

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования

«Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического
приборостроения»

На правах рукописи

Киселев Виктор Юрьевич

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

05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Монаков Андрей Алексеевич

Санкт-Петербург – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТРАЕКТОРНОЙ ОБРАБОТКИ	15
1.1 Система траекторной обработки	15
1.2 Оценка качества траекторной обработки	18
1.3 Выводы.....	25
2 ОЦЕНКА КАЧЕСТВА АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ ТРЕКОВ	26
2.1 Алгоритмы обнаружения треков	26
2.2 Выбор показателей, характеризующих качество функционирования алгоритмов обнаружения треков	27
2.3 Методика оценивания показателей и результаты математического моделирования.....	31
2.4 Выводы.....	39
3 ОЦЕНКА КАЧЕСТВА АЛГОРИТМОВ АССОЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ ...	41
3.1 Алгоритмы ассоциации измерений.....	41
3.2 Выбор показателей, характеризующих качество функционирования алгоритмов ассоциации измерений	43
3.3 Методика оценивания показателей и результаты математического моделирования.....	49
3.4 Выводы.....	60
4 ОЦЕНКА КАЧЕСТВА АЛГОРИТМОВ ФИЛЬТРАЦИИ ТРЕКОВ	61
4.1 Алгоритмы фильтрации траекторий	61
4.2 Выбор показателей, характеризующих качество функционирования алгоритмов фильтрации траекторий	65
4.3 Методика оценивания показателей и результаты математического моделирования.....	70
4.4 Выводы.....	88
5 ОЦЕНКА КАЧЕСТВА АЛГОРИТМОВ ТРАЕКТОРНОЙ ОБРАБОТКИ В МНОГОПОЗИЦИОННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ	89

5.1 Схемы совместной обработки данных.....	89
5.1.1 Система траекторной обработки с объединением на уровне отметок	92
5.1.2 Система траекторной обработки с объединением на уровне монотреков	93
5.1.3 Система траекторной обработки с гибридным объединением	94
5.2. Методы объединения данных в системе траекторной обработки ..	95
5.2.1 Методы селекции	95
5.2.2 Методы взвешивания/усреднения.....	95
5.2.3 Метод переменного времени обновления	96
5.3 Выбор показателей, характеризующих качество траекторной обработки в многопозиционных радиолокационных системах.....	97
5.4 Методика оценивания показателей и результаты математического моделирования.....	103
5.5 Выводы.....	128
6 ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СИСТЕМ ТРАЕКТОРНОЙ ОБРАБОТКИ.....	130
6.1 Введение.....	130
6.2 Нечеткий логический вывод	131
6.3 Методика оценивания качества СТО и результаты математического моделирования.....	133
6.4 Выводы.....	142
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	144
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	145
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	148
ПРИЛОЖЕНИЕ А ПРЕДСКАЗАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ВОЗДУШНОГО СУДНА В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ.....	166

ПРИЛОЖЕНИЕ Б ОПРОСНЫЙ ЛИСТ для экспертной оценки показателей качества систем тракторной обработки в РЛК УВД.....	181
ПРИЛОЖЕНИЕ В АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ.....	199

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Траекторная обработка (ТО) в автоматизированных системах управления воздушным движением (АС УВД) является заключительным этапом обработки радиолокационной и радионавигационной информации. Ее результаты служат основой для принятия управленческих решений и непосредственно используются для отображения воздушной обстановки на рабочих местах диспетчеров УВД. Достоверность траекторной информации напрямую влияет на качество аэронавигационного обслуживания и безопасность полетов в зонах ответственности АС УВД.

Траекторную обработку принято рассматривать как совокупность следующих операций [1, 2]: получение первичных измерений (отметок) целей от РЛС, обнаружение и уничтожение треков, ассоциация и стробирование отметок, фильтрация и предсказание, объединение данных, полученных от разных источников. Результатом совместного выполнения этих операций является совокупность треков – оценок реальных траекторий наблюдаемых ВС. На этапе обнаружения треков принимается решение о принадлежности множества последовательных измерений траекториям 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 алгоритмов для систем траекторной обработки глубоко разработаны. Существует большое количество методов реализации отмеченных выше операций. Однако, этого нельзя сказать о проблеме оценки качества этих систем. Очевидно, что для объективного определения эффективности систем траекторной обработки

необходимо осуществить выбор соответствующих показателей качества 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 показателей качества, причем основное внимание отдано показателям обнаружения и фильтрации траекторий.

Наиболее авторитетным источником по оценке качества ТО является стандарт Европейской организации по безопасности воздушной навигации «*EUROCONTROL*», содержащий требования к качеству СТО в системах радиолокационного наблюдения УВД. Требования стандарта представляют собой предельные значения показателей качества 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. В настоящее время ни в одном из литературных источников все эти вопросы не проработаны в достаточной степени.

На сегодняшний день 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 (АЗН) [3]. 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 показателей качества траекторного сопровождения в радиолокационных комплексах (РЛК) АС УВД и разработка методики оценивания выбранных показателей качества.

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, истинные и ложные радиолокационные измерения в соответствии с заданными параметрами первичной обработки.

2. Разработать компьютерную модель модульной системы траекторной обработки. Модель должна позволять независимо менять алгоритмы работы каждого из этапов траекторной обработки.

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

4. Синтезировать алгоритмы статистического оценивания предложенных показателей качества.

5. Разработать алгоритм получения интегрального показателя качества системы траекторной обработки, который должен учитывать требования, предъявляемые к качеству траекторной обработки.

Научная новизна. Среди результатов исследования новыми являются следующие:

1. Разработаны наборы показателей, характеризующих качество обнаружения треков, ассоциации измерений, фильтрации треков и совместной

обработки данных, поступающих от сети радиолокационных источников информации.

2. Предложена методика статистического оценивания выбранных показателей качества.

3. На основе имитационного моделирования произведен анализ наиболее часто используемых алгоритмов траекторной обработки в условиях, характерных для задач УВД.

4. На основе аппарата нечеткой логики разработан алгоритм получения интегрального показателя качества системы траекторной обработки.

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

Практическая значимость полученных результатов. Разработанные методики оценки качества траекторной обработки и алгоритм получения интегрального показателя качества 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 системы траекторной обработки (СТО) заданным требованиям к качеству траекторной обработки, в частности требованиям стандарта, разработанного Европейской организацией по безопасности воздушной навигации «*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 траекторной обработки.

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 траекторной обработки, которые позволяют произвести полноценный и достоверный сравнительный анализ алгоритмов всех этапов траекторной обработки.

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

3. Алгоритм получения интегрального показателя качества траекторной обработки, 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 Европейской организацией по безопасности воздушной навигации «*EUROCONTROL*».

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 показателей качества и методик их оценивания используются наиболее часто применяемые в задачах УВД алгоритмы траекторной обработки.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертации отражены в четырех научных публикациях в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК:

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

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

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

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

Кроме того, основные результаты диссертационной работы обсуждались в следующих докладах на конференциях:

1. Киселев В. Ю. Анализ точности алгоритмов фильтрации пространственных координат одиночной маневрирующей воздушной цели. Всеукраинская научно-практическая конференция молодых ученых и студентов «Проблемы навигации и управления движением». 18 – 20 ноября 2013 г., Киев. – с. 29.

2. Киселев В. Ю. Оценка качества алгоритмов обнаружения траекторий в системах управления воздушным движением. 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. 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. 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. 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. Научная сессия ГУАП. Часть II. Технические науки. Сборник докладов. 6-10 апреля 2015 г., Санкт-Петербург. – С. 85 – 95.

7. Киселев В. Ю., Монаков А. А. Оценка качества алгоритмов фильтрации треков в системах управления воздушным движением. 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. Научная сессия ГУАП. Часть II. Технические науки. Сборник докладов. 9-12 апреля 2016 г., Санкт-Петербург. – С. 55 – 67.

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.

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.

Во **введении** обсуждается актуальность работы, представлены цели и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, приводится список работ, в которых опубликованы основные результаты исследования, дано краткое описание работы по главам.

В **первой главе** сформулирована задача траекторной обработки в АС УВД. Приводится краткий обзор трудов, посвященных вопросам разработки алгоритмов траекторной обработки, и дан анализ состояния вопроса по оценке качества этих алгоритмов. В главе определены достоинства и недостатки существующих подходов по оценке качества СТО. На основании результатов выполненного анализа определена цель исследований, сформулированы задачи работы и представлены требования к показателям качества.

Во **второй главе** предложен набор показателей, характеризующих качество процесса обнаружения треков ВС, и методика их оценивания. Получены экспериментальные зависимости, характеризующие качество работы алгоритмов завязки и обнаружения треков на примере двух алгоритмов обнаружения, построенных на основе метода серийных испытаний и преобразования Хафа. Проведен сравнительный анализ обнаружителей треков. Набор показателей апробирован для сценария, характерного для задач радиолокационного сопровождения ВС в АС УВД.

В **третьей главе** предложен набор показателей качества ассоциации измерений с треками в СТО и методика их оценивания. Получены экспериментальные зависимости, характеризующие качество работы алгоритмов ассоциации измерений на примере четырех алгоритмов ассоциации: ближайшего соседа, глобального ближайшего соседа, вероятностной ассоциации данных и совместной вероятностной ассоциации данных. Произведен сравнительный анализ алгоритмов с точки зрения правильности ассоциации первичных отметок с

существующими треками, целостности треков и устойчивости СТО к ложным отметкам. Даны рекомендации по выбору алгоритма, исходя из предъявляемых к СТО требований.

В **четвертой главе** предложен набор показателей качества фильтрации и экстраполяции треков и методика их оценивания. Предложенные показатели и методика их оценки были использованы для получения экспериментальных зависимостей, характеризующих качество работы алгоритмов фильтрации треков на примере восьми алгоритмов: фильтра Калмана (ФК), расширенного ФК (РФК), сигма-точечного ФК (СТФК), фильтра частиц (ФЧ), интерактивного многомодельного (ИММ) ФК, ИММ РФК, ИММ STFК и ИММ ФЧ. Произведен сравнительный анализ алгоритмов с точки зрения точности оценивания параметров движения ВС как на участках без изменения типа движения, так и на участках со сменой типа движения.

В **пятой главе** предложен набор показателей качества процесса совместной обработки данных в многопозиционных РЛК. Предложенные показатели и методика их оценивания были использованы для получения экспериментальных зависимостей, характеризующих эффективность совместной обработки на примере трех схем объединения: СТО с объединением на уровне отметок, СТО с объединением на уровне треков, СТО с гибридным объединением. Произведен сравнительный анализ схем с точки зрения эффективности совместного использования информации от нескольких источников.

В **шестой главе** разработан алгоритм получения интегрального показателя качества траекторной обработки на основе аппарата нечеткой логики. Для формирования функций принадлежности и базы нечетких правил использованы результаты экспертной оценки разработанных показателей качества. Произведен сравнительный анализ двух СТО с учетом требований к качеству траекторной обработки в системах УВД.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы по работе.

В приложении А приводится описание программных средств предсказания траектории ВС в АС УВД. Данные средства использованы при моделировании траекторий ВС.

В приложении Б приводится опросный лист для экспертной оценки показателей качества систем траекторной обработки в РЛК УВД. Результаты ответов специалистов в области УВД на вопросы опросного листа использованы в шестой главе при синтезе алгоритма получения интегрального показателя качества траекторной обработки.

В приложении В приводятся акты о внедрении результатов исследований.

1 ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТРАЕКТОРНОЙ ОБРАБОТКИ

1.1 Система траекторной обработки

Традиционно обработка данных в РЛК АС УВД делится на первичную (обнаружение и измерение координат целей в каждом периоде обзора) и вторичную (оценка траекторий целей) [1, 2, 4, 5, 6]. Сформированная по результатам вторичной обработки информация о траекториях объектов поступает в систему отображения АС УВД. Работа АС УВД связана с оценкой времени пролета контрольных точек маршрута, возможности захода на посадку, расчетом минимальных интервалов вертикального и горизонтального эшелонирования, предупреждением опасных сближений ВС и обеспечением безопасности полетов в целом [7, 8]. Таким образом, достоверность информации, получаемой из *системы траекторной обработки*, непосредственно влияет на качество аэронавигационного обслуживания и безопасность полетов в зонах ответственности АС УВД. Очевидно, что для обеспечения возможности оценить эффективность выбранных алгоритмов траекторной обработки необходимо определить соответствующие показатели качества и способы их количественной оценки.

Рассмотрим, представленную на рисунке 1.1 [2, 9, 10], структурную схему однопозиционной СТО. Пусть *траектория цели* – четырехмерная (время + пространственные координаты) линия, соответствующая движению цели – ВС – в зоне ответственности АС УВД. Назовем *треком* оценку траектории, получаемую по результатам наблюдений.

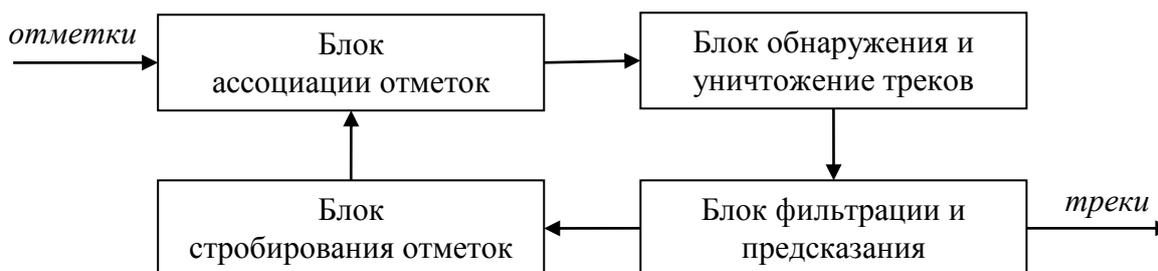


Рисунок 1.1 – Структурная схема однопозиционной СТО

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. Для облегчения нагрузки на вычислитель отметка, выбранная или сформированная для ассоциирования с одним из существующих треков, получается из множества отметок, попавших в строб трека. *Строб трека* – это область пространства, куда с заданной вероятностью попадает отметка, при условии, что она принадлежит данному треку. *Центр строба* – экстраполированное (предсказанное) на текущий период обзора положение ВС. 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 строка 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. Естественно, что наилучшим вариантом был бы такой, при котором в каждом блоке СТО использовался оптимальный алгоритм. Однако этот вариант не реализуем, поскольку очень немногие задачи, решаемые в СТО, допускают такой уровень формализации, при котором возможен синтез оптимальных алгоритмов. Поэтому в настоящее время предложено большое количество подоптимальных алгоритмов реализации рассмотренных этапов траекторной обработки.

Вопросу разработки алгоритмов траекторной обработки посвящено большое количество работ. Среди трудов отечественных специалистов следует выделить монографии С. З. Кузьмина [1, 11, 12, 13]. Эти книги до недавнего времени оставались единственным источником, где рассматриваются все этапы и аспекты траекторной обработки в однопозиционной РЛС. Безусловно, заслуживает внимания недавно вышедшая монография в двух частях А. А. Коновалова [14, 15]. На сегодняшний день эта монография является, пожалуй, единственной русскоязычной, опубликованной в открытом доступе работой, где на современном уровне рассматриваются многие вопросы траекторной обработки. Однако, отмеченные источники не рассматривают вопросы траекторной обработки в многопозиционных РЛС. Кратко данные задачи рассмотрены в последней главе книги В. С. Черняка [21]. Следует отметить ряд трудов, опубликованных сотрудниками НИИ «Прогноз» (при СПбГЭТУ «ЛЭТИ») в последние годы [16, 17, 18, 19, 20]. Также существует ряд источников [5, 6, 22,

23, 24, 25], в которых в той или иной степени проработаны вопросы траекторной обработки. Стоит отметить, что в РФ наблюдается дефицит проблемно-ориентированных источников отечественных авторов и переводов на русский язык.

В зарубежной литературе, напротив, без труда можно найти немалое количество специализированных источников. Среди них следует выделить три книги Я. Бар-Шалома и соавторов [9, 10, 26, 27, 28], две книги С. Блэкмена и соавторов [2, 29]. Книга Я. Бар-Шалома, изданная в 1998 [27], была переведена на русский язык в 2011 [30, 31]. Определенно заслуживают внимания труды А. Фарина и Ф. Студера «Цифровая обработка радиолокационной информации», изданные в 1985 [32] и 1986 [33]. Первая книга была переведена на русский язык и вышла в свет в 1993 [34]. Также следует отметить цикл статей К. Р. Ли и В. П. Жилкова [35, 36, 37, 38, 39]. Данные статьи особенно полезны при изучении алгоритмов фильтрации траектории маневрирующих объектов. Немало трудов, посвященных траекторной обработке, написали Т. Кирубарян, В. Д. Блэр в соавторстве с другими специалистами [40, 41, 42, 43]. Ежегодно в научно-технической литературе появляются сотни статей, посвященных траекторной обработке. Очевидно, что еще далеко не по всем вопросам проведены исчерпывающие исследования. За последними достижениями в области траекторной обработки следует обратиться к статьям издательства «Радиотехника» [44, 45, 46], трудам сообщества *IEEE*, особенно журнала «*Transaction on Aerospace and Electronics Systems*» [47, 48], материалам конференций «Радиолокация, навигация, связь» [49, 50, 51], «*Radar*» [52, 53], «*RadarConf*» [54, 55, 56], «*FUSION*» [57, 58] и другим публикациям [59, 60, 61, 62, 63, 64].

1.2 Оценка качества траекторной обработки

Таким образом, в условиях устойчивого развития воздушного транспорта и средств наблюдения многие теоретические вопросы синтеза систем траекторной

обработки глубоко разработаны, чего нельзя сказать о проблеме оценки качества этих систем.

Авторы работ, посвященных разработке алгоритмов траекторной обработки, уделяют недостаточно внимания этим вопросам и часто ограничиваются только беглым обзором показателей качества. Так, например, С. З. Кузьмин [1] в главе, посвященной статистическому анализу процесса автоматического сопровождения, вводит несколько показателей, характеризующих качество этапов обнаружения и фильтрации треков. При этом не для всех показателей предлагается методика их оценки. Заметно глубже подошли к этому вопросу П. А. Бакут и соавторы в книге «Обнаружение движущихся объектов» [65]. В книге приводятся показатели качества обнаружения треков и обобщенные выражения для их вычисления. В принципе кроме этих двух источников никаких других работ по вопросам оценки качества траекторной обработки в русскоязычной литературе на сегодняшний день нет.

Ненамного лучше обстоят дела в иностранной литературе. В упомянутых источниках [2, 9, 10, 26, 27, 28, 29, 32, 33] приводятся разнообразные показатели качества различных этапов траекторной обработки. Больше всего показателей сформулировано для этапов обнаружения и фильтрации треков. Большую практическую ценность имеют материалы статей [66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73]. В них наборы показателей апробированы при различных условиях и алгоритмах траекторной обработки. Рассмотрены самые разнообразные сценарии автоматического сопровождения от одиночной подводной лодки [67] до группы маневрирующих истребителей [70]. Разнообразие областей, где данная тема востребована, подтверждает важность разработки методик оценивания качества алгоритмов траекторной обработки.

Для специалистов в области УВД наиболее авторитетным источником на тему оценки качества траекторной обработки является документ [74], опубликованный Европейской организацией по безопасности воздушной навигации «*EUROCONTROL*». Данный источник [74] является стандартом и

содержит требования к качеству радиолокационного наблюдения в АС УВД. Характеристики качества треков, удовлетворяющие требованиям данного стандарта, обеспечивают требуемый уровень безопасности полетов. Стандарт содержит большое количество показателей. Требования стандарта представляют собой предельные значения показателей качества траекторной обработки при заданных тестовых сценариях сопровождения ВС и требованиях к качеству первичной обработки. Однако большинство перечисленных в стандарте показателей относится к этапу фильтрации треков.

Существование соответствующего стандарта подтверждает важность задачи анализа качества информации, поступающей от технических средств наблюдения АС УВД. Очевидно, что эффективный анализ должен производиться с помощью автоматических средств. Для решения этой задачи «*EUROCONTROL*» разработала комплекс специализированных программных средств *Surveillance Analysis Support System for ATC Centre (SASS-C)* [75], доступный для стран-членов этой организации. Комплекс *SASS-C* содержит программные средства для оценки качества наблюдения за воздушным пространством. На сегодняшний день *SASS-C* широко используется европейскими поставщиками аэронавигационных услуг, научно-исследовательскими организациями, производителями средств УВД. Разработку *SASS-C* координирует «*EUROCONTROL*». Комплекс *SASS-C* стал де-факто стандартным средством при решении следующих задач:

1. Контроль за соответствием характеристик качества средств наблюдения номинальным, в частности, определенным в стандарте [74];
2. Обеспечение информационной поддержки в части процесса наблюдения при расследовании авиационных происшествий;
3. Обеспечение информационной поддержки при разработке средств наблюдения за воздушным пространством.

Решение первых двух задач связано с анализом качества источников наблюдения. *SASS-C* поддерживает источники следующих типов: первичные и вторичные РЛС, системы автоматического зависимого наблюдения, системы

multilateration, системы траекторной обработки. Третья задача связана с тестированием новых средств наблюдения и предполагает моделирование воздушной обстановки. *SASS-C* позволяет синтезировать реалистичные данные наблюдения и воспроизводить различные тестовые сценарии.

На самом высоком уровне *SASS-C* реализует следующие основные функции [75, 77, 78]:

1. Верификация (англ. *Verification*) источников наблюдения за воздушным пространством;
2. Прогнозирование (англ. *Prediction*) рабочих характеристик источников наблюдения.

Процесс верификации источников наблюдения пятиступенчатый:

1. Получение данных наблюдения от различных источников;
2. Восстановление траекторий наблюдаемых объектов, эти траектории принимаются за эталон;
3. Вычисление расхождений данных анализируемого источника с восстановленными траекториями;
4. Составление отчета о превышении расхождений заранее определенных пороговых величин;
5. Отображение результатов анализа потребителю.

Данная процедура повторяется круглосуточно в реальном времени. Таким образом осуществляется постоянный мониторинг качества средств наблюдения. Следует отметить, что в *SASS-C* определен свой набор показателей качества траекторной обработки, большую часть которого составляют показатели из стандарта [74]. При верификации источников наблюдения *SASS-C* подразумевает, что эталонные данные формируются непосредственно из наблюдаемых. Преимущество данного метода заключается в его низкой стоимости по сравнению, например, с проведением специальных облетов радиолокационных позиций и высокоточных измерений [79]. При этом оценка качества выполняется по реальной воздушной обстановке. Функция прогнозирования рабочих

характеристик (эксплуатационных показателей) позволяет рассчитать теоретически достижимый уровень качества средств наблюдения. Также данная функция позволяет прогнозировать ухудшение качества работы средств наблюдения.

Среди отечественных достижений в области автоматизации контроля качества средств наблюдения за воздушным пространством следует отметить программно-аппаратный комплекс «Автоматизированная система контроля радиолокационных средств» (АСК-РЛС). Патентными правами [80] на данный комплекс обладает предприятие-разработчик ЗАО «ПЕЛЕНГ» (г. Санкт-Петербург). АСК-РЛС решает задачи диагностики и оперативного контроля работоспособности различных источников наблюдения: первичных и вторичных РЛС, систем автоматического зависимого наблюдения, систем *multilateration*, радиопеленгаторов. Контроль работоспособности осуществляется путем круглосуточного мониторинга технических характеристик источников. В качестве источника эталонной информации в АСК-РЛС используются траектории ВС, полученные в результате вторичной мультисенсорной траекторной обработки информации источников. Расчет точностных и вероятностных характеристик, зон видимости и других показатели работоспособности источников наблюдения производится на основе анализа расхождений результатов вторичной и результатов первичной обработки. За детальным описанием используемых при анализе алгоритмов можно обратиться к диссертационной работе [81] и статьям [82, 83, 84] главного разработчика АСК-РЛС А. М. Миролубова. В будущих версиях АСК-РЛС планируется включить возможность анализа качества траекторной обработки в АС УВД.

Из сказанного выше следует, что сравнительная оценка качества алгоритмов обработки информации, предложенных для использования в каждом блоке СТО, является актуальной проблемой. Решение этой проблемы невозможно без определения показателей качества.

В соответствии с общим определением (см. [85]) показатель качества продукции – это «количественная характеристика одного или нескольких свойств продукции, входящих в ее качество, рассматриваемая применительно к определенным условиям ее создания и эксплуатации или потребления». Поскольку вышеперечисленные блоки в составе СТО (рисунок 1.1) выполняют различные задачи, то и показатели качества их работы также будут различны. Однако система показателей по каждому блоку должна давать объективную оценку качества для любого из алгоритмов обработки информации возможных для его реализации. Выбор показателей качества 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. Показатели качества 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.

Упомянутые в данной главе источники отражают современное положение дел по вопросам оценки качества траекторной обработки. Выбор предложенных показателей является либо следствием теоретических исследований алгоритмов обработки информации в СТО, либо результатом экспертной оценки СТО в целом. При анализе вышеупомянутых источников обнаружены следующие недостатки:

1. Отсутствие явного разделения показателей по этапам траекторной обработки;

2. Отсутствие методики выбора и единой методики оценки показателей качества;

3. Отсутствие предложений по вычислению интегрального показателя качества всей системы траекторной обработки.

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

Вышесказанного достаточно, чтобы сформулировать цель диссертации. Целью предлагаемой работы является выбор показателей качества траекторного сопровождения в РЛК АС УВД и разработка методики оценивания выбранных показателей качества. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

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

2. Разработать модель модульной системы траекторной обработки. Модель должна позволять независимо менять алгоритмы работы каждого из этапов траекторной обработки.

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

4. Разработать алгоритмы статистического оценивания предложенных показателей качества.

5. Разработать алгоритм получения интегрального показателя качества системы траекторной обработки, который должен учитывать требования, предъявляемые к качеству траекторной обработки.

1.3 Выводы

В главе представлено описание работы однопозиционной СТО. Модульная архитектура СТО на рисунке 1.1 является канонической [1, 2, 26, 29], а отмеченные этапы траекторной обработки: обнаружение треков, ассоциация измерений, фильтрация треков – в той или иной степени присущи любой СТО. Каждый из перечисленных этапов выполняется с помощью некоторого алгоритма обработки информации, на вход которого поступают результаты предыдущего этапа.

Вопросам разработки алгоритмов траекторной обработки посвящено большое количество отечественных и зарубежных публикаций. При этом проблемам анализа качества этих алгоритмов уделяется недостаточно внимания. Вместе с тем важность данного вопроса для АС УВД подтверждается наличием стандарта [74], соответствие требованиям которого является необходимым условием для сертификации СТО. Сертифицированная СТО должна быть в состоянии обеспечивать требуемый уровень безопасности полетов.

Со временем по разным причинам качество наблюдения за воздушным пространством может меняться. Наличие автоматизированных средств позволило бы своевременно обнаружить ухудшение качества и предотвратить неполное или искаженное восприятие воздушной обстановки диспетчером УВД. Очевидно, создание подобных средств невозможно без методик выбора и оценивания показателей качества траекторного сопровождения. Таким образом, достижение поставленной в диссертации цели будет способствовать решению актуальной как с теоретической, так и с практической точек зрения задачи.

2 ОЦЕНКА КАЧЕСТВА АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ ТРЕКОВ

2.1 Алгоритмы обнаружения треков

Процесс обнаружения треков (ОТ) существенно влияет на характеристики СТО. С выхода блока обнаружения (рисунок 1.1) поступают сведения о количестве объектов в зоне ответственности и предварительная информация об их траекториях (оценки текущего местоположения, скорости и направления движения). В настоящее время наиболее известными и широко используемыми алгоритмами обнаружения треков являются следующие:

1. Алгоритм последовательных серийных испытаний (СИ) [1, 14, 34]. Это простейший классический алгоритм, который был разработан в начале теоретических исследований траекторной обработки. Трек считается обнаруженным, если в его строб попало m отметок в n последовательных периодах обзора. Целые числа m и n являются параметрами метода, значения которых выбираются заранее на этапе проектирования. Алгоритм прост в реализации, имеет низкую вычислительную сложность при приемлемом качестве обнаружения истинных треков. Для алгоритма характерна сравнительно большая вероятность завязки ложных треков [1, 26].

2. Алгоритм обнаружения с использованием преобразования Хафа (англ. *Hough Transform*) [86, 87]. Преобразование Хафа (ПХ) было предложено в 1962 году для распознавания отрезков прямых линий при анализе изображений [88]. Трек считается обнаруженным, если количество отметок, полученных в n последовательных обзорах и попавших в одну и ту же область в пространстве параметров (аккумуляторе) ПХ, превысило некоторый порог m . Алгоритм легко обобщается для реализации стратегии «сопровождение до обнаружения» (англ. *Track-Before-Detection*) [66], при которой в качестве решающей статистики используется результат накопления (когерентного или некогерентного) принятого сигнала в ячейках аккумулятора, и позволяет обнаруживать треки при высокой вероятности ложной тревоги первичной обработки. При увеличении плотности ложных отметок алгоритм имеет тенденцию к завязке ложных треков [89].

3. Алгоритм многогипотезного сопровождения (МГС, англ. *Multi Hypothesis Tracking, MHT*) [1, 2, 26, 90, 91]. Алгоритм реализует оптимальный байесовский подход. Трек считается обнаруженным, если апостериорная вероятность обнаружения трека достигла порогового значения. Алгоритм является оптимальным, имеет наивысшие показатели качества обнаружения истинных и фильтрации ложных треков. Однако данный алгоритм сложен в реализации, поскольку имеет комбинаторную вычислительную сложность.

Для решения поставленных во введении задач используем алгоритмы СИ и ПХ как наиболее часто применяемые на практике.

2.2 Выбор показателей, характеризующих качество функционирования алгоритмов обнаружения треков

В отечественной и зарубежной научной литературе качество алгоритмов обнаружения треков оценивается в основном следующими показателями: вероятность обнаружения трека динамического объекта и среднее количество ложных треков, передаваемых на сопровождение в единицу времени [1, 2, 9]. При натурных испытаниях рекомендуется использовать показатель средней длительности обнаружения истинного трека [1].

В качестве актуальных источников на тему оценки качества обнаружения треков необходимо назвать документы [74, 75], опубликованные Европейской организацией по безопасности воздушной навигации «*EUROCONTROL*». Первый источник [74] является стандартом и содержит требования к качеству СТО в системах радиолокационного наблюдения УВД. Стандарт предъявляет количественные требования к следующим показателям:

1. Среднее время обнаружения истинного трека;
2. Среднеквадратическое отклонение (СКО) времени обнаружения истинного трека;
3. Вероятность обнаружения ложного трека.

Допустимые пределы верхних значений показателей различны для режимов полета воздушных судов по трассам и в терминальной зоне, а также для первичных и вторичных радиолокаторов.

Второй источник [75] является руководством оператора комплекса специализированных программных средств *Surveillance Analysis Support System for ATC Centre (SASS-C)*, предназначенных для оценки качества радиолокационного наблюдения в системах УВД. Комплекс разработан по заказу «EUROCONTROL». В руководстве выделено следующее множество событий, связанных с обнаружением треков ВС:

1. Инициализация трека: время, прошедшее с момента обнаружения первой истинной отметки до момента обнаружения трека;

2. Потеря трека: момент, когда трек был удален, а отметки от соответствующей траектории продолжают поступать;

3. Восстановление трека: время, прошедшее с момента последнего обновления трека истинной отметкой до момента обнаружения нового трека, соответствующего той же траектории;

4. Мультипликация трека: момент, когда произошла одновременная ассоциация двух и более треков с одной истинной траекторией;

5. Перепутывание трека: момент изменения идентификатора ВС у трека;

6. Ложный трек: трек, для которого не было произведено ассоциации ни с одной из истинных траекторий;

7. Завершение трека: время, прошедшее с момента завершения истинной траектории до момента удаления трека;

8. Пропуск трека: появление траектории, которая не была обнаружена; а также набор измеряемых параметров, характеризующих в отдельности эти события. Полный перечень измеряемых параметров довольно широк, а их общее количество превышает 40.

На основании перечисленных в первой главе соображений, анализа вышеупомянутых документов, а также требований и опыта эксплуатирующих

организаций, предлагается следующая система из шести показателей эффективности алгоритмов обнаружения треков:

1. Вероятность обнаружения истинного трека в течение заданного времени обнаружения;
2. Вероятность обнаружения истинного трека за время большее заданного времени обнаружения;
3. Среднее время обнаружения истинного трека;
4. СКО времени обнаружения истинного трека;
5. Среднее количество ложных треков;
6. СКО количества ложных треков.

Приведенный набор показателей в полной мере характеризует возможности алгоритмов по достоверности отображения обстановки в зоне обзора РЛС. Рассмотрим методику оценивания вышеуказанных показателей.

Вероятность обнаружения истинного трека в течение заданного времени $P_{ИТ}^{ОТ}(0 \leq t \leq T_{обн})$ является основной характеристикой алгоритма обнаружения. Здесь подстрочный индекс «ИТ» означает истинный трек, а надстрочный индекс «ОТ» указывает на принадлежность показателя к блоку обнаружения треков. Оценка этой вероятности для выбранного сценария воздушной обстановки вычисляется как выборочное среднее по ансамблю испытаний $k = 1, \dots, K$ отношения количества успешных обнаружений истинных треков $M_k(0 \leq t \leq T_{обн})$ к количеству истинных траекторий $N_k(0 \leq t \leq T_{обн})$, существовавших в течение интервала времени $0 \leq t \leq T_{обн}$:

$$P_{ИТ}^{ОТ}(0 \leq t \leq T_{обн}) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{M_k(0 \leq t \leq T_{обн})}{N_k(0 \leq t \leq T_{обн})}. \quad (2.1)$$

Длительность интервала обнаружения $T_{обн}$ является тактическим параметром системы УВД, исчисляется в периодах обзора РЛС и обычно лежит в пределах 10...30 с. Вероятность $P_{ИТ}^{ОТ}(0 \leq t \leq T_{обн})$ зависит как от самого алгоритма обнаружения трека, так и от вероятности правильного обнаружения сигнала D .

Поэтому для характеристики алгоритма обнаружения трека следует рассматривать зависимость $P_{ИТ}^{OT}(0 \leq t \leq T_{обн})$ от D .

Оценка вероятности обнаружения истинного трека за время большее заданного времени обнаружения $P_{ИТ}^{OT}(t \geq T_{обн})$ формируется как выборочное среднее по ансамблю испытаний $k=1, \dots, K$ отношения количества событий $M_k(t \geq T_{обн})$, в которых было зафиксировано обнаружение трека на интервале $t \geq T_{обн}$ к количеству истинных траекторий $N_k(t \geq T_{обн})$, существовавших на этом интервале:

$$P_{ИТ}^{OT}(t \geq T_{обн}) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{M_k(t \geq T_{обн})}{N_k(t \geq T_{обн})}. \quad (2.2)$$

Для данного показателя также следует рассматривать зависимость $P_{ИТ}^{OT}(t \geq T_{обн})$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D . Для алгоритмов обнаружения треков должно строго выполняться следующее условие состоятельности:

$$P_{ИТ}^{OT}(0 \leq t \leq T_{обн}) + P_{ИТ}^{OT}(t \geq T_{обн}) = 1. \quad (2.3)$$

Невыполнение условия (2.3) свидетельствует о том, что в логике работы алгоритма имеются ошибки: например, при обнаружении различных треков используются одни и те же отметки. Такая логика приводит к явлению мультипликации треков. Очевидно, что контроль выполнения условия (2.3) позволяет судить о корректности алгоритма обнаружения треков.

Среднее время обнаружения истинного трека $\tau_{обн}^{OT}$ и СКО времени обнаружения истинного трека $\Delta\tau_{обн}^{OT}$ представляют собой выборочные статистические характеристики количества обзоров, прошедших с момента появления ВС в зоне действия РЛС до момента вынесения решения об обнаружении трека:

$$\tau_{обн}^{OT} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{M_k} \sum_{m=1}^{M_k} t_{обн}^{(m)}, \Delta\tau_{обн}^{OT} = \left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{M_k - 1} \sum_{m=1}^{M_k} \left(t_{обн}^{(m)} - \tau_{обн}^{OT} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (2.4)$$

где $M_k = M_k(0 \leq t \leq T_{обн})$ – количество успешных обнаружений истинных треков в k -ом испытании, $t_{обн}^{(m)}$ – время обнаружения m -го истинного трека. Данные показатели позволяют судить о временном ресурсе, который необходим СТО для обнаружения истинного трека. Для данных показателей также следует рассматривать их зависимость от вероятности правильного обнаружения сигнала D .

Среднее количество ложных треков $\lambda_{ЛТ}^{OT}$ и СКО количества ложных треков $\Delta\lambda_{ЛТ}^{OT}$ представляют собой выборочные статистические характеристики количества ложных треков, обнаруженных и переданных на сопровождение за интервал обнаружения $T_{обн}$:

$$\lambda_{ЛТ}^{OT} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \lambda_{ЛТ}^{(k)}, \Delta\lambda_{ЛТ}^{OT} = \left[\frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K \left(\lambda_{ЛТ}^{(k)} - \lambda_{ЛТ}^{OT} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (2.5)$$

где $\lambda_{ЛТ}^{(k)}$ – количество ложных треков в k -ом испытании. Здесь подстрочный индекс «ЛТ» означает ложный трек. Данные показатели характеризуют чувствительность СТО к интенсивности ложных отметок, возникающих в системе первичной обработки. Поэтому для них следует рассматривать зависимость от вероятности ложной тревоги F РЛС.

Для определения свойств рассмотренных показателей обнаружения истинных треков в ходе работы было проведено математическое моделирование, методика и результаты которого рассмотрены в следующем разделе.

2.3 Методика оценивания показателей и результаты математического моделирования

В общем случае значения показателей качества СТО зависят от положения 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 описанных выше показателей качества включает в себя:

1. Определение требований к условиям сопровождения ВС, а именно выбор параметров завязки и критериев алгоритма обнаружения, динамических параметров ВС, точностных и вероятностных характеристик РЛС;

2. Проведение имитационного моделирования заданного сценария статистически достаточное количество раз и получение массивов выходных данных от алгоритмов обнаружения треков;

3. Расчет на основе полученных данных зависимостей эмпирических оценок показателей от характеристик РЛС.

Результатом выполнения приведенной последовательности действий для различных показателей является набор отмеченных эмпирических зависимостей. Полученные данные являются основой для проведения сравнительного анализа различных алгоритмов обнаружения треков и последующей оптимизации выбора алгоритма и критерия обнаружения.

Следует сказать несколько слов о разработанном имитаторе воздушной обстановки. Он включает в себя имитатор траектории движения ВС, который позволяет моделировать полет в соответствии с заданным сценарием; и имитатор истинных и ложных радиолокационных измерений, который позволяет моделировать измерения в соответствии с заданными параметрами первичной обработки.

Моделирование траектории движения ВС основывается на методике предсказания траектории (англ. *trajectory prediction*) ВС, разработанной «EUROCONTROL». Методика 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. Подробное описание и результаты работы методики предсказания траектории ВС приводится в приложении А и статье [76].

В данной главе показатели качества и методика их оценивания использованы для анализа характеристик обнаружения треков алгоритмом СИ и алгоритмом геометрических отображений на основе ПХ. Анализ качества обнаружения треков произведен по результатам моделирования процесса автоматического сопровождения ВС в трассовой зоне по смоделированным данным однопозиционного обзорного вторичного радиолокатора. Для проведения математического эксперимента была синтезирована модульная СТО, состав которой соответствует рисунок 1.1. Выбранная модульность позволяет независимо менять алгоритмы работы каждого из блоков в составе СТО. В работе был выбран следующий сценарий моделирования:

Количество ВС в зоне обзора – 10;

Режим полета ВС – равномерное прямолинейное движение;

Путевая скорость ВС – 1110 км/ч;

Средняя дальность до ВС – 300 км;

Количество статистических прогонов математической модели – $K = 10^8$.

Параметры сценария сопровождения соответствуют стандартному тесту «*EUROCONTROL*» на качество траекторной информации по данным однопозиционной вторичной РЛС [74]. В качестве РЛС был выбран вторичный обзорный трассовый радиолокатор, характеристики первичной обработки которого соответствуют требованиям того же стандарта:

Период обзора – 12 с;

Среднеквадратическая ошибка определения дальности – 70 м;

Среднеквадратическая ошибка определения азимута – $0,08^\circ$.

По результатам математического моделирования были определены зависимости показателей $P_{ИТ}^{OT}(0 \leq t \leq T_{обн})$, $P_{ИТ}^{OT}(t \geq T_{обн})$, $\tau_{обн}^{OT}$, $\Delta\tau_{обн}^{OT}$ от вероятности

правильного обнаружения сигнала D (рисунки 2.1 – 2.4) и зависимости показателей λ_{IT}^{OT} , $\Delta\lambda_{IT}^{OT}$ от вероятности ложной тревоги F (рисунки 2.5, 2.6).

Из рисунка 2.1 видно, что значение $P_{IT}^{OT}(0 \leq t \leq T_{обн})$ для всех рассмотренных алгоритмов монотонно возрастает с ростом вероятности правильного обнаружения сигнала D . При заданном n скорость роста вероятности увеличивается с ослаблением (т.е. с уменьшением величины отношения m/n) критерия обнаружения. 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.

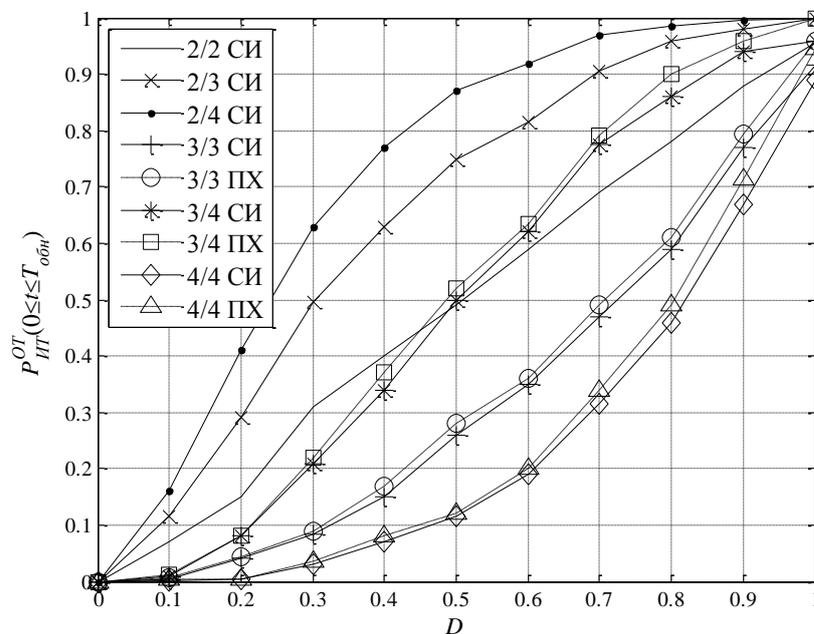


Рисунок 2.1 – Зависимости вероятности обнаружения истинного трека $P_{IT}^{OT}(0 \leq t \leq T_{обн})$ в течение заданного времени от вероятности правильного обнаружения сигнала D

Зависимости, приведенные на рисунке 2.2, имеют обратный характер: вероятности $P_{ИТ}^{OT}(t \geq T_{обн})$ монотонно убывают с ростом D . При этом скорость уменьшения возрастает с усилением критерия обнаружения. Для соответствующих зависимостей на рисунках 2.1 и 2.2 выполняется условие (2.3), что подтверждает корректность алгоритмов обнаружения треков.

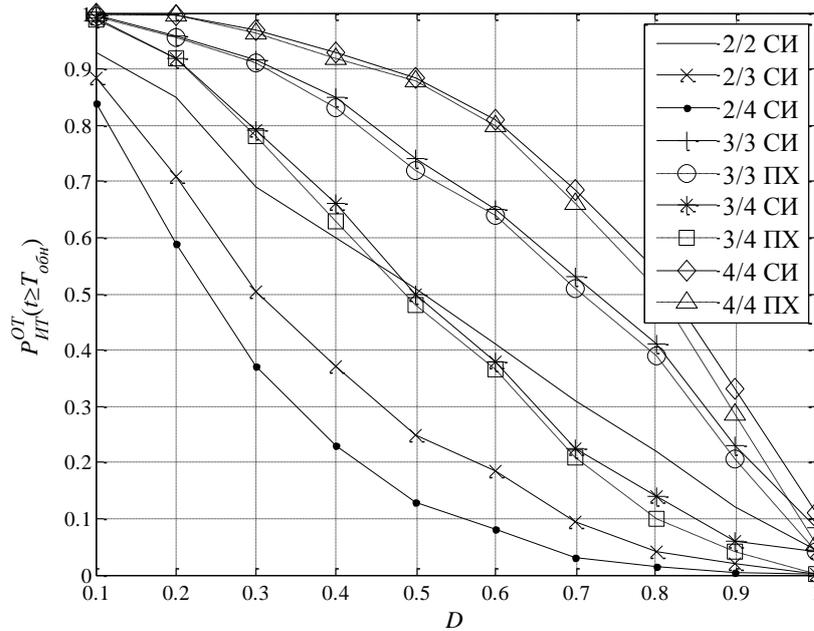


Рисунок 2.2 – Зависимости вероятности обнаружения истинного трека за время большее заданного времени $P_{ИТ}^{OT}(t \geq T_{обн})$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D

Зависимости, приведенные на рисунке 2.3, свидетельствуют о том, что среднее время обнаружения истинного трека $\tau_{обн}^{OT}$ для всех алгоритмов и критериев линейно убывает с ростом D , меняясь в пределах от n (при $D \leq 0.1$) до m (при $D \geq 0.9$). С усилением критерия обнаружения скорость, с которой $\tau_{обн}^{OT}$ стремится к m , убывает. Сравнение зависимостей, относящихся к разным алгоритмам и одному и тому же критерию, показывает, что кривые $\tau_{обн}^{OT} = \tau_{обн}^{OT}(D)$ для алгоритма ПХ проходят немного ниже, а для некоторых значений D вообще сливаются с аналогичными кривыми для алгоритма СИ. Этот небольшой

выигрыш алгоритма ПХ также объясняется его априорной «нацеленностью» на обнаружение треков ВС, совершающих прямолинейное движение. На рисунке 2.3 отсутствуют кривые для критериев с $m = n$, т.к. в этих случаях всегда $\tau_{обн}^{OT} = m = n$.

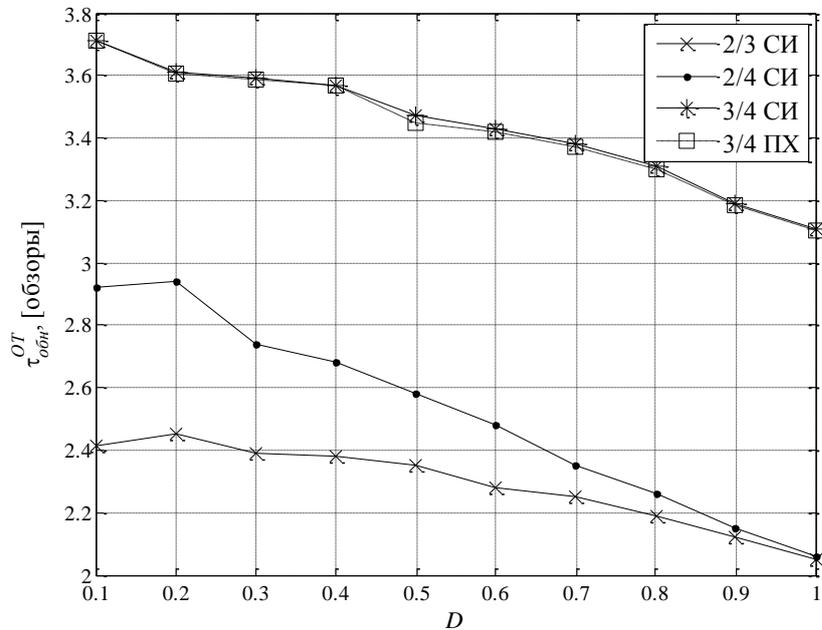


Рисунок 2.3 – Зависимости среднего времени обнаружения истинного трека $\tau_{обн}^{OT}$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D

На рисунке 2.4 приведены зависимости СКО времени обнаружения истинного трека $\Delta\tau_{обн}^{OT}$ от D для алгоритма СИ для критериев с $m < n$. Для алгоритма ПХ эти зависимости аналогичны. Из рисунка видно, что с ростом D СКО убывает. Скорость уменьшения СКО тем больше, чем слабее критерий и больше значение D .

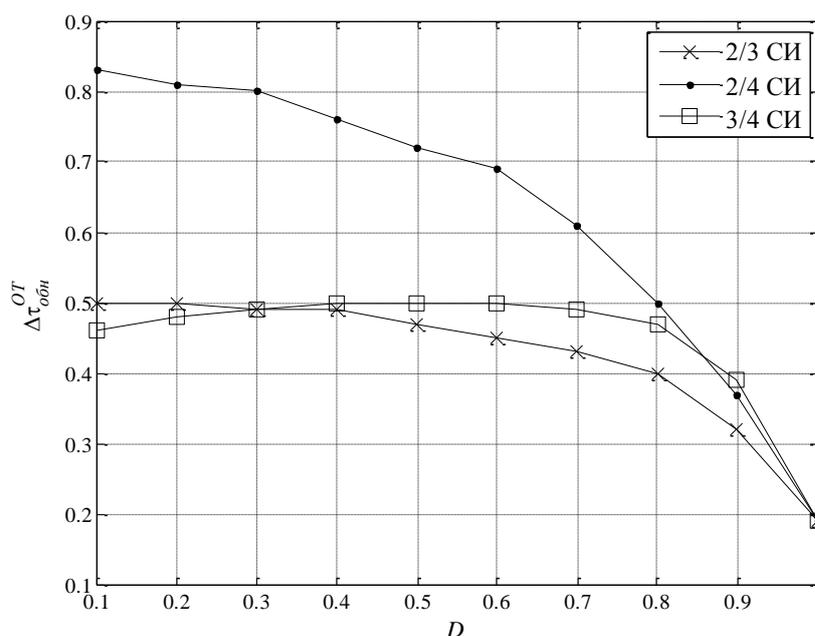


Рисунок 2.4 – Зависимости СКО времени обнаружения истинного трека $\Delta\tau_{обн}^{OT}$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D

Зависимости, приведенные на рисунке 2.5, свидетельствуют о том, что среднее количество ложных треков λ_{JT}^{OT} для всех алгоритмов и критериев увеличивается с ростом вероятности ложной тревоги F . Скорость роста λ_{JT}^{OT} тем больше, чем больше n и меньше отношение m/n . Полученные зависимости $\lambda_{JT}^{OT} = \lambda_{JT}^{OT}(F)$ полностью идентичны для обоих алгоритмов, поэтому на рисунке приводятся данные только для алгоритма СИ. При $F \leq 10^{-6}$ $\lambda_{JT}^{OT} \approx 0$, поэтому в СТО, радиолокаторы которой удовлетворяют требованиям стандарта [74], ложных треков практически нет. Однако, для РЛС, работающих в сложной помеховой обстановке ($F > 10^{-5}$), ложные треки представляют серьезную проблему. Выбор сильного критерия с большими значениями длины n и отношения m/n позволяет существенно снизить частоту их появления. Как следует из сравнения рисунков 2.5 и 2.6, характер зависимостей СКО $\Delta\lambda_{JT}^{OT}$ от F аналогичен характеру зависимостей $\lambda_{JT}^{OT} = \lambda_{JT}^{OT}(F)$.

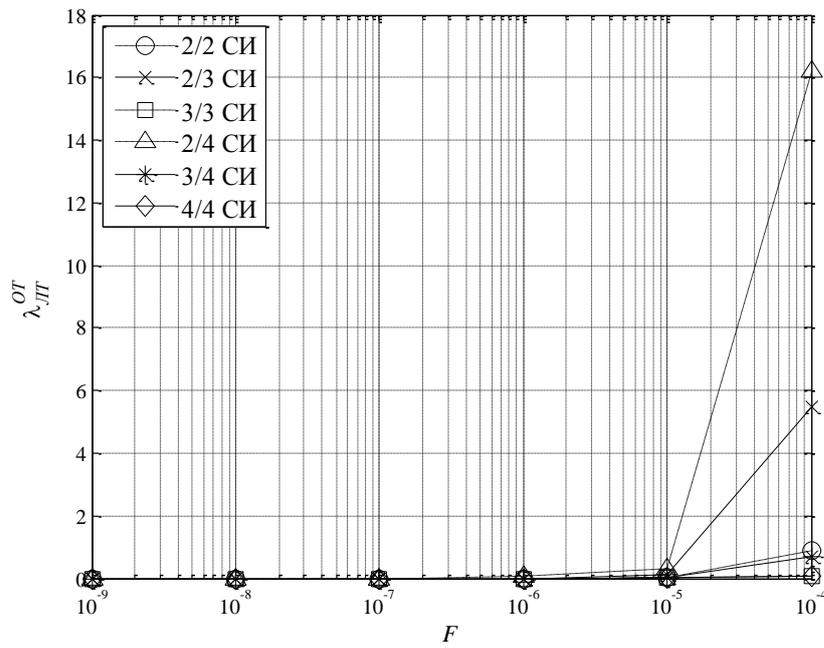


Рисунок 2.5 – Зависимости среднего количества ложных треков λ_{OT}^{OT} от вероятности ложной тревоги F

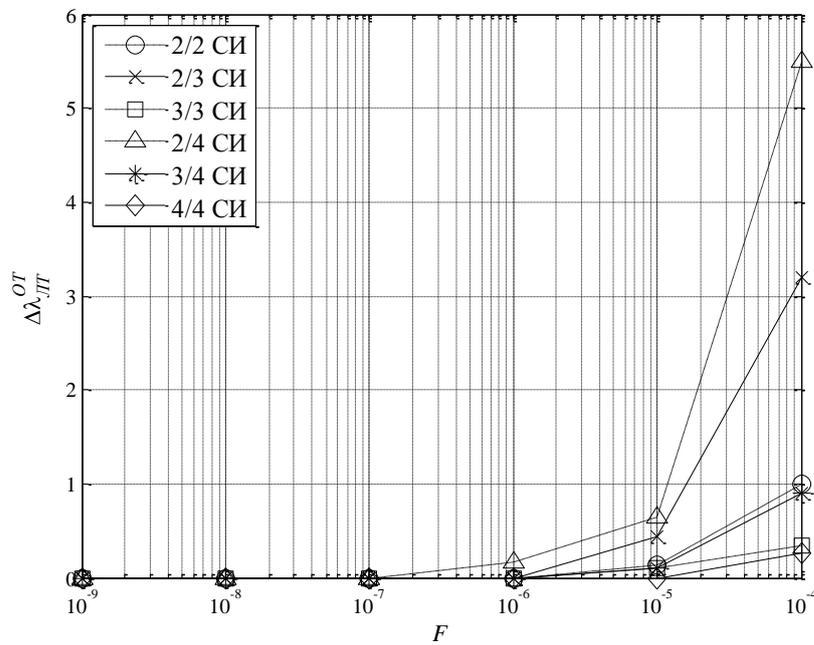


Рисунок 2.6 – Зависимости СКО количества ложных треков $\Delta\lambda_{OT}^{OT}$ от вероятности ложной тревоги F

Таким образом, сделанный в работе анализ алгоритмов обнаружения треков по выбранным показателям качества выявил различия между критериями обнаружения, а также алгоритмами, использующими и не использующими априорную информацию о характере движения ВС. В среднем алгоритмы, использующие более слабые критерии обнаружения, имеют показатели обнаружения истинных треков выше, чем алгоритмы, использующие сильные критерии обнаружения. Однако этот выигрыш достигается за счет ухудшения показателей обнаружения ложных треков. Вполне закономерно, что использование априорных сведений о характере движения ВС дает прирост в качестве обнаружения истинных треков. В общем, качество первичной обработки в РЛС, которое характеризуется вероятностями правильного обнаружения сигнала D и ложной тревоги F , определяет эффективность обнаружения треков. Выявлено, что для качественной траекторной обработки необходимо, чтобы эти показатели удовлетворяли следующим условиям: $D \geq 0.8$ и $F \leq 10^{-6}$. В целом проведенный анализ позволил оценить важные с точки зрения практического применения различия рассмотренных критериев и алгоритмов обнаружения треков.

2.4 Выводы

В главе предложен набор показателей качества обнаружения треков в СТО. Предложенные показатели и методика их оценивания были использованы для получения экспериментальных зависимостей, характеризующих качество работы алгоритмов завязки и обнаружения треков на примере двух алгоритмов обнаружения, построенных на основе серийных испытаний и преобразования Хафа.

Наиболее значимыми показателями, позволяющими оценить качество выполнения задач завязки и обнаружения треков, являются: вероятность обнаружения истинного трека в течение заданного времени $P_{ИТ}^{ОТ}(0 \leq t \leq T_{обн})$, среднее время обнаружения истинного трека $\tau_{обн}^{ОТ}$ и среднее количество ложных

треков $\lambda_{\text{ЛТ}}^{\text{ОТ}}$. Данный набор показателей позволяет произвести сравнительный анализ различных обнаружителей треков и осуществить выбор критерия обнаружения, исходя из предъявляемых к СТО требований.

3 ОЦЕНКА КАЧЕСТВА АЛГОРИТМОВ АССОЦИИИ ИЗМЕРЕНИЙ

3.1 Алгоритмы ассоциации измерений

Ассоциация измерений (АИ) – процесс разделения множества отметок, полученных в текущем периоде обзора, на два подмножества: ассоциированные отметки используются для подтверждения и продолжения уже существующих треков, неассоциированные отметки для инициирования (завязки) новых треков. С выхода блока АИ ассоциированные отметки поступают на обработку в блок фильтрации и предсказания, а неассоциированные – в блок обнаружения и уничтожения треков. Качество ассоциации отметок существенно влияет на характеристики всей СТО. В настоящее время наиболее известными и широко используемыми алгоритмами ассоциации измерений являются:

1. Алгоритм ближайшего соседа (БС, англ. *Nearest Neighbor, NN*) [1, 14, 34]. Это самый простой и очевидный метод решения задачи ассоциации вновь полученных отметок с существующими треками. Для продолжения трека выбирается отметка с минимальным расстоянием до центра его строба – экстраполированного (предсказанного) на текущий период обзора положения ВС. После успешной ассоциации с одним из существующих в СТО треков отметка удаляется из множества полученных отметок. Преимуществами метода являются его простота и возможность производить обновление трека сразу после ассоциации, что полезно при работе с аperiodическими источниками информации. Недостатком метода является неустойчивость к ложным отметкам, которые в случае возникновения в пределах строба неотличимы от истинных отметок. Применимость этого метода ассоциации ограничена ситуациями сопровождения одиночных ВС, траектории которых не пересекаются с траекториями других целей, при малой интенсивности ложных отметок.

2. Алгоритм глобального ближайшего соседа (ГБС, англ. *Global Nearest Neighbor, GNN*) [1, 2, 14, 28, 34]. Алгоритм является естественным обобщением алгоритма БС на случай сопровождения множества объектов с пересекающимися траекториями на фоне ложных отметок. Ассоциация осуществляется на основе

решения оптимизационной задачи по поиску такой схемы соответствия, которая получается при минимизации суммы расстояний между вновь полученными отметками и существующими треками. При этом считается, что каждому треку может быть поставлена в соответствие только одна отметка. Алгоритм использует венгерский алгоритм (алгоритм Куна-Манкреса) решения задачи о назначениях [92]. Преимуществом алгоритма является устойчивость к ложным отметкам, которые вследствие их случайного расположения в среднем будут находиться дальше от предсказанного положения трека, чем истинные отметки. Алгоритм позволяет успешно ассоциировать отметки близко летящих ВС, что положительно влияет на качество работы СТО при наличии большого числа ВС в зоне ответственности.

3. Алгоритм вероятностной ассоциации данных (ВАД, англ. *Probabilistic Data Association, PDA*) [14, 28, 93, 94]. Алгоритм реализует байесовский подход к задаче, а общая логика работы идентична логике алгоритма БС. Отличие заключается в том, что для формирования текущей оценки параметров траектории используется синтезированная отметка, которая формируется путем весового объединения всех попавших в строб трека отметок с весами пропорциональными их правдоподобию. Как и алгоритм БС, алгоритм корректен только при сопровождении одиночных объектов, но при высокой плотности ложных отметок работает лучше.

4. Алгоритм совместной вероятностной ассоциации данных (СВАД, англ. *Joint Probabilistic Data Association, JPDA*) [1, 2, 14, 95, 96, 97]. Является естественным расширением алгоритма ВАД на случай сопровождения множества объектов с пересекающимися траекториями. В отличие от метода ВАД ключевая идея метода СВАД состоит в том, что вероятность принадлежности к треку каждой попавшей в строб отметки рассчитывается с учетом ее возможной принадлежности к трекам других целей. Алгоритм реализует стратегию глобальной ассоциации, подобную алгоритму ГБС.

5. Алгоритм многогипотезного сопровождения (МГС, англ. *Multi Hypothesis Tracking, MHT*) [1, 26, 90, 91] является самым мощным методом решения задач ассоциации измерений с треками. Алгоритм подоптимальным образом реализует байесовский подход, который невозможно применить на практике вследствие комбинаторного роста числа гипотез ассоциации. Алгоритм предполагает построение дерева гипотез всех возможных ассоциаций, вычисление апостериорных вероятностей гипотез ассоциации по данным всей последовательности измерений вплоть до текущего, выбор гипотезы с максимальной апостериорной вероятностью в качестве рабочей и удаление гипотез с апостериорной вероятностью ниже пороговой. Алгоритм МГС является близким к оптимальному и имеет наивысшие показатели качества ассоциации истинных и фильтрации ложных отметок. Вместе с тем алгоритм МГС, несмотря на наличие механизма отбраковки маловероятных гипотез, требует больших вычислительных затрат и по этой причине на практике применяется редко.

Для решения поставленных во введении задач будем ориентироваться на алгоритмы БС, ГБС, ВАД и СВАД, поскольку они наиболее часто используются в современных СТО.

3.2 Выбор показателей, характеризующих качество функционирования алгоритмов ассоциации измерений

Основным документом, содержащим информацию по оценке качества ассоциации измерений, является стандарт [74], разработанный агентством «*EUROCONTROL*». Стандарт содержит требования к следующим показателям, характеризующим качество ассоциации измерений:

1. Частота прерываний истинного трека;
2. Частота перепутывания истинных треков;
3. Средняя продолжительность ложного трека;
4. СКО продолжительности ложного трека.

Допустимые границы значений показателей различны для первичных и вторичных радиолокаторов, а также для режимов полета воздушных судов по

трассам и в терминальной зоне. Разработанный по заказу агентства «*EUROCONTROL*» программный комплекс *SASS-C* позволяет оценивать эти показатели по данным радиолокационного наблюдения [75]. Кроме того, в публикациях [28, 67, 68, 69], посвященных оценке качества алгоритмов траекторной обработки, предлагаются следующие показатели:

1. Частота прерываний истинного трека;
2. Длительность истинного трека;
3. Количество истинных треков в единицу времени;
4. Вероятность перепутывания истинных треков;
5. Частота появления ложных треков.

Изучение работ по рассматриваемой теме показало, что предлагаемые наборы показателей качества недостаточно полно характеризуют качество ассоциации измерений и могут быть расширены. Таким образом, на основании перечисленных в первой главе требований к системе показателей качества, анализа вышеупомянутых документов и статей, а также требований и опыта разработчиков и эксплуатантов, предлагается следующая система показателей эффективности алгоритмов ассоциации измерений:

1. Вероятность правильной ассоциации истинной отметки;
2. Вероятность перепутывания треков;
3. Вероятность потери истинного трека;
4. Средняя частота потерь истинного трека;
5. СКО частоты потерь истинного трека;
6. Средняя длительность истинного трека;
7. СКО длительности истинного трека;
8. Средняя длительность истинного трека до первой потери;
9. СКО длительности истинного трека до первой потери;
10. Средняя частота появления ложных треков;
11. СКО частоты появления ложных треков;
12. Средняя длительность ложного трека;

13. СКО длительности ложного трека.

Предложенный набор показателей позволяет судить о корректности ассоциации доступных измерений с существующими треками, целостности треков, и чувствительности СТО к интенсивности ложных отметок, возникающих в системе первичной обработки. Приведенный набор показателей в полной мере характеризует возможности алгоритмов по достоверности отображения обстановки в зоне обзора РЛС.

Рассмотрим методику оценивания вышеуказанных показателей. Вероятность правильной ассоциации истинной отметки $P_{ИТ}^{АИ}$ является основной характеристикой алгоритма ассоциации измерений. Здесь и далее подстрочный индекс «ИТ» означает истинный трек, а надстрочный индекс «АИ» указывает на принадлежность показателя к блоку ассоциации измерений. Оценка этой вероятности формируется как выборочное среднее по ансамблю испытаний $k = 1, \dots, K$ отношения количества истинных отметок (ИО), правильно ассоциированных с истинным треком (ИТ) $M_k(\text{ИО} \in \text{ИТ})$ к общему количеству истинных отметок $N_k(\text{ИО} \in \text{ИТ})$ соответствующего ИТ:

$$P_{ИТ}^{АИ} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{M_k(\text{ИО} \in \text{ИТ})}{N_k(\text{ИО} \in \text{ИТ})}. \quad (3.1)$$

Оценка вероятности перепутывания треков $S_{ИТ}^{АИ}$ вычисляется как выборочное среднее по ансамблю испытаний $k = 1, \dots, K$ отношения количества ИТ, для которых произошло изменение идентификатора ИТ $M_k(\text{ИД} = \text{var})$ к общему количеству ИТ $N_k = M_k(\text{ИД} = \text{const}) + M_k(\text{ИД} = \text{var})$ в k -м испытании:

$$S_{ИТ}^{АИ} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{M_k(\text{ИД} = \text{var})}{N_k}, \quad (3.2)$$

где ИД – идентификатор ИТ, который равен уникальному номеру ВС в АС УВД.

В работе предполагается, что истинные траектории формируются в имитаторе траекторных измерений. В этом случае информация об ИТ доступна на этапе расчета показателей качества. Показатели $P_{ИТ}^{АИ}$ и $S_{ИТ}^{АИ}$ позволяют судить о

корректности ассоциации доступных измерений с существующими треками. При этом показатель $S_{ИТ}^{АИ}$ важен для оценки качества сопровождения близко расположенных и/или пересекающихся траекторий.

Оценка вероятности потери истинного трека $L_{ИТ}^{АИ}$ вычисляется через вероятность противоположного события – сопровождения истинной траектории без потерь. Оценка данной вероятности представляет собой выборочное среднее по ансамблю испытаний $k = 1, \dots, K$ отношения среднего времени существования трека к истинной длительности трека. Таким образом, $L_{ИТ}^{АИ}$ рассчитывается как:

$$L_{ИТ}^{АИ} = 1 - \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^{N_k} \frac{\tau_{ИТ}^{(n)}}{T_{ИТ}^{(n)}}, \quad \tau_{ИТ}^{(n)} = \frac{1}{J_n} \sum_{j=1}^{J_n} t_{ИТ}^{(j)}, \quad (3.3)$$

где N_k – количество истинных треков в k -м испытании, $T_{ИТ}^{(n)}$ – реальная длительность n -го истинного трека, $\tau_{ИТ}^{(n)}$ – среднее время существования n -го трека, $t_{ИТ}^{(j)}$ – время существования трека между $(j-1)$ -й и j -й потерями, J_n – количество потерь n -го трека.

Средняя частота потерь трека $v_{ИТ}^{АИ}$ и СКО частоты потерь трека $\Delta v_{ИТ}^{АИ}$ представляют собой выборочные статистические характеристики количества потерь истинного трека, зафиксированных в течение заданного времени наблюдения $T_{набл}$:

$$v_{ИТ}^{АИ} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^{N_k} \frac{v_{ИТ}^{(n)}}{T_{набл}}, \quad (3.4)$$

$$\Delta v_{ИТ}^{АИ} = \left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N_k - 1} \sum_{n=1}^{N_k} \left(\frac{v_{ИТ}^{(n)}}{T_{набл}} - v_{ИТ}^{АИ} \right)^2 \right]^{1/2},$$

где $v_{ИТ}^{(n)}$ – количество потерь n -го истинного трека в течение $T_{набл}$. Показатель $v_{ИТ}^{АИ}$ имеет размерность частоты – количество потерь в единицу времени.

Средняя длительность истинного трека $\tau_{ИТ}^{АИ}$ и СКО длительности истинного трека $\Delta\tau_{ИТ}^{АИ}$ представляют собой выборочные характеристики времени существования истинного трека в СТО:

$$\tau_{ИТ}^{АИ} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N_k} \sum_{m=1}^{N_k} \tau_{ИТ}^{(n)}, \quad (3.5)$$

$$\Delta\tau_{ИТ}^{АИ} = \left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N_k - 1} \sum_{n=1}^{N_k} \frac{1}{J_n} \sum_{j=1}^{J_n} \left(t_{ИТ}^{(j)} - \tau_{ИТ}^{(n)} \right)^2 \right]^{1/2},$$

где N_k , $\tau_{ИТ}^{(n)}$, $t_{ИТ}^{(j)}$ и J_n имеют тот же смысл, что и в выражениях (3.3).

Средняя длительность истинного трека до первой потери $t_{ИТ}^{АИ}$ и СКО длительности истинного трека до первой потери $\Delta t_{ИТ}^{АИ}$ представляют собой выборочные статистические характеристики времени существования трека в СТО до момента первой потери трека:

$$t_{ИТ}^{АИ} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^{N_k} t_{ИТ}^{(n)}, \quad (3.6)$$

$$\Delta t_{ИТ}^{АИ} = \left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N_k - 1} \sum_{n=1}^{N_k} \left(t_{ИТ}^{(n)} - t_{ИТ}^{АИ} \right)^2 \right]^{1/2},$$

где $t_{ИТ}^{(n)}$ – время существования n -трека до первой потери. Таким образом, показатели $L_{ИТ}^{АИ}$, $\tau_{ИТ}^{АИ}$, $\Delta\tau_{ИТ}^{АИ}$, $t_{ИТ}^{АИ}$, $\Delta t_{ИТ}^{АИ}$, $\nu_{ИТ}^{АИ}$, $\Delta\nu_{ИТ}^{АИ}$, позволяют судить о целостности треков в СТО.

Рассмотренные девять показателей зависят как от самого алгоритма ассоциации измерений, так и от вероятности правильного обнаружения сигнала D . Поэтому для данных характеристик алгоритма ассоциации измерений следует рассматривать зависимости от D при заданной вероятности ложной тревоги F .

Средняя частота появления ложных треков $\nu_{ЛТ}^{АИ}$ и СКО частоты появления ложных треков $\Delta\nu_{ЛТ}^{АИ}$ представляют собой выборочные статистические

характеристики количества ложных треков, находящихся на сопровождении за время наблюдения $T_{набл}$:

$$v_{ЛТ}^{АИ} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{\lambda_{ЛТ}^{(k)}}{T_{набл}}, \Delta v_{ЛТ}^{АИ} = \left[\frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K \left(\frac{\lambda_{ЛТ}^{(k)}}{T_{набл}} - v_{ЛТ}^{АИ} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (3.7)$$

где $\lambda_{ЛТ}^{(k)}$ – количество ложных треков в k -ом испытании. $v_{ЛТ}^{АИ}$ имеет размерность, частоты – количество треков в единицу времени. Здесь и далее подстрочный индекс «ЛТ» означает ложный трек.

Средняя длительность ложного трека $\tau_{ЛТ}^{АИ}$ и СКО длительности ложного трека $\Delta \tau_{ЛТ}^{АИ}$ представляют собой выборочные статистические характеристики времени существования ложных треков в СТО:

$$\tau_{ЛТ}^{АИ} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left(\frac{1}{\lambda_{ЛТ}^{(k)}} \sum_{j=1}^{\lambda_{ЛТ}^{(k)}} \tau_{ЛТ}^{(j)} \right), \quad (3.8)$$

$$\Delta \tau_{ЛТ}^{АИ} = \left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{\lambda_{ЛТ}^{(k)} - 1} \sum_{j=1}^{\lambda_{ЛТ}^{(k)}} \left(t_{ЛТ}^{(j)} - \tau_{ЛТ}^{АИ} \right)^2 \right]^{1/2},$$

где $t_{ЛТ}^{(j)}$ – время существования j -го ложного трека в k -ом испытании. Показатели $v_{ЛТ}^{АИ}$, $\Delta v_{ЛТ}^{АИ}$, $\tau_{ЛТ}^{АИ}$ и $\Delta \tau_{ЛТ}^{АИ}$ характеризуют чувствительность СТО к интенсивности ложных отметок, возникающих в системе первичной обработки. Поэтому для них следует рассматривать зависимости от вероятности ложной тревоги F .

Для определения свойств рассмотренных показателей качества работы блока ассоциации измерений СТО в ходе работы было проведено математическое моделирование, методика и результаты которого рассмотрены в следующем разделе.

3.3 Методика оценивания показателей и результаты математического моделирования

В общем случае значения показателей качества СТО чувствительны к параметрам движения ВС и характеристикам первичной обработки РЛС (вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги; точностей измерения дальности и азимута). Статистический эксперимент по исследованию алгоритмов должен проводиться при одинаковых параметрах траекторий и измерителя в каждом испытании.

Собственно методика проведения эксперимента по оценке описанных выше показателей качества заключается в выполнении следующей последовательности действий: определение сценария сопровождения ВС, проведение имитационного моделирования по определенному сценарию и построение зависимостей эмпирических оценок показателей качества от характеристик РЛС. Полученные зависимости позволяют рекомендовать алгоритм ассоциации измерений, исходя из требований к качеству выполнения этого этапа траекторной обработки.

Анализ качества алгоритмов ассоциации измерений произведен по результатам моделирования процесса автоматического сопровождения ВС в трассовой зоне по смоделированным данным однопозиционного обзорного вторичного радиолокатора. Набор показателей качества и методики их оценивания апробированы на примере анализа эффективности ассоциации измерений с использованием алгоритмов БС, ГБС, ВАД и СВАД.

Для проведения математического эксперимента в ходе работы была синтезирована модульная СТО, состав которой соответствует рисунок 1.1. Выбранная модульность позволяет независимо менять алгоритмы работы каждого из блоков в составе СТО.

В работе был выбран следующий сценарий моделирования:

Количество ВС в зоне обзора – 10;

Режим полета ВС – равномерное прямолинейное движение;

Путевая скорость ВС – 1110 км/ч;

Дальность до ВС – 300 км;

Время наблюдения – 60 мин;

Количество статистических прогонов математической модели – $K = 10^8$.

Для оценки показателя $S_{ИТ}^{АИ}$ был выбран сценарий с аналогичными параметрами для десяти пар ВС, в каждой паре траектории пересекаются под углом 90° .

Сценарии сопровождения соответствуют стандартным тестам «*EUROCONTROL*» на качество траекторной информации однопозиционной РЛС [74]. В качестве РЛС был выбран вторичный обзорный трассовый радиолокатор, характеристики первичной обработки которого соответствуют требованиям того же стандарта:

Период обзора – 12 с;

Вероятность правильного обнаружения – $0.5 \leq D \leq 1.0$;

Вероятность ложной тревоги – $10^{-9} \leq F \leq 10^{-5}$.

Среднеквадратическая ошибка определения дальности – 70 м;

Среднеквадратическая ошибка определения азимута – $0,08^\circ$.

Предельные значения D и F выбраны с учетом требований к источникам измерений и практики их применения в УВД [74, 75, 77]. РЛС с вероятностью правильного обнаружения сигнала меньшей 0.5, равно как и с вероятностью ложной тревоги большей 10^{-5} , являются непригодными для использования.

По результатам математического моделирования были определены зависимости показателей $P_{ИТ}^{АИ}$, $S_{ИТ}^{АИ}$, $L_{ИТ}^{АИ}$, $v_{ИТ}^{АИ}$, $\Delta v_{ИТ}^{АИ}$, $\tau_{ИТ}^{АИ}$, $\Delta \tau_{ИТ}^{АИ}$, $t_{ИТ}^{АИ}$, $\Delta t_{ИТ}^{АИ}$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D (рисунки 3.1 – 3.7) и зависимости показателей $v_{ИТ}^{АИ}$, $\Delta v_{ИТ}^{АИ}$, $\tau_{ИТ}^{АИ}$, $\Delta \tau_{ИТ}^{АИ}$ от вероятности ложной тревоги F (рисунки 3.8, 3.9).

Из рисунка 3.1 видно, что значение $P_{ИТ}^{АИ}$ для всех рассмотренных алгоритмов монотонно возрастает с ростом вероятности правильного обнаружения сигнала D . При этом соответствующие зависимости сближаются,

различия в качестве алгоритмов уменьшаются. Байесовские алгоритмы (ВАД, СВАД) превосходят по данному показателю небайесовские алгоритмы (БС, ГБС). Такой результат является естественным следствием того факта, что в алгоритмах ВАД и СВАД все попавшие в строб отметки 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.

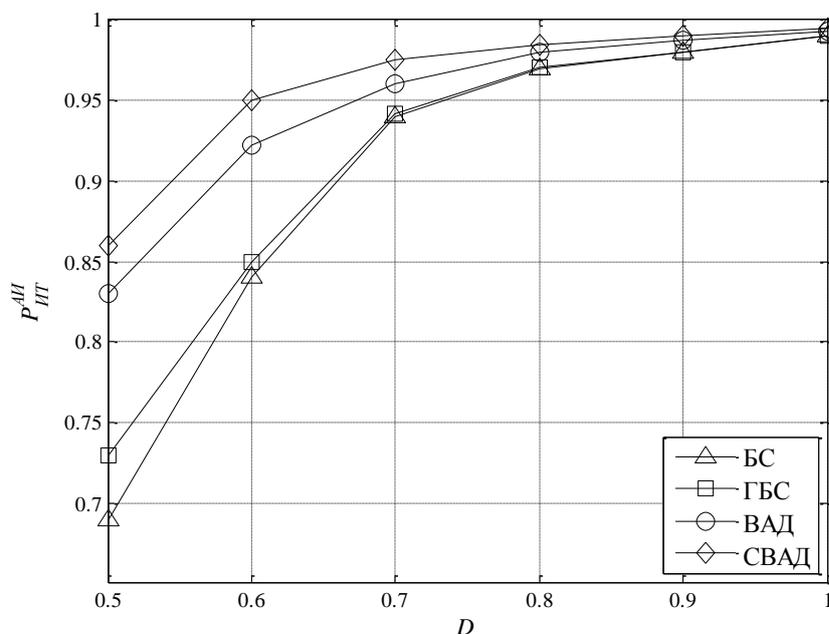


Рисунок 3.1 – Зависимости вероятности правильной ассоциации истинной отметки P_{II}^{AI} от вероятности правильного обнаружения сигнала D

Зависимости, приведенные на рисунке 3.2, свидетельствуют о том, что значение S_{II}^{AI} для всех рассмотренных алгоритмов монотонно убывает с ростом вероятности правильного обнаружения сигнала D . В условиях отсутствия пропусков отметок перепутывание треков становится маловероятным. Этот вывод подтверждается тем, что при $D=1$ различия в алгоритмах по данному показателю

практически отсутствуют. Однако рисунок 3.2 свидетельствует о превосходстве байесовских алгоритмов над небайесовскими, которое особенно заметно при малых и средних значениях D . По-видимому, это является следствием уже отмеченного выше синтетического характера ассоциированной отметки и большего значения вероятности $P_{ИТ}^{АИ}$ для данных алгоритмов.

По рассматриваемому показателю алгоритмы, реализующие стратегию глобальной ассоциации (ГБС, СВАД), превосходят алгоритмы, использующие локальную ассоциацию (БС, ВАД). Это также является следствием принципиальной разницы между стратегиями. Поскольку глобальная стратегия ассоциации основана на решении оптимизационной задачи, такой подход позволяет получить правильное решение задачи ассоциации измерений даже в тех случаях, когда в стробы пересекающихся треков попадают одинаковые отметки.

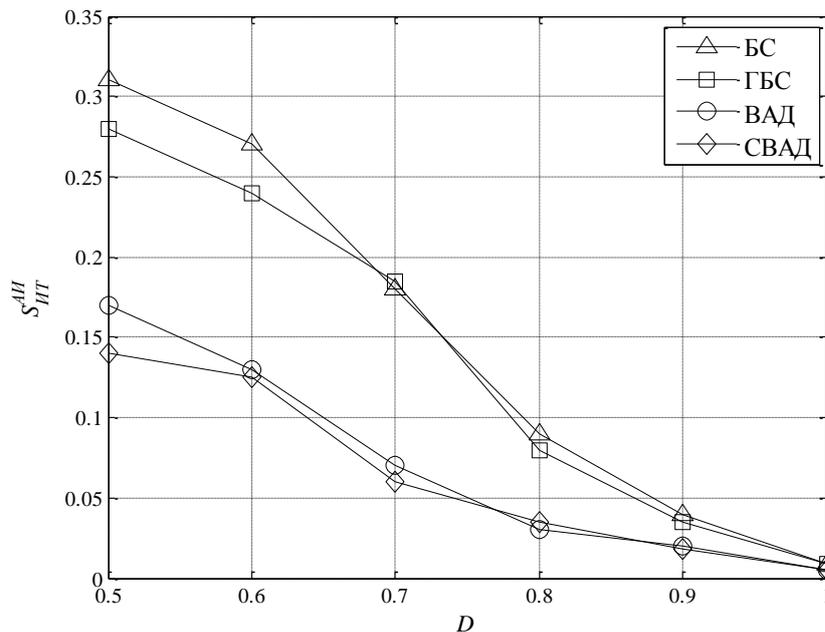


Рисунок 3.2 – Зависимости вероятности перепутывания пересекающихся треков $S_{ИТ}^{АИ}$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D

На рисунке 3.3 приведены зависимости вероятности потери истинного трека $L_{ИТ}^{АИ}$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D . Значение $L_{ИТ}^{АИ}$ для всех

алгоритмов убывает с ростом вероятности правильного обнаружения сигнала D . Такой характер зависимостей говорит о том, что с ростом D длительность истинного трека изменяется от величины близкой к нулю до длительности интервала наблюдения. Из рисунка следует, что и для данного показателя преимущество байесовских алгоритмов и глобальной стратегии ассоциации сохраняется. Следовательно, более качественное решение задачи ассоциации приводит к улучшению целостности треков.

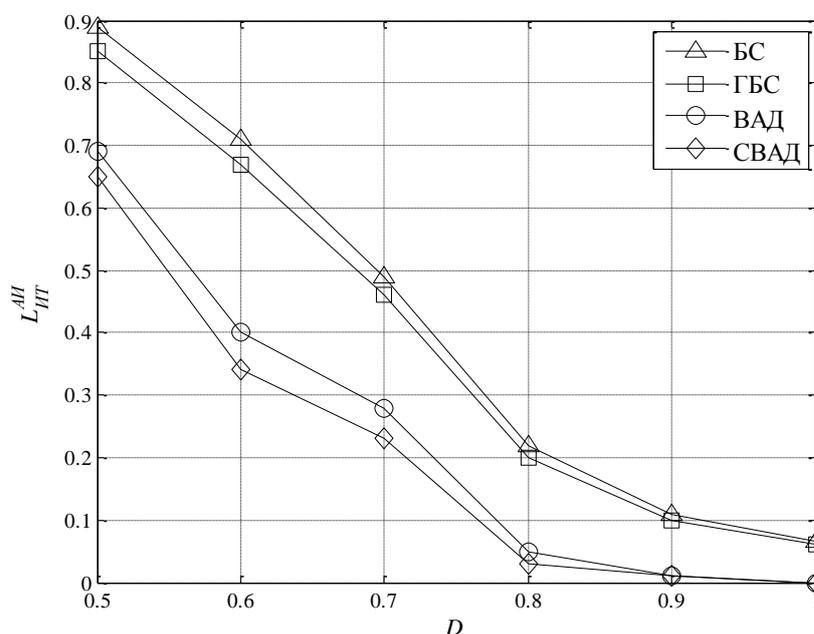


Рисунок 3.3 – Зависимости вероятности потери истинного трека $L_{ИТ}^{AI}$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D

Зависимости, приведенные на рисунке 3.4, свидетельствуют о том, что значение средней частоты потерь истинного трека $\nu_{ИТ}^{AI}$ для всех алгоритмов убывает с ростом вероятности правильного обнаружения сигнала D . Следует отметить, что в условиях с достаточно высокой вероятностью правильного обнаружения сигнала при $D > 0.8$ частота $\nu_{ИТ}^{AI}$ меняется мало. Соотношение качества ассоциации по рассматриваемому показателю для разных алгоритмов

сохраняется. Как следует из сравнения рисунков 3.4 и 3.5, характер зависимостей СКО $\Delta v_{ИТ}^{АИ}$ от D аналогичен характеру зависимостей $v_{ИТ}^{АИ} = v_{ИТ}^{АИ}(D)$.

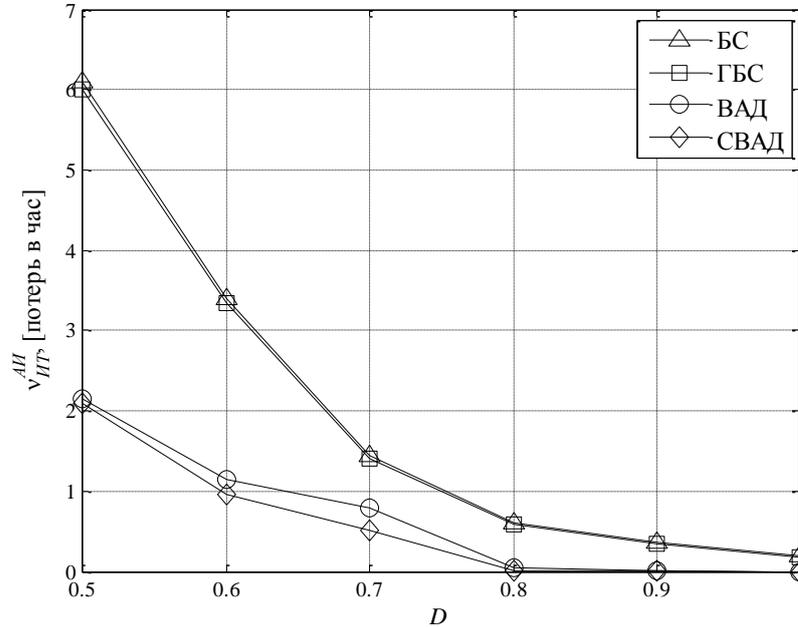


Рисунок 3.4 – Зависимости средней частоты потерь истинного трека $v_{ИТ}^{АИ}$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D

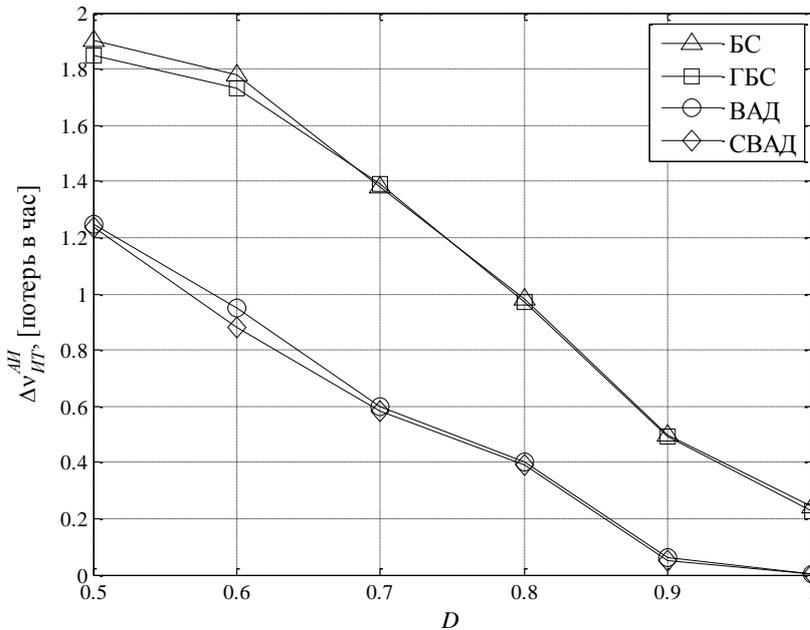


Рисунок 3.5 – Зависимости СКО частоты потерь истинного трека $\Delta v_{ИТ}^{АИ}$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D

Зависимости, приведенные на рисунках 3.6 и 3.7, имеют обратный характер: значение средней длительности истинного трека $\tau_{ИТ}^{АИ}$ и средней длительности истинного трека до первой потери $t_{ИТ}^{АИ}$ для всех алгоритмов возрастает с ростом вероятности правильного обнаружения сигнала D . Этот результат также свидетельствует о том, что целостность треков улучшается с ростом качества первичной обработки. Графики $t_{ИТ}^{АИ}$ проходят ниже аналогичных кривых для $\tau_{ИТ}^{АИ}$, это объясняется различиями в методике оценивания советующих показателей. Показатель $t_{ИТ}^{АИ}$ оценивается как время от момента появления первой отметки ИТ до момента превышения количества последовательных пропусков отметок заданной величины, после чего трек удаляется из СТО. При оценивании $\tau_{ИТ}^{АИ}$ удаление трека из СТО задерживается на несколько периодов обзора РЛС, при этом прекращается только отображение трека. Однако, если в течение этого времени отметки от трека продолжают поступать и попадают в его строб, отображение трека возобновляется. Таким образом, из рисунка 3.6 видно, что задержка полного удаления трека позволяет увеличить время существования ИТ в СТО. При отсутствии указанной задержки зависимости $\tau_{ИТ}^{АИ}(D)$ аналогичны зависимостям $t_{ИТ}^{АИ}(D)$.

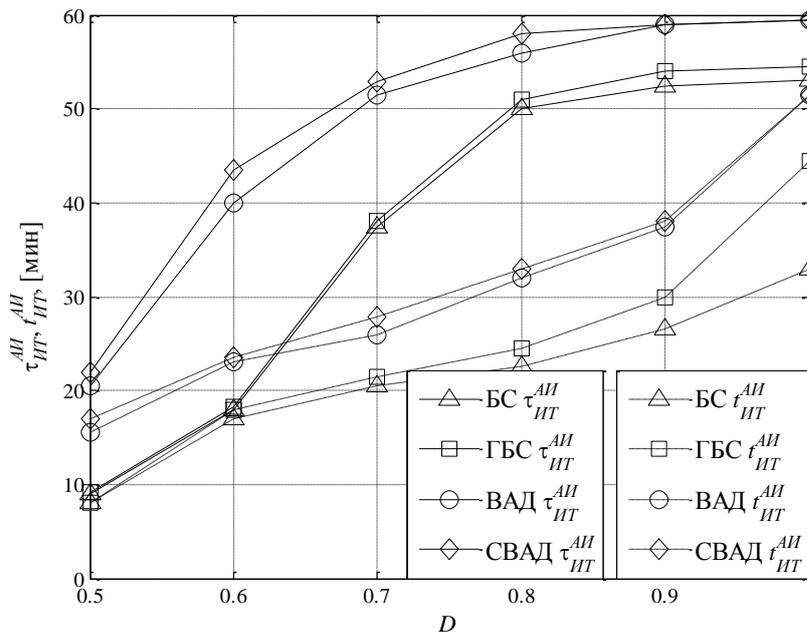


Рисунок 3.6 – Зависимости средней длительности истинного трека $\tau_{ИТ}^{АИ}$ и средней длительности истинного трека до первой потери $t_{ИТ}^{АИ}$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D

Из рисунка 3.7 видно, что СКО длительности сопровождения истинного трека $\Delta\tau_{ИТ}^{АИ}$ и СКО длительности сопровождения истинного трека до первой потери $\Delta t_{ИТ}^{АИ}$ для всех алгоритмов растет с увеличением вероятности правильного обнаружения сигнала D . Этот факт свидетельствует о таком характере процесса потерь истинного трека, который близок к пуассоновскому. В то же время случайный поток точек срыва сопровождения, как следует из сравнения рисунков 3.6 и 3.7, не является пуассоновским, поскольку рост СКО $\Delta\tau_{ИТ}^{АИ}$ и $\Delta t_{ИТ}^{АИ}$ происходит со значительно меньшей скоростью, чем увеличение средних значений $\tau_{ИТ}^{АИ}$ и $t_{ИТ}^{АИ}$. Значения $\Delta t_{ИТ}^{АИ}$ незначительно отличаются от значений $\Delta\tau_{ИТ}^{АИ}$, это свидетельствует о близости дисперсий соответствующих распределений.

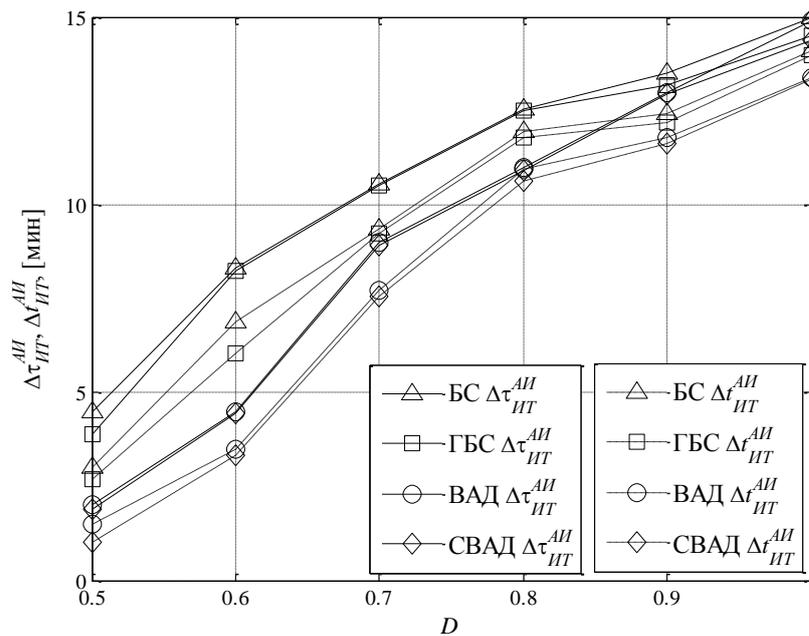


Рисунок 3.7 – Зависимости СКО длительности истинного трека $\Delta\tau_{ИТ}^{АИ}$ и СКО длительности истинного трека до первой потери $\Delta t_{ИТ}^{АИ}$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D

Зависимости, приведенные на рисунке 3.8, свидетельствуют о том, что средняя частота ложных треков $\nu_{ЛТ}^{АИ}$ для всех рассмотренных алгоритмов увеличивается с ростом вероятности ложной тревоги F . Полученные зависимости $\nu_{ЛТ}^{АИ} = \nu_{ЛТ}^{АИ}(F)$ практически идентичны для всех алгоритмов. Это объясняется тем, что устойчивость алгоритмов к формированию ложных треков в большей степени определяется критериями обнаружения и удаления треков, а также размером строга трека и в меньшей степени алгоритмом ассоциации измерений. При $F \leq 10^{-6}$ $\nu_{ЛТ}^{АИ}, \Delta\nu_{ЛТ}^{АИ} < 0.5$, поэтому в СТО, радиолокаторы в составе которой удовлетворяют требованиям стандарта [74], ложных треков практически нет. Однако, для РЛС, работающих в сложной помеховой обстановке ($F > 10^{-5}$), ложные треки представляют серьезную проблему. Из сравнения графиков на

рисунке 3.8 следует, что характер зависимостей СКО $\Delta v_{ЛТ}^{АИ}$ от F аналогичен характеру зависимостей $v_{ЛТ}^{АИ} = v_{ЛТ}^{АИ}(F)$.

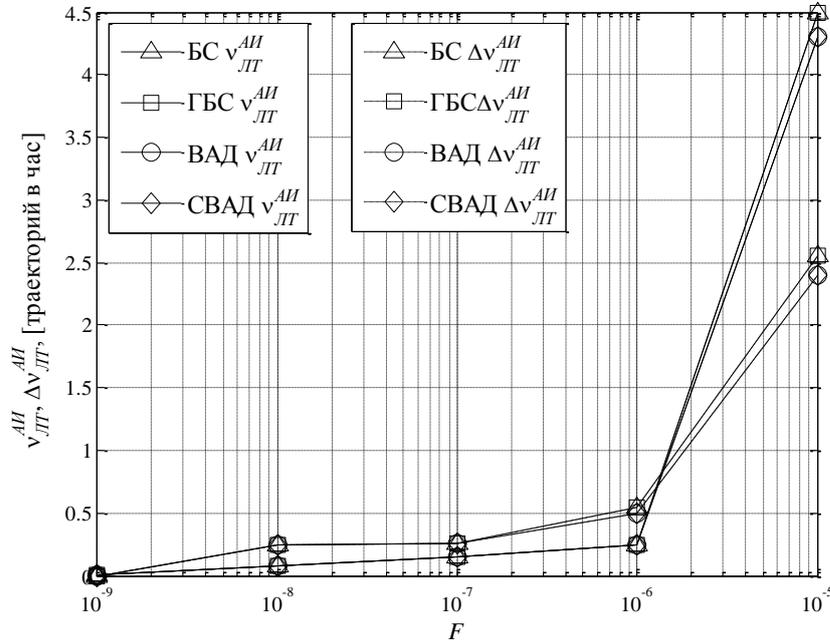


Рисунок 3.8 – Зависимости среднего значения $v_{ЛТ}^{АИ}$ и СКО частоты появления ложных треков $\Delta v_{ЛТ}^{АИ}$ от вероятности ложной тревоги F

Зависимости, приведенные на рисунке 3.9, свидетельствуют о том, что среднее $\tau_{ЛТ}^{АИ}$ и СКО времени существования ложных треков $\Delta\tau_{ЛТ}^{АИ}$ для всех рассмотренных алгоритмов увеличивается с ростом вероятности ложной тревоги F . При $F \leq 10^{-6}$ длительность ложных треков не превышает нескольких периодов обзора РЛС. Однако, при дальнейшем повышении F в СТО появляется тенденция устойчивого сопровождения ложных треков, что представляет серьезную проблему и требует специальных мер. Поэтому следует признать, что требование стандарта [74] к величине вероятности ложной тревоги – $F \leq 10^{-6}$ является абсолютно обоснованным.

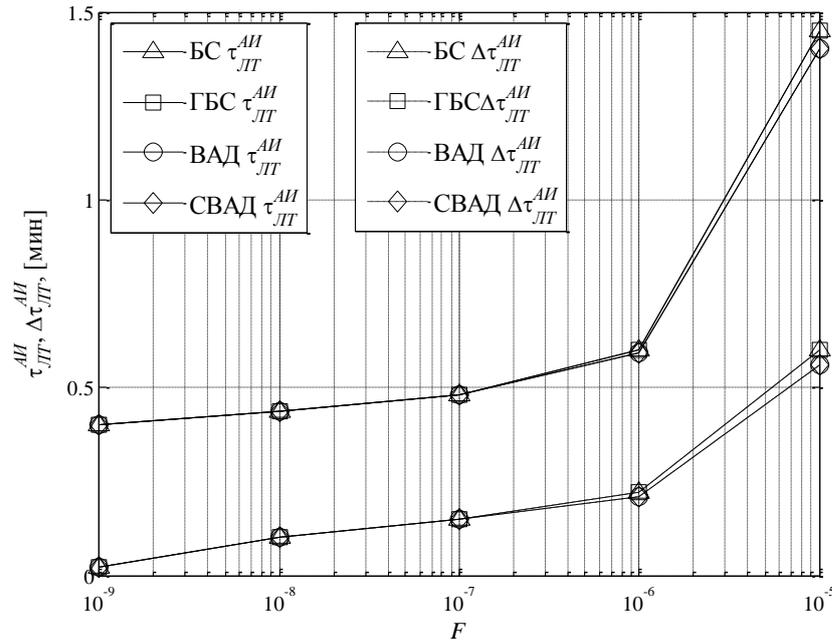


Рисунок 3.9 – Зависимости среднего значения $\tau_{ЛТ}^{АИ}$ и СКО времени существования ложных треков $\Delta\tau_{ЛТ}^{АИ}$ от вероятности ложной тревоги F

Проделанный анализ алгоритмов ассоциации измерений по выбранным показателям качества выявил различия между байесовским и небайесовским подходом, стратегиями глобальной и локальной ассоциации измерений. В среднем алгоритмы, реализующие байесовский подход, имеют показатели качества ассоциации измерений выше, чем алгоритмы, реализующие небайесовский (эмперический) подход. Вполне закономерна тенденция уменьшения степени различия в качестве алгоритмов с ростом D . Общие тенденции изменения эффективности алгоритмов в зависимости от вероятностей правильного обнаружения сигнала D и ложной тревоги F , которые характеризуют качество первичной обработки в РЛС, позволяют утверждать, что для качественной траекторной обработки необходимо, чтобы эти показатели удовлетворяли следующим условиям: $D \geq 0,8$ и $F \leq 10^{-6}$. В целом проведенный в работе анализ выявил важные с точки зрения практического применения различия рассмотренных алгоритмов ассоциации измерений.

3.4 Выводы

В главе предложен набор показателей качества ассоциации измерений с треками в СТО. Разработанный набор показателей позволяет произвести полноценный и достоверный сравнительный анализ алгоритмов с точки зрения правильности ассоциации первичных отметок с существующими треками, целостности треков и устойчивости СТО к ложным отметкам. Выбранные показатели имеют ясный физический смысл.

Предложенные показатели и методика их оценивания были использованы для получения экспериментальных зависимостей, характеризующих качество работы алгоритмов ассоциации измерений на примере четырех алгоритмов ассоциации: БС, ГБС, ВАД и СВАД. Результаты проведенного в работе анализа свидетельствуют о том, что наиболее значимыми показателями при оценке качества ассоциации измерений являются: вероятность правильной ассоциации истинной отметки P_{IT}^{AI} , вероятность перепутывания треков S_{IT}^{AI} , вероятность потери истинного трека L_{IT}^{AI} , средняя длительность истинного трека τ_{IT}^{AI} , частота появления ложных треков ν_{IT}^{AI} . Данный набор показателей позволяет произвести объективный сравнительный анализ различных алгоритмов ассоциации и осуществить выбор алгоритма, исходя из предъявляемых к СТО требований.

4 ОЦЕНКА КАЧЕСТВА АЛГОРИТМОВ ФИЛЬТРАЦИИ ТРЕКОВ

4.1 Алгоритмы фильтрации траекторий

Последовательность радиолокационных измерений (отметок), поступающих на вход блока фильтрации и предсказания (рисунок 1.1), представляет собой дискретный случайный процесс, содержащий информацию об истинной траектории ВС. Поэтому оценивание траектории ВС является известной в математической статистике задачей фильтрации и сводится к синтезу фильтра оптимального в смысле принятого критерия качества (например, наименьшей СКО).

Как отмечалось, получаемая на выходе фильтра оценка траектории ВС называется треком. С выхода блока фильтрации сформированные треки поступают в систему отображения радиолокационного комплекса и в подсистему объединения данных от различных РЛС, где реализуется т.н. третичная (мультирадарная) обработка. Экстраполированная оценка поступает в блок стробирования отметок, где используется для построения строба трека. Таким образом, качество решения задачи фильтрации определяет точность оценки параметров движения ВС и существенно влияет на характеристики всей СТО.

При решении задачи оценивания траектории воздушное судно рассматривается как дискретная стохастическая динамическая система, эволюционирующая в некотором фазовом пространстве. Состояние системы в k -й момент времени t_k характеризуется вектором [1, 2, 15, 22, 27, 35]:

$$\mathbf{x}_k = [x(t_k) \quad y(t_k) \quad \dot{x}(t_k) \quad \dot{y}(t_k) \quad \ddot{x}(t_k) \quad \ddot{y}(t_k)]^T, \quad (4.1)$$

составляющие которого представляют собой координаты ВС в системе координат радиолокатора и их производные (скорости и ускорения). В некоторых СТО вектор состояния (4.1) включает в себя также угловые скорости движения ВС. Динамика изменения вектора состояния \mathbf{x}_k и условия его наблюдения определяются разностными уравнениями:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k = \mathbf{f}(k, \mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{v}_k) \\ \mathbf{z}_k = \mathbf{h}(k, \mathbf{x}_k, \mathbf{w}_k) \end{cases}, \quad (4.2)$$

где $\mathbf{f}(k, \mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{v}_k)$ и $\mathbf{h}(k, \mathbf{x}_k, \mathbf{w}_k)$ – функции перехода и наблюдения, которые в общем случае являются нелинейными. Функция перехода определяется на основании выбранной модели движения ВС, а динамический шум \mathbf{v}_k позволяет учесть случайные возмущения траектории. Следует отметить, что в процессе сопровождения могут возникать значительные отклонения ВС от принятой модели движения вследствие выполнения маневров (см. далее). Составляющие вектора измерений $\mathbf{z}_k = [\hat{\rho}(t_k) \quad \hat{\phi}(t_k)]^T$ в k -й момент представляют собой оценки дальности и азимута ВС. Функция наблюдения $\mathbf{h}(k, \mathbf{x}_k, \mathbf{w}_k)$ задает правила преобразования параметров движения из пространства состояний в пространство измерений, и \mathbf{w}_k – шум измерений.

Решение задачи оптимальной фильтрации базируется на двух основных положениях [27, 39, 101]: во-первых, процесс изменения вектора состояния \mathbf{x}_k является марковским; во-вторых, апостериорная плотность распределения вероятностей (ПРВ) $p(\mathbf{x}_k | \mathbf{Z}_k = \{\mathbf{z}_k\}_{k=1}^m)$, содержит всю получаемую в результате измерений информацию о текущем состоянии динамической системы. Эти свойства позволяют определить рекурсивную процедуру формирования апостериорной ПРВ, которая использует формулу Байеса и состоит из следующих шагов:

1. Экстраполяция (прогноз) апостериорной ПРВ:

$$p(\mathbf{x}_k | \mathbf{Z}_{k-1}) = \int p(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1}) p(\mathbf{x}_{k-1} | \mathbf{Z}_{k-1}) d\mathbf{x}_{k-1}, \quad (4.3)$$

2. Обновление апостериорной ПРВ:

$$p(\mathbf{x}_k | \mathbf{Z}_k) = \frac{p(\mathbf{z}_k | \mathbf{x}_k) p(\mathbf{x}_k | \mathbf{Z}_{k-1})}{\int p(\mathbf{z}_k | \mathbf{x}_{k-1}) p(\mathbf{x}_{k-1} | \mathbf{Z}_{k-1}) d\mathbf{x}_{k-1}}. \quad (4.4)$$

В общем случае рекурсия (4.3) и (4.4) не имеет замкнутого представления, и оптимальный байесовский фильтр не реализуем [2, 27, 91]. Поэтому используются

приближения, которые различаются способом аппроксимации апостериорной ПРВ. Если уравнения (4.2) линейные, а шумы аддитивные, белые и нормальные, то оптимальным фильтром, как известно, является линейный фильтр Калмана (ФК, англ. *Kalman Filter, KF*) [2, 34, 98, 99, 100].

В условиях радиолокационного наблюдения за воздушной обстановкой уравнение наблюдения (4.2) носит принципиально нелинейный характер, поскольку измерения координат цели происходят в полярной системе «дальность-азимут». Поэтому оптимальный фильтр должен быть нелинейным, и задача его синтеза становится крайне сложной. Для получения решения в настоящее время применяются различные приближения, среди которых можно отметить следующие:

1. Расширенный фильтр Калмана (РФК, англ. *Extended Kalman Filter, EKF*) [15, 26, 27]. Алгоритм, в котором функции $\mathbf{f}(k, \mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{v}_k)$ и $\mathbf{h}(k, \mathbf{x}_k, \mathbf{w}_k)$ на каждом шаге фильтрации аппроксимируются первыми членами ряда Тейлора в окрестности экстраполированных оценок вектора состояния. При этом нелинейные функции должны быть, как минимум, дифференцируемыми.

2. Сигма-точечный фильтр Калмана (СТФК, англ. *Unscented Kalman Filter, UKF*) [15, 102, 103]. Является расширением ФК на случай, когда нелинейные уравнения (4.2) не могут быть линеаризованы. В основе фильтра лежит сигма-точечное преобразование (в зарубежной литературе – *Unscented Transformation*). Преобразование подразумевает выбор набора характерных точек (т.н. сигма-точек) в фазовом пространстве и их весов, которые совместно с достаточной точностью позволяют аппроксимировать моменты распределения оценки вектора состояния (4.1).

3. Фильтр частиц (ФЧ, англ. *Particle Filter, PF*) [15, 104, 105]. Является наиболее близким к оптимальному алгоритмом, основанным на численном расчете интегралов рекурсии (4.3) и (4.4) с помощью метода Монте-Карло. На каждом шаге фильтрации распределение вектора оцениваемых параметров (4.1) аппроксимируется множеством частиц (случайных векторов). Этот подход

используется в случае высокой степени нелинейности задачи фильтрации, негауссовых шумах, многомодовой апостериорной ПРВ.

Оптимальность рассмотренных фильтров, основана на гипотезе о точном соответствии модели движения (4.2) истинной траектории. В действительности реальные траектории ВС представляют собой наборы ограниченных по времени участков движения, на каждом из которых ВС выполняет один из возможных маневров. В частности, в УВД принято выделять [7, 35, 74, 75]: равномерное прямолинейное движение (РПД), равноускоренное движение (РУД), равномерное движение по окружности с угловой скоростью 3 град/с , известное как стандартный разворот (СР) воздушного судна. Поэтому для описания траектории движения маневрирующего ВС можно использовать модель случайного процесса, управляемого скрытой марковской цепью [39], которая управляет переходами с одной модели движения на другую.

Оптимальная фильтрация таких процессов производится при помощи многомодельных алгоритмов (ММА, англ. *Multiple Model Algorithm, MMA*) [5, 27, 106]. ММА реализуется как банк фильтров, каждый согласован с одной из допустимых моделей движения ВС. Фильтры работают параллельно с последующим объединением оценок с весами, равными апостериорным вероятностям реализации соответствующих моделей движения. Разные ММА отличаются набором моделей и стратегией их взаимодействия. В данной работе исследуется наиболее популярный и практически применяемый алгоритм фильтрации – интерактивный многомодельный алгоритм (ИММ, англ. *Interactive Multiple Model algorithm, IMM*). В основе алгоритма лежит предположение о том, что смена модели движения описывается марковской цепью с конечным числом состояний и известной стационарной матрицей перехода $\pi_{ij} = P\{m_j | m_i\}$, $i, j = 1, \dots, l$ из состояния m_i в m_j . Структура и последовательность операций ИММ алгоритма подробно рассмотрены в [39, 106, 107, 108, 109, 110]. Фильтры в наборе могут быть как линейные, так и нелинейные.

Для решения поставленных во введении задач используем следующие фильтры: ФК, РФК, СТФК, ФЧ, ИММ ФК, ИММ РФК, ИММ СТФК и ИММ ФЧ.

4.2 Выбор показателей, характеризующих качество функционирования алгоритмов фильтрации траекторий

Анализ научно-технических публикаций [68, 69, 70, 71, 73, 111, 112, 113] и, в частности, стандарта [74] Европейской организацией по безопасности воздушной навигации «*EUROCONTROL*» и руководства оператора комплекса специализированных программных средств *SASS-C* [75], показывает, что существуют две группы показателей качества для алгоритмов фильтрации траекторий (ФТ). Первая группа состоит из показателей, характеризующих точность оценивания траектории ВС на участках, где ВС совершает полет в соответствии с одной из следующих моделей: равномерное прямолинейное движение на заданной высоте, равноускоренное прямолинейное движение на заданной высоте, стандартный разворот налево, стандартный разворот направо, равномерное прямолинейное движение с увеличением или уменьшением высоты. Вторая группа показателей характеризует качество фильтрации в переходном режиме полета, когда ВС меняет модель движения. Выделение двух групп показателей связано с тем, что в суммарной ошибке фильтрации траектории ВС принято выделять флуктуационную и динамическую составляющие. Флуктуационная составляющая порождена случайными ошибками, возникающими при измерении координат ВС. Данная составляющая характеризуется, как правило, смещением и СКО оценки при стационарном характере входного воздействия на СТО. Динамическая составляющая является следствием инерционности используемого в СТО фильтра и проявляется при изменении характера движения ВС. Данная составляющая характеризуется пиковым значением ошибки (ПЗО), наблюдаемым в течение перехода от одного типа движения к другому, и временем переходного процесса (ВПП), необходимым для уменьшения ошибки оценки траектории ВС с пикового до уровня равного половине ПЗО.

На основании перечисленных в первой главе требований к системе показателей качества, анализа вышеупомянутых документов, требований и опыта эксплуатирующих организаций предлагается система показателей качества фильтрации траекторий, состоящая из двух наборов. Первый набор включает в себя показатели, характеризующие флуктуационную составляющую ошибки оценивания траектории ВС:

1. Смещение и СКО оценки положения ВС в тангенциальном и нормальном к вектору скорости направлениях;
2. Смещение и СКО оценки путевой скорости;
3. Смещение и СКО тангенциальной и нормальной составляющих ускорения;
4. Смещение и СКО оценки курса.

Второй набор включают показатели, характеризующие динамическую составляющую ошибки оценивания траектории ВС:

1. ПЗО и ВПП оценки положения ВС в тангенциальном и нормальном к вектору скорости направлениях;
2. ПЗО и ВПП оценки путевой скорости;
3. ПЗО и ВПП оценки курса;

Рассмотрим методику оценивания вышеуказанных показателей. Здесь и далее надстрочный индекс « ΦT » указывает на принадлежность к блоку фильтрации траекторий. Все показатели оцениваются в скоростной системе координат ВС [74]. Начнем с рассмотрения первого набора показателей.

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 представляют собой выборочные статистические характеристики ошибки оценки положения ВС по ансамблю испытаний $k = 1, \dots, K$:

$$\begin{aligned}
b_X^{\Phi T} &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^{N_k} X^{(n)}, \\
b_Z^{\Phi T} &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^{N_k} Z^{(n)}, \\
s_X^{\Phi T} &= \left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N_k - 1} \sum_{n=1}^{N_k} \left(X^{(n)} \right)^2 \right]^{1/2}, \\
s_Z^{\Phi T} &= \left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N_k - 1} \sum_{n=1}^{N_k} \left(Z^{(n)} \right)^2 \right]^{1/2},
\end{aligned} \tag{4.5}$$

где

$$\begin{aligned}
X^{(n)} &= \frac{1}{M_n} \sum_{m=1}^{M_n} \left[\left(\hat{x}_m^{(n)} - x_m^{(n)} \right) \cos \varphi_m^{(n)} + \left(\hat{y}_m^{(n)} - y_m^{(n)} \right) \sin \varphi_m^{(n)} \right], \\
Z^{(n)} &= \frac{1}{M_n} \sum_{m=1}^{M_n} \left[\left(\hat{x}_m^{(n)} - x_m^{(n)} \right) \sin \varphi_m^{(n)} - \left(\hat{y}_m^{(n)} - y_m^{(n)} \right) \cos \varphi_m^{(n)} \right],
\end{aligned} \tag{4.6}$$

N_k – количество истинных траекторий в k -м испытании; $X^{(n)}$, $Z^{(n)}$ – выборочные средние значения по длине n -го трека M_n ошибки оценки положения ВС; $\varphi_m^{(n)}$, $x_m^{(n)}$, $y_m^{(n)}$ – истинные значения курсового угла и координат n -го ВС в m -й момент времени в системе координат РЛС; $\hat{x}_m^{(n)}$, $\hat{y}_m^{(n)}$ – соответствующие оценки координат ВС.

Смещение $b_V^{\Phi T}$ и СКО $s_V^{\Phi T}$ оценки путевой скорости ВС представляют собой следующие выборочные характеристики:

$$b_V^{\Phi T} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^{N_k} V^{(n)}, \quad s_V^{\Phi T} = \left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N_k - 1} \sum_{n=1}^{N_k} \left(V^{(n)} \right)^2 \right]^{1/2}, \tag{4.7}$$

где N_k – количество истинных траекторий в k -м испытании,

$V^{(n)} = \frac{1}{M_n} \left(\sum_{m=1}^{M_n} \hat{v}_m^{(n)} - v_m^{(n)} \right)$ – выборочное среднее значение ошибки оценки

путевой скорости по длине n -го трека $M_n \cdot v_m^{(n)}$, $\hat{v}_m^{(n)}$ – истинное значение и оценка путевой скорости ВС, соответственно, в m -й момент времени.

Аналогично уравнениям (4.5) и (4.6), могут быть вычислены смещения и СКО оценок составляющих ускорения ВС:

$$\begin{aligned} b_{AX}^{\Phi T} &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^{N_k} A_X^{(n)}, \\ b_{AZ}^{\Phi T} &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^{N_k} A_Z^{(n)}, \\ s_{AX}^{\Phi T} &= \left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N_k - 1} \sum_{n=1}^{N_k} \left(A_X^{(n)} \right)^2 \right]^{1/2}, \\ s_{AZ}^{\Phi T} &= \left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N_k - 1} \sum_{n=1}^{N_k} \left(A_Z^{(n)} \right)^2 \right]^{1/2}, \end{aligned} \quad (4.8)$$

где

$$\begin{aligned} A_X^{(n)} &= \frac{1}{M_n} \sum_{m=1}^{M_n} \left[\left(\hat{a}_x^{(n,m)} - a_x^{(n,m)} \right) \cos \varphi_m^{(n)} + \left(\hat{a}_y^{(n,m)} - a_y^{(n,m)} \right) \sin \varphi_m^{(n)} \right], \\ A_Z^{(n)} &= \frac{1}{M_n} \sum_{m=1}^{M_n} \left[\left(\hat{a}_x^{(n,m)} - a_x^{(n,m)} \right) \sin \varphi_m^{(n)} - \left(\hat{a}_y^{(n,m)} - a_y^{(n,m)} \right) \cos \varphi_m^{(n)} \right], \end{aligned} \quad (4.9)$$

$A_X^{(n)}$, $A_Z^{(n)}$ – выборочные средние значения ошибок оценки тангенциальной и нормальной составляющих ускорения по длине n -го трека M_n ; $a_x^{(n,m)}$, $a_y^{(n,m)}$, $\hat{a}_x^{(n,m)}$, $\hat{a}_y^{(n,m)}$ – истинные значения и оценки составляющих ускорения ВС в системе координат РЛС в m -й момент времени.

Смещение $b_{\Phi}^{\Phi T}$ и СКО $s_{\Phi}^{\Phi T}$ оценки курса представляют собой выборочные статистические характеристики ошибки соответствующей оценки по ансамблю испытаний $k = 1, \dots, K$:

$$b_{\Phi}^{\Phi T} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^{N_k} \Phi^{(n)}, \quad s_{\Phi}^{\Phi T} = \left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N_k - 1} \sum_{n=1}^{N_k} \left(\Phi^{(n)} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (4.10)$$

где $\Phi^{(n)} = \frac{1}{M_n} \sum_{m=1}^{M_n} (\hat{\phi}_m^{(n)} - \phi_m^{(n)})$ – выборочное среднее значение ошибки оценки курса по длине n -го трека M_n ; $\phi_m^{(n)}$, $\hat{\phi}_m^{(n)}$ – истинное значение и оценка курса ВС в m -й момент времени.

Рассмотрим методику оценивания показателей второго набора. Определенные выше ПЗО оценок равны максимальному значению среднеквадратического отклонения соответствующего параметра трека относительно истинной траектории, которые наблюдаются во время перехода ВС от одной модели движения к другой:

$$\begin{aligned} m\Phi_X^{GT} &= \left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^{N_k} \max_m \left(X_m^{(n)} \right)^2 \right]^{1/2}, \\ m\Phi_Z^{GT} &= \left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^{N_k} \max_m \left(Z_m^{(n)} \right)^2 \right]^{1/2}, \\ m\Phi_V^{GT} &= \left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^{N_k} \max_m \left(V_m^{(n)} \right)^2 \right]^{1/2}, \\ m\Phi_\Phi^{GT} &= \left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^{N_k} \max_m \left(\Phi_m^{(n)} \right)^2 \right]^{1/2}, \end{aligned} \quad (4.11)$$

где $X_m^{(n)} = (\hat{x}_m^{(n)} - x_m^{(n)}) \cos \phi_m^{(n)} + (\hat{y}_m^{(n)} - y_m^{(n)}) \sin \phi_m^{(n)}$,

$Z_m^{(n)} = (\hat{x}_m^{(n)} - x_m^{(n)}) \sin \phi_m^{(n)} - (\hat{y}_m^{(n)} - y_m^{(n)}) \cos \phi_m^{(n)}$,

$V_m^{(n)} = \hat{v}_m^{(n)} - v_m^{(n)}$, $\Phi_m^{(n)} = \hat{\phi}_m^{(n)} - \phi_m^{(n)}$ – мгновенные ошибки соответствующих

параметров. Показатели времен переходных процессов $\tau_X^{\Phi T}$, $\tau_Z^{\Phi T}$, $\tau_V^{\Phi T}$, $\tau_\Phi^{\Phi T}$ оцениваются как средние выборочные значения интервалов времени, в течение которых отклонение параметров трека от истинных значений уменьшается в два раза относительно ПЗО.

Рассмотренные показатели позволяют судить о точности оценки параметров движения ВС на участках траектории без и со сменой типа движения. Поскольку

показатели имеют смысл только для истинных траекторий, следует рассматривать зависимость показателей первой группы от СКО оценки местоположения ВС $\sigma_{МП}$, а показателей второй группы – от вероятности правильного обнаружения сигнала D . Такой выбор связан с ориентацией показателей: в первой группе они характеризуют флуктуационную ошибку оценки траектории, во второй – динамическую ошибку. Для определения свойств рассмотренных показателей фильтрации треков в ходе работы было проведено математическое моделирование, методика и результаты которого рассмотрены в следующем разделе.

4.3 Методика оценивания показателей и результаты математического моделирования

Методика проведения эксперимента по оценке выбранных показателей качества состоит из следующих этапов: 1) определение сценария движения ВС; 2) проведение имитационного моделирования в соответствии с выбранным сценарием; 3) обработка результатов моделирования, состоящая в построении графиков зависимостей оценок показателей качества от характеристик РЛС ($\sigma_{МП}$ или D). Полученные зависимости позволяют рекомендовать алгоритм фильтрации треков, исходя из требований к качеству траекторной обработки.

Анализ качества фильтров произведен по результатам моделирования процесса автоматического сопровождения ВС в трассовой зоне по данным однопозиционного обзорного вторичного радиолокатора. Набор показателей качества и методики их оценивания апробированы на примере анализа эффективности оценивания параметров движения ВС с использованием алгоритмов ФК, РФК, СТФК, ФЧ, ИММ ФК, ИММ РФК, ИММ СТФК и ИММ ФЧ. Одномодельные фильтры (ФК, РФК, СТФК, ФЧ) согласованы с моделью РУД, многомодельные – с моделями РПД, правым и левым СР с известной угловой скоростью.

Математический эксперимент проводился на базе модульной СТО, состав которой соответствует рисунку 1.1. Выбранная модульность позволяет

независимо менять алгоритмы работы каждого из блоков в составе СТО. В работе были выбраны следующие сценарии моделирования:

- Количество ВС в зоне обзора – 10;
- Тип движения ВС:
 - Первый сценарий – РПД;
 - Второй сценарий – СР;
 - Третий сценарий – переход от РПД к правому СР;
- Путевая скорость ВС – 1110 км/ч;
- Средняя дальность до ВС – 300 км;
- Количество статистических прогонов математической модели – $K = 10^8$.

Сценарии сопровождения соответствуют стандартным тестам «*EUROCONTROL*» на качество траекторной обработки однопозиционной РЛС [74]. В качестве РЛС был выбран вторичный обзорный трассовый радиолокатор, характеристики которого соответствуют требованиям того же стандарта:

Период обзора – 12 с;

Вероятность правильного обнаружения:

Первый, второй сценарий – $D = 0,9$;

Третий сценарий – $0,5 \leq D \leq 1,0$;

Вероятность ложной тревоги – $F = 10^{-6}$;

Среднеквадратическая ошибка определения дальности – $\sigma_R = 70$ м;

Среднеквадратическая ошибка определения азимута – $\sigma_\varphi = 0,08^\circ$.

Предельные значения D выбраны с учетом требований к источникам измерений и практики их применения в УВД [74, 75, 77, 78]: РЛС с вероятностью правильного обнаружения сигнала меньшей 0,5 являются непригодными для использования. Значение F выбрано исходя из требований стандарта [74]. Значения σ_R и σ_φ также соответствуют требованиям стандарта [74]. При этом

СКО оценки местоположения ВС $\sigma_{МП} = \sqrt{\sigma_R^2 + R^2\sigma_\Phi^2}$ можно изменять в ходе моделирования, меняя дальность ВС R .

По результатам математического моделирования были определены зависимости показателей первого набора $b_X^{\Phi T}$, $s_X^{\Phi T}$, $b_Z^{\Phi T}$, $s_Z^{\Phi T}$, $b_V^{\Phi T}$, $s_V^{\Phi T}$, $b_{AZ}^{\Phi T}$, $s_{AZ}^{\Phi T}$, $b_\Phi^{\Phi T}$, $s_\Phi^{\Phi T}$ (рисунки 4.1 – 4.9) от СКО оценки местоположения ВС $\sigma_{МП}$ и показателей второго набора $m_X^{\Phi T}$, $m_Z^{\Phi T}$, $m_V^{\Phi T}$, $m_\Phi^{\Phi T}$ (рисунки 4.10, 4.11), $\tau_X^{\Phi T}$, $\tau_Z^{\Phi T}$, $\tau_V^{\Phi T}$, $\tau_\Phi^{\Phi T}$ (таблицы 4.1 – 4.4) от вероятности правильного обнаружения сигнала D .

Как отмечалось, блок фильтрации и экстраполяции формирует информацию о траекториях объектов непосредственно для отображения на рабочих местах диспетчеров АС УВД. Работа АС УВД связана с оценкой времени пролета контрольных точек маршрута, возможности захода на посадку, расчетом минимальных интервалов вертикального и горизонтального эшелонирования, предупреждения опасных сближений ВС и обеспечения безопасности полетов в целом. Поэтому для работы АС УВД большое значение имеют данные о величинах ошибок оценок параметров движения ВС. Стандарт [74] отражает эту необходимость и уделяет большое внимание точностным показателям траекторного сопровождения ВС на различных этапах полета.

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 фильтр Калмана минимизирует СКО оценок. Смещение оценки на его выходе равно нулю. В случае неточного согласования оценка приобретает смещение. Из рисунков 4.1 и 4.2 видно, что значения $b_X^{\Phi T}$ и $b_Z^{\Phi T}$ действительно монотонно и линейно увеличиваются с ростом СКО оценки местоположения ВС $\sigma_{МП}$ для всех рассматриваемых фильтров. Однако, ММА (ИММ ФК, ИММ РФК, ИММ СТФК, ИММ ФЧ) включают в себя банки фильтров, которые рассчитаны соответственно на РПД, правый СР и левый СР с известной угловой скоростью. Поскольку в банках присутствуют настроенные на РПД фильтры, смещение

оценок для ММА, хоть и незначительно, но меньше, чем у одномоделных фильтров.

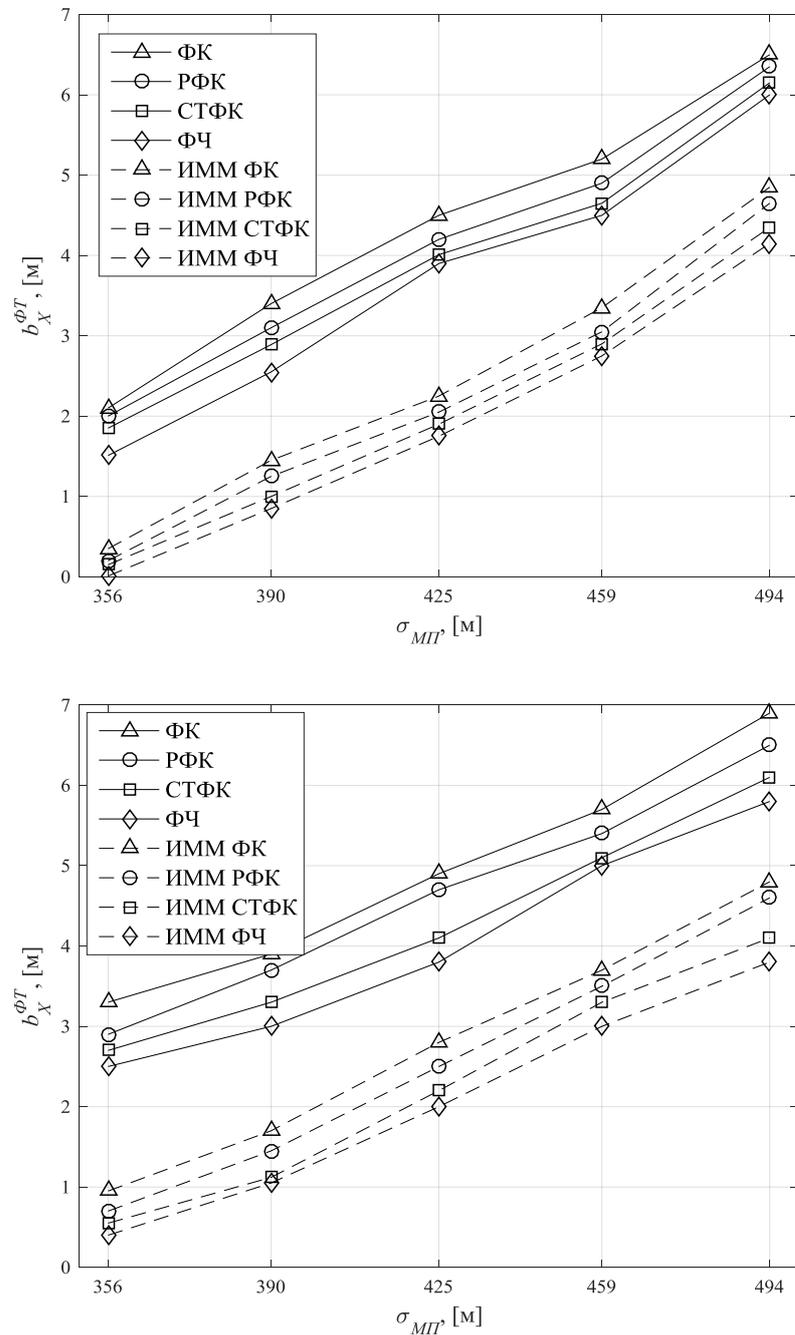


Рисунок 4.1 – Зависимости смещения оценки положения ВС в тангенциальном направлении $b_{X^T}^{\phi T}$ от СКО оценки местоположения σ_{MPI} для первого (РПД) и второго (СР) сценариев

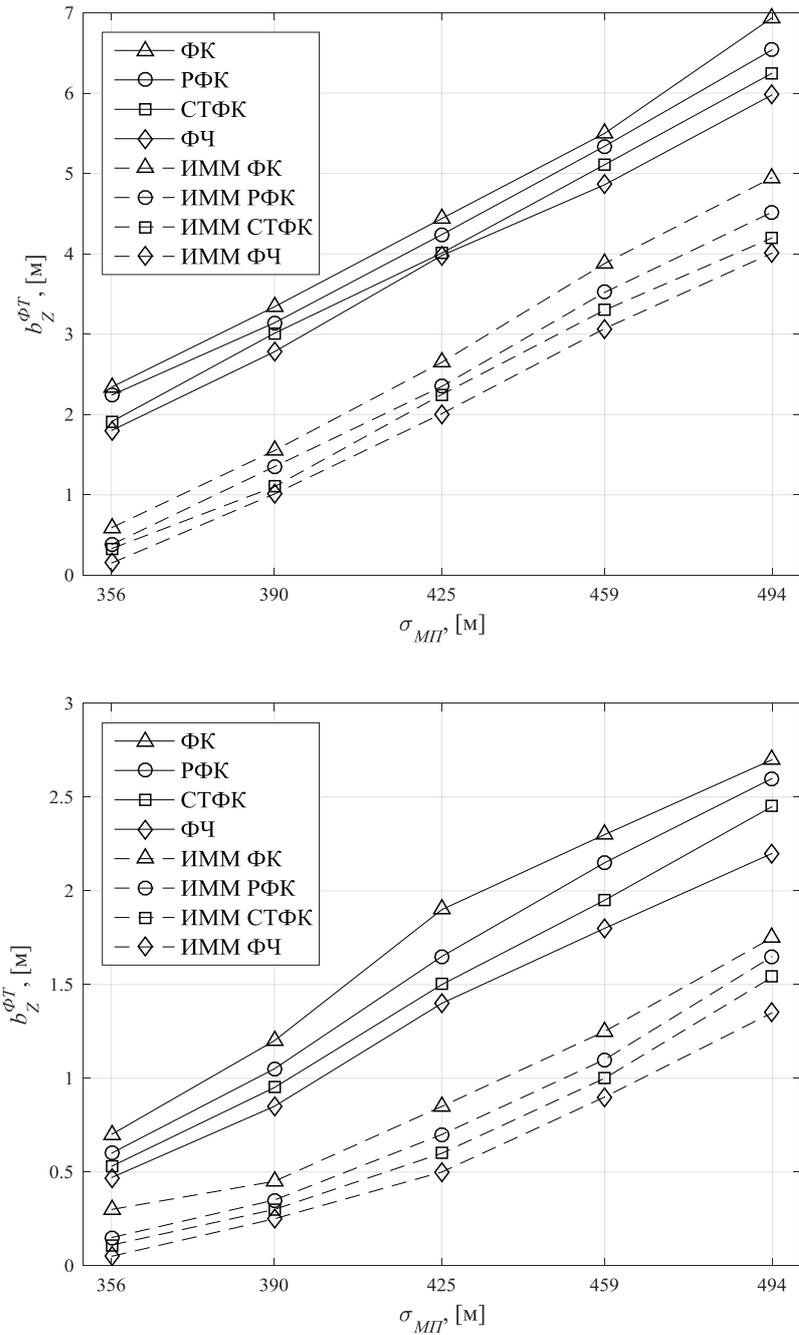


Рисунок 4.2 – Зависимости смещения оценки положения ВС в нормальном направлении $b_Z^{\Phi T}$ от СКО оценки местоположения σ_{ML} для первого (РПД) и второго (СР) сценариев

Из рисунков 4.3 и 4.4 видно, что при $\sigma_{ML} \leq 425$ м ($R \leq 300$ км), значения $s_X^{\Phi T}$ и $s_Z^{\Phi T}$ не превышают предельной величины 170 м, указанной в стандарте [74] для РПД. Графики, советующие ММА, проходят ниже аналогичных кривых для

одномоделных фильтров. Объяснение этому факту было дано выше при рассмотрении смещения оценок. Следует обратить внимание на то, что величина СКО оценок значительно превышает соответствующую величину смещения.

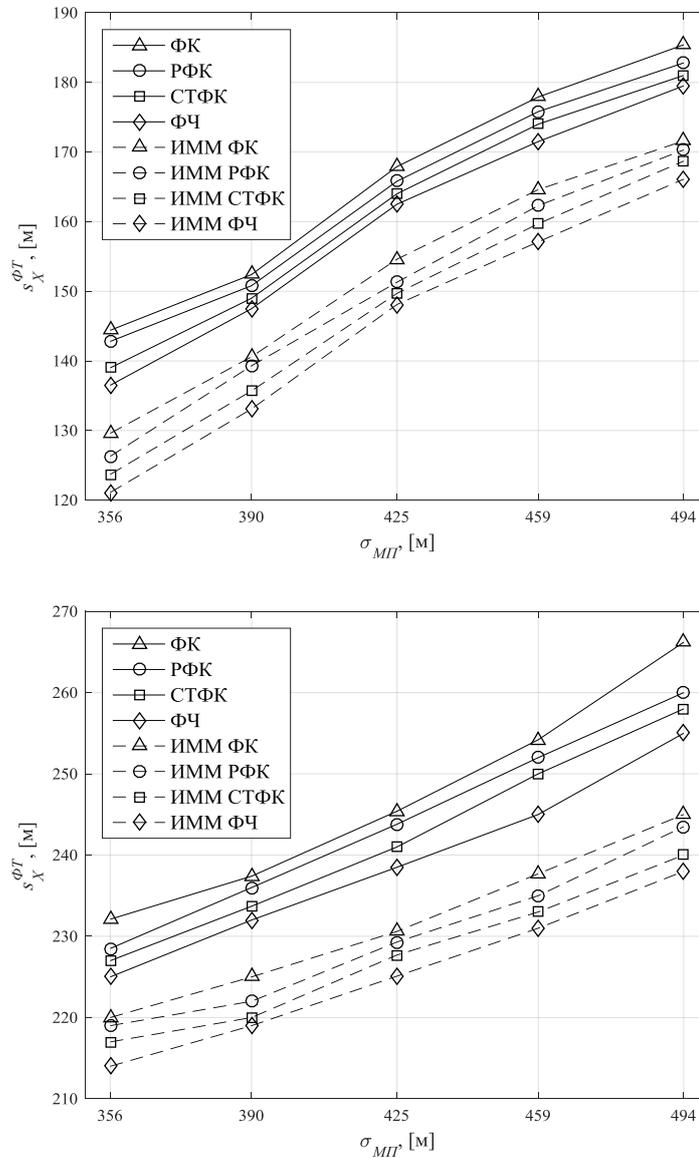


Рисунок 4.3 – Зависимости СКО оценки положения ВС в тангенциальном направлении $s_X^{\Phi T}$ от СКО оценки местоположения $\sigma_{МП}$ для первого сценария (РПД) и второго (СР) сценариев

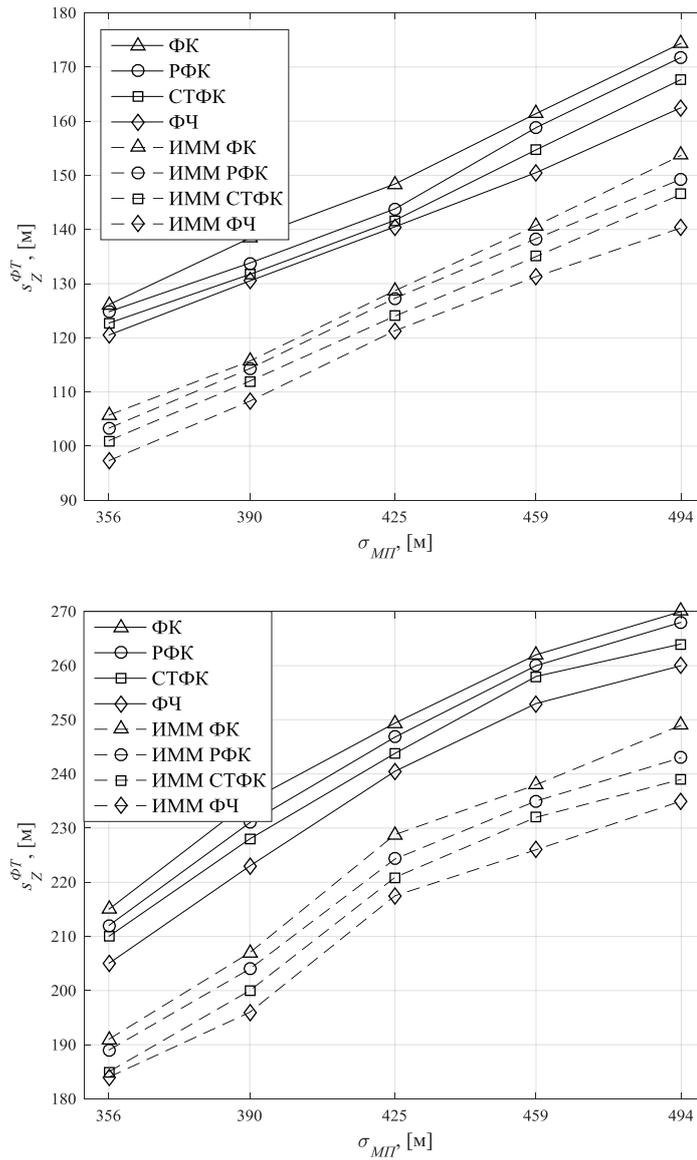


Рисунок 4.4 – Зависимости СКО оценки положения ВС в нормальном направлении $s_Z^{\Phi T}$ от СКО оценки местоположения σ_{MPI} для первого (РПД) и второго (СР) сценариев

Зависимости, приведенные на рисунках 4.5 и 4.6 свидетельствуют о том, что ошибки оценки путевой скорости ВС $b_V^{\Phi T}$ и $s_V^{\Phi T}$ монотонно возрастают с ростом СКО оценки местоположения ВС σ_{MPI} для рассматриваемых сценариев. При $\sigma_{MPI} \leq 425$ м ($R \leq 300$ км) значение $s_V^{\Phi T}$ не превышают предельной величины 2 м/с, указанной в стандарте [74] для РПД.

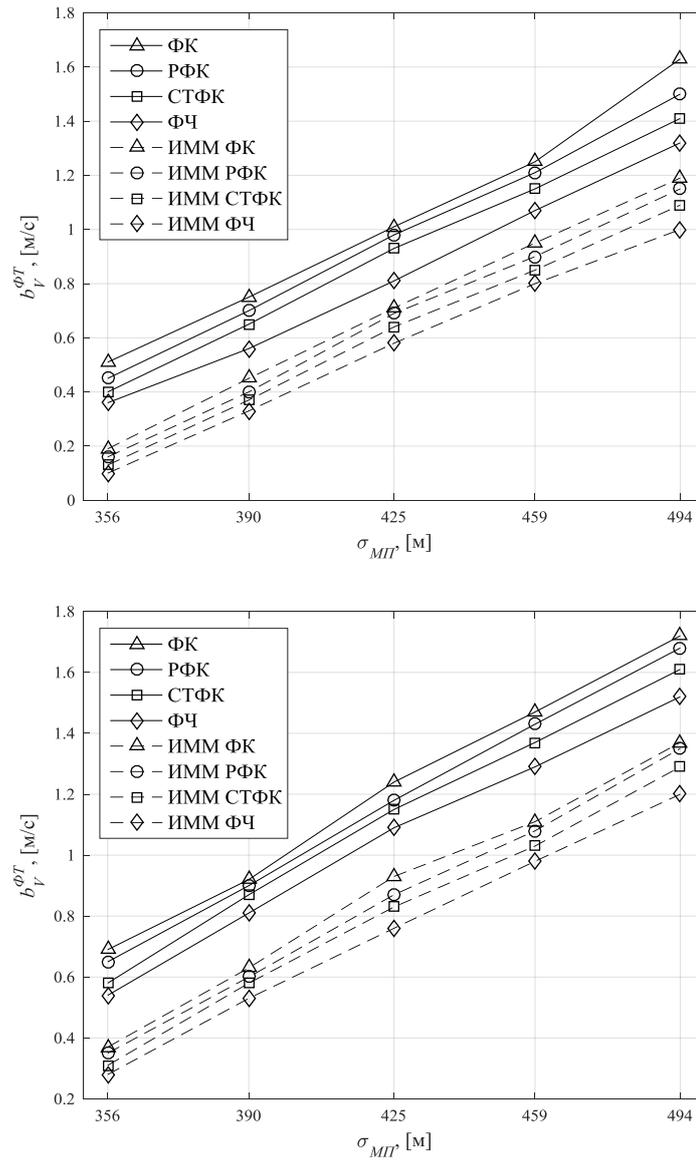


Рисунок 4.5 – Зависимости смещения оценки путевой скорости $b_V^{\Phi T}$ от СКО оценки местоположения $\sigma_{МП}$ для первого (РПД) и второго (СР) сценариев

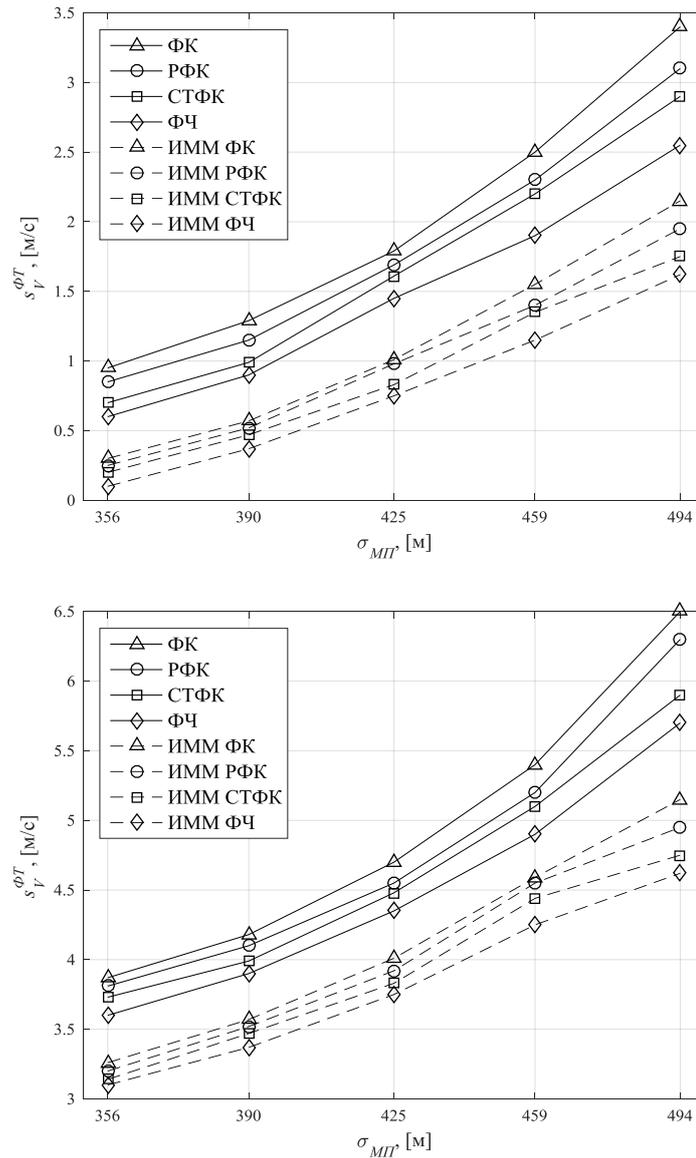


Рисунок 4.6 – Зависимости смещения оценки путевой скорости $s_V^{\Phi T}$ от СКО оценки местоположения $\sigma_{МП}$ для первого (РПД) и второго (СР) сценариев

Из рисунков 4.7, 4.8 и 4.9 видно, что смещения и СКО оценок нормального ускорения $b_{AZ}^{\Phi T}$ и $s_{AZ}^{\Phi T}$ и курса ВС $b_{\Phi}^{\Phi T}$ и $s_{\Phi}^{\Phi T}$ также монотонно увеличиваются с ростом СКО оценки местоположения ВС $\sigma_{МП}$ для рассматриваемых сценариев. Смещения оценок по-прежнему значительно меньше соответствующих СКО. Нормальная составляющая ускорения определяет перегрузку, которую ВС испытывает при маневре. Стандарт [74] не предъявляет требований к точности оценивания ускорения. Однако, в АС УВД наличие численной оценки

нормальной составляющей ускорения важно для обеспечения возможности расчета времени окончания маневрирования ВС в горизонтальной плоскости. При $\sigma_{МП} \leq 425 \text{ м}$ ($R \leq 300 \text{ км}$) значение $s_{\Phi}^{\Phi T}$ не превышает предельной величины 0.7° , указанной в стандарте для РПД. Оценка курса наряду с оценкой путевой скорости обеспечивают возможности для краткосрочного прогнозирования положения ВС, что крайне важно для обеспечения безопасности полетов.

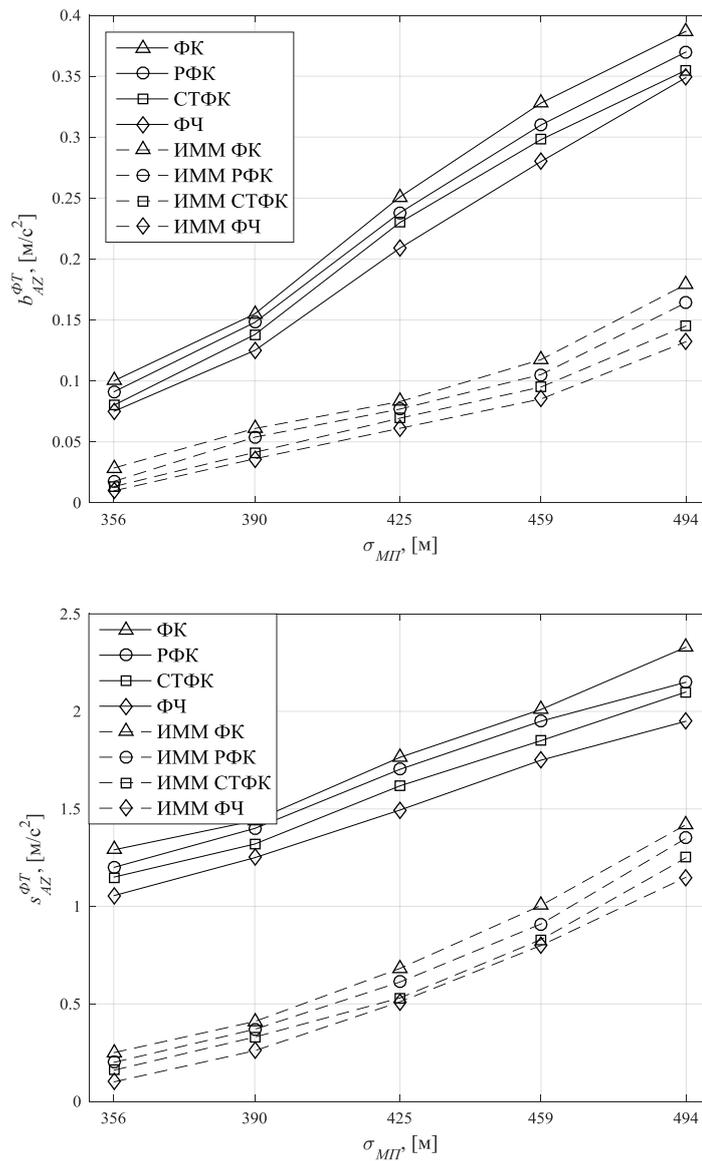


Рисунок 4.7 – Зависимости смещения $b_{AZ}^{\Phi T}$ и СКО $s_{AZ}^{\Phi T}$ оценки нормальной составляющей ускорения от СКО оценки местоположения $\sigma_{МП}$ для второго сценария (СР)

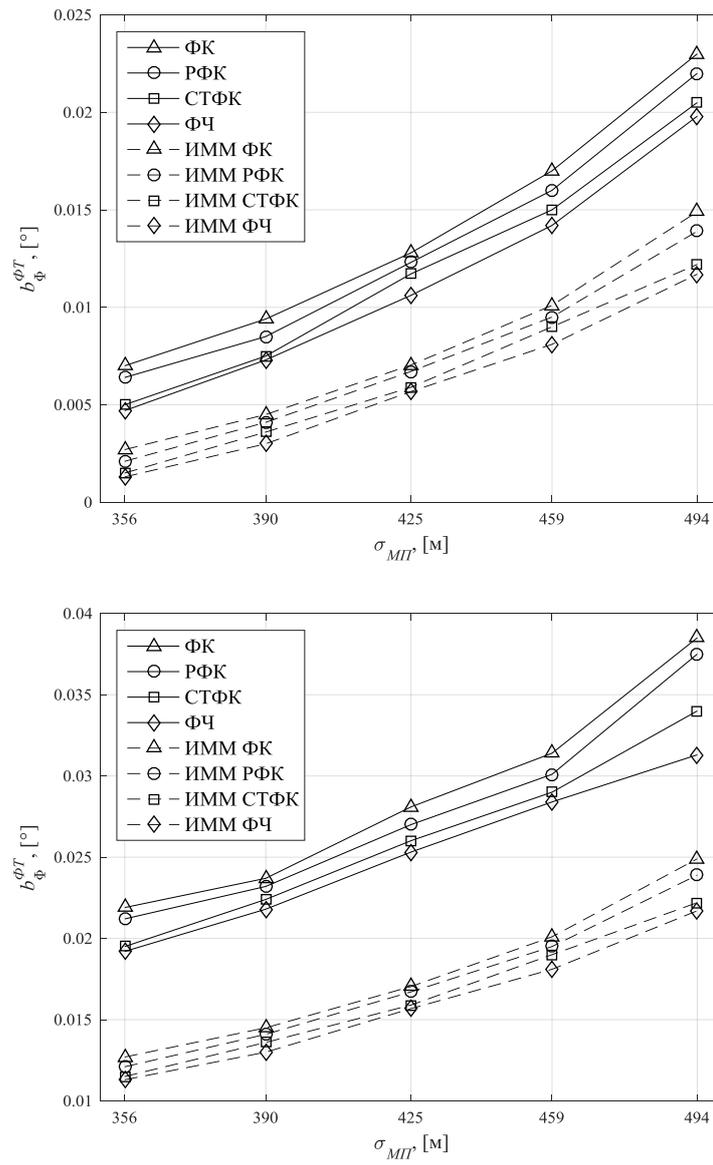


Рисунок 4.8 – Зависимости смещения оценки курса $b_{\Phi}^{\Phi T}$ от СКО оценки местоположения $\sigma_{МП}$ для первого (РПД) и второго (СР) сценариев

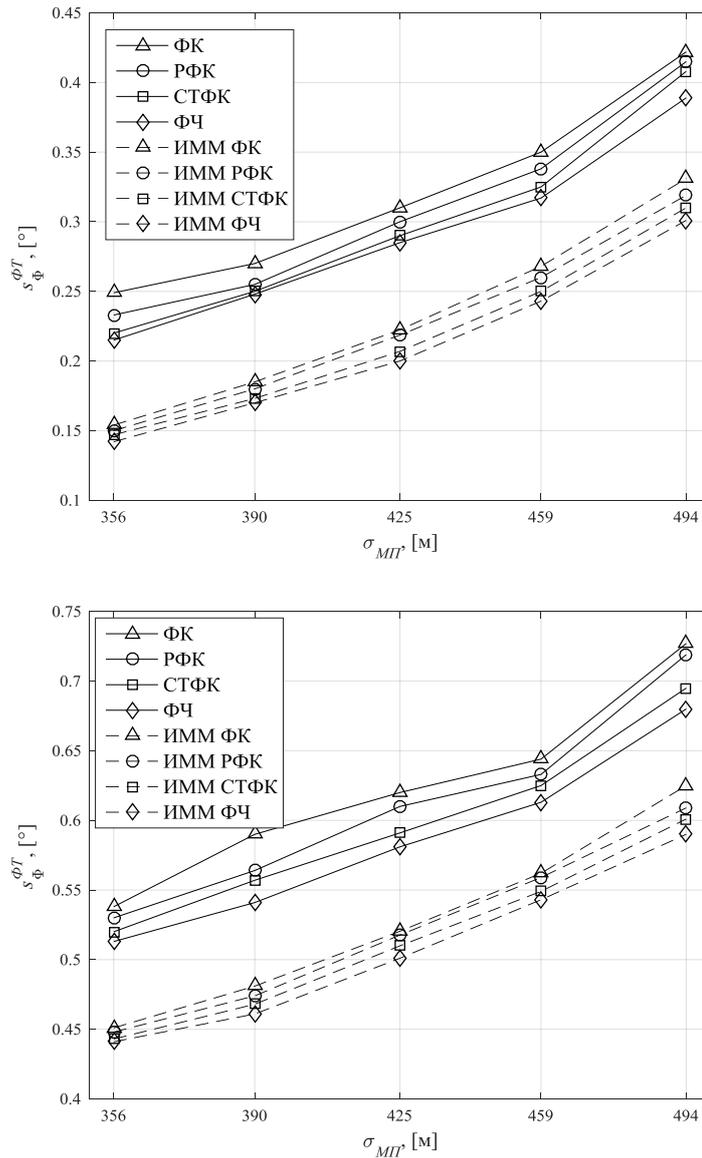


Рисунок 4.9 – Зависимости СКО оценки курса $s_{\Phi}^{\Phi T}$ от СКО оценки местоположения $\sigma_{МП}$ для первого (РПД) и второго (СР) сценариев

Из рисунков 4.1 – 4.9 видно, что наиболее точные оценки параметров траектории получаются на выходе ФЧ. Отсюда следует, что аппроксимация распределения случайного вектора параметров (4.1) достаточно большим набором частиц (в данном случае 1000) дает результат в наибольшей степени близкий к оптимальной байесовской оценке (4.3) – (4.4). По существу, ФЧ реализует непараметрическое оценивание апостериорной плотности распределения вектора состояния и, кроме того, позволяет работать с нелинейной моделью наблюдения

(4.2). СТФК также позволяет работать с нелинейной моделью наблюдения и реализует гауссовскую аппроксимацию распределения случайного вектора параметров на основе сигма-точечного преобразования (англ. *Unscented Transform*) [102, 103]. СТФК незначительно проигрывает ФЧ, при этом вычислительная сложность фильтра на порядки ниже, чем у ФЧ. РФК также реализует гауссовскую аппроксимацию ошибок оценивания вектора состояния. Однако ковариационная матрица вектора состояния фильтра является лишь удобной аппроксимацией при построении фильтра, а не истинной матрицей ковариаций оценок. Поэтому ошибка оценки у РФК больше по сравнению с другими нелинейными фильтрами [26, 27, 112, 114]. Кроме того, в некоторых ситуациях процедура линеаризации в РФК имеет высокую погрешность. Это приводит к несостоятельности оценок и нестабильности фильтра [9]. Обычный ФК, как известно, оптимален лишь при линейной модели наблюдения (4.2), что несправедливо при выполнении преобразования измеренных полярных координат ВС в декартовы.

Анализ зависимостей, приведенных на рисунках 4.1 – 4.9, приводит к двум важным выводам: во-первых, качество оценивания параметров движения ВС критично к модели движения, с которой согласован фильтр, поэтому наилучшие результаты оценивания получились у ММА; во-вторых, фильтры, использующие более сложные подходы к аппроксимации распределения вектора оцениваемых параметров дают лучшие результаты.

В следующем сценарии (см. рисунки 4.10, 4.11), который разработан для апробации второго набора показателей качества, моделируется полет ВС с переходом от РПД к СР. Для данного сценария анализируются те же две группы фильтров, которые были использованы выше. Обычно процесс смены типов движения достаточно точно описывается дискретным полумарковским процессом с конечным числом состояний. Поэтому наиболее точные оценки параметров движения должны получаться при использовании ММА с подходящим набором

моделей (в данном случае РПД и СР). В качестве универсального алгоритма фильтрации используется одномодельный фильтр, рассчитанный на РУД.

После смены типа движения в случайный процесс, характеризующий ошибку оценивания параметров движения ВС, добавляется переходный процесс в фильтре. Вследствие этого ошибка резко возрастает и перестает быть стационарной. Требуется время для того, чтобы фильтр адаптировался к новому типу движения, а ошибка оценивания достигла уровня, наблюдаемого для установившегося режима при новом типе движения.

Зависимости, приведенные на рисунках 4.10 и 4.11, свидетельствуют о том, что значения $m_X^{\Phi T}$ и $m_Z^{\Phi T}$ убывают с ростом вероятности правильного обнаружения сигнала D . Эта закономерность свидетельствует о том, что смена типа движения ВС отрабатывается более точно с ростом качества первичной обработки сигналов РЛС, что связано с увеличением частоты прихода истинных отметок и лучшей экстраполяцией трека. Зависимости, соответствующие разным алгоритмам одной группы сближаются с ростом D , что свидетельствует об уменьшении их различий.

Графики на рисунках свидетельствуют о том, что при $D \geq 0,9$ значения $m_X^{\Phi T}$ и $m_Z^{\Phi T}$ не превышают предельных величин, указанных в стандарте [74]: 340 м и 530 м для перехода от РПД к СР. Кривые, соответствующие ММА, проходят ниже аналогичных для одномодельных фильтров. Это свидетельствует о большем весе парциальных оценок, которые получаются в фильтрах, согласованных с отдельными участками реальной траектории ВС, в суммарной оценке на выходе ММА.

Зависимости, приведенные на рисунке 4.11, свидетельствуют о том, что ПЗО оценки путевой скорости ВС $m_V^{\Phi T}$, монотонно убывают с ростом вероятности правильного обнаружения сигнала для рассматриваемых сценариев. При $D \geq 0,9$ значение $m_V^{\Phi T}$ не превышает предельной величины 9 м/с, указанной в стандарте [74] для перехода от РПД к СР. Характер зависимостей ПЗО оценки

курса ВС $m_{\Phi}^{\Phi T}$ от D , свидетельствует об аналогичном поведении этого показателя. При этом для большой вероятности правильного обнаружения ($D \geq 0.9$) значение $m_{\Phi}^{\Phi T}$ не превышает предельной величины 11° , указанной в стандарте [74] для перехода от РПД к СР.

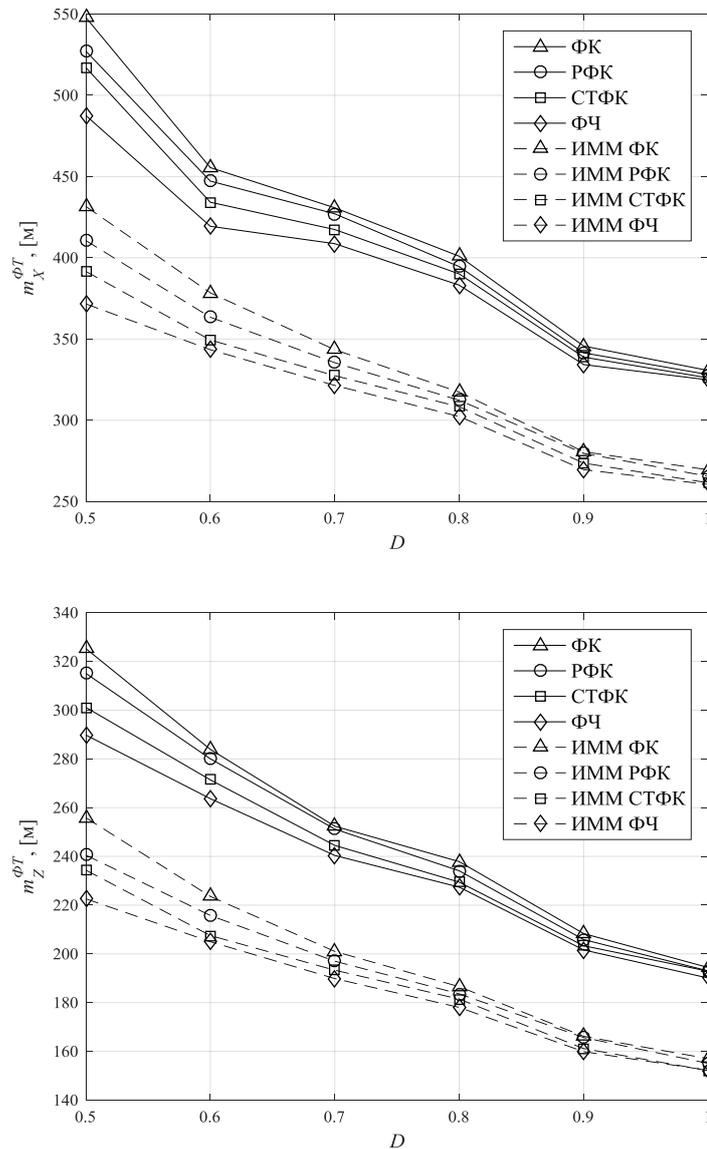


Рисунок 4.10 – Зависимости ПЗО оценки положения ВС в тангенциальном $m_X^{\Phi T}$ и нормальном $m_Z^{\Phi T}$ направлениях от вероятности правильного обнаружения D для третьего сценария (РПД-СР)

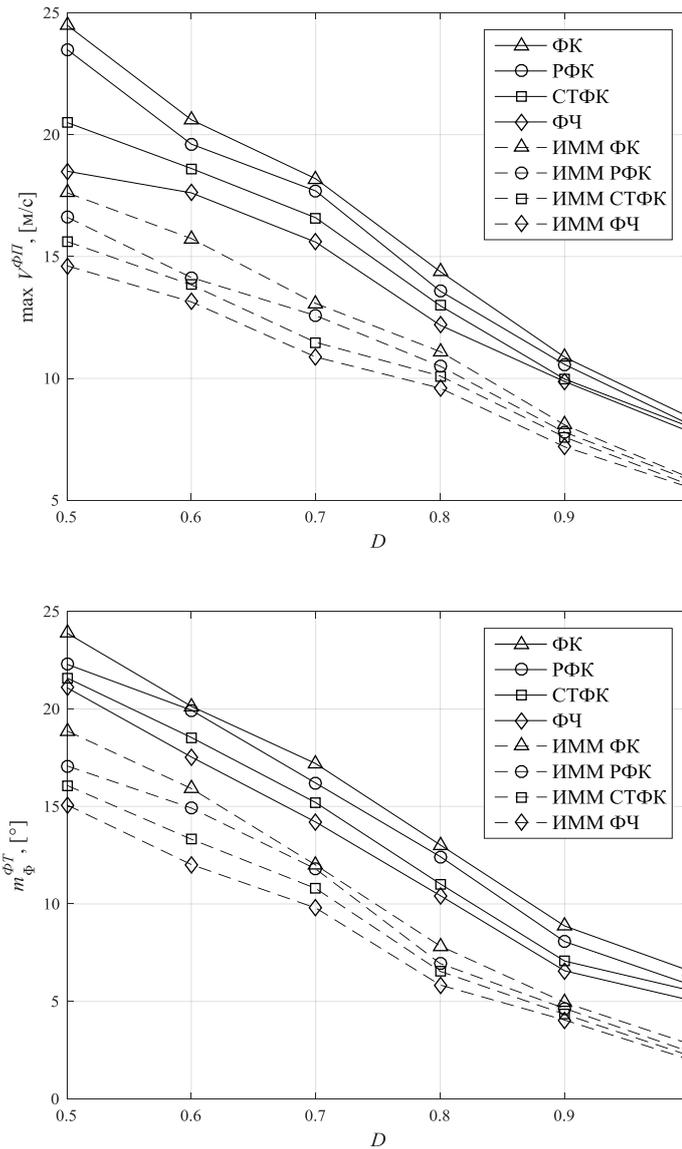


Рисунок 4.11 – Зависимости ПЗО оценки путевой скорости ВС $m_V^{\Phi\Gamma}$ и курса ВС $m_{\Phi}^{\Phi\Gamma}$ от вероятности правильного обнаружения D для третьего сценария (РПД-СР)

Из таблиц 4.1 – 4.4 видно, что значения ВПП $\tau_X^{\Phi\Gamma}$, $\tau_Z^{\Phi\Gamma}$, $\tau_V^{\Phi\Gamma}$, $\tau_{\Phi}^{\Phi\Gamma}$ убывают кратно периоду обзора РЛС (12 с) с ростом вероятности правильного обнаружения сигнала D . Значение D определяет частоту прихода истинных отметок. Как уже отмечалось, после смены типа движения требуется некоторое время, чтобы ошибки оценки вектора параметров движения достигли установившихся значений. Из анализа таблиц следует, что большая частота

прихода отметок позволяет быстрее достичь установившегося режима оценивания.

Следует отметить, что ВПП обратно пропорциональны величине полосы пропускания фильтров. Одномодельные фильтры имеют полосу пропускания шире многомодельных, поэтому и значения ВПП у них меньше. При $D \geq 0.9$ значения $\tau_X^{\Phi T}$, $\tau_Z^{\Phi T}$, $\tau_V^{\Phi T}$, $\tau_\Phi^{\Phi T}$ не превышают 50 с, что соответствует предельным величинам, указанным в стандарте [74].

Таблица 4.1 – ВПП ошибки оценки положения ВС в тангенциальном направлении $\tau_X^{\Phi T}$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D для третьего сценария (РПД-СР).

Фильтр	Вероятность правильного обнаружения сигнала D					
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
ФК	60	48	48	36	36	24
РФК	60	48	48	36	36	24
СТФК	60	48	48	36	36	24
ФЧ	48	48	48	36	24	24
ИММ ФК	72	60	48	48	36	36
ИММ РФК	72	60	48	48	36	36
ИММ СТФК	72	60	48	48	36	36
ИММ ФЧ	60	48	48	36	36	24

Таблица 4.2 – ВПП ошибки оценки положения ВС в нормальном направлении $\tau_Z^{\Phi T}$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D для третьего сценария (РПД-СР).

Фильтр	Вероятность правильного обнаружения сигнала D					
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
ФК	120	108	84	72	60	24
РФК	120	108	84	72	60	24
СТФК	120	108	84	72	60	24
ФЧ	132	108	60	48	36	24
ИММ ФК	132	108	96	84	60	36
ИММ РФК	132	108	96	84	60	36
ИММ СТФК	132	108	96	84	60	36
ИММ ФЧ	132	108	96	84	60	36

Таблица 4.3 – ВПП ошибки оценки путевой скорости ВС $\tau_V^{\Phi T}$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D для третьего сценария (РПД-СР).

Фильтр	Вероятность правильного обнаружения сигнала D					
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
ФК	60	48	48	36	24	12
РФК	60	48	48	36	24	24
СТФК	60	48	48	36	24	24
ФЧ	48	48	48	36	24	24
ИММ ФК	48	48	48	36	24	12
ИММ РФК	48	48	48	36	24	12
ИММ СТФК	48	48	48	36	24	12
ИММ ФЧ	48	48	48	36	24	12

Таблица 4.4 – ВПП ошибки оценки курса ВС $\tau_{\Phi}^{\Phi T}$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D для третьего сценария (РПД-СР).

Фильтр	Вероятность правильного обнаружения сигнала D					
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
ФК	108	96	60	48	36	24
РФК	108	96	60	48	36	24
СТФК	108	96	60	48	36	24
ФЧ	108	96	48	36	24	24
ИММ ФК	132	96	48	36	24	24
ИММ РФК	132	96	48	36	24	24
ИММ СТФК	96	48	48	24	24	12
ИММ ФЧ	96	48	48	24	24	24

Проделанный анализ алгоритмов фильтрации и экстраполяции трека по выбранным показателям выявил различия между линейным алгоритмом фильтрации Калмана и его нелинейными модификациями, а также преимущества использования адаптивного подхода (на примере ММА). В среднем алгоритмы, реализующие адаптивный подход, имеют показатели качества фильтрации выше, чем алгоритмы, согласованные с одной моделью движения ВС. Поэтому применение ММА может дать значительный эффект для повышения качества СТО. Общие тенденции изменения эффективности алгоритмов в зависимости от СКО ошибки оценки местоположения ВС $\sigma_{МП}$ и вероятности правильного

обнаружения D , которые характеризуют качество первичной обработки сигналов в РЛС, позволяют утверждать, что для качественной траекторной обработки необходимо, чтобы $D \geq 0,9$ при вероятности ложной тревоги $F \leq 10^{-6}$, а СКО $\sigma_{МП}$ соответствовало нормативам стандарта [74].

4.4 Выводы

В главе предложен набор показателей качества фильтрации и экстраполяции треков в СТО. Разработанный набор показателей позволяет произвести полноценный и достоверный сравнительный анализ алгоритмов с точки зрения точности оценивания параметров движения ВС как на участках без изменения типа движения, так и на участках со сменой типа движения. Выбранные показатели имеют ясный физический смысл.

Предложенные показатели и методика их оценивания были использованы для получения экспериментальных зависимостей, характеризующих качество работы алгоритмов фильтрации треков на примере восьми алгоритмов: ФК, РФК, СТФК, ФЧ, ИММ ФК, ИММ РФК, ИММ СТФК и ИММ ФЧ. Результаты проведенного в работе анализа свидетельствуют о том, что наиболее значимыми показателями при оценке качества фильтрации трека на участках без смены типа движения являются: смещение $b_X^{\Phi T}$, $b_Z^{\Phi T}$ 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; на участках со сменой типа движения – 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 $m_\Phi^{\Phi T}$. Данный набор показателей позволяет произвести объективный сравнительный анализ различных алгоритмов фильтрации и осуществить выбор алгоритма, исходя из предъявляемых к СТО требований.

5 ОЦЕНКА КАЧЕСТВА АЛГОРИТМОВ ТРАЕКТОРНОЙ ОБРАБОТКИ В МНОГОПОЗИЦИОННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

5.1 Схемы совместной обработки данных

В АС УВД для повышения качества сопровождения ВС в зоне ответственности используется сеть пространственно-распределенных РЛС. Данные наблюдения, полученные несколькими РЛС в составе сети, могут содержать информацию об одних и тех же объектах. Эта избыточность используется для повышения качества работы СТО в составе АС УВД. Таким образом, при создании систем СТО актуальными являются задачи оптимизации и оценки качества совместной обработки данных.

Совместная обработка данных (СОД) – процесс объединения отметок и треков от разных РЛС с целью формирования единого трека для каждого наблюдаемого объекта. Назовем монотреком трек, полученный в результате траекторной обработки в одной отдельно взятой РЛС, и объединенным треком – трек, синтезированный в результате совместной обработки данных нескольких РЛС. Объединенные треки представляют собой конечный продукт работы СТО и образуют поток информации, поступающий заинтересованным потребителям – диспетчерам и другим сервисам АС УВД. Очевидно, что качество решения задачи СОД во многом определяет эффективность работы всей СТО.

Модель совместной обработки данных (англ. *Data Fusion*) была разработана в середине 1980-х [115] группой при Объединенном комитете начальников лабораторий (*Joint Directors of Laboratories (JDL) Data Fusion Group*) Министерства обороны США и первоначально была ориентирована на военные приложения. Концепция была опубликована в 1991 году в [116] и получила название *JDL Data Fusion Model*. В 1998 [117] и 2004 [118] году ее положения пересматривались и расширялись с целью переориентации на гражданские области применения [119]. *JDL*-модель представляет собой функциональную модель процессов СОД, в которой принято выделять следующие компоненты (см. рисунок 5.1): источники и базы данных (БД), человеко-машинный интерфейс

(ЧМИ), систему обработки данных и систему управления БД (СУБД). Источники данных могут иметь одинаковую или различную физическую природу. БД предназначены для хранения входной и выходной информации. ЧМИ позволяет осуществлять двухсторонний обмен информацией между вычислительной системой и операторами. СУБД предназначена для эффективного управления хранимыми данными.

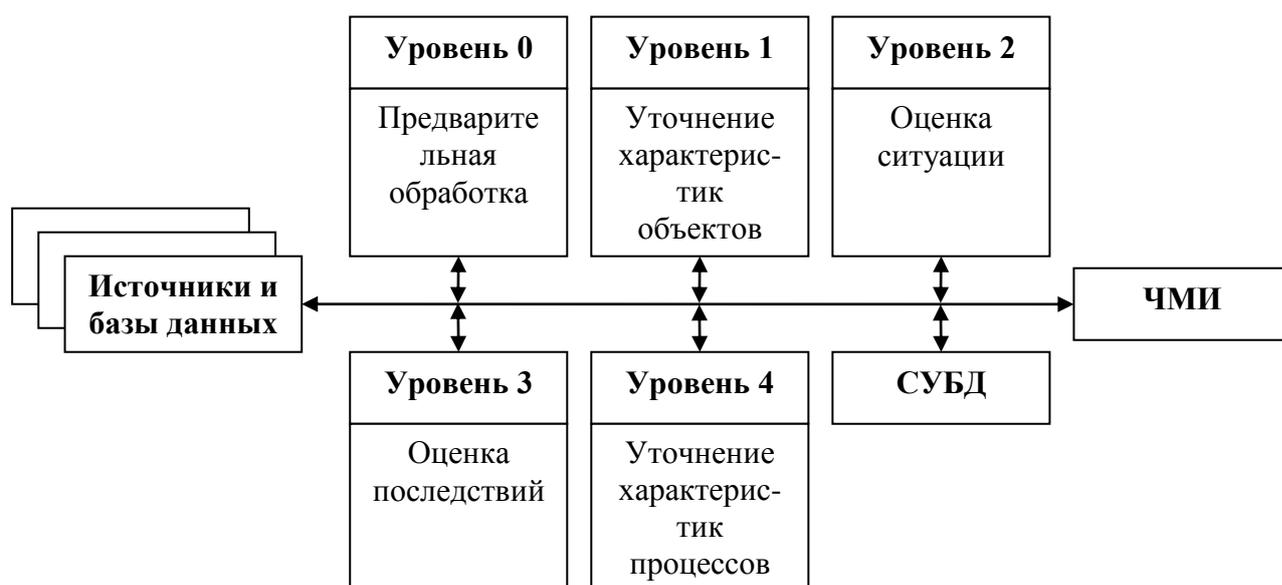


Рисунок 5.1 – Модель совместной обработки данных *JDL*

В системе обработки данных принято выделять пять иерархических уровней:

- (1) **Уровень 0 (*Source Preprocessing*)** – этап предварительной обработки информации. На данном этапе происходит уменьшение количества данных при сохранении полезной информации для процессов более высокого уровня. Применительно к радиолокационным системам это уменьшение происходит за счет обнаружения и оценки параметров сигналов датчиков. На этом уровне не предполагается формирование решений о наличии истинных объектов в наблюдаемом пространстве.

- (2) Уровень 1 (*Object Refinement*) – этап уточнения характеристик объектов. Процедуры этого уровня включают в себя приведение получаемой от разных источников информации к единому пространственно-временному масштабу, обнаружение и оценку параметров состояния наблюдаемых объектов, устранение ложных объектов, а также использование методов ассоциирования, корреляции, кластеризации или группировки данных для образования единых информационных структур, соответствующих объектам наблюдения.
- (3) Уровень 2 (*Situation Assessment*) – этап оценки ситуации. Целью этапа является определение возможного взаимодействия выделенных на предыдущем этапе объектов при заданном множестве наблюдаемых явлений и данных.
- (4) Уровень 3 (*Impact Assessment*) – этап оценки последствий. На этапе происходит оценка возможных исходов выявленной на Уровне 2 активности для определения возможных рисков и угроз, а также прогноз возможных последствий этой активности;
- (5) Уровень 4 (*Process Refinement*) – процесс уточнения. Этап является заключительным и предполагает осуществление эффективного управления источниками данных и имеющимися ресурсами для достижения поставленных задач с учетом их приоритетов.

Рассмотренные уровни отражают логическое разделение задач систем СОД, которые, как правило, решаются различными методами, отличаются наборами входных и выходных данных, а также степенью взаимодействия с другими уровнями системы. *JDL*-модель часто используется как каноническая модель декомпозиции функциональности систем СОД.

В современных АС УВД с различной степенью детализацией могут быть реализованы все уровни *JDL*-модели [118, 119, 120, 121, 122]. В свою очередь, СТО является частью АС УВД и реализует СОД в рамках функциональности первого уровня: уточнение характеристик объектов.

Методы СОД в СТО можно классифицировать двумя способами: либо по уровню объединения данных (объединение на уровне отметок, треков, смеси отметок и треков), либо по методу объединения (метод выбора, взвешенное усреднение, метод переменного времени обновления).

Рассмотрим распространенные варианты архитектур СТО, реализующих СОД.

5.1.1 Система траекторной обработки с объединением на уровне отметок

Архитектура СТО, приведенная на рисунке 5.2, реализует объединение на уровне отметок РЛС. Отметки от каждой РЛС напрямую поступают в центр объединения (ЦО), где обрабатываются в порядке поступления. ЦО должен размещаться на одной вычислительной машине (ВМ).

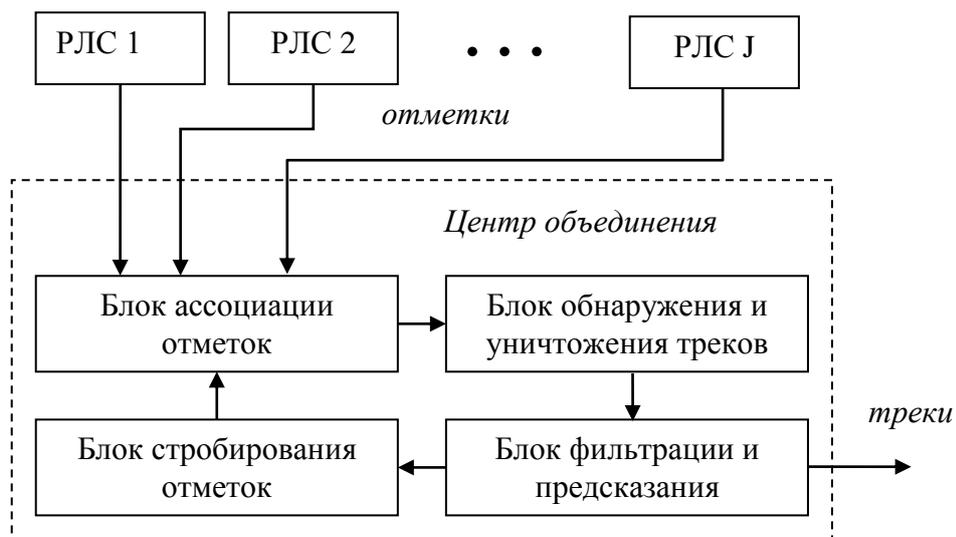


Рисунок 5.2 – Функциональная схема СТО с объединением на уровне отметок

В случае асинхронного прихода отметок алгоритм работы центра траекторной обработки аналогичен алгоритму работы СТО для одной РЛС. Достоинствами данной архитектуры являются простота организации и низкие затраты на оборудование. При таком подходе достигается высокая скорость реакции СТО на поступление очередной отметки. Однако, высокий темп поступления отметок не позволяет использовать в СТО глобальные стратегии

ассоциации измерений, и очевидной платой за скорость реакции является необходимость применения локальных стратегий с присущими им недостатками [123, 124, 125].

5.1.2 Система траекторной обработки с объединением на уровне монотреков

На рисунке 5.3 приведена архитектура СТО, которая также реализует объединение на уровне монотреков, которые являются результатом работы локальных СТО каждой РЛС. Монотреки от локальных СТО поступают в блок ассоциации, где оценивается их близость к объединенным трекам, существующим на данный момент в ЦО, где выносятся решения об их ассоциации. Ассоциированные монотреки используются для фильтрации и экстраполяции (предсказания) объединенных треков.

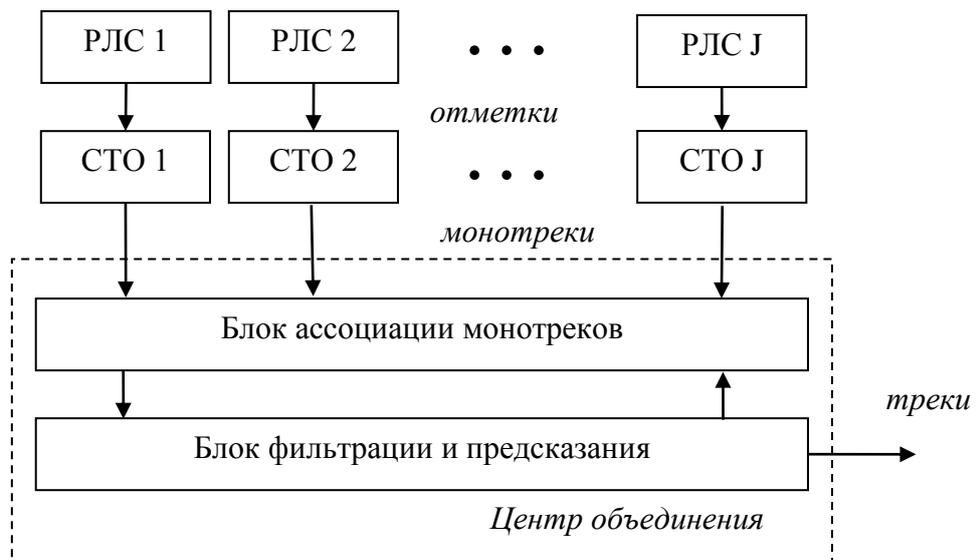


Рисунок 5.3 – Функциональная схема СТО с объединением на уровне монотреков

Преимуществом данной схемы по сравнению с предыдущей является лучшее качество ассоциации, поскольку схема позволяет использовать алгоритмы глобальной ассоциации [123] при меньших ошибках оценки положения сопровождаемых ВС. Однако, поскольку объединению подлежат данные, уже прошедшие этап фильтрации в локальных СТО, серьезной проблемой при

реализации рассмотренной схемы является создание фильтра объединения монотреков.

5.1.3 Система траекторной обработки с гибридным объединением

Архитектура, приведенная на рисунке 5.4, реализует гибридное объединение, т.е. совместное объединение отметок и треков отдельных РЛС. Для этого в ЦО существуют два блока ассоциации. Блок ассоциации монотреков выполняет те же функции, что и в СТО с объединением на уровне монотреков (рисунок 5.3). Блок ассоциации отметок выделяет потоки отметок, порожденные одними и теми же ВС. Ассоциированные таким образом отметки поступают в блок фильтрации и предсказания для формирования объединенных треков.

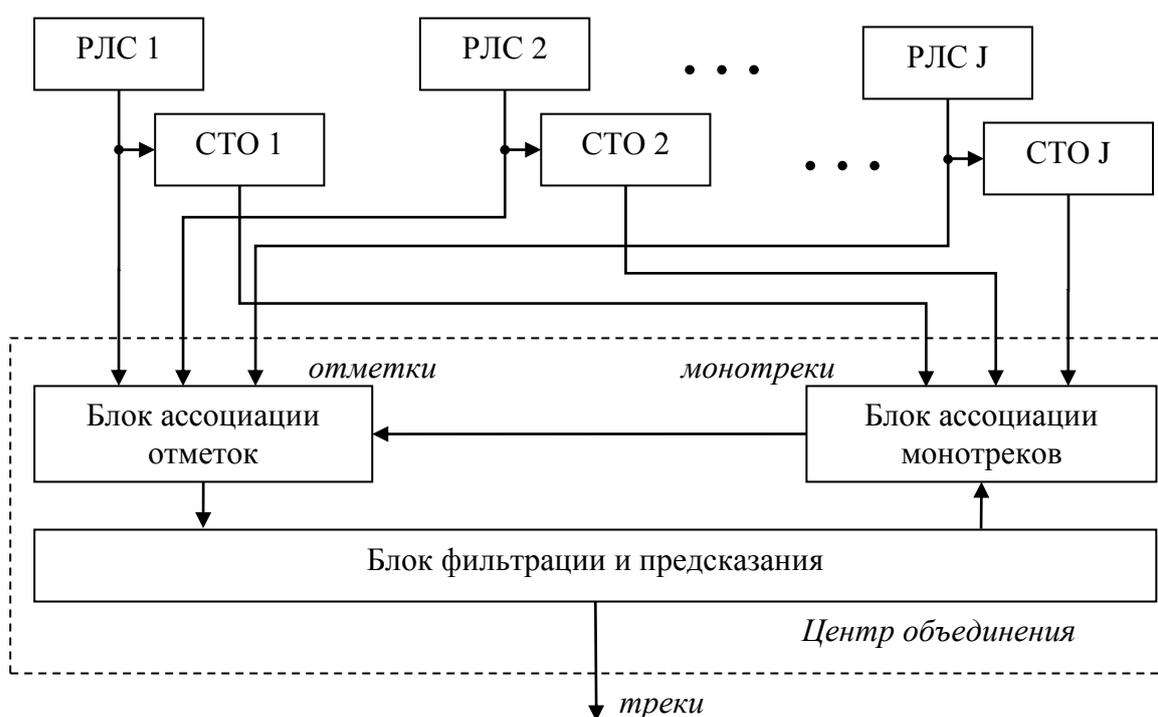


Рисунок 5.4 – Функциональная схема СТО с гибридным объединением

Данная схема является, безусловно, более сложной при реализации, чем две предыдущие. Однако она позволяет сочетать их преимущества: простоту ассоциации данных, поскольку эта часть обработки реализуется при использовании монотреков, и легкость построения фильтра объединения, в

качестве которого может быть использован фильтр Калмана или одна из его модификаций [9, 10].

5.2. Методы объединения данных в системе траекторной обработки

5.2.1 Методы селекции

Методы селекции, также известные как «мозаичные» методы, появились на заре развития радиолокационной техники [9]. Общая идея методов заключается в том, что воздушное пространство разбито на зоны ответственности каждой РЛС. Такое разбиение определяет приоритет выбора конкретной РЛС в качестве источника информации в зависимости от текущего географического положения ВС или текущих ошибок оценки траекторных параметров различных РЛС.

Метод селекции из множества отметок

Данный метод заключается в селекции на уровне отметок, т.е. на каждом периоде обзора отбираются отметки только от одной РЛС. Эти отметки используются для обновления объединенного трека.

Метод селекции из множества треков

Данный метод заключается в селекции на уровне треков. Различные РЛС ведут траекторную обработку независимо. Для формирования объединенного трека в текущий момент времени выбирается только один из монотреков (локальных треков). Очевидным преимуществом методов селекции является простота реализации и низкие требования к вычислительным ресурсам. Однако, данные методы не используют всю доступную информацию о воздушной обстановке, что делает методы селекции малопривлекательными.

5.2.2 Методы взвешивания/усреднения

Метод усреднения по множеству отметок

На каждом периоде обзора объединенный трек обновляется взвешенной суммой отметок различных РЛС. На момент времени k объединенный вектор измерения ВС определяется как:

$$\mathbf{z}_k^{об} = \frac{\sum_{j=1}^J w_j \mathbf{z}_k^j}{\sum_{j=1}^J w_j}, \quad (5.1)$$

где \mathbf{z}_k^j – вектор измерения (4.1) j -й РЛС, w_j – вес j -й РЛС, J – число РЛС. Метод предполагает, что отметки, участвующие в объединении, относятся к одному моменту времени. Такое условие требует синхронизации всех РЛС, что является серьезным практическим ограничением.

Метод усреднения по множеству треков

Данный метод предполагает экстраполяцию оценок положения от всех используемых в объединенном треке источников на один момент времени, с последующим усреднением на основе выбранной системы весов источников по формуле аналогичной (5.1).

Методы усреднения не требовательны к ресурсам и просты в реализации. В отличие от методов селекции они используют всю доступную информацию о воздушной обстановке. Однако, методы селекции и взвешивания редко применяются в современных многопозиционных РЛС, поскольку имеют существенный недостаток. Недостаток заключается в скачкообразном изменении оценки положения сопровождаемого ВС. Скачки происходят при выходе ВС из зоны обзора РЛС из-за сброса с сопровождения соответствующего монотрека.

5.2.3 Метод переменного времени обновления

Главный недостаток перечисленных методов заключается в том, что они нерационально используют доступную на текущий момент времени информацию. Это приводит к тому, что объединение данных не является оптимальным [9].

Самым перспективным в плане эффективности является метод переменного времени обновления по множеству отметок [119]. Данный метод состоит в использовании всех отметок от всех РЛС для обновления общей траектории без предварительной обработки. Обновление производится мгновенно после получения отметок от конкретной РЛС. Данный метод является наиболее

эффективным, однако он гораздо более сложен в реализации ввиду необходимости асинхронной обработки данных. Метод переменного времени обновления хорошо согласуется с асинхронной природой появления отметок РЛС. Как правило, объединение асинхронной траекторной информации производится с помощью ФК.

Для решения поставленных во введении задач используем следующие схемы СОД: СТО с объединением на уровне отметок (СОД-1), СТО с объединением на уровне монотреков (СОД-2) и СТО с гибридным объединением (СОД-3). Все СТО реализуют метод переменного времени обновления.

5.3 Выбор показателей, характеризующих качество траекторной обработки в многопозиционных радиолокационных системах

Из рисунков 5.1 – 5.3 видно, что СОД организована на базе блоков однопозиционной СТО, приведенной на рисунке 1.1. Собственно, основная задача СОД заключается в улучшении качества траекторной информации по сравнению со случаем единственного источника данных. Качество процесса СОД следует оценивать, как на основе показателей характерных исключительно для данного процесса, так и наиболее значимых показателей качества обнаружения траекторий, ассоциации измерений, фильтрации и экстраполяции треков, поскольку соответствующие алгоритмы используются и в СОД. Так, например, в [69] в качестве показателя качества СОД вводится вероятность объединения данных от различных РЛС. В [115, 116] качество работы многопозиционных РЛК характеризуется показателями из числа уже рассмотренных в предыдущих главах. В стандарте [74] не вводятся специальных показателей качества для анализа алгоритмов СОД. Однако, к качеству объединенного трека предъявляются более жесткие требования.

В настоящей главе предлагается система, которая сформирована на основе наиболее важных показателей из числа отмеченных в предыдущих главах. Эта система дополнена рядом показателей, характеризующих качество собственно процесса СОД. Надстрочный индекс «СОД» указывает на принадлежность

соответствующего показателя к блоку объединения. Предлагаемая система включает в себя пять групп показателей.

1. Показатели качества обнаружения треков:

1.1 Вероятность обнаружения истинного трека в течение заданного времени

$$P_{ИТ}^{СОД/ОТ} (0 \leq t \leq T_{обн});$$

1.2 Среднее время обнаружения истинного трека $\tau_{обн}^{СОД/ОТ}$;

1.3 Среднее количество ложных треков $\lambda_{ЛТ}^{СОД/ОТ}$.

2. Показатели качества ассоциации измерений:

2.1 Вероятность правильной ассоциации истинной отметки $P_{ИТ}^{СОД/АИ}$;

2.2 Вероятность потери истинного трека $L_{ИТ}^{СОД/АИ}$;

2.3 Средняя длительность истинного трека $\tau_{ИТ}^{СОД/АИ}$;

2.4 Частота появления ложных треков $\nu_{ЛТ}^{СОД/АИ}$;

2.5 Средняя длительность ложного трека $\tau_{ЛТ}^{СОД/АИ}$.

3. Показатели качества фильтрации и экстраполяции параметров треков:

3.1 Смещения $b_X^{СОД/ФТ}$, $b_Z^{СОД/ФТ}$ и СКО $s_X^{СОД/ФТ}$, $s_Z^{СОД/ФТ}$ оценки положения ВС в тангенциальном (X) и нормальном (Z) к вектору скорости направлениях;

3.2 Смещение $b_V^{СОД/ФТ}$ и СКО $s_V^{СОД/ФТ}$ оценки путевой скорости;

3.3 Смещение $b_\Phi^{СОД/ФТ}$ и СКО $s_\Phi^{СОД/ФТ}$ оценки курса;

4. Показатели качества совместной обработки данных:

4.1 Вероятность правильного объединения данных $P_{ИТ}^{СОД}$;

4.2 Вероятность правильного обнаружения истинной траектории $E_{ИТ}^{СОД}$.

4.3 Вероятность мультипликации истинной траектории $M_{ИТ}^{СОД}$;

5. Показатели улучшения качества объединенного трека по сравнению с монотреком:

- 5.1 Коэффициент увеличения вероятности обнаружения истинного трека $R^{СОД/ОТ}(P_{ИТ})$;
- 5.2 Коэффициент уменьшения вероятности потери истинного трека $R^{СОД/ОТ}(L_{ИТ})$;
- 5.3 Коэффициент уменьшения среднего времени обнаружения истинного трека $R^{СОД/ОТ}(\tau_{обн})$;
- 5.4 Коэффициент уменьшения среднего количества ложных треков $R^{СОД/ОТ}(\lambda_{ЛТ})$;
- 5.5 Коэффициент увеличения вероятности правильной ассоциации истинных отметок $R^{СОД/АИ}(P_{ИТ})$;
- 5.6 Коэффициент уменьшения частоты появления ложных треков $R^{СОД/АИ}(v_{ЛТ})$;
- 5.7 Коэффициент увеличения средней длительности истинного трека $R^{СОД/АИ}(\tau_{ИТ})$;
- 5.8 Коэффициент уменьшения средней длительности ложного трека $R^{СОД/АИ}(\tau_{ЛТ})$.
- 5.9 Коэффициент уменьшения смещений $R^{СОД/ФТ}(b_X)$, $R^{СОД/ФТ}(b_Z)$ и СКО $R^{СОД/ФТ}(s_X)$, $R^{СОД/ФТ}(s_Z)$ оценки положения ВС в тангенциальном (X) и нормальном (Z) к вектору скорости направлениях;
- 5.10 Коэффициент уменьшения смещения $R^{СОД/ФТ}(b_V)$ и СКО $R^{СОД/ФТ}(s_V)$ оценки путевой скорости;
- 5.11 Коэффициент уменьшения смещения $R^{СОД/ФТ}(b_\Phi)$ и СКО $R^{СОД/ФТ}(s_\Phi)$ оценки курса;

Таким образом, наборы показателей 1 – 3 в полной мере характеризует качество траекторной обработки в РЛС в составе АС УВД. Наборы показателей 4,

5 характеризует возможности схем СОД по улучшению качества треков по сравнению с однопозиционным РЛК.

Рассмотрим методику оценивания вышеуказанных показателей. Выражения для оценок показателей 1.1 – 3.3 идентичны рассмотренным в предыдущих главах, поэтому здесь не приводятся. Вероятность правильного объединения данных $P_{ИТ}^{СОД}$ представляет собой вероятность того, что произвольная истинная отметка произвольной РЛС участвует в формировании соответствующего объединенного трека. Вероятность мультипликации истинной траектории $M_{ИТ}^{СОД}$ равна вероятности образования в СТО нескольких треков, соответствующих одной истинной траектории (одному воздушному судну). Вероятность обнаружения истинной траектории $E_{ИТ}^{СОД}$ есть вероятность равенства количества объединенных ИТ и количества истинных траекторий (воздушных судов) в зоне ответственности СТО.

Оценки этих вероятностей формируются как выборочные средние по ансамблю испытаний $k=1, \dots, K$ в соответствии со следующими выражениями:

$$P_{ИТ}^{СОД}, M_{ИТ}^{СОД}, E_{ИТ}^{СОД} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{M(k)}{N(k)}, \quad (5.2)$$

где $M(k)$ – количество истинных отметок (ИО), правильно ассоциированных с истинными треками (ИТ), и $N(k)$ – общее количество истинных отметок при оценке $P_{ИТ}^{СОД}$; $M(k)$ – количество мультипликаций, т.е. количество размноженных ИТ, и $N(k)$ – общее количество ИТ при оценке $M_{ИТ}^{СОД}$; $M(k)$ – количество ИТ, находящихся на сопровождении, и $N(k)$ – общее количество ИТ при оценке $E_{ИТ}^{СОД}$.

Коэффициент увеличения вероятности обнаружения ИТ $R^{СОД/ОТ}(P_{ИТ})$ представляет собой выборочное среднее по ансамблю испытаний $k=1, \dots, K$ отношения вероятности обнаружения объединенного трека $P_{ИТ}^{СОД/ОТ}$ к вероятности обнаружения монотрека $P_{ИТ}^{ОТ}$:

$$R^{СОД/ОТ}(P_{ИТ}) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{P_{ИТ}^{СОД/ОТ}(k)}{P_{ИТ}^{ОТ}(k)}. \quad (5.3)$$

Коэффициент увеличения вероятности правильной ассоциации истинных отметок $R(P_{ИТ}^{АИ})$ рассчитывается по формуле аналогичной (5.3).

Коэффициент уменьшения среднего времени обнаружения истинного трека $R^{СОД/ОТ}(\tau_{обн})$ представляет собой выборочное среднее по ансамблю испытаний $k = 1, \dots, K$ отношения среднего времени обнаружения монотрека $\tau_{обн}^{ОТ}$ к среднему времени обнаружения объединенного трека $\tau_{обн}^{СОД/ОТ}$:

$$R^{СОД/ОТ}(\tau_{обн}) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{\tau_{обн}^{ОТ}(k)}{\tau_{обн}^{СОД/ОТ}(k)}. \quad (5.4)$$

Коэффициент уменьшения средней длительности ложного трека $R^{СОД/АИ}(\tau_{ЛТ})$ по формуле аналогичной (5.4).

Коэффициент уменьшения среднего количество ложных треков $R^{СОД/ОТ}(\lambda_{ЛТ})$ представляет собой выборочное среднее по ансамблю испытаний $k = 1, \dots, K$ отношения количества ложных монотреков $\lambda_{ЛТ}^{ОТ}$ к количеству объединенных ложных треков $\lambda_{ЛТ}^{СОД/ОТ}$:

$$R^{СОД/ОТ}(\lambda_{ЛТ}) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{\lambda_{ЛТ}^{ОТ}(k)}{\lambda_{ЛТ}^{СОД/ОТ}(k)}. \quad (5.5)$$

Коэффициент уменьшения частоты появления ложных треков $R^{СОД/АИ}(\nu_{ЛТ})$ рассчитывается по формуле аналогичной (5.5).

Коэффициент увеличения средней длительности истинного трека $R^{СОД/АИ}(\tau_{ИТ})$ представляет собой выборочное среднее по ансамблю испытаний $k = 1, \dots, K$ отношения средней длительности объединенного трека $\tau_{ИТ}^{СОД/АИ}$ к среднему средней длительности монотрека $\tau_{ИТ}^{АИ}$:

$$R^{COД/АИ}(\tau_{ИТ}) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{\tau_{ИТ}^{COД/АИ}(k)}{\tau_{ИТ}^{АИ}(k)}. \quad (5.6)$$

Коэффициенты уменьшения смещения $R^{COД/ФТ}(b_X)$, $R^{COД/ФТ}(b_Z)$ и СКО $R^{COД/ФТ}(s_X)$, $R^{COД/ФТ}(s_Z)$ оценки положения в тангенциальном (X) и нормальном (Z) направлениях представляют собой выборочные статистические характеристики по ансамблю испытаний $k=1, \dots, K$ отношения статистических характеристик оценки положения объединенного трека к аналогичным показателям монотрека:

$$\begin{aligned} R^{COД/ФТ}(b_X) &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{b_X^{\Phi T}(k)}{b_X^{COД/ФТ}(k)}, \\ R^{COД/ФТ}(b_Z) &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{b_Z^{\Phi T}(k)}{b_Z^{COД/ФТ}(k)}, \\ R^{COД/ФТ}(s_X) &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{s_X^{\Phi T}(k)}{s_X^{COД/ФТ}(k)}, \\ R^{COД/ФТ}(s_Z) &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{s_Z^{\Phi T}(k)}{s_Z^{COД/ФТ}(k)}. \end{aligned} \quad (5.7)$$

Значения коэффициентов $R^{COД/ФТ}(b_V)$, $R^{COД/ФТ}(s_V)$ и $R^{COД/ФТ}(b_\Phi)$, $R^{COД/ФТ}(s_\Phi)$ рассчитываются по формулам аналогичным (5.7).

Следует отметить, что предлагаемые 39 показателей можно рассматривать как систему, характеризующую качество СТО в целом. Для определения свойств рассмотренных показателей качества функционирования многопозиционной СТО в ходе работы было проведено математическое моделирование, методика и результаты которого рассмотрены в следующем разделе.

5.4 Методика оценивания показателей и результаты математического моделирования

Для проведения эксперимента по оценке предлагаемых показателей качества использована методика, примененная в предыдущих главах. Полученные зависимости позволяют проанализировать качество траекторной обработки в многопозиционных РЛК и рекомендовать схему СОД.

Анализ качества объединенного трека произведен по результатам моделирования процесса автоматического сопровождения ВС в трассовой зоне по данным двух вторичных радиолокаторов. Набор показателей качества и методики их оценивания апробированы на примере анализа эффективности объединения данных с использованием схем СОД-1, СОД-2 и СОД-3. Математический эксперимент проводился на базе модульных СТО, состав которых соответствует рисункам 5.1 – 5.3. В настоящей главе был выбран следующий сценарий моделирования:

- Количество ВС в зоне обзора – 10;
- Тип движения ВС – РПД;
- Путьевая скорость ВС – 1110 км/ч;
- Средняя дальность до ВС – 300 км;
- Количество статистических прогонов – $K = 10^8$.

Сценарий сопровождения соответствует стандартному тесту «*EUROCONTROL*» на качество объединения траекторной информации двух РЛС [74]. Параметры вторичных обзорных трассовых радиолокаторов соответствуют требованиям того же стандарта:

Период обзора – 12 с;

Вероятность правильного обнаружения – $0.5 \leq D \leq 1.0$

Вероятность ложной тревоги – $10^{-9} \leq F \leq 10^{-6}$;

Среднеквадратическая ошибка определения дальности – $\sigma_R = 70$ м;

Среднеквадратическая ошибка определения азимута – $\sigma_\varphi = 0,08^\circ$.

Расстояние между РЛС – 100 км.

Как и в предыдущих главах, предельные значения D и F выбраны с учетом требований к источникам измерений и практики их применения в УВД [75, 77, 78]. РЛС с вероятностью правильного обнаружения сигнала меньшей 0.5, равно как и с вероятностью ложной тревоги большей 10^{-5} , являются непригодными для использования.

По результатам математического моделирования были определены зависимости показателей $P_{ИТ}^{СОД/ОГ}(0 \leq t \leq T_{обн})$, $R^{СОД/ОГ}(P_{ИТ})$, $\tau_{обн}^{СОД/ОГ}$, $R^{СОД/ОГ}(\tau_{обн})$, (рисунки 5.5 – 5.8), $P_{ИТ}^{СОД/АИ}$, $R^{СОД/АИ}(P_{ИТ})$, $L_{ИТ}^{СОД/АИ}$, $R^{СОД/АИ}(L_{ИТ})$, $\tau_{ИТ}^{СОД/АИ}$, $R^{СОД/АИ}(\tau_{ИТ})$ (рисунки 5.11 – 5.16), $P_{ИТ}^{СОД}$, $M_{ИТ}^{СОД}$, $E_{ИТ}^{СОД}$ (рисунки 5.33 – 5.35) от вероятности правильного обнаружения сигнала D . Показателей $b_X^{СОД/ФГ}$, $b_Z^{СОД/ФГ}$, $s_X^{СОД/ФГ}$, $s_Z^{СОД/ФГ}$, $R^{СОД/ФГ}(b_X)$, $R^{СОД/ФГ}(b_Z)$, $R^{СОД/ФГ}(s_X)$, $R^{СОД/ФГ}(s_Z)$, $b_V^{СОД/ФГ}$, $s_V^{СОД/ФГ}$, $b_\Phi^{СОД/ФГ}$, $s_\Phi^{СОД/ФГ}$ (рисунки 5.21 – 5.32) от СКО оценки местоположения ВС $\sigma_{МП}$. Показателей $\lambda_{ЛТ}^{СОД/ОГ}$, $R^{СОД/ОГ}(\lambda_{ЛТ})$ (рисунки 5.9, 5.10), $v_{ЛТ}^{СОД/АИ}$, $R^{СОД/АИ}(v_{ЛТ})$, $\tau_{ЛТ}^{СОД/АИ}$, $R^{СОД/АИ}(\tau_{ЛТ})$ (рисунки 5.17 – 5.20) от вероятности ложной тревоги F .

Как было отмечено выше, основная задача СОД заключается в формировании объединенного трека с более высокими показателями качества по сравнению с монотреками. В предыдущих главах были сделаны выводы относительно поведения показателей качества в зависимости от характеристик первичной обработки РЛС. При анализе алгоритмов СОД эти выводы остаются актуальными.

Зависимости, приведенные на рисунке 5.5 свидетельствуют о том, что значение $P_{ИТ}^{СОД/ОГ}(0 \leq t \leq T_{обн})$ для всех рассмотренных алгоритмов СОД монотонно возрастает с ростом вероятности правильного обнаружения сигнала D . Зависимости, соответствующие разным алгоритмам сближаются, что свидетельствует об уменьшении различий соответствующих алгоритмов с ростом

D. В схеме СОД-1 ввиду асинхронного характера траекторной обработки применяется стратегия локальной ассоциации отметок (БС). В схеме СОД-2 траекторная обработка отметок каждой РЛС ведется независимо. Зависимость, соответствующая схеме СОД-3, проходит 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). Таким образом, сочетание преимуществ первой и второй схемы СОД положительно сказывается на качестве обнаружения ИТ.

Для схем СОД-1 и СОД-3 количество отметок, доступных для обработки представляет собой сумму отметок всех РЛС. Принципиальное отличие схемы СОД-2 в том, что совместной обработке подвергаются не отметки, а монотреки. Для этой схемы обнаружение объединенного трека фиксируется в момент обнаружения трека хотя бы одной РЛС:

$$P = 1 - \prod_{j=1}^J (1 - P_j), \quad (5.8)$$

где P_j – вероятность обнаружения трека j -й РЛС, J – количество РЛС.

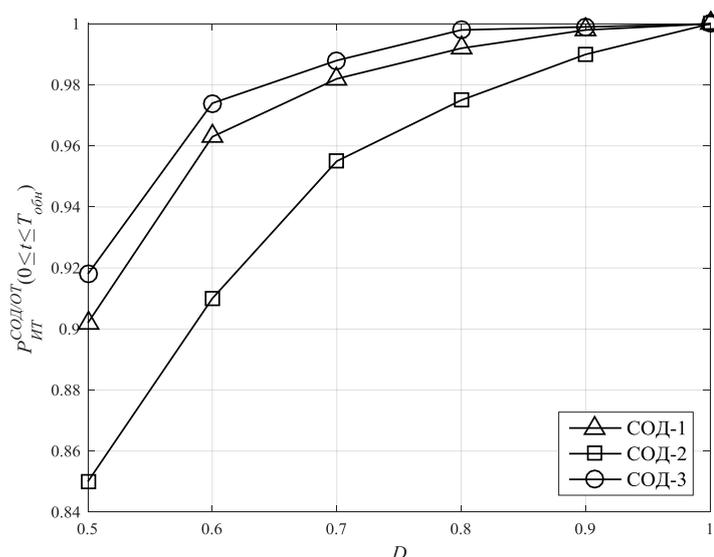


Рисунок 5.5 – Зависимости вероятности обнаружения истинного трека $P_{ИТ}^{СОД/ОТ}(0 \leq t \leq T_{обн})$ в течение заданного времени от вероятности правильного обнаружения сигнала D

Из рисунка 5.6 видно, что зависимости коэффициента увеличения вероятности правильного обнаружения ИТ $R^{СОД/ОТ}(P_{ИТ})$ для всех рассмотренных алгоритмов СОД монотонно стремятся к единице с ростом вероятности правильного обнаружения сигнала 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.

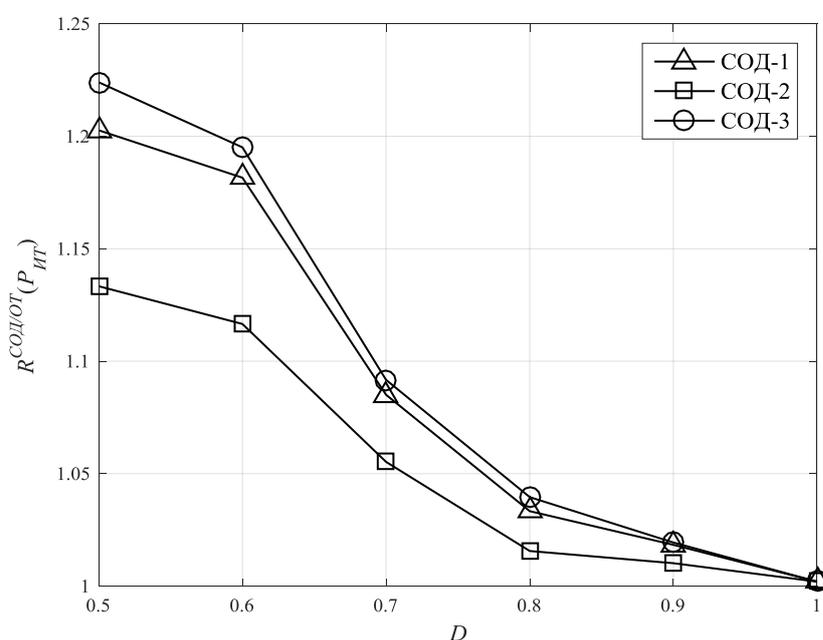


Рисунок 5.6 – Зависимости коэффициента увеличения вероятности обнаружения истинного трека $R^{СОД/ОТ}(P_{ИТ})$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D

Зависимости, приведенные на рисунке 5.7, свидетельствуют о том, что среднее время обнаружения истинного трека $\tau_{обн}^{СОД/ОТ}$ для всех алгоритмов и критериев практически линейно убывает с ростом D . Соответствующие кривые почти параллельны друг другу, что свидетельствует в пользу применения СОД-3. Это подтверждает тот факт, что сочетание преимуществ первой и второй схемы положительно сказывается на качестве обнаружения ИТ. В схеме СОД-2

фиксация обнаружения объединенного трека в момент обнаружения хотя бы одного монотрека дает меньший прирост в качестве обнаружения. Большой прирост достигается увеличением количества обрабатываемых отметок (частоты прихода отметок).

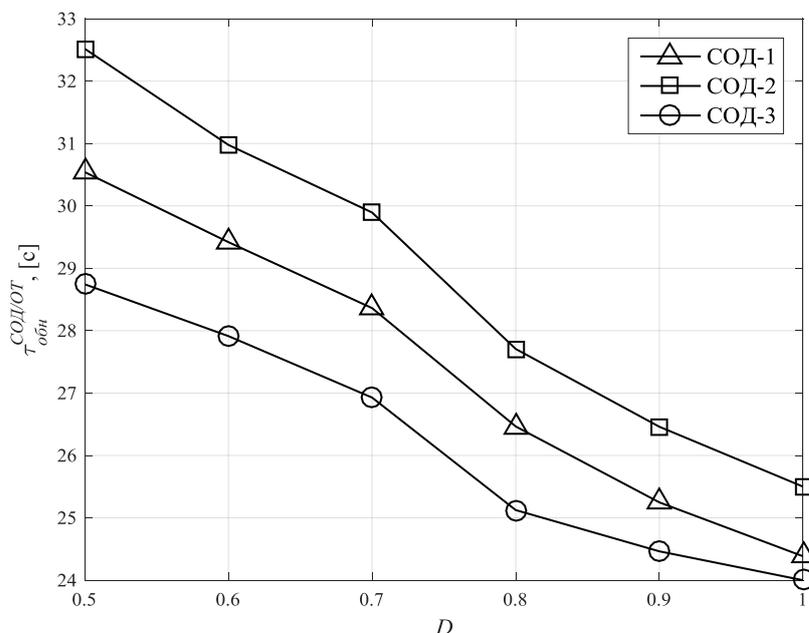


Рисунок 5.7 – Зависимости среднего времени обнаружения истинного трека $\tau_{ИТ}^{СОД/ОГ}$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D

Из рисунка 5.8 видно, что зависимости коэффициента увеличения среднего времени обнаружения ИТ $R^{СОД/ОГ}(\tau_{ИТ})$ для всех рассмотренных алгоритмов СОД медленно стремятся к единице с ростом вероятности правильного обнаружения сигнала D . Сделанные выше выводы объясняют улучшение характеристик обнаружения объединенного трека по сравнению с монотреком.

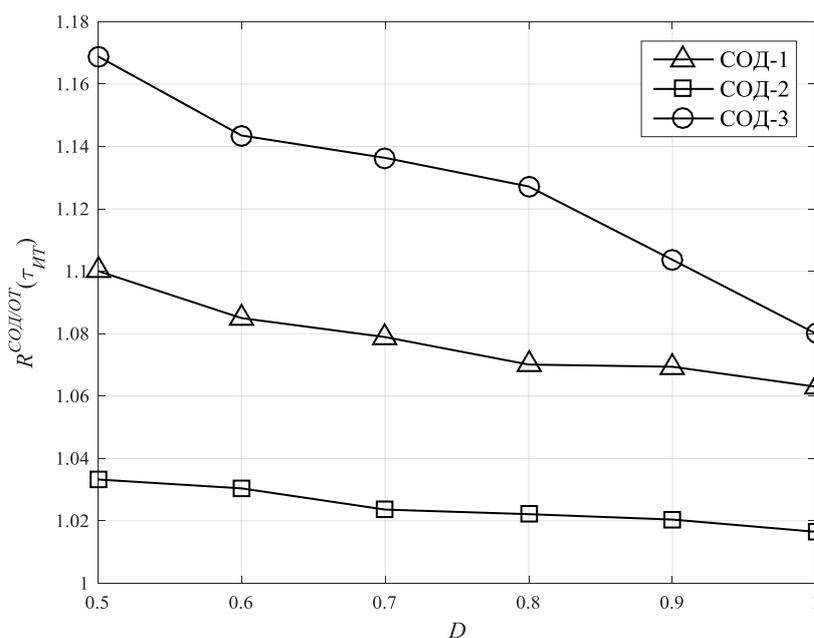


Рисунок 5.8 – Зависимости коэффициента уменьшения среднего времени обнаружения истинного трека $R^{СОД/ОТ}(\tau_{ИТ})$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D

Зависимости, приведенные на рисунке 5.9, свидетельствуют о том, что среднее количество ЛТ $\lambda_{ЛТ}^{СОД/ОТ}$ для всех схем увеличивается с ростом вероятности ложной тревоги F [126, 127, 128, 129]. Зависимость, соответствующая схеме СОД-1, проходит выше остальных зависимостей, что свидетельствует о том, что данная схема наименее устойчива к формированию ложных треков. Для схемы СОД-2 рассматриваемая зависимость принимает минимальные значения в силу того, что объединяются только монотреки.

В рассматриваемой модели пространственное распределение ложных отметок в каждый момент времени подчиняется случайному равномерному закону. Как отмечалось, для схем СОД-1 и СОД-3 количество отметок, доступных для обработки, представляет собой сумму отметок всех РЛС. Это неизбежно приводит к увеличению количества обнаруженных ЛТ в этих схемах. Однако схема СОД-3 позволяет применять алгоритмы глобальной ассоциации отметок, что положительно сказывается на качестве фильтрации ложных отметок.

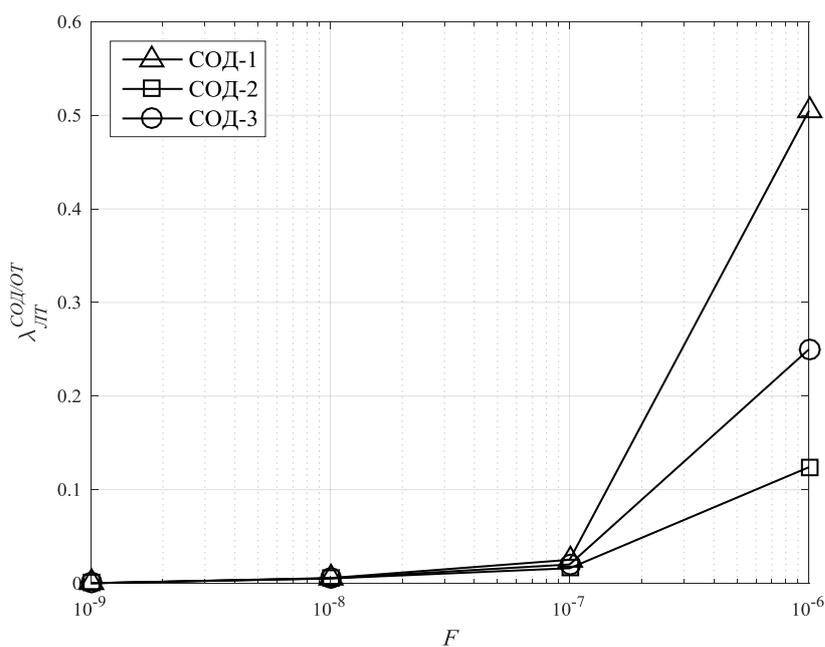


Рисунок 5.9 – Зависимости среднего количества ложных обнаруженных треков $\lambda_{ЛТ}^{СОД/ОТ}$ от вероятности ложной тревоги F

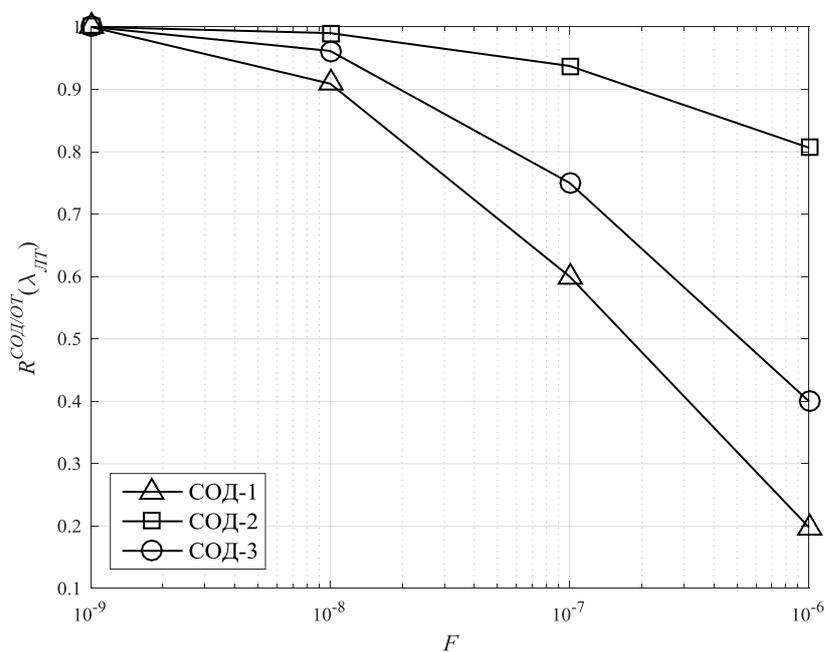


Рисунок 5.10 – Зависимости коэффициента уменьшения среднего количества ложных треков $R^{СОД/ОТ}(\lambda_{ЛТ})$ от вероятности ложной тревоги F

Зависимости приведенные на рисунке 5.11 свидетельствуют о том, что значение $P_{ИТ}^{СОД/АИ}$ для всех рассмотренных схем монотонно возрастает с ростом вероятности правильного обнаружения сигнала D . При этом соответствующие зависимости сближаются, различия в качестве работы схем СОД уменьшаются. Как отмечалось в третьей главе, алгоритмы, реализующие стратегию глобальной ассоциации, превосходят алгоритмы, использующие стратегию локальной ассоциации. Поэтому зависимость, соответствующая схеме СОД-3 проходит выше зависимостей, соответствующих схемам СОД-1 и СОД-2. При этом схема СОД-2 уступает другим схемам. Это объясняется тем, что стробы ассоциации отметок и монотреков имеют разные размеры. Первые вычисляются исходя из СКО измерений, а вторые – из СКО экстраполированных отметок монотреков, которые меньше СКО измерений. Поэтому для схемы СОД-2 строб объединенного трека и, соответственно, вероятность попадания истинной отметки в строб меньше, чем для схем СОД-1 и СОД-3.

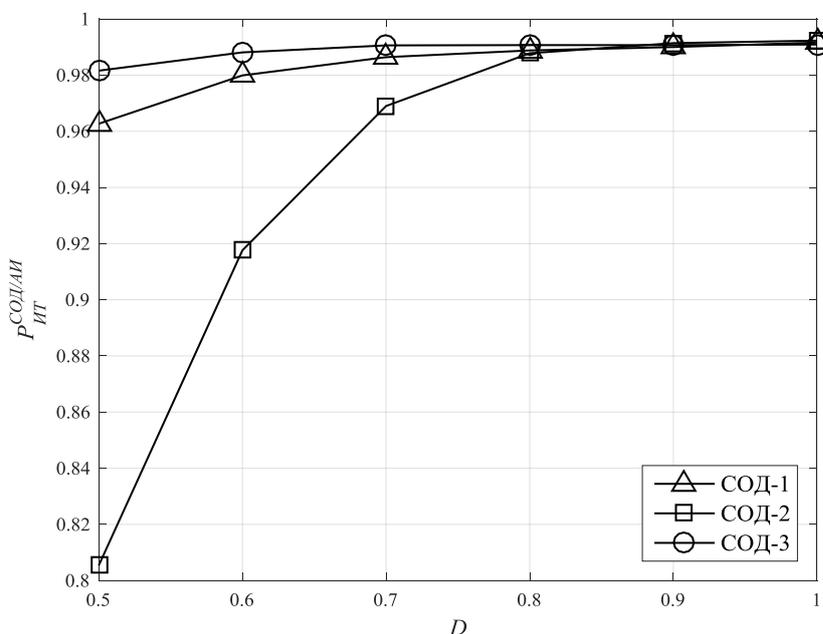


Рисунок 5.11 – Зависимости вероятности правильной ассоциации истинных отметок $P_{ИТ}^{СОД/АИ}$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D

Из рисунка 5.12 видно, что зависимости коэффициента увеличения вероятности правильной ассоциации $R^{СОД/АИ}(P_{ИТ})$ для всех рассмотренных алгоритмов СОД монотонно стремятся к единице с ростом вероятности правильного обнаружения сигнала D . Для схем СОД-1 и СОД-3 увеличение вероятности правильной ассоциации истинных отметок с объединенным треком по сравнению с аналогичным показателем для монотрека объясняется увеличением частоты прихода истинных отметок. Меньшие значения соответствующей характеристики при применении схемы СОД-2 объясняются тем, что при ассоциации монотреков стробы имеют меньшие размеры, чем при ассоциации отметок.

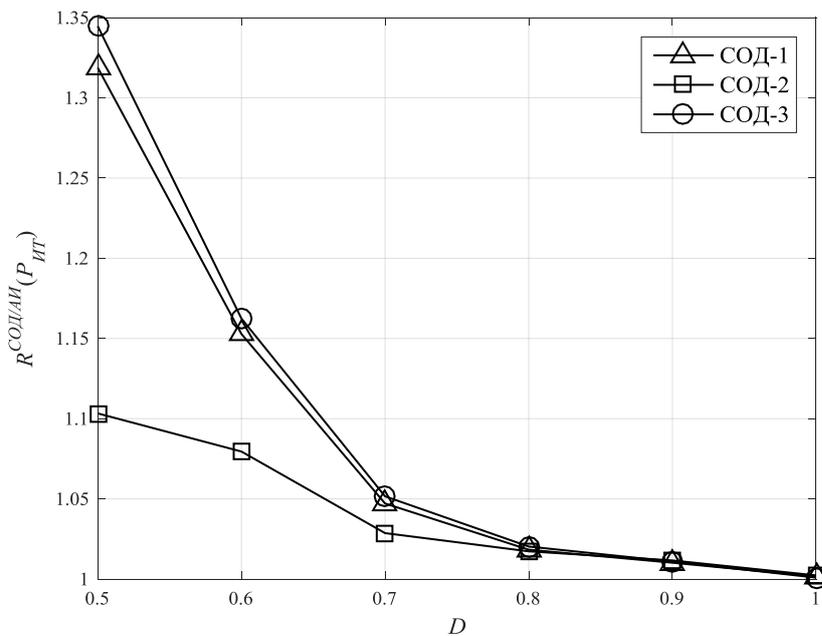


Рисунок 5.12 – Зависимости коэффициента увеличения вероятности правильной ассоциации $R^{СОД/АИ}(P_{ИТ})$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D

На рисунке 5.13 приведены зависимости вероятности потери истинного трека $L_{ИТ}^{СОД/АИ}$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D . Значение $L_{ИТ}^{СОД/АИ}$ для всех алгоритмов убывает с ростом вероятности правильного обнаружения сигнала D . Из рисунка следует, что для данного показателя

преимущество глобальной стратегии ассоциации сохраняется. Кроме того, на целостность трека также влияет размер строга ассоциации.

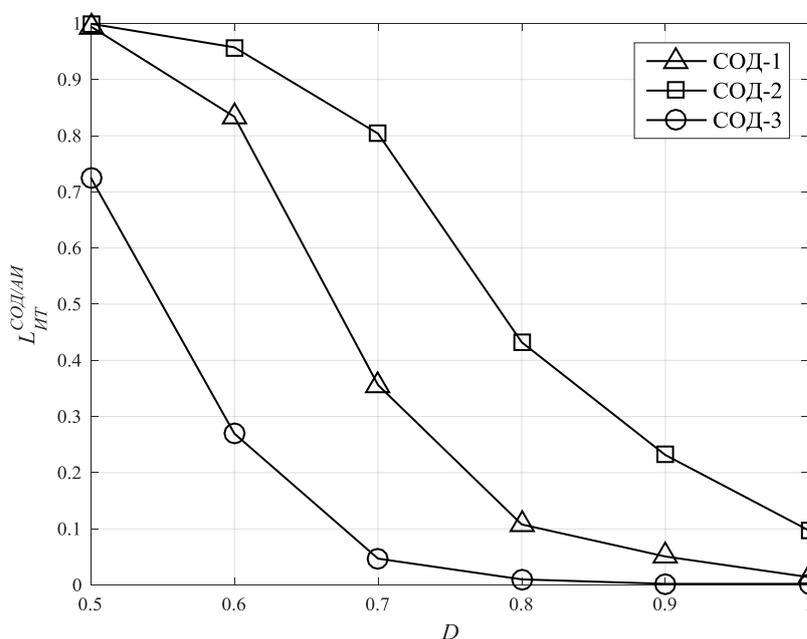


Рисунок 5.13 – Зависимости вероятности потери истинного трека $L_{ИТ}^{СОД/АИ}$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D

Из рисунка 5.14 видно, что зависимости коэффициента уменьшения вероятности потери ИТ $R^{СОД/АИ}(L_{ИТ})$ для всех рассмотренных алгоритмов СОД монотонно стремятся к единице с ростом вероятности правильного обнаружения сигнала D . Для схем СОД-1, СОД-3 уменьшение вероятности потери объединенного истинного трека по сравнению с аналогичным показателем для монотрека объясняется увеличением частоты прихода истинных отметок. Меньшие значения соответствующей характеристики для схемы СОД-2 объясняются тем, что при ассоциации монотреков с объединенным треком используются строги с меньшими размерами.

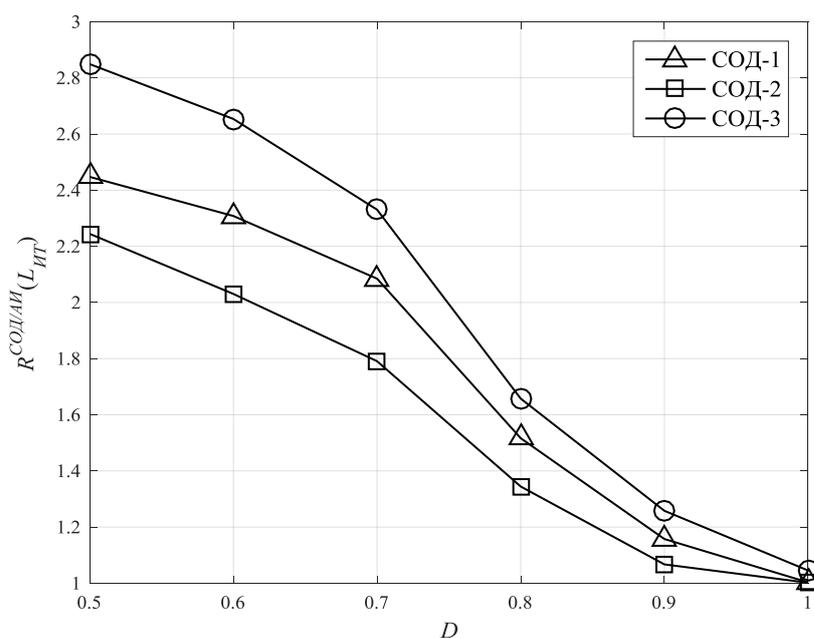


Рисунок 5.14 – Зависимости коэффициента уменьшения вероятности потери истинного трека $R^{СОД/АИ}(L_{ИТ})$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D

Из рисунка 5.15 видно, что значение средней длительности истинного трека $\tau_{ИТ}^{СОД/АИ}$ для всех алгоритмов возрастает с ростом вероятности правильного обнаружения сигнала D . При этом все отмеченные выше тенденции сохраняются, и сделанный в третьей главе вывод о том, что более качественное решение задачи ассоциации приводит к улучшению целостности треков, подтверждается.

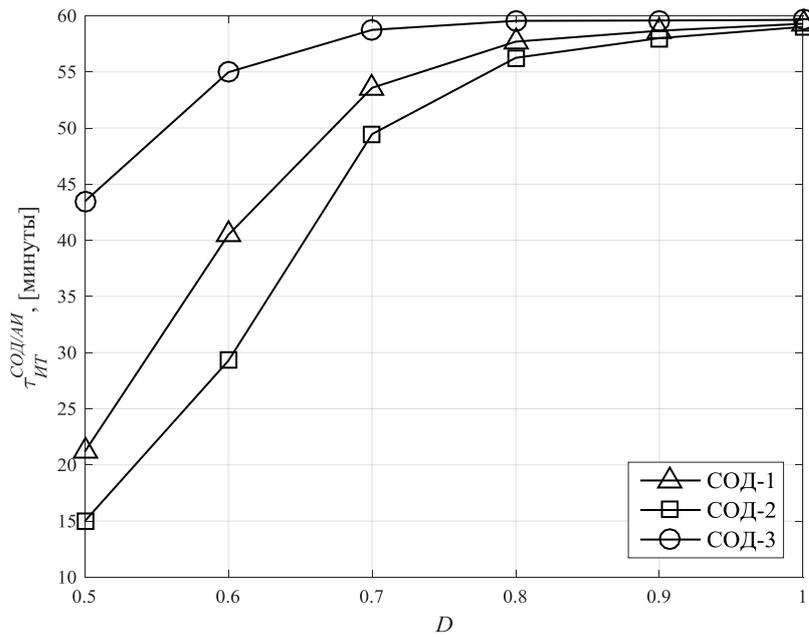


Рисунок 5.15 – Зависимости средней длительности истинного трека $\tau_{ИТ}^{СОД/АИ}$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D

Из рисунка 5.16 видно, что зависимости коэффициента увеличения средней длительности ИТ $R^{СОД/АИ}(\tau_{ИТ})$ для всех рассмотренных алгоритмов СОД монотонно стремятся к единице с ростом вероятности правильного обнаружения сигнала D . Для схем СОД-1 и СОД-3 увеличение средней длительности объединенного истинного трека по сравнению с аналогичным показателем монотрека объясняется увеличением частоты прихода истинных отметок. Меньшие значения соответствующей характеристики при применении схемы СОД-2 объясняются тем, что при ассоциации монотреков с объединенным треком используются стробы с меньшими размерами.

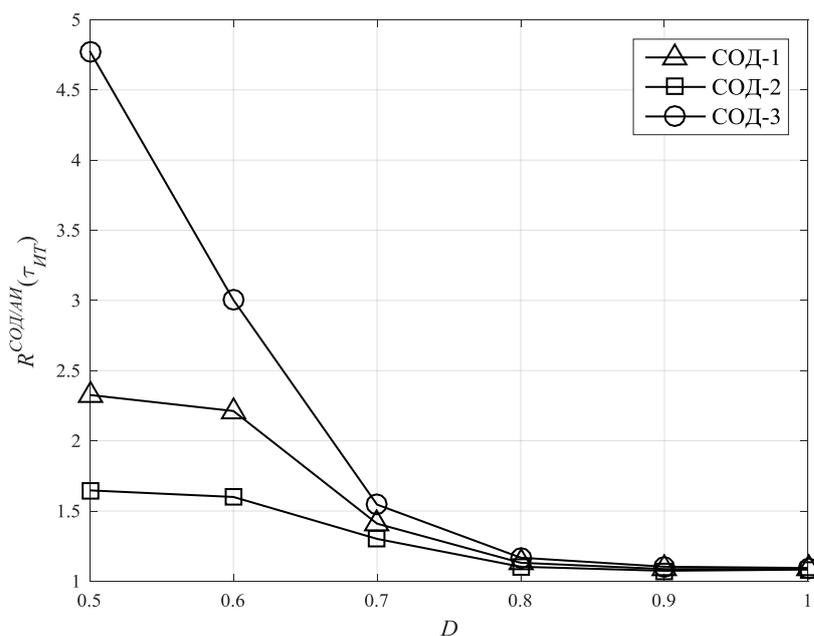


Рисунок 5.16 – Зависимости коэффициента увеличения средней длительности истинного трека $R^{СОД/АИ}(\tau_{ИТ})$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D

Зависимости, приведенные на рисунке 5.17, свидетельствуют о том, что средняя частота ложных треков $\nu_{ЛТ}^{СОД/АИ}$ для всех рассмотренных алгоритмов увеличивается с ростом вероятности ложной тревоги F . Полученные зависимости близки для всех схем. Это подтверждает сделанный во третьей главе вывод о том, что устойчивость алгоритмов к формированию ложных треков в большей степени определяется критериями обнаружения и удаления треков, а также размером строба трека и в меньшей степени алгоритмом ассоциации измерений. Для схемы СОД-2 рассматриваемая зависимость принимает минимальные значения.

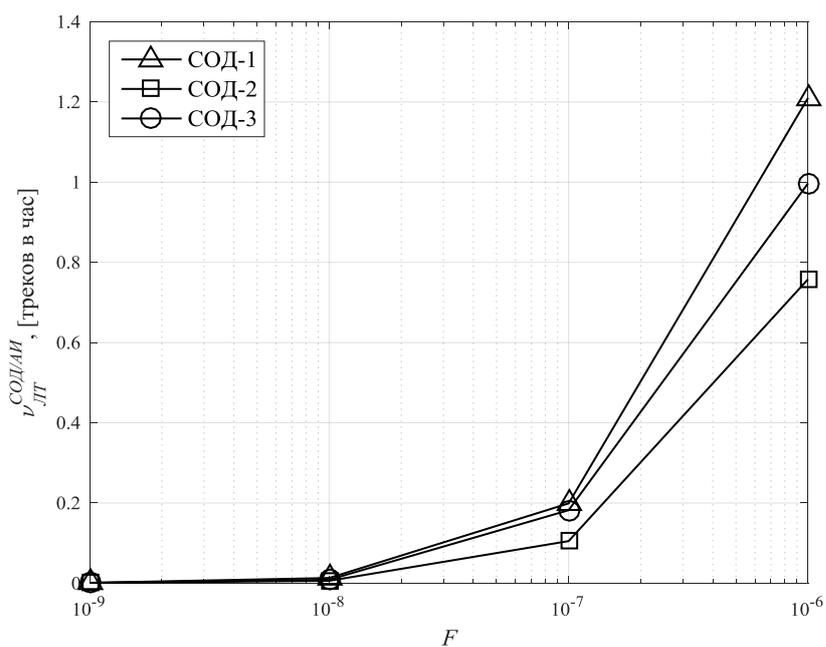


Рисунок 5.17 – Зависимости средней частоты появления ложных треков $\nu_{LL}^{COD/AI}$ от вероятности ложной тревоги F

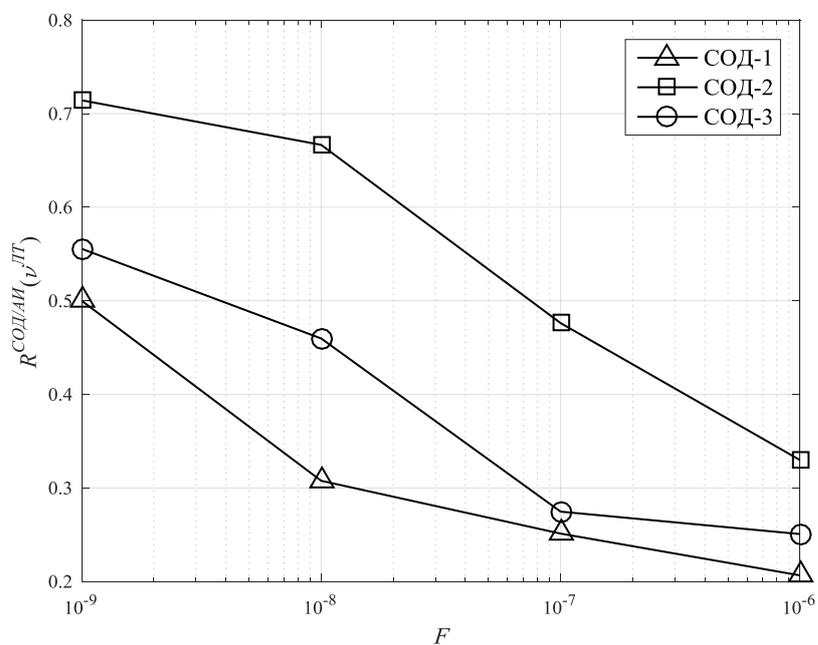


Рисунок 5.18 – Зависимости коэффициента уменьшения средней частоты появления ложных треков $R_{COD/AI}(\nu_{LL})$ от вероятности ложной тревоги F

Зависимости, приведенные на рисунке 5.19, свидетельствуют о том, что среднее время существования ЛТ $\tau_{ЛТ}^{СОД/АИ}$ для всех рассмотренных алгоритмов увеличивается с ростом вероятности ложной тревоги F . Зависимость, соответствующая схеме СОД-1, проходит выше остальных зависимостей, что свидетельствует о том, что данная схема наименее устойчива к формированию ложных треков. Для схемы СОД-2 рассматриваемая зависимость принимает минимальные значения, что свидетельствует о большей устойчивости к формированию ЛТ.

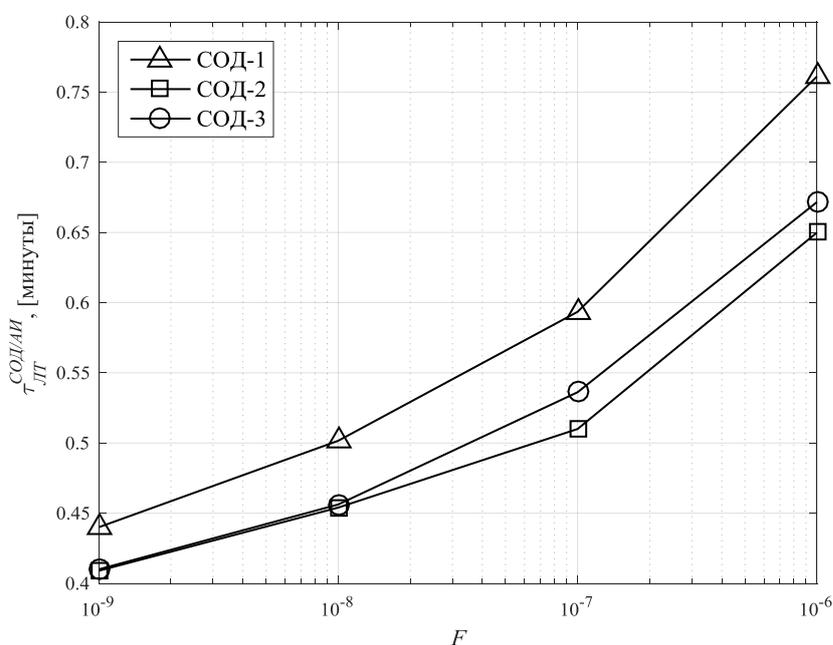


Рисунок 5.19 – Зависимости средней длительности ложного трека $\tau_{ЛТ}^{СОД/АИ}$ от вероятности ложной тревоги F

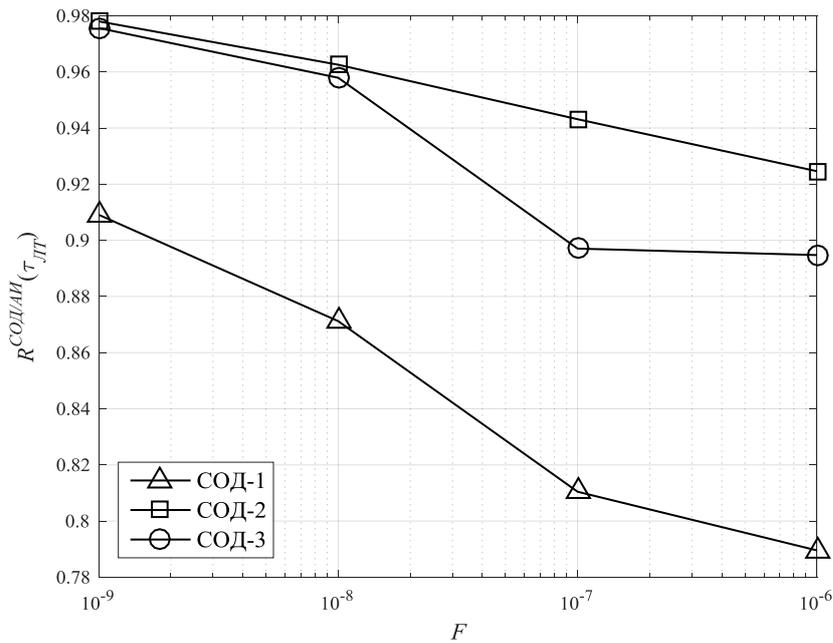


Рисунок 5.20 – Зависимости коэффициента уменьшения средней длительности ложного трека $R^{СОД/АИ}(\tau_{ЛТ})$ от вероятности ложной тревоги F .

Зависимости, приведенные на рисунках 5.21 – 5.24, свидетельствуют о том, что значения смещений $b_X^{СОД/ФТ}$, $b_Z^{СОД/ФТ}$ и СКО $s_X^{СОД/ФТ}$, $s_Z^{СОД/ФТ}$ оценки положения ВС в тангенциальном (X) и нормальном (Z) к вектору скорости направлениях монотонно и линейно увеличиваются с ростом СКО оценки местоположения ВС $\sigma_{МП}$ для всех рассматриваемых схем СОД. Схема СОД-2 уступает по данному показателю также по причине того, что при ассоциации монотреков стробы имеют меньшие размеры, чем при ассоциации отметок. Схема СОД-2 выигрывает по СКО, поскольку объединенный трек дополнительно сглаживается при объединении монотреков.

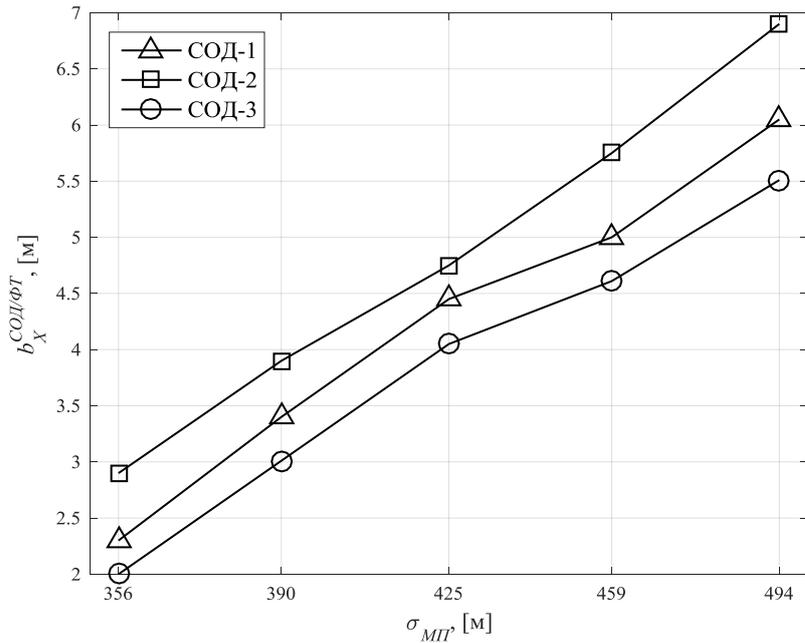


Рисунок 5.21 – Зависимости смещения оценки положения ВС в тангенциальном направлении $b_X^{СОД/ФТ}$ от СКО оценки местоположения $\sigma_{МП}$

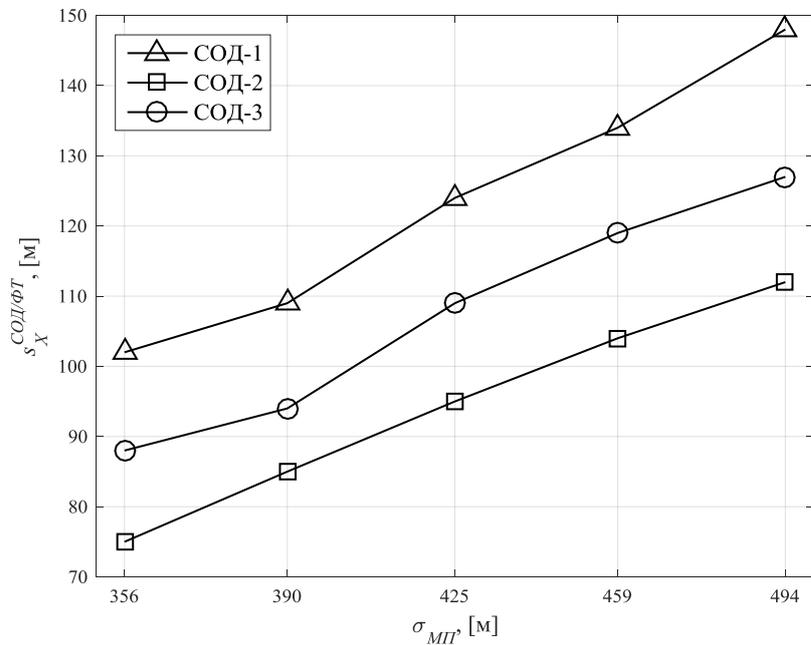


Рисунок 5.22 – Зависимости СКО оценки положения ВС в тангенциальном направлении $s_X^{СОД/ФТ}$ от СКО оценки местоположения $\sigma_{МП}$

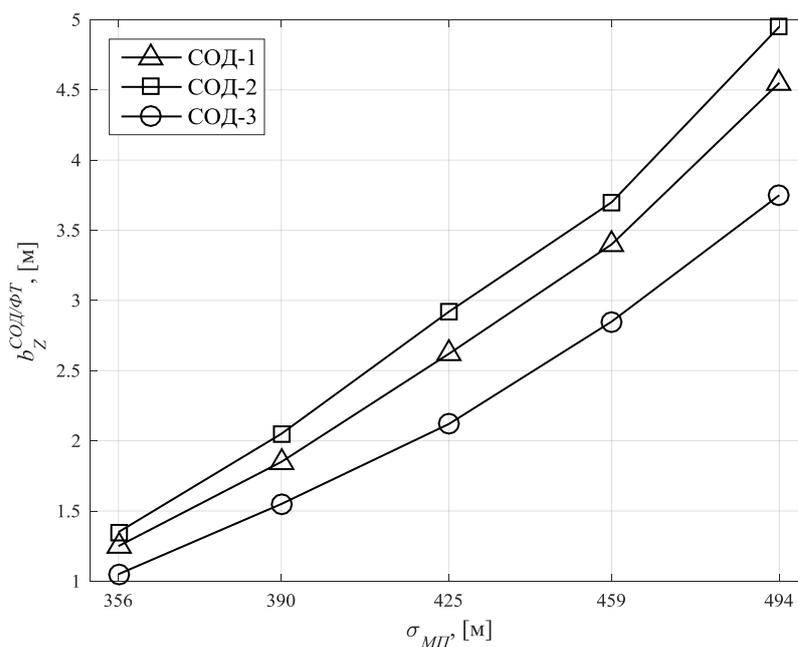


Рисунок 5.23 – Зависимости смещения оценки положения ВС в нормальном направлении $b_Z^{СОД/ФТ}$ от СКО оценки местоположения $\sigma_{МП}$

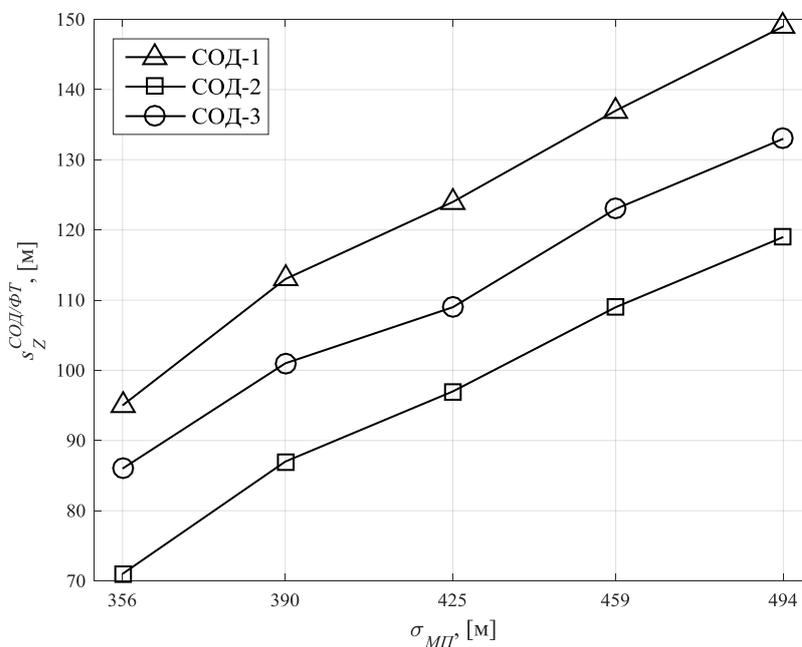


Рисунок 5.24 – Зависимости СКО оценки положения ВС в нормальном направлении $s_Z^{СОД/ФТ}$ от СКО оценки местоположения $\sigma_{МП}$

Из рисунков 5.25 – 5.28 видно, что зависимости коэффициента уменьшения смещения $R^{СОД/ФТ}(b_X)$ и СКО $R^{СОД/ФТ}(s_X)$ для всех рассмотренных алгоритмов СОД монотонно стремятся к единице с ростом СКО оценки местоположения $\sigma_{МП}$. Для схем СОД-1, СОД-3 уменьшение смещения и СКО оценки положения по сравнению с аналогичными показателями для монотрека объясняется увеличением частоты прихода истинных отметок, для схемы СОД-2 – дополнительным сглаживанием при объединении монотреков.

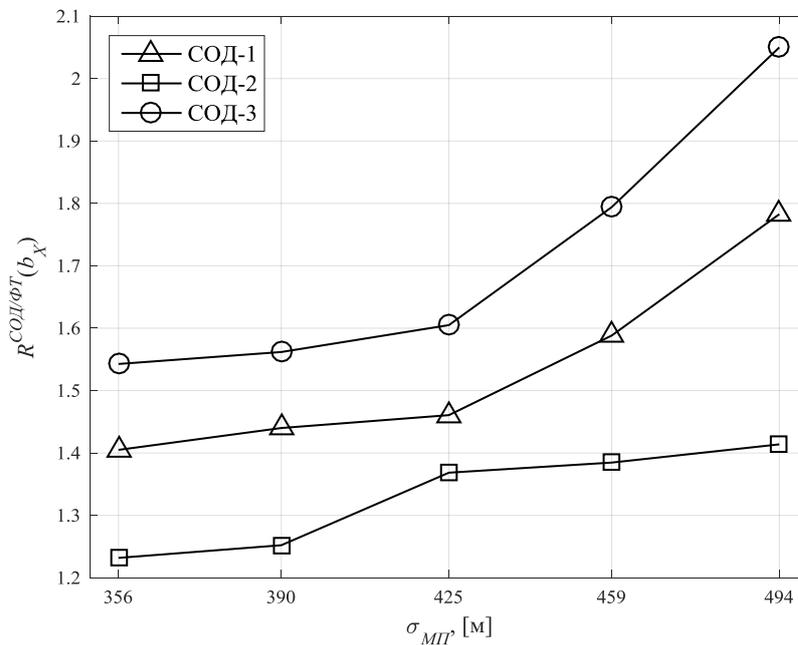


Рисунок 5.25 – Зависимости коэффициента уменьшения смещения оценки положения ВС в тангенциальном направлении $R^{СОД/ФТ}(b_X)$ от СКО оценки местоположения $\sigma_{МП}$

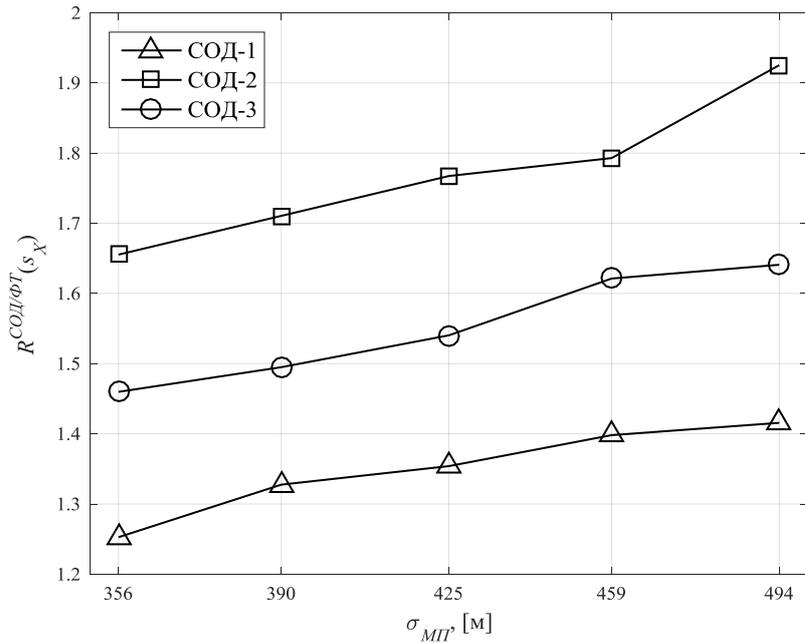


Рисунок 5.26 – Зависимости коэффициента уменьшения смещения СКО оценки положения ВС в тангенциальном направлении $R^{COD/\Phi T}(s_X)$ от СКО оценки местоположения $\sigma_{МП}$

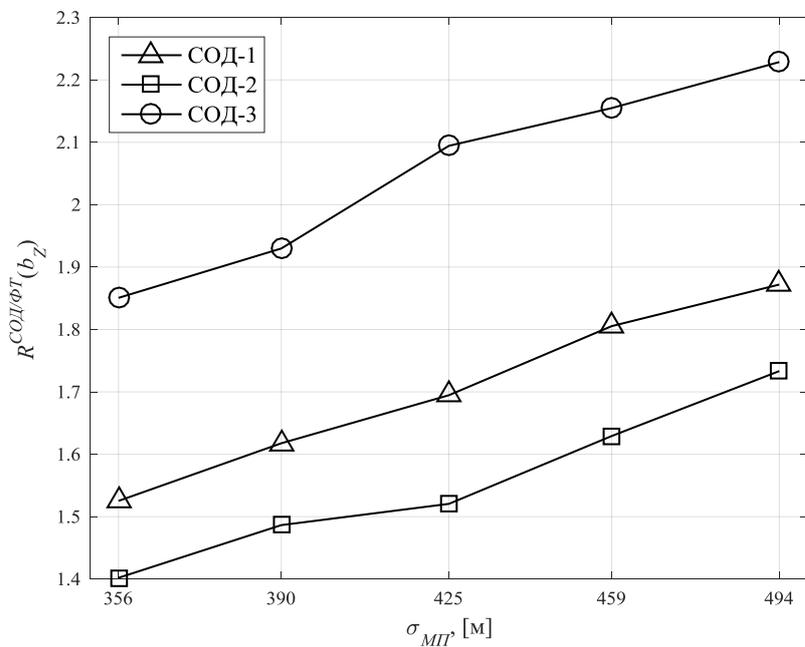


Рисунок 5.27 – Зависимости коэффициента уменьшения смещения оценки положения ВС в тангенциальном направлении $R^{COD/\Phi T}(b_Z)$ от СКО оценки местоположения $\sigma_{МП}$

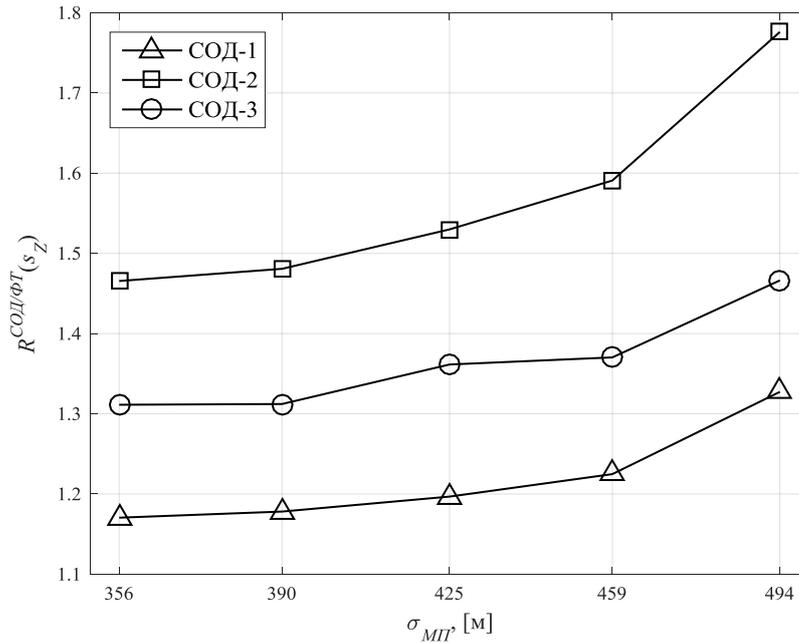


Рисунок 5.28 – Зависимости коэффициента уменьшения СКО оценки положения ВС в тангенциальном направлении $R^{СОД/ФТ}(s_Z)$ от СКО оценки местоположения $\sigma_{МП}$

Из анализа рисунков 5.29 – 5.32 видно, что характер поведения зависимостей смещения, СКО путевой скорости $b_V^{СОД/ФТ} = b_V^{СОД/ФТ}(\sigma_{МП})$, $s_V^{СОД/ФТ} = s_V^{СОД/ФТ}(\sigma_{МП})$ и курса ВС $b_\Phi^{СОД/ФТ} = b_\Phi^{СОД/ФТ}(\sigma_{МП})$, $s_\Phi^{СОД/ФТ} = s_\Phi^{СОД/ФТ}(\sigma_{МП})$ аналогичен характеру зависимостей, приведенных на рисунках 5.20 – 5.23. Поэтому зависимости $R^{СОД/ФТ}(b_V)$, $R^{СОД/ФТ}(s_V)$, $R^{СОД/ФТ}(b_\Phi)$ и $R^{СОД/ФТ}(s_\Phi)$ от $\sigma_{МП}$ не приводятся.

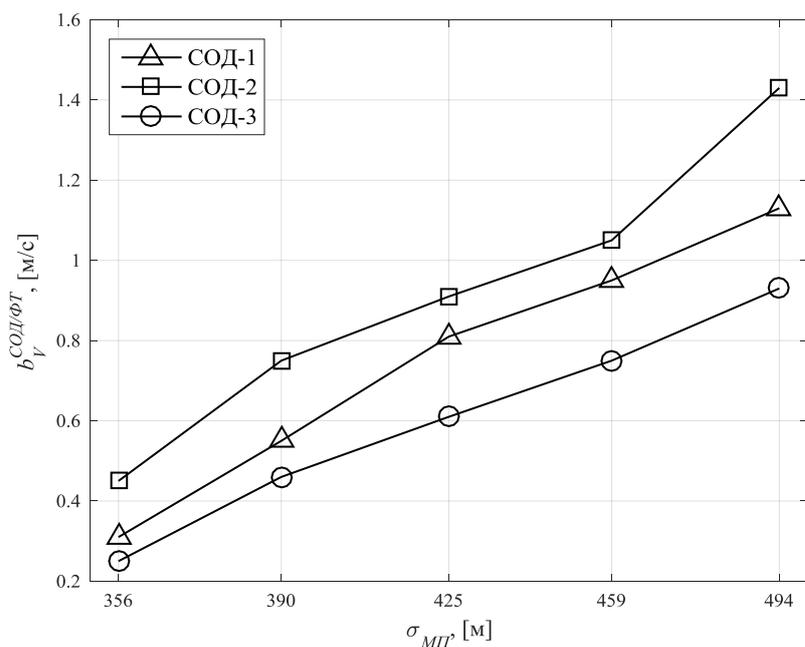


Рисунок 5.29 – Зависимости смещения оценки путевой скорости $b_V^{COД/ФТ}$ от СКО оценки местоположения $\sigma_{МП}$

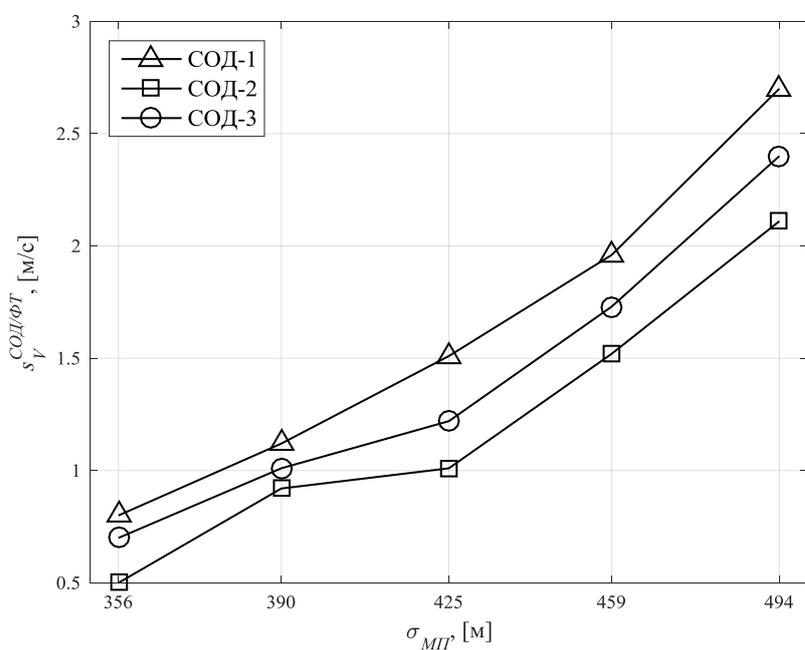


Рисунок 5.30 – Зависимости СКО оценки путевой скорости $s_V^{COД/ФТ}$ от СКО оценки местоположения $\sigma_{МП}$

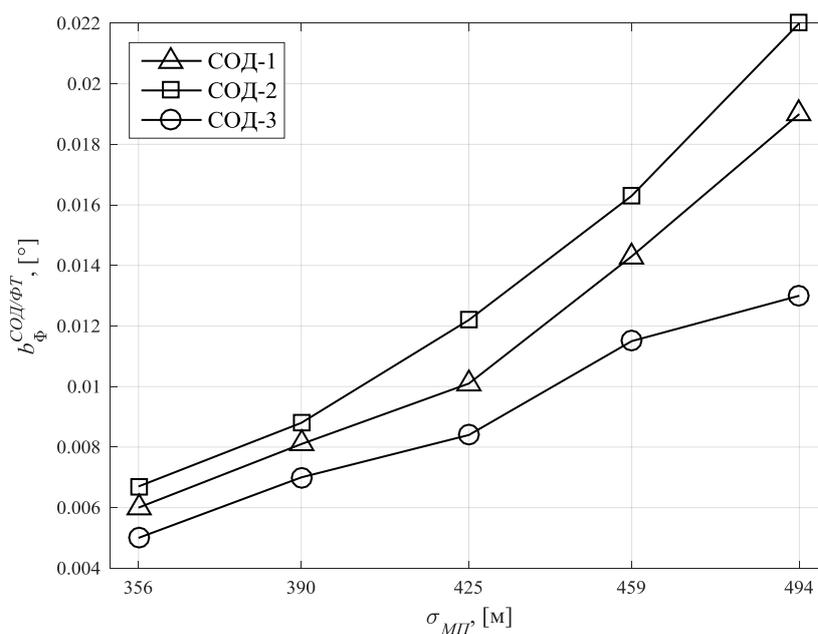


Рисунок 5.31 – Зависимости смещения оценки курса ВС $b_{\Phi}^{COD/\Phi T}$ от СКО оценки местоположения $\sigma_{МП}$

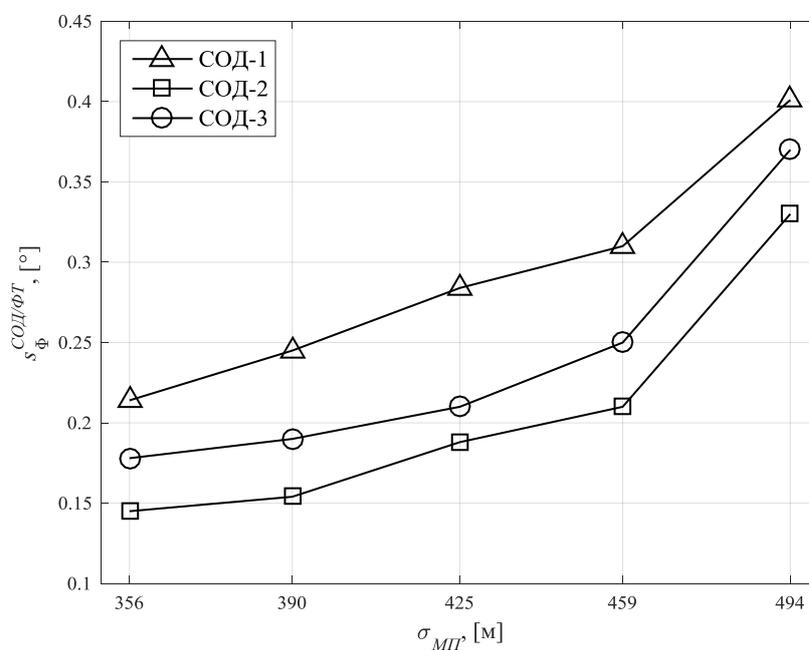


Рисунок 5.32 – Зависимости СКО оценки курса ВС $s_{\Phi}^{COD/\Phi T}$ от СКО оценки местоположения $\sigma_{МП}$

Зависимости, приведенные на рисунке 5.33 свидетельствуют о том, что значения $P_{ИТ}^{СОД}$ монотонно возрастают с ростом вероятности правильного обнаружения сигнала D . Зависимость, соответствующая схеме СОД-3, проходит выше зависимостей соответствующим схемам СОД-1 и СОД-2. Это преимущество также является следствием того, что в схеме СОД-3 применяется алгоритм ГБС для ассоциации отметок с треками. В третьей главе отмечалось, что использование стратегии глобальной ассоциации позволяет повысить характеристики целостности треков. Схема СОД-2 уступает другим схемам, поскольку при ассоциации монотреков с объединенным треком используются стробы с меньшими размерами.

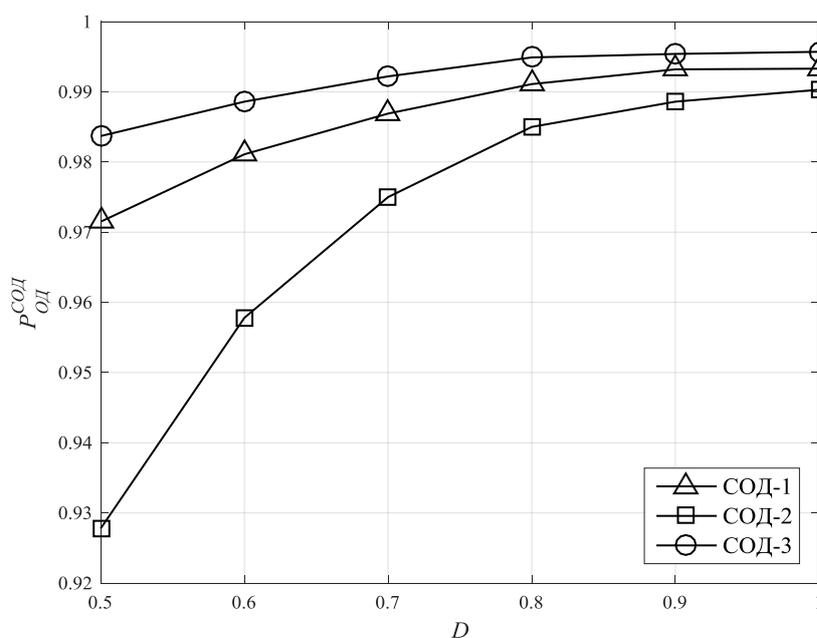


Рисунок 5.33 – Зависимости вероятности объединения данных $P_{ИТ}^{СОД}$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D

Зависимости, приведенные на рисунке 5.34, свидетельствуют о том, что значение вероятности правильного обнаружения истинной траектории $E_{ИТ}^{СОД}$ для всех рассмотренных схем монотонно увеличивается с ростом вероятности правильного обнаружения сигнала D . При этом соответствующие зависимости

сближаются, различия в качестве схем СОД уменьшаются. Зависимость, соответствующая схеме СОД-3, проходит выше зависимостей соответствующих схемам СОД-1 и СОД-2. Это преимущество также является следствием того, что в схеме СОД-3 применяется алгоритм ГБС для ассоциации отметок с треками. В третьей главе отмечалось, что использование стратегии глобальной ассоциации позволяет повысить характеристики целостности истинных треков. Схема СОД-2 уступает другим схемам, поскольку при ассоциации монотреков используются стробы с меньшими размерами.

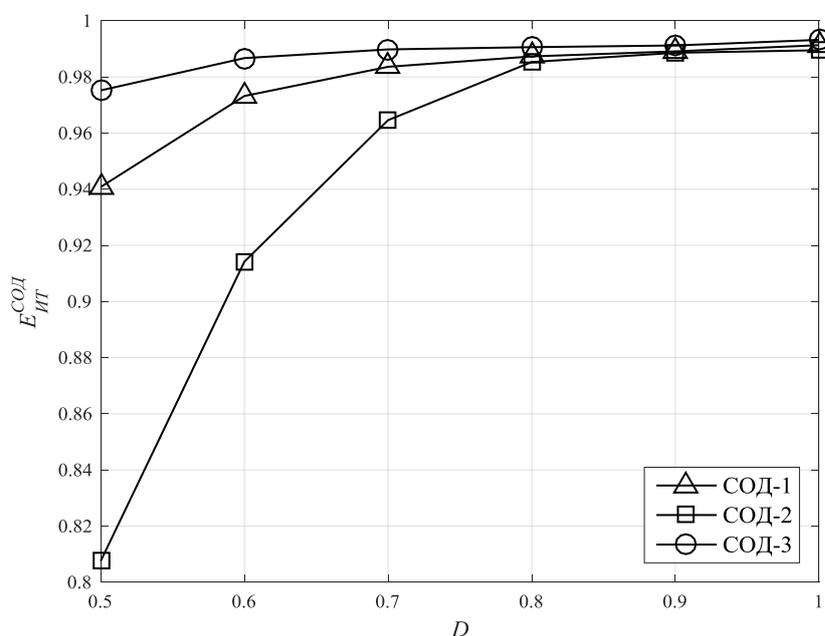


Рисунок 5.34 – Зависимости вероятности правильного обнаружения истинной траектории $E_{IT}^{СОД}$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D

Зависимости, приведенные на рисунке 5.35, свидетельствуют о том, что значение вероятности мультипликации трека $M_{IT}^{СОД}$ для всех рассмотренных схем монотонно убывает с ростом вероятности правильного обнаружения сигнала D . При этом соответствующие зависимости сближаются, различия в качестве работы схем СОД уменьшаются. Зависимость, соответствующая схеме СОД-3, проходит ниже зависимостей соответствующих схемам СОД-1 и СОД-2. Это преимущество также является следствием того, что в схеме СОД-3 применяется алгоритм ГБС

для ассоциации отметок с треками. Схема СОД-2 уступает другим схемам, поскольку вероятность объединения монотреков меньше, чем вероятность объединения отметок, что обуславливает повышение мультипликации треков.

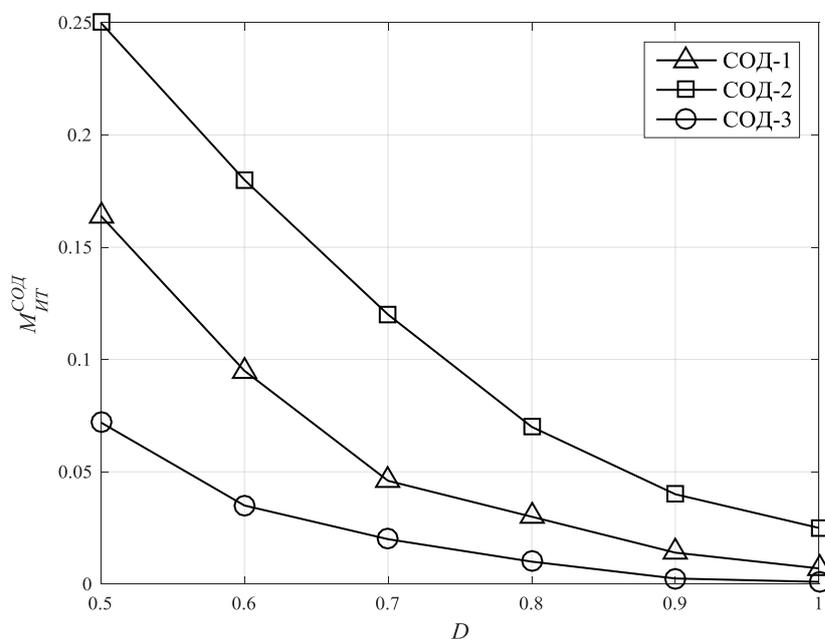


Рисунок 5.35 – Зависимости вероятности мультипликации трека $M_{ИТ}^{СОД}$ от вероятности правильного обнаружения сигнала D

Проделанный анализ схем СОД по выбранным показателям выявил принципиальные различия между схемами с объединением отметок, монотреков и гибридным объединением, и таким образом подтвердил преимущества использования алгоритма ГБС для ассоциации отметок. Особенность рассмотренных схем СОД заключается в улучшении показателей, характеризующих качество истинных треков. В целом проведенный анализ выявил важные, с точки зрения практического применения, различия рассмотренных схем объединения данных в многопозиционных РЛК.

5.5 Выводы

В главе предложен набор показателей качества траекторной обработки в многопозиционных РЛК. Разработанный набор показателей позволяет произвести полноценный, содержательный и достоверный сравнительный анализ схем с

точки зрения эффективности совместного использования информации от нескольких РЛС. Выбранные показатели имеют ясный физический смысл. Предложенные показатели и методика их оценивания были использованы для получения экспериментальных зависимостей, характеризующих эффективность СОД на примере трех схем: СТО с объединением на уровне отметок, СТО с объединением на уровне монотреков, СТО с гибридным объединением. 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. Предложенный набор показателей позволяет произвести объективный сравнительный анализ СТО и осуществить выбор алгоритмов объединения данных в системах траекторной обработки.

6 ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СИСТЕМ ТРАЕКТОРНОЙ ОБРАБОТКИ

6.1 Введение

В предыдущих главах были предложены наборы показателей качества работы каждого этапа ТО. Всего было определено 39 показателей, из них качество обнаружения треков оценивается 3 показателями, ассоциации измерений – 5, фильтрации треков – 12 и совместной обработки данных – 19. Очевидно, что имея в распоряжении такое количество показателей качества работы СТО, решить задачу оценки качества СТО в целом даже для опытного эксперта затруднительно. 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 другая СТО ведет себя наоборот. 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.

Известно [130, 131, 132], что для определения технического состояния объекта в условиях большого количества информации широко применяются экспертные системы, основанные на аппарате нечеткой логики (англ. *Fuzzy Logic*). Понятие «нечеткая логика» ввел американский ученый советского происхождения Лотфи Заде (англ. *Lotfi Zadeh*) в основополагающей работе *Fuzzy Sets*, опубликованной в 1965 г. в периодическом издании *Information and Control* [133]. Нечеткая логика (НЛ) позволяет имитировать человеческий разум, чтобы эффективно использовать способы рассуждения, которые являются приближенными, а не точными в смысле булевой логики. Достижения теории НЛ позволили принимать решения в условиях неопределенности, когда применение точных количественных методов и подходов затруднено или даже невозможно.

6.2 Нечеткий логический вывод

В сущности, процесс нечеткого логического вывода (НЛВ) задает отображение вектора входных данных в скалярный параметр, используя нечеткие отношения и правила [134, 135, 136]. На рисунке 6.1 представлена типовая схема системы НЛВ [134]. Рассмотрим модули, входящие в ее состав.



Рисунок 6.1 – Система нечеткого логического вывода

Фаззификатор преобразует численные значения вектора входных параметров $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ в вектор лингвистических переменных $\tilde{\mathbf{X}} = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n)$, определенных на нечетком множестве [137].

Нечеткая база знаний позволяет представить эмпирические знания экспертов в форме нечетких правил. Нечеткие правила задают зависимость $\tilde{y} = f(\tilde{\mathbf{X}})$ и имеют вид «Если <Условие> – то <Заключение>». В условиях и заключениях фигурируют значения лингвистических переменных. Нечеткая база знаний, связывающая входы $\tilde{\mathbf{X}} = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n)$ с выходом \tilde{y} , представляется следующими образом:

$$(\tilde{x}_{1j} \Theta_j \tilde{x}_{2j} \Theta_j \dots \Theta_j \tilde{x}_{nj}) \Rightarrow \tilde{y}, \quad j=1, \dots, m, \quad (6.1)$$

где \tilde{x}_{ij} – значение лингвистической переменной, которой ставится в соответствие значение переменной x_i в j -м правиле; m – количество правил в базе знаний;

Θ_j – логическая операция, которой может быть логические «И» или «ИЛИ», « \Rightarrow » – нечеткая импликация [134, 136].

Функции принадлежности устанавливают соответствие между множеством значений параметра и множеством значений лингвистических переменных. Лингвистическая переменная принимает значения из множества слов естественного языка, например: «низкий», «средний», «высокий». Значения лингвистической переменной называются нечеткими термами. Соответствие устанавливается в виде степени принадлежности μ_{ij} значения переменной x_i нечеткому терму l_j :

$$\mu_{ij} = \mu_{ij}(x_i), i=1..n, j=1, \dots, m \quad (6.2)$$

Наиболее простой метод построения функций принадлежности – параметрический. Метод состоит в выборе вида функции принадлежности и фиксации характерных точек. Далее дискретное представление функции аппроксимируется наиболее подходящей непрерывной типовой функцией. Получение характерных точек основывается на статистической обработке мнений группы экспертов [134, 136].

Алгоритм нечеткого логического вывода занимает центральное место в системе НЛВ. Собственно, этот алгоритм на основе нечетких правил задает преобразование входного вектора нечетких значений \tilde{X} в выходной скалярный нечеткий параметр \tilde{y} . На сегодняшний день в системах НЛВ наиболее часто применяется один из двух алгоритмов: алгоритм Мамдани (англ. *Mamdani*) и алгоритм Сугено (англ. *Sugeno*). Алгоритм Мамдани впервые применен в системах автоматического управления на основе НЛ. Он был разработан английским математиком Эбрахимом Мамдани в 1975 году, применялся для управления паровым двигателем [138, 139, 140, 141]. Алгоритм Сугено [134, 135] предложен в 1985 г. и во многом похож на алгоритм Мамдани.

Правила НЛВ Мамдани формируются следующим образом:

$$(x_1 = \tilde{x}_{1j} \ominus_j x_2 = \tilde{x}_{2j} \ominus_j \dots \ominus_j x_n = \tilde{x}_{nj} \text{ с весом } w_j) \Rightarrow y = d_j, \quad (6.3)$$

$$j=1, \dots, m$$

где $w_j \in [0; 1]$ – весовой коэффициент j -го правила, означает степень уверенности в истинности получаемого заключения y . База знаний Мамдани формируется интуитивно понятным способом и поэтому имеет удобный для восприятия человеком вид. При этом не возникнет трудностей при необходимости модификации такой базы.

НЛВ Сугено выполняется по следующей схеме:

$$(x_1 = \tilde{x}_{1j} \ominus_j x_2 = \tilde{x}_{2j} \ominus_j \dots \ominus_j x_n = \tilde{x}_{nj}) \Rightarrow \quad (6.4)$$

$$\Rightarrow y = b_{j0} + b_{j1}x_1 + b_{j2}x_2 + \dots + b_{jn}x_n, \quad j = 1, \dots, m$$

где $b_{j0}, b_{j1}, \dots, b_{jn}$ – некоторые действительные числа. Правила в базе знаний Сугено в отличие от базы знаний Мамдани задаются линейной комбинацией входов, а не нечеткими высказываниями. При этом вид функций принадлежности выходного параметра линейный или постоянный. Алгоритм Сугено имеет высокую вычислительную эффективность и хорошо подходит для применения совместно с адаптивными методиками и автоматическими средствами анализа. За подробным описанием алгоритмов нечеткого вывода можно обратиться в [134].

Поскольку пользователем разрабатываемой системы является человек то, основными критерием при выборе алгоритма НЛВ является интуитивность самого алгоритма и простота составления базы правил. Поэтому в разделе 6.3 при синтезе системы НЛВ используется алгоритм Мамдани.

Дефазификатор преобразует выходной нечеткий параметр \tilde{Y} в числовой параметр Y . Дефазификация осуществляется по методу центра тяжести [134].

6.3 Методика оценивания качества СТО и результаты математического моделирования

Для того, чтобы адаптировать систему НЛВ, приведенную на рисунке 6.1, под предметную область необходимо, во-первых, определить лингвистические

переменные и функции принадлежности, во-вторых, сформировать нечеткую базу знаний.

Для решения этих задач был сформулирован «Опросный лист для экспертной оценки показателей качества систем тракторной обработки в РЛК УВД» (см. приложение Б). Данный опросный лист предлагает принять участие экспертов в формировании интегральной оценки качества тракторной обработки. Опросный лист содержит четыре таблицы. Каждая таблица соответствует отдельному этапу тракторной обработки. Таблицы разделены на секции. Количество секций соответствует числу показателей качества, характеризующих конкретный этап тракторной обработки. Для каждого показателя экспертам предлагается определить:

1. Диапазоны значений показателя, соответствующие значениям лингвистических переменных.

2. Степень влияния показателя на качество соответствующего этапа ТО.

Весь диапазон значений показателей качества предлагается характеризовать с помощью следующих значений лингвистических переменных:

«**Низкий**» – входит диапазон значений показателя, соответствующих низкому качеству выполнения этапа;

«**Средний**» – входит диапазон значений показателя, соответствующих умеренному качеству выполнения этапа;

«**Высокий**» – входит диапазон значений показателя, соответствующих высокому качеству выполнения этапа.

Диапазоны значений показателей и лингвистические переменные использовались для получения функций принадлежности показателей качества.

Степени влияния каждого показателя качества на работу соответствующего этапа ТО предлагается характеризовать следующими лингвистическими переменными:

«**Отсутствует или практически отсутствует**» – значение данного показателя не влияет на качество этапа;

«**Низкая**» – значение данного показателя слабо влияет на качество этапа;

«**Средняя**» – значение данного показателя умеренно влияет на качество этапа;

«**Высокая**» – значение данного показателя сильно влияет или определяет качество этапа.

Степени влияния показателей качества использовались при формировании нечеткой базы знаний.

Опросный лист был распространен среди специалистов в области разработки алгоритмов траекторной обработки и средств УВД. Результаты ответов экспертов использовались для построения функций принадлежности показателей качества и формирования базы нечетких правил.

Как отмечалось, процесс траекторной обработки принято делить на четыре этапа: обнаружение треков, ассоциация измерений, фильтрация треков и совместная обработка данных. 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 показателей качества этапов ТО;
- 2) Получение интегральных показателей качества этапов ТО;
- 3) Получение интегрального показателя качества СТО в целом.

Первый шаг методики подробно описан в главах 2 – 5. Следующие два шага реализуются с помощью схемы, приведенной на рисунке 6.2.

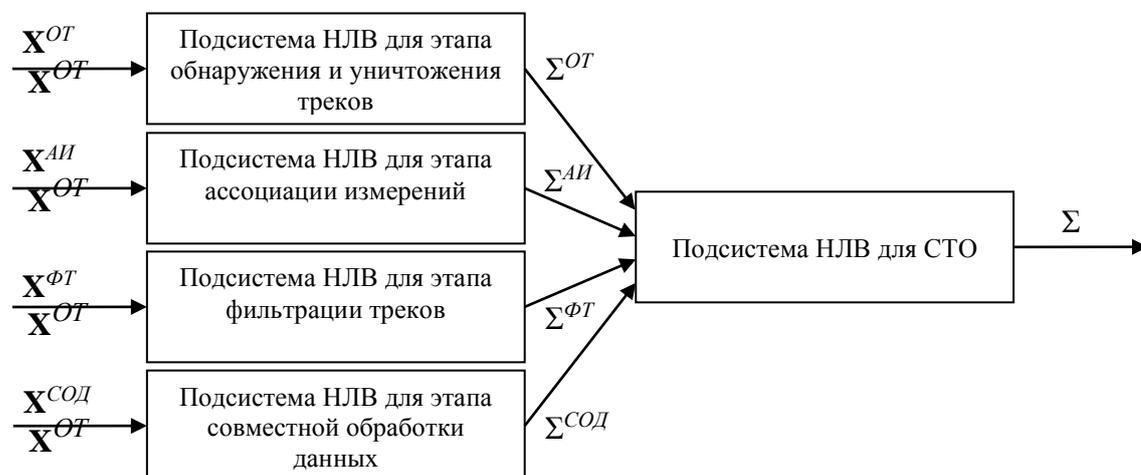


Рисунок 6.2 – Система НЛВ для интегральной оценки качества СТО

Предлагаемая система НЛВ состоит из двух уровней. На первом производится интегральная оценка качества отдельных этапов ТО. На втором – по результатам первого вычисляется интегральный показатель качества СТО. Каждая подсистема НЛВ представляет собой алгоритм НЛВ Мамдани, функциональная схема которого приводится на рисунке 6.1. На вход системы НЛВ для интегральной оценки качества СТО поступают следующие векторы показателей качества:

$$\mathbf{X}^{OT} = \left[P_{ИТ}^{OT} (0 \leq t \leq T_{обн}) \quad P_{ИТ}^{OT} (t \geq T_{обн}) \quad \tau_{обн}^{OT} \quad \Delta\tau_{обн}^{OT} \quad \lambda_{ЛТ}^{OT} \quad \Delta\lambda_{ЛТ}^{OT} \right], \quad (6.5)$$

$$\mathbf{X}^{AI} = \left[\begin{array}{cccccc} P_{ИТ}^{AI} & S_{ИТ}^{AI} & L_{ИТ}^{AI} & v_{ИТ}^{AI} & \Delta v_{ИТ}^{AI} & \tau_{ИТ}^{AI} & \dots \\ \dots & \Delta\tau_{ИТ}^{AI} & v_{ЛТ}^{AI} & \Delta v_{ЛТ}^{AI} & \tau_{ЛТ}^{AI} & \Delta\tau_{ЛТ}^{AI} & \dots \end{array} \right],$$

$$\mathbf{X}^{\Phi T} = \left[\begin{array}{cccccc} b_X^{\Phi T} & s_X^{\Phi T} & b_Z^{\Phi T} & s_Z^{\Phi T} & b_V^{\Phi T} & s_V^{\Phi T} & b_\Phi^{\Phi T} & s_\Phi^{\Phi T} & \dots \\ \dots & m_X^{\Phi T} & m_Z^{\Phi T} & m_V^{\Phi T} & m_\Phi^{\Phi T} & \tau_X^{\Phi T} & \tau_Z^{\Phi T} & \tau_V^{\Phi T} & \tau_\Phi^{\Phi T} \end{array} \right],$$

$$\mathbf{X}^{СОД} = \left[P_{ИТ}^{СОД} \quad E_{ИТ}^{СОД} \quad M_{ИТ}^{СОД} \right],$$

где \mathbf{X}^{OT} – вектор показателей качества обнаружения треков, \mathbf{X}^{AI} – вектор показателей качества ассоциации измерений, $\mathbf{X}^{\Phi T}$ – вектор показателей качества фильтрации треков, $\mathbf{X}^{СОД}$ – вектор показателей качества совместной обработки данных.

Для каждого показателя качества определен набор функций принадлежности. С помощью функций принадлежности производятся операции фаззификации. По результатам интегральной оценки качества этапов ТО получаются следующие показатели:

Σ^{OT} – интегральный показатель качества обнаружения треков;

Σ^{AI} – интегральный показатель качества ассоциации измерений;

$\Sigma^{\Phi T}$ – интегральный показатель качества фильтрации треков;

$\Sigma^{СОД}$ – интегральный показатель качества совместной обработки данных.

После дефаззификации интегральные показатели принимают значения из диапазона $[0; 1]$. Показатели поступают на вход подсистемы НЛВ для СТО, где формируется интегральный показатель качества Σ СТО. Σ принимает значение одной из лингвистических переменных «низкий», «средний», «высокий».

Функции принадлежности задаются в виде комбинации двух гауссовских функций:

$$\mu(x) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{(x-c_1)^2}{2\sigma^2}\right), & x < c_1 \\ 1, & c_1 \leq x \leq c_2 \\ \exp\left(-\frac{(x-c_2)^2}{2\sigma^2}\right), & x > c_2 \end{cases} \quad (6.6)$$

где $\mu \in [0; 1]$ – степень принадлежности значения аргумента x , c_1 (c_2) – минимальное (максимальное) значение ядра нечеткого множества; a_1 (a_2) – коэффициент концентрации левой (правой) части функции принадлежности. Для построения функций принадлежности используется параметрический метод.

На рисунке 6.3 представлены функции принадлежности показателя вероятности обнаружения истинного трека в течение заданного времени обнаружения $P_{ИТ}^{ОТ}(0 \leq t \leq T_{обн})$. Функции задают отображение множества возможных значений параметра на нечеткое множество, состоящее из лингвистических переменных «низкий», «средний», «высокий». Диапазоны значений, границы которых отмечены символами «□», получены по результатам обработки экспертных оценок. Аналогичным образом задаются функции принадлежности всех показателей качества ТО, а также интегральных показателей качества этапов ТО.

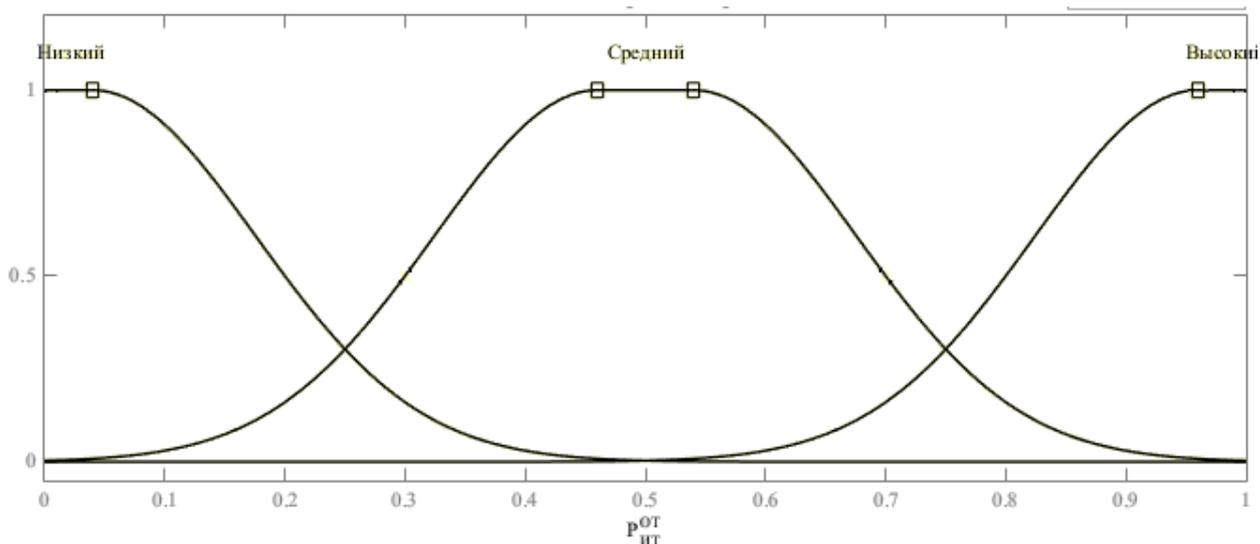


Рисунок 6.3 – Функции принадлежности показателя $P_{ИТ}^{OT}(0 \leq t \leq T_{обн})$

Связь между входными и выходными нечеткими переменными по отношению к подсистеме НЛВ (рисунок 6.2) задается набором нечетких логических правил. Построение базы нечетких правил рассмотрим на примере этапа обнаружения треков. База правил имеет следующий вид:

Правило 1 ($w=1$): $(P_{ИТ}^{OT}(0 \leq t \leq T_{обн}) = \text{«высокий»}) \wedge (\tau_{обн}^{OT} = \text{«высокий»}) \wedge (\lambda_{ЛТ}^{OT} = \text{«низкий»}) \Rightarrow (\Sigma^{OT} = \text{«высокий»})$;

Правило 2 ($w=1$): $(P_{ИТ}^{OT}(0 \leq t \leq T_{обн}) = \text{«низкий»}) \vee \tau_{обн}^{OT} = \text{«низкий»}) \vee \lambda_{ЛТ}^{OT} = \text{«высокий»}) \Rightarrow (\Sigma^{OT} = \text{«низкий»})$;

Правило 3 ($w=1$): $(P_{ИТ}^{OT}(0 \leq t \leq T_{обн}) = \text{«средний»}) \wedge (\tau_{обн}^{OT} \neq \text{«низкий»}) \wedge (\lambda_{ЛТ}^{OT} \neq \text{«низкий»}) \Rightarrow (\Sigma^{OT} = \text{«средний»})$;

Правило 4 ($w=1$): $(P_{ИТ}^{OT}(0 \leq t \leq T_{обн}) \neq \text{«низкий»}) \wedge (\tau_{обн}^{OT} = \text{«средний»}) \wedge (\lambda_{ЛТ}^{OT} \neq \text{«низкий»}) \Rightarrow (\Sigma^{OT} = \text{«средний»})$;

Правило 5 ($w=1$): $(P_{ИТ}^{OT}(0 \leq t \leq T_{обн}) \neq \text{«средний»}) \wedge (\tau_{обн}^{OT} \neq \text{«низкий»}) \wedge (\lambda_{ЛТ}^{OT} = \text{«высокий»}) \Rightarrow (\Sigma^{OT} = \text{«средний»})$;

Правило 6 ($w=0.3$): $(\Delta\tau_{обн}^{OT} = \text{«высокий»}) \wedge (\Delta\lambda_{ЛТ}^{OT} = \text{«высокий»}) \Rightarrow (\Sigma^{OT} = \text{«высокий»});$

Правило 7 ($w=0.3$): $(\Delta\tau_{обн}^{OT} = \text{«низкий»}) \vee (\Delta\lambda_{ЛТ}^{OT} = \text{«низкий»}) \Rightarrow (\Sigma^{OT} = \text{«низкий»});$

Правило 8 ($w=0.3$): $(\Delta\tau_{обн}^{OT} = \text{«средний»}) \wedge (\Delta\lambda_{ЛТ}^{OT} \neq \text{«высокий»}) \Rightarrow (\Sigma^{OT} = \text{«средний»});$

Правило 9 ($w=0.3$): $(\Delta\tau_{обн}^{OT} \neq \text{«низкий»}) \wedge (\Delta\lambda_{ЛТ}^{OT} = \text{«средний»}) \Rightarrow (\Sigma^{OT} = \text{«средний»}),$

где \wedge – операция логической конъюнкции; \vee – операция логической дизъюнкции. Каждому правилу присваивается вес w , соответствующий степени доверия к получаемому заключению. Веса получены по результатам обработки экспертных оценок.

В формировании правил участвуют показатели качества с одинаковой степенью влияния. Правилам, содержащим показатели качества со степенью влияния «Отсутствует или практически отсутствует» присваивается вес $w=0.1$; «низкая» – $w=0.3$; «средняя» – $w=0.7$; «высокая» – $w=1.0$. Таким образом, определяются приоритеты правил. Следует отметить общую закономерность построения баз правил: если показатель качества со степенью влияния «высокая» принимает значение «средний» («низкий»), тогда интегральный показатель качества опускается до значения «средний» («низкий»). Подобным образом базы правил определены для подсистем НЛВ для каждого этапа ТО и подсистемы НЛВ для СТО в целом (рисунок 6.2).

Анализ качества СТО произведен по результатам моделирования процесса автоматического сопровождения ВС по вышеописанной методике. Математический эксперимент проводился на базе модульной СТО. Модульность позволяет быстро изменять конфигурацию СТО [126]. Методика оценивания апробирована на двух конфигурациях СТО, функциональные схемы которых

соответствуют рисункам 5.2 и 5.4. Ниже приводятся состав алгоритмов в исследуемых системах:

СТО-1:

- Алгоритм обнаружения треков: СИ 2/4;
- Алгоритм ассоциации измерений: БС;
- Алгоритм фильтрации треков: ФК;
- Алгоритм совместной обработки данных: СОД-1.

СТО-2:

- Алгоритм обнаружения треков: ПХ 2/3;
- Алгоритм ассоциации измерений: СВАД;
- Алгоритм фильтрации треков: ИММ ФЧ;
- Алгоритм совместной обработки данных: СОД-3.

Анализ качества СТО произведен по результатам моделирования процесса автоматического сопровождения ВС в сценариях, соответствующих стандартным тестам «*EUROCONTROL*» [74], рассмотренным в главах 2 – 5. При оценке этапа фильтрации треков моделировалось два сценария: в первом ВС движется равномерно и прямолинейно, во втором ВС переходит от РПД к правому СР. Характеристики качества первичной обработки РЛС соответствует нормативам стандарта [74]:

Вероятность правильного обнаружения – $D = 0.9$;

Вероятность ложной тревоги – $F = 10^{-6}$;

Среднеквадратическая ошибка определения дальности – $\sigma_R = 70$ м;

Среднеквадратическая ошибка определения азимута – $\sigma_\varphi = 0.08^\circ$.

В таблице 6.1 приведены результаты оценки работы двух СТО: наборы показателей качества X^{OT} , X^{AI} , $X^{ФТ}$ и $X^{СОД}$ (6.4), интегральные показатели качества Σ^{OT} , Σ^{AI} , $\Sigma^{ФТ}$, $\Sigma^{СОД}$ отдельных этапов ТО и интегральные оценки качества СТО в целом Σ . Интегральные показатели качества имеют три возможных значения: «низкий», «средний» и «высокий».

Таблица 6.1 – Результаты оценки качества работы двух СТО

СТО-1		
$\mathbf{X}^{OT} = [0.99 \ 0.01 \ 30 \ 4.5 \ 0.1 \ 0.01]$	$\Sigma^{OT} = \text{высокий}$	$\Sigma = \text{средний}$
$\mathbf{X}^{AI} = \begin{bmatrix} 0.98 & 0.04 & 0.11 & 0.37 & 0.5 & 52.5 & \dots \\ \dots & 13.5 & 0.25 & 0.55 & 36.0 & 13.0 & \dots \end{bmatrix}$	$\Sigma^{AI} = \text{средний}$	
$\mathbf{X}^{\Phi T} = \begin{bmatrix} 4.5 & 168.0 & 4.44 & 164.5 & 1.01 & 1.8 & \dots \\ \dots & 0.017 & 0.3 & 345.5 & 208.1 & 10.8 & \dots \\ \dots & 6.1 & 36.0 & 60.0 & 24.0 & 36.0 & \dots \end{bmatrix}$	$\Sigma^{\Phi T} = \text{средний}$	
$\mathbf{X}^{COD} = [0.992 \ 0.999 \ 0.001]$	$\Sigma^{COD} = \text{высокий}$	
СТО-2		
$\mathbf{X}^{OT} = [0.97 \ 0.03 \ 25.0 \ 3.7 \ 0.05 \ 0.001]$	$\Sigma^{OT} = \text{высокий}$	$\Sigma = \text{высокий}$
$\mathbf{X}^{AI} = \begin{bmatrix} 0.99 & 0.02 & 0.01 & 0.05 & 0.05 & 59.0 & \dots \\ \dots & 12.9 & 0.24 & 0.5 & 35.0 & 12.0 & \dots \end{bmatrix}$	$\Sigma^{AI} = \text{высокий}$	
$\mathbf{X}^{\Phi T} = \begin{bmatrix} 1.75 & 150.0 & 2.0 & 142.0 & 0.58 & 0.75 & \dots \\ \dots & 0.005 & 0.2 & 269.6 & 159.9 & 7.2 & \dots \\ \dots & 2.5 & 36.0 & 60.0 & 24.0 & 24.0 & \dots \end{bmatrix}$	$\Sigma^{\Phi T} = \text{высокий}$	
$\mathbf{X}^{COD} = [0.995 \ 0.999 \ 0.0001]$	$\Sigma^{COD} = \text{высокий}$	

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 показателем качества Σ могут быть рекомендованы для применения в АС УВД.

Как отмечалось в предыдущих главах, соблюдается следующая общая тенденция: при высоком качестве первичной обработки значения показателей, соответствующие различным алгоритмам ТО, отличаются меньше, чем при низком качестве первичной обработки. В отдельных случаях они практически равны друг другу. Поэтому высокие требования к качеству радиолокационных источников наблюдения стандарта [74] вполне оправданы, не только с точки

зрения качества первичной обработки информации, но и последующей траекторной обработки.

Выбранные алгоритмы обнаружения треков имеют высокий интегральный показатель качества. Это говорит о том, что любой из этих алгоритмов удовлетворяет заданным требованиям к качеству ТО.

Алгоритм ассоциации измерений по методу БС в составе СТО-1 уступает алгоритму СВАД, выбранному в СТО-2. Это является следствием отмеченного в третьей главе превосходства байесовских алгоритмов над небайесовскими и глобальной стратегии ассоциации над локальной [123].

Выбранный в СТО-1 в качестве алгоритма фильтрации треков ФК, уступает ИММ ФЧ в СТО-2. Как отмечалось в четвертой главе, это превосходство обусловлено тем, что, во-первых, в составе ИММ фильтра присутствует банк фильтров, каждый из которых рассчитан на особый тип движения, и, во-вторых, ФЧ ближе к оптимальному алгоритму фильтрации траектории, чем ФК [142].

Алгоритмы СОД в обеих СТО имеют высокие показатели качества в заданных сценариях. Это подтверждает эффективность подходов с объединением отметок.

Как уже отмечалось, интегральный показатель качества ТО получается из интегральных показателей качества этапов ТО. База правил для подсистемы НЛВ для СТО (см. рисунок 6.2) организована таким образом, что этапы ТО имеют одинаковый приоритет. Поэтому интегральный показатель определяется худшим показателем качества этапов ТО. Таким образом, из анализа данных таблицы 6.1 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.

6.4 Выводы

В заключительной главе предложена методика решения задачи интегральной оценки качества траекторной обработки. В основе методики лежат:

математическое моделирование 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 получены 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 показатели качества 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 показателей качества.

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 показателя качества 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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АБД	Аэронавигационная база данных
АЗН	автоматического зависимого наблюдения
АИ	Ассоциация измерений
АС УВД	Автоматизированная система управления воздушным движением
АСК-РЛС	Автоматизированная система контроля радиолокационных средств
БД	База данных
БС	Ближайший сосед
ВАД	Вероятностная ассоциация данных
ВМ	Вычислительная машина
ВПП	Время переходного процесса
ВС	Воздушное судно
ВСПП	Высотно-скоростной профиль полета
ГБС	Глобальный ближайший сосед
ДМ	Динамическая модель
ИММ	Интерактивный многомодельный
ИО	Истинная отметка
ИТ	Истинный трек
ЛТХ	Летно-технические характеристики
МГС	Многогипотезное сопровождение
ММА	Многомодельный алгоритм
МСА	Международная стандартной атмосферы
МСУП	Модель системы управления полетом
НЛ	Нечеткая логика
НЛВ	Нечеткий логический вывод
ОТ	Обнаружение треков
ПЗО	Пиковое значение ошибки
ПРВ	Плотность распределения вероятностей
ПС	Программные средства

ПТ	Предсказание траектории
ПХ	Преобразование Хафа
РЛК	Радиолокационный комплекс
РЛС	Радиолокационная станция
РПД	Равномерное прямолинейное движение
РПИ	Район полетной информации
РУД	Равноускоренное движение
РФК	Расширенный фильтр Калмана
СВАД	Совместная вероятностная ассоциация данных
СИ	Серийные испытания
СКО	Среднеквадратическое отклонение
СОД	Совместная обработка данных
СР	Стандартный разворот
СТО	Системы траекторной обработки
СТФК	Сигма-точечный фильтр Калмана
СУБД	Система управления базой данных
ТО	Траекторная обработка
УВД	Управление воздушным движением
ФК	Фильтр Калмана
ФТ	Фильтрация треков
ФЧ	Фильтр частиц
ФЭБ	Фактор энергетического баланса
ЦО	Центр объединения
ЧМИ	Человеко-машинный интерфейс
ADS	Automatic dependent surveillance
AIDB	Aeronautical Information Data Base
ALDT	Actual Landing Time
BADA	Base of Aircraft Data
CAS	Calibrated Air Speed
EKF	Extended Kalman Filter
ESF	Energy Share Factor

ETA	Estimated Time of Arrival
EUROCONTROL	Европейская организация по безопасности воздушной навигации
FDPS	Flight Data Processing System
FIR	Flight Information Region
GNN	Global Nearest Neighbor
ICAO	International Civil Aviation Organization,
IMM	Interactive Multiple Model algorithm
ISA	International Standard Atmosphere
JDL	Joint Directors of Laboratories
JPDA	Joint Probabilistic Data Association
KF	Kalman Filter
MHT	Multi Hypothesis Tracking
MLAT	Multilateration
MMA	Multiple Model Algorithm
NN	Nearest Neighbor
PDA	Probabilistic Data Association
PF	Particle Filter
SASS-C	Surveillance Analysis Support System for ATC Centre
SDPS	Surveillance Data Processing System
SID	Standard Instrument Departure
STAR	Standard Terminal Arrival Route
TAS	True Air Speed
TEM	Total energy Model
UKF	Unscented Kalman Filter
WAM	Wide Area Multilateration
WGS	World Geodetic System

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С.З. Кузьмин – Киев: КВиЦ, 2000. – 428 с.
2. Blackman S.S. Multiple-target tracking with radar applications / S.S. Blackman – London: Artech House, 1986. – 449 p.
3. SRA International. Multilateration & ADS-B Executive Reference Guide / Creativerge, 2009. – 48 p.
4. Гришин Ю.П. Радиотехнические системы / Ю.П. Гришин, В.П. Ипатов, Ю.М. Казаринов – М.: Высшая школа, 1990. – 496 с.
5. Казаринов Ю.М. Радиотехнические системы / Ю.М. Казаринов, Ю.А. Коломенский, В.М. Кутузов – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 592 с.
6. Бакулев П.А. Радиолокационные системы / П.А. Бакулев – М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.
7. Ахмедов Р.М. Автоматизированные системы управления воздушным движением: Новые информационные технологии в авиации. Учебное пособие. / Р.М. Ахмедов, А.А. Бибутов, А.В. Васильев, под ред. С.Г. Пятко, А.И. Красова – СПб.: Политехника, 2004. – 446 с.
8. Бестугин А.Р. Автоматизированные системы управления воздушным движением. Учебное пособие. 2-е издание / А.Р. Бестугин, М.А. Велькович, А. В. Володягин под научной редакцией Ю. Г. Шатракова. – СПб.: Политехника, 2014. – 450 с.
9. Bar-Shalom Y. Multitarget-Multisensor Tracking. Applications and Advances. Vol. 2 / Y. Bar-Shalom, W.D. Blair – London: Artech House, 1992. – 442 p.
10. Bar-Shalom Y. Multitarget-Multisensor Tracking. Applications and Advances. Vol. 3 / Y. Bar-Shalom, W.D. Blair – London: Artech House, 2000. – 608 p.
11. Кузьмин, С. З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации / С. З. Кузьмин. – М.: «Советское радио», 1974. – 432 с.

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

13. Кузьмин С.З. Цифровая обработка радиолокационной информации / С.З. Кузьмин – М.: «Советское радио», 1967 г. – 400 с.

14. Коновалов А.А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации. Часть 1 / А.А. Коновалов – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. – 164 с.

15. Коновалов А.А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации. Часть 2 / А.А. Коновалов – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – 180 с.

16. Веремьев В.И. Оценивание параметров траектории радиолокационной цели с использованием нейродинамических структур / В.И. Веремьев, Д.А. Ковалев // Сборник докладов XVI международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». Том 3 – Воронеж, 13-15 апреля 2010 г. – С. 2247-2253.

17. Коновалов А.А. Алгоритм завязки траектории при многопозиционном сопровождении радиолокационной цели / А.А. Коновалов // Материалы научно-практической конференции «Наукоемкие и инновационные технологии в решении проблем прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий». – СПб, 24-25 ноября 2011. – С. 83-88.

18. Коновалов А.А. Алгоритм последовательного обнаружения траектории радиолокационной цели / А.А. Коновалов // Материалы научно-практической конференции «Геополитические факторы устойчивого развития и инновационные технологии прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций». – СПб, 29 ноября 2012. – С. 142-148.

19. Кутузов В.М. Принципы построения системы совместной траекторной обработки в многопозиционном радиолокационном комплексе мониторинга окружающего пространства / В.М. Кутузов, С.П. Калениченко, А.Г. Попов, В.И. Веремьев, А.А. Коновалов, А.В. Бархатов, В.Н. Михайлов // Сборник докладов

XVIII международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». Том 3. – Воронеж, 17-19 апреля 2012 г. – С. 1453-1461.

20. Коновалов А.А. Разработка системы траекторной обработки для пассивного когерентного локатора / А.А. Коновалов // Известия ВУЗов России. Радиоэлектроника. № 5, 2015. – С. 3-9.

21. Черняк В. С. Многопозиционная радиолокация / В. С. Черняк. – М.: «Радио и связь», 1993. – 418 с.

22. Фарбер В. Е. Основы траекторной обработки радиолокационной информации в многоканальных РЛС. Учебное пособие / В. Е. Фарбер. – М.: МФТИ, 2005. – 160 с.

23. Фалькович С. Е., Костенко П. Ю. Основы статистической теории радиотехнических систем / С. Е. Фалькович, П. Ю. Костенко. Учебное пособие. – Харьков: Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», 2005. – 390 с.

24. Хомяков Э. Н. Радиоэлектронные пространственно-временные системы и комплексы. Введение в статистическую теорию: учебное пособие / Э. Н. Хомяков. – Харьков : Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», 1993. – 99 с.

25. Ширман Я.Д. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник / Ширман Я.Д. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.

26. Bar-Shalom Y. Multitarget-Multisensor Tracking: Principles and Techniques / Y. Bar-Shalom, X.R. Li. – Storrs, CT: YBS Publishing, 1995. – 615 p.

27. Bar-Shalom Y. Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory, Algorithms, and Software / Y. Bar-Shalom, X. R. Li., T. Kirubarajan – New York: John Wiley & Sons, 2001. – 558 p.

28. Bar-Shalom Y. Tracking and Data Association / Y. Bar-Shalom, T. E. Fortmann – Academic Press, 1988. – 353 p.

29. Blackman S. Design and Analysis of Modern Tracking Systems / S. Blackman, R. Popoli – London: Artech House, 1999. – 1230 p.

30. Бар-Шалом Я. Траекторная обработка. Принципы, способы и алгоритмы: часть первая / Я. Бар-Шалом, Х. Р. Ли – М.: МГТУ им. Баумана, 2011. – 271 с.
31. Бар-Шалом Я. Траекторная обработка. Принципы, способы и алгоритмы: часть вторая / Я. Бар-Шалом, Х. Р. Ли – М.: МГТУ им. Баумана, 2011. – 239 с.
32. Farina A. A. Radar Data Processing. Volume I: Introduction and Tracking / A. A. Farina, F. A. Studer – Letchworth: Research Studies Press Ltd., 1985. – 325 p.
33. Farina A.A. Radar Data Processing. Volume I: Advanced topics and applications. / A. A. Farina, F. A. Studer. – Letchworth: Research Studies Press Ltd., 1986. – 362 p.
34. Фарина А. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей. / Фарина А., Студер Ф. Перевод с английского. – М.: «Радио и связь», 1993. – 320 с.
35. Li X. R. A Survey of Maneuvering Target Tracking: Part I. Dynamic Models / X. R. Li, V. P. Jilkov // Proceedings of SPIE, Orlando, FL, USA, April 2000. – 24 p.
36. Li X. R. A Survey of Maneuvering Target Tracking. Part II: Ballistic Target Models / X. R. Li, V. P. Jilkov // Proceedings of SPIE, San Diego, CA, USA, July-August 2001. – 23 p.
37. Li X. R. A Survey of Maneuvering Target Tracking. Part III: Measurement Models. / X. R. Li, V. P. Jilkov // Proceedings of SPIE, San Diego, CA, USA, July-August 2001. – 24 p.
38. Li X. R. A Survey of Maneuvering Target Tracking. Part IV: Decision-Based Methods / X. R. Li, V. P. Jilkov // Proceedings of SPIE. Orlando, FL, USA, August 2002. – 24 p.
39. Li X. R. A Survey of Maneuvering Target Tracking. Part V: Multiple-Model Methods / X. R. Li, V. P. Jilkov // IEEE Trans. on aerospace and electric systems vol. 41, № 4, 2005. – pp. 1255 – 1321.

40. Kirubarajan T. Ground Target Tracking with Topography-Based Variable Structure IMM Estimator, / T. Kirubarajan, Y. Bar-Shalom, K. R. Pattipati, I. Kadar // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 36, No. 1, January 2000. – pp. 26-46.

41. Wang H. Precision Large Scale Air Traffic Surveillance Using an IMM Estimator with Assignment / H. Wang, T. Kirubarajan, Y. Bar-Shalom // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 35, No. 1, January 1999. – pp. 255-266

42. Kirubarajan T. IMM PDAF for Radar Management and Tracking Benchmark with ECM / T. Kirubarajan, Y. Bar-Shalom, W.D. Blair, G.A. Watson // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. Vol. 34, No. 4, October 1998. – pp. 1115 – 1134.

43. Blair W. D. Benchmark for Radar Allocation and Tracking Targets in ECM / W.D. Blair, G.A. Watson, T. Kirubarajan, Y. Bar-Shalom // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 34, No. 4, October 1998. – pp. 1097 – 1114.

44. Меркулов В. И. Способы и алгоритмы построения траекторий радиоизлучающих целей в авиационных многопозиционных пассивных угломерных системах / В. И. Меркулов, Е. В. Попов, В. С. Чернов // «Успехи современной радиотехники», Москва: Издательство «Радиотехника». 2013. № 11. – С. 60 – 68.

45. Богомолов Н. П. Децентрализованная система траекторной обработки информации в многопозиционной радиолокационной системе с обратной связью / Н. П. Богомолов, В. Г. Сидоров, Г. Я. Шайдуров, И. В. Лютиков // «Радиотехника», Москва: Издательство «Радиотехника». 2013. № 6. – С. 43 – 45.

46. Коновалов А. А. Алгоритм завязки траектории цели в асинхронном многопозиционном радиолокационном комплексе / А. А. Коновалов // «Радиотехника», Москва: Издательство «Радиотехника». 2012. № 7. – С. 50 – 55.

47. Nadarajah N., IMM Forward Filtering and Backward Smoothing for Maneuvering Target Tracking / N. Nadarajah, R. Tharmarasa, M. McDonald, T.

Kirubarajan // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 48, No. 3, July 2012. – pp. 2673 – 2678

48. Roy A. Multi-target trackers using cubature Kalman filter for Doppler radar tracking in clutter / A. Roy, D. Mitra // IET Signal Processing. Volume: 10, Issue: 8, 2016, – pp. 888 – 901.

49. Кутузов В. М. Принципы построения системы совместной траекторной обработки в многопозиционном радиолокационном комплексе мониторинга окружающего пространства / В. М. Кутузов, С. П. Калениченко, А. Г. Попов, В. И. Веремьев, А. А. Коновалов, А. В. Бархатов, В. Н. Михайлов // Сборник докладов конференции RLNC-2012. Том 3, секции 6-10, апрель 2012 г., Воронеж. – С. 1454 – 1462.

50. Семенов А. Н. Обзор алгоритмов завязки и подтверждения траекторий / А. Н. Семенов, Г. П. Слукин, А. Н. Савельев // Сборник докладов конференции RLNC-2013. Том 3, секции 15, 16, 16-18 апреля 2013 г., Воронеж. С. 2195 – 2202.

51. Костоглотов А. А. Синтез фильтра сопровождения с адаптацией к маневру на основе объединенного принципа максимума / А. А. Костоглотов, А. А. Кузнецов, С. В. Лазаренко, Б. М. Ценных // Сборник докладов конференции RLNC-2015. Том 2, секции 8-10, 14-16 апреля 2015 г., Воронеж. – С. 1734 – 1744.

52. Jinbin F. A novel state dependent VS-IMM tracker for GMTI radar / F. Jinbin, S. Jinping, Wei S. Xianzhong // International radar conference, Hangzhou, China. 14-16 October 2015,

53. Fu J. B. Maneuvering target tracking with improved unbiased FIR filter / J. B. Fu, J. Sun, G. Fei, S. Lu // Radar Conference (Radar), 2014 International. 13-17 October 2014.

54. Jiang H. Radar detection of Swerling 3 target in G0-distributed clutter via track-before-detect / H. Jiang, W. Yi, L. Kong, X. Yang, B. He // IEEE Radar Conference, 2-6 May 2016.

55. Kabakchiev C. Data association algorithm in multiradar system / C. Kabakchiev, I. Garvanov, L. Doukovska, V. Kyovtorov, H. Rohling // IEEE Radar Conference, 26-30 May 2008.
56. Jiang H. Radar detection and tracking of targets in the presence of clutter edge via DP-TBD / H. Jiang, W. Yi, G. Cui, L. Kong // Radar Conference IEEE, 10-15 May 2015.
57. Lu K. The exact algorithm for multi-sensor asynchronous track-to-track fusion / K. Lu, K. C. Chang, R. Zhou // Information Fusion (Fusion), 18th International Conference on. 6-9 July 2015.
58. Wang W. A novel multiple-model treatment for maneuvering target tracking / W. Wang, J. Zhou J., X. Qu // Information Fusion (FUSION), 19th International Conference on, 5-8 July 2016.
59. Bruzzone L. A particle filter for multi-target tracking in track before detect context / L. Bruzzone, F. Bovolo // Proc. SPIE, Image and Signal Processing for Remote Sensing XXII, October 2016, – 6 p.
60. Ranney K. I. Investigation of target and ground clutter reflections on the correlation between transmitted and received noise signals / K. I. Ranney, A. Doerry // Proc. SPIE, Radar Sensor Technology XX, May 2016. – 11 p.
61. Arturi D. X band radar target tracking in marine environment: A comparison of different algorithms in a real scenario / D. Arturi, L. Crocco, F. Serafino // 10th European Conference on Antennas and Propagation, 10-15 April 2016.
62. Zhang M. Variable structure multiple model particle filter for maneuvering radar target tracking / M. Zhang, W. Chen // International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, 8-10 May 2010.
63. Konovalov A. A. Radar target sequential track formation algorithm / A. A. Konovalov, E. N. Vorobev // International Conference on Soft Computing and Measurements, 25-27 May 2016.

64. Kazimierski W. Adjusting multiple model neural filter for the needs of marine radar target tracking / W. Kazimierski, A. Stateczny // Radar Symposium (IRS), 7-9 Sept. 2011.
65. Бакут П. А. Обнаружение движущихся объектов / П. А. Бакут, Ю. В. Жулина, Н. А. Иванчук – М.: «Советское радио», 1980. – 288 с.
66. Davey S. J. A Comparison of Detection Performance for Several Track-before-Detect Algorithms / S. J. Davey, M. G. Rutten, B. Cheung // Information Fusion, 2008 11th International Conference on, 2008, – pp. 1 – 8.
67. Coraluppi S. Benchmark Analysis of NURC Multistatic Tracking Capability / S. Coraluppi, C. Carthel // The 9th International Conference on Information Fusion, 2006. – 11 p.
68. Maludrottu S. Performance Evaluation of Multisensor Architectures for Tracking. Multi-camera and Multi-modal Sensor Fusion Algorithms and Applications / S. Maludrottu, A. Dore // M2SFA2008: Workshop on Multi-camera and Multi-modal Sensor Fusion, 2008. – 12 p.
69. Coraluppi S. MSTWG Multistatic Tracker Evaluation Using Simulated Scenario Data Sets / S. Coraluppi, C. Hempel, B. Cour // 11th International Conference on Information Fusion, 2008, – pp. 1807 – 1814.
70. Leung H. Evaluation of multiple radar target trackers in stressful environments / H. Leung, H. Zhijian, M. Blanchette // IEEE Transactions on Aerospace and electronics systems. Vol. 35. 1999. – pp. 663 – 674.
71. Xiaofan H. A Track Quality Based Metric for Evaluating Performance of Multitarget Filters / H. Xiaofan, R. Tharmarasa, T. Kirubarajan, T. Thayaparan // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. Vol. 49, 2013. – pp. 610 – 616.
72. Kirubarajan T. Target Motion Analysis in Clutter for Passive Sonar Using Amplitude Information / T. Kirubarajan, Y. Bar-Shalom Y. // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 32, No. 4, 1996. – pp. 1367 –1384.

73. Hofmann M. O. Complexity and Performance Assessment for Data Fusion Systems / M. O. Hofmann, S. M. Jameson // Lockheed Martin Advanced Technology Laboratories. April 1998. – 16 p.

74. Sunnen A. Eurocontrol Standard Document for Radar Surveillance in En-Route Airspace and Major Terminal Areas / A. Sunnen, P. Escritt, W. Philipp. – Brussels: Eurocontrol Agency, 1997. – 103 p.

75. Zeebroek Y. Surveillance Analysis Support System for ATC-Centre V-7 User Manual / Y. Zeebroek, E. Voet – Brussels: Eurocontrol Agency, 2011. – 632 p.

76. 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.

77. Besada J. ATC trajectory reconstruction for automated evaluation of sensor and tracker performance / J. Besada, A. Soto, G. Miguel, J. Garcia, E. Voet // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine Vol.: 28, Issue: 2, February 2013, – pp. 4 – 17

78. Besada J. TRES: Multiradar-Multisensor Data Processing assessment using Opportunity Traffic / J. Besada, G. Miguel, A. Soto, J. Garcia, E. Voet // IEEE Radar Conference. Rome 2008, – pp. 1 – 6.

79. Приказ от 18 января 2005 года «Об утверждении Федеральных авиационных правил “Летные проверки наземных средств радиотехнического обеспечения полетов, авиационной электросвязи и систем светосигнального оборудования гражданской авиации”». 2011. – 56 с.

80. Патент № 22560. Автоматизированная система контроля радиолокационных средств / А. В. Алферьев, В. А. Беломутский, В. А. Бочков, А. М. Миролюбов, Н. А. Миролюбова, О. А. Остапенко, И. Н. Янушевич. 2002.

81. Миролюбов А. М. Методы контроля характеристик радиолокационных средств УВД в автоматизированных системах. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. М. Миролюбов – СПб, 2004. – 128 с.

82. Миролубов А. М. Влияние тактических характеристик РЛС на количество радиолокационной информации / А. М. Миролубов // Труды VIII международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». Том 3. – Воронеж, 2002. – С. 1609- 1615.

83. Миролубов А. М. Информационные характеристики радиолокационных систем / А. М. Миролубов // Материалы VI научной сессии аспирантов. Часть I, технические науки. – СПб.: . ГУАП. 2003. – С. 112-114.

84. Миролубов А. М. Автоматизированные системы контроля радиолокационных средств: Методические материалы/ А. М. Миролубов // ГУАП, ИЭТГА. – СПб. 2002.

85. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2009. – 22 с.

86. Монаков А. А. Обнаружитель движущейся цели для радиолокационного приемника на основе алгоритма Хафа / А. А. Монаков // Сборник докладов международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж, 2014. – С. 1584–1594.

87. Alexiev K. Implementation of Hough Transform as track detector / K. Alexiev // Third International Conference on Information Fusion, 2000, Vol. 2, – pp. THC4/11–THC4/16.

88. U.S. Patent No. 3069654 Method and means for recognizing complex patterns / Hough P. V. C. – USA, 18 December 1962.

89. Hu Z. Statistical performance analysis of track initiation techniques / Z. Hu, H. Leung, M. Blanchette // IEEE Transactions on Signal Processing, Volume: 45, Issue: 2, 1997. – pp. 445 – 456.

90. Reid D. B. An algorithm for tracking multiple targets / D. B. Reid // IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 24, No. 6, 1979. – pp. 843 – 854.

91. Blackman S. Multiple Hypothesis Tracking for multiple target tracking / Blackman S. // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 19, No.1, 2003 / – pp. 5 – 18.

92. Munkres J. Algorithms for the Assignment and Transportation Problems / J. Munkres // Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, Vol. 5, No.1, 1957. – pp. 32 – 38.
93. Kirubarajan T. Probabilistic data association techniques for target tracking in clutter / T. Kirubarajan, Y. Bar-Shalom // Proceedings of the IEEE Vol. 92, Issue 3, 2004, – pp. 536 – 557.
94. Миролубов А. М. Траекторная обработка на основе метода вероятностного объединения данных / Миролубов А. М., Монаков А. А. // Оборонная техника. №9. 2003. – С.38-41.
95. Fortmann T. E. Multitarget tracking using joint probabilistic data association / T. E. Fortmann, Y. Bar-Shalom, M. Scheffe // Proc. of 19th IEEE Conf. Decision and Control, 1980. – pp. 807 – 812.
96. Blom H. A. P. Combining IMM and JPDA for tracking multiple maneuvering targets in clutter / H. A. P. Blom, E. A. Bloem // ISIF, 2002. –p. 705 – 712.
97. Pham N. T. Combining JPDA and particle filter for visual tracking. / N. T. Pham, K. Leman, M. Wong // Multimedia and Expo (ICME) IEEE International Conference on. 2010.
98. Kalman R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems / R. E. Kalman // Transactions of the ASME. Journal of Basic Engineering (Series D), 1960. – pp. 35 – 45.
99. Kalman R. E. New Results in Linear Filtering and Prediction Theory / R. E. Kalman, R. S. Bucy // Transactions of the ASME. Journal of Basic Engineering (Series D), 1961. – pp. 95 – 108.
100. Балакришнан А. В. Теория фильтрации Калмана. / А. В. Балакришнан // Перевод с англ. С. М. Зуева, под ред. А.А. Новикова. – М.: Мир, 1988. – 168 с.
101. Рязанцев Л. Б. Многомодельное байесовское оценивание вектора состояния маневренной воздушной цели в дискретной времени / Л. Б. Рязанцев // Вестник ТГТУ, № 4, Том 15, 2009. – С. 729 – 739.

102. Julier S. J. A New Extension of the Kalman Filter to Nonlinear Systems / S. J. Julier, J. K. Uhlmann // Proc. of SPIE, July 1997. – 12 p.
103. Julier, S. A New Method for the Nonlinear Transformation of Means and Covariances in Nonlinear Filters / S. Julier, J. Uhlmann. // IEEE Transactions on Automatic Control. Vol. 45, 2000. – pp. 477 – 482
104. Gustafsson F. Particle filters for positioning, navigation, and tracking / F. Gustafsson, F. Gunnarsson, N. Bergman // IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 50, Issue: 2, 2002, pp. 425 – 437.
105. Sanjeev A. M. A Tutorial on Particle Filters for Online Nonlinear/Non-Gaussian Bayesian Tracking / A. M. Sanjeev, S. Maskell, N. Gordon, T. Clapp // IEEE Transactions on signal processing, Vol. 50, – pp. 174 – 188.
106. Yuan X. Models and Algorithms for Tracking Target with Coordinated Turn Motion / X. Yuan, F. Lian, C. Han // Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering Vol. 2014, 10 p.
107. Blom H. A. P. The Interacting Multiple Model algorithm for systems with Markovian switching coefficients / H. A. P. Blom., Y. Bar-Shalom // IEEE Tr. on Automatic Control, Vol. 33, 1988, – pp. 780 –783.
108. Besada J. A. Design of IMM filter for radar tracking using evolution strategies / J. A. Besada, J. Garcia, De G. Miguel, A. Berlanga. // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems Vol. 41, Issue: 3, 2005. pp. 1109 – 1122
109. Сычев М. И. Траекторная обработка радиолокационной информации на основе упрощенных многомодельных фильтров / М. И. Сычев // Журнал «Электросвязь», номер 10, 2016. – С. 32-37.
110. Данилов С. Н. Алгоритм прогноза координат воздушных объектов для обеспечения функционирования системы направленной связи на основе систем со случайным изменением структуры / С. Н. Данилов, А. П. Пудовкин, Р. Р. Шатовкин Вестник ТГТУ, Том 15. №3, Тамбов, 2009. – С. 530-539.
111. Bar-Shalom Y. Tracking a maneuvering target using input estimation versus the interacting multiple model algorithm / Y. Bar-Shalom, K. C. Chang, H. A. P. Blom,

// IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 25, no. 2, , 1989. – pp. 296–300.

112. Shen J. Evaluation of Unscented Kalman Filter and Extended Kalman Filter for Radar Tracking Data Filtering / J. Shen, Y. Liu, S. Wang, Z. Sun // European Modelling Symposium, 21-23 Oct. 2014, – pp. 190 –194.

113. Zhao Z. Comparison of Several Space Target Tracking Filters. / Z. Zhao, H. Chen, G. Chen, C. Kwan, X. R. Li // Proceedings of SPIE, May 2009. – 12 p.

114. Simon D. Optimal State Estimation: Kalman, H Infinity, and Nonlinear Approaches / D. Simon // John Wiley & Sons inc., 2006. – 552 p.

115. White J., A model for data fusion / J. White // Proc. 1st Natl. Symp. Sensor Fusion, vol. 2, 1988.

116. White, J., Data Fusion Lexicon, Joint Directors of Laboratories, Technical Panel for C3, Data Fusion Sub-Panel, Naval Ocean Systems Center, San Diego, 1991. – 16 p.

117. Steinberg A. Revisions to the JDL Data Fusion Model. / Steinberg, A., C. Bowman, J. White. // Proc. 3rd NATO/IRIS Conf., Quebec City, Canada, 1998. – 17 p.

118. Steinberg A.. Rethinking the JDL Data Fusion Levels / A. Steinberg, C. Bowman // Proc. of national symposium on sensor data fusion, 2004. – 18 p.

119. Gomord P. Multi Sensor Data Fusion Architectures for Air Traffic Control Applications / P. Gomord, N. Honore, L. Ostorero // THALES Air Systems, 2009. – 21 p.

120. Jia H. Cranfield University 2004 Data Fusion Methodologies for Multisensor Aircraft Navigation Systems / H. Jia // PhD thesis. – 264 p.

121. Smith D. Approaches to Multisensor Data Fusion in Target Tracking: A Survey / D. Smith, S. Singh // IEEE Trans. on knowledge and data engineering, Vol. 18, No. 12, December 2006. – pp. 1696 – 1710.

122. Castanedo F. A Review of Data Fusion Techniques / F. Castanedo // Hindawi Publishing Corporation the Scientific World Journal Volume 2013. – 19 p.

123. 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», М.: Издательство «Радиотехника». 2016. № 8. С. 55 – 66.

124. 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. Воронеж. – С. 594 – 609.

125. 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.

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

127. 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 – 1753.

128. 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.

129. Киселев В. Ю. Анализ характеристик качества алгоритмов обнаружения траекторий в радиотехнических системах управления воздушным движением / В. Ю. Киселев // Сборник трудов 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. 17-25 апреля 2014г., Санкт-Петербург, ЛЭТИ. – С. 55 – 56.

130. Liua D. M. Trajectory tracking in aircraft landing operations management using the adaptive neural fuzzy inference system / D. M. Liua, G. Naadimuthub, E. S. Leea // *Computers & Mathematics with Applications*, Vol. 56, Issue 5, September 2008. – pp. 1322–1327.

131. Nho K. Automatic Landing System Design Using Fuzzy Logic / K. Nho, R. K. Agarwal // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 23, No 2, 2000, – pp. 298 – 304.

132. Livchitz M. Development of an automated fuzzy logic based expert system for unmanned landing / M. Livchitz, A. Abershitz, U. Soudak, A. Kandel // *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 93, Issue 2, 16 January 1998, – pp. 145 – 159.

133. Zadeh L. Fuzzy Sets / L. Zadeh // *Information and Control*, Vol. 8, 1965. – pp. 338-353.

134. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба // М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.

135. Асаи К.. Прикладные нечеткие системы: Перевод с японского / К. Асаи, Д. Ватада, С. Иваи. // М.: Мир, 1993. – 368 с.

136. Mendel J. M. Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial / Mendel J. M. // *Proceedings of the IEEE* Vol. 83, Issue 3, March 1995, – pp. 345 – 377

137. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. А. Заде // М.:Мир, 1976. – 165 с.

138. Mamdani E. H. An Experiment in Linguistic Synthesis With a Fuzzy Logic Controller/ E. H. Mamdani, S. Assilion // *International Journal Man-Machine Stud7*, 1974, – pp. 1 – 13.

139. Ходашинский И. А. Технология идентификации нечетких моделей типа Синглтон и Мамнади / И. А.Ходашинский // Труды VII международной

конференции «Идентификация систем и задачи управления», Москва, 28-31 января 2008. С. 137 – 163.

140. Cordo O. A historical review of evolutionary learning methods for Mamdani-type fuzzy rule-based systems: Designing interpretable genetic fuzzy systems / O. Cordo // *International Journal of Approximate Reasoning* 52, 2011. – pp. 894 – 913.

141. Marquez A. A, Rule Base and Inference System Cooperative Learning of Mamdani Fuzzy Systems with Multiobjective Genetic Algorithms / A. A Marquez, F. A. Marquez, A. Peregrin // *Proceedings of the 2009 IFSA-EUSFLAT Conference, Lisbon, Portugal, July 20-24, 2009.* – 6 p.

142. 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», Москва: Издательство «Радиотехника». 2017. № 2. С. 34 – 49.

143. 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». 18 – 20 ноября 2013, Киев. – с. 29.

144. 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 – 1237.

145. 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.

146. Fairclough I. PHARE Advanced Tools Trajectory Predictor Final Report Version 1.0 / I. Fairclough, D. McKeever // EUROCONTROL DOC 98-70-18, August 12, 1999. – 50 p.
147. Morton S. EUROCONTROL Specification for Trajectory Prediction Edition 1.0 / S. Morton, P. Dias, J. Garnier, B. Redeborn // EUROCONTROL-SPEC-0143, July 15, 2010. – 60 p.
148. Nuic A. User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.12 / A. Nuic // EUROCONTROL Experimental Centre, August 2014. – 106 p.
149. Glover W. A Multi-Aircraft Model for Conflict Detection and Resolution Algorithm Evaluation / W. Glover, J. Lygeros // IST-2001032460 of European Commission, February 18, 2004. – 49 p.
150. Airlines Electronic Engineering Committee. Navigation System Data Base. ARINC Specification 424-15 // Aeronautical Radio, Inc., February 11, 2000. – 361 p.
151. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Издание второе, переработанное и дополненное / Л. Т. Матвеев. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 751 с.
152. Poles D. Revision of Atmosphere Model in BADA Aircraft Performance Model / D. Poles // EUROCONTROL Experimental Centre, February 2010. – 162 p.
153. Slattery R. Trajectory Synthesis for Air Traffic Automation / R. Slattery, Y. Zhao // Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1997, vol. 20, no 2, – pp. 232–238.
154. Caron G. M. Online Learning for Ground Trajectory Prediction / G. M. Caron, M. Schoenauer, P. Saveant, A. Hadjaz // Proceedings of the 2nd SESAR Innovation Days (2012), EUROCONTROL, 2012. – 8 p.
155. Ландау Л. Д. Теоретическая физика. Том I. Механика. Издание 5-е, стереотипное / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц – М.: Физматлит, 2004. – 224 с.
156. Бахвалов Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. Кобельков – М.: Бином, 2001 – 636 с.

157. Morton S. EUROCONTROL Specification for Monitoring Aids / S. Morton, P. Dias, J. Garnier, B. Redeborn // EUROCONTROL-SPEC-0142, Edition 1.0, July 15, 2010. – 27 p.

158. National Imagery and Mapping Agency. Department of Defense World Geodetic System 1984. Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems // Technical Report TR8350.2, Third Edition, Amendment 1, January 3, 2000. – 175 p.

159. Blythe W. ADS-B Implementation and Operations Guidance Document / W. Blythe, H. Anderson, N. King // International Civil Aviation Organization. Asia and Pacific Ocean, September 5, 2011. – 38 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
ПРЕДСКАЗАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ВОЗДУШНОГО СУДНА
В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ
УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

1 Введение

Совершенствование АС УВД определяет необходимость разработки и применения программных средств предсказания траекторий воздушных судов [146, 147]. Под предсказанием траектории (ПТ) понимается расчет времени прохождения ВС последовательных точек маршрута, соответствующих высот и скоростей от начала и до окончания полета на основании данных плана полета. Синтез средств ПТ наземного базирования является актуальной задачей, поскольку результаты ПТ используются для решения следующих задач УВД [146, 147]:

1. Распределение информации о ходе полетов по рабочим местам диспетчеров секторов УВД;
2. Определение загрузок секторов воздушного пространства для подсистемы планирования полетов;
3. Корреляция текущих планов полетов с соответствующими системными траекториями ВС, которые генерируются в подсистеме траекторных наблюдений АС УВД;
4. Определение времени прохождения ВС точек маршрута прибытия и времени посадки ВС на заданные взлетно-посадочные полосы;
5. Определение времени прохождения ВС точек маршрута взлета с учетом существующих очередей на взлет и посадку;
6. Среднесрочное обнаружение потенциально опасных и конфликтных ситуаций в контролируемом АС УВД воздушном пространстве.

Применение ПТ способствует повышению безопасности воздушного движения и эффективности использования воздушного пространства,

сокращению частоты авиационных происшествий, увеличению пропускной способности аэропортов и сокращению задержек отправления и прибытия ВС.

Данное приложение посвящено вопросам синтеза, использования и оценки точности программных средств (ПС) ПТ в соответствии с рекомендациями Европейской организации по безопасности воздушной навигации *EUROCONTROL*¹. Впервые применение ПСПТ было предложено *EUROCONTROL* в конце 90-х годов при разработке облика перспективной системы АС УВД в рамках проекта *PHARE (Programme for Harmonised ATM Research in EUROCONTROL)* [146]. В этом проекте ПСПТ (*Trajectory Prediction Advance Tool*) были названы в числе основных сервисов необходимых для эффективной работы других составных частей АС УВД нового поколения. В окончательном виде требования к ПСПТ были сформулированы в технической спецификации [147].

2 Программные средства предсказания траектории ВС

При проведении расчетов четырехмерной траектории ВС принято рассматривать в последовательном прохождении следующих этапов полета [146, 148]:

1. Взлет и набор высоты – этап полета, на котором происходит отрыв ВС от взлетно-посадочной полосы, существенное увеличение высоты и выход на заданную высоту (эшелон);
2. Крейсерский этап – движение на эшелоне, назначенном в плане полета;
3. Снижение и посадка – этап полета, на котором происходит существенное уменьшение высоты полета и приземление ВС на взлетно-посадочную полосу.

Структурная схема ПСПТ с источниками входных данных приведена на рисунке А.1 [149]. ПСПТ включают в себя динамическую модель ВС (ДМВС) и модель системы управления полетом (МСУП). ПСПТ сопрягаются со следующими источниками информации и базами данных:

¹ Именно в силу этого в тексте часто используются англоязычные термины и аббревиатуры.

1. Плановая подсистема (*Flight Data Processing System, FDPS*);
2. Система наблюдения воздушного пространства (*Surveillance Data Processing System, SDPS*).
3. Метеорологический сервер (*Meteo Server*);
4. База летно-технических характеристик (ЛТХ) ВС (*Base of Aircraft Data, BADA*);
5. Аэронавигационная база данных (АБД) (*Aeronautical Information Data Base, AIDB*);
6. Модель международной стандартной атмосферы (МСА) (*International Standard Atmosphere, ISA*);

Дадим краткую характеристику перечисленных источников информации и баз данных. По мере изложения материала эти сведения будут уточняться.

Плановая подсистема (*FDPS*) ответственна за обработку, обновление текущей плановой информации. Плановая подсистема обеспечивает доступ диспетчеров АС УВД к плановой информации, а также координацию соседних центров УВД.

Система наблюдения воздушного пространства (*SDPS*) использует данные о местоположении ВС в зоне ответственности АС УВД, получаемые от первичных и вторичных радиолокаторов, а также от системы автоматического зависимого наблюдения (*Automatic dependent surveillance, ADS*) и многопозиционной радионавигационной системы (*Wide Area Multilateration, WAM*). На основании этих данных в системе формируются треки ВС, которые являются оценками их истинных траекторий.

Метеорологический сервер собирает и предоставляет АС УВД необходимую информацию о состоянии погоды в зоне ответственности. Эта информация получается от метеорологических средств наблюдения за состоянием атмосферы.

База летно-технических характеристик ВС (*BADA*) содержит данные по более чем четырёмстам типам ВС, состоящим в летной эксплуатации в настоящее

время [148]. База была разработана компанией *Boeing* по заданию *EUROCONTROL* специально для задач моделирования и предсказания траекторий ВС в контексте работы АС УВД.

Аэронавигационная база данных (*AIDB*) содержит информацию о трассах полета, стандартных маршрутах вылета (*Standard Instrument Departure, SID*) и прилета (*Standard Terminal Arrival Route, STAR*). Информация представлена в международном стандартном формате *ARINC-424* [150].

Модель международной стандартной атмосферы (*ISA*) является политропной моделью атмосферы [151, 152]. Модель позволяет рассчитать статические параметры атмосферы (температура, давление, плотность воздуха и скорость звука), индикаторную воздушную скорость (*Calibrated Air Speed, CAS*), истинную воздушную скорость (*True Air Speed, TAS*) и число Маха (*Mach*) ВС на любой высоте, исходя из результатов измерения температуры и давления на поверхности земли.

Рассматриваемые ПСПТ имитируют полет ВС по заданному маршруту в условиях реальной атмосферы.



Рисунок А.1 – Структурная схема ПСПТ

На вход МСУП поступает план полета. В результате обработки плана полета формируется сценарий полета. Сценарий полета включает в себя высотно-скоростной профиль полета (ВСПП) и географические координаты контрольных точек маршрута со временем их прохождения.

Сценарий полета поступает на вход МСУП. На другой вход МСУП поступает вектор состояния ВС, элементами которого являются координаты, составляющие вектора скорости, углы ориентации и масса ВС с выхода ДМВС. В МСУП вычисляется рассогласование сценарных и истинных параметров полета. На основании выявленного рассогласования формируется вектор управления ВС, который поступает на ДМВС. Таким образом осуществляется такое управление ВС, которое стремится минимизировать разницу между сценарным и истинным состояниями ВС.

Начальное состояние ВС, параметры атмосферы (температура и давление воздуха на поверхности, а также скорость и направление ветра) на всем маршруте полета, вектор начального состояния ВС, в состав элементов которого входят географические координаты ВС. ДМВС использует ЛТХ ВС из *BADA* и модель атмосферы *ISA* для расчета вектора состояния ВС. Для расчета используются дифференциальные уравнения движения ВС в атмосфере с заданными параметрами [149, 153, 154].

Рассмотрим подробнее вышеназванные средства ПТ.

2.1 Динамическая модель воздушного судна

При синтезе ДМ предполагалось, что ВС является динамической системой с внешним управлением. Модель использует дифференциальные уравнения классической механики Ньютона [155] и имитирует поведение ВС, выполняющего управляемый полет в условиях реальной атмосферы. ВС рассматривается как материальная точка, состояние которой характеризуется следующим вектором:

$$\mathbf{X}(t) = [X(t) \ Y(t) \ H(t) \ V_{TAS}(t) \ \psi(t) \ m(t)], \quad (\text{A.1})$$

где X, Y – координаты ВС в горизонтальной плоскости [м]; H – геопотенциальная высота ВС [м]; V_{TAS} – истинная воздушная скорость ВС [м/с]; ψ – курс ВС [рад]; m – масса ВС [кг].

Динамика вектора состояния (А.1) описывается следующей системой:

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} \equiv \begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{H} \\ \dot{V}_{TAS} \\ \dot{\psi} \\ \dot{m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{TAS} \cos \psi \cos \gamma + w_x \\ V_{TAS} \sin \psi \cos \gamma + w_y \\ V_{TAS} \sin \gamma + w_h \\ (T - D)/m - g_0 \sin \gamma \\ L \sin \varphi / (m V_{TAS}) \\ -\eta T \end{pmatrix}, \quad (\text{A.2})$$

где L – аэродинамическая подъемная сила [Н]; D – сила лобового сопротивления [Н]; η – удельный расход топлива по тяге [кг/(Н·с)] (соответствующая методика расчета приведена в [148]); T – сила тяги двигателя [Н]; γ – угол наклона траектории ВС [рад]; φ – угол крена [рад]; g_0 – ускорение свободного падения на высоте среднего уровня моря [м/с²]; $\mathbf{W} = [w_x \ w_y \ w_h]$ – вектор скорости ветра. В предлагаемой модели предполагается независимость истинной воздушной скорости V_{TAS} от скорости ветра \mathbf{W} .

Силы L и D определяются как функции истинной воздушной скорости:

$$L = \frac{C_L S \rho}{2} V_{TAS}^2, \quad (\text{A.3})$$

$$D = \frac{C_D S \rho}{2} V_{TAS}^2,$$

где C_L – коэффициент подъемной силы; C_D – коэффициент лобового сопротивления; S – расчетная площадь крыла ВС [м²]; ρ – плотность воздуха [кг/м³]. Методика и формулы расчета C_L и C_D приведены в [148]. Предельные значения параметров динамической модели $H, V_{TAS}, m, T, \gamma, \varphi$ задаются с учетом ограничений на параметры ВС.

Управляющими воздействиями являются: T – сила тяги двигателя, γ – угол наклона траектории ВС, φ – угол крена. Третье и четвертое уравнения позволяют ввести вместо угла наклона траектории γ новую управляющую переменную, которая введена в [148] и называется фактором энергетического баланса (ФЭБ)

(*Energy Share Factor, ESF*). Рассмотрим это управляющее воздействие подробнее. Исключая из названных уравнений $\sin(\gamma)$, придем к уравнению, которое получило в [148] название *Total energy Model (TEM)*:

$$(T - D)V_{TAS} = mg_0 \frac{dH}{dt} + mV_{TAS} \frac{dV_{TAS}}{dt}, \quad (\text{A.4})$$

Физический смысл уравнения (A.4) очевиден: оно соответствует равенству между скоростью изменения работы сил, действующих на ВС, и скоростью изменения полной (потенциальной и кинетической) энергии ВС. Для вертикальной скорости ВС при этом будет справедливо следующее уравнение:

$$V_V \equiv \frac{dH}{dt} = \frac{(T - D)V_{TAS}}{mg_0} \left[1 + \frac{V_{TAS}}{g_0} \frac{dV_{TAS}}{dH} \right]^{-1}. \quad (\text{A.5})$$

ФЭБ, который в [148] обозначен как $f(M)$, равен второму множителю в уравнении (A.5):

$$f(M) \equiv \left[1 + \frac{V_{TAS}}{g_0} \frac{dV_{TAS}}{dH} \right]^{-1}. \quad (\text{A.6})$$

В [148, 149] показано, что ФЭБ зависит от высоты полета, температуры атмосферы и числа Маха M . ФЭБ определяет соотношение между мощностями, которые расходуются на изменение высоты полета (на изменение потенциальной энергии ВС) и ускорение ВС (на изменение кинетической энергии). Методика расчета ФЭБ приведена в [148].

С учетом нового управляющего воздействия система (A.2) примет вид:

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} \equiv \begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{H} \\ \dot{V}_{TAS} \\ \dot{\psi} \\ \dot{m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{TAS} \cos\psi \cos\gamma + w_x \\ V_{TAS} \sin\psi \cos\gamma + w_y \\ (T - D)V_{TAS} f(M)/(mg_0) + w_h \\ (T - D)[1 - f(M)]/m \\ L \sin\varphi/(mV_{TAS}) \\ -\eta T \end{pmatrix}. \quad (\text{A.7})$$

Полет ВС моделируется в дискретном времени с шагом Δt от начального момента взлета t_0 до момента касания взлетно-посадочной полосы путем решения системы (A.7). Моменту t_0 соответствует вектор начальных параметров \mathbf{X}_0 ,

который формируется с учетом актуальных данных от системы наблюдения за воздушным пространством. Система уравнений (А.7) решается методом Рунге-Кутты четвертого порядка [156]. При наличии метеорологической информации параметры атмосферы и ветра также поступают в ДМВС. Таким образом, на выходе модели получается траектория ВС, рассчитанная согласно сценарию полета и текущему состоянию атмосферы. Очевидно, что рассмотренная модель является существенным упрощением динамики движения ВС. Однако, как показала практика, точность прогнозирования при ее использовании удовлетворяет требованиям, предъявляемым к ПТ.

2.2 Сценарий полета

Сценарий полета формируется в результате обработки плана полета и содержит следующие данные:

1. тип ВС;
2. аэропорт отправления и аэропорт назначения;
3. маршрут полета;
4. высотнo-скоростной профиль полета;
5. время отправления;
6. начальная взлетная масса ВС.

Тип ВС – четырехзначный код Международной организации гражданской авиации (ИКАО) (*International Civil Aviation Organization, ICAO*). Код уникален для каждой модели ВС.

Аэропорт отправления и аэропорт назначения – четырехзначный код ИКАО уникальный для каждого аэропорта.

Маршрут полета – множество контрольных точек, включая точки стандартных маршрутов взлета (*SID*) и посадки (*STAR*). Каждая опорная точка имеет уникальное имя в пределах своего района полетной информации (РПИ) (*Flight Information Region, FIR*), пространственные координаты (географическая широта и долгота) и дополнительную информацию (например, способ пролета точки). Информация о точках маршрута берется из *AIDB*, где она представлена в

международном стандартном формате *ARINC-424* [150]. Дополнительно каждой точке присваивается курс на следующую точку маршрута. Следует отметить, что реальный маршрут полета не всегда соответствует плановому. В этом случае отклонения обнаруживаются, а план полета корректируется [157].

Высотно-скоростной профиль полета (ВСПП) представляет собой зависимость индикаторной воздушной скорости V_{CAS} от геопотенциальной высоты H для трех этапов полета: взлета и набора высоты, крейсерского полета, снижения и посадки [148]. На этапе крейсерского полета высота и скорость ВС задаются в плане полета. ВС рассматривается как конечный автомат, каждое дискретное состояние которого в множестве $\{H, V_{CAS}\}$ определяется типом, этапом полета, конфигурацией ВС. Процедура синтеза такого конечного автомата описана в [148].

Время отправления – фактическое или планируемое время взлета ВС.

Начальная взлетная масса – расчетная масса ВС при взлете.

2.3 Модель системы управления полетом

МСУП является грубым приближением реальной бортовой СУП, которая имеет намного более сложное устройство и алгоритм работы. МСУП реализует управление полетом по маршруту в горизонтальной и вертикальной плоскостях. В горизонтальной плоскости ВС управляется путем установки угла крена φ , который позволяет ВС двигаться от одной контрольной точки маршрута к другой, осуществляя при этом заданный способ пролета точек. Для следования по заданному маршруту используется глобальная система координат *World Geodetic System 1984 (WGS-84)* [158].

Для управления в вертикальной плоскости в МСУП предусмотрены три дискретные переменные $q_j, j = 1, 2, 3$, состояние которых зависит от режима полета самолета [148, 149, 154]:

$$\begin{aligned}
 q_1 &= \begin{cases} CAS, \text{если } H \leq H_{trans} \\ MACH, \text{если } H > H_{trans} \end{cases}, \\
 q_2 &= \begin{cases} LOW, \text{если } H \leq H_{trop} \\ HIGH, \text{если } H > H_{trop} \end{cases}, \\
 q_3 &= \begin{cases} ACC, \text{если } V_{CAS} \leq V_{CAS}^* - \Delta V \\ DEC, \text{если } V_{CAS} \geq V_{CAS}^* + \Delta V, \\ CST, \text{если } |V_{CAS} - V_{CAS}^*| < \Delta V \end{cases}
 \end{aligned} \tag{A.8}$$

где значения дискретных переменных имеют следующий смысл: *CAS*, *MACH* – полет с постоянной индикаторной скоростью ниже высоты перехода H_{trans} или с постоянным числом Маха выше высоты перехода H_{trans} ; *LOW*, *HIGH* – полет ниже или выше высоты тропопаузы H_{trop} ; *ACC*, *DEC*, *CST* – полет с увеличением (ускорение), уменьшением (замедление) или постоянной скоростью; V_{CAS}^* – индикаторная скорость из ВСПП; ΔV – допустимое отклонение V_{CAS} от V_{CAS}^* . В соответствии со значениями переменных q_j , $j = 1, 2, 3$ по методике, приведенной в [148], рассчитываются сила тяги T и фактор энергетического баланса $f(M)$, которые являются сигналами управления, поступающими в ДМВС.

2.4 Модель атмосферы

Модель позволяет рассчитать изменение параметров атмосферы в зависимости от геопотенциальной высоты, определяет порядок преобразований между индикаторной воздушной скоростью V_{CAS} (*Calibrated Air Speed, CAS*), истинной воздушной скоростью V_{TAS} (*True Air Speed, TAS*) и числом Маха M [148]. Состояние атмосферы задается следующим набором параметров: T – температура воздуха [К]; p – атмосферное давление [Па]; ρ – плотность воздуха [кг/м³]; a – скорость звука [м/с]. Базовыми параметрами модели атмосферы являются стандартная температура $T_{0ISA} = 288,15$ [К], давление $p_{0ISA} = 1013,25$ [гПа], плотность воздуха $\rho_{0ISA} = 1,225$ [кг/м³] и скорость звука $a_{0ISA} = 340,294$ [м/с] на высоте среднего уровня моря. Текущее состояние атмосферы на высоте среднего уровня моря задается через отклонения:

$$\begin{aligned}
 T_0 &= T_{0ISA} + \Delta T_0, \\
 p_0 &= p_{0ISA} + \Delta p_0,
 \end{aligned} \tag{A.9}$$

где ΔT_0 , Δp_0 – разность температур и давлений стандартной и реальной атмосферы на высоте среднего уровня моря. Основные расчетные соотношения по ISA приведены в [148, 149, 150].

3 Моделирование траектории полета

В соответствии с рассмотренной структурной схемой средств ПТ (рисунок 1) на языке программирования С++ разработаны программные средства. ПС позволяют моделировать четырехмерную траекторию ВС согласно плану полета. В данном разделе анализируются результаты работы ПС.

На вход ПС поступают следующие данные: план полета, параметры атмосферы в районе аэропорта прибытия, исходное положение ВС. На выходе получается рассчитанная согласно маршруту следования траектория ВС. Оценка точности ПТ произведена путем сравнения реального ВСПП ВС с расчетным.

Доступ к архиву ВСПП выполненных рейсов могут быть получены через открытый интерфейс прикладного программирования Интернет-ресурса www.flightradar24.com. Данный ресурс позволяет наблюдать за ходом выполнения рейсов в реальном времени, а также имеет архив с записями завершенных полетов. Наблюдение за ВС основано на технологии автоматического зависимого наблюдения – *Automatic Dependence Surveillance-Broadcast (ADS-B)* [159]. Для моделирования и анализа точности ПТ разработанных ПС был выбран рейс № *AFL1549* компании «Аэрофлот», выполненный в ночь с 25 на 26 февраля 2015 года. Маршрут рейса приведен на рисунке А.2. План полета был составлен по данным Интернет-ресурса www.vatstats.net. Данный ресурс предоставляет доступ к плановой информации по всем выполненным рейсам.

План полета рейса № *AFL1549* содержит следующую информацию:

1. Позывной ВС: *AFL1549*;
2. Модель ВС: *Airbus A321*;
3. Аэропорт отправления: *UNNT* – Толмачево (г. Новосибирск);
4. Аэропорт назначения: *UUUU* – Шереметьево (г. Москва);
5. Маршрут полета:

*OG16T OGAMA GEBSA A308 ML A300 TINRI A303 BANAM A723
SOPUS A300 INTEP A300 MF ITINA RW RUGEL BESTA BST21G;*

6. Крейсерская высота: 34000 футов;

7. Крейсерская скорость: 400 узлов;

5. Отправление: 25.02.2015 в 23:59.

Взлетная масса ВС не указывается в плане полета, поэтому в данном случае из *BADA* берется масса, соответствующая полной загрузке ВС типа *A321*.

Данные о состоянии атмосферы в районе аэропорта назначения за 26.02.2015 предоставлены Интернет-ресурсом www.wunderground.com. Кроме того, ресурс предоставляет информацию о скорости ветра, однако без информации о направления ветра невозможно получить ориентированный в пространстве вектор воздействия и использовать его в системе уравнений (А.2).

В качестве исходного положения ВС установлена первая точка маршрута полета, то есть точка на взлетно-посадочной полосе аэропорта отправления.

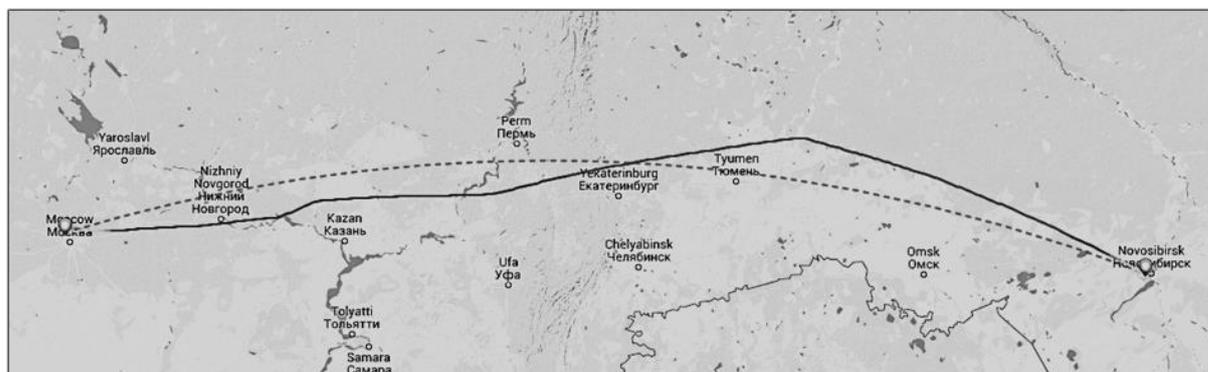


Рисунок А.2 – Маршрут полета рейса № AFL1549

Полет ВС моделировался с момента взлета до момента посадки без обновления информации о параметрах движения ВС, маршруте полета и метеорологических условиях. Полученные по данным *ADS-B* и рассчитанный с помощью ПС высотный и скоростной профили полета ВС приведены на рисунках А.3 и А.4, соответственно.

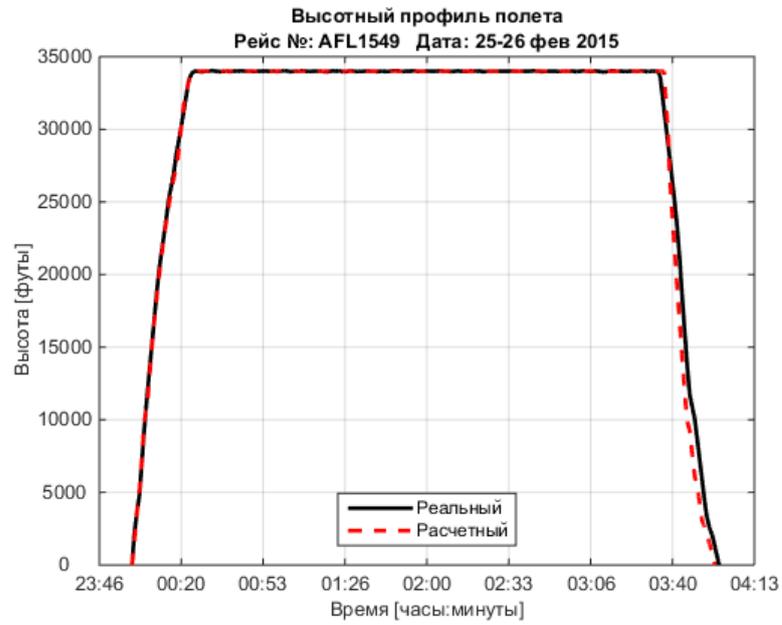


Рисунок А.3 – Реальный и расчетный высотный профиль полета

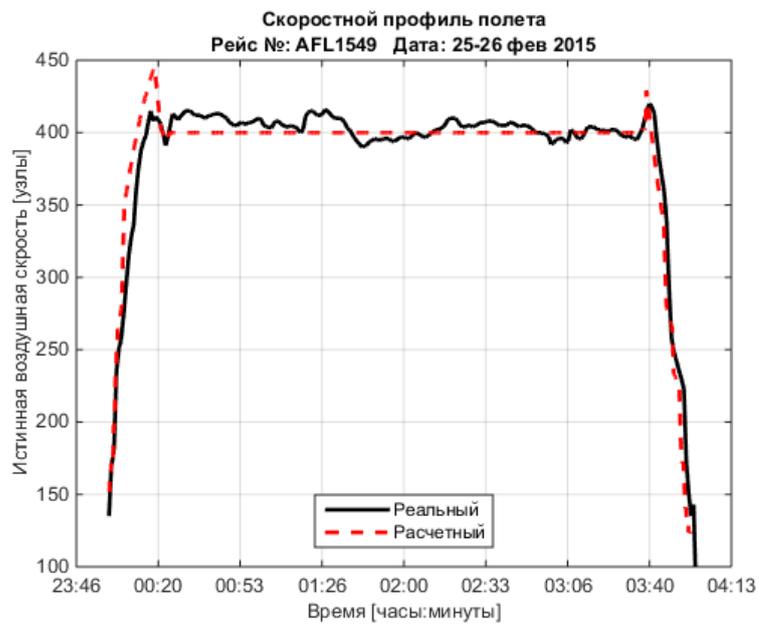


Рисунок А.4 – Реальный и расчетный скоростной профиль полета

Результаты вычисления расхождения расчетных и реальных параметров траектории для трех этапов полета сведены в таблицу А.1.

Таблица А.1 – Расхождение расчетных и реальных параметров траектории

Этап полета	Параметр	Среднее отклонение	Максимальное отклонение
Набор высоты	Высота, м	91.8	701.3
	Скорость, м/с	7.0	31.3
Крейсерский полет	Высота, м	3.4	15.2
	Скорость, м/с	2.6	8.2
Снижение	Высота, м	435.4	1440.2
	Скорость, м/с	4.9	25.8
Все этапы	Высота, м	74.0	1440.2
	Скорость, м/с	4.2	31.3

Результатом анализа реального и расчетного ВСПП являются следующие наблюдения и выводы:

1. На всех этапах полета расчетный ВСПП качественно повторяет реальный, что говорит об адекватности используемой методики ПТ;
2. На этапе крейсерского полета расхождения расчетного и реального ВСПП незначительны и по существу обусловлены намерениями ВС выдерживать значения высоты скорости, назначенные в плане полета;
3. На этапе набора высоты и снижения наблюдаются относительно высокие расхождения расчетного и реального ВСПП, которые можно объяснить сложностью моделирования полета в отсутствии информации о ВСПП, которые применяются в пунктах отправления и прибытия на стандартных маршрутах *SID* и *STAR*, а также скорости ветра на маршруте.

Как отмечалось выше во многих случаях основной задачей ПТ является прогнозирование точного времени прохождения ВС опорных и других важных точек маршрута. В данном случае достоверно известно фактическое время прибытия в конечную точку маршрута – аэропорт Шереметьево и полученное в результате ПТ расчетное время прибытия:

Фактическое время прибытия (*Actual Landing Time, ALDT*):

26 февраля 2015 года 3 часа 58 минут;

Расчетное время прибытия (*Estimated Time of Arrival, ETA*):

26 февраля 2015 года 4 часа 00 минут.

Таким образом, разница между фактическим и расчетным временем прибытия составляет менее двух минут. Очевидно, что такая точность является достаточно высокой, учитывая, что полет моделировался с момента взлета до момента посадки без коррекции по реальным данным в промежуточных точках.

4 Заключение

В приложении изложены основные принципы синтеза алгоритмов и программных средств, предназначенных для предсказания траектории полета воздушных судов. Синтез алгоритмов работы ПС осуществлялся в соответствии с рекомендациями «*EUROCONTROL*». Предсказание траектории происходит путем моделирования полета воздушного судна по заданному маршруту с учетом доступной плановой и метеорологической информации, а также с использованием данных о летно-технических характеристиках самого воздушного судна.

Разработанные ПС позволяют моделировать четырехмерные траектории ВС. Работоспособность алгоритмов и ПС продемонстрирована на примере моделирования реального полета с последующей оценкой точности как невязки реального и расчетного высотно-скоростного профилей полета и времени прибытия в аэропорт назначения. Наибольшая разница между расчетной и фактической траекториями наблюдается на участках переходов между этапами полета, наименьшая – на протяжении стационарного полета, т.е. при полете на крейсерском эшелоне. На этапе набора высоты и снижения наблюдаются относительно высокие расхождения расчетного и реального высотно-скоростного профилей полета, которые можно объяснить сложностью моделирования полета в отсутствие информации о профилях, которые применяются в пунктах отправления и прибытия на стандартных маршрутах *SID* и *STAR*, а также скорости ветра на маршруте. Тем не менее, полученная точность прогноза дает основания рекомендовать разработанные алгоритмы для применения в задачах автоматизации УВД.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б ОПРОСНЫЙ ЛИСТ

для экспертной оценки показателей качества систем траекторной обработки в РЛК УВД

Традиционно обработка данных в РЛК АС УВД делится на первичную (обнаружение и измерение координат целей в каждом периоде обзора) и вторичную (оценка траекторий целей). Достоверность информации, получаемой из системы траекторной обработки, непосредственно влияет на качество аэронавигационного обслуживания и безопасность полетов в зонах ответственности АС УВД.

Система траекторной обработки имеет структурную схему, представленную на рисунок Б.1. Описание работы СТО приводится в первой главе диссертации и статье [126].

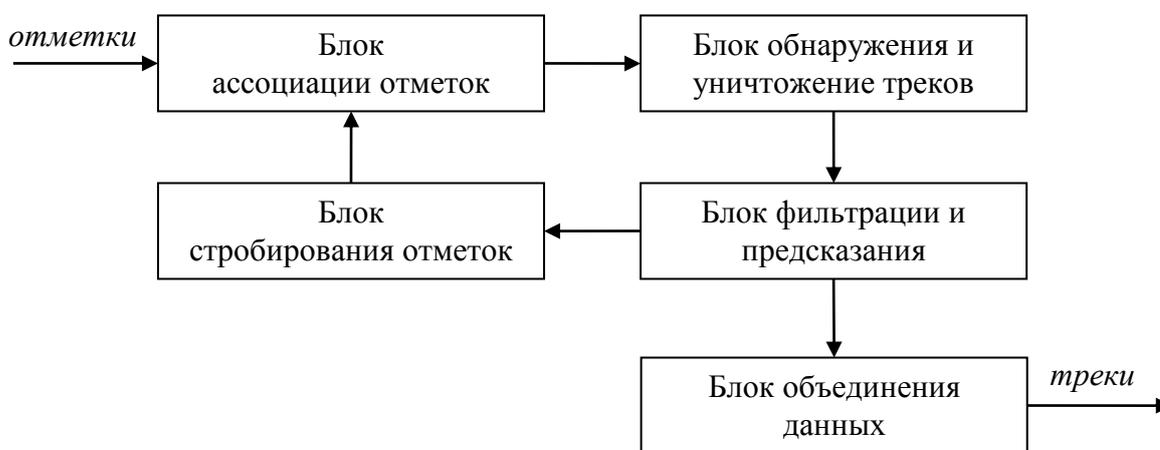


Рисунок Б.1 – Структурная схема системы траекторной обработки

Каждый из блоков СТО реализует некоторый алгоритм обработки поступающей на его вход информации. Естественно, что наилучшим вариантом был бы такой, при котором в каждом блоке СТО использовался оптимальный алгоритм. Однако этот вариант не реализуем, поскольку очень немногие задачи, решаемые в СТО, допускают такой уровень формализации, при которой возможен

синтез оптимальных алгоритмов. Поэтому в настоящее время предложено большое количество подоптимальных алгоритмов реализации рассмотренных этапов траекторной обработки.

В связи с этим актуальной проблемой является сравнительная оценка качества алгоритмов обработки информации, предложенных для использования в каждом блоке СТО. Решение этой проблемы невозможно без определения показателей качества. Выбор показателей качества является либо следствием теоретических исследований алгоритмов обработки информации в СТО, либо результатом экспертной оценки.

Данный опросный лист предлагает принять участие экспертов в формировании такой оценки СТО. На основе результатов опроса с использованием аппарата нечеткой логики будет синтезирована система оценки качества работы СТО. В данном документе приводятся только названия показателей. За подробным описанием показателей можно обратиться к статьям [123, 124, 126, 128, 142, 144, 145] и к соответствующим главам диссертации.

Необходимо подчеркнуть, что данный опросный лист ориентирован на траекторную обработку в АС УВД. В таких системах к качеству первичной и вторичной обработки предъявляются специфические требования, ознакомиться с которыми можно в документе [74].

Экспертам предлагается определить:

1. Диапазоны значений каждого показателя качества, соответствующие значениям лингвистических переменных. В графе «Диапазон значений» верхняя половина оставлена свободной для внесения значений, соответствующих мнению эксперта. Нижняя половина содержит значения, которые соответствуют представлениям авторов опросного листа и могут быть использованы экспертами в качестве исходных значений.

2. Степень влияния каждого показателя качества на работу соответствующего блока СТО. Для определения степени влияния используются графа «Степень влияния», в которой необходимо отметить нужный вариант установкой соответствующего «флажка»².

² Для установки «флажка» **режим Конструктора** редактора должен быть **выключен!!!** Признаком отключения режима Конструктора является возможность свободно менять положения включенного «флажка». Указатель «мыши» при этом при наведении на «флажок» меняет свой вид с «I» на стрелку «».

Весь диапазон значений показателей качества предлагается характеризовать с помощью следующих значений лингвистических переменных:

«**Низкий**» – входит диапазон значений показателя, соответствующих низкому качеству работы блока;

«**Средний**» – входит диапазон значений показателя, соответствующих умеренному качеству работы блока;

«**Высокий**» – входит диапазон значений показателя, соответствующих высокому качеству работы блока.

Примечание: значения лингвистических переменных относятся к качеству работы СТО, а не к численному значению самого показателя.

Степени влияния каждого показателя качества на работу соответствующего блока СТО предлагается характеризовать следующими лингвистическими переменными:

«**Отсутствует или практически отсутствует**» – значение данного показателя не влияет на качество работы блока;

«**Низкая**» – значение данного показателя слабо влияет на качество работы блока;

«**Средняя**» – значение данного показателя умеренно влияет на качество работы блока;

«**Высокая**» – значение данного показателя сильно влияет или определяет качество работы блока.

Таблица Б.1 – Показатели эффективности алгоритмов обнаружения треков

1. Вероятность обнаружения истинного трека в течение заданного времени обнаружения			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений			
	[0; 0.5]	[0.5; 0.8]	[0.8; 1]
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input type="radio"/> Низкая <input checked="" type="radio"/> Высокая	<input type="radio"/> Средняя
2. Вероятность обнаружения истинного трека за время большее заданного времени обнаружения			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений			
	[0.7; 1]	[0.3; 0.7]	[0; 0.3]
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input checked="" type="radio"/> Низкая <input type="radio"/> Высокая	<input type="radio"/> Средняя
3. Среднее время обнаружения истинного трека			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [кол-во обзоров]			
	≥ 5	[3; 5]	[1; 3]
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input type="radio"/> Низкая <input checked="" type="radio"/> Высокая	<input type="radio"/> Средняя

4. СКО времени обнаружения истинного трека			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [обзоры]	≥ 2	[0.5; 2]	≤ 0.5
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input type="radio"/> Низкая <input type="radio"/> Высокая	<input checked="" type="radio"/> Средняя
5. Среднее количество обнаруженных ложных треков			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений	≥ 10	[2; 10]	≤ 2
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input type="radio"/> Низкая <input checked="" type="radio"/> Высокая	<input type="radio"/> Средняя
6. СКО количества обнаруженных ложных треков			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений	≥ 5	[1; 5]	≤ 1
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input type="radio"/> Низкая <input type="radio"/> Высокая	<input checked="" type="radio"/> Средняя

Таблица Б.2 – Показатели эффективности алгоритмов ассоциации измерений

7. Вероятность правильной ассоциации истинной отметки			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений			
	[0; 0.5]	[0.5; 0.7]	[0.7; 1]
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input type="radio"/> Низкая <input checked="" type="radio"/> Высокая	<input type="radio"/> Средняя
8. Вероятность перепутывания треков			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений			
	[0.7; 1]	[0.3; 0.7]	[0; 0.3]
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input type="radio"/> Низкая <input checked="" type="radio"/> Высокая	<input type="radio"/> Средняя
9. Вероятность потери истинного трека			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений			
	[0.7; 1]	[0.3; 0.7]	[0; 0.3]
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input type="radio"/> Низкая <input checked="" type="radio"/> Высокая	<input type="radio"/> Средняя

10. Средняя частота потерь истинного трека			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [потерь в час]	≥ 5	[5; 2]	≤ 2
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input type="radio"/> Низкая <input checked="" type="radio"/> Высокая	<input type="radio"/> Средняя
11. СКО частоты потерь истинного трека			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [потерь в час]	≥ 2	[1; 2]	≤ 1
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input type="radio"/> Низкая <input type="radio"/> Высокая	<input checked="" type="radio"/> Средняя
12. Средняя длительность истинного трека			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [мин] При $T_{набл} = 60$ мин	≤ 30	[30; 50]	≥ 50
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input type="radio"/> Низкая <input checked="" type="radio"/> Высокая	<input type="radio"/> Средняя

13. СКО длительности истинного трека			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [мин]			
При $T_{набл} = 60$ мин	≥ 10	[5; 10]	≤ 5
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input type="radio"/> Низкая <input type="radio"/> Высокая	<input checked="" type="radio"/> Средняя
14. Средняя длительность истинного трека до первой потери			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [мин]			
	≤ 20	[20; 50]	≥ 50
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input type="radio"/> Низкая <input checked="" type="radio"/> Высокая	<input type="radio"/> Средняя
15. СКО длительности истинного трека до первой потери			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [мин]			
	≥ 10	[5; 10]	≤ 5
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input type="radio"/> Низкая <input checked="" type="radio"/> Высокая	<input type="radio"/> Средняя

16. Средняя частота появления ложных треков			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [треков в час]	≥ 10	[10; 2]	≤ 2
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input type="radio"/> Низкая <input checked="" type="radio"/> Высокая	<input type="radio"/> Средняя
17. СКО частоты появления ложных треков			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [треков в час]	≥ 5	[1; 5]	≤ 1
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input type="radio"/> Низкая <input type="radio"/> Высокая	<input checked="" type="radio"/> Средняя
18. Средняя длительность ложного трека			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [мин]	≥ 2	[1; 2]	≤ 1
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input type="radio"/> Низкая <input type="radio"/> Высокая	<input checked="" type="radio"/> Средняя

19. СКО длительности ложного трека			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [мин]			
	≥ 2	[1; 2]	≤ 1
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input type="radio"/> Низкая <input type="radio"/> Высокая	<input checked="" type="radio"/> Средняя

Таблица Б.3.1 – Показатели эффективности алгоритмов фильтрации треков: параметры точности

20. Смещение оценки положения ВС в тангенциальном к вектору скорости направлении			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [м]			
	≥ 10	[5; 10]	≤ 5
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input type="radio"/> Низкая <input type="radio"/> Высокая	<input checked="" type="radio"/> Средняя

21. Смещение оценки положения ВС в нормальном к вектору скорости направлении			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [м]			
	≥ 10	[5; 10]	≤ 5
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input type="radio"/> Низкая <input type="radio"/> Высокая	<input checked="" type="radio"/> Средняя

22. СКО оценки положения ВС в тангенциальном к вектору скорости направлении			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [м]	≥ 100	[50; 100]	≤ 50
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет <input type="radio"/> Низкая <input type="radio"/> Средняя <input checked="" type="radio"/> Высокая		
23. СКО оценки положения ВС в нормальном к вектору скорости направлении			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [м]	≥ 100	[50; 100]	≤ 50
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет <input type="radio"/> Низкая <input type="radio"/> Средняя <input checked="" type="radio"/> Высокая		
24. Смещение оценки путевой скорости			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [м/с]	≥ 5	[2; 5]	≤ 2
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет <input type="radio"/> Низкая <input checked="" type="radio"/> Средняя <input type="radio"/> Высокая		

25. СКО оценки путевой скорости			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [м/с]	≥ 7	[3; 7]	≤ 3
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input type="radio"/> Низкая <input type="radio"/> Высокая	<input checked="" type="radio"/> Средняя
26. Смещение тангенциальной составляющей ускорения			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [м/с ²]	≥ 1	[0.5 1]	≤ 0.5
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input checked="" type="radio"/> Низкая <input type="radio"/> Высокая	<input type="radio"/> Средняя
27. СКО тангенциальной составляющей ускорения			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [м/с ²]	≥ 2	[1; 2]	≤ 1
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input checked="" type="radio"/> Низкая <input type="radio"/> Высокая	<input type="radio"/> Средняя

28. Смещение нормальной составляющей ускорения			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [м/с ²]	≥ 0.5	[0.1 0.5]	≤ 0.1
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input checked="" type="radio"/> Низкая <input type="radio"/> Высокая	<input type="radio"/> Средняя
29. СКО нормальной составляющей ускорения			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [м/с ²]	≥ 1	[0.5 1]	≤ 0.5
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input checked="" type="radio"/> Низкая <input type="radio"/> Высокая	<input type="radio"/> Средняя
30. Смещение оценки курса			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [°]	≥ 1	[0.1; 1]	≤ 0.1
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input type="radio"/> Низкая <input checked="" type="radio"/> Высокая	<input type="radio"/> Средняя

31. СКО оценки курса			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [°]			
	≥ 3	[0.5; 3]	≤ 0.5
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input type="radio"/> Низкая <input checked="" type="radio"/> Высокая	<input type="radio"/> Средняя

Таблица Б.3.2 – Показатели эффективности алгоритмов фильтрации треков: динамические параметры

32. ПЗО оценки положения ВС в тангенциальном к вектору скорости направлении			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [м]			
	≥ 300	[200; 300]	≤ 200
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input type="radio"/> Низкая <input checked="" type="radio"/> Высокая	<input type="radio"/> Средняя

33. ПЗО оценки положения ВС в нормальном к вектору скорости направлении			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [м]			
	≥ 200	[100; 200]	≤ 100
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input type="radio"/> Низкая <input checked="" type="radio"/> Высокая	<input type="radio"/> Средняя

34. ВПП оценки положения ВС в тангенциальном к вектору скорости направлении			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [кол-во обзоров]	≥ 10	[5; 10]	≤ 5
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет <input type="radio"/> Низкая <input type="radio"/> Средняя <input checked="" type="radio"/> Высокая		
35. ВПП оценки положения ВС в нормальном к вектору скорости направлениях			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [обзоры]	≥ 10	[5; 10]	≤ 5
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет <input type="radio"/> Низкая <input type="radio"/> Средняя <input checked="" type="radio"/> Высокая		
36. ПЗО оценки путевой скорости ВС			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [м/с]	≥ 20	[5; 20]	≤ 5
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет <input type="radio"/> Низкая <input checked="" type="radio"/> Средняя <input type="radio"/> Высокая		

37. ВПП оценки путевой скорости ВС			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [обзоры]	≥ 5	[3; 5]	≤ 3
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input type="radio"/> Низкая <input type="radio"/> Высокая	<input type="radio"/> Средняя
38. ПЗО оценки курса ВС			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [°]	≥ 20	[10; 20]	≤ 10
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input type="radio"/> Низкая <input type="radio"/> Высокая	<input type="radio"/> Средняя
39. ВПП оценки курса ВС			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений, [обзоры]	≥ 5	[3; 5]	≤ 3
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет	<input type="radio"/> Низкая <input type="radio"/> Высокая	<input type="radio"/> Средняя

Таблица Б.4 – Показатели эффективности алгоритмов объединения данных различных РЛС

40. Вероятность объединения данных			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений			
	[0; 0.5]	[0.5; 0.8]	[0.8; 1]
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет <input type="radio"/> Низкая <input type="radio"/> Средняя <input checked="" type="radio"/> Высокая		
41. Вероятность мультипликации трека			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений			
	[0.7; 1]	[0.3; 0.7]	[0; 0.3]
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет <input type="radio"/> Низкая <input type="radio"/> Средняя <input checked="" type="radio"/> Высокая		
42. Вероятность синтеза объединенного трека			
Лингвистическая переменная	«Низкий»	«Средний»	«Высокий»
Диапазон значений			
	[0; 0.5]	[0.5; 0.8]	[0.8; 1]
Степень влияния	<input type="radio"/> Нет <input type="radio"/> Низкая <input type="radio"/> Средняя <input checked="" type="radio"/> Высокая		

ПРИЛОЖЕНИЕ В АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

Акционерное общество
Научно-производственное предприятие
«КАЛУЖСКИЙ
ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ЗАВОД
«ТАЙФУН»

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
«КАЛУЖСКИЙ ПРИБОРО-
СТРОИТЕЛЬНЫЙ ЗАВОД
«ТАЙФУН»» А.А. Петраков
« 17 » _____ 2017 г.



АКТ

от « 26 » 01 20 17 г. № 325-003
г. Калуга

«О внедрении результатов диссертационной работы В.Ю. Киселева, представляемой на соискание ученой степени кандидата технических наук»

Научно-техническая комиссия представителей АО «Тайфун», в составе:

Председатель:

Зам. ген. директора – директор по конструкторским разработкам

С.В. Недодиров

Члены комиссии: Главный конструктор изделия

П.А. Моисеев

Нач. Лаборатории СВЧ

Н.В. Самбуров

Нач. ОСПК

М.Ю. Алиев

составила настоящий акт о том, что разработанные Киселевым В.Ю. алгоритмы, методики и научные положения, изложенные в диссертации В.Ю. Киселева «Оценка качества траекторной обработки в радиолокационных системах управления воздушным движением», были использованы при отработке технических решений при модернизации изделия Позитив-МЭ1.2.

Использование результатов диссертационного исследования позволило оптимизировать алгоритмы сопровождения целей различного класса.

Председатель комиссии



С.В. Недодиров

Члены комиссии:



П.А. Моисеев



Н.В. Самбуров



М.Ю. Алиев



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»
(ГУАП)

ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, Санкт-Петербург, 190000, Тел. (812) 710-6510, факс (812) 494-7057,
E-mail: common@aanet.ru ОГРН 1027810232680, ИНН/КПП 7812003110/783801001

№ _____

На № _____

от _____

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебно-воспитательной работе,
доктор юридических наук, профессор

/Боср В. М./

«21» февраля 2017 года



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы В. Ю. Киселева на тему «ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТРАЕКТОРНОЙ ОБРАБОТКИ В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ» в учебном процессе

Комиссия в составе председателя директора института радиотехники, электроники и связи, доктора технических наук, профессора Бестугина А. Р., и членов: заместителя заведующего кафедрой «Радиотехнические системы», кандидата технических наук, доцента Хоменко А. А., кандидата технических наук, доцента Поддубного С. С. настоящим актом подтверждает, что результаты диссертационной работы аспиранта В. Ю. Киселева, а именно методика оценки качества траекторной обработки в радиолокационных системах УВД, внедрены в разделы лекционных курсов и лабораторного практикума дисциплин «Методы траекторной обработки сигналов», «Теория и техника РТС» и «Основы теории радионавигационных систем и комплексов», читаемых на кафедре «Радиотехнические системы» по направлению подготовки 11.04.01 «Радиотехника».

Председатель:
директора института радиотехники,
электроники и связи,
доктор технических наук, профессор

/Бестугин А. Р./

Члены комиссии:
заместитель заведующего кафедрой
«Радиотехнические системы»,
кандидат технических наук, доцент

/Хоменко А. А./

доцент кафедры «Радиотехнические системы»,
кандидат технических наук,
доцент

/Поддубный С. С./

« 20 » февраля 2017 года