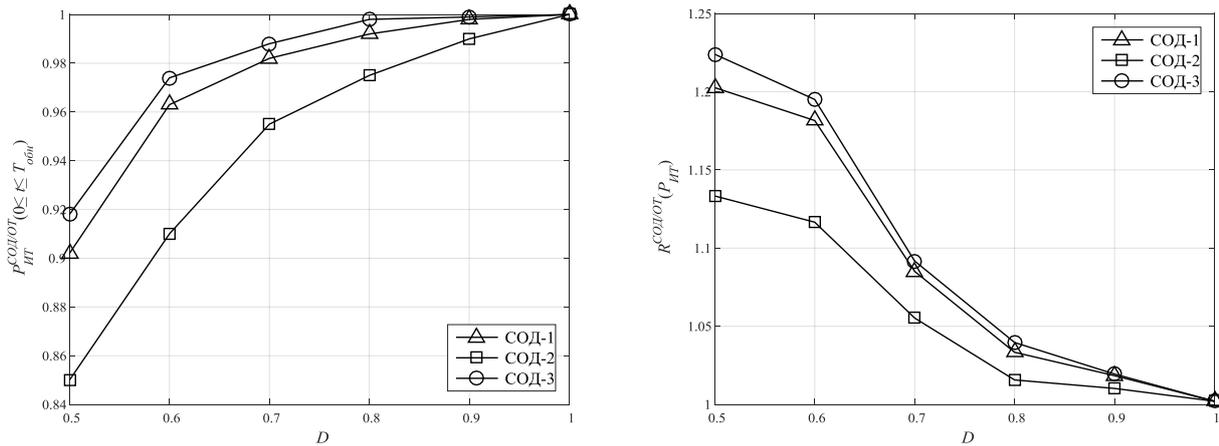


Рисунок 5 – Зависимости вероятности обнаружения ИТ $P_{IT}^{COD/OT}(0 \leq t \leq T_{обн})$ и коэффициента увеличения вероятности обнаружения ИТ $R^{COD/OT}(P_{IT})$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D при $F = 10^{-6}$

Из рисунка 5 видно, что зависимости, соответствующие схеме СОД-3, проходят выше зависимостей, соответствующих схемам СОД-1 и СОД-2. Это преимущество является следствием того, что в схеме СОД-3 применяется стратегия глобальной ассоциации отметок (ГБС). В схеме СОД-1 ввиду асинхронного характера ТО применяется стратегия локальной ассоциации отметок (БС). В схеме СОД-2 ТО отметок каждой РЛС ведется независимо. Таким образом, сочетание преимуществ первой и второй схемы СОД положительно сказывается на качестве обнаружения ИТ. Зависимости коэффициента увеличения вероятности правильного обнаружения ИТ $R^{COD/OT}(P_{IT})$ для всех рассмотренных алгоритмов СОД монотонно стремятся к единице с ростом D . Это свидетельствует о преимуществах СОД в случае объединения информации от нескольких сенсоров среднего класса точности. При наличии в системе наблюдения высокоточных РЛС преимущества СОД существуют, но они не так велики. В целом проведенный анализ выявил важные, с точки зрения практического применения, различия рассмотренных схем объединения данных в многопозиционных РЛК.

По результатам анализа качества алгоритмов ТО, проведенном в главах 2 – 5, сделан ряд общих выводов. В общем, качество первичной обработки в РЛС, которое характеризуется вероятностями правильного обнаружения сигнала D и ложной тревоги F , точностями измерения дальности и азимута, определяет качество ТО. Полученные зависимости ПК свидетельствуют о том, что качество ТО улучшается с ростом качества первичной обработки. Вполне закономерна тенденция уменьшения степени различия в качестве алгоритмов с ростом D . Выявлено, что для качественной ТО необходимо, чтобы эти показатели удовлетворяли следующим условиям: $D \geq 0.8$ и $F \leq 10^{-6}$, что соответствует нормативам стандарта «EUROCONTROL». В целом проведенный анализ позволил оценить важные с точки зрения практического применения различия рассмотренных алгоритмов ТО. Предложенные наборы показателей позволяют произвести

объективный сравнительный анализ алгоритмов на различных этапах ТО; осуществить выбор алгоритма, исходя из предъявляемых к СТО требований.

В шестой главе разработан алгоритм получения интегрального ПК ТО на основе аппарата нечеткой логики. В предыдущих главах были предложены наборы ПК для каждого этапа ТО. Всего было определено 39 показателей, из них качество ОТ оценивается тремя показателями, АИ – пятью, ФТ – 12 и СОД – 19. Очевидно, что имея в распоряжении такое количество ПК СТО, решить задачу оценки качества СТО в целом затруднительно даже для опытного эксперта. Задача сравнительной оценки нескольких СТО осложняется тем, что одна и та же СТО может в большей степени удовлетворять требованиям к одному этапу ТО и в меньшей – требованиям к другому, в то время как для другой СТО ситуация может быть обратной. Таким образом, более предпочтительным является такой подход, при котором решение данной задачи получается автоматически с привлечением полной системы показателей. В таком случае имеется возможность получить объективную интегральную оценку качества работы СТО. Для определения технического состояния объекта в условиях большого количества информации широко применяются экспертные системы, основанные на алгоритмах нечеткого логического вывода (НЛВ).

Как отмечалось, процесс ТО принято делить на четыре этапа. Было показано, что такое разделение позволяет независимо оценивать качество различных этапов ТО. В работе предложена следующая методика интегральной оценки качества СТО:

- 1) Применение методик по оценке ПК отдельных этапов ТО;
- 2) Получение интегральных ПК этапов ТО;
- 3) Получение интегрального ПК СТО в целом.

Первый шаг методики подробно описан в главах 2 – 5. Следующие два шага реализуются с помощью схемы, приведенной на рисунке 6.

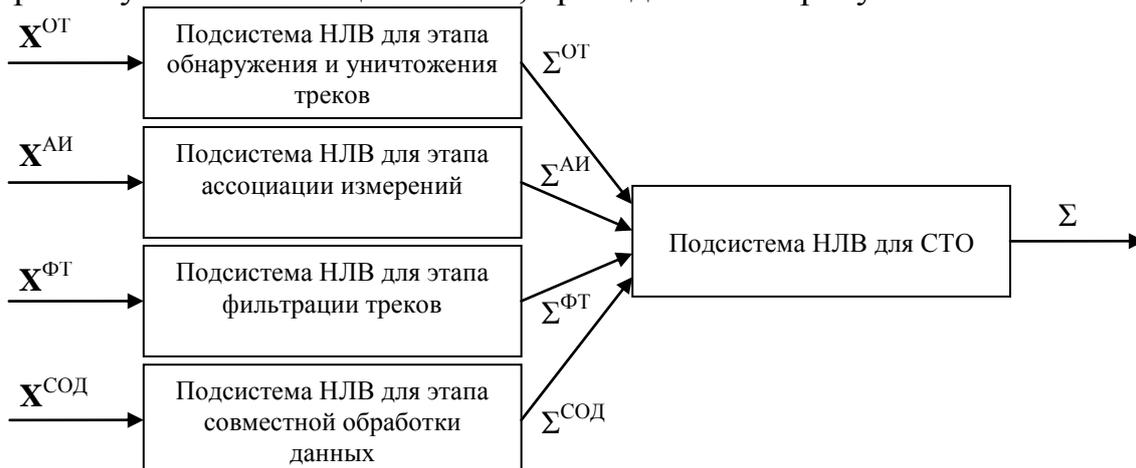


Рисунок 6 – Система НЛВ для интегральной оценки качества СТО

Предлагаемая система НЛВ состоит из двух уровней. На первом производится интегральная оценка качества отдельных этапов ТО. На втором – по результатам первого вычисляется интегральный ПК СТО. На вход системы поступают следующие векторы показателей: $\mathbf{x}^{\text{ОТ}}$, $\mathbf{x}^{\text{АИ}}$, $\mathbf{x}^{\text{ФТ}}$, $\mathbf{x}^{\text{СОД}}$ – векторы ПК этапов ОТ, АИ, ФТ, СОД, соответственно. По результатам интегральной

оценки качества этапов ТО получают следующие интегральные ПК Σ^{OT} , Σ^{AI} , $\Sigma^{ФТ}$, $\Sigma^{СОД}$ этапов ОТ, АИ, ФТ, СОД, соответственно.

Каждая подсистема на рисунке б реализуется с использованием алгоритма НЛВ Мамдани. Алгоритм НЛВ задает отображение вектора входных данных в скалярный параметр, используя нечеткие отношения и правила. Для того чтобы адаптировать алгоритм НЛВ Мамдани под предметную область необходимо, во-первых, определить лингвистические переменные и функции принадлежности, во-вторых, сформировать базу нечетких правил.

Для решения этих задач был сформулирован «Опросный лист для экспертной оценки показателей качества СТО в РЛК УВД», который предлагался группе экспертов в области разработки алгоритмов ТО и средств УВД для формирования интегральной оценки качества ТО. Результаты ответов экспертов использовались для построения функций принадлежности ПК и формирования базы нечетких правил. Опросный лист состоит из четырех секций. Каждая секция соответствует отдельному этапу ТО. Для каждого показателя экспертам предлагается определить:

1. Диапазоны значений показателя, соответствующие значениям лингвистических переменных: «Низкий», «Средний», «Высокий». Диапазоны значений показателей и лингвистические переменные использовались для получения функций принадлежности ПК.

2. Степень влияния показателя на качество соответствующего этапа ТО. Степени влияния предлагается характеризовать следующими лингвистическими переменными: «Отсутствует или практически отсутствует», «Низкая», «Средняя», «Высокая». Степени влияния ПК использовались при формировании базы нечетких правил.

В главе произведен сравнительный анализ двух СТО с учетом требований к качеству ТО в системах УВД. Анализ качества СТО произведен по результатам моделирования процесса автоматического сопровождения ВС по вышеописанной методике. Математический эксперимент проводился на базе модульной СТО (рисунок 1). Модульность позволяет быстро изменять конфигурацию СТО. Методика оценивания апробирована на двух конфигурациях СТО. Состав алгоритмов в исследуемых системах:

СТО-1: алгоритм ОТ: СИ 2/4; алгоритм АИ: БС; алгоритм ФТ: ФК; алгоритм СОД: СОД-1.

СТО-2: алгоритм ОТ: ПХ 2/3; алгоритм АИ: СВАД; алгоритм ФТ: ИММ ФЧ; алгоритм СОД: СОД-3.

Анализ качества СТО произведен по результатам моделирования процесса автоматического сопровождения ВС в сценариях, соответствующих стандартным тестам «*EUROCONTROL*», рассмотренных в главах 2 – 5. Характеристики качества первичной обработки РЛС соответствуют нормативам стандарта «*EUROCONTROL*»: $D = 0.9$; $F = 10^{-6}$; $\sigma_R = 70$ м; $\sigma_\varphi = 0.08^\circ$.

В таблице 1 приведены результаты оценки работы двух СТО: интегральные ПК отдельных этапов ТО и СТО в целом. Интегральные ПК имеют три возможных значения: «Низкий», «Средний» и «Высокий».

Таблица 1. Результаты оценки качества работы двух СТО

	СТО-1	СТО-2
Обнаружение треков Σ_{OT}	Высокий	Высокий
Ассоциация измерений Σ_{AI}	Средний	Высокий
Фильтрация треков Σ_{FT}	Средний	Высокий
Совместная обработка $\Sigma_{СОД}$	Высокий	Высокий
Интегральная оценка Σ	Средний	Высокий

Проделанный анализ выявил различия в эффективности некоторых алгоритмов в составе исследуемых СТО с точки зрения требований к качеству ТО в системах УВД. Прежде всего, необходимо подчеркнуть, что только СТО с «Высоким» интегральным ПК Σ могут быть рекомендованы для применения в АС УВД.

Как уже отмечалось, интегральный ПК ТО получается из интегральных ПК этапов ТО. База правил для подсистемы НЛВ для СТО (см. рисунок 6) организована таким образом, что этапы ТО имеют одинаковый приоритет. Поэтому интегральный показатель определяется худшим интегральным ПК этапов ТО. Таким образом, из анализа данных таблицы 1 следует, что СТО-2 удовлетворяет требованиям к качеству ТО в системах УВД, а СТО-1 не удовлетворяет. При этом, очевидно, что повышение эффективности СТО-1 до приемлемого уровня возможно после соответствующей замены алгоритма ассоциации измерений и алгоритма фильтрации треков.

В заключительной главе предложена методика, решающая задачу интегральной оценки качества ТО. В основе методики лежат: математическое моделирование процесса радиолокационного наблюдения и процесса автоматического сопровождения ВС, независимая оценка этапов ТО и нечеткая логика принятия решения о качестве ТО на базе экспертных оценок. При этом достоверность оценок качества обеспечивается корректно проведенным опросом мнений экспертов. Существенным достоинством предлагаемой методики является возможность выявить слабые места СТО на уровне этапов ТО и соответствующих алгоритмов. Таким образом, методика позволяет определить несоответствие СТО требованиям к качеству еще на этапе разработки, а не в процессе эксплуатации или ввода в эксплуатацию. При этом если СТО имеет модульную архитектуру, заменить отдельный алгоритм не составляет труда даже в процессе эксплуатации. Отмеченная особенность делает предлагаемую методику ценной как для разработчиков, так и для пользователей АС УВД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача оценки качества ТО в РЛК УВД. В процессе выполнения работы были получе-

ны следующие основные результаты, имеющие научное и практическое значение:

1. Разработан имитатор воздушной обстановки. Имитатор позволяет моделировать траекторию движения любого из существующих в настоящее время ВС в соответствии с заданным сценарием, а также истинные и ложные радиолокационные измерения в соответствии с заданными параметрами первичной обработки.

2. Разработана модель модульной системы ТО. Модель позволяет независимо менять алгоритмы работы каждого из этапов ТО.

3. Рассмотрены ПК для всех этапов ТО и предложена система показателей, которая имеет ясный физический смысл и позволяет выполнить полноценный и достоверный сравнительный анализ различных алгоритмов ТО.

4. Разработаны алгоритмы статистического оценивания предложенных ПК.

5. На основе имитационного моделирования произведен анализ наиболее часто используемых алгоритмов ТО в условиях, характерных для задач УВД.

6. На основе аппарата нечеткой логики разработан алгоритм получения интегрального ПК системы ТО. Показатель учитывает требования, предъявляемые к качеству ТО. Алгоритм базируется на независимой оценке этапов ТО и нечеткой логике принятия решения о качестве ТО на базе экспертных оценок. При этом достоверность оценок качества обеспечивается корректно проведенным опросом мнений экспертов.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень ВАК

1. Киселев, В.Ю. Оценка качества алгоритмов траекторной обработки в радиолокационных системах управления воздушным движением: обнаружение треков / В.Ю. Киселев, А.А. Монаков // Радиотехника. – 2016. – № 3. – С. 28 – 36.

2. Киселев, В.Ю. Оценка качества алгоритмов траекторной обработки в радиолокационных системах управления воздушным движением: ассоциация измерений / В.Ю. Киселев, А.А. Монаков // Успехи современной радиоэлектроники. – 2016. – № 8. С. 55 – 66.

3. Киселев, В.Ю. Оценка качества алгоритмов траекторной обработки в радиолокационных системах управления воздушным движением: фильтрация треков / В.Ю. Киселев, А.А. Монаков // Успехи современной радиоэлектроники. – 2017. – № 2. – С. 34 – 49.

4. Киселев, В.Ю. Предсказание траектории воздушного судна в автоматизированных системах управления воздушным движением / В.Ю. Киселев, А.А. Монаков // Информационно-управляющие системы. – 2015. – №4. – С. 33 – 40.

Другие статьи и материалы конференций:

1. Киселев, В.Ю. Анализ точности алгоритмов фильтрации пространственных координат одиночной маневрирующей воздушной цели / В.Ю. Киселев

// Всеукраинская научно-практическая конференция молодых ученых и студентов «Проблемы навигации и управления движением». Сборник тезисов докладов. 18 - 20 ноября 2013 г., Киев. – с. 29.

2. Киселев, В.Ю. Оценка качества алгоритмов обнаружения траекторий в системах управления воздушным движением / В.Ю. Киселев // Сборник докладов конференции RLNC-2014. Том 3, секции 8-10, 15-17 апреля 2014 г., Воронеж. – С. 1744 – 1752.

3. Киселев, В.Ю. Показатели и методика оценивания качества алгоритмов обнаружения траекторий в радиотехнических системах управления воздушным движением / В.Ю. Киселев // Научная сессия ГУАП. Часть II. Технические науки. Сборник докладов. 9-12 апреля 2014 г., Санкт-Петербург. – С. 56 – 62.

4. Киселев, В.Ю. Анализ характеристик качества алгоритмов обнаружения траекторий в системах управления воздушным движением / В.Ю. Киселев // 69-я научно-техническая конференция Санкт-Петербургской организации Общероссийской общественной организации «Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи» им. А. С. Попова, посвященная Дню радио. Труды конференции. 17-25 апреля 2014 г., г. Санкт-Петербург. – С. 55 – 56.

5. Киселев, В.Ю. Оценка качества алгоритмов ассоциации измерений в системах управления воздушным движением / В.Ю. Киселев // Сборник докладов конференции RLNC-2015. Том 2, секции 8-10, 14-16 апреля 2015 г., Воронеж. – С. 594 – 609.

6. Киселев, В.Ю. Анализ показателей и разработка методики оценивания качества алгоритмов ассоциации измерений в радиотехнических системах управления воздушным движением / В.Ю. Киселев // Научная сессия ГУАП. Часть II. Технические науки. Сборник докладов. 6-10 апреля 2015 г., Санкт-Петербург. – С. 85 – 95.

7. Киселев, В.Ю. Оценка качества алгоритмов фильтрации треков в системах управления воздушным движением / В.Ю. Киселев, А.А. Монаков // Сборник докладов конференции RLNC-2016. 19-21 апреля 2016 г., Воронеж. – С. 1221 – 1236.

8. Киселев, В.Ю. Анализ показателей и разработка методики оценивания качества алгоритмов фильтрации траекторий в радиотехнических системах управления воздушным движением / В.Ю. Киселев // Научная сессия ГУАП. Часть II. Технические науки. Сборник докладов. 9-12 апреля 2016 г., Санкт-Петербург. – С. 55 – 67.