

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Дальневосточный федеральный университет»

На правах рукописи



ГРИНЯК Виктор Михайлович

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
БЕЗОПАСНОСТИ КОЛЛЕКТИВНОГО ДВИЖЕНИЯ МОРСКИХ СУДОВ**

Специальность: 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и  
комплексы программ

Диссертация  
на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Научный консультант:  
доктор технических наук,  
профессор Девятисильный А.С.

Владивосток - 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ .....	2
Введение.....	7
Глава 1. Обеспечение навигационной безопасности движения. Основные задачи и проблемы.....	20
1.1 Особенности судовождения в условиях коллективного движения.....	20
1.2 Задачи и развитие береговых СУДС.....	22
1.3 Структура навигационных функций современных береговых СУДС .....	30
1.4 Некоторые научные и технические аспекты задач обеспечения навигационной безопасности движения.....	35
1.4.1 Обзор моделей и методов оценки риска опасного сближения судов .....	35
1.4.2 Обзор моделей и методов предупреждения опасного сближения судов	39
1.4.3 Обзор моделей и методов планирования траектории безопасного движения судов.....	47
1.5 Краткие итоги главы 1 .....	58
Глава 2. Нечёткая идентификация модели движения объекта в задаче сопровождения траектории движения судна .....	61
2.1 Задача сопровождения траектории движущегося объекта по данным двухкоординатной РЛС кругового обзора .....	61
2.2 Модельные представления задачи сопровождения траектории .....	65
2.3 Метод решения задачи сопровождения, основанный на многомодельной оценке вектора состояния и нечётком обнаружителе маневра.....	70
2.3.1 Система типа Сугено.....	72
2.3.2 Система типа Мамдани.....	74
2.3.3 Двухуровневая система типа Мамдани.....	75

2.3.4	Нейро-нечёткая система .....	77
2.4	Результаты численного моделирования задачи сопровождения траектории	79
2.4.1	Система типа Сугено и нейро-нечёткая система .....	80
2.4.2	Система типа Мамдани.....	82
2.4.3	Двухуровневая система типа Мамдани.....	84
2.5	Краткие итоги главы 2.....	86
Глава 3.	Многоуровневая оценка риска опасного сближения судов .....	89
3.1	Задача предупреждения об опасном сближении судов на основе внешних траекторных измерений .....	89
3.2	Модельные представления задачи предупреждения об опасном сближении судов .....	92
3.2.1	Модель вероятностного типа, основанная на полиномиальной экстраполяции траекторий .....	92
3.2.2	Детерминированная модель, основанная на геометрической интерпретации относительного движения судов.....	98
3.3	Концепция решения задачи предупреждения об опасном сближении судов .....	102
3.3.1	Метод решения, основанный на приведении к конечномерному виду .	102
3.3.2	Решение задачи: модель вероятностного типа, основанная на полиномиальной экстраполяции траекторий .....	108
3.3.3	Решение задачи: детерминированная модель, основанная на геометрической интерпретации относительного движения судов .....	113
3.3.4	Фаззификация задачи .....	116
3.3.4.1	Мотивы разработки нечеткой модели задачи .....	116
3.3.4.2	Система типа Сугено (основной случай) .....	120
3.3.4.3	Система типа Мамдани (основной случай).....	121

3.3.4.4	Нейро-нечёткая система (основной случай) .....	123
3.3.4.5	Система типа Сугено (двухуровневый случай) .....	126
3.3.4.6	Система типа Мамдани (двухуровневый случай) .....	128
3.3.4.7	Нейро-нечеткая система (двухуровневый случай).....	129
3.4	Результаты численного моделирования задачи предупреждения об опасном сближении судов.....	131
3.4.1	Модель вероятностного типа, основанная на полиномиальной экстраполяции траекторий .....	131
3.4.2	Детерминированная модель, основанная на геометрической интерпретации относительного движения судов (четкая модель).....	138
3.4.3	Детерминированная модель, основанная на геометрической интерпретации относительного движения судов (нечеткая модель).....	140
3.4.3.1	Система типа Мамдани (основной случай).....	141
3.4.3.2	Система типа Сугено и нейро-нечеткая система (основной случай).....	144
3.4.3.3	Двухуровневый случай нечетких систем .....	146
3.5	Результаты натурных исследований модели задачи предупреждения об опасном сближении судов .....	148
3.6	Краткие итоги главы 3.....	151
Глава 4.	Распознавание воздушных объектов двухкоординатными РЛС кругового обзора.....	155
4.1	Задача распознавания воздушных объектов в системах управления движением судов.....	155
4.2	Модельные представления задачи распознавания воздушных объектов как задачи наблюдения .....	157

4.3 Теоретико-численное исследование задачи наблюдения воздушных объектов двухкоординатными измерителями .....	167
4.3.1 Априорные оценки разрешимости задачи .....	168
4.3.2 Апостериорные оценки разрешимости задачи .....	180
4.4 Метод решения задачи распознавания воздушных объектов .....	192
4.4.1 Вероятностная оценка «надводный-воздушный» .....	193
4.4.2 Нечёткая оценка «надводный-воздушный» .....	195
4.4.3 Нейроподобная оценка высотного диапазона .....	200
4.5 Результаты численного моделирования задачи распознавания воздушных объектов .....	203
4.5.1 Вероятностная оценка «надводный-воздушный» .....	204
4.5.2 Нечёткая оценка «надводный-воздушный» .....	206
4.5.3 Нейроподобная оценка высотного диапазона .....	209
4.6 Краткие итоги главы 4 .....	216
Глава 5. Некоторые особенности функционирования СУДС как программных комплексов .....	220
5.1 Особенности программной архитектуры СУДС .....	220
5.2 Визуализация навигационной информации на рабочем месте судоводителя .....	224
5.2.1 Визуализация данных радиолокационного наблюдения .....	225
5.2.2 Визуализация информации, предоставляемой системой предупреждения об опасном сближении судов .....	229
5.3 Краткие итоги главы 5 .....	237
Глава 6. Сбор и обработка данных о движении судов на морских акваториях....	239
6.1 Программный комплекс для сбора данных о движении морских судов .....	240

6.2 Имитационное моделирование траекторий движения судов на морских акваториях .....	249
6.3 Краткие итоги главы 6.....	252
Заключение .....	254
Список литературы .....	257
Приложение А. Акты об использовании результатов работы.....	284
Приложение Б. Работа СУДС в заливе Находка.....	286
Приложение В. Об ограничении разрешения компьютеризированных РЛС кругового обзора .....	288

## Введение

**Актуальность избранной темы.** Безопасность движения транспорта является важнейшим аспектом организации перевозок и планирования работы транспортных узлов. Настоящая работа относится к области обеспечения навигационной безопасности движения морских судов; некоторые результаты могут быть применены на речном и воздушном транспорте.

В настоящее время оперативный контроль за навигационной безопасностью движения судов в акватории морских портов осуществляется специализированными предприятиями – системами управления движением судов (СУДС). Их основной функцией является диспетчеризация движения в заданном районе [4, 6, 119, 208, 209].

Функционирование СУДС связано с решением целого ряда специфических задач, обеспечивающих их целевое назначение. При этом функциональным ядром СУДС являются навигационные задачи, то есть задачи, связанные с определением координат (наблюдением) обслуживаемых объектов, анализом и планированием их траекторий, интерпретацией, визуализацией информации о движении объектов и выработкой диспетчерских решений. Именно этой стороне обеспечения навигационной безопасности движения судов посвящена настоящая работа.

Движение морских судов имеет свою особую специфику, состоящую в том, что вся ответственность за судно лежит на судоводителе (капитане). Оператор СУДС также несет ответственность за инциденты, происходящие в его зоне контроля. Поэтому управление судном не может быть полностью автоматизированным (без участия человека), а известные общие методы автоматического управления индивидуальным и коллективным движением объектов (см., например, [14]) неприменимы в судоводительской практике. С другой стороны, постоянный рост трафика, размеров и скоростей судов повышает нагрузку на судоводителей и операторов СУДС, у них остается всё меньше времени для принятия решений, что является побудительным мотивом автоматизации контроля навигационной обстановки с целью повышения безопасности движения.

Таким образом, главной проблемой функционирования СУДС является необходимость обеспечения участия оператора в процессе обеспечения навигационной безопасности одновременно с высокой степенью автоматизации этого процесса. Это требует разработки специальных подходов и методов, обеспечивающих работу СУДС прежде всего, как системы поддержки принятия решений.

При обеспечении навигационной безопасности движения в условиях высокой интенсивности и неоднородности трафика возникает необходимость информационной поддержки процесса принятия решений. Обслуживающие в настоящее время работу портов нашей страны и за рубежом СУДС (например, навигационное оборудование фирм Transas, Kongsberg, OKI Electronics и др.) являются исключительно развитыми инструментами в аппаратной части, в задачах визуализации, в сервисных возможностях, реализуют мощные интерфейсы комплексирования различных навигационных средств. Вместе с тем, эти системы ориентированы на традиционные подходы к контролю навигационной обстановки, степень автоматизации их навигационных функций в контексте поддержки принятия решений недостаточна. Настоящая работа призвана восполнить этот пробел.

**Степень разработанности темы.** Предметом проведённого исследования является разработка фундаментальных основ и применение математического моделирования, численных методов и комплексов программ для решения научных и технических, фундаментальных и прикладных проблем (в данном случае – проблемы обеспечения навигационной безопасности движения морских судов). В результате проведённого исследования был создан комплекс новых математических моделей и соответствующих численных методов, реализованных в виде исследовательских программ-прототипов.

Проведённые исследования относятся к следующим областям:

- Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений.



- Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента;
- Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента;
- Разработка новых математических методов и алгоритмов проверки адекватности математических моделей объектов на основе данных натурального эксперимента.

В работе присутствуют оригинальные результаты одновременно из трех областей: математического моделирования, численных методов и комплексов программ. Таким образом, работа соответствует специальности 05.13.18 - математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

**Цели и задачи работы.** Целью настоящей работы является разработка и исследование математических моделей и методов решения задач обеспечения навигационной безопасности коллективного движения морских судов в условиях высокой интенсивности движения, ориентированных на реализацию в береговых системах управления движением судов (СУДС).

Для достижения поставленной цели в работе ставились и решались следующие **задачи**:

1. Исследование комплекса научных проблем, математических моделей и методов, связанных с организацией и функционированием современных систем обеспечения навигационной безопасности движения судов.
2. Разработка и исследование метода идентификации модели движения объекта по данным траекторных измерений.
3. Разработка и исследование моделей задачи оценки возможности опасного сближения судов на основе многозначной логики.
4. Разработка и исследование моделей задачи трёхкоординатного наблюдения движущегося объекта двухкоординатными измерителями.

5. Разработка моделей представления навигационной информации на рабочем месте оператора СУДС и судоводителя.
6. Верификация разработанных моделей и методов
  - a. Разработка информационной системы сбора данных о движении судов на морских акваториях.
  - b. Разработка метода имитационного моделирования траекторий движения судов на морских акваториях.
  - c. Программная реализация разработанных моделей и методов, постановка вычислительных и натурных экспериментов.

**Научная новизна.** В работе предложен и исследован новый метод идентификации модели движения объекта на основе идей нечёткой логики. Известны классические методы для решения этой задачи (например, Байесовский подход). Разработанный новый метод характеризуется простотой и наглядностью, возможностью гибкой интуитивной настройки, низкой вычислительной сложностью. Метод апробирован в задаче многомодельного сопровождения траектории движения судна; показана эффективность метода при движении судна в условиях интенсивного трафика.

Разработана новая математическая модель оценки возможности опасного сближения судов на основе многозначной логики: дискретного типа (чёткая) и непрерывного типа (нечёткая). В этой модели дискретное разделение уровней опасности при сближении судов основано на анализе характера движения судов. Опыт практического судовождения показывает, что при внешнем наблюдении маневрирующие и не маневрирующие суда с точки зрения коллективной безопасности движения имеют принципиальные различия. При внешнем наблюдении для маневрирующего объекта вербальный уровень опасности заведомо ниже, чем для не маневрирующего. Решение о том или ином уровне опасности ситуации «судно-судно» принимается с учетом особенностей сближения и степени интенсивности маневрирования судов. Непрерывное разделение уровней опасности при сближении судов основано на доопределении дискретной модели

лингвистическими переменными и системой нечётких правил. Нечёткая модель оценки уровня опасности ситуации «судно-судно» может быть построена как на основе системы нечеткого вывода типа Мамдани (нечеткие вход и выход), так и системы нечеткого вывода типа Сугено (вход – нечеткий, выход – четкий), а, также, на основе нейро-нечёткой сети. Модель позволяет настраивать (обучать) систему поддержки принятия решений о возможности опасного сближения судов: как экспертным способом, так и на обучающей выборке с учетом особенностей трафика конкретной акватории. Новый подход к оценке возможности опасного сближения судов позволяет упорядочить действия оператора СУДС и судоводителя в условиях высокой интенсивности движения.

Разработан новый метод представления (визуализации) информации об опасных и безопасных параметрах движения судна на основе многозначной логики. Метод основан на комплексировании известных классических моделей Митрофанова [225] и Дегрэ, Лефевра [185] с новой многоуровневой моделью оценки уровня опасности «судно-судно». Предлагаемая цветовая интерпретация (красный, желтый) опасных и безопасных скоростей и курсов движения даёт возможность обеспечить оператору СУДС и судоводителю принятие наиболее подходящего для конкретной обстановки решения по обеспечению навигационной безопасности коллективного движения судов (тому или иному изменению параметров движения судна).

Разработана и исследована новая модель задачи трёхкоординатного наблюдения движущегося объекта двухкоординатными измерителями; предложен метод априорной оценки разрешимости задачи в условиях конечной точности модельных представлений; разработан и исследован соответствующий метод решения задачи распознавания воздушных объектов двухкоординатными измерителями. Метод может быть основан как на четких, так и на нечетких модельных представлениях. При двухкоординатном радиолокационном наблюдении в тех случаях, когда скорости движения воздушных объектов (низколетящих вертолетов) и морских объектов (скоростных катеров) сравнимы,

возможно ошибочное заключение о воздушной цели как о морской. Это может привести к искажению представлений оператора СУДС о навигационной обстановке и ошибочным диспетчерским решениям, особенно при высокой интенсивности движения. С точки зрения задач обеспечения навигационной безопасности движения судов метод позволяет выделять воздушные объекты и исключать их из обработки при принятии решений.

Предложен новый метод выделения на фоне среды первичного РЛС сигнала наблюдаемых объектов, основанный на адаптивном определении порога амплитуды. Метод позволяет максимально информативно представлять радиолокационную информацию в условиях интенсивных динамических помех (морское волнение, метеоусловия).

Разработана новая имитационная модель траектории движения судна, основанная на общемеханических представлениях о движении объектов и учитывающая особенности исходных данных, предоставляемых спутниковыми навигационными системами (GPS/ГЛОНАСС). Модель предназначена для постановки экспериментов по анализу навигационной обстановки с использованием реальных данных о движении судов на конкретной акватории.

**Теоретическая значимость работы.** Значимость теоретических результатов работы определяется тем, что удалось построить совокупность методологически связанных математических моделей для системы комплексируемых технических средств обеспечения навигационной безопасности движения судов. В частности, разработан класс моделей и методов, ориентированных на обеспечение навигационных функций СУДС с использованием современных представлений теории управления, вычислительной линейной алгебры, методов оптимизации, нейроинформатики, нечётких систем.

**Практическая значимость работы.** Результаты диссертации направлены на решение задач обеспечения навигационной безопасности коллективного движения морских судов. Разработанный комплекс моделей, методов и алгоритмов представляет собой адекватный инструментарий для реализации в действующих

современных береговых СУДС. Он позволяет операторам СУДС и судоводителям принимать наиболее подходящие диспетчерские решения, и обеспечивать безопасное движение судов на акватории в условиях высокой интенсивности движения и неопределенностей.

Разработанные в работе программные комплексы, в частности, система имитационного моделирования траекторий движения судов и система сбора данных о движении судов на морских акваториях служат базой для проведения научных исследований в области обеспечения навигационной безопасности коллективного движения судов. Они позволяют испытывать методы и алгоритмы как на моделируемых типичных траекториях, так и на реальных данных о трафике конкретной акватории. Это обеспечивает верификацию методик на предмет пригодности работы в конкретных условиях, обеспечивает идентификацию границ применимости.

Теоретические, методологические и практические результаты исследования представляют интерес для профильных научно-исследовательских коллективов, предприятий, обеспечивающих разработку, сопровождение и эксплуатацию современных СУДС и для администраций морских портов.

Результаты работы переданы для использования в Морской государственной академии им. адм. Г.И. Невельского, г. Владивосток, где используются в учебной и научной работе в области судовождения и эксплуатации водного транспорта, при планировании перспективных направлений работы учебно-методического центра конвенционной подготовки судоводителей. Кроме того, результаты работы используются Дальневосточным федеральным университетом, г. Владивосток в научно-исследовательской работе и в учебном процессе (см. Приложение А).

**Методы диссертационного исследования.** Проведённые исследования основываются на применении методов статистически оптимального оценивания, методов вычислительной линейной алгебры, методов оптимизации, методов нейроинформатики и систем нечёткой логики.

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

1. Концептуальная модель систем обеспечения навигационной безопасности коллективного движения судов – береговых систем управления движением судов (СУДС).
2. Метод идентификации модели движения объекта, основанный на идеях нечёткой логики и сформулированная на его основе модель задачи сопровождения траектории движущегося судна, основанная на мультимодельном подходе.
3. Модель многоуровневой оценки возможности опасного сближения судов, основанная на разделении уровней опасности в зависимости от траекторных свойств движения сближающихся судов.
4. Модель задачи наблюдения воздушных объектов двухкоординатными измерителями, основанная как на четких, так и на нечетких представлениях и соответствующие численные методы оценки разрешимости и собственно решения задачи.
5. Метод выделения объектов на фоне среды в системах радиолокационного наблюдения, основанный на автоматизированном расчете порога амплитуды отражённого сигнала.
6. Программная реализация разработанных моделей и методов, результаты вычислительных и натурных экспериментов.

**Степень достоверности результатов.** Обоснованность и достоверность результатов работы обеспечивается корректным применением методов исследования и подтверждается вычислительными и натурными экспериментами, существующими закономерностями, а, также, сопоставлением с общепризнанными результатами.

**Апробация результатов работы.** Основные научные и практические результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

- Дальневосточная математическая школа-семинар имени ак. Е.В. Золотова (Владивосток, 1999, 2000, 2002) [37, 45, 62].
- XXXII Summer School-Conference «Advanced Problems in Mechanics» (Санкт-Петербург, 2004) [197].
- Конференция «Интеллектуальный потенциал вузов – на развитие Дальневосточного региона России» (Владивосток, 2004, 2012) [32, 76].
- Региональная научно-техническая конференция, посвящённая годовщине морского образования на Дальнем Востоке (Владивосток, 2000, 2005) [27, 63].
- Региональная научно-техническая конференция творческой молодёжи Дальнего Востока (Владивосток, 2006) [26].
- Sino-Russian Academic Conference (Shenyang, 2012) [198].
- Конференция «Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации» (Тольятти, 2012) [71].
- Научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» (Красноярск, 2012) [67].
- Межвузовская научно-практическая конференция студентов и аспирантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России» (Санкт-Петербург, 2013) [73].
- Конференция «Информационные технологии в управлении» (ИТУ). (Санкт-Петербург, 2012, 2014) [50, 61].
- Конференция «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИКМ МТМТС) (Санкт-Петербург, 2015) [48].

По теме диссертации опубликовано 76 работ, среди которых 2 монографии, 33 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 6 переводных версий статей, проиндексированных в базах Scopus и Web of Science. Зарегистрировано 9 программных средств. Получено 6 патентов на изобретение.

Решение задач диссертационной работы выполнялось в рамках следующих научных проектов и программ:

- Проект РФФИ 11-01-98501-р\_восток\_а «Разработка моделей векторной гравиметрии на основе метода инерциальной навигации в интересах природопользования и сейсмической безопасности»;
- Проект РФФИ 12-1-П17-01 «Развитие математической теории интегрированных информационно-навигационных систем»;
- Проект в рамках Государственного задания высшим учебным заведениям в части проведения научно-исследовательских работ, проект 7.2104.2011 «Разработка и исследование нейро-нечётких моделей и алгоритмов решения обратных траекторных задач (интеллектуальные системы управления движением судов)»;
- Проект РФФИ 15-08-00234 «Моделирование интеллектуальной системы поддержки принятия решений при обеспечении навигационной безопасности коллективного движения судов на морских акваториях».

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы. Основной объём диссертации составляет 283 страницы, в том числе список литературы из 241 наименований, 105 рисунков, 23 таблицы. Диссертацию дополняют 3 приложения.

**Первая глава** посвящена обзору комплекса научных проблем, связанных с обеспечением навигационной безопасности движения судов и функционированием соответствующих технических средств. Обсуждаются особенности судовождения в ограниченных водах и в условиях коллективного движения; рассматриваются специальные классы технических средств – береговые системы управления движением судов, их функциональность, история, современное состояние и перспективы развития; даётся ретроспективный обзор математических моделей и методов оценки риска опасного сближения, предупреждения опасного сближения и планирования траекторий безопасного движения судов. В главе делается вывод о том, что разработка новых моделей и методов решения задач обеспечения



навигационной безопасности коллективного движения судов является актуальной задачей.

**Вторая глава** посвящена задаче идентификации модели движения объекта с помощью систем нечеткой логики. Исследуется применение разработанного метода для сопровождения траектории движущегося объекта. Рассматривается модельная интерпретация метода с помощью нечёткой системы типа Мамдани (нечёткие вход и выход), нечеткой системы типа Сугено (вход – нечёткий, выход – чёткий), нейро-нечеткой системы. Приводится большое количество графического материала, иллюстрирующего (по результатам вычислительных экспериментов) особенности поведения разработанных алгоритмов в типичных ситуациях. Делается вывод о том, что все варианты модельных представлений пригодны для практического использования. Ещё один аспект применения разработанной модели характеризуется возможностью её использования для нечеткой классификации наблюдаемых объектов по степени интенсивности маневрирования, что предоставляет дополнительные возможности по поддержке принятия решений операторами СУДС и судоводителями.

**В третьей главе** рассматривается задача оценки риска опасного сближения судов. В главе обосновывается необходимость перехода от двухуровневого представления опасной ситуации типа «опасный / безопасный» к многоуровневому представлению типа «очень опасный / опасный / почти безопасный / безопасный». При этом в качестве критерия разделения уровней опасности предлагаются кинематические свойства движения судов, что отвечает особенностям внешнего наблюдения, реализуемого СУДС. С целью перехода от дискретной оценки уровня опасности к непрерывной предлагается доопределить дискретные модели нечёткими модельными представлениями. В главе приведено большое количество графического материала, демонстрирующего особенности поведения разработанных моделей в типичных навигационных ситуациях. Кроме того, приведены результаты натурных исследований в акватории порта Владивосток.

**В четвёртой главе** исследуется задача трёхкоординатного наблюдения воздушных объектов двухкоординатными измерителями. На основе анализа классов ненаблюдаемых траекторий движения предложена модельная интерпретация задачи системой уравнений «состояние-измерение» в сферических (географических) координатах. При этом разработан метод априорной оценки разрешимости задачи в условиях конечной точности модельных представлений – представления вещественных чисел в ЭВМ и инструментальных погрешностей измерений. Теоретически и на модельных примерах показано, что сама по себе оценка координат объекта в трёхмерном навигационном пространстве при двухкоординатной информационной базе не даёт возможности выделять маловысотные низкоскоростные удалённые воздушные объекты; это может существенно исказить представления о навигационной обстановке на акватории. С целью преодоления этого ограничения в главе разработаны и исследованы несколько математических моделей интерпретации исходной задачи наблюдения как задачи распознавания (селекции) воздушных объектов: модель вероятностной оценки «надводный-воздушный», основанная на сравнении оценок высоты наблюдаемого объекта и эталонного фиктивного объекта; нечёткая модель оценки «надводный-воздушный», основанная на системе нечёткого логического вывода типа Сугено или нейро-нечёткой сети; модель оценки высотного диапазона наблюдаемого объекта, основанная на элементной базе искусственных нейронных сетей.

**Пятая глава** посвящена анализу некоторых аспектов функционирования СУДС как программного комплекса. Рассматриваются особенности программной архитектуры СУДС с точки зрения последовательности, характера и особенностей обработки информации. Предложен метод автоматизированного определения постоянного и адаптивного порога при визуализации радиолокационного образа акватории. Разработана математическая модель визуализации информации об опасных и безопасных параметрах движения судов при многоуровневой оценке риска опасного сближения судов (рассмотренной в главе 3), ориентированная на

использование в автоматизированном рабочем месте судоводителя (оператора СУДС). Модель также позволяет получить представление о степени эмоциональной нагрузки на судоводителей при движении в плотном судопотоке. Приводятся примеры реализации модели, в том числе - на реальных данных акватории залива Находка.

**В шестой главе** рассматриваются некоторые аспекты планирования и постановки вычислительных экспериментов в задачах обеспечения навигационной безопасности коллективного движения судов. Описана информационная система, позволяющая формировать базу данных трафика морских акваторий на основе информации открытых интернет-источников. Показаны примеры массивов собранных данных. Предложена математическая модель доопределения (интерполяции) собранных данных, ориентированная на специфику задач наблюдения.

Все разделы работы раскрывают различные стороны общей темы и имеют ярко выраженную смысловую связь.

Результаты, полученные в диссертации, ориентированы на расширение функциональности современных и перспективных СУДС и позволяют обеспечивать навигационную безопасность коллективного движения судов в условиях высокой плотности и интенсивности движения.

# **Глава 1. Обеспечение навигационной безопасности движения.**

## **Основные задачи и проблемы**

### **1.1 Особенности судовождения в условиях коллективного движения**

Безопасное судовождение – одна из основных категорий, связанных с эксплуатацией морского транспорта. Настоящее время характеризуется постоянным ростом объёмов морских перевозок; всё возрастающая интенсивность движения в зонах оживленного судоходства приводит к постоянному повышению нагрузки на судоводителей. При этом возрастает и потенциальная угроза возникновения нештатных ситуаций [235].

Как показывают экспериментальные исследования, наибольшее число аварий на водном транспорте совершается в зонах ответственности портов и на подходах к ним. В связи с этим наибольшей остроты проблема безопасного движения на море приобретает в ограниченных водах и стеснённых условиях плавания [20, 147].

Анализ проблем и модельных представлений коллективного движения судов указывает на исключительную важность знания судоводителем точных значений навигационных параметров судна (глобальных и относительных местных координат и скорости) [24, 135]. При этом современными правилами судовождения для предоставления информации о навигационных параметрах регламентировано применение автоматизированных навигационных средств. Вместе с тем, определение с высокой точностью координат и скорости судна само по себе не является достаточным условием его безопасного плавания, так как в условиях насыщенного судопотока требуется решать задачу координации (диспетчеризации) коллективного плавания судов.

Для решения этой задачи среди навигационных комплексов имеется особый класс технических средств – береговые системы управления движением судов (СУДС), действующие в зоне ответственности портов и на подходах к ним. СУДС

различной сложности оборудованы практически все подходы к портам и прибрежные районы интенсивного судоходства [203, 204, 237].

Движение морского транспорта имеет свою особую отраслевую специфику. Несмотря на развитие технологий автономных движущихся объектов (например, беспилотных летательных аппаратов, наземных роботов и т.п.) методы управления их движением не применимы для судоводительской практики. Это связано с тем, что каждая ситуация, сложившаяся при движении судов, является по-своему уникальной и зависящей от множества факторов: Международных правил предупреждения столкновений судов (МППСС) [4, 131], правил судоходства на конкретной акватории, состояния водной среды (течение, волнение), погодных условий, особенностей движения других судов, находящихся на акватории и т.д. Кроме того, динамика судна как объекта, движущегося в жидкой среде, также исключительно сложна [80, 82, 83, 84, 96, 97, 127, 129, 161, 169, 186-188].

Современная правовая база прямо регламентирует, что управление судном есть исключительное право его капитана. В своих действиях капитан лишь руководствуется правилами судоходства и информацией, предоставляемой различными навигационными средствами. Он может получать распоряжения и рекомендации от оператора береговой СУДС (диспетчера) и других участников движения, но окончательное решение о движении судна принимает только судоводитель (капитан судна).

В связи с этим следует особенно подчеркнуть, что устоявшийся термин «система управления движением судов - СУДС» (англ. vessel traffic system – VTS) не подразумевает собственно управления судном в классическом понимании (это задача систем автоматической прокладки курса и авторулевых [121, 122, 128]). Задачей СУДС является общая координация движения путем выдачи оператором СУДС указаний (например, о снижении скорости или изменении полосы движения), а способ выполнения этих указаний выбирает капитан судна. Таким образом, под термином СУДС понимается не система управления, а система поддержки принятия решений.

Принцип работы береговой СУДС как навигационного средства и её место в процессе обеспечения навигационной безопасности движения схематично показан на рисунке 1. Особенность ролей судоводителя и оператора СУДС проявляется в данном случае в двух аспектах: во-первых, оператор СУДС имеет возможность координировать трафик акватории, добиваясь максимальной навигационной безопасности коллективного движения; во-вторых, управление каждым конкретным судном осуществляет только судоводитель.

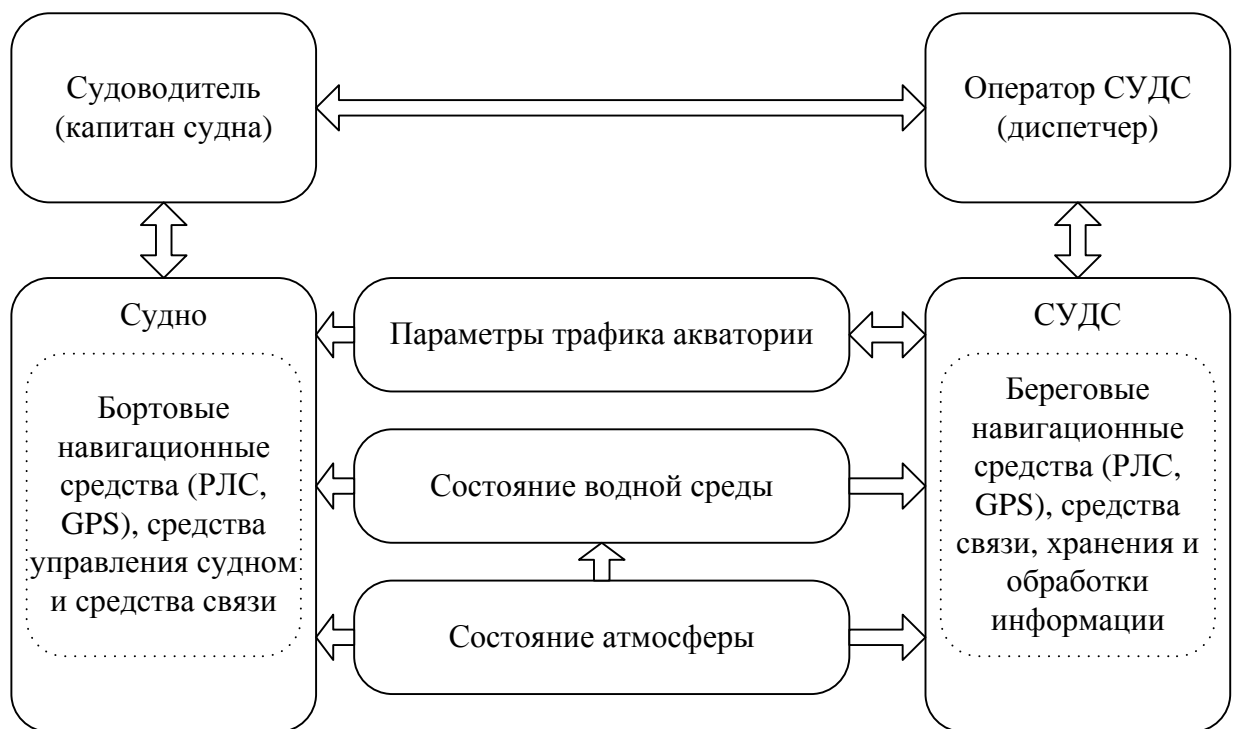


Рисунок 1 - Принцип работы береговой системы управления движением с организационной точки зрения

## 1.2 Задачи и развитие береговых СУДС

Системы управления движением судов представляют собой очень сложные в техническом и организационном отношении предприятия. Все существующие СУДС различаются по организационной структуре, уровню технической

оснащённости, уровню регулирования и другим параметрам [109, 119, 163, 190, 239].

По своей *организационной структуре* СУДС подразделяются на две группы:

- Одиночные СУДС, техническое оборудование которых расположено на одном посту;
- Комплексные СУДС, состоящие из оперативного центра, сети береговых радиолокационных станций (РЛС) и станций Автоматической идентификационной системы (АИС);

По *уровню технического оснащения* СУДС можно разделить на четыре группы:

- Посты управления движением, оборудование которых состоит из РЛС и средств визуального наблюдения;
- Системы, включающие в себя РЛС с индикаторами меток целей и средствами документирования;
- Автоматизированные СУДС, в состав оборудования которых наряду с несколькими РЛС входят подсистемы хранения и компьютерной обработки данных, автоматического документирования, дистанционной передачи данных и т.д.
- Системы, оборудованные приёмопередающим и индикаторным оборудованием Автоматической идентификационной системы (АИС).

Выбор уровня технического оснащения СУДС зависит от объема и характера возлагаемых на них функций.

Что касается различия систем управления движением по уровню регулирования движения, то он определяется уровнем технической оснащённости СУДС; другими словами, эти классификационные признаки взаимосвязаны. Однако, если уровень технической оснащённости можно определить достаточно точно, то уровень регулирования движения при существующем правовом статусе функционирования СУДС однозначно классифицировать достаточно сложно.

Современные СУДС рассматриваются как важный и неотъемлемый элемент обеспечения безопасности мореплавания, создаются и функционируют в соответствии с международными и национальными правовыми и нормативными актами. Правило V/19 Международной Конвенции по охране человеческой жизни на море (SOLAS) и связанная с ним Резолюция ИМО А.857(20) определяют, что СУДС создаются в целях охраны человеческой жизни на море, безопасности и эффективности судоходства и защиты окружающей среды. Правительства прибрежных государств обязуются создавать СУДС там, где, по их мнению, достаточно высоки интенсивность судоходства или степень риска аварий.

Согласно существующим отраслевым представлениям, в зависимости от протяженности зоны действия, навигационных и гидрометеорологических условий, интенсивности движения судов и оснащенности техническими средствами в соответствии с присвоенной категорией, СУДС должны выполнять целиком или частично следующие функции.

- Обнаружение судов на подходах к зоне действия, установление связи с ними, получение необходимого перечня данных о каждом судне, регистрация этих данных.
- Регулирование движения судов на основе радиолокационного и визуального наблюдения за плаванием и стоянкой судов в зоне действия СУДС, а также радиообмена, контроля за соблюдением установленных путей, скоростей и дистанций между судами, навигационной и другой информации для обеспечения движения судов.
- Выдача информации судам для предотвращения аварийных ситуаций, при нарушении правил плавания, смещения с якорных стоянок, о смещении со штатных мест средств навигационного оборудования (СНО) и наличия других факторов, влияющих на безопасность плавания судов, а также координация действий в аварийных ситуациях.
- Выдача обязательных для выполнения судами указаний, касающихся очередности движения, маршрута и скорости движения, места стоянки.



- Выдача данных о местоположении судна при радиолокационной проводке, которые носят информационный характер.
- Получение от соответствующих служб гидрометеорологической информации, передачу ее на суда, использование при выработке указаний о режиме движения.
- Получение от соответствующих местных органов гидрографии, береговых организаций и лоцманов данных об изменениях в работе СНО и иной навигационно-гидрографической информации в зоне действия СУДС, передачу полученных сведений на суда, использование их при выработке указаний о режиме движения.
- Оказание содействия аварийно-спасательным, буксировочным, дноуглубительным и другим специальным работам в зоне действия СУДС.
- Оказание содействия в установлении связи между судами, береговыми организациями и службами.
- Контроль за нахождением на штатных местах плавучих средств навигационного оборудования в зоне действия СУДС.
- Сбор, обработка, документирование и хранение информации и статистических данных о движении судов.

В настоящее время развитие СУДС в организационном плане идёт по пути углубления интеграции с судовыми системами и береговыми службами; концепция такой интеграции получила название «е-навигация» [110, 123, 199]. В настоящее время под ней понимают скоординированные сбор, интеграцию, передачу, воспроизведение и анализ информации о ситуации на море на борту судов и на берегу с помощью электронных средств в целях обеспечения улучшенной навигации «от причала до причала» и работы соответствующих служб, повышения надежности и безопасности морской навигации и защиты морской среды. Основным мотивом развития и поэтапного внедрения концепции е-навигации является координация дальнейшего развития технологий обеспечения безопасности судоходства.

Несмотря на то, что в СУДС используется самое разнообразное техническое оборудование, имеющее различные характеристики и функциональное назначение, их материальную часть можно структурировать на подсистемы с чётко выраженной направленностью. Важнейшими подсистемами СУДС, составляющими её инструментальное ядро, являются подсистемы сбора и обработки навигационной информации.

Основой подсистемы сбора информации являются радиолокационные станции кругового обзора. В последнее время они дополняются приёмниками Автоматической идентификационной системы (АИС), получающими информацию о навигационных параметрах движения судна и некоторые данные сервисного характера [1, 125, 205].

Что касается обработки, то в современных СУДС она осуществляется специализированными компьютерами с высоким быстродействием и большим объёмом памяти.

В настоящее время можно выделить пять существующих и перспективных поколений систем управления движением судов [9, 10, 106, 119, 134, 138, 154-156].

**1 поколение СУДС** использует в качестве информационной базы стандартные РЛС кругового обзора и реализуют лишь визуализацию первичной измерительной информации – отражённого эхо-сигнала наблюдаемой акватории. Получили распространение в 50 – 60 годы. Самый первый технический комплекс был введён в эксплуатацию в 1948 году фирмой «Сэр Роберт Уотсон и партнеры». Система располагалась на левом берегу реки Мерсей на подходах к Ливерпулю, включала в себя серийную судовую РЛС «Сперри Коссор» и аппаратуру УКВ радиосвязи и предназначалась для радиолокационной проводки крупных судов в условиях плохой видимости. В последующие годы аналогичные системы были установлены в Дугласе Сазерленде, Саутгемптоне (Англия), Гавре (Франция), Амстердаме (Голландия), Балтиморе, Лонг-Бич (США), Ванкувере (Канада).

**2 поколение СУДС** обладает повышенным уровнем реализуемых математических моделей и поддерживает функции автосопровождения траектории

целей и отображения меток судов с их координатами и скоростями. Получили распространение в 60 годы. Успешная эксплуатация СУДС второго поколения выявила их широкие возможности, в свете которых были уточнены задачи, возлагаемые на эти системы. В 1973 году в Голландии была создана специальная рабочая группа, которая и сформулировала эти задачи в общем виде следующим образом: «Система управления и регулирования судоходства предназначена, прежде всего, для повышения безопасности внутри и вокруг судоходной области. Кроме того, подобную систему следует использовать для более эффективного и экономичного использования инфраструктуры гавани и прилегающих к ней водных проходов».

**3 поколение СУДС** кроме функций визуализации навигационной обстановки (отображения первичного РЛС сигнала и меток целей) реализует специальные математические модели распознавания опасно сближающихся судов. СУДС третьего поколения появились в 70 годы вместе с первыми универсальными ЭВМ. Первая такая автоматизированная СУДС была введена в эксплуатацию в Сан-Франциско в августе 1972 года. Эта система состояла из оперативного центра на острове Йерба-Буэна и телеуправляемой РЛС на мысе Бонита. Обработка данных по судам выполнялась подсистемой автоматического захвата и сопровождения целей, которая могла обрабатывать одновременно до 253 объектов. В 1973 году были разработаны проекты автоматизации СУДС для Нью-Йорка, Нового Орлеана, Пюджет Саунда и Валдиза.

По настоящее время подавляющее большинство СУДС, обслуживающих порты земного шара, являются системами третьего поколения. В последнее десятилетие эти системы получили дополнительное развитие навигационных и сервисных функций за счет повсеместного внедрения Автоматической идентификационной системы (АИС), основанной на использовании на судах транспондеров. Транспондеры АИС передают на берег по запросу береговой СУДС координаты судна, определяемые по данным спутниковых навигационных систем второго поколения (GPS/Глонасс), его название, регистрационные данные и

служебную информацию, что значительно упрощает работу диспетчеров и открывает расширенные возможности по автоматизации. Такие СУДС с поддержкой АИС можно отнести к поколению 3+ («три с плюсом»).

**4 поколение СУДС** кроме визуализации навигационной информации реализует оптимизирующие математические модели обеспечения безопасного движения судов. Например, для опасно сближающихся судов такие системы способны предложить рекомендации по изменению курса и скорости движения. В настоящее время СУДС четвёртого поколения ещё не получили широкого распространения, а их специфические функции используются скорее, как исследовательские прототипы, а не как повседневное промышленное средство автоматизации.

**5 поколение СУДС** характеризуется расширенной функциональностью по диспетчеризации движения, в частности, СУДС пятого поколения реализуют математические модели планирования траектории безопасного движения судна с учетом текущего трафика (коллективного движения) и особенностей конкретной акватории. Они способны планировать оптимальные и наиболее безопасные схемы движения на акваториях в зависимости, например, от метеоусловий и времени года. В настоящее время СУДС пятого поколения находятся в стадии научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, таким образом, пятое поколение СУДС можно считать перспективным.

В нашей стране изучение возможностей и целесообразности внедрения систем управления движением судов началось в 50 годы. Первые простейшие системы были введены в эксплуатацию в Усть-Камчатске и Одессе в 1956 году. В 1961 году промышленностью СССР был выпущен первый образец специализированной РЛС «Раскат», который и был установлен в порту Ленинграда. К 1966 году системы второго поколения, основанные на использовании «Раската», начали действовать в портах Жданов, Ильичёвск и Мурманск, а в конце 70 годов был налажен выпуск новых специализированных РЛС «Океан-М51».

В октябре 1980 года в заливе Находка была введена в эксплуатацию автоматизированная СУДС третьего поколения. Оборудование этой системы было поставлено японской фирмой «ОКІ Electronics». Год спустя была введена в эксплуатацию централизованная автоматизированная СУДС северо-западного района Чёрного моря. До конца 80 годов системами третьего поколения было оборудовано большинство крупных портов нашей страны.

В 90 и нулевые годы, несмотря на все трудности, переживаемые страной, выдающийся успех в деле организации управления движением судов был достигнут в портах залива Петра Великого (Владивосток, Находка, Зарубино, Посьет), объединённых единой Региональной СУДС. Знания и опыт, накопленные управляющей Региональной СУДС компанией «Норфес», в дальнейшем были использованы при организации управления движением на современных принципах во всех портах нашей страны и послужили основой нового отечественного отраслевого стандарта. Этот опыт был воспринят и при создании компанией «Транзас» новой отечественной СУДС «НАВИ – ХАРБОР» - системы поколения 3+ мирового уровня, внедрённой в настоящее время в крупнейших портах и нашей страны, и целого ряда зарубежных стран.

В Приложении Б показано несколько рисунков, характеризующих работу СУДС в заливе Находка.

Вообще, проблемы построения СУДС и обеспечения навигационной безопасности судовождения привлекают внимание большого числа исследователей, что подтверждает их многоаспектность и актуальность. В настоящее время существует целый ряд специализированных научных изданий, предоставляющих свои страницы для публикации результатов исследований в соответствующей области. Самым авторитетным и уважаемым мировым научным сообществом, содержащим наибольшее количество проблемных статей самого высокого исследовательского уровня является журнал «Journal of Navigation», издаваемый специализированным институтом Royal Institute of Navigation. Кроме него в международной научной среде можно отметить такие журналы как: «Journal

of Marine Science and Technology», издаваемый в Японии, и «Navigation», издаваемый в США.

Среди авторитетных журналов, выходящих в России и периодически публикующих соответствующие работы общесистемно-теоретического характера, можно отметить такие издания как «Известия РАН. Теория и системы управления» и «Проблемы управления». Существует также целый ряд специализированных изданий, публикующих работы прикладного характера: «Транспорт: наука, техника, управление», «Морской вестник», «Мехатроника, автоматизация, управление», журналы, издаваемые отраслевыми университетами. Среди них следует особо выделить журналы «Эксплуатация морского транспорта» и «Вестник государственного университета морского и речного флота им. С.О. Макарова».

### **1.3 Структура навигационных функций современных береговых СУДС**

В настоящее время имеет место определённая структуризация функций береговых СУДС, обеспечивающих их основное целевое назначение. Ядром этих функций являются навигационные, то есть функции, решающие задачу определения координат объектов в навигационном пространстве. Навигационные функции являются базовыми для решения всех остальных задач СУДС и определяют качество работы СУДС в целом. Анализ мировых тенденций развития СУДС показывает, что генеральным направлением такового является их всеобъемлющая информатизация, проявляющаяся, в частности, в постоянном расширении арсенала аппаратных и программных средств, углублении обработки информации и её комплексировании [8, 141, 167, 170, 194, 239 и др.].

Несмотря на успехи в развитии различных навигационных средств, главным информационным элементом береговой СУДС, способным обеспечить надёжность и автономность её функционирования, являются двухкоординатные радиолокационные станции (РЛС) кругового обзора. Такая элементная база определяет тот факт, что проблемы обеспечения навигационных функций в

традиционных аналоговых и современных цифровых системах имеют сходное звучание, хотя и принципиально разнятся в ряде аспектов.

С указанных позиций проблема реализации навигационных функций СУДС может быть дифференцирована на следующие подзадачи (структура навигационных функций современных СУДС схематически показана на рисунке 2):



Рисунок 2 - Структура навигационных функций современных СУДС с точки зрения последовательности обработки информации и решаемых задач

- Получение радиолокационного образа навигационного пространства и преобразование радиолокационного образа с помощью аналого-цифровых (АЦП) устройств («ведение» радиолокационного образа в память ЭВМ);
- Обеспечение обнаружения, захвата и сопровождения траекторий целей;
- Определение (оценка) навигационных параметров целей (координат и их производных), в том числе путем комплексирования информации;
- Обеспечение навигационной безопасности движения.

С учетом декларируемых целей настоящей работы остановимся подробнее на последних трёх задачах.

Под понятием «*обнаружение цели*» принято понимать выделение полезного отражённого радиосигнала на фоне помех и его интерпретацию как свидетельства присутствия в той или иной области навигационного пространства интересующего наблюдателя физического объекта. Методы обнаружения могут быть различными, простейшим из них является так называемый порогово-амплитудный подход, когда свидетельством наличия в пространстве цели является превышение амплитудой отражённого сигнала некоего порога.

*Сопровождением траектории цели* называют динамический процесс соотнесения условной точки, принятой за объект, с радиолокационным образом цели. Инициацию этого процесса называют *захватом цели*. Непроизвольное (аварийное) прекращение сопровождения – срывом сопровождения (срывом захвата). С механизмом процесса сопровождения тесно связано понятие *строба*, а именно – с тем обстоятельством, что протяжённый физический объект необходимо отождествить с точкой. *Строб* – область радиолокационного образа, используемая для преобразования в точку, отождествляемую затем с измеренными координатами объекта. Процедура такого преобразования называется *стробированием*. Размер строба, выраженный в каких-либо единицах (например, в единицах длины), называется *шириной строба*. Стробирование в своём простейшем варианте обычно представляет собой определение «центра масс» амплитуд отражённого сигнала в



области строга («центра масс» строга). В ряде практических приложений используются и более сложные подходы.

Основное назначение процедур обнаружения, захвата и сопровождения – формализация измерительной информации. Формализованные измерения могут быть применены в качестве основной навигационной информации об объекте как непосредственно, так и использоваться в качестве информационной базы процедур оценивания. Именно последнее принято в современных СУДС. Главные назначения процедур оценивания – определение характеристик, недоступных непосредственному измерению. Если иметь в виду задачи, возлагаемые на СУДС, то такими характеристиками являются координаты, скорости, ускорения и, возможно, некоторые другие параметры, определяющие характер движения наблюдаемых системой объектов. В рамках модельных представлений современной теории автоматического управления задачи такого рода классифицируются как обратные задачи динамики движущихся объектов. Процедуры оценивания используются также для комплексирования информации, поступающей от различных информационных элементов СУДС (например, РЛС и транспондеров АИС).

Регулярные исследования проблем обеспечения навигационной безопасности движения судов начались в конце 1950 годов, когда резко выросла интенсивность судоходства. К настоящему времени в научном направлении обеспечения навигационной безопасности судовождения сложилась устойчивая специфическая терминология [118, 235]. Так, управляемое судно – это судно, находящееся под непосредственным контролем (например, собственное судно). По отношению к остальным судам применяется термин судно-цель. Все объекты, находящиеся на акватории, кроме управляемого судна (как суда, так и не являющиеся судами - например, береговая линия), называются препятствиями. Статические объекты – покоящиеся объекты. Динамические объекты – движущиеся суда, меняющие скорость или курс. Под учётом влияния внешней среды понимается учёт направления и силы ветра или течения. Среди множества

методов обеспечения навигационной безопасности движения отдельно выделяют оптимизирующие методы – это методы, включающие оптимизирующие процедуры, например, вычисление кратчайшего пути, траектории с минимальным количеством маневров и т.п. Ограниченные воды – это акватории, ограниченные береговой линией (например, бухты, проливы). Динамическая модель движения судна – модель движения судна, учитывающая особенности его движения в жидкой среде.

Методы обеспечения навигационной безопасности движения делятся в свою очередь на три категории:

- методы заблаговременного обнаружения возможности опасного сближения судов (оценки риска опасного сближения);
- методы маневрирования для ухода судна от опасного сближения (предупреждения опасного сближения);
- методы планирования траектории безопасного движения судна.

Задача методов оценки риска – предупредить судоводителя о том, что существует риск столкновения с препятствием или сближения с ним на недопустимо малое расстояние. Методы предупреждения опасного сближения дают алгоритм действий судоводителя, позволяющих избежать опасного сближения с другими объектами. Методы планирования траектории судна позволяют прогнозировать будущую навигационную ситуацию на основе текущей навигационной обстановки и рассчитать планируемую траекторию судна таким образом, чтобы обеспечить движение управляемого судна на безопасной дистанции от других объектов. Методы планирования траектории могут быть интегрированы с системами автоматизированной прокладки курса (авторулевыми).

## **1.4 Некоторые научные и технические аспекты задач обеспечения навигационной безопасности движения**

### **1.4.1 Обзор моделей и методов оценки риска опасного сближения судов**

В методах оценки риска опасного сближения базовым понятием является точка кратчайшего сближения судов (closest point of approach (CPA)). Считается, что при безопасном движении кратчайшее расстояние между судами должно быть больше некоторого критического значения. Учитываются также величины «время движения до точки кратчайшего сближения судов» (time of closest point of approach (TCPA)) и «расстояние до точки кратчайшего сближения судов» (distance to closest point of approach (DCPA)). Для моделирования риска столкновения используется представление о некоторой «зоне навигационной безопасности» вокруг каждого судна, называемой также «корабельный домен».

Фудзии и Танака [192] были первыми, кто ввёл понятие «корабельный домен». Они предложили корабельный домен в форме эллипса, опираясь на результаты статистических исследований движения судов во внутренних водах Японии.

Развивая их идею, Гудвин [193] предложила корабельный домен, разделённый на три сектора. В её модели считается, что домен - область вокруг судна, которую судоводитель предпочитает видеть свободной от других объектов. Размеры этой зоны различны, в зависимости от того, движутся ли суда навстречу друг другу, совершает ли судно обгон или стоит на месте (рисунок 3). Радиус секторов корабельного домена Гудвин – это критические значения величины CPA для каждого из этих трёх возможных сценариев движения, зависящие от таких факторов как интенсивность движения, длина судна, максимальная скорость судна и т.п. Меньший радиус левого сектора связан с правилами МППСС, так как нахождение препятствий по левому борту более вероятная и естественная ситуация, чем нахождение их по правому борту: при встречном движении суда

расходятся левыми бортами. Малый размер кормового сектора также связан с особенностями судовождения: судоводитель не имеет возможности непосредственно контролировать ситуацию у себя за кормой.

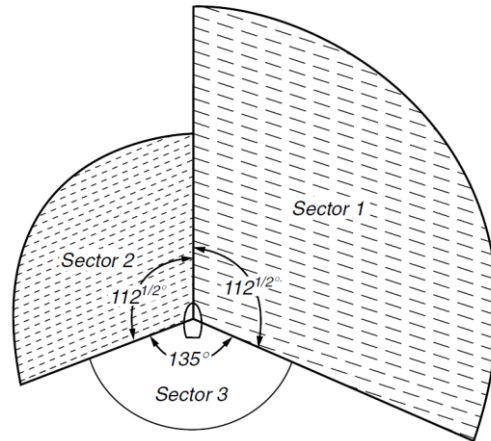


Рисунок 3 - Корабельный домен Гудвин

Корабельный домен Дэвиса [184] развивает идею Гудвин. Он представляет собой эллипс со смещённым центром, разделённый на сектора, имеющие тот же смысл, что и у Гудвин (рисунок 4). Такой «гладкий» домен оказывается удобнее для построения математических моделей. Кроме того, Дэвис также предложил концепцию «активного домена» - это домен увеличенного размера, служащий индикатором для судоводителя: при вторжении в область активного домена других объектов судоводитель должен принять решение о совершении маневра уклонения.

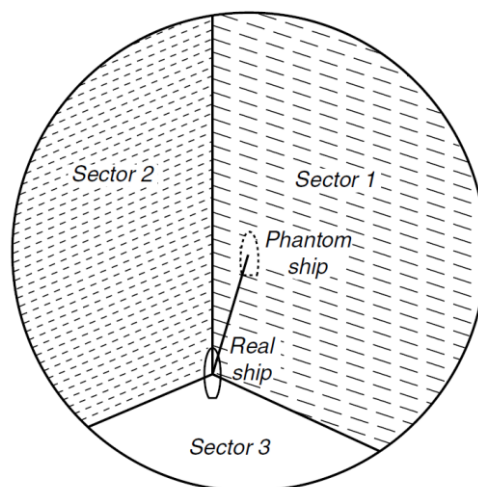


Рисунок 4 - Корабельный домен Дэвиса

Корабельный домен Колдуэлла [181] имеет различную конфигурацию в зависимости от того или иного сценария сближения судов. Так, в случае встречного движения в домене полностью отсутствует кормовая часть, поскольку в этом случае ею можно пренебречь. В случае обгона домен имеет эллипсоидальную форму, аналогично модели Фудзии и Танака.

Корабельный домен Колли [182] был разработан на основе домена Дэвиса. Модель безопасности движения, разработанная Колли, берёт начало из области управления воздушным движением и названа «range-to-domain over range-rate (RDRR)». В основу модели было положено отношение расстояния от судна-цели до домена управляемого судна (range-to-domain) к скорости изменения этого расстояния (range-rate). Сравнивая эту величину с критическим значением модель может определить точку или время начала маневра уклонения. Эта концепция получила широкое распространение и использовалась целым рядом других авторов, например [183]; в этой работе модель RDRR модифицирована для автоматического обнаружения опасного сближения и определения типа такого сближения (обгон или встречное движение) путем дополнительного учета расстояния и времени до сближения.

Корабельный домен Цзю [241] – это особое представление зоны безопасности вокруг судна, учитывающее субъективные особенности восприятия судоводителем окружающей обстановки. Его определение основано на нейронных сетях, обучаемых методом обратного распространения ошибки, что позволяет частично учесть влияние внешней среды, не прибегая при этом к сложным классическим детерминированным математическим моделям её описания. Структура нейронной сети подобрана так, чтобы оперировать безразмерными переменными, такими как соотношение длины домена к его ширине, нормированное расстояние, нормированная дальность видимости и т.п. Настраиваемые коэффициенты нейронной сети также являются безразмерными величинами.

Из разработок последних лет стоит отметить оригинальный метод оценки риска столкновения, предложенный В.М. Букатым и С.Ю. Морозовой [11, 12]. В этом способе вычисляются моменты времени выхода двух сближающихся судов на одну и ту же параллель, и один и тот же меридиан. Если разница между этими моментами времени окажется меньше критической, то суда считаются опасно сближающимися. Таким образом, фактически данный способ неявно использует корабельный домен в форме эллипса.

Следует также отметить разработку М.А. Коноплёва [112, 113], где используется корабельный домен в форме эллипса, а оценка риска столкновения делается нечеткой системой, дополнительно учитывающей кинематические свойства движения судна при маневрировании.

Все описанные здесь представления корабельных доменов задают критическую величину СРА для пары «судно-судно». Экстраполяция движения судов происходит в предположении, что движение является прямолинейным и равномерным. Если экстраполяция движения судов приводит к «вторжению» в область корабельного домена, то считается зафиксированным риск опасного сближения и судоводителю нужно принять решение о начале маневра уклонения; параметры маневра уклонения при этом никак не определяются. Все методы также сводят навигационную обстановку на акватории к набору пар «судно-судно», не решая задачу для нескольких судов в целом. За исключением «активного домена» Дэвиса, все описанные представления не дают полноценной возможности для работы в ограниченных водах. За исключением нечёткой системы Коноплёва (частично), все они не учитывают динамику движения судов и возможность их неравномерного движения. В таблице 1 показаны свойства рассмотренных методов оценки риска столкновения с точки зрения способности их модели учитывать правила судовождения, решать задачу для нескольких судов одновременно, учитывать движение в ограниченных водах, учитывать динамические свойства движения судна, возможность изменения курса и скорости судна.

Таблица 1 - Методы оценки риска столкновения судов

Метод/модель	МППСС	Кол-во судов > 2	Огранич. воды	Динам. модель движения судна	Измен. курса судна	Измен. скор. судна
Корабельный домен Фудзии и Танака	-	-	-	-	-	-
Корабельный домен Гудвина	+	-	-	-	-	-
Корабельный домен Дэвиса	+	-	+	-	-	-
Корабельный домен Кодузелла	+	-	-	-	-	-
Корабельный домен Колли	+	-	-	-	-	-
Корабельный домен Цзю	+	-	-	-	-	-
«Временной» корабельный домен Букатого и Морозовой	-	-	-	-	-	-
Нечеткая система Коноплева	+	-	-	+/-	-	-

#### 1.4.2 Обзор моделей и методов предупреждения опасного сближения судов

Первый способ предупреждения опасного сближения был предложен Калвертом [177]. Был предложен манёвр уклонения, при котором судно делает поворот на правый борт таким образом, чтобы линия, соединяющая два судна (sight-line или line-of-sight (LOS)), вращалась против часовой стрелки во время маневра.

Для распознавания риска опасного сближения и вычисления параметров возможного маневра судна Митрофановым [220] был разработан специальный «индикатор столкновения» - электромеханическое устройство, устанавливаемое на мостике судна. Устройство требовало ручного ввода данных, получаемых с радара, о координатах, скоростях и курсах находящихся на акватории судов и определяло возможные параметры маневра, предотвращающего их опасное сближение. Эти возможные значения скоростей и курсов отображаются в виде сектора (рисунок 5).

Из них судоводитель может интуитивно выбрать конкретные значения скорости и курса.

Джонс [211] предложил способ предупреждения опасного сближения на основе «диаграмм маневра». Диаграмма представляла собой изображение области параметров безопасного движения, основанной на геометрических представлениях относительного движения судов и возможных маневров встречного судна-цели. Целью диаграммы было показать области параметров движения, ведущих к опасному сближению с другими судами с высокой вероятностью. Как и метод Митрофанова, метод Джонса лишь обозначает параметры опасного и безопасного движения, но не позволяет определить параметры наиболее подходящего (оптимального) маневра уклонения.

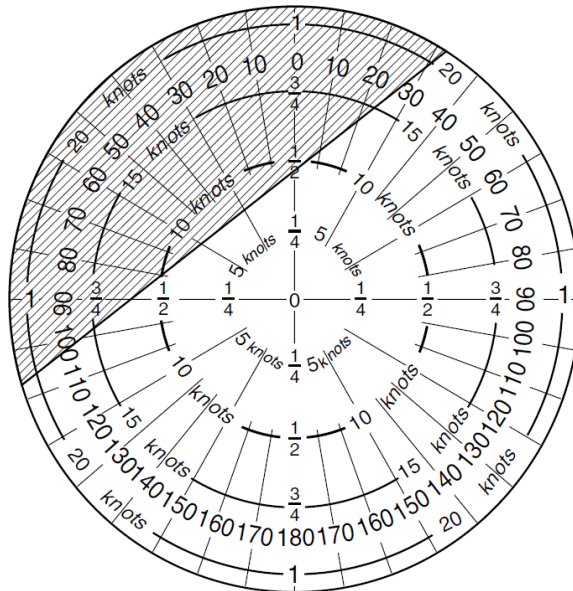


Рисунок 5 - Схема работы индикатора Митрофанова. Заштрихованная область соответствует опасным значениям скорости и курса судна. Судоводитель выбирает подходящие скорость и курс из не заштрихованной области

Мерцем и Кармакаром [218] был предложен способ предупреждения опасного сближения на основе тригонометрической модели, аналитически определявшей параметры движения судов таким образом, что обеспечивалась максимально возможная дистанция между ними. Модель учитывает относительное положение судов, относительную скорость их движения и характеристики их



маневренности. При этом движение судов считается идеализированным: модель не учитывает возможного изменения скорости судна и влияния на судно внешней среды.

До 1980 года навигационные средства, располагавшиеся на мостике судна, решали в основном задачу визуализации навигационной обстановки. Профессиональное сообщество ещё не осознавало возможностей компьютерной обработки информации. Идеи внедрения компьютеров для обработки навигационной информации воспринимались сдержанно из-за низкой надёжности элементной базы компьютеров того времени. Кроме того, судоводители придерживались мнения, что знания и опыт профессионала гораздо важнее, чем формальные расчеты на основе математических моделей [173]. Тем не менее, в начале 1980 годов появились первые модели и методы предупреждения опасного сближения судов, рассчитанные на применение ЭВМ.

Кэнелл [178] описал решение задачи по предупреждению опасного сближения двух судов путем сведения её к задаче одноэтапной кооперативной игры с целевой функцией максимизации безопасности, основанной на величине отклонения от опасного курса. Была предложена функция безопасности каждого возможного сценария движения судна, в матрице возможных сценариев искались лишь те сценарии, которые не приводили к опасной ситуации. Опасной ситуацией считалась такая, которая приводит к нулевой скорости вращения линии, соединяющей два судна (LOS). Модель задачи учитывала требования МППСС, выделяя в матрице сценариев такие, которые противоречили этим требованиям.

Дегрэ и Лефевр [185] предложили систему предупреждения столкновений на основе принципа «область маневра» (room-to-manoeuvre), который можно было использовать как для визуализации навигационной обстановки, так и для принятия решения о совершении того или иного маневра уклонения. Принцип «область маневра» основан на геометрическом представлении области возможных значений вектора скорости для случаев опасного и безопасного движения (рисунок б). Авторы особенно подчеркивали, что предложенная ими модель пригодна для

реализации в специальном вычислительном устройстве. Вместе с тем, модель никак не позволяет учитывать требования МППСС и позволяет лишь предупреждать столкновения, не решая задачу выбора оптимальной траектории для расхождения судов.

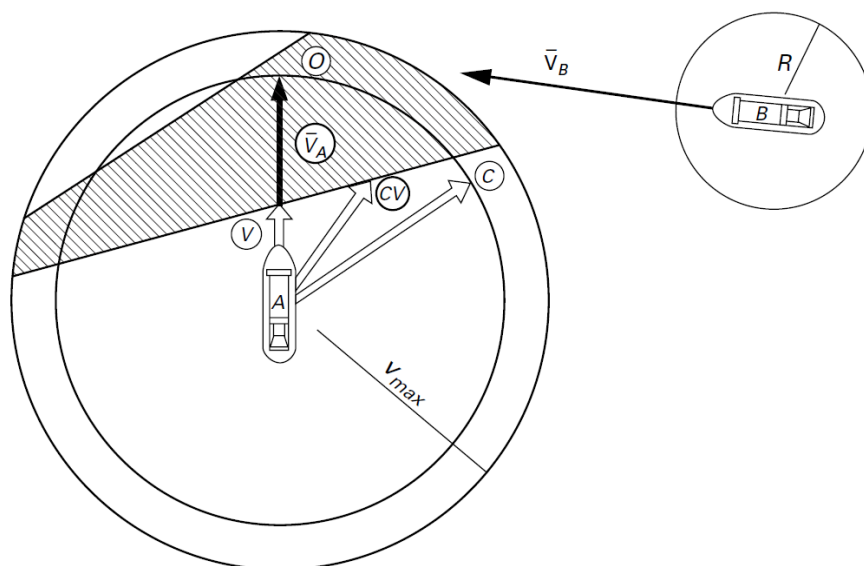


Рисунок 6 - Идея «области маневра» Дегрэ и Лефевра. А – управляемое судно, В – судно-цель.  $\bar{V}_A$  - вектор скорости управляемого судна,  $\bar{V}_B$  - вектор скорости судна-цели. Видно, что  $\bar{V}_A$  находится в опасной (заштрихованной) зоне.  $V$  - вектор скорости, соответствующий безопасному движению управляемого судна без изменения курса.  $CV$  - вектор скорости, соответствующий безопасному движению управляемого судна, когда изменяются и скорость, и курс.  $C$  - вектор скорости, соответствующий безопасному движению управляемого судна, когда изменяется только курс

Доув [190] разработал систему предупреждения столкновений на основе представлений корабельного домена Колли. RDDR модель используется для определения времени, когда судно должно изменить курс, чтобы избежать столкновения, а, также, параметров манёвра, необходимого для предотвращения столкновения. Маневр начинается, когда происходит «вторжение» другого объекта в область корабельного домена, параметры манёвра зависят от характера сближения судов. Манёвр производится до тех пор, пока другой объект не выйдет из области корабельного домена, после чего судно возвращается на исходный курс. В случае присутствия на акватории множества судов задача решается для каждой

пары «судно-судно» последовательно, в соответствии с уровнем опасности для каждой пары. За уровень опасности принимается время ТСРА. Недостатком метода является тот факт, что при решении задачи уклонения для одной пары судов метод никак не учитывает наличие на акватории других судов, что может послужить причиной для неблагоприятного развития событий, например, попадания судна в «навигационную ловушку». Метод не позволяет оптимизировать траекторию расхождения судов.

Джеймс [210] предложил нечёткую экспертную систему принятия решений для предотвращения столкновений судов. Возможные действия для предотвращения столкновения были классифицированы в зависимости от расстояния между судами и их взаимного расположения. Нечёткая система работает для случая двух судов, находящихся в открытом море и учитывает требования МППСС, однако не учитывает воздействие окружающей среды и не оптимизирует траекторию движения.

Смитон и Коэнен [229] также использовали нечёткую систему для принятия решений. Правила их системы основаны главным образом на требованиях МППСС. Система принимает решение путем анализа двух параметров: тип движения пары «судно-судно» (то есть встречное, догоняющее, пересекающееся и т.п.) и степень риска столкновения, основанная на величинах СРА, ТСРА и расстоянии. Авторы взяли при этом за основу представления корабельного домена Дэвиса. Наиболее подходящие параметры маневра определяются путем моделирования развития навигационной ситуации (прогноза) на некоторое время вперед при различных изменениях курса с дискретом 10 градусов. В случае множества судов система решает задачу для каждой пары «судно-судно» в соответствии с заданным приоритетом.

Петерсен [224] предложил ещё один вариант индикатора столкновения, основанного на анализе векторов скорости движения судов. Индикатор рассчитывает «линию опасности столкновения» (collision danger line (CDL)) и «область опасности столкновения» (collision danger sector (CDS)). Если движение

судна таково, что конец вектора скорости лежит на «линии опасности столкновения», то это движение ведёт к опасности. Судоводитель должен маневрировать таким образом, чтобы конец вектора скорости не попадал на эту линию (рисунок 7).

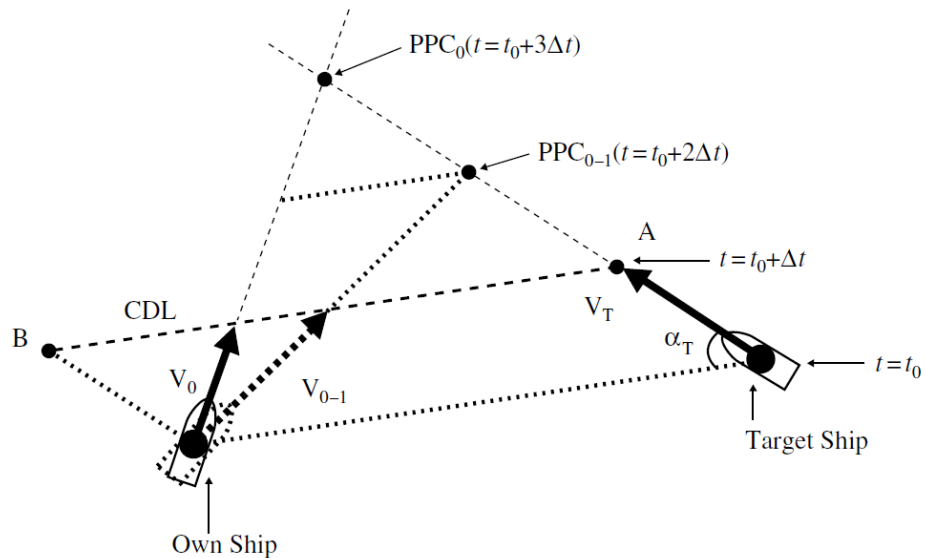


Рисунок 7 - Иллюстрация «линии опасности столкновения» Петерсена. Конец вектора скорости управляемого судна не должен лежать на линии CDL

«Область опасности столкновения» дополнительно учитывает значение CPA, судоводитель должен маневрировать таким образом, чтобы конец вектора скорости не попадал в эту область (рисунок 8). Система, таким образом, служит для предупреждения о возможном столкновении и визуализации возможных параметров маневра, но не решает задачу выбора оптимального маневра. Метод никак не учитывает МППСС и может приводить к ситуациям, когда судоводитель при формальном выполнении рекомендаций будет вынужден постоянно оставаться в кильватере судна-цели или идти параллельно ему. Кроме того, в случае нахождения на траектории большого количества судов судоводителю будет трудно принять решение из-за особенностей визуализации информации таким способом.

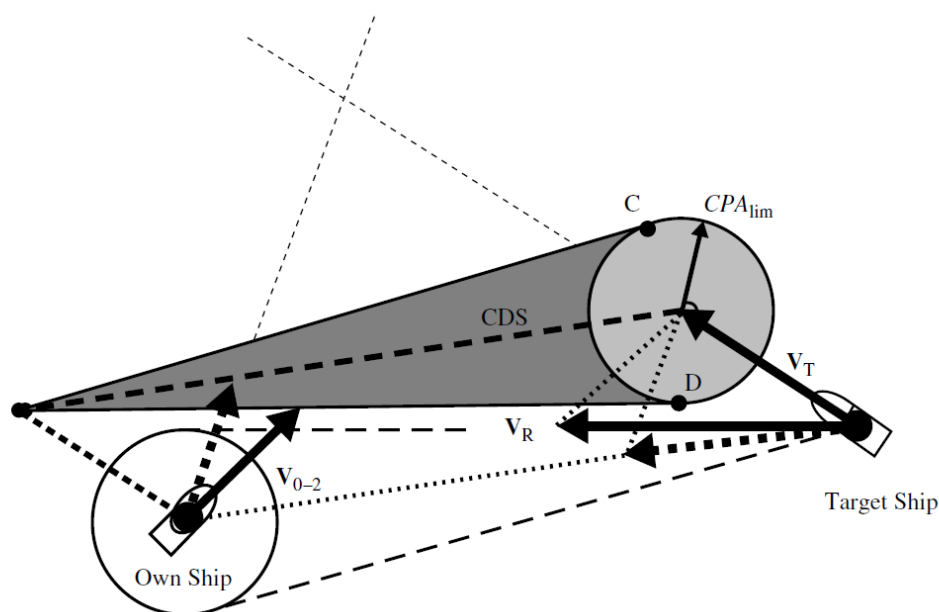


Рисунок 8 - Иллюстрация «области опасности столкновения» Петерсена. Конец вектора скорости управляемого судна не должен лежать внутри области CDS

Уилсон [238] предложил метод вычисления маневра уклонения судна, похожий на тот, что традиционно используется в системах наведения торпед и ракет: нужно совместить направление вектора относительной скорости с направлением линии, соединяющей суда (LOC), что является условием столкновения (рисунок 9). Условия столкновения сформулированы так: расстояние между «корабельными доменами» должно быть меньше критического; направление вектора относительной скорости должно быть близко к направлению линии, соединяющей суда (LOC); скорость вращения вектора относительной скорости должна быть близка к скорости изменения направления линии, соединяющей суда (LOC). Способ слишком идеализированно описывает движение судов и не учитывает множества ограничений, например, правил МППСС, а, также, предлагает управлять движением исключительно с помощью изменения курса, что не всегда является лучшим решением на практике.

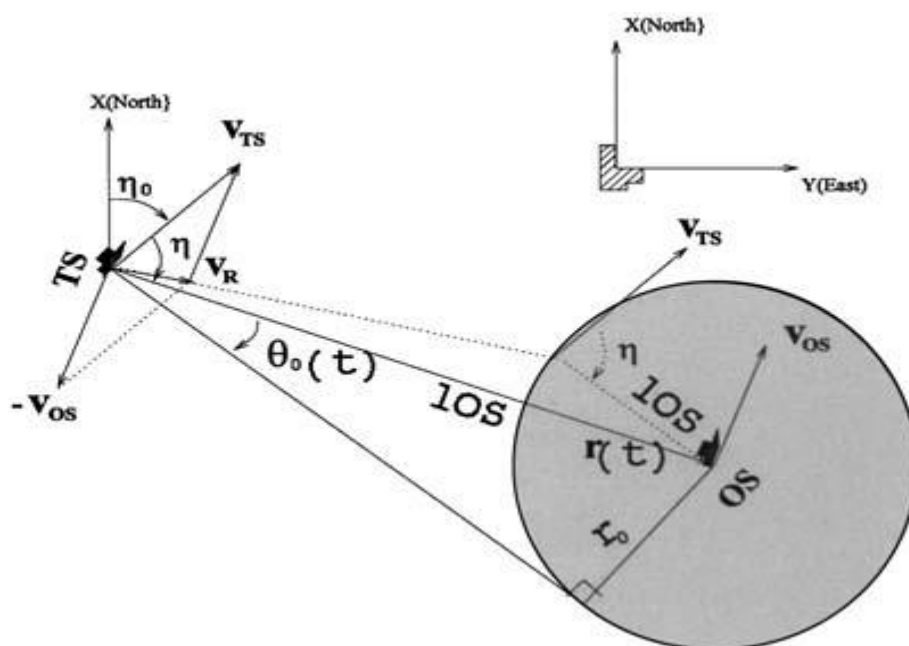


Рисунок 9 - Геометрическая схема относительного движения двух судов Уилсона [238]. Показаны курсы и скорости управляемого судна и судна цели, а, также, линия, соединяющая суда (LOS) и параметры, определяющие её изменение

Из разработок последних лет следует отметить способ, предложенный А.П. Нырковым и П.В. Викулиным [139]. Способ основан на простых представлениях о кинематике движения и адаптирован для использования данных о движении судов, поставляемых автоматической идентификационной системой (АИС).

Кроме того, представляет интерес способ, разработанный исследовательским коллективом под руководством Р. Злапчинского [233]. Взяв за основу идею области манёвра Дегре и Лефевра, авторы дополнительно ввели различные уровни опасности, соответствующие тем или иным курсам и скоростям управляемого судна. Градация уровней опасности обусловлена размерами корабельного домена и правилами судоходства МППСС (способ рассматривается подробнее в главе 5 настоящей работы).

Все рассмотренные здесь подходы к предупреждению столкновений судов обладают такими общими недостатками как неполнота для применения в ограниченных водах и невозможность учета сложной динамики движения судов и воздействия окружающей среды (таблица 2).

Таблица 2 - Методы предупреждения столкновения судов

Метод/модель	МППСС	Кол-во судов > 2	Огранич. воды	Динам. модель движения судна	Измен. курса судна	Измен. скор. судна
Способ Калверта	-	-	-	-	+	-
Индикатор Митрофанова	-	-	-	-	+	+
Диаграмма маневра Джонса	-	-	-	-	+	+
Тригонометрическая модель Мерца и Кармакара	-	-	-	-	+	+
Матрица сценариев Кэнелла	+	-	-	-	+	+
Область маневра Дегрэ и Лефевра	-	-	-	-	+	+
Система предупреждения столкновений Доува	-	-	-	-	+	-
Нечеткая система Джеймса	+	-	-	-	+	-
Экспертная система Смитона и Коэнена	+	+/-	-	-	+	-
Индикатор столкновения Педерсена	-	+/-	-	-	+	+
Метод Уилсона	-	-	-	-	+	-
Способ Ныркова и Викулина	+	-	-	-	+	-
Способ Злапчинского	+	-	-	-	+	+

### 1.4.3 Обзор моделей и методов планирования траектории безопасного движения судов

Известные методы планирования траектории безопасного движения судна можно разделить на две категории: детерминированные и эвристические. Детерминированные (или точные) методы основаны на точных математических моделях и строго определённой последовательности вычислений. Эвристические

методы ищут решение внутри некоторого подпространства возможных приемлемых решений. Хотя найденное ими решение формально может не являться наилучшим (глобальным экстремумом), оно вполне пригодно для повседневной практики судовождения.

Иидзима и Хагивара [208] разработали экспертную систему предупреждения столкновений и управления маневрированием судна, включающую в себя специальную базу знаний. Система была способна работать полностью автономно: оценивать риск опасного сближения, планировать траекторию уклонения и управлять маневром судна. Выбор безопасной траектории судна осуществляется путём поиска среди возможных сценариев движения. Эффективность (целевая функция) каждого сценария движения оценивается на базе следующих факторов:

- степень опасности ситуации (в качестве корабельного домена используется окружность заданного радиуса);
- длина выбранного пути (наилучший путь – кратчайший);
- степень изменения курса (наилучший путь – с минимальным изменением курса);
- соответствие правилам МППСС (брались из базы знаний).

Система работает итеративно, с 10 секундным интервалом, обрабатывая цели в порядке приоритета (сначала – самые опасные, потом – менее опасные). Планирование траектории осуществляется в предположении, что суда-цели также стараются придать своему движению безопасный характер. Система не учитывает влияния внешней среды.

В работах Чуркина [165, 180] описаны непрерывная и дискретная математические модели маневра уклонения судна от столкновения. Непрерывная модель основана на методе линейного программирования, где в качестве целевой функции выступает скорость изменения курса (её нужно минимизировать). Дискретная модель основана на дискретизации возможного курса движения судна и выборе оптимального пути с помощью метода ветвей и границ. Непрерывная модель имеет чересчур высокую вычислительную сложность и её нельзя



применить для случая нескольких судов. Оба подхода не учитывают влияния внешней среды.

Миль [219] сформулировал задачу управления маневрированием судна для предотвращения столкновения как задачу равномерного приближения Чебышева. В методе Мили маневр судна подбирается таким образом, чтобы максимизировать время до точки наибольшего сближения судов (ТСРА). Реализация метода возможна для случая координированного движения судов и движения судов независимо друг от друга. При независимом друг от друга движении управляется только управляемое судно, а судно-цель сохраняет своё движение неизменным. При координированном движении суда совершают маневр зеркально по отношению к точке, соответствующей середине дистанции между ними. Такая модель слишком упрощённо описывает движение расходящихся судов.

Известен рекурсивный алгоритм Хонга и др. [201], основанный на методах аналитической геометрии. Алгоритм рекурсивно рассчитывает множество точек, расположенных в окрестности собственного судна и ограничивающих область безопасного движения. При этом точки множества интерпретируются как вершины треугольников, движение внутри которых безопасно (рисунок 10).

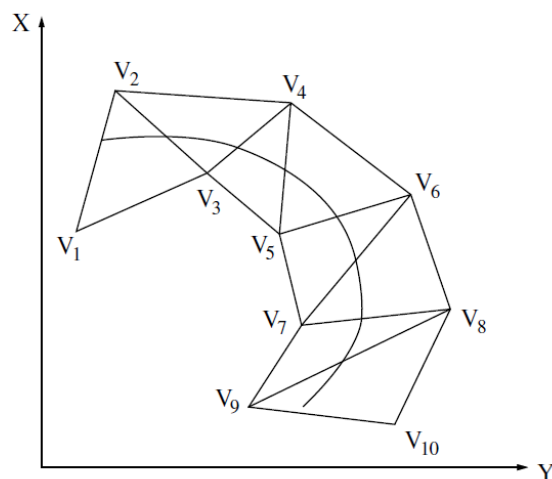


Рисунок 10 - Иллюстрация алгоритма Хонга и др. Внутри треугольников – область безопасного движения судна

Управляемое судно движется таким образом, чтобы проходить через середины сторон треугольников. Такой способ трудно применим на практике, так как вершины треугольников «плывут» вслед за изменением обстановки и судоводителю придется все время корректировать курс собственного судна, то есть траектория движения судна не является оптимальной.

Хванг [206, 207] разработал нечеткую систему принятия решений для оценки риска столкновения и расчета параметров маневра уклонения. Система принимает решение, анализируя «степени близости» судов друг к другу (рисунок 11).

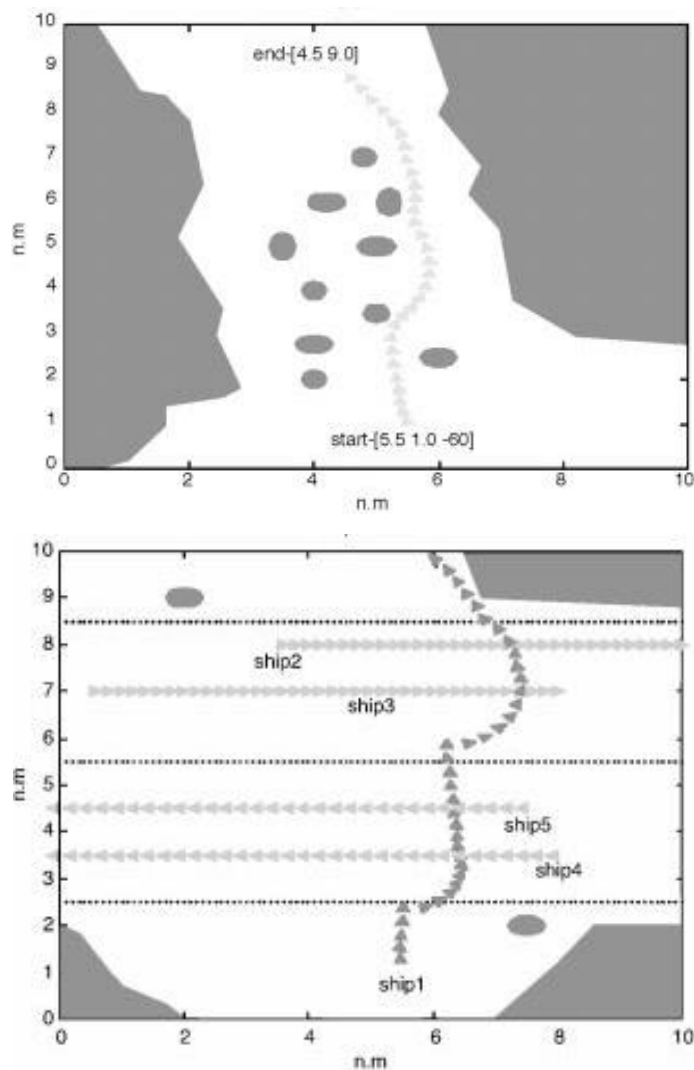


Рисунок 11 - Иллюстрация алгоритма Хванга. Расчет безопасной траектории движения судна в случае неподвижных препятствий (вверху) и для случая нескольких движущихся судов (внизу)

Алгоритм использует представление корабельного домена в виде окружности заданного радиуса. В случае множества судов алгоритм дает последовательное решение задачи для каждой пары «судно-судно», при этом решение для одной пары не учитывает наличие других судов, что в целом делает решение не оптимальным.

В работе Ли и Ри [214] также предложена нечеткая система, основанная на анализе значений ТСРА и ДСРА. При принятии решения о наличии риска столкновения активируется модуль предотвращения столкновения, который использует экспертную базу знаний о возможных маневрах судна, сгенерированную на основе МППСС. Из множества возможных выбирается тот маневр, который обеспечивает минимум произведения величин «риск столкновения» и «время выполнения маневра». При этом авторы считают скорость судна постоянной (что не соответствует реалиям практики) и не учитывают влияние внешней среды.

Чанг [179] предложил модель вычисления траектории безопасного движения судна с использованием алгоритма обхода лабиринта (рисунок 12). Используя представление корабельного домена в виде окружности или другой фигуры, алгоритм строит диаграмму препятствий в виде ячеек (рисунок 13).

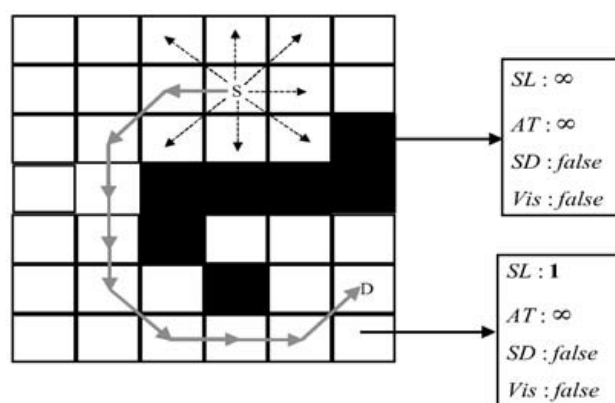


Рисунок 12 - Схема алгоритма обхода лабиринта, используемая в модели Чанга. Черными квадратами помечены «запрещённые» области

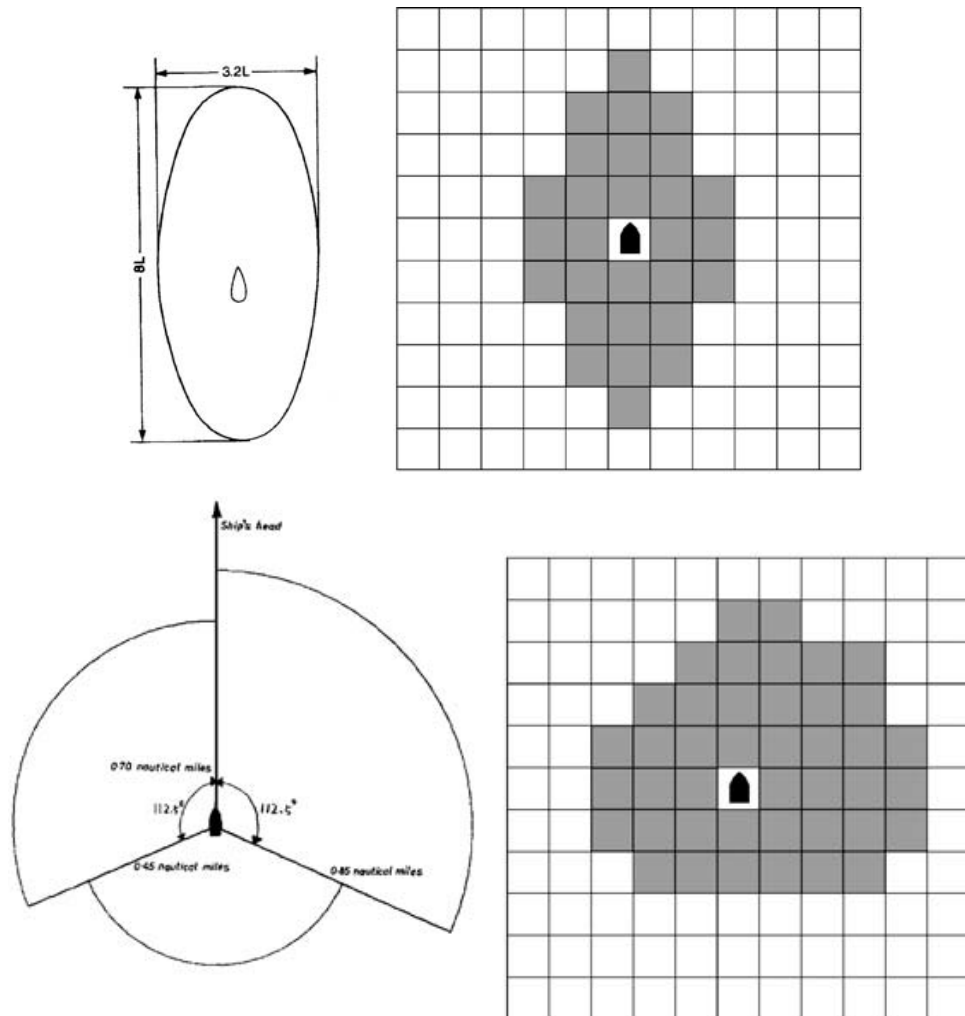


Рисунок 13 - Схема представления корабельных доменов Фудзии и Танака (вверху) и Гудвин (внизу) в модели Чанга

В один момент времени в одной ячейке может находиться только одно судно. При этом движение управляемого судна и судна цели экстраполируется вперёд с учетом скоростей их движения. Если какая-либо ячейка диаграммы препятствий, куда «хочет встать» управляемое судно уже занята судном-целью, то она помечается как запрещённая зона. Затем алгоритм обхода лабиринта ищет в нем кратчайший путь и направляет по нему судно. Хотя алгоритм может быть применен для ситуации с множеством судов, он не учитывает правила МППСС и воздействие внешней среды.

Ли и Ким [215] разработали систему предупреждения столкновений, работающую с использованием экспертной базы знаний, учитывающей МППСС.

Информация представляется в виде гистограммы, показывающей риск столкновения, соотнесенный с тем или иным курсом движения управляемого судна (рисунок 14). На гистограмме выделяются запрещённые и разрешенные области (секторы) возможных значений курса судна. Сначала системой вычисляются секторы, удовлетворяющие критериям безопасности движения. Затем выбранные сектора оцениваются нечеткой системой на соответствие правилам МППСС. Система в принципе допускает применение для случая нескольких судов, но не учитывает воздействие внешней среды.

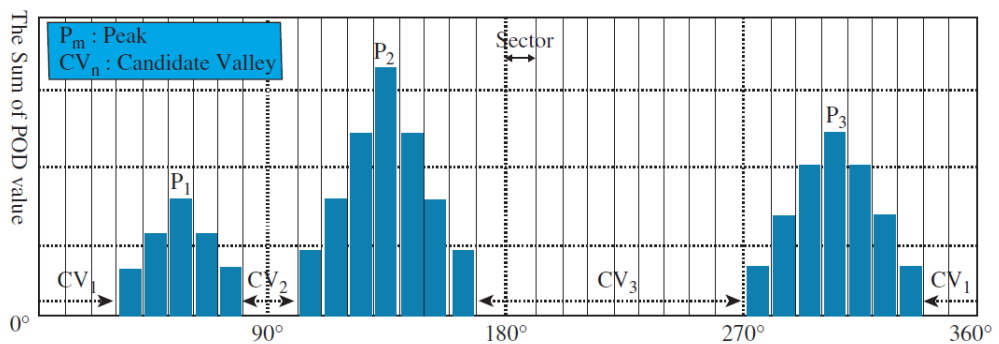


Рисунок 14 - Иллюстрация гистограммы риска столкновения Ли и Кима. Ось абсцисс – курс судна. Области CV – значения безопасных курсов движения

Бенджамин и Курсио [174] создали навигационную систему для управления безопасным движением судна, которая определяет возможные траектории с учетом МППСС. Система работает на основе множества правил, описывающих различные варианты навигационной обстановки и соответствующие им возможные «действия» судна. Система, по сути, выбирает одну из возможных траекторий судна, удовлетворяющую правилам МППСС, не решая при этом задачу оптимизации и не учитывая воздействие внешней среды.

Лиу и Ши [217] описали способ предупреждения столкновений, основанный на нейронных сетях и нечетких системах принятия решений. Нейронная сеть состоит из трёх подсетей, анализирующих три аспекта, определяющих безопасность движения. Первая сеть анализирует тип сближения (определяемый на основе ДСРА, курса и расстояния) и возвращает соответствующий тип маневра

(вправо, влево или не изменять курс). Вторая сеть анализирует соотношение скоростей сближающихся судов и возвращает величину, описываемую лингвистическими переменными «большое», «равное» или «малое». Третья сеть анализирует выход первых двух и возвращает управляющее воздействие, описываемое лингвистическими переменными, соответствующими величине воздействия и его длительности. Разработанная система генерирует управляющее воздействие, имея в виду наличие только одного судна-цели (с наибольшим риском столкновения). В сущности, это аналогично подходу Джеймса [210]. Система, таким образом, не учитывает случай множества судов, не оптимизирует траекторию движения, и не учитывает воздействие внешней среды.

Злапчинский [231, 232] предложил оригинальную модифицированную систему Чанга [179], основанную на методе обхода лабиринтов, дополнив её понятиями «штраф за поворот», «временно запрещённая зона» и возможностью изменять не только курс, но и скорость движения судна. Штраф за поворот моделируется увеличением времени движения до выбранной точки всякий раз, когда судно совершает поворот (что соответствует реальной динамике движения судна, когда его скорость на повороте уменьшается). Запрещённые зоны зависят и от времени, так, что активируются только в определенном временном интервале, когда судно-цель находится рядом с ними. Это позволяет рассчитывать траекторию движения управляемого судна в узких проливах и каналах. Если изменение только лишь курса судна не позволяет обеспечить безопасное движение, то управление осуществляется изменением и скорости судна: изменение скорости моделируется как линейная функция расстояния до запрещенной зоны и округляется до ближайшей скорости, достижимой возможностями конкретного двигателя. Способ использует двоичный поиск для нахождения необходимого изменения скорости таким образом, чтобы оно было минимальным, обеспечивая вместе с тем уход судна от столкновения. Систему Злапчинского следует признать наиболее продвинутой с точки зрения количества учитываемых ею факторов, влияющих на безопасность движения, большинство из которых учитываются в других

рассмотренных моделях. Однако, несмотря на то, что система учитывает уменьшение скорости судна при повороте, все же она учитывает влияние внешней среды не в полной мере.

К эвристическим методам планирования траектории безопасного движения судна следует отнести метод Смержальского [230], основанный на генетическом алгоритме. Изменение скорости управляемого судна возможно дискретно, на основе процедуры мутации на отдельных участках траектории движения. Первоначальное пространство решений образуется с помощью представления корабельного домена многоугольником. Затем возможные траектории движения судна скрещиваются, образуя множество траекторий-потомков, из которых выбираются наилучшие с точки зрения целевой функции, учитывающей длину траектории, время движения и гладкость траектории. Учет правил МППСС реализуется формой корабельного домена, который смещен в одну из сторон, в зависимости от типа сближения судов. Метод Смержальского был взят за основу интеллектуальной системы управления движением судном [216], реализованной в модели симулятора корабля, разработанной в Гдынском морском университете (Gdynia Maritime University). Метод не учитывает влияние внешней среды.

Генетический алгоритм был использован также Ито [209]. Как и в методе Смержальского, первоначальное пространство решений формировалось с использованием представлений о корабельном домене как безопасной зоне, первоначальные точки возможного пути судна генерировались случайным образом. Затем генетический алгоритм использовался для нахождения среди них оптимальных точек траектории движения судна. Целевая функция учитывала следующие параметры: уровень опасности (вероятность попадания в опасную зону), дистанция (длина траектории движения судна), прямолинейность (сумма косинусов углов изменения курса), потеря энергии (суммарная кинетическая энергия, потерянная при движении по траектории). По сравнению с моделью Смержальского эта модель проще, не учитывает правил МППСС и влияние внешней среды.

Цзенг [240] также предложил генетический алгоритм для вычисления траектории безопасного движения судна. Его метод позволяет сгенерировать такую траекторию движения судна, чтобы оно не сближалось недопустимо близко с другими судами. При этом метод не учитывает явно правил МППСС.

Проведённый анализ методов планирования безопасного движения судна позволяет говорить о следующих общих существенных недостатках этих методов:

- Все методы практически не позволяют в полной мере учесть влияние внешней среды при планировании движения и маневров судна;
- Планирование траектории осуществляется в предположении о том, что все препятствия являются либо статическими, либо движутся прямолинейно и равномерно. Ни один метод не учитывает возможных динамических препятствий;
- Все методы используют сильно упрощенную модель движения судна (например, или вообще без изменения скорости, или в предположении о её мгновенной потере при повороте).

Большинство методов слишком упрощают задачу управления судном: рассматривают только открытое море, рассматривают случай только двух судов, не учитывают состояние окружающей среды, игнорируют МППСС (таблица 3). Вместе с тем, следует особо отметить методы Смержальского [230] и Злапчинского [231], которые учитывают наличие как статических, так и подвижных препятствий.

Следует отметить, что в рамках приведённого обзора методов наибольшую ценность представляют те из них, которые позволяют учесть отраслевую специфику морского транспорта, которая делает в принципе неправомерным полностью автоматизированное судовождение (без участия человека). Вместе с тем, в условиях высокой интенсивности движения и быстро меняющейся обстановки судоводители не застрахованы от ошибок.

Таким образом, судоводителям требуются специальные средства поддержки принятия решений, способные учесть максимальное количество факторов, влияющих на безопасность движения (в том числе – влияние внешней среды) и



правильно информировать судоводителей (операторов береговой СУДС и капитанов судов) о сложившейся обстановке и путях разрешения потенциально опасных ситуаций. Следовательно, путь дальнейшего совершенствования технологий обеспечения навигационной безопасности движения судов видится в повышении уровня автоматизации: разработке и внедрении систем с проблемно-ориентированным пользовательским интерфейсом, позволяющих максимально застраховать судоводителя от принятия заведомо ошибочных управленческих решений.

Таблица 3 - Методы планирования траектории судна

Метод/модель	МППСС	Кол-во судов $v > 2$	Огранич. воды	Динам. модель движения судна	Измен. курса судна	Измен. скор. судна
Экспертная система Иидзима и Хагивара	+	+/-	-	-	+	-
Модель Чуркина	-	+/-	-	-	+	-
Метод Миля	-	-	-	-	+	-
Метод Хонга	-	+	+	-	+	-
Нечеткая система Хванга	-	+/-	-	-	+	-
Нечеткая система Ли и Ри	+	+/-	-	-	+	-
Метод лабиринта Чанга	-	+	+	-	+	-
Экспертная система Ли и Кима	+	+	-	-	+	-
Экспертная система Бенджамина и Курсио	+	+	-	-	+	+
Нейро-нечеткая система Лиу и Ши	+	-	-	-	+	-
Метод лабиринта Злапчинского	-	+	+	+/-	+	+
Генетический алгоритм Смержалевского	+	+	+	-	+	+
Генетический алгоритм Ито	-	+	+	-	+	+
Генетический алгоритм Цзенга	-	+	+	-	+	+

## 1.5 Краткие итоги главы 1

Системы управления движением судов представляют собой очень сложные в техническом и организационном отношении предприятия. При этом под устоявшимся термином «система управления движением судов - СУДС» (англ. vessel traffic system – VTS) подразумевается система поддержки принятия решений, задачей которой является общая координация движения путем выдачи оператором СУДС указаний судоводителям (капитанам судов).

В настоящее время можно выделить пять существующих и перспективных поколений систем управления движением судов, различающихся степенью автоматизации навигационных функций и характером решаемых навигационных задач. Настоящая работа ориентирована на системы управления движением судов 4 и 5 поколений.

Структура навигационных функций современных СУДС включает в себя следующие этапы обработки информации:

- Оцифровка первичного РЛС сигнала;
- Сопровождение траекторий целей;
- Определение параметров движения целей, не доступных непосредственному измерению (наблюдение);
- Обеспечение навигационной безопасности движения.

При этом системой решаются следующие задачи:

- Обнаружение и захват цели;
- Преобразование РЛС образа цели в точку (стробирование);
- Определение параметров движения цели;
- Комплексование измерительной информации из различных источников;
- Оценка риска опасного сближения судов;
- Предупреждение опасного сближения судов;
- Планирование траектории безопасного движения судов.

Одной из особенностей судовождения является полная ответственность судоводителя за любые инциденты. Это правило закреплено во всей судоводительской правовой базе. Такая специфика делает в принципе неправомерным полностью автоматизированное судовождение (без участия человека). Поэтому актуальной является разработка моделей и методов решения задач обеспечения навигационной безопасности коллективного движения судов (в том числе методов оценки риска опасного сближения, предупреждения опасного сближения и планирования траектории безопасного движения судов), сформулированных в рамках следующей целевой установки: *система управления движением судов, осуществляющая диспетчеризацию в заданном районе, не должна ставить своей целью собственно управление судном. Задача системы – предоставить оператору (судоводителю) информацию о навигационной обстановке таким образом, чтобы она способствовала принятию как можно меньшего числа ошибочных решений.* Другими словами, методы должны подразумевать участие человека как неотъемлемую часть процесса управления коллективным движением судов. Известные же исследования в основном идут по пути разработки методов с усложненными моделями движения судов, учитывающих максимальное число факторов при принятии решений имея в виду перспективы реализации в автоматических системах судовождения (системах автоматической прокладки курса, авторулевых). Для решения задач, стоящих перед береговыми системами управления движением судов, осуществляющих диспетчеризацию коллективного движения эти методы неприменимы, так как противоречат идеологии, принятой в отрасли. В практике судовождения считается, что каждая навигационная ситуация по-своему уникальна, судно – инерционный объект с очень сложным и трудно моделируемым движением, поэтому участие оператора СУДС и судоводителя с их опытом в принятии решений совершенно необходимо. Рассмотренные методы оценки риска опасного сближения, предупреждения опасного сближения судов и планирования траектории безопасного движения судов возможности участия оператора СУДС и

судоводителя либо не предполагают вовсе, либо дают эту возможность в недостаточной мере.

Целью настоящей работы является разработка и исследование математических моделей и методов решения задач обеспечения навигационной безопасности коллективного движения морских судов в условиях высокой интенсивности движения, ориентированных на реализацию в береговых системах управления движением судов.

В рамках этой целевой установки в дальнейших главах настоящей работы исследуются и решаются следующие задачи:

- Задача идентификации модели движения объекта по данным траекторных измерений.
- Задача оценки возможности опасного сближения судов на основе многозначной логики.
- Задача трёхкоординатного наблюдения движущегося объекта двухкоординатными измерителями.
- Задача представления навигационной информации на рабочем месте оператора СУДС и судоводителя;
- Задача сбора данных о движении судов на морских акваториях;
- Задача имитационного моделирования траекторий движения судов на морских акваториях.

## Глава 2. Нечёткая идентификация модели движения объекта в задаче сопровождения траектории движения судна

### 2.1 Задача сопровождения траектории движущегося объекта по данным двухкоординатной РЛС кругового обзора

В том случае, если для наблюдения за объектами используется РЛС кругового обзора, радиолокационный образ навигационного пространства представляется в памяти ЭВМ в виде двумерного массива  $A$ , количество строк в котором равно количеству секторов по углу (линеек), формируемых за полный оборот антенны радара, а количество столбцов - количеству сегментов по дальности,  $a[i, j]$  - амплитуда отраженного эхо-сигнала в точке с азимутом  $i \cdot \delta_\psi$  и с дальностью  $j \cdot \delta_r$  (здесь  $\delta_\psi$  - разрешение радара по углу, соответствующее частоте посылок,  $\delta_r$  - разрешение по дальности, обусловленное частотой дискретизации при оцифровке отраженного сигнала). Массив обновляется по мере вращения антенны радара [94, 95].

Для получения измерений координат движущегося объекта на протяжении всей его траектории необходима формализация исходной измерительной информации  $A$  с помощью процедуры сопровождения [19].

В обсуждаемом контексте *сопровождением траектории движения цели* называют динамический процесс соотнесения условной точки, принятой за наблюдаемый объект, с радиолокационным образом цели. Здесь и далее будем считать, что радиолокационный образ цели формируется типовой РЛС кругового обзора (именно такая информационная база характерна для современных СУДС). Основное назначение процедуры сопровождения – формализация измерительной информации в виде набора (массива) точек, определяющих азимут и расстояние до наблюдаемого объекта в некоторые моменты времени (как правило – соответствующие моментам облучения объекта сигналом РЛС). Другими словами, целью сопровождения является формирование измерений координат движущегося

объекта на протяжении всей его траектории. Формализованные таким образом измерения могут быть применены в качестве навигационной информации об объекте как непосредственно, так и использоваться процедурами оценивания для определения параметров траектории движения, недоступных непосредственному измерению.

С процессом сопровождения тесно связано понятие *строба*, а именно - с тем обстоятельством, что протяжённый физический объект необходимо отождествить с точкой. *Строб* - область радиолокационного образа наблюдаемой акватории, используемая для преобразования в точку, отождествляемую затем с измеренными координатами объекта. Процедура такого преобразования называется *стробированием*. В обсуждаемом случае с двухкоординатной РЛС строб представляет собой матрицу амплитуд отражённого радиолокационного эхо-сигнала, которая содержит как сигнал от наблюдаемого объекта, так и сигнал от окружающего объект пространства. В простейшем варианте стробирование представляет собой определение «центра масс» амплитуд отраженного эхо-сигнала в области строба; для описания линейных размеров этой области принят термин *ширина строба*. Ширина строба выбирается таким образом, чтобы, с одной стороны, обеспечить «покрытие» наблюдаемого объекта, и, с другой, обеспечить отсутствие внутри строба других объектов.

Особенность, связанная с выбором ширины строба, проиллюстрирована на рисунках 15 и 16. На рисунке 15 показаны значения амплитуд отраженного эхо-сигнала от одиночного судна на фоне эхо-сигнала от подстилающей поверхности (моря). Пурпурным цветом выделен сигнал, амплитуда которого выше некоторого порога, что позволяет увидеть сигнал, отражаемый непосредственно от судна. В данном случае в стробе находится только один объект. На рисунке 16 показаны значения амплитуд отраженного эхо-сигнала в том случае, когда в область строба попали два судна. Красным и пурпурным цветом выделен сигнал, амплитуда которого выше некоторого порога. В данном случае в стробе находятся два объекта, что не даёт возможности корректно сформировать измерение координат

каждого из них. Для обеспечения корректного сопровождения траектории такие ситуации необходимо дополнительно распознавать и предотвращать.

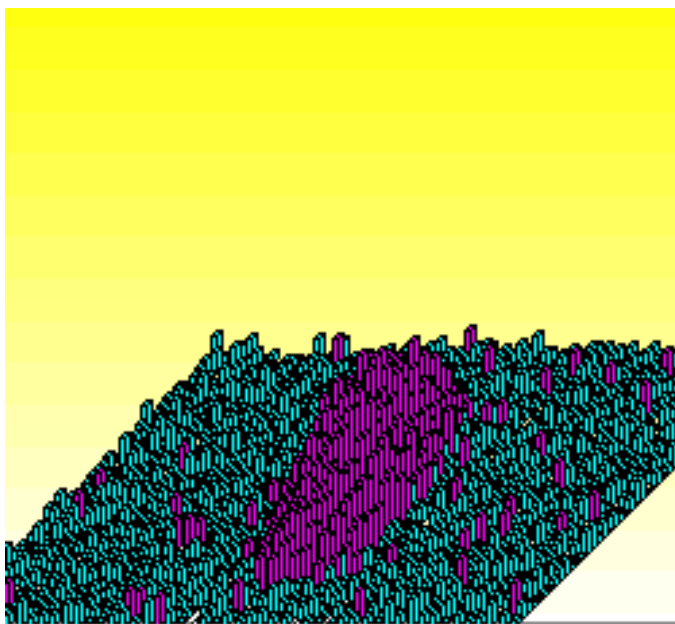


Рисунок 15 - Матрица амплитуд отраженного эхо-сигнала: случай одного объекта в области строба

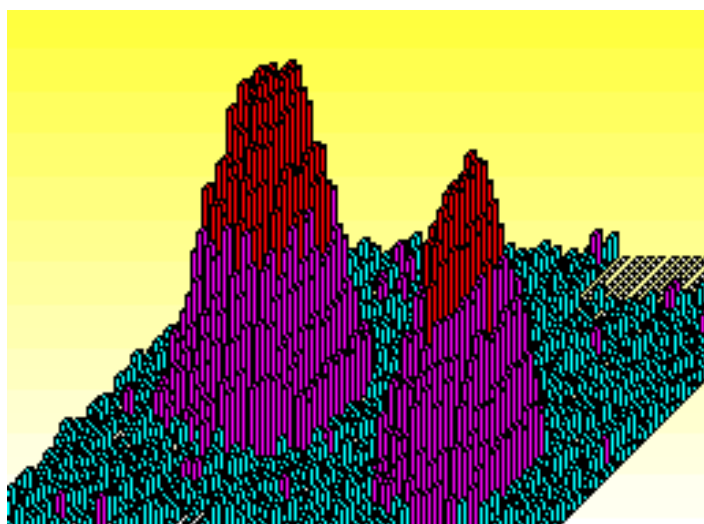


Рисунок 16 - Матрица амплитуд отраженного эхо-сигнала: случай двух объектов в области строба

В общем случае сопровождение траектории объекта по данным РЛС кругового обзора представляет собой итерационную процедуру, включающую в себя следующие этапы:

1. Инициация сопровождения (захват цели) путем назначения первичных координат центра строба;
2. Вычисление координат объекта, находящегося в стробе, путем анализа матрицы амплитуд (например, определение «центра масс» строба); вычисленные координаты принимаются за измеренные координаты объекта;
3. Перемещение строба в точку, где предполагается нахождение объекта при следующем обороте антенны РЛС;
4. Итерационное повторение пункта 2 и 3.

В результате описанной процедуры формируются измеренные координаты объекта на всём протяжении его траектории движения.

Основной проблемой, возникающей при сопровождении траектории является обеспечение устойчивости этого процесса по отношению к срыву, то есть к произвольному, аварийному нарушению корректного сопровождения. Если отбросить случаи аппаратных сбоев и высоких радарных помех различной природы, то основная причина срыва сопровождения – интенсивное маневрирование объектов, приводящее к «уходу» объекта за пределы строба. Одним из путей разрешения этой проблемы является увеличение ширины строба. Вместе с тем, строб не может быть слишком большим – в него не должно «попадать» более одного объекта. Таким образом, максимальная ширина строба ограничена характерным расстоянием между объектами. Кроме того, при увеличении ширины строба усиливается влияние морского волнения и метеопомех на погрешность определения измеренных координат объекта [153].

Ограничение на ширину строба, связанное с характерным расстоянием между объектами приобретает существенный вес при работе СУДС в условиях летней навигации, когда движение маломерных скоростных высокоманевренных



судов (прогулочных катеров, яхт и т.п.) приобретает характер разнонаправленных судопотоков с предельными значениями насыщенности и интенсивности. Для СУДС, обслуживающей такую акваторию, становится актуальной разработка специальных алгоритмов сопровождения, сохраняющих устойчивость при сопровождении высокоманевренных объектов стробом небольшой ширины.

## 2.2 Модельные представления задачи сопровождения траектории

Рассмотрим следующую модель движения объекта

$$\begin{aligned}x(t_{k+1}) &= x(t_k) + v_x(t_k)\tau + q_x(t_k), \\y(t_{k+1}) &= y(t_k) + v_y(t_k)\tau + q_y(t_k)\end{aligned}\quad (1)$$

здесь  $k$  - идентификатор (порядковый номер) момента времени,  $x(t_k), y(t_k)$  - координаты объекта в момент времени  $t_k$ ;  $v_x(t_k), v_y(t_k)$  - компоненты вектора скорости объекта (как правило, в задаче сопровождения траектории ограничиваются лишь первыми производными координат),  $q_x(t_k), q_y(t_k)$  - компоненты вектора случайных не моделируемых параметров движения,  $\tau$  - период оценивания, так что  $\tau = t_{k+1} - t_k$ . В данном случае  $\tau$  равен периоду вращения антенны РЛС.

Пусть измеряемыми параметрами являются декартовы координаты объекта. Тогда модель рассматриваемой задачи можно представить следующим дискретным матричным уравнением «состояние-измерение»

$$\begin{aligned}s(t_{k+1}) &= \Phi s(t_k) + q(t_k), \\z(t_k) &= Hs(t_k) + \xi(t_k).\end{aligned}\quad (2)$$

Здесь  $s(t_k) = (x(t_k), v_x(t_k), y(t_k), v_y(t_k))^T$  - вектор состояния объекта, включающий его координаты и их производные ( $T$  – символ транспонирования),  $q(t_k)$  - вектор не моделируемых параметров,  $z(t_k)$  - вектор измерений,  $\xi(t_k)$  - вектор погрешностей

измерений. Имея в виду (1), матричные коэффициенты  $\Phi$  и  $H$  равны, соответственно

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & \tau & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Модель оценивания вектора состояния  $s(t_k)$  по измерениям  $z(t_k)$  может быть представлена следующим уравнением

$$\hat{s}(t_{k+1}) = \Phi \hat{s}(t_k) + K(z(t_k) - H\Phi \hat{s}(t_k)), \quad (3)$$

Здесь  $\hat{s}(t_k)$  - оценка вектора состояния,  $K$  - матричный коэффициент.

Известно множество подходов к выбору матрицы  $K$ . Наиболее популярны в практических приложениях: фильтр Калмана, модальные алгоритмы,  $\alpha - \beta$  алгоритм [152, 176 и др.]. В работе [77] рассмотрен также метод определения матрицы  $K$  на основе модельной интерпретации уравнения (3) нейронной сетью.

*Фильтр Калмана.* В фильтре Калмана [108, 130, 159, 160] матрица  $K$  выбирается таким образом, чтобы асимптотически обеспечить минимум функционала  $J = M[(s(t_k) - \hat{s}(t_k))^T (s(t_k) - \hat{s}(t_k))]$ , то есть математического ожидания среднеквадратичной погрешности оценивания при априорно известных вероятностных характеристиках шумов  $q(t_k)$  и  $\xi(t_k)$ . Рекуррентная схема фильтра Калмана для задачи (3) имеет вид:

$$\begin{aligned} K_k &= D_k H^T R^{-1}, \\ D_k &= P_k - P_k H^T [H P_k H^T + R]^{-1} H P_k, \\ P_{k+1} &= \Phi P_k \Phi^T + Q, \quad P_0 = D_0, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $D_0 = M[(s(t_k) - \hat{s}(t_k))(s(t_k) - \hat{s}(t_k))^T]$  - матрица, характеризующая погрешность априорных представлений о векторе состояния системы  $s(t_k)$  в начале

процедуры,  $R = M[\xi(t_k)\xi^T(t_k)]$  - ковариационная матрица вектора  $\xi(t_k)$ ,  
 $Q = M[q(t_k)q^T(t_k)]$  - ковариационная матрица вектора  $q(t_k)$ .

Необходимым и достаточным условием асимптотической устойчивости фильтра Калмана является наблюдаемость задачи (рассматриваемая нами задача (2) наблюдаема). В тех случаях, когда принятые значения  $R$  и  $Q$  не соответствуют реальным, устойчивость фильтра Калмана сохраняется, однако нарушается свойство оптимальности алгоритма.

*Модальные алгоритмы.* Если в наблюдаемой задаче процесс оценивания описывается уравнением (3), то эволюция погрешности оценивания вектора состояния может быть записана так:

$$\hat{s}(t_{k+1}) - s(t_{k+1}) = \Delta s(t_{k+1}) = (\Phi - KH\Phi)\Delta s(t_k) + (KH - E)q(t_k) + Kr(t_{k+1}). \quad (5)$$

Необходимым и достаточным условием асимптотической устойчивости системы (3) является

$$|\lambda_i| < 1, \quad i = \overline{1, \dim s}, \quad (6)$$

где  $\lambda_i$  - собственные числа матрицы  $(\Phi - KH\Phi)$ . Именно выполнение этого условия является критерием выбора матрицы  $K$  в модальных алгоритмах. Что касается её конкретного вида, то он может определяться, например, решением следующей экстремальной задачи

$$\hat{K} = \arg \min_K \lambda,$$

при условиях

$$\lambda_i = \lambda_j = \lambda$$

или, имея в виду (5), выбираться из каких-либо других соображений.

$\alpha - \beta$  алгоритм. В этом алгоритме для рассматриваемой задачи матрица  $K$  имеет вид [162, 164]:

$$K = \left\| \begin{array}{cc} \alpha & 0 \\ \beta/\tau & 0 \\ 0 & \alpha \\ 0 & \beta/\tau \end{array} \right\|. \quad (7)$$

Сходимость алгоритма обеспечивается выполнением условия  $0 < \alpha \leq 1$ ,  $0 < \beta \leq 1$ . Коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  выбираются исходя из требований чувствительности алгоритма к не моделируемым манёврам судна  $q(t_k)$  и ошибкам измерений  $\xi(t_k)$ . При больших значениях  $\alpha$  и  $\beta$  алгоритм способен сопровождать интенсивно маневрирующие объекты, где  $q(t_k)$  - велико, однако при этом плохо сглаживаются ошибки измерений  $\xi(t_k)$ . При малых значениях  $\alpha$  и  $\beta$  алгоритм хорошо сглаживает ошибки измерений, однако при этом велика ошибка оценки вектора состояния  $s(t_k)$  в том случае, если объект маневрирует.

Показано [172], что в рассматриваемой задаче соотношение коэффициентов  $\beta = \alpha^2 / (2 - \alpha)$  является оптимальным.

Конкретные значения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  могут выбираться из различных соображений. Например, классическим является подход, когда значения  $\alpha$  и  $\beta$  выводятся из алгоритма Калмана, в предположении, что  $q(t_k) = 0$ . В этом случае алгоритм (7) обеспечивает минимум функционала  $J = M[(s(t_k) - \hat{s}(t_k))^T (s(t_k) - \hat{s}(t_k))]$ , если коэффициенты выбираются по следующему правилу:

$$\alpha_k = \frac{2(2k+1)}{(k+2)(k+1)}, \quad \beta_k = \frac{6}{(k+2)(k+1)},$$

где  $k$  - порядковый номер момента времени в формуле (3).

Основное достоинство  $\alpha$ - $\beta$  алгоритма – простота реализации и низкая вычислительная сложность.

Пусть  $J$  - число измерений (и, соответственно, итераций), участвующих в оценке вектора состояния  $s(t_k)$  итерационной процедурой (3), (7), так что  $k = \overline{1, J}$ . При увеличении  $J$  коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  асимптотически уменьшаются, так что  $\alpha \rightarrow 0$ ,  $\beta \rightarrow 0$ , поэтому  $\alpha$ - $\beta$  алгоритм, реализованный с большим  $J$  будет успешно сопровождать объекты, движущиеся прямолинейно и равномерно, а для маневрирующих объектов погрешность оценки вектора состояния будет довольно

высокой. Аналогичная проблема имеет место и для алгоритма Калмана, и для модального алгоритма.

Классическим подходом к разрешению указанного противоречия является адаптация рассмотренных алгоритмов к сопровождению объектов того или иного типа (движущихся прямолинейно и равномерно или маневрирующих) и их сочетание со специальной функцией – обнаружителем (детектором) манёвра, который может быть сформулирован из различных соображений [5, 57, 107]. Объект начинает сопровождаться алгоритмом, адаптированным для равномерного и прямолинейного движения. Если зафиксирован маневр объекта, то сопровождение «переключается» на алгоритм, адаптированный для маневренного движения.

Более сложный вариант адаптации - решение задачи одновременно несколькими алгоритмами (многомодельное сопровождение), после чего делается выбор в пользу одного из них. Известен адаптивный подход Байеса для решения этой задачи, основанный на анализе апостериорной вероятности того или иного движения объекта [5]. Хотя этот подход считается классическим и хорошо зарекомендовал себя в целом ряде практических приложений, его корректное использование в рассматриваемой задаче связано с рядом трудностей, так как необходимо знание вероятностных характеристик шумов  $q(t_k)$  и  $\xi(t_k)$ , что не всегда возможно; кроме того, адаптивный подход Байеса характеризуется большой вычислительной сложностью.

Для преодоления обозначенных проблем, связанных с сопровождением как маневрирующих, так и движущихся прямолинейно и равномерно объектов, в настоящей работе разработан метод, основанный на реализации нескольких  $\alpha-\beta$  алгоритмов с различным числом измерений, участвующих в оценке. Выбор наиболее подходящего из них осуществляется с использованием идей систем нечеткой логики. Таким образом, идентифицируется наиболее достоверная модель движения объекта.

### 2.3 Метод решения задачи сопровождения, основанный на многомодельной оценке вектора состояния и нечётком обнаружителе маневра

Пусть  $\hat{s}_J(t_i)$  – оценка вектора состояния системы в момент времени  $t_i$ , полученная итерационным алгоритмом (3) при обработке  $J$  последних измерений. Если при этом задача одновременно решается при  $J, J-1, J-2, \dots$ , и, наконец, только при двух измерениях (минимально возможном их количестве), то тогда в момент времени  $t_i$  будем иметь кортеж векторов оценки

$$\hat{S}_J(t_i) = \{ \hat{s}_2(t_i), \hat{s}_3(t_i), \hat{s}_4(t_i), \dots, \hat{s}_J(t_i) \}. \quad (8)$$

Задача сопровождения траектории сводится, таким образом, к проблеме выбора вектора состояния из кортежа, порождаемого множеством моделей с различными значениями  $J$ .

Основным информативным признаком, характеризующим качество сопровождения, является величина невязки измерения, порождаемой той или иной моделью сопровождения.

Введем вектор  $\delta z(t_{k+1}) = z(t_{k+1}) - H\hat{s}(t_{k+1})$ , характеризующий невязку измерения при оценке вектора состояния уравнением (3), (7). Пусть  $\|\delta z_J(t_i)\|$  – евклидова норма вектора невязки  $\delta z(t_i)$ , полученного в момент времени  $t_i$  при реализации итерационного алгоритма (3), (7), обрабатывающего  $J$  последних измерений. Тогда при оценке вектора состояния в каждый момент времени  $t_i$  наряду с кортежем векторов оценки (8) будем иметь кортеж норм векторов невязок

$$\delta_J(t_i) = \{ \|\delta z_2(t_i)\|, \|\delta z_3(t_i)\|, \|\delta z_4(t_i)\|, \dots, \|\delta z_J(t_i)\| \}. \quad (9)$$

Для анализа качества сопровождения целесообразно перейти от (9) к кортежу относительных величин

$$\Delta_J(t_i) = \{ L_2(t_i), L_3(t_i), L_4(t_i), \dots, L_J(t_i) \}, \quad (10)$$

где  $L_j(t_i) = \frac{\|\delta z_j(t_i)\|}{\sigma}$ ,  $\sigma$  – норма вектора среднеквадратичного отклонения погрешности измерений  $r(t_k)$  в системе (2).

В силу особенностей  $\alpha$ – $\beta$  алгоритма, если объект движется прямолинейно и равномерно, то качество сопровождения будет тем лучше, чем больше измерений участвует в оценке (т.е. чем больше значение  $J$ ). При практическом решении задачи достаточно взять  $J$  не более 10. Если же объект маневрирует, то погрешность оценки вектора состояния (а, значит, и значение величины  $L_j(t_i)$ ) будет минимальной при некотором «оптимальном» значении  $J$ , зависящем от погрешностей измерений  $\xi(t_k)$ , интервала времени  $\tau$  и интенсивности маневрирования (то есть приведённых значений  $q_k$ ), а при увеличении  $J$  будет недопустимо возрастать. При практическом решении задачи, имея в виду саму специфику и целевое назначение процедуры сопровождения траектории в СУДС, говорить о поиске оптимального  $J$  в смысле обеспечения минимума погрешности оценки вектора состояния нецелесообразно. Достаточно найти значения  $J$ , обеспечивающие приемлемую ошибку оценки вектора состояния (приемлемые  $J$ ) с точки зрения устойчивости процесса по отношению к срыву сопровождения (выходу наблюдаемого объекта за пределы строга). При этом будет иметь место следующее положение: если значение  $J$  - приемлемо (то есть сопровождение по  $J$  последним измерениям – устойчиво), то и значение  $J-1$  - приемлемо. Если значение  $J$  - неприемлемо (не обеспечивает устойчивого сопровождения), то и значение  $J+1$  - неприемлемо.

Рассмотренные свойства  $\alpha$ – $\beta$  алгоритма лежат в основе выбора подходящего значения вектора состояния из кортежа (8).

Введем лингвистическую переменную  $Q_j(t_i)$ ,  $j = \overline{2, J}$  «Качество оценки вектора состояния алгоритмом (3), (7) в момент времени  $t_i$  по  $j$  последним измерениям» с термами «good» («хорошее») и «bad» («плохое»). Пусть термы

имеют следующие функции принадлежности типа «дополнение», определённые на универсальном множестве  $u \in [0,3]$ :

$$\begin{aligned}\mu_{good}(u) &= 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a_1(u - c_1))}, \\ \mu_{bad}(u) &= \frac{1}{1 + \exp(-a_2(u - c_2))},\end{aligned}\tag{11}$$

где  $a_1, a_2, c_1, c_2$  - настраиваемые параметры.

Известно два основных подхода к построению нечеткой системы логического вывода [7, 114, 166, 222]. Первый – машина типа Сугено – имеет систему правил с нечетким условием и четким выводом. У второго – машины типа Мамдани – и условие, и вывод нечеткие. Для выбора вектора состояния из кортежа (8) возможно применение нечетких систем обоих типов.

### 2.3.1 Система типа Сугено

Пусть переменные  $Q_j(t_i)$  обрабатываются машиной нечеткого вывода типа Сугено, на вход которой подается кортеж величин (10), а на выходе формируется числовое значение  $m_{sug}(t_i)$  – номер вектора состояния, выбираемого из кортежа (8). Машина нечеткого вывода работает согласно системе правил, представленной в таблице 4.

Таблица 4 - Система правил машины нечеткого вывода типа Сугено

№	$Q_2(t_i)$	$Q_3(t_i)$	$Q_4(t_i)$	...	$Q_{J-2}(t_i)$	$Q_{J-1}(t_i)$	$Q_J(t_i)$	$m_{sug}(t_i)$
1	good	good	good	...	good	good	good	$J$
2	good	good	good	...	good	good	bad	$J-1$
3	good	good	good	...	good	bad	bad	$J-2$
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$J-2$	good	good	bad	...	bad	bad	bad	3
$J-1$	good	bad	bad	...	bad	bad	bad	2
$J$	bad	bad	bad	...	bad	bad	bad	2



Работу нечеткого алгоритма сопровождения траектории можно представить схемой, показанной на рисунке 17. Здесь  $L_j(t_i)$  – величины кортежа (10) в момент времени  $t_i$  (вход), если  $L_j(t_i) > 3$ , то вход принимается равным 3;  $m(t_i) = m_{sug}(t_i)$  – определённый нечеткой системой  $F$  в момент времени  $t_i$  номер элемента кортежа (8).

Из величин  $m(t_i)$  и  $m(t_{i-1})$  выбирается максимальное значение  $m$ , которое и принимается за окончательное (выход). Если  $m$  – не целое число, то оно округляется до ближайшего целого. Выбор максимального из двух соседних  $m(t_i)$  необходим для повышения устойчивости работы системы при больших ошибках измерений (для фильтрации случайных выбросов).

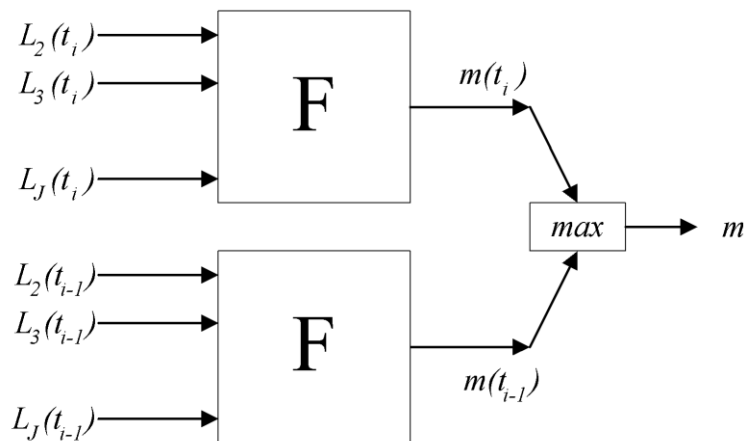


Рисунок 17 - Схема работы алгоритма сопровождения траектории

Настройка описанной системы состоит в задании максимального количества измерений  $J$ , параметров функций принадлежности  $a_1, a_2, c_1, c_2$  и величины  $\sigma$ , характеризующей погрешность измерений.

### 2.3.2 Система типа Мамдани

Для решения задачи с помощью машины логического вывода типа Мамдани введём лингвистическую переменную  $P(t_i)$  «Характер движения судна в момент времени  $t_i$ » с термами «high-high-maneuverable» (h<sub>h</sub>m, «очень высокоманевренное»), «high-maneuverable» (h<sub>m</sub>, «высокоманевренное»), «low-maneuverable» (l<sub>m</sub>, «низкоманевренное») и «low-low-maneuverable» (l<sub>l</sub>m, «очень низкоманевренное»). Пусть термы имеют следующие функции принадлежности типа «кластер», определённые на универсальном множестве  $v \in [2, J]$ :

$$\begin{aligned}\mu_{hhm}(v) &= 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a_3(v - c_3))}, \\ \mu_{hm}(v) &= \exp\left(-\frac{(v - c_4)^2}{a_4}\right), \\ \mu_{lm}(v) &= \exp\left(-\frac{(v - c_5)^2}{a_5}\right), \\ \mu_{llm}(v) &= \frac{1}{1 + \exp(-a_6(v - c_6))},\end{aligned}\tag{12}$$

где  $a_3 - a_6, c_3 - c_6$  - настраиваемые параметры.

Машина нечеткого вывода работает согласно системе правил, представленной в таблице 5. На вход машины типа Мамдани подается кортеж величин (10), а на выходе формируется числовое значение  $m_{mam}(t_i)$  - вещественное число, характеризующее степень интенсивности маневрирования судна; округляя его до целого будем иметь номер вектора состояния, выбираемого из кортежа (8).

Таблица 5 - Система правил машины нечеткого вывода типа Мамдани

№	$Q_2(t_i)$	$Q_3(t_i)$	$Q_4(t_i)$	...	$Q_{J-2}(t_i)$	$Q_{J-1}(t_i)$	$Q_J(t_i)$	$P(t_i)$
1	good	good	good	...	good	good	good	$P_1$
2	good	good	good	...	good	good	bad	$P_2$
3	good	good	good	...	good	bad	bad	$P_3$
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$J-1$	good	bad	bad	...	bad	bad	bad	$P_{J-1}$
$J$	bad	bad	bad	...	bad	bad	bad	$P_J$

Работу нечеткого алгоритма сопровождения траектории можно, аналогично для случая системы типа Сугено, представить схемой, показанной на рисунке 17. Здесь  $L_j(t_i)$  – величины кортежа (10) в момент времени  $t_i$  (вход), если  $L_j(t_i) > 3$ , то вход принимается равным 3;  $m(t_i) = m_{mam}(t_i)$  – определённый нечеткой системой  $F$  в момент времени  $t_i$  номер элемента кортежа (8), характеризующий степень интенсивности маневрирования судна.

Из величин  $m(t_{i-1})$  и  $m(t_i)$  выбирается максимальное значение, которое и принимается за окончательное. Настройка описанной системы состоит в задании максимального количества измерений  $J$ , параметров функций принадлежности  $a_1, \dots, a_6$ ,  $c_1, \dots, c_6$ , значений лингвистической переменной  $P_i$  и величины  $\sigma$ , характеризующей погрешность измерений.

### 2.3.3 Двухуровневая система типа Мамдани

Возможна также модельная интерпретация задачи двухуровневой иерархической нечеткой системой типа Мамдани, показанной на рисунке 18.

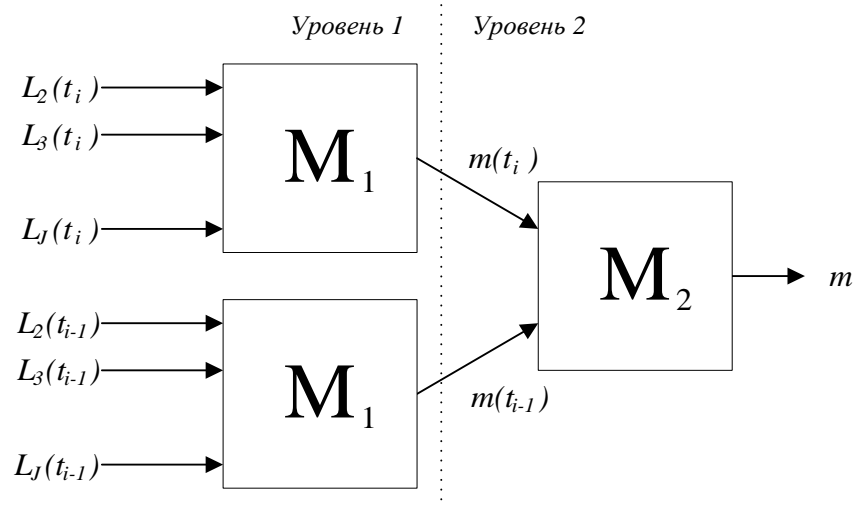


Рисунок 18 - Схема работы алгоритма сопровождения траектории – двухуровневая нечеткая система

Величины  $m_i$  и  $m_{i-1}$  подаются на вход системы типа Мамдани  $M_2$  (уровень 2). На выходе этой системы формируется числовое значение  $m$ , которое и принимается за окончательное значение номера элемента кортежа (5). Машина нечеткого вывода  $M_2$  работает согласно системе правил, представленной в таблице 6.

Таблица 6 - Система правил машины нечеткого вывода типа Мамдани (уровень 2)

№	$P(t_{i-1})$ (вход 1)	$P(t_i)$ (вход 2)	$P(t_i)$ (выход)
1	hhm	hhm	hhm
2	hm	hhm	hm
3	lm	hhm	lm
4	llm	hhm	llm
5	hhm	hm	hm
6	hm	hm	hm
7	lm	hm	lm
8	llm	hm	llm
9	hhm	lm	lm
10	hm	lm	lm
11	lm	lm	lm
12	llm	lm	llm
13	hhm	llm	llm
14	hm	llm	llm
15	lm	llm	llm
16	llm	llm	llm

Если получившееся  $m$  - не целое число, то оно округляется до ближайшего целого. Обработка двух соседних  $m_i$  машиной нечеткого вывода  $M_2$  повышает устойчивость работы системы при больших ошибках измерений (фильтрует случайные выбросы).

Настройка параметров функций принадлежности показанных систем может производиться как экспертным способом, так и путем обучения системы на данных обучающей выборки. В первом случае величины  $a_1, a_2, c_1, c_2$  (для системы типа Сугено (11) ) и  $a_1, \dots, a_6, c_1, \dots, c_6$  (для системы типа Мамдани (12) ) подбираются опытным путем. В другом случае обучение системы происходит известными методами нейроинформатики [114]. Обучающая выборка формируется путем моделирования задачи сопровождения либо на наборе эталонных траекторий, либо на наборе реальных траекторий движения судов, характерных для конкретной акватории.

### 2.3.4 Нейро-нечёткая система

Известна модельная интерпретация задачи машины нечеткого вывода типа Сугено, основанная на элементной базе искусственных нейронных сетей. Такую модель принято называть нейро-нечеткой системой (нейро-нечеткой сетью) [166]. В рассматриваемой задаче выбора вектора состояния из кортежа (8) нейро-нечеткая сеть имеет  $J-1$  входов и состоит из пяти слоёв (рисунок 19).

В узлах первого слоя вычисляются значения функций принадлежности  $\mu_{good}(u)$  и  $\mu_{bad}(u)$  для каждого из входов. Узлы  $\Pi$  второго слоя (всего  $J$  узлов) соответствуют посылкам  $J$  нечетких правил (таблица 4).

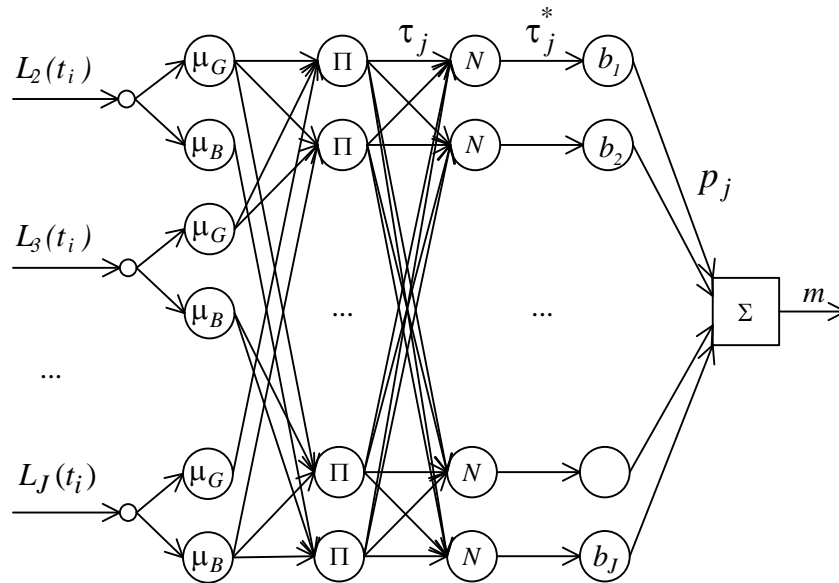


Рисунок 19 - Схема нейро-нечёткой сети, оценивающей степень интенсивности маневрирования судов

Выходом каждого узла второго слоя является степень выполнения  $j$ -го правила, которая рассчитывается как произведение входных сигналов. Узлы  $N$  третьего слоя ( $J$  узлов) рассчитывают относительную степень выполнения каждого нечеткого правила по формуле

$$\tau_j^* = \frac{\tau_j}{\sum_{k=1}^J \tau_k}.$$

Узлы  $b_1, b_2, \dots, b_J$  четвертого слоя формируют заключения нечетких правил; фактически  $b_j$  - это значения выхода сети при однозначном выполнении только  $j$ -го правила. Каждый узел соединен с одним узлом третьего слоя и рассчитывает вклад одного нечеткого правила (таблица 4) в выход сети по формуле  $p_j = b_j \tau_j^*$ .

Единственный узел пятого слоя агрегирует результат, полученный по разным правилам, суммируя вклады всех правил  $u = \sum_{k=1}^J p_j$ .

Обучение описанной нейро-нечеткой сети (рисунок 19) состоит в настройке параметров функций принадлежности  $a_1, a_2, c_1, c_2$  и коэффициентов узлов

четвертого слоя, которые в данном случае определяются значениями заключений нечетких правил таблице 4 (то есть значения последнего столбца).

## 2.4 Результаты численного моделирования задачи сопровождения траектории

При моделировании задачи было принято, что информационной базой СУДС является двухкоординатные радары кругового обзора с периодом обращения 3с и разрешением по углу и дальности, соответственно,  $\delta_\psi = 0.03^\circ$  и  $\delta_r = 6\text{м}$ , дающим характерную ошибку  $\xi(t_k)$ . Максимальное количество измерений было принято равным  $J = 10$ .

Величину  $\sigma$  трудно задать априорно. Суть проблемы в том, что радиолокационный образ судна при высоком разрешении радара представляет собой не одиночное значение амплитуды, а целую матрицу таких амплитуд, сложно распределённых и зависящих от ориентации судна и расположения на нем локальных источников отраженного эхо-сигнала [94, 95] (рисунки 15, 16). Соответственно и вероятностные характеристики ошибок измерений  $\xi(t_k)$  можно априорно оценить только приблизительно, с точностью до порядка величин. Поэтому на практике величину  $\sigma$  предлагается приблизительно оценивать в процессе реализации процедуры сопровождения по следующей формуле:

$$\hat{\sigma}_k = \frac{\sum_{i=1}^k \|\delta z_i^{(2)}\|}{k},$$

где  $k$  - порядковый номер момента времени, прошедшего от начала сопровождения судна.

На рисунке 20 показана моделируемая траектория движения судна. Вначале судно движется прямолинейно и равномерно, а затем совершает манёвр – поворот с радиусом 300м (такие кинематические свойства вполне характерны для современных маломерных судов).

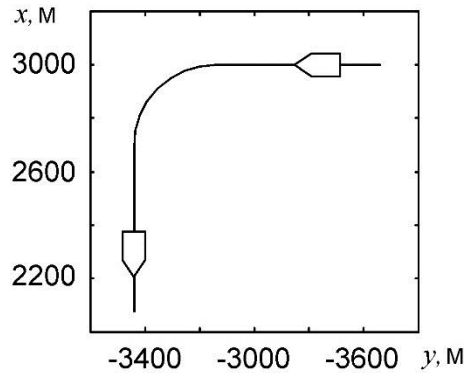


Рисунок 20 - Траектория движения судна

### 2.4.1 Система типа Сугено и нейро-нечёткая система

Рассмотрим случай моделирования задачи системой типа Сугено (таблица 4) или эквивалентной ей нейро-нечеткой системой (рисунок 19). Параметры функций принадлежности (11) системы Сугено задавались равными  $a_1 = a_2 = 5, c_1 = c_2 = 1.5$  (рисунок 21).

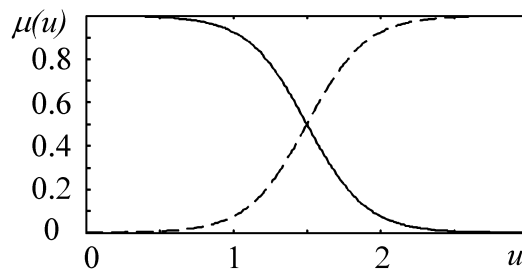


Рисунок 21 - Функции принадлежности термов «good» (сплошная линия) и «bad» (пунктир).

На рисунке 22 показан результат решения задачи сопровождения для судна, движущегося по изображенной траектории со скоростью 10 м/с (левая колонка рисунков) и 20 м/с (правая колонка рисунков). Здесь  $t$  - время, прошедшее от начала сопровождения траектории,  $\delta$  - длина вектора погрешности оценивания положения судна по мере его движения (рисунки 22а и 22б). В данном случае величина  $\delta$  дает представление о ширине строба, необходимого для устойчивого сопровождения объекта. Так, при скорости судна 10 м/с погрешность оценки положения судна на прямолинейном участке траектории (интервал времени  $[0, 45]$



секунд и [90, 120] секунд) составляет 10-12 метров, а на участке маневра (интервал времени [45, 90] секунд, заштрихованная область оси абсцисс) – не более 22м. При скорости судна 20 м/с погрешность оценки положения судна на прямолинейном участке – 10-12 метров, на участке маневрирования – не более 27 метров. Такие значения лишь незначительно превышают характерные геометрические размеры маломерного судна; это означает, что строб с радиусом, например, 30 метров, дает возможность устойчиво сопровождать траекторию судна в насыщенном судопотоке даже при его интенсивном маневрировании.

Рисунки 22в и 22г показывают значение величины  $m$  ( $m$  - номер вектора в кортеже (8), по сути - количество измерений в выбранном нечёткой системой для окончательной оценки  $\alpha$ - $\beta$  фильтре) по мере движения судна. Видно, что на прямолинейной траектории алгоритм устойчиво работает при максимальном  $m = 10$ , что соответствует минимальным значениям коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ , а при маневре (заштрихованный участок оси абсцисс) количество измерений, участвующих в оценке параметров движения судна уменьшается до 5-6 (скорость движения судна – 10 м/с, рисунок 22в) и 3-4 (скорость движения судна – 20 м/с, рисунок 22г). Замечательное свойство алгоритма - быстрая реакция на изменение характера движения судна (начало и окончание маневрирования) – даже при высокой скорости движения изменение величины  $m$  с максимального до минимального (и наоборот) происходит не более чем за 10 секунд (участок [65, 75] секунд на рисунок 22г). Это определяет высокую устойчивость процедуры сопровождения траектории по отношению к срыву.

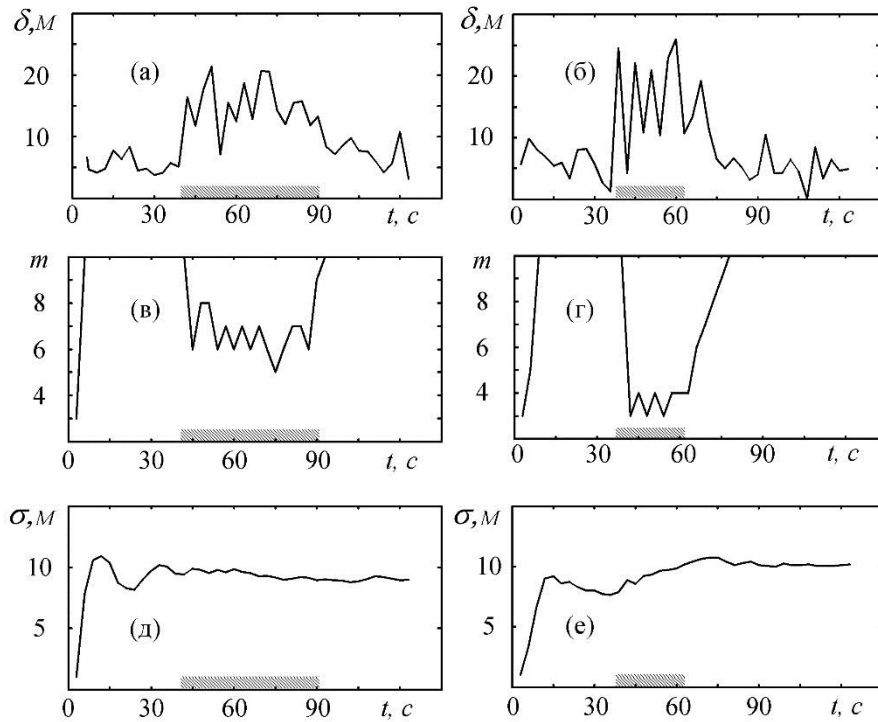


Рисунок 22 - Работа алгоритма сопровождения; штрихами по оси абсцисс показан участок маневрирования судна.

Рисунки 22д и 22е дают значение оценки величины  $\sigma$ , используемой при работе алгоритма. Видно, что по прошествии приблизительно 1 минуты (что соответствует 20 измерениям) значение  $\sigma$  становится достаточно стабильным и корректно отражает среднеквадратичную погрешность измерений координат (в данном случае - около 10 метров).

## 2.4.2 Система типа Мамдани

Рассмотрим случай моделирования задачи системой типа Мамдани (таблица 5). Заданные значения параметров функций принадлежности (12) системы типа Мамдани показаны в таблице 7 (см. также рисунки 23 и 24). Принятые значения лингвистической переменной  $P_i$  из системы правил таблицы 5 приведены в таблице 8.

Таблица 7 - Значения параметров функций принадлежности системы типа Мамдани

$i$	$a_i$	$c_i$
1	5.0	1.5
2	5.0	1.5
3	6.0	3.0
4	2.0	4.5
5	2.0	7.5
6	6.0	9.0

Таблица 8 - Значения лингвистической переменной  $P(t_i)$  системы типа Мамдани

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_i$	<i>llm</i>	<i>llm</i>	<i>lm</i>	<i>lm</i>	<i>lm</i>	<i>hm</i>	<i>hm</i>	<i>hm</i>	<i>hhm</i>	<i>hhm</i>

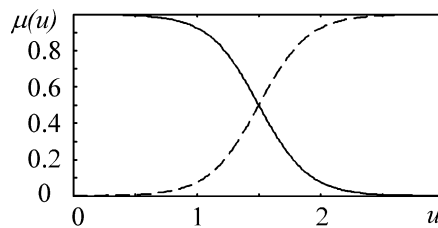


Рисунок 23 - Функции принадлежности термов «good» (сплошная линия) и «bad» (пунктир), соответствующие значениям таблицы 7

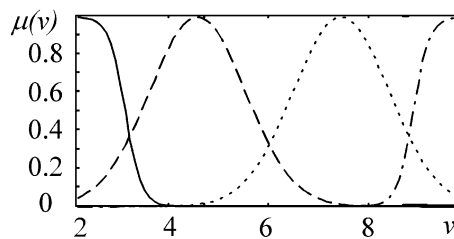


Рисунок 24 - Функции принадлежности термов «hhm» (сплошная линия), «hm» (пунктир), «lm» (точки) и «llm» (точка-пунктир)

На рисунке 25 показан результат решения задачи сопровождения для судна, движущегося по изображенной траектории со скоростью 10 м/с (левая колонка рисунков) и 20 м/с (правая колонка рисунков). Полученные результаты, как и

следовало ожидать, примерно соответствуют результатам для системы Сугено (см. предыдущий пункт).

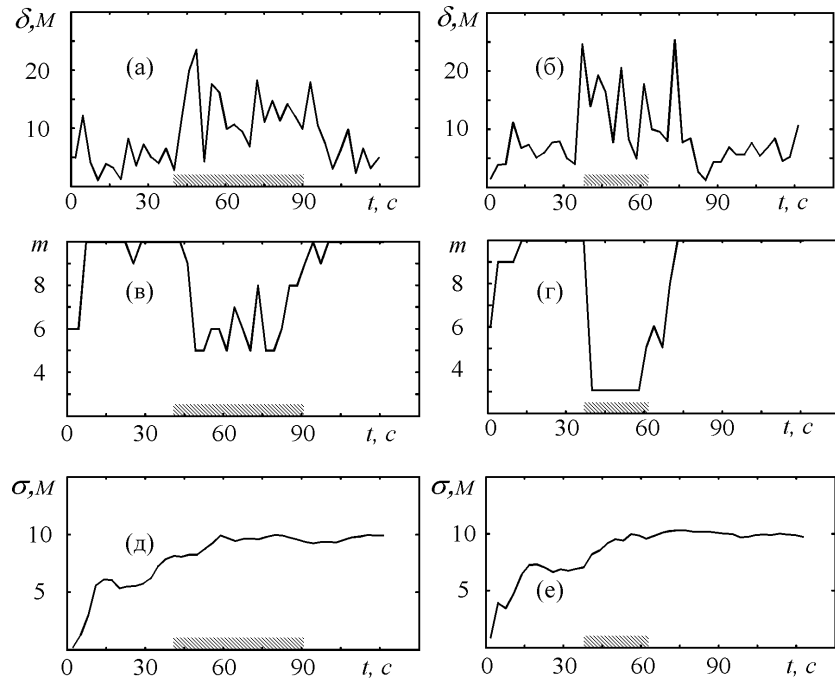


Рисунок 25 - Работа алгоритма сопровождения; штрихами по оси абсцисс показан участок маневрирования судна

### 2.4.3 Двухуровневая система типа Мамдани

Качество решения задачи сопровождения траектории, полученное двухуровневой системой типа Мамдани (см. рисунок 18) примерно соответствует решению, полученному с помощью системы типа Сугено и системы типа Мамдани (рисунок 17, см. предыдущие пункты).

Модельная интерпретация задачи обычной или двухуровневой системой типа Мамдани может быть использована для решения самостоятельной задачи построения нечеткого обнаружителя (детектора) манёвра. На рисунке 26 показан результат решения задачи оценки степени интенсивности маневрирования для судна, движущегося по изображенной на рисунке 20 траектории, со скоростью 10 м/с (левая колонка рисунков) и 20 м/с (правая колонка рисунков). Здесь  $t$  - время, прошедшее от начала работы алгоритма,  $m$  - определённое по мере движения судна

значение степени интенсивности его маневрирования (рисунки 26а и 26б). В данном случае  $m$  близко к максимальному значению (около 10) на прямолинейном участке траектории и уменьшается до значений  $\approx 3.5 - 5$  при повороте на скорости 10 м/с и до  $\approx 2.5$  при повороте на скорости 20 м/с. При этом алгоритм достаточно быстро отреагировал на изменение характера движения судна (не более 15 секунд, участок [63, 78] секунд на рисунке 26б).

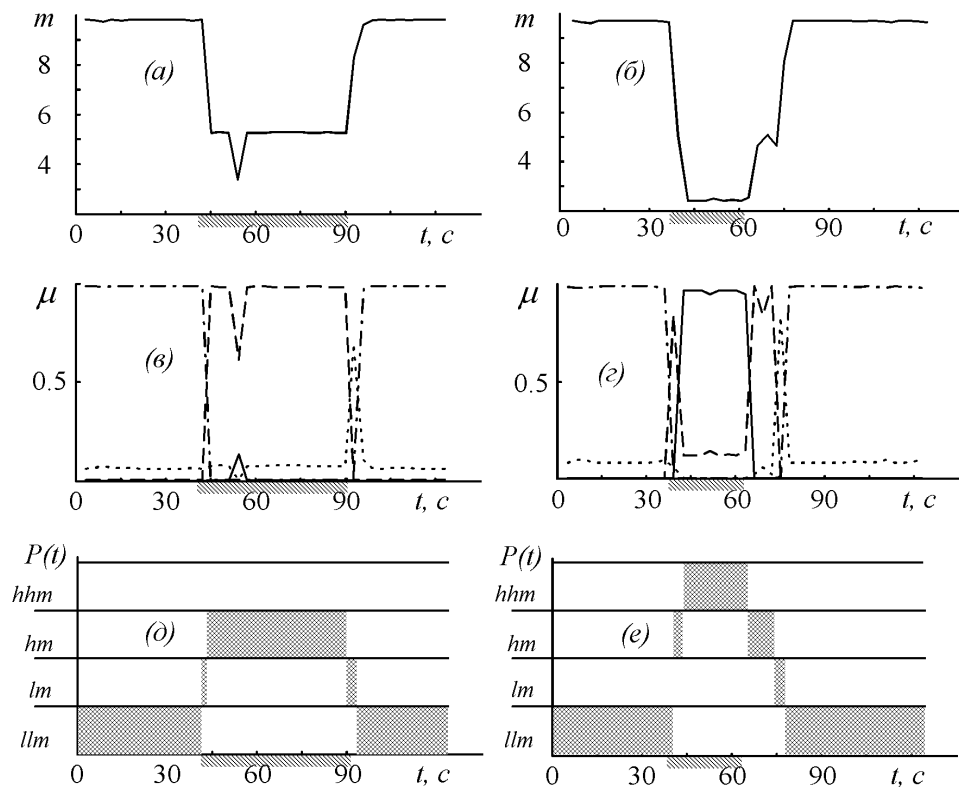


Рисунок 26 - Работа алгоритма нечеткой оценки степени маневрирования судна; штрихами снизу оси абсцисс показан участок маневрирования судна

Рисунки 26в и 26г показывают значения функций принадлежности термов « $hhm$ » (сплошная линия), « $hm$ » (пунктир), « $lm$ » (точки) и « $llm$ » (точка-пунктир) по мере движения судна. Так, при движении со скоростью 10 м/с на участке [0, 40] секунд движение с наивысшей степенью оценено как «очень низкоманевренное», на участке (40, 43) – как «низкоманевренное», на участке [43, 90] – как «высокоманевренное» и т.д. (рисунок 25в). Соответствующие термы с максимальными значениями функции принадлежности приведены на рисунках 25д

и 25е, которые иллюстрируют обобщённую вербальную лингвистическую интерпретацию траекторных свойств движения в разрезе значений «очень высокоманевренное», «высокоманевренное», «низкоманевренное» и «очень низкоманевренное». Такая лингвистическая оценка степени маневренности судна служить дополнительной информацией, используемой для поддержки принятия решений операторами СУДС и судоводителями.

## 2.5 Краткие итоги главы 2

В главе рассмотрен метод идентификации модели движения объекта, который применён для решения задачи сопровождения траектории движения судна по данным РЛС кругового обзора. В основу задачи положена многомодельная оценка вектора состояния динамическим алгоритмом с различной степенью фильтрации (в данном случае -  $\alpha$ - $\beta$  алгоритмом) в сочетании с нечётким обнаружителем манёвра. Задача решается в следующих модельных представлениях:

- нечеткая система типа Сугено;
- нечёткая система типа Мамдани;
- двухуровневая нечеткая система типа Мамдани;
- нейро-нечеткая система, эквивалентная соответствующей системе типа Сугено.

На вход всех систем подаётся вектор приведённых невязок измерений координат объекта, на выходе формируется число, характеризующее степень маневренности объекта и используемое для выбора той или иной модели для сопровождения его траектории. По результатам численного исследования все варианты модельных представлений пригодны для практического использования.

В задачах наблюдения нередко имеет значение достоверность априорной информации о характеристиках случайных параметров модели (шумов) [99]. Так, при решении задач динамическими алгоритмами статистически оптимального

оценивания (например, фильтр Калмана) важна достоверность соотношения между дисперсиями измерительных ошибок и случайных не моделируемых параметров движения. Очень часто соответствующие характеристики случайных процессов трудно задать априорно (например, параметры инструментальных ошибок измерений РЛС кругового обзора). В силу этого обстоятельства для решения задачи сопровождения траектории судна в работе предлагается использовать упрощённую интерпретацию алгоритма Калмана –  $\alpha$ – $\beta$  алгоритм, который не требует априорного знания характеристик инструментальных погрешностей измерений. Кроме того, в п. 2.4 даётся рекомендация по определению величины, опосредованно характеризующей ошибки измерений при реализации процедуры многомодельного сопровождения, что также даёт возможность «обойти» проблему достоверности априорной информации о характеристиках случайных параметров задачи.

Помимо задачи сопровождения траектории, разработанный новый подход к обнаружению маневра, связанный с классификацией наблюдаемых объектов по степени интенсивности маневрирования с помощью аппарата нечеткой логики удобен для поддержки вербального принятия решений операторами СУДС и судоводителями (этот аспект применения метода рассматривается в 3 главе настоящей работы). Маневрирующие и не маневрирующие объекты с точки зрения оценки безопасности имеют ряд принципиальных различий [18, 102]. Во-первых, при внешнем наблюдении полностью достоверный прогноз траектории маневрирующего объекта невозможен. Во-вторых, если исходить из принятого на практике положения, что маневрирование судна, как правило, свидетельствует о попытке судоводителя придать движению безопасный характер и о его контроле над ситуацией, то для маневрирующих объектов вербальный уровень опасности заведомо ниже, чем для не маневрирующих. В связи с этим обобщённые лингвистические представления о характере движения того или иного судна могут быть использованы при распознавании опасных ситуаций бортовой или береговой

СУДС с выделением различных уровней опасности ситуации типа «очень опасная», «опасная», «почти безопасная» и т.п.

Перспективным направлением дальнейших исследований по теме представляется изучение поведения разработанного алгоритма сопровождения при обучении описанных нечетких систем на обучающей выборке, полученной путем моделирования различных классов типичных (эталонных) траекторий движения судна или путем извлечения информации из базы данных, хранящей трафик конкретной акватории. Исследование позволит ответить на следующие вопросы:

- является ли в рассматриваемой задаче сопровождения траектории обучение нечеткой системы экспертным способом достаточным для практического использования предложенных моделей и алгоритмов;
- если всё же необходимо прибегать к обучению системы на обучающей выборке, то как сформировать такую выборку;
- достаточно ли при формировании обучающей выборки ограничиться набором эталонных траекторий судов или для настройки системы на особенности трафика конкретной акватории необходимо обучать её на реальных траекториях движения.

Эти вопросы представляют как научный, так и прикладной интерес.

Основные результаты, представленные в главе 2, были опубликованы в статьях [44, 51, 56, 74, 75, 77], отражены в патентах на изобретение [38, 87].



## **Глава 3. Многоуровневая оценка риска опасного сближения судов**

### **3.1 Задача предупреждения об опасном сближении судов на основе внешних траекторных измерений**

Современные средства автоматизации, имеющиеся на мостике судна, позволяют обеспечить решение задачи оценки риска опасного сближения [2, 3]. Автоматизированные бортовые системы предупреждения опасного сближения генерируют тревожные сигналы в тех случаях, когда существует риск столкновения с препятствием или сближения с ним на недопустимо малое расстояние, при этом бортовые системы исходят из априорной посылки управляемости объекта. Вместе с тем, решение задачи оценки риска столкновения «на борту» не является достаточным условием безопасного плавания в условиях коллективного движения и в ограниченных водах, так как при этом не решается задача координации движения судов. Решение этой задачи возложено на береговые системы управления движением судов.

Береговые СУДС являются прежде всего средством визуализации навигационной обстановки. Оператор СУДС (диспетчер) имеет возможность видеть расположение судов на акватории (рисунок 27) и дополнительную информацию о характере их движения.

Главная особенность береговых СУДС – реализация ими внешнего наблюдения, когда отведённая им роль в управлении ограничивается лишь выдачей предупреждений. СУДС третьего и последующих поколений позволяют не только отображать навигационную обстановку, но и распознавать опасно сближающиеся суда. По результатам решения этой задачи система генерирует для оператора тревожный сигнал. Проанализировав обстановку, оператор при необходимости связывается с судоводителями (капитанами судов), доводит до них необходимую информацию и даёт указания по изменению траектории движения. Реализуемые СУДС алгоритмы распознавания опасно сближающихся судов основываются не на

идейной установке генерации оптимальной траектории расхождения (как в бортовых системах), а на выдаче своевременных сигналов тревоги и минимизации числа ложных тревог.

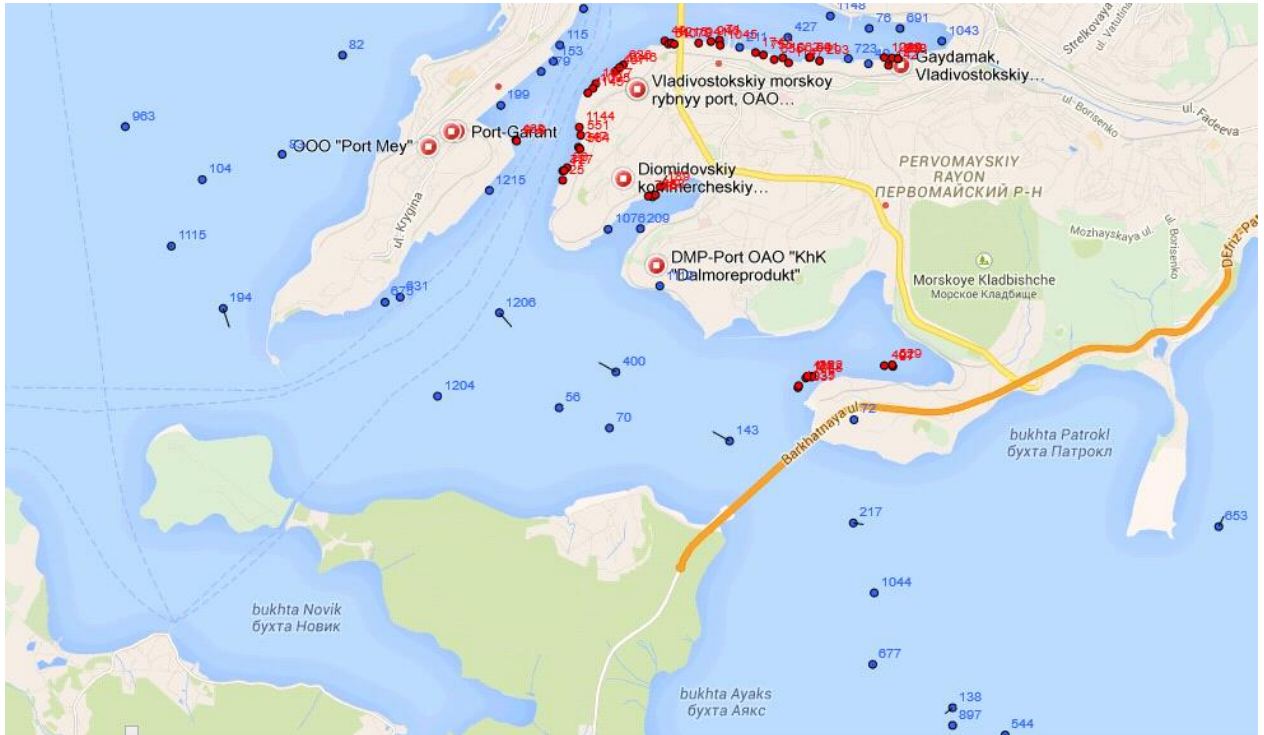


Рисунок 27 - Принцип визуализации навигационной обстановки на акватории в современных СУДС. Кружками показано текущее положение судов, стрелкой – направление и скорость их движения. Красным отмечены суда, стоящие близко друг к другу

Задача оценки риска опасного сближения судов решается на основе экстраполяции их траекторий. При этом информационной базой СУДС являются внешние траекторные измерения, поступающие от береговых радаров и/или бортовых транспондеров спутниковых навигационных систем. В этих условиях становится невозможной достоверная экстраполяция траекторий судов на больших интервалах времени, особенно, если суда маневрируют. В условиях высокой интенсивности движения это приводит к расширению множества решений, способных обеспечить безопасное движение и возрастанию неопределённости при принятии конкретного решения. Всё это повышает эмоциональную нагрузку на операторов СУДС и способно привести к критическим ошибкам [136, 137, 234].

Основной проблемой, возникающей при построении модели распознавания опасных ситуаций, является сложность перехода от вербальных представлений понятия «опасная ситуация» (далеко не однозначного [98, 212, 213]) к его формализованным представлениям. Обычно при этом принято учитывать известные данные натурных измерений, показывающие, что наибольшее значение для обеспечения безопасного плавания имеет соблюдение некоей «зоны навигационной безопасности» вокруг судна. Часто эту зону называют также «корабельный домен». В отношении понятия «корабельный домен» имеется несколько толкований [100, 101, 118, 194, 200, 225-227 и др.]. Так, статическим корабельным доменом принято называть зону, в которую другие суда не допускают вторжения. Область пространства, используемую судном для совершения маневра уклонения называют динамическим корабельным доменом. Граница эффективного корабельного домена – это некий психологический барьер, который, сближаясь, судоводители не могут преодолеть. Во всех этих определениях за опасную ситуацию (столкновение или посадку на мель) принимается вторжение другого судна или зоны, запрещённой для плавания, в пространство домена (см. также п. 1.4).

Предлагаемым в работе *новым подходом* к упорядочиванию действий оператора СУДС является дополнительный учет кинематических траекторных свойств движения судов. При внешнем наблюдении в качестве дополнительного информативного признака предлагается использовать маневрирование судна. Практика судовождения показывает, что маневрирующие и не маневрирующие суда с точки зрения безопасности коллективного движения имеют принципиальные различия. Во-первых, при внешнем наблюдении полностью достоверный прогноз траектории маневрирующего объекта невозможен. Во-вторых, на практике маневрирование судна, как правило, свидетельствует о попытке судоводителя придать движению безопасный характер и о его контроле над ситуацией. Поэтому для маневрирующего объекта вербальный уровень опасности заведомо ниже, чем для не маневрирующего.

Это является побудительным мотивом учитывать тип навигационной ситуации с точки зрения маневрирования судов и выделять различные уровни опасности (типа «очень опасная», «опасная», «почти безопасная» и т.п.) [57, 233]. Такой подход позволяет оператору СУДС действовать согласно установленного приоритета (например, в случаях, когда одновременно присутствуют несколько тревожных сигналов, принимать решения по наиболее опасным из них).

### **3.2 Модельные представления задачи предупреждения об опасном сближении судов**

#### **3.2.1 Модель вероятностного типа, основанная на полиномиальной экстраполяции траекторий**

Рассматриваемый в этом разделе класс моделей реализует специализированный подход, предназначенный для обработки потока измерительной информации, поступающей от одной или нескольких береговых двухкоординатных РЛС кругового обзора и/или бортовых транспондеров спутниковой навигационной системы, используемых как базовый источник навигационной информации для СУДС. Наличие случайной компоненты эхо-сигнала и помех, связанных в том числе с конечным объёмом цифрового радиолокационного образа акватории, предопределяет выбор для распознавания опасных ситуаций моделей вероятностного типа.

Введём правую ортогональную систему отсчёта  $oxy$ , с осью  $y$ , направленной на Север, и осью  $x$ , направленной на Восток. Пусть измеряемыми параметрами являются декартовы координаты объекта. В этом случае модель измерений выглядит так:

$$\begin{aligned} z_x(t_k) &= x(t_k) + \xi_x(t_k), \\ z_y(t_k) &= y(t_k) + \xi_y(t_k). \end{aligned} \tag{13}$$

Здесь  $x(t_k)$ ,  $y(t_k)$  - декартовы координаты наблюдаемого объекта в момент времени  $t_k$ ,  $\xi_x(t_k)$ ,  $\xi_y(t_k)$  - случайные инструментальные ошибки измерений.

В условиях естественного отсутствия при внешнем наблюдении данных о силах и моментах, действующих на объект и обуславливающих его траекторию на интервале наблюдения, будем описывать эволюцию координат объекта простейшими полиномиальными моделями:

$$\begin{aligned} x(t) &= x(t_0) + \sum_{i=1}^{N_x} a_i^{(x)} (t - t_0)^i, \\ y(t) &= y(t_0) + \sum_{i=1}^{N_y} a_i^{(y)} (t - t_0)^i. \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь  $N_x$ ,  $N_y$  - порядок полинома, применяемого при описании эволюции координат,  $a_i^{(x)}$ ,  $a_i^{(y)}$  - полиномиальные коэффициенты, отождествляемые со скоростями объекта и приведёнными значениями старших производных.

Таким образом, о системе уравнений ((13), (14)) можно говорить, как о модели задачи наблюдения, целью решения которой является определение вектора оценок  $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T$ , причём момент времени  $t$  может как принадлежать интервалу наблюдения, так и лежать вне его. При этом в силу вероятностного характера значений оценок вектор  $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T$  имеет смысл только вместе с информацией о характеристиках случайных погрешностей оценивания (величинах  $\Delta x(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ ,  $\Delta y(t) = y(t) - \hat{y}(t)$ ).

Рассмотрим варианты формализации понятия «опасная ситуация» в рамках модели ((13), (14)). Будем различать два типа опасностей: опасность типа «судно-берег» и опасность типа «судно-судно».

*Случай «судно-берег».* Разделим наблюдаемую СУДС акваторию на две зоны: участок, где движение судов возможно без ограничений (разрешённую зону, множество  $Y$ ), и участок, где движение судов запрещено (запрещённую зону, множество  $N$ ). Определим корабельный домен  $S^\circ$  в виде круга радиуса  $R^\circ$ ,

очерченного вокруг условной точки – центра судна (рисунок 28). Будем трактовать этот домен в статическом смысле – как зону, вторжение в которую интерпретируется как опасность. В таком случае за опасную ситуацию можно принять факт наличия (в данный момент времени) непустого пересечения множеств  $N$  и  $S^\circ$ .

Пусть положение наблюдаемого объекта в данный момент времени  $t$  характеризуется оценкой его координат – вектором  $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T$  и функцией плотности распределения вероятностей оценок  $f(x, y)$ . Опишем возможные способы определения понятия «вероятность опасной ситуации».

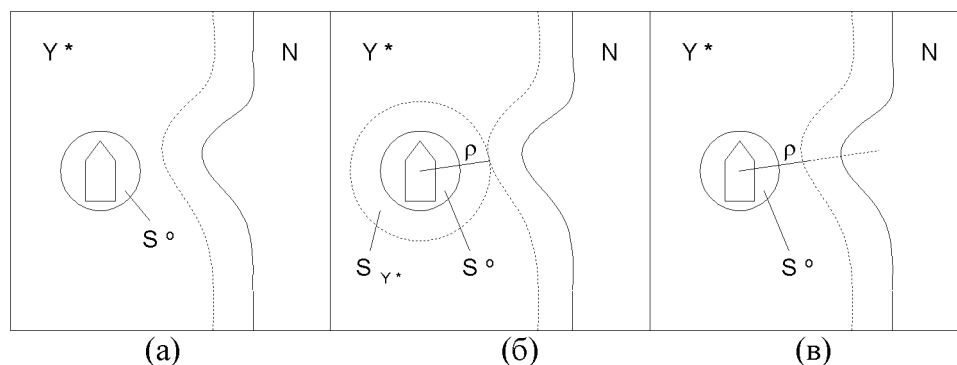


Рисунок 28 - Иллюстрация понятий, используемых при моделировании опасной ситуации для случая «судно-берег»

1. Рассмотрим разрешённую зону  $Y$ . В рамках неё выделим зону  $Y^*$  - множество разрешённых положений центра судна (т.е. приведём  $Y$  к  $Y^*$  с учётом радиуса корабельного домена (рисунок 28а). Если  $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T$  - оценка положения центра объекта, а  $f(x, y)$  - функция плотностей распределения вероятностей оценок, то вероятность того, что  $(x(t), y(t))^T \in Y^*$  (т.е. корабельный домен в момент времени  $t$  лежит в безопасной зоне) может быть найдена по формуле

$$P_{Y^*}(t) = \int_{Y^*} f(x, y) dx dy \quad (15)$$

2. Как и в первом случае, приведём зону  $Y$  к  $Y^*$ . Пусть  $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T \in Y^*$ . Обозначим через  $\rho$  минимальное расстояние от  $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T$  до границы  $Y^*$  и введём понятие круга безопасности объекта  $S_{Y^*}$  - круга с центром  $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))$  и радиусом  $\rho$  (рисунок 28б); как видно из рисунка,  $S_{Y^*}$  не следует отождествлять с корабельным доменом  $S^0$ ). Вероятность того, что  $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T \in S_{Y^*}$  (т.е. центр судна в момент времени  $t$  лежит в круге безопасности) может быть найдена по формуле

$$P_{S_{Y^*}}(t) = \int_{S_{Y^*}} f(x, y) dx dy \quad (16)$$

В случае, когда  $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T \notin Y^*$ , примем  $P_{S_{Y^*}}(t) = 0$ .

3. Рассмотрим вектор оценок координат объекта  $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T$  и зону  $Y^*$ . Пусть  $|\rho|$  - минимальное расстояние от точки  $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))$  до границы  $Y^*$ , причём,  $\rho > 0$  если  $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T \in Y^*$  и  $\rho < 0$ , если  $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T \notin Y^*$  (рисунок 28в). Если  $f(\rho)$  - функция плотности распределения вероятностей случайной величины  $\rho$  (вероятностный характер которой обусловлен статистикой  $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T$ ), то вероятность того, что  $\rho > 0$  в момент времени  $t$  (то есть центр объекта лежит в зоне  $Y^*$ ) можно определить по формуле

$$P_{\rho > 0}(t) = \int_0^{\infty} f(\rho) d\rho \quad (17)$$

Величины  $P_{Y^*}(t)$ ,  $P_{S_{Y^*}}(t)$  и  $P_{\rho > 0}(t)$  можно интерпретировать как вероятности безопасной ситуации в момент времени  $t$  (безопасного положения судна по отношению к берегу). Соответственно, величины  $1 - P_{Y^*}(t)$ ,  $1 - P_{S_{Y^*}}(t)$  и  $1 - P_{\rho > 0}(t)$  можно принять в качестве вероятностей опасной ситуации.

Случай «судно-судно». Пусть имеются два объекта. Определим корабельный домен: в виде квадрата  $S_i^\square$  ( $i=1,2$ ) со стороной  $2R_i^\square$  и центром, совпадающим с условным центром судна, или, аналогично случаю «судно-берег», в виде круга  $S_i^\circ$  радиуса  $R_i^\circ$  (рисунок 29). За опасную ситуацию между этими двумя объектами примем факт наличия непустого пересечения множеств  $S_1^\square, S_2^\square$  или  $S_1^\circ, S_2^\circ$ .

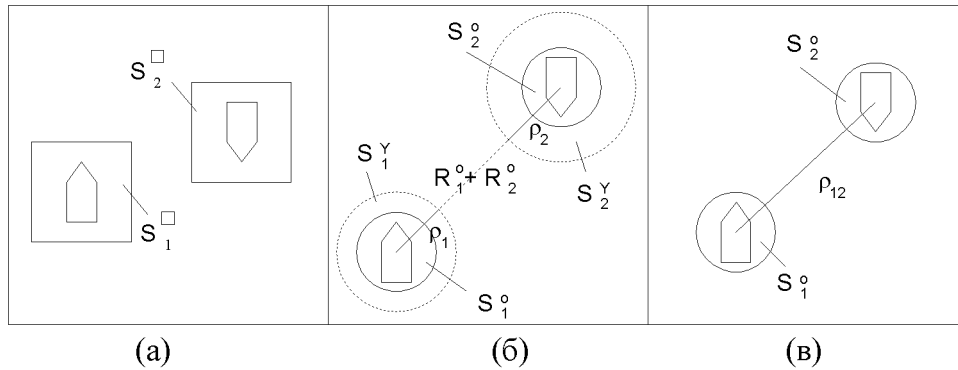


Рисунок 29 - Иллюстрация понятий, используемых при моделировании опасной ситуации для случая «судно-судно»

Если положение наблюдаемых объектов в данный момент времени  $t$  описывается оценками их координат  $(\hat{x}_1(t), \hat{y}_1(t))^T$ ,  $(\hat{x}_2(t), \hat{y}_2(t))^T$  и функциями плотностей распределения вероятностей оценок  $f_1(x_1, y_1)$  и  $f_2(x_2, y_2)$ , то возможны следующие способы определения понятия «вероятность опасной ситуации».

1. Пусть корабельные домены двух рассматриваемых объектов заданы как  $S_1^\square, S_2^\square$  с соответствующими  $R_1^\square, R_2^\square$  (рисунок 29а). При заданных функциях плотностей распределения вероятностей оценок  $f_1(x_1, y_1)$  и  $f_2(x_2, y_2)$  вероятность не пересечения корабельных доменов в заданный момент времени может быть найдена по формуле

$$P_\Gamma(t) = \int_{\Gamma} f_1(x_1, y_1) f_2(x_2, y_2) dx_1 dy_1 dx_2 dy_2, \quad (18)$$

где  $\Gamma$  есть множество решений системы неравенств



$$|x_1 - x_2| > R_1^\square + R_2^\square,$$

$$|y_1 - y_2| > R_1^\square + R_2^\square,$$

т.е.  $\Gamma$  эквивалентно множеству значений  $x_1(t)$ ,  $y_1(t)$ ,  $x_2(t)$ ,  $y_2(t)$ , при которых пересечение  $S_1^\square$  и  $S_2^\square$  пусто.

2. Пусть корабельные домены двух рассматриваемых объектов заданы как  $S_1^\circ$  и  $S_2^\circ$  с соответствующими радиусами  $R_1^\circ$  и  $R_2^\circ$ . Введём для каждого объекта понятие круга безопасности  $S_i^Y$  ( $i=1,2$ ) - круга с центром  $(\hat{x}_i(t), \hat{y}_i(t))$  и радиусом  $\rho_i$  (рисунок 29б), причем  $\rho_i$  определяется как решение в данный момент времени системы уравнений

$$\rho_1 = \rho_2,$$

$$\sqrt{(\hat{x}_1(t) - \hat{x}_2(t))^2 + (\hat{y}_1(t) - \hat{y}_2(t))^2} - (\rho_1 + \rho_2) = R_1^\circ + R_2^\circ.$$

Тогда вероятность того, что  $(x_i(t), y_i(t)) \in S_i^Y$  для всех  $i$  (то есть центры обоих объектов лежат в своих кругах безопасности) может быть найдена по формуле

$$P_{S^Y}(t) = \int_{S_1^Y} f_1(x_1, y_1) dx_1 dy_1 \int_{S_2^Y} f_2(x_2, y_2) dx_2 dy_2. \quad (19)$$

3. Зададим корабельные домены объектов в виде кругов  $S_1^\circ$  и  $S_2^\circ$  с соответствующими радиусами  $R_1^\circ$  и  $R_2^\circ$ . Введём величину (расстояние между центрами объектов – рисунок 29в)

$$\rho_{12} = \sqrt{(\hat{x}_1(t) - \hat{x}_2(t))^2 + (\hat{y}_1(t) - \hat{y}_2(t))^2}.$$

Если  $f(\rho_{12})$  - функция плотности распределения вероятностей случайной величины  $\rho_{12}$  (вероятностный характер которой обусловлен ошибками оценок координат объектов), то вероятность того, что  $\rho_{12} > R_1^\circ + R_2^\circ$  в момент времени  $t$  (то есть корабельные домены не пересекаются) можно определить по формуле

$$P_{\rho > R_1^\circ + R_2^\circ}(t) = \int_{R_1^\circ + R_2^\circ}^{\infty} f(\rho_{12}) d\rho_{12}. \quad (20)$$

Величины  $P_{\Gamma}(t)$ ,  $P_{SY}(t)$  и  $P_{\rho > R_1^{\circ} + R_2^{\circ}}(t)$  можно интерпретировать как вероятности безопасного положения объектов по отношению друг к другу в момент времени  $t$ . Соответственно, величины  $1 - P_{\Gamma}(t)$ ,  $1 - P_{SY}(t)$  и  $1 - P_{\rho > R_1^{\circ} + R_2^{\circ}}(t)$  можно принять в качестве вероятностей опасной ситуации. В свете рассмотренных модельных представлений может быть поставлена общая обратная задача ((13), (14)), включающая в себя:

- определение координат наблюдаемых объектов  $x_i(t), y_i(t)$  на заданном интервале времени;
- определение характеристик погрешностей оценивания координат как случайных величин (нахождение для каждого момента времени функции  $f(x_i, y_i)$ );
- определение для каждого объекта величин ((15)-(20)), характеризующих вероятность безопасного состояния объектов;
- принятие решения о типе сложившейся ситуации (опасная/безопасная) и выдаче сигнала тревоги.

### **3.2.2 Детерминированная модель, основанная на геометрической интерпретации относительного движения судов**

При моделировании навигационной безопасности коллективного движения прибегнем к традиционному приближению - построению модели безопасности «судно-судно» для каждой пары судов.

Не теряя общности, рассмотрим береговую СУДС, реализующую внешнее наблюдение и имеющую информационной основой РЛС кругового обзора (измеряющую расстояние и азимут) и/или приёмо-передающие устройства Автоматической идентификационной системы (АИС) [125, 236].

Введём правую ортогональную систему отсчёта  $oxy$ , с центром  $O$ , связанным с осью вращения антенны РЛС, осью  $y$ , направленной на Север, и осью

$x$ , направленной, соответственно, на Восток. Пусть измеряемыми параметрами являются декартовы координаты объекта. В этом случае модель измерений координат каждого судна имеет вид (13).

Рассмотрим два судна с координатами  $x^{(1)}, y^{(1)}$  и  $x^{(2)}, y^{(2)}$  и скоростями  $v_x^{(1)}, v_y^{(1)}$  и  $v_x^{(2)}, v_y^{(2)}$ . Будем описывать их коллективное движение набором величин  $(r_x, r_y, v, \eta_v, w_v)^T$  - вектором состояния коллективного движения двух судов, где  $r_x = x^{(2)} - x^{(1)}$ ,  $r_y = y^{(2)} - y^{(1)}$  - координаты вектора относительного положения судов,  $v = \sqrt{(v_x^{(1)} - v_x^{(2)})^2 + (v_y^{(1)} - v_y^{(2)})^2}$  - скорость относительного движения судов,  $\eta_v$  - направление вектора скорости относительного движения судов,  $w_v = \frac{d\eta_v}{dt}$  - скорость изменения угла  $\eta_v$  (рисунок 30).

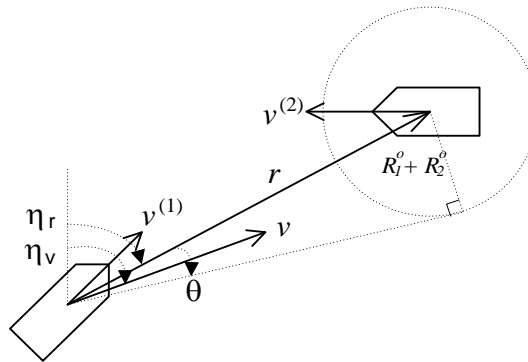


Рисунок 30 - Модель относительного движения пары «судно-судно»

Примем следующие модельные представления об эволюции вектора состояния коллективного движения:

$$\begin{aligned}
 \dot{r}_x(t) &= -v \sin(\eta_v(t_0) + w_v(t - t_0)), \\
 \dot{r}_y(t) &= -v \cos(\eta_v(t_0) + w_v(t - t_0)), \\
 \dot{v} &= 0, \\
 \dot{\eta}_v &= w_v, \\
 \dot{w}_v &= 0.
 \end{aligned} \tag{21}$$

С учётом (13) и (21) будем иметь следующие уравнения измерений:

$$\begin{aligned} z_{rx}(t_k) &= z_x^{(2)}(t_k) - z_x^{(1)}(t_k) = r_x(t_k) + \xi_{rx}(t_k), \\ z_{ry}(t_k) &= z_y^{(2)}(t_k) - z_y^{(1)}(t_k) = r_y(t_k) + \xi_{ry}(t_k), \\ k &= \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (22)$$

Здесь  $z_x^{(1)}(t_k)$ ,  $z_y^{(1)}(t_k)$  - измерения координат первого судна,  $z_x^{(2)}(t_k)$ ,  $z_y^{(2)}(t_k)$  - измерения координат второго судна;  $z_{rx}(t_k)$ ,  $z_{ry}(t_k)$  - измерения соответствующих проекций вектора относительного положения судов, полученные в момент времени  $t_k$ ;  $\xi_{rx}(t_k)$ ,  $\xi_{ry}(t_k)$  - приведённые случайные ошибки измерений;  $N$  – число измерений.

Целью решения системы уравнений ((21), (22)) является оценка вектора состояния коллективного движения двух судов  $\hat{s}(t) = (\hat{r}_x(t), \hat{r}_y(t), \hat{v}(t), \hat{\eta}_v(t), \hat{w}_v(t))^T$ , отнесённая к выбранному моменту времени  $t$ , который может как принадлежать интервалу наблюдения, так и лежать вне его. Описанная модель движения (21) является кинематической моделью; модели такого типа традиционны при решении задач наблюдения в условиях отсутствия информации о силах и моментах, обуславливающих движение.

Совокупность величин  $(r_x, r_y, v, \eta_v, w_v)^T$  свидетельствует о потенциально опасном движении двух судов в случае выполнения следующих двух неформальных условий:

- направление вектора скорости относительного движения судов близко к направлению вектора  $r$ ;
- величина  $w_v$  близка к скорости изменения направления вектора  $r$ ;
- время, оставшееся до сближения, меньше критического.

Формализация данных условий определяется, очевидно, трактовкой понятия «опасная ситуация».

Аналогично пункту 3.2.1 определим корабельный домен в виде круга  $S_i^\circ$  радиуса  $R_i^\circ$ , очерченного вокруг условной точки – центра судна. Будем трактовать этот домен в статическом смысле – как зону, вторжение в которую интерпретируется как опасность (рисунок 30). Это позволяет формализовать условия потенциально опасного движения двух судов следующим образом:

$$|\eta_v - \eta_r| < \theta, \quad (23)$$

$$|w_v - w_r| < \dot{\theta}, \quad (24)$$

$$0 < T < T^* \quad (25)$$

Здесь  $|r| = \sqrt{r_x^2 + r_y^2}$  – текущее расстояние между судами;  $\eta_r = \arctan\left(\frac{r_x}{r_y}\right)$  –

азимут вектора  $r$ ;  $w_r = d\eta_r / dt = \frac{r_x v \cos \eta_v - r_y v \sin \eta_v}{|r|^2}$  – скорость изменения азимута

вектора  $r$ ;  $\theta = \arcsin((R_1 + R_2)/|r|)$  – угол, определяемый расстоянием между судами и размерами доменов, считается, что в безопасном состоянии корабельные домены не должны «вторгаться» в область друг друга;

$\dot{\theta} = d\theta / dt = -\frac{R_1 + R_2}{|r|^2 \sqrt{1 - (R_1 + R_2)^2 / |r|^2}} \frac{d|r|}{dt}$  – скорость изменения угла  $\theta$ ;

$\frac{d|r|}{dt} = -\frac{r_x v \sin \eta_v + r_y v \cos \eta_v}{|r|}$  – скорость изменения расстояния между судами;

$T = -\frac{|r|^2}{r_x v \sin \eta_v + r_y v \cos \eta_v}$  – приближённое время, оставшееся до максимального

сближения судов;  $T^*$  – пороговое значение для времени  $T$ .

Условие (23) формализует опасную ситуацию при равномерном и прямолинейном движении судов; условие (24) дополняет его в случае, если суда маневрируют; условие (25) отбирает из общего массива лишь те суда, время до сближения которых меньше порогового.

В свете рассмотренных модельных представлений может быть поставлена общая обратная задача ((21), (22)), включающая в себя:

- определение параметров относительного движения  $(r_x, r_y, v, \eta_v, w_v)$  для каждой пары судов на заданном интервале времени;
- определение для каждой пары судов условий ((23)-(25)), характеризующих потенциально опасное движение;
- принятие решения о типе сложившейся ситуации (опасная/безопасная) и выдаче сигнала тревоги.

### 3.3 Концепция решения задачи предупреждения об опасном сближении судов

#### 3.3.1 Метод решения, основанный на приведении к конечномерному виду

Рассмотрим задачу ((13), (14)), являющуюся линейной задачей. Запишем её в общем виде:

$$\begin{aligned} \dot{s}(t) &= A(t)s(t) + q(t), \\ z(t) &= H(t)s(t) + \xi(t). \end{aligned} \quad (26)$$

Задача ((21), (22)) является нелинейной. Методологически общим при исследовании и решении задач такого типа является их линеаризация около некоторых опорных решений, что обуславливается достаточной гладкостью реальных механических процессов и их реальных описаний. Оставаясь в рамках этой традиции, запишем линеаризованную задачу ((21), (22)) в следующем общем виде:

$$\begin{aligned} \delta \dot{s}(t) &= A(t)\delta s(t) + q(t), \\ \delta z(t) &= H(t)\delta s(t) + \xi(t). \end{aligned} \quad (27)$$

Здесь  $\delta s(t)$  и  $\delta z(t)$  - векторы малых возмущений опорных решений, при этом  $\delta z(t)$  принято отождествлять с невязкой измерения;  $A(t)$ ,  $H(t)$  - матрицы частных производных.

Система (26) является моделью задачи, описываемой непрерывными функциями (непрерывной моделью). Также при модельной интерпретации бывает удобно прибегать к её аналогу – дискретной модели вида

$$\begin{aligned} s(t_{k+1}) &= \Phi(t_k)s(t_k) + q(t_k), \\ z(t_k) &= H(t_k)s(t_k) + \xi(t_k). \end{aligned} \quad (28)$$

Здесь  $\Phi(t_k)$  - фундаментальная матрица решений системы (26), определяемая как

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}(t_*, t_0) &= A(t_*)\Phi(t_*, t_0), \quad \Phi(t_0, t_0) = E, \\ \Phi(t_k) &= \Phi(t_{k+1}, t_k) \end{aligned}$$

Центральное место при постановке, исследовании и решении задач типа (26) занимает проблема их разрешимости, которая тесно связана с такими фундаментальными понятиями современной теории систем как управляемость и наблюдаемость [130]. Рассмотрим матрицу  $M(t_0, t)$ , где

$$\begin{aligned} M(t_0, t) &= \int_{t_0}^t \Phi^T(t_*, t_0)H^T(t_*)H(t_*)\Phi(t_*, t_0)dt_*, \\ \dot{\Phi}(t_*, t_0) &= A(t_*)\Phi(t_*, t_0), \quad \Phi(t_0, t_0) = E. \end{aligned}$$

Необходимым и достаточным условием принципиальной разрешимости задачи (28) является положительная определённость матрицы  $M(t_0, t)$ , или, учитывая вид, её не вырожденность. Задача (28), обладающая таким свойством, называется наблюдаемой в точке  $s(t_0)$ . Матрицу  $M(t_0, t)$  можно назвать матрицей наблюдаемости. Следует отметить, что это не единственная форма её представления. Кроме того, проблема разрешимости задачи (28) не ограничивается только понятием наблюдаемости.

В зависимости от требований к качеству решение задачи (28) может быть выполнено с использованием широкого спектра современных методов. Например, может быть применён фильтр Калмана, рассмотренный в пункте 2.2 и относящийся к динамическим алгоритмам, усваивающим измерительную информацию последовательно, по мере её поступления. Другим подходом является использование метода наименьших квадратов (МНК); в этом случае измерительная

информация сначала накапливается, а затем обрабатывается совместно. Во многих случаях на практике свойства решения, определяемые этой особенностью метода, являются решающими при выборе способа решения в пользу МНК.

Рассмотрим применение метода наименьших квадратов к задаче (28) подробнее. Запишем второе уравнение системы (28) с учетом решения первого с начальным условием  $s(t_0)$ . Согласно формуле Коши решение первого уравнения имеет вид:

$$s(t) = \Phi(t, t_0)s(t_0) + \int_{t_0}^t \Phi(t, \tau)q(\tau)d\tau ,$$

где  $\Phi$  - фундаментальная матрица решения, так что  $\dot{\Phi}(t_*, t_0) = A(t_*)\Phi(t_*, t_0)$ ,  $\Phi(t_0, t_0) = E$ . Имея в виду формулу Коши, запишем второе уравнение системы (28):

$$z(t) = H(t)\Phi(t, t_0)s(t_0) + \int_{t_0}^t H(t)\Phi(t, \tau)q(\tau)d\tau + \xi(t) .$$

Таким образом, если измерения  $\delta z(t)$  поступают в дискретные моменты времени  $t_k$ , то можно говорить о сведении задачи (27) к последовательности линейных уравнений вида

$$\begin{pmatrix} z(t_1) \\ z(t_2) \\ \vdots \\ z(t_m) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} H(t_1)\Phi(t_1, t_0) \\ H(t_2)\Phi(t_2, t_0) \\ \vdots \\ H(t_m)\Phi(t_m, t_0) \end{bmatrix} s(t_0) + \begin{pmatrix} \int_{t_0}^{t_1} H(t_1)\Phi(t_1, \tau)q(\tau)d\tau + \xi(t_1) \\ \int_{t_0}^{t_2} H(t_2)\Phi(t_2, \tau)q(\tau)d\tau + \xi(t_2) \\ \vdots \\ \int_{t_0}^{t_m} H(t_m)\Phi(t_m, \tau)q(\tau)d\tau + \xi(t_m) \end{pmatrix} ,$$

или, в общем виде

$$Z = \tilde{H}s + \tilde{\xi} . \quad (29)$$



Здесь  $Z$  - полный вектор измерений на интервале времени  $[t_1, t_m]$ ,  $\tilde{\xi}$  - вектор приведённых не моделируемых возмущений,  $s$  - оцениваемый вектор состояния,  $\tilde{H}$  - известный матричный коэффициент. Момент времени  $t_0$ , которому соответствует значение искомого вектора  $s$  может как принадлежать интервалу  $[t_1, t_m]$ , так и лежать вне его.

Понимая под  $\hat{s}$  оценку вектора  $s$  сформулируем критерий качества решения задачи (29) как задачи оценивания постоянного вектора  $s$  в виде следующего квадратичного критерия:

$$Q = (Z - \tilde{H}\hat{s})^T \tilde{R}^{-1} (Z - \tilde{H}\hat{s}).$$

Полагая для определённости, что  $\tilde{\xi}$  - случайный вектор с нулевым средним, примем, что  $R = M[\tilde{\xi}\tilde{\xi}^T]$  - невырожденная матрица, ( $M[*]$  - оператор математического ожидания) и поставим экстремальную задачу

$$\hat{s} = \arg \min_{\hat{s}} Q.$$

Тогда условие  $\frac{\partial Q}{\partial \hat{s}} = 0$  приводит к уравнению (взвешенный метод наименьших квадратов [120]):

$$\tilde{H}^T \tilde{R}^{-1} \tilde{H} \hat{s} = \tilde{H}^T \tilde{R}^{-1} Z, \quad (30)$$

или

$$\hat{s} = (\tilde{H}^T \tilde{R}^{-1} \tilde{H})^{-1} \tilde{H}^T \tilde{R}^{-1} Z.$$

Таким образом, можно говорить о сведении исходной динамической модели (26) к статической декларативной модели (29) с процедурной моделью (30).

Очевидно, что говорить о разрешимости задачи (29) можно говорить только в том случае, если матрица  $\tilde{H}$  - не вырождена (имеет полный ранг). Таким образом, можно говорить об  $\tilde{H}$  как об ещё одной форме представления матрицы наблюдаемости. При этом, кроме качественной оценки, на её основе можно строить различные количественные оценки разрешимости: как в форме дисперсионной

матрицы  $(\tilde{H}^T \tilde{R}^{-1} \tilde{H})^{-1}$ , так и с привлечением фундаментального понятия вычислительной линейной алгебры - числа обусловленности.

Числом обусловленности  $\mu(A)$  матрицы  $A$  называется число, которое даёт следующую оценку возмущения решения  $\Delta x$  системы линейных уравнений  $Ax = b$  при возмущениях вектора свободных членов  $\Delta b$ :

$$\frac{\|\Delta x\|}{\|x\|} \leq \mu(A) \frac{\|\Delta b\|}{\|b\|}.$$

При этом

$$\mu(A) = \max_b \frac{\|b\|}{\|x\|} \max_x \frac{\|x\|}{\|b\|} = \|A\| \|A^{-1}\|,$$

где  $\|*\|$  - какая-либо норма вектора и соответствующая ей (согласованная с ней) норма матрицы. На практике обычно пользуются евклидовой нормой вектора и согласованной с ней сингулярной нормой матрицы. В этом случае говорят о сингулярном числе обусловленности  $\mu(A) = \frac{|\sigma|_{\max}}{|\sigma|_{\min}}$ .

Одной из важнейших особенностей задач типа (26) является их решение в условиях наличия погрешностей в модельных представлениях. Особое место среди них занимают, во-первых, инструментальные погрешности измерений, и, во-вторых, погрешности вычислений, связанные с конечной точностью представления чисел в ЭВМ. Именно эти факторы обуславливают, что принципиальная разрешимость (наблюдаемость) задач типа (26) ещё не означает их реальной, конструктивной разрешимости, особенно, если иметь в виду нелинейность исходных задач и связанных с этим проблем сходимости итерационных процедур.

Разрешимость задачи в условиях неточности модельных представлений можно отождествить с понятием вычислительной устойчивости, т.е. устойчивости вычислительной процедуры оценивания в смысле корректности по Ж. Адамару. Наряду с анализом наблюдаемости, отождествляемой с существованием и

единственностью решения, анализ разрешимости как вычислительной устойчивости является важным этапом решения задач типа (26).

Простейший способ сделать вывод о вычислительной устойчивости процедуры нахождения решения задачи, к которому часто и прибегают исследователи – постановка вычислительного эксперимента. В этом случае можно говорить об апостериорном анализе. Однако, иногда возможен и предварительный, априорный анализ этого аспекта разрешимости. Он возможен, например, в случае представления задачи в виде (29).

Пусть исходная задача приведена к процедурной модели вида  $Ax = b$  (системе линейных алгебраических уравнений с невырожденной квадратной матрицей  $A$ ). Тогда в качестве достаточного условия вычислительной устойчивости решения задачи может рассматриваться следующее:

$$\mu(A) < \mu^*, \quad (31)$$

где  $\mu(A)$  - вычисленное значение числа обусловленности матрицы  $A$ ,  $\mu^*$  - некоторое критическое число. Например, при решении системы  $Ax = b$  с помощью ортогональных преобразований Хаусхолдера  $\mu^*$  определяется следующим образом [124]:

$$\mu^* = \frac{1}{(\sqrt{n}(2n-3)(4n+27)+11)\varepsilon_1},$$

где  $\varepsilon_1$  - относительная точность представления чисел в ЭВМ (например, при расширенной точности  $\varepsilon_1 \approx 10^{-20}$ ),  $n = \dim x$ .

Если условие (31) при заданном значении  $\varepsilon_1$  не выполняется, то целесообразно прибегнуть к операции масштабирования исходных переменных, то есть их преобразованию по правилу  $\tilde{x} = P^{-1}x$ , где  $P$  есть решение экстремальной задачи  $\arg \min_P \mu(AP)$ . На практике, однако, часто прибегают к следующей процедуре выбора  $P$ :

$$P = \text{diag}(p_1, p_2, \dots, p_n),$$

где  $p_i = \|a_i\|^{-1}$ ,  $a_i$  -  $i$ -й столбец матрицы  $A$ . Такое масштабирование приводит к результату по  $\mu(A)$ , отличающемуся от оптимального не более, чем в  $\sqrt{n}$  раз. При этом гарантируется устойчивость обратного перехода к исходным переменным.

С учётом вышесказанного иногда бывает целесообразен переход от процедурной модели (30) к процедурной модели вида

$$B^{-1}\tilde{H}x = B^{-1}Z, \quad (32)$$

где  $B$  такое, что  $\tilde{R} = BB^T$ , то есть  $B$  - некоторое разложение матрицы  $\tilde{R}$ , в котором, например, можно взять  $B = \tilde{R}^{1/2}$  или в качестве  $B$  использовать верхнетреугольный множитель из разложения Холесского, легко вычисляемый и обратимый. Преимущества перехода к процедурной модели (32) понятны из равенства  $\mu(\tilde{H}^T \tilde{R}^{-1} \tilde{H}) = \mu^2(B^{-1} \tilde{H})$ , хотя некоторые дополнительные усилия по вычислению матрицы  $B$  способны ограничить популярность такого типа моделей при больших размерностях  $\tilde{H}$ .

### 3.3.2 Решение задачи: модель вероятностного типа, основанная на полиномиальной экстраполяции траекторий

Предлагаемый в работе метод оценки вектора состояния задачи ((13), (14)) связан с её сведением к конечномерному виду задачи метода наименьших квадратов:

$$\begin{aligned} z_x(t_k) &= x(t_0) + \sum_{i=1}^{N_x} a_i^{(x)} (t_k - t_0)^i + \xi_x(t_k), \\ z_y(t_k) &= y(t_0) + \sum_{i=1}^{N_y} a_i^{(y)} (t_k - t_0)^i + \xi_y(t_k), \end{aligned} \quad (33)$$

$$k = \overline{1, m}.$$

Здесь  $x(t_0)$ ,  $y(t_0)$  - декартовы координаты наблюдаемого объекта в момент времени  $t_0$ ,  $\xi_x(t_k)$ ,  $\xi_y(t_k)$  - случайные инструментальные ошибки измерений,  $N_x$ ,  $N_y$  -

порядок полинома, применяемого при описании эволюции координат,  $a_i^{(x)}$ ,  $a_i^{(y)}$  - полиномиальные коэффициенты, отождествляемые со скоростями объекта и приведёнными значениями старших производных,  $m$  - количество измерений, участвующих в оценке. Таким образом, задача имеет вид (29).

Представление исходной задачи ((13), (14)) в виде (29) и применение метода наименьших квадратов даёт возможность достаточно просто определить функцию плотности распределения вероятности координат объекта  $f(x, y)$  (см. пункт 3.2.1). Так, можно показать, что в этом случае  $f(x, y)$  близка к плотности двумерного нормального распределения со средним  $(x(t_0), y(t_0))^T$  и дисперсиями  $\sigma_x^2(t_0)$ ,  $\sigma_y^2(t_0)$ ,  $\sigma_{xy}^2(t_0)$ , соответствующими дисперсионной матрице задачи (29)  $(\tilde{H}^T \tilde{R}^{-1} \tilde{H})^{-1}$ .

Будем разделять наблюдаемые объекты на два класса: движущиеся прямолинейно и равномерно, для описания которых будем пользоваться моделью (33) при  $N_x = 1$ ,  $N_y = 1$  и маневрирующие, траекторию которых опишем моделью (33) при  $N_x = 2$ ,  $N_y = 2$ . В рамках решения задачи ((13), (14)) предлагается следующий алгоритм выделения маневрирующих объектов. Пусть  $\hat{a}_x$ ,  $\hat{a}_y$  и  $\sigma_{a_x}^2$ ,  $\sigma_{a_y}^2$  - значения оценок ускорений объекта и их дисперсий, вычисленные в рамках модели (33). Тогда вероятность того, что нулевые значения ускорений  $a_x$ ,  $a_y$  не входят в область их вероятных значений могут быть определены формулами:

$$P(a_x \neq 0) = \int_0^{2|\hat{a}_x|} f_{a_x}(\tau) d\tau, \quad P(a_y \neq 0) = \int_0^{2|\hat{a}_y|} f_{a_y}(\tau) d\tau, \quad (34)$$

где  $f_{a_x}(\tau)$ ,  $f_{a_y}(\tau)$  - функции плотностей нормального распределения со средними  $|\hat{a}_x|$ ,  $|\hat{a}_y|$  и дисперсиями  $\sigma_{a_x}^2$ ,  $\sigma_{a_y}^2$ . Решение о том, что объект является маневрирующим, принимается в том случае, если значение

$\max[P(a_x \neq 0), P(a_y \neq 0)]$  превышает некоторый порог. В противном случае принимается решение о неопределённой ситуации.

Имея в виду модельные представления ((15)-(20)), определим следующие вербальные уровни опасности для объекта. Под ситуацией с уровнем опасности «красная тревога» (RED) будем понимать ситуацию, когда возникновение опасности возможно без изменения текущих курса и скорости движения. Ситуацией с уровнем опасности «желтая тревога» (YELLOW) назовём ситуацию, когда возникновение опасности имеет место при маневрировании судна. Наконец, уровнем «отсутствие тревоги» (GREEN) будем называть случай, когда возникновение опасности маловероятно при любом типе движения.

Рассмотрим задачу «судно-берег» (см. пункт 3.2.1). Введём величины  $P_1^c$ ,  $P_2^c$ , определяемые в зависимости от типа объекта:

$$P_1^c = \min_{T_1} P(t),$$

- для объектов, движущихся прямолинейно и равномерно, и

$$P_2^c = \min_{T_2} P(t),$$

- для маневрирующих объектов. Здесь  $T_1, T_2$  - время прогнозирования траектории для модели соответствующего порядка,  $P(t)$  - вероятность безопасной ситуации, определяемая как (15), (16) или (17).

В соответствии с описанными модельными представлениями предлагается следующая дискретная система правил соотнесения уровней опасности с вычисленными значениями вероятностей  $P_1^c$  и  $P_2^c$  (таблица 9).

Здесь  $p^*$  - некоторый порог безопасности, с которым сравниваются значения  $P_1^c, P_2^c$ ;  $d$  - значения детектора маневра, причём  $d = 1$ , если манёвр зафиксирован и  $d = 0$  в случае неопределённой ситуации; «GREEN», «YELLOW», «RED» - соответствующие вербальные значения уровня опасности.

Таблица 9 - Система правил определения уровня опасности для случая «судно-берег»

№ п/п	$P_1^c < p^*$	$P_2^c < p^*$	$d$	GREEN	YELLOW	RED
1	+	+	1		+	
2	+	+	0			+
3	+	-	1	+		
4	+	-	0			+
5	-	+	1		+	
6	-	+	0		+	
7	-	-	1	+		
8	-	-	0	+		

Перейдём к задаче «судно-судно». Аналогично случаю «судно-берег» введём величины

$$P_1^S = \min_{T_1} P(t),$$

- для объектов, движущихся прямолинейно и равномерно, и

$$P_2^S = \min_{T_2} P(t),$$

- для маневрирующих объектов. Здесь  $T_1, T_2$  - время прогнозирования траектории для модели соответствующего порядка,  $P(t)$  - вероятность безопасной ситуации, определяемая как (18), (19) или (20).

Как и для предыдущего случая, зададим систему правил соотнесения уровней опасности с вычисленными значениями вероятностей  $P_1^S$  и  $P_2^S$  (таблица 10). Здесь  $p^*$  - некоторый порог безопасности, с которым сравниваются значения  $P_1^S, P_2^S$ ;  $d_1$  и  $d_2$  - значения детектора маневра для первого и второго судна,  $d_1 \vee d_2$  - результат логического сложения этих значений; «GREEN», «YELLOW», «RED» - вербальные значения уровня опасности.

Подводя итог описанию концепции решения рассматриваемой задачи предупреждения об опасном сближении судов в рамках модельных представлений (13) – (20), кратко сформулируем основные этапы алгоритма её решения.

1. Формирование вектора измерений координат  $Z$  для каждого из наблюдаемых объектов;
2. Оценка векторов состояния объектов в рамках модельных представлений (33) при  $N_x = 1, N_y = 1$  и при  $N_x = 2, N_y = 2$ . Определение характеристик случайных погрешностей оценивания координат объектов.
3. Принятие решения об отнесении объекта к классу маневрирующих.
4. Решение задачи прогнозирования опасной ситуации «судно-берег» и «судно-судно» (определение величин  $P_1^c, P_2^c$  и  $P_1^s, P_2^s$  при заданных интервалах прогнозирования  $T_1, T_2$  и соотнесение их с системой правил таблиц 7 и 8 при заданных значениях порогов  $p_*$ ).
5. Выдача соответствующего сигнала тревоги.

Таблица 10 - Система правил определения уровня опасности для случая «судно-судно»

№ п/п	$P_1^s < p_*$	$P_2^s < p_*$	$d_1 \vee d_2$	GREEN	YELLOW	RED
1	+	+	1		+	
2	+	+	0			+
3	+	-	1	+		
4	+	-	0			+
5	-	+	1		+	
6	-	+	0		+	
7	-	-	1	+		
8	-	-	0	+		

На практике определение в условиях внешнего наблюдения по конкретному судну (двум судам) уровня «GREEN» означает, что его движение не представляет опасности; уровня «YELLOW» означает, что опасная ситуация возможна, но при этом судно (суда) маневрирует, то есть судоводитель, скорее всего, сам контролирует ситуацию и старается придать движению безопасный характер; уровня «RED» - движение судна (судов) ведёт к опасности и необходимо начать манёвр уклонения.



### 3.3.3 Решение задачи: детерминированная модель, основанная на геометрической интерпретации относительного движения судов

Предлагаемый в работе метод решения задачи ((21), (22)) связан с её линейризацией и сведением к конечномерному виду задачи метода наименьших квадратов:

$$\begin{aligned}
 \delta z_{rx}(t_k) = & \delta r_x(t) + \\
 & + \frac{1}{w_v} [\cos(\eta_v(t) + (t_k - t)w_v) - \cos(\eta_v(t))] \delta v(t) + \\
 & + \frac{v}{w_v} [-\sin(\eta_v(t) + (t_k - t)w_v) + \sin(\eta_v(t))] \delta \eta_v(t) + \\
 & + \left[ -\frac{v}{w_v^2} [\cos(\eta_v(t) + (t_k - t)w_v) - \cos(\eta_v(t))] + \right. \\
 & \left. + \frac{(t_k - t)v}{w_v} (\sin(\eta_v(t) + (t_k - t)w_v)) \right] \delta w_v(t) + \\
 & \xi_{rx}(t_k),
 \end{aligned} \tag{35}$$

$$\begin{aligned}
 \delta z_{ry}(t_k) = & \delta r_y(t) - \\
 & - \frac{1}{w_v} [\sin(\eta_v(t) + (t_k - t)w_v) - \sin(\eta_v(t))] \delta v(t) + \\
 & + \frac{v}{w_v} [\cos(\eta_v(t) + (t_k - t)w_v) - \cos(\eta_v(t))] \delta \eta_v(t) + \\
 & + \left[ \frac{v}{w_v^2} [\sin(\eta_v(t) + (t_k - t)w_v) - \sin(\eta_v(t))] + \right. \\
 & \left. + \frac{(t_k - t)v}{w_v} (\cos(\eta_v(t) + (t_k - t)w_v)) \right] \delta w_v(t) + \\
 & \xi_{ry}(t_k), \quad k = \overline{1, N}.
 \end{aligned}$$

Здесь  $\delta r_x(t), \delta r_y(t), \delta v(t), \delta \eta_v(t), \delta w_v(t)$  - величины невязок относительно некоторого опорного решения системы ((21), (22)) (то есть погрешности априорных представлений о состоянии системы), образующие вектор  $\delta s(t)$ .

При нахождении вектора  $\hat{s}(t)$  необходимо учитывать, что соответствующая система линейных уравнений (35) становится вырожденной при значениях  $v=0$  и/или  $w_v=0$ . Это приводит к тому, что не гарантируется устойчивость сходимости итерационной процедуры оценивания типа  $\hat{s}_{i+1}(t) = \hat{s}_i(t) + \delta\hat{s}_i(t)$  для произвольных  $\hat{s}_0(t)$ . Для преодоления этого ограничения достаточно организовать вычислительный процесс для нескольких различных первоначальных опорных значений  $\hat{s}_0(t)$  с последующим выбором корректного  $\hat{s}(t)$ .

Введём следующие вербальные уровни опасности ситуации. Уровень опасности SAFE (минимальный) соответствует безопасной ситуации; уровень опасности LOW (почти безопасный) – ситуации, когда суда могут сблизиться, если прекратят маневрирование; уровень MEDIUM (средняя степень опасности) – ситуации, когда суда могут сблизиться, если продолжат маневрирование; уровень DANGEROUS (максимальный) – ситуации, когда суда сблизятся, если не начнут манёвр уклонения. В данном случае уровень SAFE соответствует уровню GREEN таблицы 10, уровни LOW и MEDIUM – уровню YELLOW таблицы 10, уровень DANGEROUS – уровню RED таблицы 10.

Имея в виду модельные представления ((23)-(25)), зададим систему правил соотнесения уровней опасности с условиями (23), (24) и (25) (таблица 11).

Таблица 11. Система правил определения уровня опасности в модели (21), (22): основной (четырёхуровневый) случай

№ п/п	(23)	(24)	(25)	SAFE	LOW	MEDIUM	DANGEROUS
1	+	+	+				+
2	+	+	-	+			
3	+	-	+		+		
4	+	-	-	+			
5	-	+	+			+	
6	-	+	-	+			
7	-	-	+	+			
8	-	-	-	+			

Основной проблемой при практической реализации рассмотренной модели является необходимость оценки угловых скоростей, входящих в правило (24). При больших расстояниях между судами эта оценка неустойчива в условиях инструментальных погрешностей измерений, что не даёт возможности надёжно распознавать опасно сближающиеся суда заблаговременно. Одним из путей решения этой проблемы является упрощённая интерпретация правила (24) – замена его детектором маневра. Функция – детектор маневра может быть построена множеством известных способов (см. например, [107, 146, 162]), в том числе – рассмотренными в настоящей работе (см. пункт 2.3 и пункт 3.3.2). В этом случае вместо правила (24) будем иметь:

$$d = 0, \quad (36)$$

где  $d$  - значение детектора маневра, причём  $d = 1$ , если манёвр зафиксирован и  $d = 0$  в случае неопределённой ситуации. Имея в виду вербальные уровни опасности GREEN, YELLOW и RED, введённые в пункте 3.3.2, зададим систему правил соотнесения уровней опасности с условиями (23), (36) и (25) (таблица 12).

Таблица 12. Система правил определения уровня опасности в модели (21), (22): упрощённый (трёхуровневый) случай

№ п/п	(23)	(36)	(25)	GREEN	YELLOW	RED
1	+	+	+			+
2	+	+	-	+		
3	+	-	+		+	
4	+	-	-	+		
5	-	+	+	+		
6	-	+	-	+		
7	-	-	+	+		
8	-	-	-	+		

Подводя итог описанию концепции решения рассматриваемой задачи предупреждения об опасном сближении судов в рамках модельных представлений (21) - (25), кратко сформулируем основные этапы алгоритма её решения.

1. Формирование вектора измерений координат  $Z$  для каждого из наблюдаемых объектов;
2. Выбор опорного решения и линеаризация модели задачи со сведением её к виду (35). Нахождение вектора  $\hat{s}(t) = (\hat{r}_x(t), \hat{r}_y(t), \hat{v}(t), \hat{\eta}_v(t), \hat{w}_v(t))^T$ .
3. Оценка истинности условий (23), (24), (25) и (36) при заданном пороговом значении времени  $T^*$  и соотнесение их с системой правил таблиц 11 и 12.
4. Выдача соответствующего сигнала тревоги.

### 3.3.4 Фаззификация задачи

#### 3.3.4.1 Мотивы разработки нечеткой модели задачи

Методы, описанные в п.п. 3.3.2 и 3.3.3 в принципе позволяют решить задачу предупреждения об опасном сближении судов, выделив при этом различные дискретные уровни опасности (от 3 до 4 уровней). Рассмотренные методы при их практической реализации подразумевают «настройку» путём подбора значений ряда параметров. Так, в вероятностной модели, основанной на полиномиальной экстраполяции траекторий (15) – (20), такими параметрами являются:

- Размеры статических корабельных доменов  $R_i^\square$  и  $R_i^\circ$ .
- Пороговое значение вероятности безопасной ситуации  $p^*$ .
- Пороговое значение  $\max[P(a_x \neq 0), P(a_y \neq 0)]$  для определения вероятности маневрирования объекта (детектора маневра).

В детерминированной модели, основанной на геометрической интерпретации относительного движения судов (23) – (25), такими параметрами являются:

- Размеры статических корабельных доменов  $R_i^\circ$ .
- Величина порогового значения интервала времени  $T^*$ .
- Параметры детектора маневра в условии (36).

Небольшой набор настраиваемых параметров упрощает конфигурирование системы принятия решений при её реализации на практике. Одновременно с этим, малое число настраиваемых параметров в сочетании с дискретностью набора уровней опасности таблиц 9-12 делает систему чересчур «грубой» для сложной навигационной обстановки. А именно – не даёт возможности учитывать особенности судоходства на конкретной акватории, имея в виду разнообразие возможных навигационных ситуаций. Это обусловлено как фундаментальными свойствами моделей, так и неочевидной природой их параметров. Если размеры корабельных доменов  $R_i^{\square}$  и  $R_i^{\circ}$  - интуитивно понятные величины, то значения остальных настраиваемых параметров выбираются исключительно экспертным путём по результатам моделирования задачи и их восприятие специалистами-практиками затруднено. Кроме того, при высокой плотности и интенсивности движения возможны ситуации одновременной генерации большого количества тревог одинакового уровня (например, DANGEROUS или RED). Всё это способно существенно затруднить принятие решений операторами СУДС.

В связи с этим как теоретический, так и прикладной интерес представляет возможность построения системы предупреждения об опасном сближении судов, характеризующейся следующими свойствами:

- Представление уровня опасности не дискретной, а непрерывной величиной.
- Интуитивно понятная специалистам-практикам интерпретация значений настраиваемых параметров системы.
- Настройка параметров системы, способная учесть особенности движения и характерную навигационную обстановку конкретной акватории.

Перспективным подходом, позволяющим построить такую модель предупреждения об опасном сближении, является обращение к идеям систем нечеткой логики. Его сущность состоит в интерпретации ряда параметров модели лингвистическими переменными с соответствующим набором термов и замена детерминированных (четких) систем правил при принятии решений нечеткими (то есть фаззификация) [150, 151, 223].

Переходя к описанию фаззификации задачи предупреждения об опасном сближении судов, отметим, что здесь ограничимся рассмотрением нечеткого «расширения» (доопределения) детерминированной модели, основанной на геометрической интерпретации относительного движения (23) - (25). При этом будем иметь в виду, что для вероятностной модели, основанной на полиномиальной экстраполяции траекторий (15) – (20) аналогичная интерпретация нечеткой моделью также возможна.

Рассмотрим условие (23). Пусть  $A = \frac{|\eta_v - \eta_r|}{\theta}$  - оцененное отношение величины  $|\eta_v - \eta_r|$  к значению  $\theta$ . Введем лингвистическую переменную  $P_A$  «оценка отношения  $A$ » с термами «большое» и «малое» и функциями принадлежности типа «дополнение», определёнными на универсальном множестве  $A \in [0,2]$ :

$$\begin{aligned} \mu_{\text{малое}}(A) &= 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a_A(A - c_A))}, \\ \mu_{\text{большое}}(A) &= \frac{1}{1 + \exp(-a_A(A - c_A))}. \end{aligned} \quad (37)$$

Здесь параметры  $a_A$  и  $c_A$  - настраиваемые. В случае, если движение судов происходит прямолинейно и равномерно, терм «малое» соответствует ситуации, когда возможно опасное сближение судов, а терм «большое» соответствует безопасной ситуации.

Рассмотрим условие (24). Пусть  $B = \frac{|w_v - w_r|}{\dot{\theta}}$  - оцененное отношение величины  $|w_v - w_r|$  к значению  $\dot{\theta}$ . Введем лингвистическую переменную  $P_B$  «оценка отношения  $B$ » с термами «большое» и «малое» и функциями принадлежности типа «дополнение», определёнными на универсальном множестве  $B \in [0,2]$ :

$$\lambda_{\text{малое}}(B) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a_B(B - c_B))},$$

$$\lambda_{\text{большое}}(B) = \frac{1}{1 + \exp(-a_B(B - c_B))}.$$
(38)

Здесь параметры  $a_B$  и  $c_B$  - настраиваемые. В данном случае величина  $B$  и термы «малое» и «большое» характеризуют интенсивность маневрирования.

Рассмотрим условие (25). Для описания величины  $T$  (приблизённое время, оставшееся до максимального сближения судов) введем лингвистическую переменную  $P_T$  «оценка величины  $T$ » с термами «малое», «среднее» и «большое» и функциями принадлежности типа «кластер», определенными на универсальном множестве  $T \in [0, 2000]$  секунд:

$$v_{\text{малое}}(T) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a_T^{(1)}(T - c_T^{(1)}))},$$

$$v_{\text{среднее}}(T) = \exp\left(-\frac{(T - c_T^{(2)})^2}{a_T^{(2)}}\right),$$

$$v_{\text{большое}}(T) = \frac{1}{1 + \exp(-a_T^{(3)}(T - c_T^{(3)}))}.$$
(39)

Здесь параметры  $a_T^{(1)}$ ,  $a_T^{(2)}$ ,  $a_T^{(3)}$  и  $c_T^{(1)}$ ,  $c_T^{(2)}$ ,  $c_T^{(3)}$  - настраиваемые. Описание лингвистической переменной  $P_T$  тремя термами соответствует трем принятым на практике состояниям времени максимального сближения [112, 113]. Терм «малое» определяет время, когда существует возможность принять только одно решение, которое поможет избежать столкновения. Терм «среднее» - время, которое требуется для грамотного проведения оптимального маневра, т.е. время, когда начинать маневр уже не рано, но еще есть время «исправить» результат ошибочного маневрирования, есть время на «вторую попытку»; это период, когда критическая ситуация пока ещё не возникла. Терм «большое» описывает время, когда ещё нет никакого смысла предпринимать какие-либо действия, так как

ситуация может измениться и это потребует, возможно, исполнения совсем другого маневра.

### 3.3.4.2 Система типа Сугено (основной случай)

Рассмотрим интерпретацию системы правил таблицы 11 системой правил машины нечеткого вывода типа Сугено (посылки – нечеткие, выводы – чёткие). Введём величину  $u \in [0,3]$  - уровень опасности ситуации «судно-судно». Пусть значение  $u = 0$  соответствует безопасной ситуации,  $u = 1$  – ситуации, когда суда могут сблизиться, если продолжат маневрирование,  $u = 2$  - ситуации, когда суда могут сблизиться, если прекратят маневрирование,  $u = 3$  - ситуации, когда суда сблизятся, если не начнут манёвр уклонения. Имея в виду систему правил таблицы 11, значение  $u = 0$  соответствует уровню опасности SAFE, значение  $u = 1$  - уровню опасности LOW, значение  $u = 2$  - уровню опасности MEDIUM, значение  $u = 3$  - уровню опасности DANGEROUS. Пусть переменные  $P_A$ ,  $P_B$  и  $P_T$  обрабатываются машиной нечеткого вывода Сугено, на вход которой подаются величины  $A$ ,  $B$  и  $T$ , а на выходе формируется числовое значение  $u \in [0,3]$  - уровень опасности навигационной ситуации «судно-судно». Машина нечеткого вывода работает согласно системе правил, представленной в таблице 13.

Работу нечеткой системы распознавания опасного сближения судов можно, таким образом, окончательно представить схемой, показанной на рисунке 31. Здесь  $A$ ,  $B$  и  $T$  - величины, характеризующие свойства относительного движения двух судов (вход); если  $A > 2$ , то этот вход принимается равным 2, если  $B > 2$ , то, аналогично, этот вход принимается равным 2; если  $T > 2000$ , то этот вход принимается равным 2000 секунд. Величина  $u$  (выход) – определенный системой Сугено  $S$  уровень опасности ситуации.

Для повышения устойчивости работы системы (фильтрации случайных выбросов) на практике рекомендуется выбирать минимальное  $u$  из двух,



определённых в соседние моменты времени. Настройка описанной системы состоит в задании параметров функций принадлежности (37) – (39).

Таблица 13 - Система правил машины нечеткого вывода Сугено для оценки уровня опасности «судно-судно»

	$P_A$	$P_B$	$P_T$	$u$
1	большое	большое	большое	0
2	большое	большое	среднее	0
3	большое	большое	малое	0
4	большое	малое	большое	0
5	большое	малое	среднее	1
6	большое	малое	малое	2
7	малое	большое	большое	0
8	малое	большое	среднее	1
9	малое	большое	малое	1
10	малое	малое	большое	0
11	малое	малое	среднее	2
12	малое	малое	малое	3

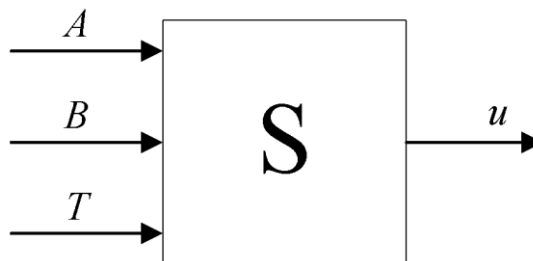


Рисунок 31 - Схема работы нечеткой системы распознавания опасного сближения судов, основанной на машине нечеткого вывода Сугено

### 3.3.4.3 Система типа Мамдани (основной случай)

Рассмотрим интерпретацию системы правил таблицы 11 системой правил машины нечеткого вывода типа Мамдани (посылки и выводы – нечеткие). Имея в виду введенную ранее величину  $u \in [0,3]$  - уровень опасности ситуации «судно-

судно», введём лингвистическую переменную  $P_u$  «уровень опасности» с термами «безопасная», «почти безопасная», «опасная» и «очень опасная» и функциями принадлежности типа «кластер», определенными на универсальном множестве  $u \in [0,3]$ :

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{безопасная}}(u) &= 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a_u^{(1)}(u - c_u^{(1)}))}, \\ \gamma_{\text{почти безопасная}}(u) &= \exp\left(-\frac{(u - c_u^{(2)})^2}{a_u^{(2)}}\right), \\ \gamma_{\text{опасная}}(u) &= \exp\left(-\frac{(u - c_u^{(3)})^2}{a_u^{(3)}}\right), \\ \gamma_{\text{очень опасная}}(u) &= \frac{1}{1 + \exp(-a_u^{(4)}(u - c_u^{(4)}))}. \end{aligned} \quad (40)$$

Пусть переменные  $P_A$ ,  $P_B$  и  $P_T$  обрабатываются машиной нечеткого вывода Мамдани, на вход которой подаются величины  $A$ ,  $B$  и  $T$ , а на выходе формируется числовое значение  $u \in [0,3]$  - уровень опасности навигационной ситуации «судно-судно» (рисунок 32); значение  $u = 0$  соответствует наименьшему уровню опасности,  $u = 3$  - наибольшему. Если  $A > 2$ , то этот вход принимается равным 2, если  $B > 2$ , то, аналогично, этот вход принимается равным 2; если  $T > 2000$ , то этот вход принимается равным 2000 секунд. Машина нечеткого вывода работает согласно системе правил, представленной в таблице 14.

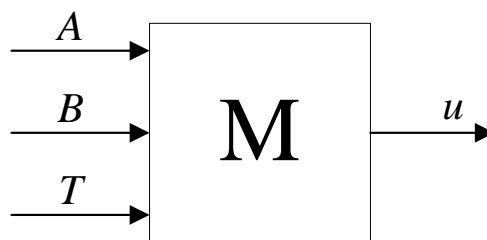


Рисунок 32 - Схема работы нечеткой системы распознавания опасного сближения судов, основанной на машине нечеткого вывода Мамдани

Так, правила 5 и 6 таблицы 14 соответствуют ситуации, когда суда могут недопустимо сблизиться, если продолжат маневрирование. Правила 8 и 9 – ситуации, когда суда могут недопустимо сблизиться, если прекратят маневрирование. Правила 11 и 12 – если не начнут маневр уклонения.

Настройка описанной системы состоит в задании параметров функций принадлежности (37) – (40).

Таблица 14 - Система правил машины нечеткого вывода Мамдани для оценки уровня опасности «судно-судно»

	$P_A$	$P_B$	$P_T$	$P_u$
1	большое	большое	большое	безопасная
2	большое	большое	среднее	безопасная
3	большое	большое	малое	безопасная
4	большое	малое	большое	безопасная
5	большое	малое	среднее	почти безопасная
6	большое	малое	малое	опасная
7	малое	большое	большое	безопасная
8	малое	большое	среднее	почти безопасная
9	малое	большое	малое	почти безопасная
10	малое	малое	большое	безопасная
11	малое	малое	среднее	опасная
12	малое	малое	малое	очень опасная

#### 3.3.4.4 Нейро-нечёткая система (основной случай)

Рассмотрим модельную интерпретацию системы правил таблицы 12, основанную на элементной базе искусственных нейронных сетей.

Если при этом моделируется машина нечеткого вывода (в нашем случае – типа Сугено), то такую модель принято называть нейро-нечеткой системой (нейро-нечеткой сетью). В рассматриваемой задаче нейро-нечеткая сеть имеет три входа и состоит из пяти слоёв (рисунок 33).

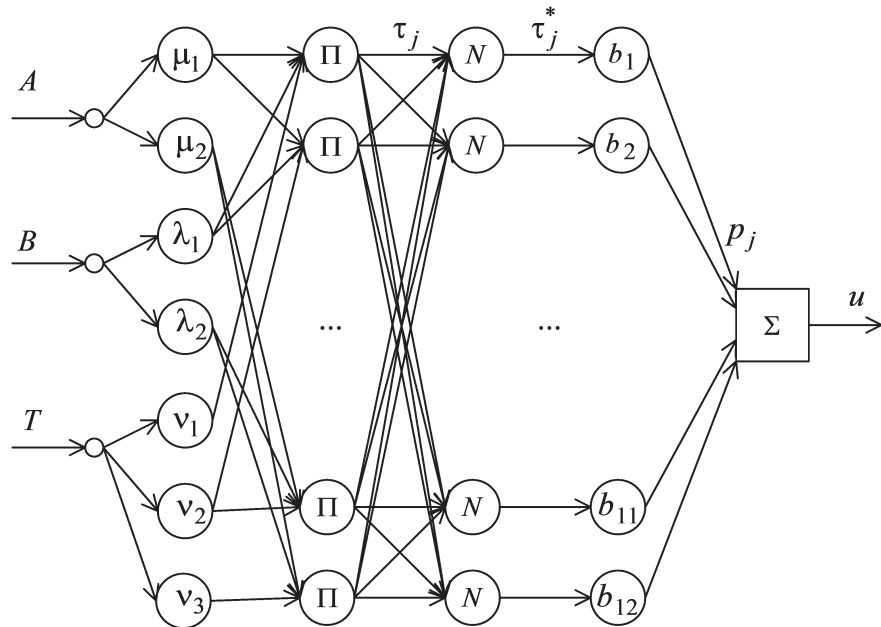


Рисунок 33 - Схема нейро-нечеткой сети, определяющей уровень опасности навигационной ситуации «судно-судно»

В узлах первого слоя  $\mu_1, \mu_2, \lambda_1, \lambda_2, v_1, v_2, v_3$  вычисляются значения функции принадлежности  $\mu_{\text{большое}}, \mu_{\text{малое}}, \lambda_{\text{большое}}, \lambda_{\text{малое}}, v_{\text{большое}}, v_{\text{среднее}}, v_{\text{малое}}$  соответственно. Узлы  $\Pi$  второго слоя (всего 12 узлов) соответствуют посылкам 12 возможных нечетких правил (таблица 13), комбинирующих все возможные значения величин  $P_A, P_B$  и  $P_T$ .

Каждый узел второго слоя соединен с теми узлами первого слоя, которые формируют посылки соответствующего правила. Выходом каждого узла второго слоя является степень выполнения  $j$ -го правила  $\tau_j$ , которая рассчитывается как произведение входных сигналов. Узлы  $N$  третьего слоя рассчитывают относительную степень выполнения каждого нечеткого правила по формуле

$$\tau_j^* = \frac{\tau_j}{\sum_{k=1}^{12} \tau_k}.$$

Узлы  $b_1, b_2, \dots, b_{12}$  четвертого слоя формируют заключения нечетких правил; фактически  $b_j$  - это значения выхода сети при однозначном выполнении только  $j$ -го правила. Каждый узел соединен с одним узлом третьего слоя и рассчитывает вклад одного нечеткого правила в выход сети по формуле  $p_j = b_j \tau_j^*$ .

Единственный узел пятого слоя агрегирует результат, полученный по разным правилам, суммируя вклады всех правил  $u = \sum_{k=1}^{12} p_j$ .

Обучение нейро-нечеткой сети (рисунок 33) состоит в настройке параметров функций принадлежности (37) – (39) и коэффициентов  $b_1, b_2, \dots, b_{12}$  узлов четвертого слоя. Обучение может быть проведено с применением трёх различных стратегий.

*Стратегия 1.* Обучение полностью экспертным способом. В этом случае все коэффициенты назначаются экспертом.

*Стратегия 2.* Обучение на обучающей выборке с экспертным формированием заключений нечетких правил. В этом случае коэффициенты  $b_j$  назначаются экспертом, а параметры функций принадлежности определяются настройкой системы на обучающей выборке.

*Стратегия 3.* Обучение полностью на обучающей выборке. В этом случае все коэффициенты системы определяются настройкой на обучающей выборке.

Обучающая выборка формируется следующим образом. Моделируется решение задачи с оценкой условий (23) – (25) на различных траекториях. При безопасном движении считается, что выход системы  $u = 0$ . В том случае, если суда опасно сближаются при прекращении маневрирования в текущий момент, то  $u = 1$  («почти безопасная» ситуация); если суда недопустимо сближаются при продолжении маневрирования, то  $u = 2$  («опасная» ситуация); если суда сближаются при прямолинейном и равномерном движении, то  $u = 3$  («очень опасная» ситуация). Накапливая данные для различных траекторий и скоростей движения судов, формируют общую обучающую выборку «вход-выход», на базе

которой обучают сеть (рисунок 33), пользуясь известными методами обучения сетей такого типа [114].

### 3.3.4.5 Система типа Сугено (двухуровневый случай)

Аналогично четкой модели, описанной в п. 3.3.3, нечеткие модели п.п. 3.3.4.2, 3.3.4.3 и 3.3.4.4 связаны с оценкой угловых скоростей, входящих в правило (24). При больших расстояниях между судами эта оценка неустойчива в условиях инструментальных погрешностей измерений, что не даёт возможности надёжно распознавать опасно сближающиеся суда заблаговременно. Одним из путей решения этой проблемы является упрощённая интерпретация правила (24) – замена его детектором маневра. Для рассматриваемого нечеткого случая наиболее естественную интерпретацию детектора маневра даёт модель, рассмотренная в главе 2 настоящей работы.

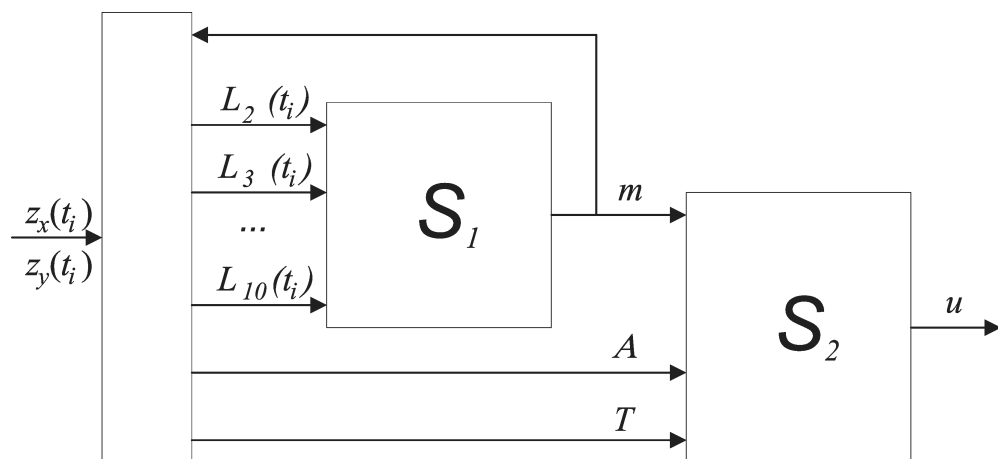


Рисунок 34 - Схема работы нечеткой системы распознавания опасного сближения судов, основанной на машине нечеткого вывода Сугено (двухуровневый случай)

Пусть для детекции маневра используется система типа Сугено (см. п. 2.3.1). В этом случае будем иметь следующую схему работы нечеткой системы распознавания опасного сближения судов (рисунок 34). Здесь  $S_1$  - система типа

Сугено, на выходе которой формируется число  $m \in [1,10]$  - степень интенсивности маневрирования судов (см. п. 2.3.1),  $S_2$ - система типа Сугено, на выходе которой формируется число  $u \in [0,3]$  - уровень опасности ситуации «судно-судно» (см. п. 3.3.4.2).

Введём лингвистическую переменную  $P_m$  «характер движения судна» с терминами «Маневренное» и «Равномерное». Пусть термы имеют следующие функции принадлежности типа «дополнение», определённые на универсальном множестве  $m \in [1,10]$ :

$$\begin{aligned}\omega_{\text{маневренное}}(m) &= 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a_m(m - c_m))}, \\ \omega_{\text{равномерное}}(m) &= \frac{1}{1 + \exp(-a_m(m - c_m))},\end{aligned}\quad (41)$$

где  $a_m; c_m$  – настраиваемые параметры.

Система  $S_2$ , (рисунок 34) работает согласно системе правил таблицы 15.

Таблица 15 - Система правил машины нечеткого вывода Сугено для оценки уровня опасности «судно-судно» (двухуровневый случай)

	$P_A$	$P_m$	$P_T$	$u$
1	большое	маневренное	большое	0
2	большое	маневренное	среднее	0
3	большое	маневренное	малое	0
4	большое	равномерное	большое	0
5	большое	равномерное	среднее	1
6	большое	равномерное	малое	2
7	малое	маневренное	большое	0
8	малое	маневренное	среднее	1
9	малое	маневренное	малое	1
10	малое	равномерное	большое	0
11	малое	равномерное	среднее	2
12	малое	равномерное	малое	3

В данном случае правила и значения  $u$  аналогичны соответствующим правилам и значениям таблицы 13 п. 3.3.4.2.

### 3.3.4.6 Система типа Мамдани (двухуровневый случай)

Система типа Мамдани, рассмотренная в п. 3.3.4.3 также может быть интерпретирована для случая с детектором манёвра. В этом случае будем иметь следующую схему работы нечеткой системы распознавания опасного сближения судов (рисунок 35). Здесь  $S_1$  - система типа Сугено, на выходе которой формируется число  $m \in [1,10]$  - степень интенсивности маневрирования судов (см. п. 2.3.1),  $M_2$  - система типа Мамдани, на выходе которой формируется число  $u \in [0,3]$  - уровень опасности ситуации «судно-судно» (см. п. 3.3.4.3).

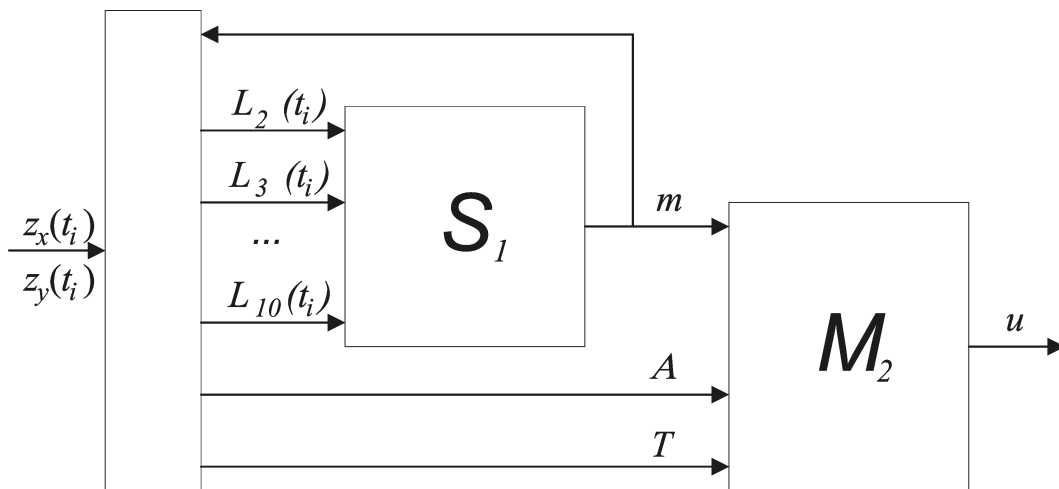


Рисунок 35 - Схема работы нечеткой системы распознавания опасного сближения судов, основанной на машине нечеткого вывода Мамдани (двухуровневый случай)

Имея в виду лингвистическую переменную  $P_m$  «характер движения судна» с функциями принадлежности (41), система  $M_2$  работает согласно системе правил таблицы 16.



Таблица 16 - Система правил машины нечеткого вывода Мамдани для оценки уровня опасности «судно-судно» (двухуровневый случай)

	$P_A$	$P_m$	$P_T$	$P_u$
1	большое	маневренное	большое	безопасная
2	большое	маневренное	среднее	безопасная
3	большое	маневренное	малое	безопасная
4	большое	равномерное	большое	безопасная
5	большое	равномерное	среднее	почти безопасная
6	большое	равномерное	малое	опасная
7	малое	маневренное	большое	безопасная
8	малое	маневренное	среднее	почти безопасная
9	малое	маневренное	малое	почти безопасная
10	малое	равномерное	большое	безопасная
11	малое	равномерное	среднее	опасная
12	малое	равномерное	малое	очень опасная

В данном случае правила и значения  $P_u$  аналогичны соответствующим правилам и значениям таблицы 14 п. 3.3.4.3.

### 3.3.4.7 Нейро-нечеткая система (двухуровневый случай)

Как и в случае, рассмотренном в п. 3.3.4.4, возможна модельная интерпретация системы правил таблицы 15, основанная на элементной базе искусственных нейронных сетей, т.е. нейро-нечеткой системой. В этом случае будет иметь место конфигурация нейро-нечеткой сети, аналогичная п. 3.3.4.4 и показанная на рисунке 36. Здесь  $S_1$  - система типа Сугено, на выходе которой формируется число  $m \in [1,10]$  - степень интенсивности маневрирования судов (см. п. 2.3.1).

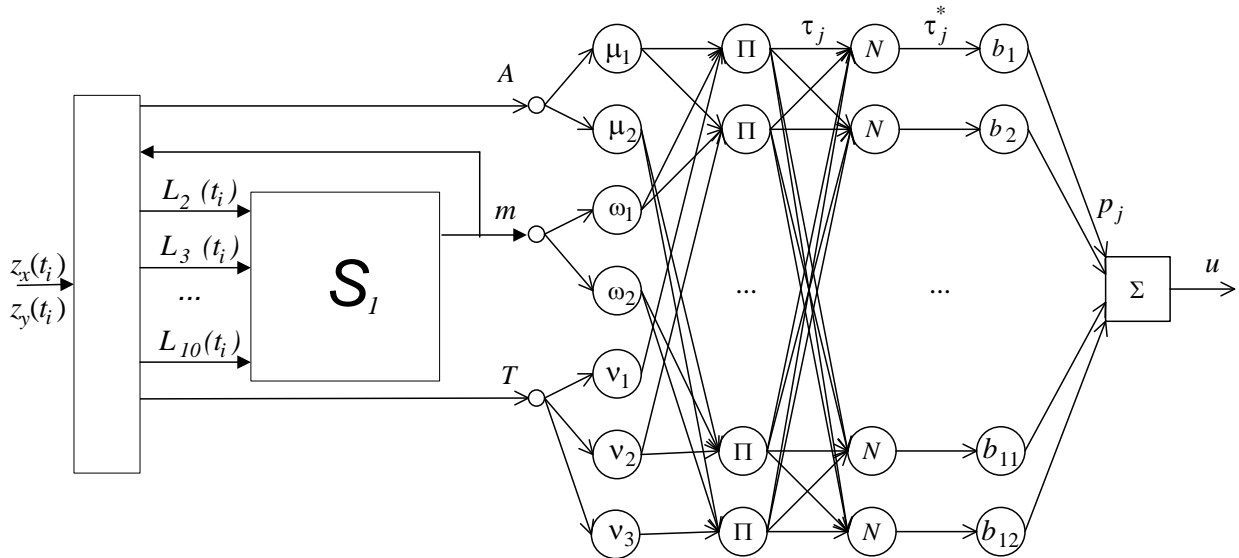


Рисунок 36 - Схема нейро-нечеткой сети, определяющей уровень опасности навигационной ситуации «судно-судно» (двухуровневый случай)

Завершая описание двухуровневых случаев нечеткой модели, определяющей уровень опасности навигационной ситуации «судно-судно», отметим, что для всех этих случаев детектор маневра может быть, конечно же, основан не только на системе типа Сугено (п. 2.3.1), но и на системе типа Мамдани (п.п. 2.3.2, 2.3.3), и на нейро-нечеткой сети (п. 2.3.4). Настройка параметров системы может осуществляться и экспертным способом, и на обучающей выборке, и сочетанием этих двух подходов. В последних двух случаях настройка параметров двух уровней модели может осуществляться как для каждого уровня по отдельности, так и совместно, например, с использованием алгоритмов обучения типа обратного распространения ошибки.

### 3.4 Результаты численного моделирования задачи предупреждения об опасном сближении судов

#### 3.4.1 Модель вероятностного типа, основанная на полиномиальной экстраполяции траекторий

Предваряя описание численного исследования, отметим, что оно проводилось для случая, когда информационная база СУДС состоит из одной РЛС. Тем не менее, рассматриваемые модели и алгоритмы могут быть легко модифицированы для случая нескольких РЛС и/или использования средств спутниковой навигации – транспондеров Автоматической идентификационной системы (АИС). Кроме того, система может быть реализована не только в береговой СУДС, но и на борту судна.

При постановке вычислительного эксперимента использовались следующие данные об РЛС: погрешности измерений  $\xi_x(t_k)$ ,  $\xi_y(t_k)$  - нормально распределённые некоррелированные случайные величины со среднеквадратичным отклонением 3м, период обращения антенны РЛС равен 3с.

Рисунок 37 иллюстрирует некоторые результаты решения задачи выделения маневрирующих объектов, имея в виду формулы (34). На рисунке 37а показаны вычисленные согласно (34) значения вероятностей  $P(a_x \neq 0)$  (сплошная линия) и  $P(a_y \neq 0)$  (точки) при различном числе измерений  $N$  для объекта, движущегося прямолинейно и равномерно со скоростью 5 м/с.

На рисунке 37б показаны вычисленные значения тех же вероятностей для объекта, движущегося ускоренно с ускорением  $0.02 \text{ м/с}^2$ . Видно, что для данного конкретного случая устойчивое выделение маневрирующего объекта возможно для числа измерений  $N \geq 17$  (надёжное решение данной задачи, как показали опыты, позволяет получить порог вероятности, равный 0.99). На рисунке 37в показаны средние значения и нижние границы вычисленных  $\max[P(a_x \neq 0), P(a_y \neq 0)]$  для ускорений объекта, равных  $0.01 \text{ м/с}^2$  (сплошные линии),  $0.02 \text{ м/с}^2$  (точки) и  $0.05 \text{ м/с}^2$

(штрих-пунктир). Видно, что, например, объект, движущийся с ускорением  $0.02 \text{ м/с}^2$  будет выделен как маневрирующий в половине случаев при  $N = 15$  (верхняя кривая из точек приближается к 1) и в 95 процентах случаев при  $N = 19$  (нижняя кривая из точек приближается к 1); для объекта, движущегося с ускорением  $0.01 \text{ м/с}^2$  соответствующие значения  $N$  равны 23 и 28. Рисунок 37г иллюстрирует зависимость необходимого для детекции маневра числа измерений (среднего и максимального) от значения ускорения наблюдаемого объекта при различных погрешностях оценивания, а именно, при среднеквадратичном отклонении  $\xi_x(t_k)$ ,  $\xi_y(t_k)$  равном 3м (точки) и 6м (сплошные линии).

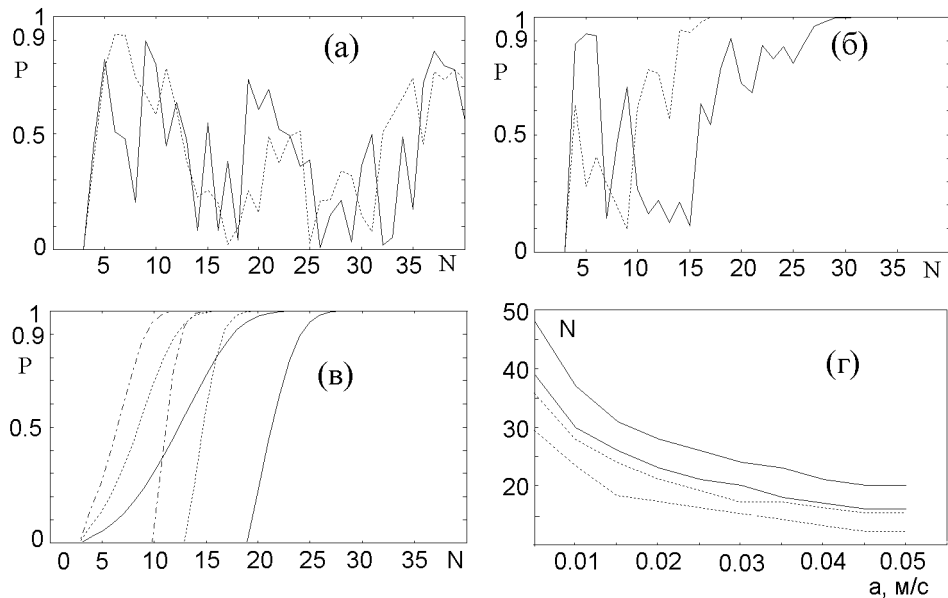


Рисунок 37 - Результаты решения задачи выделения маневрирующих объектов

На рисунке 38 показаны свойства различных модельных представлений вероятностей безопасной ситуации в задаче «судно-берег». Так, приведены вычисленные согласно (15), (16) и (17) вероятности  $P_{Y^*}(t)$  (пунктир),  $P_{S_{Y^*}}(t)$  (сплошная линия) и  $P_{\rho>0}(t)$  (точки) для модели движения объекта первого (рисунки 38в, 38г) и второго порядка (рисунки 38а, 38б). Здесь  $t$  - интервал прогнозирования траектории,  $P$  - значения соответствующих вероятностей. Объект двигался со скоростью  $5 \text{ м/с}$ , интервал наблюдения равнялся  $30\text{с}$  для модели первого порядка

(что при периоде измерений 3с соответствует 10 измерениям) и 1 минуте для модели движения второго порядка (что соответствует 20 измерениям).

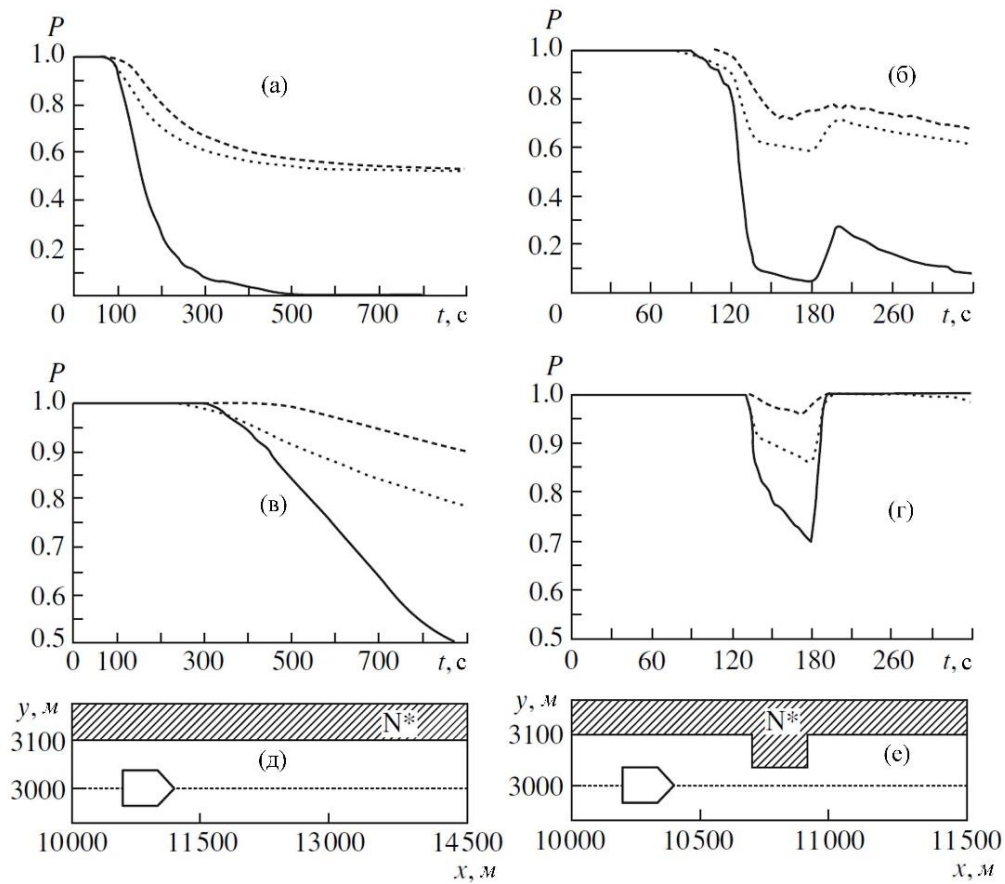


Рисунок 38 - Свойства модельных представлений вероятностей безопасной ситуации в задаче «судно-берег»

Радиусы корабельных доменов принимались равными 100 м. При этом для левой колонки рисунков (рисунков 38а, 38в) моделировалась ситуация, когда приведённая запрещённая зона ограничена прямой линией (рисунок 38д), а ситуация для рисунков 38б и 38г (правая колонка) рассматривалась для случая, когда приведённая запрещённая зона имеет выступ (рисунок 38е).

Исходя из данных рисунок 38 можно сделать вывод, что при росте интервала прогнозирования корректное заключение о безопасности ситуации (при данных свойствах объекта, акватории и измерителей) можно сделать при  $t < 100$  с для модели второго порядка (рисунок 38а) и  $t < 300$  с для модели первого порядка (рисунок 38в). Кроме того, можно утверждать (рисунки 38б, 38г), что принятая

модель вполне корректно «реагирует» на изменения уровня безопасности, вызванных особенностями геометрии запрещенной/разрешенной зоны.

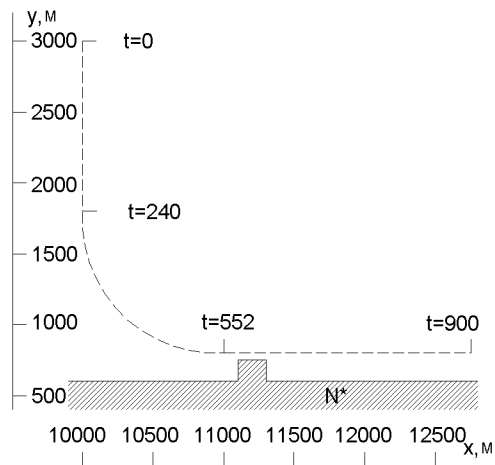


Рисунок 39 - Моделируемая траектория движения судна

На рисунке 39 показана моделируемая траектория движения объекта и конфигурация запрещенной зоны (скорость движения объекта равна 5 м/с), а на рисунке 40 изображены результаты моделирования рассматриваемой задачи предупреждения об опасном сближении типа «судно-берег».

На рисунке 40а показаны вычисленные значения  $\max[P(a_x \neq 0), P(a_y \neq 0)]$ , а на рисунке 40б – соответствующие значения детектора манёвра  $d$ . Видно, что решение о том, что наблюдаемый объект является маневрирующим принимается в интервале времени  $[280\text{с}, 585\text{с}]$ , с некоторым запаздыванием относительно истинного манёвра судна (интервал истинного маневра показан на рисунке 40а заштрихованной областью).

На рисунках 40в и 40г приведены вычисленные значения вероятностей безопасного движения  $P_1^c$  и  $P_2^c$  для случая  $T_1=300\text{с}$ ,  $T_2=60\text{с}$  и  $P(t) = P_{S_{Y^*}}(t)$ , а на рисунке 40д –соотнесение уровней опасности с вычисленными значениями вероятностей согласно таблице 9.

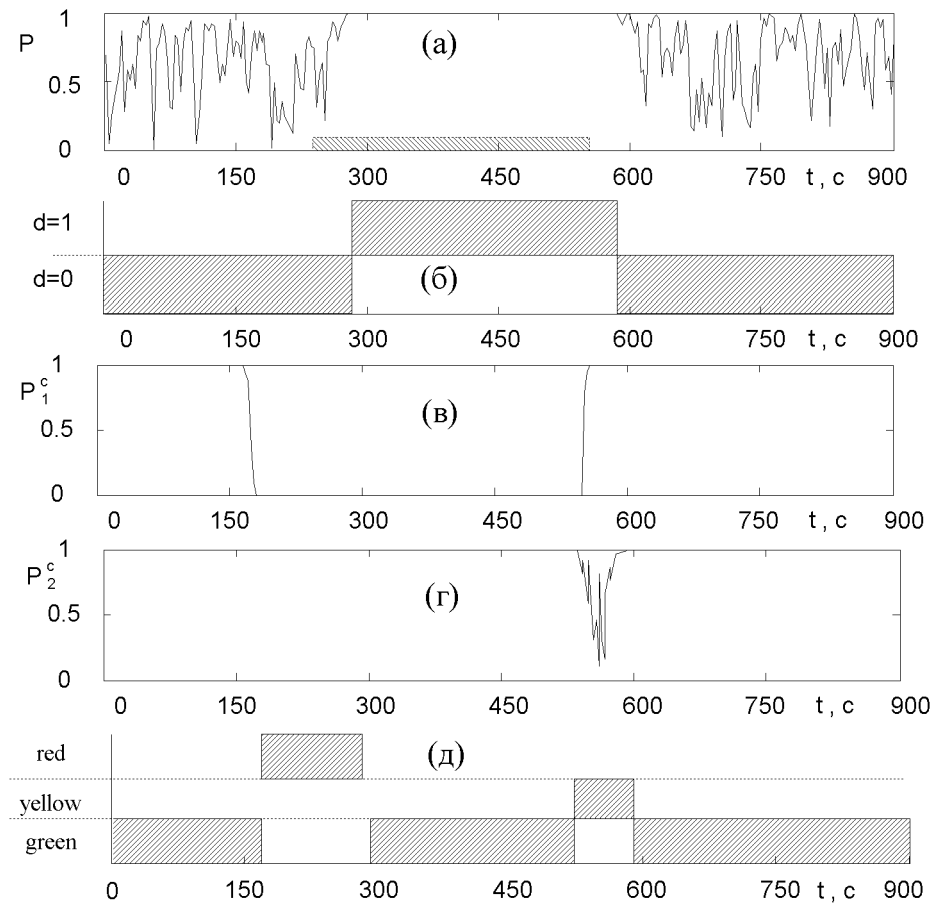


Рисунок 40 - Результаты моделирования задачи предупреждения об опасном сближении: случай «судно-берег»

На рисунке 41 представлены свойства различных модельных представлений вероятности безопасной ситуации в задаче «судно-судно». Показаны вычисленные согласно (18), (19) и (20) вероятности  $P_{\Gamma}(t)$  (пунктир),  $P_{SY}(t)$  (сплошная линия) и  $P_{\rho > R_1^{\circ} + R_2^{\circ}}(t)$  (точки) для модели движения первого (рисунок 41б) и второго порядка (рисунок 41а). Здесь  $t$  - интервал прогнозирования траектории,  $P$  - значения соответствующих вероятностей. Интервал наблюдения был принят равным 30с для модели движения первого порядка и 1 минуте для модели движения второго порядка. При этом объекты двигались со скоростью 5 м/с по траекториям, изображённым на рисунке 41в.

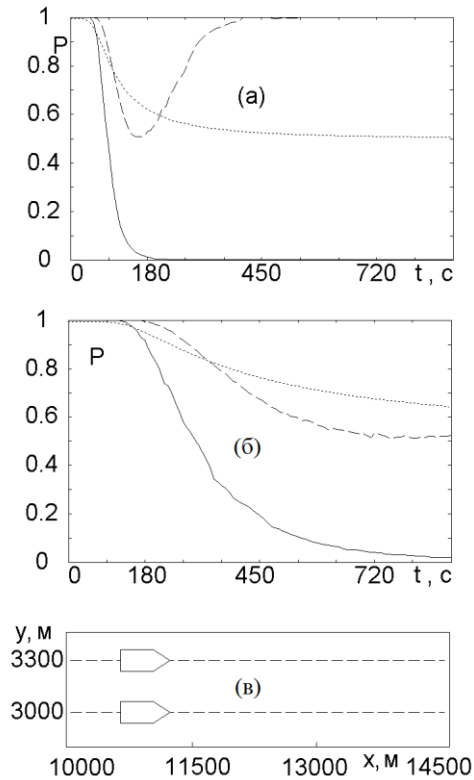


Рисунок 41 - Свойства модельных представлений вероятностей безопасной ситуации в задаче «судно-судно»

На рисунке 42 показаны моделируемые траектории движения двух объектов, рисунок 43 иллюстрирует для них результаты моделирования задачи предупреждения об опасном сближении судов.

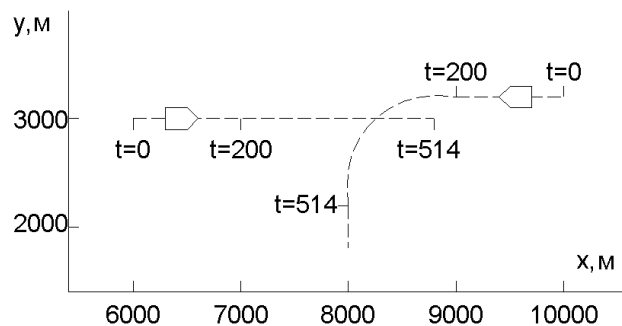


Рисунок 42 - Моделируемые траектории движения судов



На рисунке 43а показаны значения  $d_1 \vee d_2 = 0$  - логического сложения детекторов манёвра наблюдаемых объектов, а на рисунках 43б, 43в – вычисленные значения вероятностей безопасного движения  $P_1^s$  и  $P_2^s$  для случая  $T_1=300$ с,  $T_2=60$ с и  $P(t) = P_{\rho > R_1^o + R_2^o}(t)$ . Рисунок 43г содержит результаты работы на этих данных системы принятия решений - соотнесение уровней опасности с вычисленными значениями вероятностей согласно таблице 10.

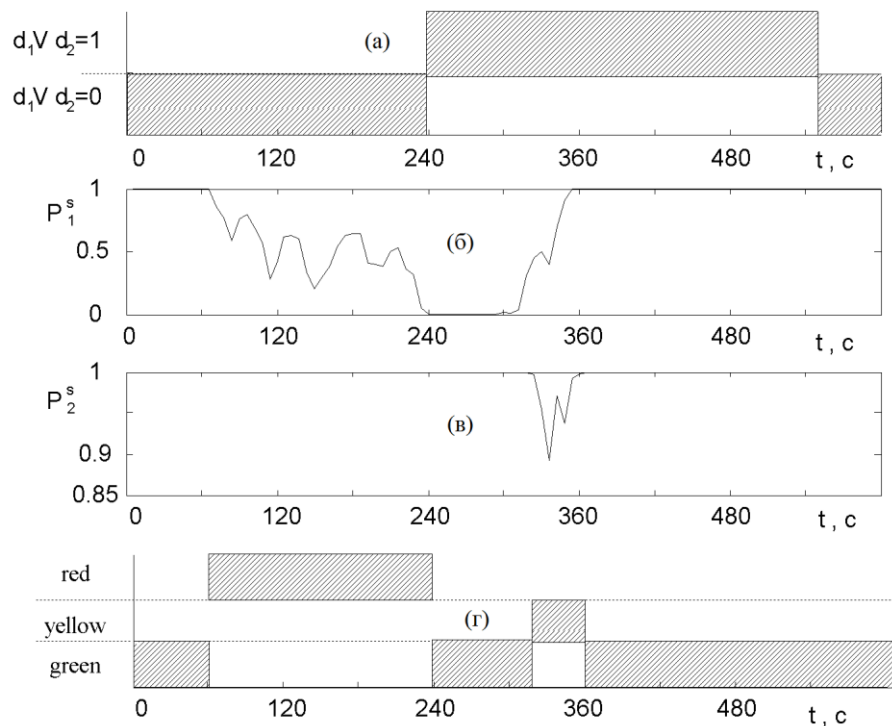


Рисунок 43 - Результаты моделирования задачи предупреждения об опасном сближении: случай «судно-судно»

Из рисунков 40 и 43 видно, что дополнительный учет информации о маневрировании судна позволяет построить конструктивную модель принятия решения о степени опасности навигационной ситуации: так, рисунок 43 показывает, что при сближении судов они сначала распознаны как опасно сближающиеся (RED), после начала одним из судов поворота уровень опасности сначала уменьшился до безопасного значения (GREEN), затем, по мере сближения,

увеличился до значения (YELLOW), после окончательного расхождения судов ситуация снова распознаётся как безопасная (GREEN).

### 3.4.2 Детерминированная модель, основанная на геометрической интерпретации относительного движения судов (четкая модель)

Численное исследование модели, рассмотренной в п. 3.3.3 также подтвердило ожидаемый эффект разделения уровней опасности. Приведённые ниже рисунки иллюстрируют один из фрагментов численного эксперимента.

На рисунке 44 изображены моделируемые траектории движения трёх судов: два из них (I и II) движутся прямолинейно и равномерно, третье (III) - маневрирует. Суда движутся со скоростью 5 м/с.

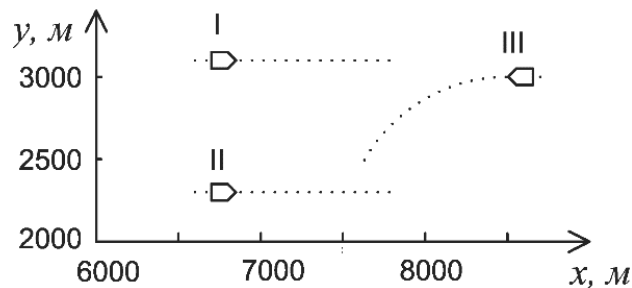


Рисунок 44 - Моделируемые траектории движения судов

Рисунок 45 иллюстрирует работу системы по проверке по мере движения судов (с течением времени) условий (23), (24), (25) и (36), и их соотносению с правилами таблиц 11 и 12 для «судно I - судно III» (левая колонка) и «судно II - судно III» (правая колонка). Для простоты восприятия результатов моделирования пороговое значение времени  $T^*$  в данном случае взято большим, так, чтобы условие (25) всегда было истинным.

На рисунках 45а и 45б представлены оцененные значения углов  $|\eta_v - \eta_r|$  (сплошная линия) и  $\Theta$  (точки); на рисунках 45в и 45г представлены оцененные скорости изменения углов - значения  $|w_v - w_r|$  (сплошная линия) и  $\dot{\Theta}$  (точки); на

рисунках 45д и 45е представлено значение  $d_1 \vee d_2 = 0$  - логического сложения детекторов манёвра наблюдаемых объектов, построенных по методу, рассмотренному в п. 3.3.2, уравнение (34); на рисунках 45ж и 45з приведены результаты соотнесения условий (23), (24) и (25) с системой правил таблицы 11; на рисунках 45и и 45к приведены результаты соотнесения условий (23), (36) и (25) с системой правил таблицы 12.

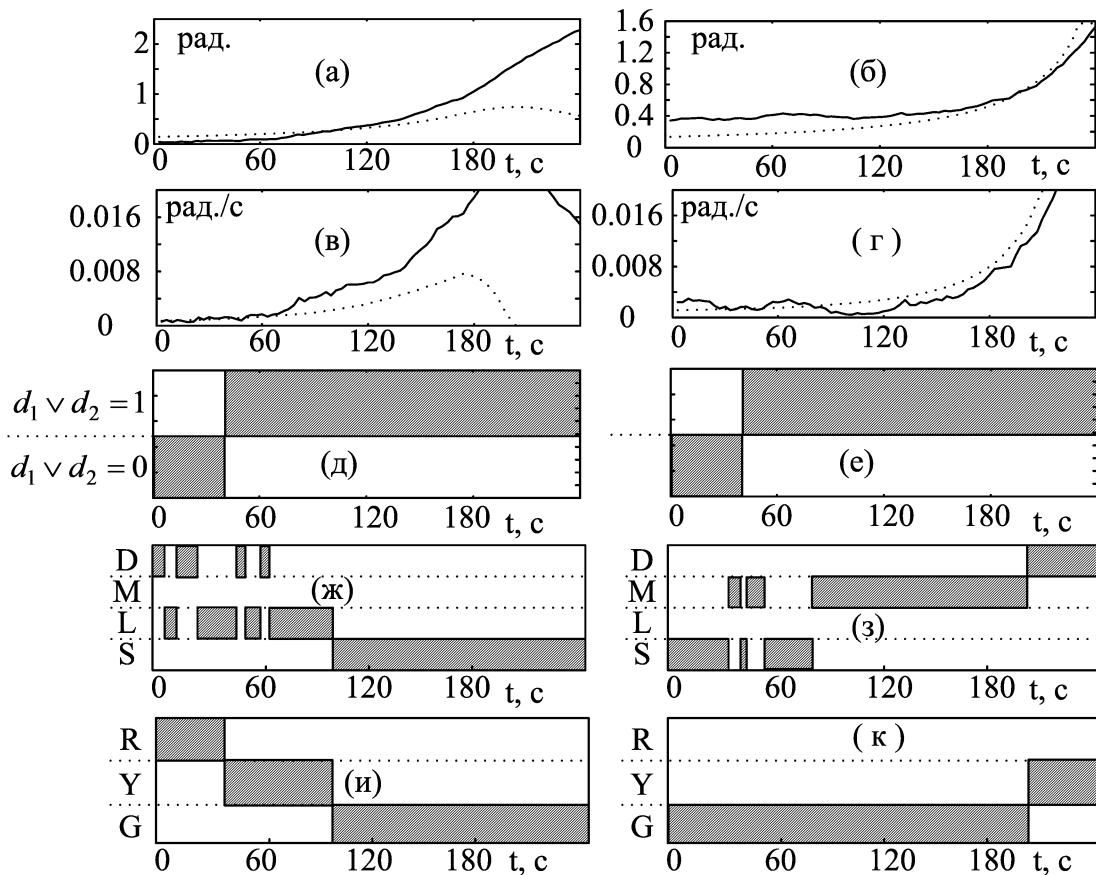


Рисунок 45 - Результаты моделирования задачи предупреждения об опасном сближении

Из рисунков 45ж и 45з видно, что при использовании четырёхуровневой системы правил определения уровня опасности (таблица 11) при большом удалении судов друг от друга (время  $t < 60$ с) вследствие влияния ошибок измерений на оценку скорости изменения углов  $|w_v - w_r|$  и  $\dot{\theta}$  (точки) оценка уровня опасности нестабильна (видны «скачки» между уровнями LOW и

DANGEROUS на рисунке 45ж и между уровнями SAFE и MIDDLE на рисунке 45з). При небольших расстояниях между судами оценка уровня опасности становится устойчивой и в целом четырёхуровневая система (таблица 11) позволяет решить задачу оценки риска опасного сближения судов: для судов I и III снижение уровня тревоги с DANGEROUS до LOW происходит сразу после устойчивой оценки ложности условия (24) (то есть выполнения судном III манёвра уклонения, рисунок 45ж); для судов II и III генерация уровня тревоги MIDDLE также происходит заблаговременно (рисунок 45з).

Из рисунков 45и и 45к видно, что использование трёхуровневой системы правил определения уровня опасности (табл. 12) при больших расстояниях между судами делает оценку уровня опасности устойчивее по сравнению с четырёхуровневой, и, безусловно, позволяет решить задачу оценки риска опасного сближения судов, хотя и не даёт разнообразия оценок, обусловленного траекторными (кинематическими) свойствами относительного движения судов. Наиболее ярко это заметно, например, по рисунку 45к: при сближении судов II и III система генерирует уровень YELLOW, такой же, как и при начале манёвра уклонения судов I и III (рисунок 45и), хотя характер этих двух ситуаций различен, что, в свою очередь, способна учесть четырёхуровневая система (таблица 11). Возможно, на практике следует реализовать обе эти системы и в области неустойчивости четырёхуровневой системы использовать показания трёхуровневой, а в области устойчивой работы четырёхуровневой системы принимать её оценки как основные.

### **3.4.3 Детерминированная модель, основанная на геометрической интерпретации относительного движения судов (нечеткая модель)**

Предваряя описание численного моделирования задачи отметим, что настраиваемые параметры во всех описанных в п. 3.3.4 случаях модели подбирались экспертным способом. Несмотря на то, что настройка параметров нечетких моделей с использованием обучающей выборке в рассматриваемой

задаче возможна, экспертный способ был выбран потому, что формирование обучающей выборки для рассмотренной задачи достаточно трудоёмко и само по себе требует привлечения экспертов.

Для демонстрации работы описанных в п. 3.3.4 нечетких систем рассмотрим модельный пример для трёх судов. Два из них (I и II) движутся со скоростью 5 м/с прямолинейно и равномерно, третье (III) – маневрирует (рисунок 46).

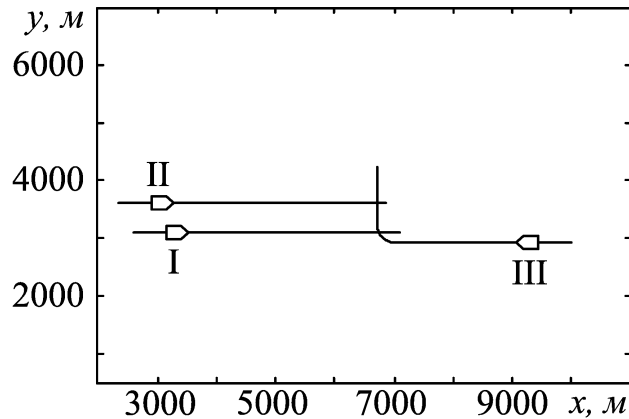


Рисунок 46 - Моделируемые траектории движения судов

### 3.4.3.1 Система типа Мамдани (основной случай)

Рассмотрим систему, описанную в п. 3.3.4.3. На рисунке 47 показаны функции принадлежности термов лингвистических переменных (37) – (40).

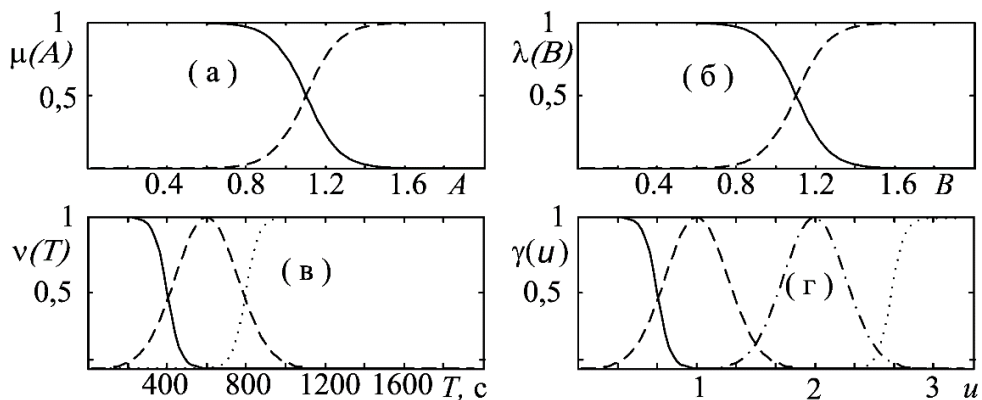


Рисунок 47 - Функции принадлежности термов лингвистических переменных  $P_A$ ,  $P_B$ ,  $P_T$  и

$P_u$

На рисунке 47а показаны функции принадлежности  $\mu_{\text{малое}}(A)$  (сплошная) и  $\mu_{\text{большое}}(A)$  (пунктир), на рисунке 47б –  $\lambda_{\text{малое}}(B)$  (сплошная) и  $\lambda_{\text{большое}}(B)$  (пунктир), на рисунке 47в –  $\nu_{\text{малое}}(T)$  (сплошная),  $\nu_{\text{среднее}}(T)$  (пунктир) и  $\nu_{\text{большое}}(T)$  (точки), на рисунке 47г –  $\gamma_{\text{безопасная}}(u)$  (сплошная),  $\gamma_{\text{почти безопасная}}(u)$  (пунктир),  $\gamma_{\text{опасная}}(u)$  (точка-пунктир),  $\gamma_{\text{очень опасная}}(u)$  (точки).

Ансамбль функций принадлежности (рисунок 47 и аналогичные функции вариантов задачи, рассмотренных ниже) выбран так, что характерные ситуации, интерпретирующие входные и выходные переменные машины нечеткого вывода (кластеры) явно различимы (за исключением только отдельных точек, где значения функций принадлежности равны). При этом система правил нечеткого вывода (таблица 14) описывает все комбинации кластеров входных и выходных переменных, а, значит, машина нечеткого вывода будет работать устойчиво и корректно, что подтверждается вычислительными экспериментами (см. ниже). Если будут иметься отрезки универсального множества, где все функции принадлежности будут равны 0, машина нечеткого вывода будет работать некорректно по Адамару. Если на универсальном множестве будут иметься отрезки, где значения хотя бы двух максимальных функций принадлежности близки друг к другу (кластеры не различимы), машина нечеткого вывода будет плохо обусловленной.

На рисунке 48 показаны результаты численного моделирования описанной в п. 3.3.4.3 нечеткой системы распознавания опасного сближения судов. Он иллюстрирует определение уровня опасности навигационной ситуации по мере движения судов (см. рисунок 46) с течением времени: «судно I – судно III» (левая колонка) и «судно II – судно III» (правая колонка).

На рисунках 48а и 48б показаны значения величины  $A$ ; на рисунках 48в и 48г – значения величины  $B$ ; на рисунках 48д и 48е – значения величины  $T$  (т. е. входы нечеткой системы). Из рисунков 48в и 48г видна особенность

рассматриваемой задачи – неустойчивость оценки величины  $B$  при больших расстояниях между судами в условиях погрешностей измерений.

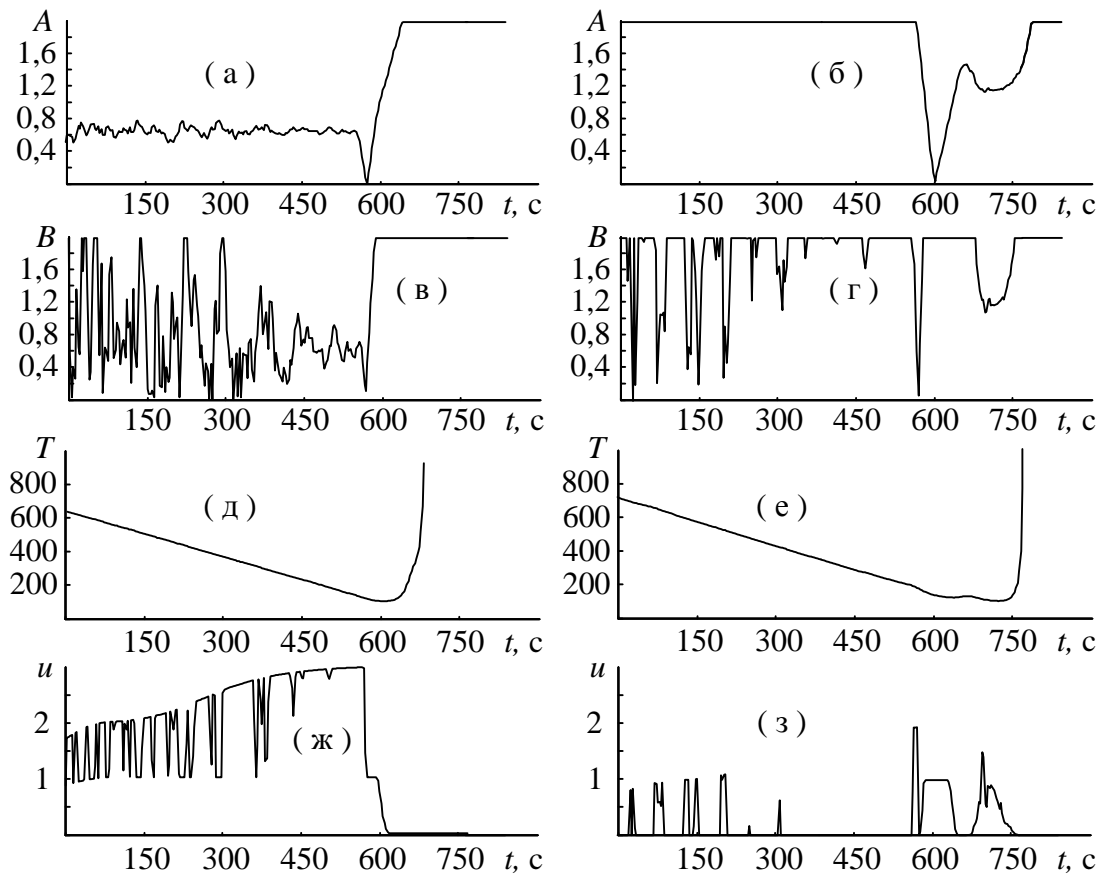


Рисунок 48 - Результаты численного моделирования работы нечеткой системы распознавания опасного сближения судов (система типа Мамдани, основной случай)

На рисунках 48ж и 48з показаны значения величины  $u$  (выход нечеткой системы Мамдани). На рисунке 48ж видно, что уровень опасности для судов I и III постоянно повышается по мере их сближения, достигая величины  $u \approx 3$  при  $t = 450$  с. При  $t = 550$  с судно III начинает маневр уклонения поворотом вправо, после чего уровень опасности «судно I – судно III» быстро снижается до уровня  $u \approx 1$  и затем до 0. Из рисунка 48з видно, что суда II и III вначале движутся безопасно. После начала судном III маневра уровень опасности «судно II – судно III» скачкообразно увеличивается до  $u \approx 2$ , по мере продолжения поворота судна III снижается до уровня  $u \approx 1$  и затем до 0. Неустойчивость оценки величины  $u$  при значениях

$t < 450$  с объясняется большим расстоянием между судами. При таких расстояниях оценка величины  $B$  неустойчива в условиях инструментальных погрешностей измерений. По мере сближения судов оценки величины  $u$  становятся устойчивыми.

### 3.4.3.2 Система типа Сугено и нейро-нечеткая система (основной случай)

Рассмотрим систему, описанную в п.п. 3.3.4.2 и 3.3.4.4.

На рисунке 49 показаны функции принадлежности термов лингвистических переменных (37) – (39). Коэффициенты  $b_j$  четвертого слоя нейро-нечеткой сети (рисунок 33) задаются таблицей 13. На рисунке 49а показаны функции принадлежности  $\mu_{\text{малое}}(A)$  (сплошная) и  $\mu_{\text{большое}}(A)$  (пунктир), на рисунке 49б –  $\lambda_{\text{малое}}(B)$  (сплошная) и  $\lambda_{\text{большое}}(B)$  (пунктир), на рисунке 49в –  $\nu_{\text{малое}}(T)$  (сплошная),  $\nu_{\text{среднее}}(T)$  (пунктир) и  $\nu_{\text{большое}}(T)$  (точки).

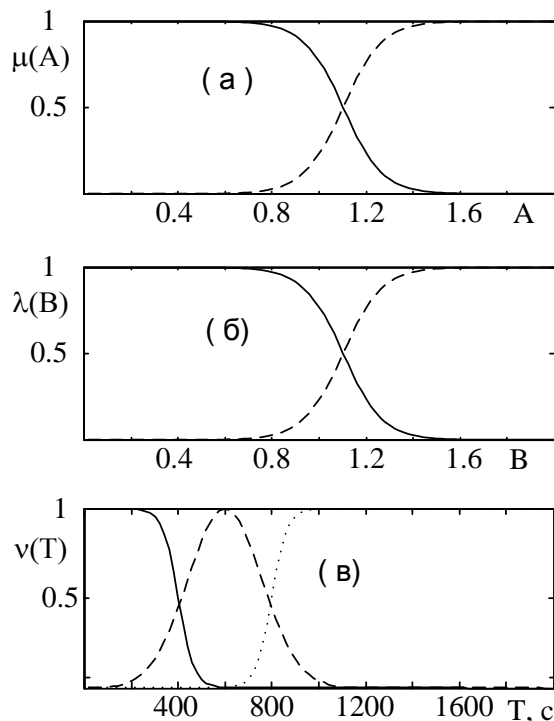


Рисунок 49 - Функции принадлежности термов лингвистических переменных  $P_A$ ,  $P_B$ ,  $P_T$



На рисунке 50 показаны результаты численного моделирования описанной в п. 3.3.4.2 и 3.3.4.4 нечеткой системы распознавания опасного сближения судов. Он иллюстрирует определение уровня опасности навигационной ситуации по мере движения судов (см. рисунок 46) с течением времени: «судно I – судно III» (левая колонка) и «судно II – судно III» (правая колонка).

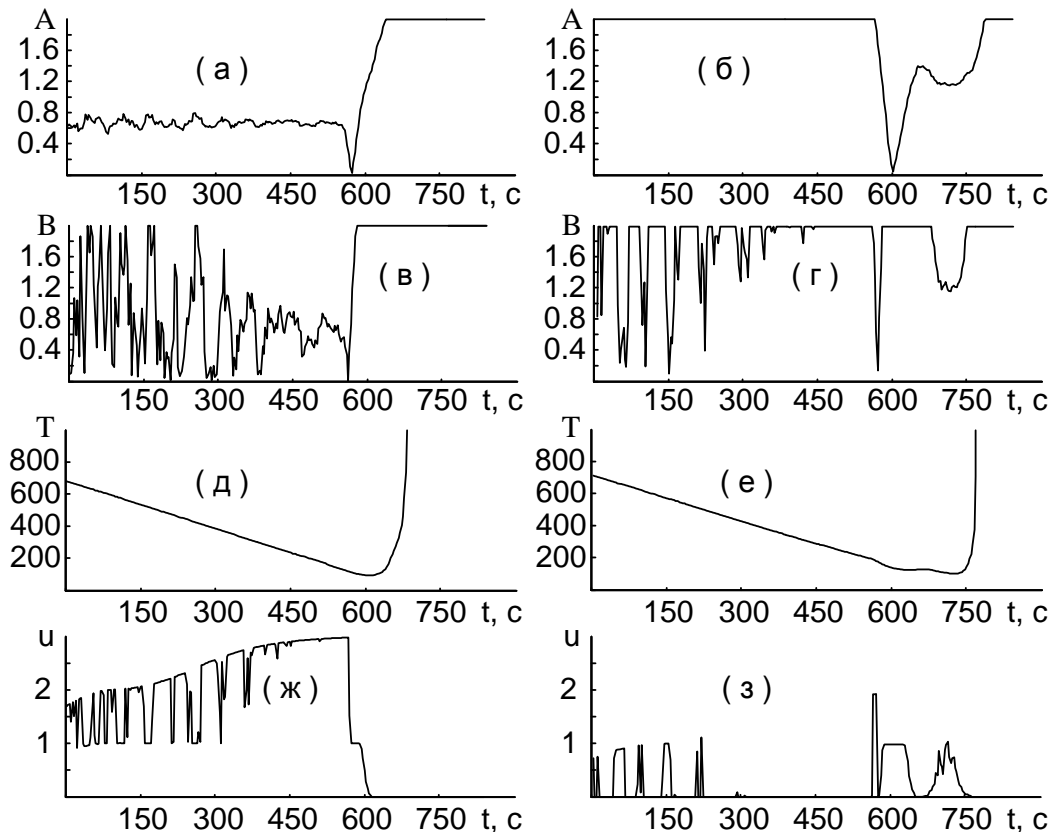


Рисунок 50 - Результаты численного моделирования работы нечеткой системы распознавания опасного сближения судов (система типа Сугено и нейро-нечёткая система, основной случай)

На рисунках 50а и 50б показаны значения величины  $A$ ; на рисунках 50в и 50г – значения величины  $B$ ; на рисунках 50д и 50е – значения величины  $T$  (т. е. входы нечеткой системы). На рисунках 50ж и 50з показаны значения величины  $u$  (выход нечеткой системы типа Сугено или соответствующей ей нейро-нечёткой системы). Неустойчивость оценки величины  $u$  при значениях  $t < 450$ с объясняется большим расстоянием между судами. При таких расстояниях оценка величины  $B$  неустойчива в условиях инструментальных погрешностей измерений. По мере

сближения судов оценки величины  $u$  становятся устойчивыми. Сравнивая рисунки 48 и 50 можно сделать вывод о том, что в целом решение задачи системой типа Мамдани и системой типа Сугено (или соответствующей ей нейро-нечеткой системой), как и следовало ожидать, близки по своим свойствам.

### 3.4.3.3 Двухуровневый случай нечетких систем

Рассмотрим нечеткие системы, описанные в п.п. 3.3.4.5, 3.3.4.6 и 3.3.4.7. На рисунке 51 показаны функции принадлежности термов лингвистических переменных (37), (41), (39), (40). Коэффициенты  $b_j$  четвертого слоя нейро-нечеткой сети рисунка 36 задаются таблицей 15. На рисунке 51а показаны функции принадлежности  $\mu_{\text{малое}}(A)$  (сплошная) и  $\mu_{\text{большое}}(A)$  (пунктир), на рисунке 51б –  $\omega_{\text{маневренное}}(m)$  (сплошная) и  $\omega_{\text{равномерное}}(m)$  (пунктир), на рисунке 51в –  $\nu_{\text{малое}}(T)$  (сплошная),  $\nu_{\text{среднее}}(T)$  (пунктир) и  $\nu_{\text{большое}}(T)$  (точки), на рисунке 51г –  $\gamma_{\text{безопасная}}(u)$  (сплошная),  $\gamma_{\text{почти безопасная}}(u)$  (пунктир),  $\gamma_{\text{опасная}}(u)$  (точка-пунктир),  $\gamma_{\text{очень опасная}}(u)$  (точки).

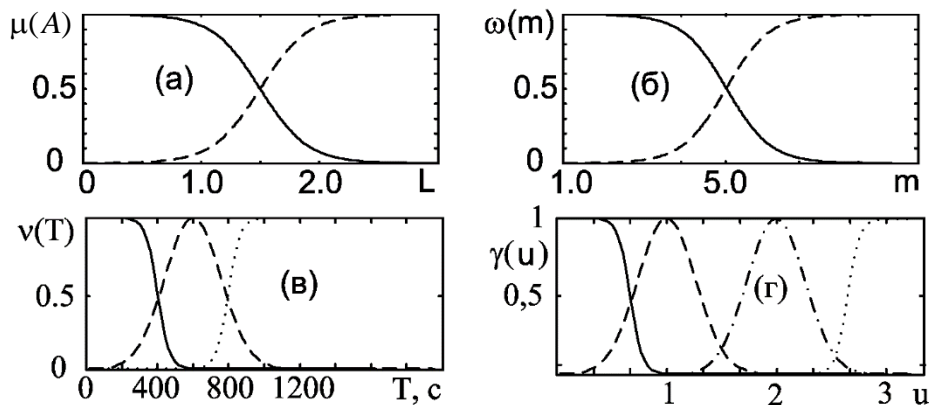


Рисунок 51 - Функции принадлежности термов лингвистических переменных  $P_A$ ,  $P_m$ ,  $P_T$  и  $P_u$

На рисунке 52 показаны результаты численного моделирования описанной в п.п. 3.3.4.5, 3.3.4.6 и 3.3.4.7 нечетких систем распознавания опасного сближения

судов. Он иллюстрирует определение уровня опасности навигационной ситуации по мере движения судов (см. рисунок 46) с течением времени: «судно I – судно III» (левая колонка) и «судно II – судно III» (правая колонка).

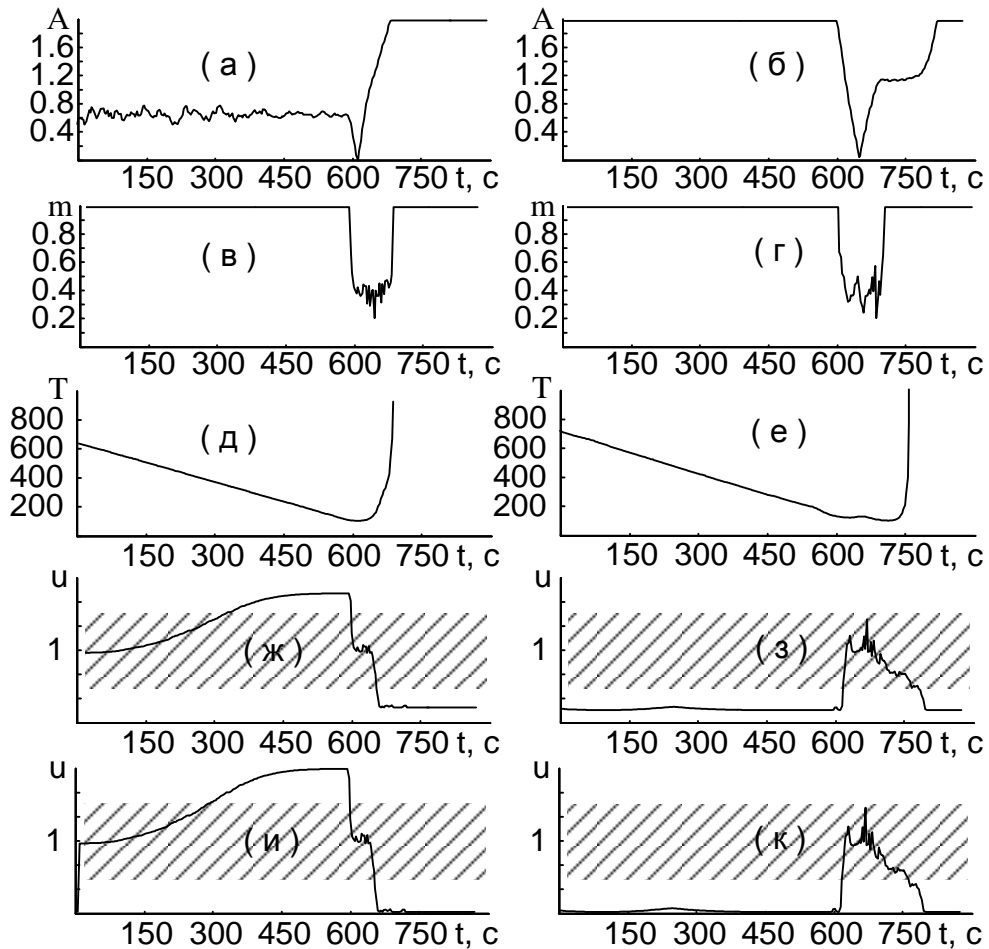


Рисунок 52 - Результаты численного моделирования работы нечеткой системы распознавания опасного сближения судов (системы типа Мамдани, Сугено и нейро-нечёткая система, двухуровневый случай)

На рисунках 52а и 52б показаны значения величины  $A$ ; на рисунках 52в и 52г – значения величины  $m$  - выхода первого уровня двухуровневой нечеткой системы (см. рисунки 34, 35 и 36); на рисунках 52д и 52е – значения величины  $T$  (т. е. входы нечеткой системы). На рисунках 52ж и 52з показаны значения величины  $u$  - выхода нечеткой системы типа Мамдани; на рисунках 52и, 52к – значения величины  $u$  - выхода нечеткой системы типа Сугено или

соответствующей ей нейро-нечёткой системы. Уровень опасности для пары судов I - III устойчив и постоянно повышается по мере их сближения. После начала судном III маневра уклонения уровень опасности быстро снижается. Из рисунка 52г видно, что суда II и III вначале движутся безопасно. После начала судном III манёвра уровень опасности для пары судов II - III скачкообразно увеличивается, а, затем, по мере продолжения поворота судна III, снижается до безопасного уровня.

Заштрихованная область рисунков 52ж, 52з, 52и, 52к иллюстрирует связь нечетких моделей с чёткими, рассмотренными выше. В данном случае значения величины  $u$ , находящиеся ниже заштрихованной области, приблизительно соответствуют безопасной ситуации (GREEN); заштрихованная область приблизительно соответствует среднему уровню тревоги (YELLOW); значения величины  $u$ , находящиеся выше заштрихованной области, приблизительно соответствуют высокому уровню тревоги (RED).

Сравнивая рисунки 52 и 50 можно сделать вывод о том, что использование двухуровневой модели, связанной с нечетким определителем манёвра, в отличие от одноуровневой, связанной с учётом угловых скоростей относительного движения судов, даёт устойчивую оценку уровня опасности в том числе и при больших расстояниях между судами.

Сравнивая рисунки 52ж, з с рисунками 52 и, к приходим к ожидаемому выводу о том, что решения задачи системой типа Мамдани и системой типа Сугено (или соответствующей ей нейро-нечеткой системой) близки по своим свойствам.

### **3.5 Результаты натурных исследований модели задачи предупреждения об опасном сближении судов**

Испытание разработанной системы проводилось на реальных данных о движении судов по акватории, прилегающей к порту Владивосток. Приведённый ниже типичный пример был получен по результатам анализа данных о движении судов в течение одних суток летом 2013 года; в это время в зоне ответственности СУДС одновременно находилось около 80 судов (рисунок 53). Пример построен с

использованием трёхуровневой детерминированной модели, основанной на геометрической интерпретации относительного движения судов (см. п. 3.3.3).

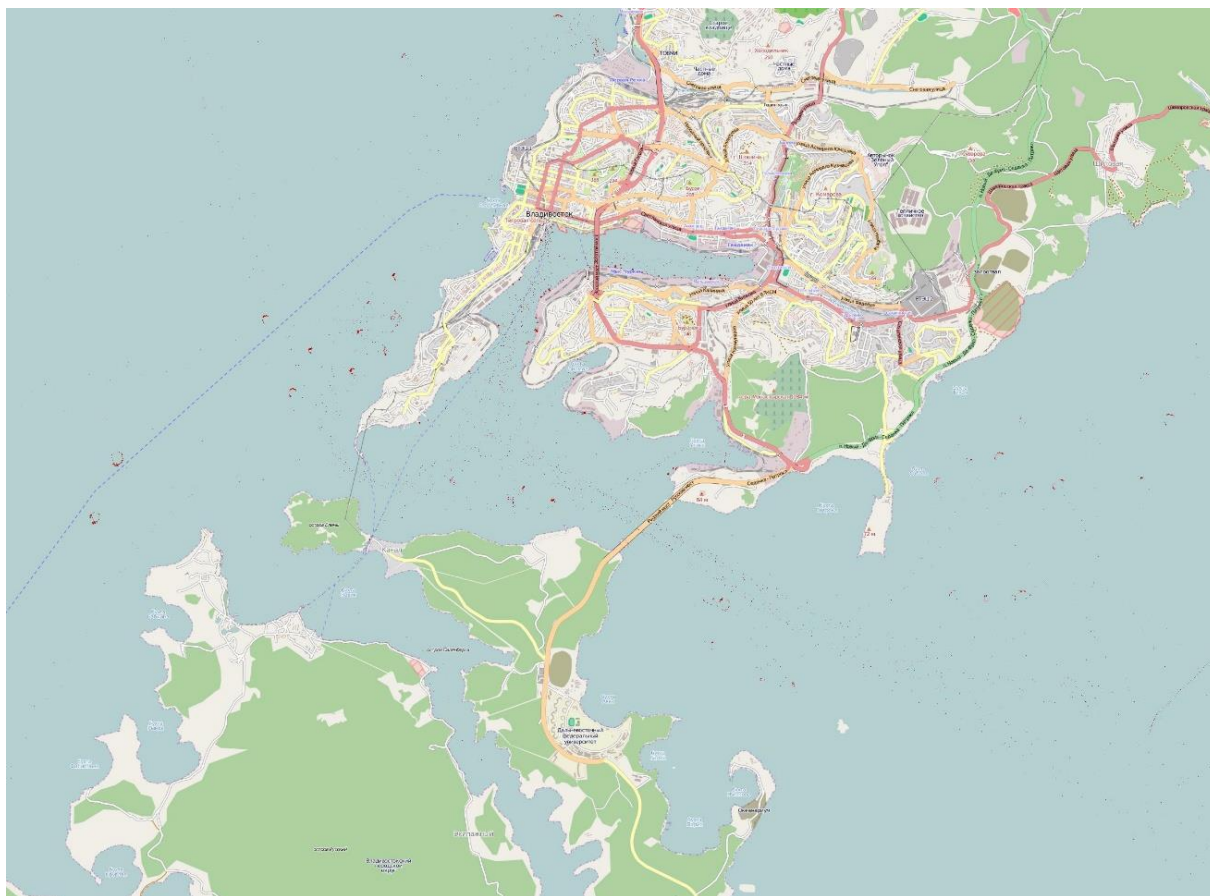


Рисунок 53 - Движение судов на акватории, прилегающей к порту Владивосток в течение одного дня в летний период. Координаты наблюдаемых судов показаны мелкими красными точками

На рисунке 54 показано положение судов на акватории в те моменты времени, когда для них был сгенерирован тревожный сигнал уровня YELLOW (жёлтые точки) или RED (красные точки). Видно, что наибольшее количество тревог возникает во внутренних портовых водах, где суда располагаются близко друг к другу и высока интенсивность движения малых плавсредств (катеров, буксиров). Оба уровня тревоги имеют место и при движении судов вне портовых вод: Амурском (слева), Уссурийском (справа) заливах, проливе Босфор Восточный. Доля тревожных сигналов уровня YELLOW составляет около 20%, места их

генерации не образуют устойчивых зон, то есть разделение уровней тревоги является универсальным, инвариантным свойством всей акватории.

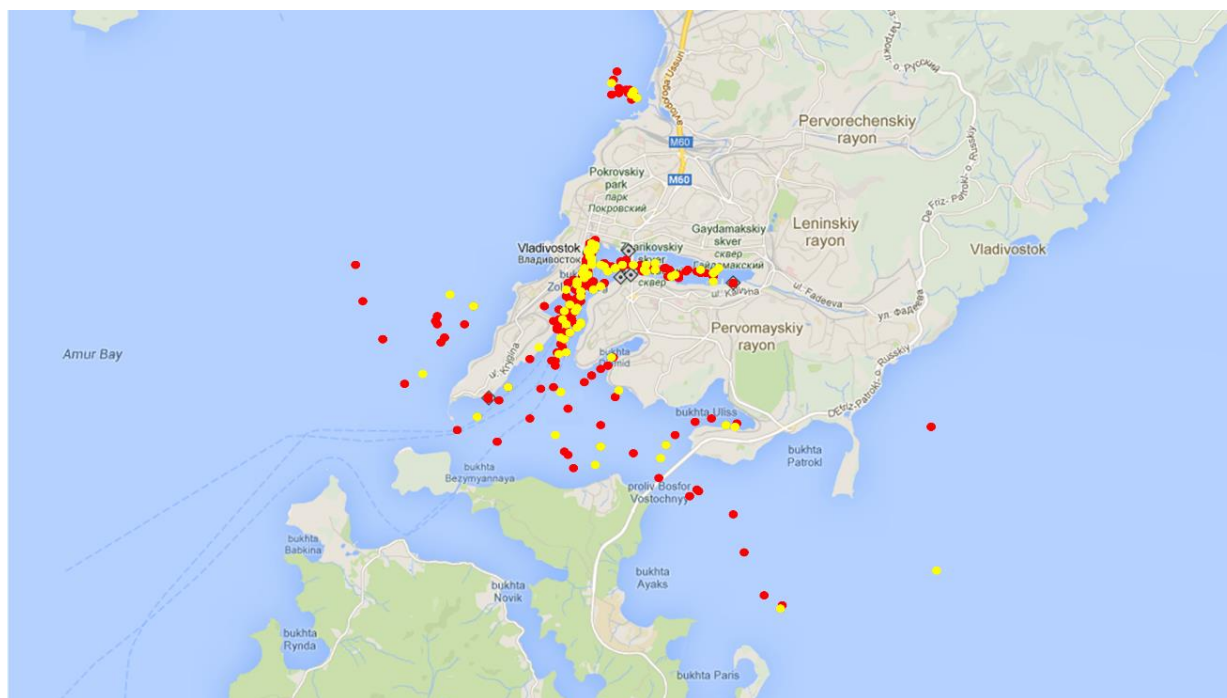


Рисунок 54 - Движение судов по акватории, прилегающей к порту Владивосток: положение судов с тревожными сигналами уровней YELLOW и RED

Для оператора (диспетчера) СУДС генерация тревожного сигнала уровня RED означает, что необходимо немедленно обратить внимание на ситуацию и принять решение о вмешательстве/невмешательстве в действия судоводителя. Генерация тревожного сигнала уровня YELLOW означает, что, хотя ситуация не является полностью безопасной, вмешиваться в неё немедленно не следует: скорее всего, судоводитель сам контролирует обстановку. Другими словами, если одновременно с ситуацией уровня YELLOW для других судов имеются ситуации уровня RED, то оператор СУДС должен работать прежде всего с ними. Тот факт, что на конкретной акватории доля ситуаций уровня YELLOW достаточно значительна (20%), говорит о том, что их выделение способно существенно снизить нагрузку на операторов СУДС, свидетельствует об актуальности рассмотренной задачи для практики. Предложенная цветовая интерпретация уровней тревоги интуитивно понятна

судоводителям и операторам СУДС, способствует принятию адекватных управленческих решений, повышая безопасность движения.

В целом испытания всех рассмотренных моделей задачи распознавания опасного сближения на реальных данных о движении судов подтвердили их работоспособность и перспективность для практического использования.

### **3.6 Краткие итоги главы 3**

Основными задачами, связанными с обеспечением навигационной безопасности коллективного движения судов являются: задача оценки риска опасного сближения, задача предупреждения опасного сближения путём совершения манёвра уклонения, задача планирования траектории безопасного движения. Третья глава работы посвящена задаче оценки риска опасного сближения. Рассмотренные модели задачи ориентированы главным образом на внешнее наблюдение коллективного движения судов – береговыми системами управления движением судов.

Особенностью рассмотренных моделей задачи является расширенная трактовка понятия «опасная ситуация»: в отличие от традиционного двузначного подхода к оценке риска опасного сближения типа «опасный / безопасный» в работе уделяется внимание многозначному подходу типа «очень опасный / опасный / почти безопасный / безопасный». С учетом особенностей внешнего наблюдения движения судов в качестве критерия разделения вербальных уровней опасности предлагается степень маневренности траектории движения судна. При этом предложены как дискретные (чёткие), так и непрерывные (нечёткие) варианты модели принятия решения о степени опасности сложившейся навигационной ситуации. Некоторые из рассмотренных нечётких моделей связаны, в свою очередь, с нечёткой моделью обнаружителя манёвра, рассмотренной в главе 2.

В главе 3 рассмотрены следующие модели задачи оценки риска опасного сближения (таблица 17).

Таблица 17 - Модели задачи оценки риска опасного сближения

№ модели	Название	Класс модели (четкая / нечеткая)	Число вербальных уровней опасности	Устойчивость при больших расстояниях между судами
1	Модель вероятностного типа, основанная на полиномиальной экстраполяции траекторий	Чёткая	3	+
2	Детерминированная модель, основанная на геометрической интерпретации относительного движения судов (основной случай)	Чёткая	4	-
3	Детерминированная модель, основанная на геометрической интерпретации относительного движения судов (упрощённый случай)	Чёткая	3	+
4	Нечёткая модель, основанная на геометрической интерпретации относительного движения судов и машине нечёткого вывода Сугено (основной случай)	Нечёткая	4	-
5	Нечёткая модель, основанная на геометрической интерпретации относительного движения судов и машине нечёткого вывода Сугено (упрощённый случай)	Нечёткая	3	+
6	Нечёткая модель, основанная на геометрической интерпретации относительного движения судов и машине нечёткого вывода Мамдани (основной случай)	Нечёткая	4	-
7	Нечёткая модель, основанная на геометрической интерпретации относительного движения судов и машине нечёткого вывода Мамдани (упрощённый случай)	Нечёткая	3	+
8	Нечёткая модель, основанная на геометрической интерпретации относительного движения судов и нейро-нечёткой системе (основной случай)	Нечёткая	4	-
9	Нечёткая модель, основанная на геометрической интерпретации относительного движения судов и нейро-нечёткой системе (упрощённый случай)	Нечёткая	3	+



Несмотря на большую формальную корректность четырёхуровневых моделей задачи, которые учитывают угловую скорость относительного движения пары судов, эти модели дают неустойчивое решение при больших расстояниях между судами, обусловленное влиянием инструментальных погрешностей измерений. Упрощённые трёхуровневые модели задачи, которые учитывают лишь степень интенсивности маневрирования судов, этого недостатка лишены.

И чёткие, и нечеткие модели позволяют обеспечить оценку риска опасного сближения судов и степени опасности навигационной ситуации. Главное преимущество нечетких моделей – не только интуитивно понятные механизмы принятия решений, но и возможность настройки параметров моделей с учетом особенностей судовождения на конкретной акватории. Такая настройка может быть произведена как экспертным способом, так и с помощью обучающей выборки, либо комбинацией этих способов. Вместе с тем, формирование обучающей выборки для такого обучения трудоёмко и само по себе требует привлечения экспертов, что снижает практическую привлекательность такого подхода. Однако перспектива независимой от экспертов настройки моделей для их работы на конкретной акватории делает актуальным продолжение исследований в этом направлении.

Натурные исследования рассмотренных моделей проводились на реальных данных о движении судов в акватории, прилегающей к порту Владивосток и подтвердили эффект разделения уровней опасности навигационной ситуации в зависимости от траекторных свойств движения судов. При этом было отмечено, что ситуации с различными уровнями опасности не имеют четко выраженных зон, то есть наблюдаемое разделение уровней опасности с помощью разработанных моделей является инвариантным свойством всей акватории.

Основные результаты, представленные в главе 3, были опубликованы в статьях [23, 31, 40, 42, 43, 52-55, 57, 59, 60, 66, 72, 79, 85, 89, 195, 196], монографиях

[29, 30], отражены в патентах на изобретение [13, 64, 65] и зарегистрированных программных средствах [25, 33-35, 68-70].

## **Глава 4. Распознавание воздушных объектов двухкоординатными РЛС кругового обзора**

### **4.1 Задача распознавания воздушных объектов в системах управления движением судов**

При решении задач обеспечения навигационной безопасности движения в потоках высокой интенсивности и неоднородности возникает необходимость обладания максимально полной информацией о свойствах движения каждого объекта. Существующие СУДС ориентированы на традиционную работу в двумерном (2D) навигационном пространстве. Вместе с тем, в условиях регулярного присутствия над оживленной акваторией маловысотных низкоскоростных воздушных объектов (вертолетов) обостряется проблема генерации ложных тревог (воздушные объекты принимаются за морские).

Диспетчерскими службами крупных морских портов отмечается значительное повышение интенсивности воздушного движения, осуществляемого средствами малой авиации и связанного с выполнением лоцманских, таможенных и пограничных функций. Указывается на возрастание психологической нагрузки на диспетчерский персонал, вынужденный принимать решения в условиях неопределённости навигационной обстановки, осложняемой вероятностью присутствия воздушных объектов.

В обсуждаемом контексте ошибочное заключение судоводителя или оператора СУДС о воздушной цели как о морской (когда их скорости движения сравнимы) может в корне исказить представления о навигационной обстановке и привести к ошибочным управленческим решениям.

Указанная проблема частично решается применением Автоматической идентификационной системы (АИС) на воздушном объекте: информация АИС позволяет, в том числе, однозначно идентифицировать тип цели. Вместе с тем, транспондерами АИС оснащаются далеко не все воздушные объекты,

допускающие полет над акваторией. Рассматриваемый прикладной аспект требует решения задачи селекции воздушных объектов путем расширения навигационных функций систем, образуемых на основе двухкоординатных радаров. Другими словами, актуальна постановка задачи наблюдения трёхмерного (3D) навигационного пространства на базе одно- и двух- координатных измерителей.

Проблема трехкоординатного наблюдения воздушных объектов двухкоординатными измерителями неоднократно привлекала внимание исследователей [81, 175, 202 и др.]. Так, в работах [175, 202] рассматривается способ определения высоты объекта по измерениям его дальности и азимута несколькими РЛС путем решения геометрической задачи.

В работе [221] была показана принципиальная возможность (хотя и с ограниченным эффектом) решения трехкоординатной задачи при использовании даже одного двухкоординатного радара. Сущность предлагаемой авторами методики состоит в использовании линейного динамического алгоритма оптимального оценивания, обрабатывающего измерения дальности и азимута объекта последовательно, по мере их поступления и основанном на дискретном фильтре Калмана [115, 164]. Если в системе имеется несколько радаров, то после отдельной обработки измерений каждой РЛС производится дополнительная совместная обработка полученных оценок высоты объекта.

В контексте проблемы обеспечения навигационной безопасности движения в настоящей работе исследуется возможность достоверной селекции воздушных объектов с помощью одного или нескольких двухкоординатных радаров. При этом используются различные подходы, в том числе - идеи, положенные в основу алгоритмов с обучением и нейро-нечетких систем.

## 4.2 Модельные представления задачи распознавания воздушных объектов как задачи наблюдения

Рассмотрим одно- или многопозиционную систему наблюдения, состоящую из радиолокационных станций, обеспечивающих измерение дальности «объект-станция» и пеленга на объект. Введём правую декартову систему координат  $xuz$  с осью  $z$ , направленной в зенит, осью  $y$ , направленной на Север и осью  $x$ , направленной на Восток. Пусть модель движения объекта в выбранной системе координат, отождествляемая далее с моделью движения точки в пространстве, имеет вид:

$$\begin{aligned} x(t) &= x(t_0) + \sum_{i=1}^{N_x} a_i^{(x)} (t - t_0)^i, \\ y(t) &= y(t_0) + \sum_{i=1}^{N_y} a_i^{(y)} (t - t_0)^i, \\ z(t) &= z(t_0) + \sum_{i=1}^{N_z} a_i^{(z)} (t - t_0)^i. \end{aligned} \quad (42)$$

Здесь  $N_x$ ,  $N_y$ ,  $N_z$  - порядок полинома, применяемого при описании эволюции координат,  $a_i^{(x)}$ ,  $a_i^{(y)}$ ,  $a_i^{(z)}$  - полиномиальные коэффициенты, отождествляемые со скоростями объекта и приведёнными значениями старших производных.

Информационная ситуация, обеспечиваемая системой из  $J$  РЛС, описывается следующей моделью измерений:

$$\begin{aligned} z_r^{(j)}(t_k) &= \sqrt{(x(t_k) - x^{(j)})^2 + (y(t_k) - y^{(j)})^2 + (z(t_k) - z^{(j)})^2} + \xi_r^{(j)}(t_k), \\ z_\psi^{(j)}(t_k) &= \arctg[(x(t_k) - x^{(j)}) / (y(t_k) - y^{(j)})] + \xi_\psi^{(j)}(t_k), \\ j &= \overline{1, J}. \end{aligned} \quad (43)$$

Здесь  $z_r^{(j)}(t_k)$ ,  $z_\psi^{(j)}(t_k)$  - показания дальности и азимута до объекта на  $j$ -й станции в момент времени  $t_k$ ;  $x(t_k)$ ,  $y(t_k)$ ,  $z(t_k)$  - отнесённые к этому времени координаты объекта;  $x^{(j)}$ ,  $y^{(j)}$ ,  $z^{(j)}$  - координаты  $j$ -й станции;  $\xi_r^{(j)}(t_k)$ ,  $\xi_\psi^{(j)}(t_k)$  - случайные

инструментальные погрешности измерений, причем  $M[\xi_r^{(j)}(t_k)] = 0$ ,  
 $M[\xi_r^{(j)}(t_k)\xi_r^{(i)}(t_k)] = D_r^{(j)}\delta_{ij}$ ,  $M[\xi_\psi^{(j)}(t_k)] = 0$ ,  $M[\xi_\psi^{(j)}(t_k)\xi_\psi^{(i)}(t_k)] = D_r^{(j)}\delta_{ij}$ ,  
 $M[\xi_r^{(j)}(t_k)\xi_\psi^{(j)}(t_k)] = 0$ ,  $\delta_{ij}$  - символ Кронекера.

В свете модельных представлений (42) и (43) может быть поставлена обратная задача, целью решения которой является определение вектора

$$s(t_k) = (x(t_k), a_1^{(x)}, a_2^{(x)}, \dots, y(t_k), a_1^{(y)}, a_2^{(y)}, \dots, z(t_k), a_1^{(z)}, a_2^{(z)}, \dots)$$

по измерениям параметров  $z_r^{(j)}(t_k)$ ,  $z_\psi^{(j)}(t_k)$ .

Допуская наличие опорного решения, характеризующего априорные представления о траектории объекта, будем говорить о сведении исходной задачи к задаче «в малом» с искомым вектором  $\delta s(t_k) = (\delta x(t_k), \delta a_1^{(x)}, \delta a_2^{(x)}, \dots, \delta y(t_k), \delta a_1^{(y)}, \delta a_2^{(y)}, \dots, \delta z(t_k), \delta a_1^{(z)}, \delta a_2^{(z)}, \dots)$ , характеризующем погрешности априорных представлений. Линеаризация приводит исходную задачу к следующему виду:

$$\begin{aligned} \delta s(t_{k+1}) &= \Phi(t_k)\delta s(t_k) + q(t_k), \\ \delta z^{(j)}(t_k) &= H(t_k)\delta s(t_k) + \xi^{(j)}(t_k), \\ j &= \overline{1, J}. \end{aligned} \quad (44)$$

Здесь  $q(t_k)$  - вектор не моделируемых параметров движения,  $\xi^{(j)}(t_k)$  - вектор инструментальных погрешностей измерений,  $\delta z^{(j)}(t_k)$  - вектор невязок измерений,  $\Phi(t_k)$ ,  $H(t_k)$  - матричные коэффициенты (матрицы частных производных), формируемые согласно равенствам:

$$\begin{aligned} \delta x(t) &= \delta x(t_0) + \sum_{i=1}^{N_x} \delta a_i^{(x)}(t - t_0)^i, \\ \delta y(t) &= \delta y(t_0) + \sum_{i=1}^{N_y} \delta a_i^{(y)}(t - t_0)^i, \\ \delta z(t) &= \delta z(t_0) + \sum_{i=1}^{N_z} \delta a_i^{(z)}(t - t_0)^i \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} \delta z_r^{(j)}(t_k) &= \frac{x(t_k) - x^{(j)}}{r^{(j)}(t_k)} \delta x(t_k) + \frac{y(t_k) - y^{(j)}}{r^{(j)}(t_k)} \delta y(t_k) + \frac{z(t_k) - z^{(j)}}{r^{(j)}(t_k)} \delta z(t_k), \\ \text{И } \delta z_\Psi^{(j)}(t_k) &= \frac{y(t_k) - y^{(j)}}{(x(t_k) - x^{(j)})^2 + (y(t_k) - y^{(j)})^2} \delta x(t_k) - \frac{x(t_k) - x^{(j)}}{(x(t_k) - x^{(j)})^2 + (y(t_k) - y^{(j)})^2} \delta y(t_k), \\ r^{(j)}(t_k) &= \sqrt{(x(t_k) - x^{(j)})^2 + (y(t_k) - y^{(j)})^2 + (z(t_k) - z^{(j)})^2}, \\ j &= \overline{1, J}. \end{aligned} \tag{46}$$

Для исследования принципиальной разрешимости (наблюдаемости) задачи (44) сведём её к виду (29) и проанализируем матрицу  $\tilde{H}$  на предмет вырожденности. Рассмотрим некоторый временной интервал наблюдения  $[t_1, t_m]$ , за который произведены измерения. Запишем систему уравнений (46) с учётом решения уравнений эволюции погрешностей (45) при начальных условиях  $s(t_*)$ , особо отмечая при этом, что момент времени  $t_*$  может как принадлежать интервалу наблюдения, так и находится вне его. Таким образом, будем иметь следующую систему уравнений измерений:

$$\begin{aligned} \delta z_r^{(j)}(t_k) &= \frac{x(t_k) - x^{(j)}}{r^{(j)}(t_k)} \left( \delta x(t_*) + \sum_{i=1}^{N_x} \delta a_i^{(x)}(t_k - t_*)^i \right) + \\ &+ \frac{y(t_k) - y^{(j)}}{r^{(j)}(t_k)} \left( \delta y(t_*) + \sum_{i=1}^{N_y} \delta a_i^{(y)}(t_k - t_*)^i \right) + \frac{z(t_k) - z^{(j)}}{r^{(j)}(t_k)} \left( \delta z(t_*) + \sum_{i=1}^{N_z} \delta a_i^{(z)}(t_k - t_*)^i \right) + \xi_r^{(j)}(t_k), \\ \delta z_\Psi^{(j)}(t_k) &= \frac{y(t_k) - y^{(j)}}{(x(t_k) - x^{(j)})^2 + (y(t_k) - y^{(j)})^2} \left( \delta x(t_*) + \sum_{i=1}^{N_x} \delta a_i^{(x)}(t_k - t_*)^i \right) - \\ &- \frac{x(t_k) - x^{(j)}}{(x(t_k) - x^{(j)})^2 + (y(t_k) - y^{(j)})^2} \left( \delta y(t_*) + \sum_{i=1}^{N_y} \delta a_i^{(y)}(t_k - t_*)^i \right) + \xi_\Psi^{(j)}(t_k), \\ r^{(j)}(t_k) &= \sqrt{(x(t_k) - x^{(j)})^2 + (y(t_k) - y^{(j)})^2 + (z(t_k) - z^{(j)})^2}, \\ j &= \overline{1, J}, \\ k &= \overline{1, m}. \end{aligned} \tag{47}$$

Последняя система может быть записана компактно в виде

$$Z = \tilde{H} \delta s(t_*) + \tilde{\xi}.$$

В общем случае, в силу линейной независимости системы функций, образующих матрицу системы (47), можно говорить о полноте ранга этой матрицы, а, значит, и о возможности наблюдения полного вектора  $\delta s(t_*)$ . Вместе с тем, следует особо отметить и существование запрещённых (ненаблюдаемых) решений задачи (42), (43), а, следовательно, и опорных решений задачи (45), (46), приводящих соответствующую матрицу  $\tilde{H}$  к вырождению. Проводя её аналитическое исследование можно выделить несколько классов таких ненаблюдаемых решений.

*Утверждение 1.* Если количество станций  $J = 1$ , а опорное решение в задаче (45), (46) такое, что  $z(t_k) - z^{(1)} = 0$  (то есть траектория движения объекта полностью лежит в плоскости вращения антенны РЛС), то соответствующая системе (47) матрица  $\tilde{H}$  - вырождена.

*Доказательство.* Рассмотрим систему уравнений (47). В условиях однопозиционного наблюдения при  $z(t_k) - z^{(1)} = 0$  коэффициенты при величинах  $\delta z(t_*)$  и  $\delta a_i^{(z)}$  всегда будут равны нулю, что, с учетом вида второго уравнения системы (47), означает наличие нулевых столбцов в матрице  $\tilde{H}$ . Такая матрица, очевидно, вырождена.

*Утверждение 2.* Если количество станций  $J = 1$ , а опорное решение в задаче (45), (46) такое, что  $a_i^{(x)} = 0$ ,  $a_i^{(y)} = 0$ ,  $a_i^{(z)} = 0$  (объект покоится), то соответствующая системе (47) матрица  $\tilde{H}$  - вырождена.

*Доказательство.* Рассмотрим систему уравнений (47). При  $a_i^{(x)} = 0$ ,  $a_i^{(y)} = 0$ ,  $a_i^{(z)} = 0$  имеют место равенства:  $x(t_k) = x(t_{k+1})$ ,  $y(t_k) = y(t_{k+1})$ ,  $z(t_k) = z(t_{k+1})$ , что в условиях однопозиционного наблюдения означает линейную зависимость строк соответствующей матрицы  $\tilde{H}$ , то есть матрица  $\tilde{H}$  - вырождена.

*Утверждение 3.* Если количество станций  $J = 1$ , а опорное решение в задаче (45), (46) такое, что  $a_1^{(x)} = const$ ,  $a_1^{(y)} = const$ ,  $a_1^{(z)} = const$ ,  $N_z > 0$  (объект движется по прямой и вертикальная скорость входит в число оцениваемых параметров), то соответствующая системе (47) матрица  $\tilde{H}$  - вырождена.



*Доказательство.* Рассмотрим систему уравнений (47). Не теряя общности, рассмотрим задачу (45), (46) при  $N_x = 1$ ,  $N_y = 1$ ,  $N_z = 1$ . При таком составе искоемых переменных в случае однопозиционного наблюдения система уравнений (26) имеет вид:

$$\begin{aligned} \delta z_r^{(1)}(t_k) &= \frac{x(t_k) - x^{(1)}}{r^{(1)}(t_k)} \delta x(t_*) + \frac{x(t_k) - x^{(1)}}{r^{(1)}(t_k)} (t_k - t_*) \delta a_1^{(x)} + \\ &+ \frac{y(t_k) - y^{(1)}}{r^{(1)}(t_k)} \delta y(t_*) + \frac{y(t_k) - y^{(1)}}{r^{(1)}(t_k)} (t_k - t_*) \delta a_1^{(y)} + \frac{z(t_k) - z^{(1)}}{r^{(1)}(t_k)} \delta z(t_*) + \frac{z(t_k) - z^{(1)}}{r^{(1)}(t_k)} (t_k - t_*) \delta a_1^{(z)} + \xi_r^{(1)}(t_k), \\ \delta z_\psi^{(1)}(t_k) &= \frac{y(t_k) - y^{(1)}}{(x(t_k) - x^{(1)})^2 + (y(t_k) - y^{(1)})^2} \delta x(t_*) + \frac{y(t_k) - y^{(1)}}{(x(t_k) - x^{(1)})^2 + (y(t_k) - y^{(1)})^2} (t_k - t_*) \delta a_1^{(x)} - \\ &- \frac{x(t_k) - x^{(1)}}{(x(t_k) - x^{(1)})^2 + (y(t_k) - y^{(1)})^2} \delta y(t_*) - \frac{x(t_k) - x^{(1)}}{(x(t_k) - x^{(1)})^2 + (y(t_k) - y^{(1)})^2} (t_k - t_*) \delta a_1^{(y)} + \xi_\psi^{(1)}(t_k), \\ r^{(1)}(t_k) &= \sqrt{(x(t_k) - x^{(1)})^2 + (y(t_k) - y^{(1)})^2 + (z(t_k) - z^{(1)})^2}, \\ &k = \overline{1..m}. \end{aligned} \quad \text{С}$$

учётom изучаемых свойств движения имеют место дополнительные условия:  $x(t_k) = V_x(t_k - t_*) + x(t_*)$ ,  $y(t_k) = V_y(t_k - t_*) + y(t_*)$ ,  $z(t_k) = V_z(t_k - t_*) + z(t_*)$  при константных значениях скоростей  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ .

Для того, чтобы показать вырожденность соответствующей матрицы  $\tilde{H}$  докажем линейную зависимость её столбцов в указанных условиях (их количество – 6 в данном случае).

Если столбцы матрицы  $\tilde{H}$  – линейно зависимые, то существуют такие 6 чисел  $A, B, C, D, E, F$  не равные одновременно нулю, что имеют место равенства (не теряя общности, для простоты будем считать, что  $x^{(1)} = 0$ ,  $y^{(1)} = 0$ ,  $z^{(1)} = 0$ ,  $t_* = 0$ ):

$$AV_x t_k + BV_x t_k^2 + CV_y t_k + DV_y t_k^2 + EV_z t_k + FV_z t_k^2 = 0, \quad (48)$$

$$AV_y t_k + BV_y t_k^2 - CV_x t_k - DV_x t_k^2 = 0.$$

Чтобы эти два равенства были верны для любых  $t_k$ , необходимо и достаточно одновременное выполнение следующих условий:

$$BV_x + DV_y + FV_z = 0,$$

$$AV_x + CV_y + EV_z = 0,$$

$$BV_y - DV_x = 0,$$

$$AV_y - CV_x = 0.$$

Очевидно, что этим условиям могут удовлетворить бесконечное множество значений  $A, B, C, D, E, F$ . Таким образом, при заданных свойствах наблюдения и движения существует континуальное множество шестёрок чисел  $A, B, C, D, E, F$ , обращающих (48) в верное равенство (то есть линейная комбинация столбцов соответствующей матрицы  $\tilde{H}$  обращается в 0), а, значит, соответствующая матрица  $\tilde{H}$  - вырождена.

Аналогичным путём (правда, несколько усложнив выражения) можно показать вырожденность  $\tilde{H}$  и при  $x^{(1)} \neq 0, y^{(1)} \neq 0, z^{(1)} \neq 0, t_* \neq 0$ . При более высоких размерностях задачи  $\tilde{H}$  будет также, очевидно, вырождена, так как у неё будут линейно зависимы уже рассмотренные 6 столбцов.

*Утверждение 4.* Если количество станций  $J > 1$ , а опорное решение в задаче (45), (46) такое, что  $z(t_k) - z^{(j)} = 0$  для всех  $j$  (все станции расположены на одной высоте и траектория объекта полностью лежит в плоскости вращения их антенн), то соответствующая системе (47) матрица  $\tilde{H}$  - вырождена.

*Доказательство.* Рассмотрим систему уравнений (47). При указанной конфигурации системы при  $z(t_k) - z^{(j)} = 0$  коэффициенты при величинах  $\delta z(t_*)$  и  $\delta a_i^{(z)}$  всегда будут равны нулю, что, с учётом вида второго уравнения системы (47), означает наличие нулевых столбцов в соответствующей матрице  $\tilde{H}$ . Такая матрица, очевидно, вырождена.

Несмотря на рассмотренные ограничения, система (47) остаётся невырожденной для достаточно широкого класса решений (траекторий), характерных для реальных ситуаций. (например, при движениях объекта в рамках модели (42) вне плоскости вращения антенн). Исходя из этого, можно сделать вывод, что постановка задачи наблюдения в виде (42), (43) правомерна с точки зрения её принципиальной разрешимости.

Отмеченная сингулярность построенной модели вблизи точки  $z(t_k) - z^{(j)} = 0$ , приводящая к обнулению соответствующего коэффициента в первом уравнении системы (47), отвечающего за определение координаты  $z$  наблюдаемого объекта, способна существенно ограничить эффективность моделей такого типа, особенно в области малых отношений «высота/дальность». Определённые перспективы в этом направлении может дать переход в модели (42), (43) от прямоугольных координат к сферическим.

Рассмотрим уравнение движения объекта в сферической системе координат  $\varphi, \lambda, R$  - соответственно географические широта, долгота и расстояние до объекта от центра Земли. В качестве модели поверхности Земли, не существенно нарушая общность модельных представлений (с учётом пространственной локальности рассматриваемой задачи) примем сферу. Эволюцию координат будем описывать моделью следующего полиномиального вида:

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \varphi(t_0) + \sum_{i=1}^{N_\varphi} a_i^{(\varphi)} (t - t_0)^i, \\ \lambda(t) &= \lambda(t_0) + \sum_{i=1}^{N_\lambda} a_i^{(\lambda)} (t - t_0)^i, \\ R(t) &= R(t_0) + \sum_{i=1}^{N_R} a_i^{(R)} (t - t_0)^i. \end{aligned} \quad (49)$$

Здесь  $N_\varphi, N_\lambda, N_R$  - порядок полинома, применяемого при описании эволюции координат,  $a_i^{(\varphi)}, a_i^{(\lambda)}, a_i^{(R)}$  - полиномиальные коэффициенты, отождествляемые со скоростями объекта и приведёнными значениями старших производных.

Имея в виду уравнения измерений (43), преобразованные к новым переменным согласно правилам

$$\begin{aligned} x &= -X \sin \lambda_0 + Y \cos \lambda_0, \\ y &= -Y \sin \lambda_0 \sin \varphi_0 - X \cos \lambda_0 \sin \varphi_0 + Z \cos \varphi_0, \\ z &= Z \sin \varphi_0 + Y \sin \lambda_0 \cos \varphi_0 + X \cos \lambda_0 \cos \varphi_0 - R_0, \end{aligned}$$

$$X = R \cos \varphi \cos \lambda,$$

$$Y = R \cos \varphi \sin \lambda,$$

$$Z = R \sin \varphi,$$

(где  $\varphi_0, \lambda_0, R_0$  - координаты начала отсчёта системы  $xuz$  в системе  $\varphi\lambda R$ ) будем говорить о постановке обратной задачи с искомым вектором  $s^{(\varphi\lambda R)}(t_k) = (\varphi(t_k), a_1^{(\varphi)}, a_2^{(\varphi)}, \dots, \lambda(t_k), a_1^{(\lambda)}, a_2^{(\lambda)}, \dots, R(t_k), a_1^{(R)}, a_2^{(R)}, \dots)$ .

Линеаризация задачи приводит её к виду:

$$\begin{aligned} \delta s^{(\varphi\lambda R)}(t_{k+1}) &= \Phi^{(\varphi\lambda R)}(t_k) \delta s^{(\varphi\lambda R)}(t_k) + q^{(\varphi\lambda R)}(t_k), \\ \delta z^{(j)}(t_k) &= H^{(\varphi\lambda R)}(t_k) \delta s^{(\varphi\lambda R)}(t_k) + \xi^{(j)}(t_k), \\ j &= \overline{1, J}. \end{aligned} \quad (50)$$

с искомым вектором

$$\delta s^{(\varphi\lambda R)}(t_k) = (\delta \varphi(t_k), \delta a_1^{(\varphi)}, \delta a_2^{(\varphi)}, \dots, \delta \lambda(t_k), \delta a_1^{(\lambda)}, \delta a_2^{(\lambda)}, \dots, \delta R(t_k), \delta a_1^{(R)}, \delta a_2^{(R)}, \dots),$$

где  $q^{(\varphi\lambda R)}(t_k)$  - вектор не моделируемых параметров движения,  $\xi^{(j)}(t_k)$  - вектор инструментальных погрешностей,  $\delta z^{(j)}(t_k)$  - вектор невязок измерений,  $\Phi^{(\varphi\lambda R)}(t_k)$  и  $H^{(\varphi\lambda R)}$  - матричные коэффициенты (матрицы частных производных), формируемые согласно равенствам

$$\begin{aligned} \delta \varphi(t) &= \delta \varphi(t_0) + \sum_{i=1}^{N_\varphi} \delta a_i^{(\varphi)} (t - t_0)^i, \\ \delta \lambda(t) &= \delta \lambda(t_0) + \sum_{i=1}^{N_\lambda} \delta a_i^{(\lambda)} (t - t_0)^i, \\ \delta R(t) &= \delta R(t_0) + \sum_{i=1}^{N_R} \delta a_i^{(R)} (t - t_0)^i \end{aligned} \quad (51)$$

и (46), приведённых к координатам  $\varphi\lambda R$ .

Анализ принципиальной разрешимости задачи (50) показывает, что переход к новым переменным позволяет несколько сузить класс характерных ненаблюдаемых траекторий, в частности, исключает сингулярность модели (при опорных движениях объекта согласно уравнениям (49)) в области малых высот. Кроме того, сферическая модель претендует на лучшую физическую корректность,

обусловленную учетом проявления влияния кривизны земной поверхности при навигации движущихся объектов с использованием больших интервалов наблюдения, а также загоризонтных целей.

Завершая описание постановки и модельных представлений рассматриваемой задачи наблюдения, остановимся ещё на одном её особом свойстве, отождествляемом с понятием многоэкстремальности, а именно – о неопределённости положения наблюдаемых объектов относительно горизонта системы РЛС. Свойство это хорошо иллюстрируется следующим примером.

Рассмотрим прямоугольную систему координат  $xz$ . Не теряя общности, положим, что измерительная система состоит из двух РЛС и наблюдаемый объект расположен так, что обе станции и цель лежат в плоскости  $xz$ , так, что  $R_1^2 = x^2 + z^2$ ,  $R_2^2 = (x - x^{(2)})^2 + (z - z^{(2)})^2$  (рисунок 55), где  $R_1$ ,  $R_2$  - дальности от объекта до станций,  $x$ ,  $z$  - координаты объекта,  $x^{(2)}$ ,  $z^{(2)}$  - координаты второй станции.

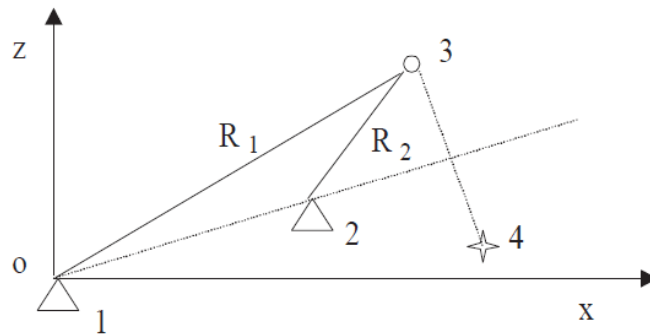


Рисунок 55 - Иллюстрация многоэкстремальности задачи наблюдения. 1, 2 – номера станций; 3, 4 – действительное и мнимое положение объекта

Считая для простоты, что измерения углов однозначно идентифицируют рассматриваемую плоскость  $xz$ , положим, что стоит задача оценки координат наблюдаемого объекта в указанной плоскости по измерениям дальностей. Пусть  $\hat{x}$ ,

$\hat{z}$  - значения оценки координат объекта, а  $\hat{R}_1, \hat{R}_2$  - соответствующие им значения дальностей, так что  $\hat{R}_1^2 = \hat{x}^2 + \hat{z}^2$ ,  $\hat{R}_2^2 = (\hat{x} - x^{(2)})^2 + (\hat{z} - z^{(2)})^2$ . Введём функционал

$$G = (R_1 - \hat{R}_1)^2 + (R_2 - \hat{R}_2)^2.$$

Тогда задача оценки координат наблюдаемого объекта сводится к экстремальной задаче

$$\hat{s} = \arg \min_{\hat{x}, \hat{z}} G, \quad (52)$$

где  $s$  - вектор с компонентами  $x, z$ . Имея в виду условия экстремума

$$\frac{\partial G}{\partial \hat{x}} = 0, \quad \frac{\partial G}{\partial \hat{z}} = 0$$

находим, что задача (52) имеет две точки минимума

$$\hat{x} = x, \quad \hat{z} = z$$

и

$$\hat{x} = \frac{2zz^{(2)}x^{(2)} + x(x^{(2)})^2 - x(z^{(2)})^2}{(z^{(2)})^2 + (x^{(2)})^2},$$

$$\hat{z} = -\frac{2xx^{(2)}z^{(2)} + z(x^{(2)})^2 - z(z^{(2)})^2}{(z^{(2)})^2 + (x^{(2)})^2},$$

одна из которых (первая) соответствует истинному положению объекта, а вторая – мнимому, расположенному по другую сторону плоскости горизонта РЛС (рисунок 55). Заметим, что это две изолированные точки. Если бы экстремальное множество было континуальным, следовало бы говорить не о многоэкстремальности, а о принципиальной неразрешимости (не наблюдаемости) задачи.

Показанное в примере свойство задачи (многоэкстремальность) в общем случае иногда может представлять собой довольно серьёзную проблему для систем РЛС с любой конфигурацией и числом станций (в примере было взято две станции для простоты и наглядности). Вместе с тем, на практике обычно имеет место ситуация, когда станции устанавливаются на высоте порядка 50-100 метров над поверхностью Земли, и в этом случае часто указанная мнимая точка располагается

как бы «под поверхностью» земного шара, исключая себя, тем самым, из множества возможных положений объекта. Таким образом, при решении рассматриваемой задачи наблюдения ограничение лишь так называемым «верхним полупространством» системы станций является, как правило, вполне корректным.

#### **4.3 Теоретико-численное исследование задачи наблюдения воздушных объектов двухкоординатными измерителями**

При исследовании задачи (42), (43) будем иметь в виду главным образом её модель в сферических координатах (50), как модель с более узким классом ненаблюдаемых траекторий и более корректную физически, а, также, проявившую себя в исследованиях как более устойчивую по отношению к ошибкам измерений и вычислений.

Для конструктивного решения рассматриваемой задачи (50) отмечаемого у неё свойства наблюдаемости недостаточно. Одна из причин этого состоит в том, что решение задачи осуществляется в условиях измерительных погрешностей, которые существенно влияют на качество оценки искомых параметров. Другая причина ограниченной применимости классического понятия наблюдаемости – нелинейность исходной задачи и её решение в условиях конечной точности вычислений, связанной с ограниченностью разрядной сетки ЭВМ. Это указывает на необходимость проведения вычислительных экспериментов, дающих ответ на вопрос о конструктивной разрешимости задачи в типичных ситуациях и направленных на получение как априорных (теоретических), так и апостериорных (численно-имитационных) оценок разрешимости.

### 4.3.1 Априорные оценки разрешимости задачи

Будем проводить априорную оценку разрешимости рассматриваемой задачи (50) путём сингулярного анализа и вероятностной интерпретации дисперсионных матриц модели (47), приведённой к сферическим координатам  $\varphi\lambda R$ .

В силу нелинейности исходной задачи проблему её процедурной разрешимости будем рассматривать сквозь призму двух понятий. Во-первых, устойчивости линейных процедур оценивания вектора состояния  $\delta s^{(\varphi\lambda R)}(t_k)$ , непосредственно связанной с конечностью точности вычислений и, во-вторых, устойчивости сходимости нелинейного итерационного процесса оценки вектора  $s^{(\varphi\lambda R)}(t_k)$ , как результата нескольких последовательных вычислений вектора  $\delta s^{(\varphi\lambda R)}(t_k)$  и соответствующей корректировки линеаризационных опорных решений. В качестве априорного показателя устойчивости линейных процедур будем рассматривать число обусловленности соответствующей матрицы  $\tilde{H}$ , имея в виду условие (31). В качестве критерия сходимости итерационного процесса эволюции опорного решения предлагается применить специальный показатель, получаемый с использованием дисперсионных матриц.

Рассмотрим конечномерную модель типа (29)

$$Z = \tilde{H}\delta s(t_*) + \tilde{\xi}$$

с процедурной моделью метода наименьших квадратов (МНК) типа (30)

$$\tilde{H}^T \tilde{R}^{-1} \tilde{H} \delta \hat{s}(t_*) = \tilde{H}^T \tilde{R}^{-1} Z,$$

где  $R = M[\tilde{\xi}\tilde{\xi}^T]$  - невырожденная матрица, ( $M[*]$  - оператор математического ожидания).

В качестве количественной оценки характеристики погрешности МНК оценивания вектора  $\delta s(t_*)$  будем рассматривать дисперсионную матрицу  $D = M[(\delta s(t_*) - \delta \hat{s}(t_*))(\delta s(t_*) - \delta \hat{s}(t_*))^T] = (\tilde{H}^T \tilde{R}^{-1} \tilde{H})^{-1}$ , диагональные элементы которой дают представление о дисперсии ошибки оценивания соответствующих компонент вектора состояния. Можно показать, что при решении задачи



процедурной моделью типа (30), распределение ошибки оценивания  $\delta s(t_*) - \delta \hat{s}(t_*)$  стремится (по вероятности) к нормальному распределению независимо от распределения случайных величин  $\tilde{\xi}$ . Это даёт возможность определения интервалов, в которых с заданной наперёд вероятностью находятся оцениваемые компоненты вектора  $\delta s(t_*)$ . Так, например, можно утверждать, что  $\delta \hat{s}_l(t_*) \in [\delta s_l(t_*) - 0.7\sqrt{D_{ll}}, \delta s_l(t_*) + 0.7\sqrt{D_{ll}}]$  с вероятностью, примерно, 0.5 и  $\delta \hat{s}_l(t_*) \in [\delta s_l(t_*) - 2\sqrt{D_{ll}}, \delta s_l(t_*) + 2\sqrt{D_{ll}}]$  с вероятностью, примерно, 0.99, где  $\delta \hat{s}_l(t_*)$  - оценка  $l$ -й компоненты вектора  $\delta s(t_*)$ ,  $D_{ll}$  - элемент матрицы  $D$ , находящийся на пересечении  $l$ -й строки и  $l$ -го столбца. Особое значение для исследуемой задачи имеет случай, когда выполняется условие

$$a\sqrt{D_R} \leq R - R_{zop}, \quad (53)$$

где  $a$  - величина, зависящая от заданной вероятности «попадания» в интервал,  $D_R$  - значение дисперсии (соответствующего коэффициента матрицы  $D$ ) оценки радиальной компоненты вектора  $\delta s(t_*)$ ,  $R$  - значение радиальной компоненты вектора  $\delta s(t_*)$ ,  $R_{zop}$  - расстояние от центра Земли до горизонта системы РЛС. Если иметь в виду, что плоскость горизонта системы РЛС является как бы «линией раздела» областей нахождения возможных решений задачи (см. рисунок 55), то можно говорить, что условие (53) является достаточным условием для «не перехода» оценки вектора состояния из одной области в другую с заданной наперёд вероятностью. При этом, как показывает опыт, на практике в качестве значения правой части неравенства (53) представляется удобным принять  $R - R_{zop} = h_1$ , где  $h_1$  - значение высоты объекта относительно самой низкой станции в системе.

Имея в виду всё сказанное, рассмотрим проблему сходимости с другой стороны. Пусть объект находится на высоте  $h_1$ , и ей соответствует погрешность оценивания со среднеквадратичным отклонением  $\sigma = \sqrt{D_R}$ . Тогда вероятность

«не перехода» оценки в другую область (с учётом нормальности  $\delta s(t_*) - \delta \hat{s}(t_*)$ ) может быть найдена формулой

$$P = \int_0^{2h_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-(t-h_1)^2/2\sigma^2} dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-h_1/\sigma}^{h_1/\sigma} e^{-t^2/2} dt. \quad (54)$$

Указанную вероятность возможно использовать в качестве универсального показателя устойчивости работы итерационного алгоритма эволюции опорного решения, дополнительно задавшись при этом условием достаточного типа.

$$P > P_*, \quad (55)$$

где  $P$  - вычисленное по заданным пределам согласно (54) значение интеграла Лапласа, а  $P_*$  - некоторое критическое число, выбираемое опытным путём, например, в рассматриваемой задаче удовлетворяющее своему назначению критерия сходимости итерационных процедур при  $P_* = 0.99$  ( $2\sigma$ ).

Принимая во внимание совокупность рассмотренных здесь модельных представлений, можно приближенно, но, как показывает эксперимент, с весьма хорошей степенью адекватности, интерпретировать  $P$  как вероятность того, что объект может быть причислен (по высоте) к классу воздушных. При этом следует особо отметить, что значение  $P$  не зависит от способа такой селекции, а является универсальной характеристикой системы (42), (43) в целом.

С учётом изложенного, можно говорить, что (53) и (55) в дополнение к (31), являются условиями, позволяющими априорно выделять из навигационного пространства области, в которых гарантируется устойчивое решение рассматриваемой задачи наблюдения типа (42), (43). Ниже приведены результаты расчетов, характеризующие разрешимость задачи в типичных ситуациях.

*Однопозиционное наблюдение.* Рассмотрим систему на базе одной РЛС ( $J = 1$ ).

Пусть модель задачи (50) характеризуется значениями  $N_\varphi = 1$ ,  $N_\lambda = 1$ ,  $N_R = 0$ . Рассмотрим равномерное прямолинейное движение объекта на постоянной высоте (здесь и далее под понятием «прямолинейное движение» будем понимать

движение, прямолинейное относительно поверхности Земли, то есть происходящее по дуге большого круга) по направлению на РЛС, измерения которой производятся в течение 300с с интервалом 3с.

На рисунке 56 показаны значения десятичных логарифмов чисел обусловленности нормированной по столбцам матрицы  $\tilde{H}^T \tilde{R}^{-1} \tilde{H}$  для скорости объекта 20м/с (сплошная линия) и 10м/с (точки) при различных отношениях  $h/\rho$ , где  $\rho$  - расстояние от РЛС до «следа» объекта на поверхности горизонта по дуге большого круга  $\rho = \sqrt{((\lambda - \lambda^{(1)})R_{zop})^2 + ((\varphi - \varphi^{(1)})R_{zop})^2}$ ,  $h$  - высота объекта относительно РЛС.

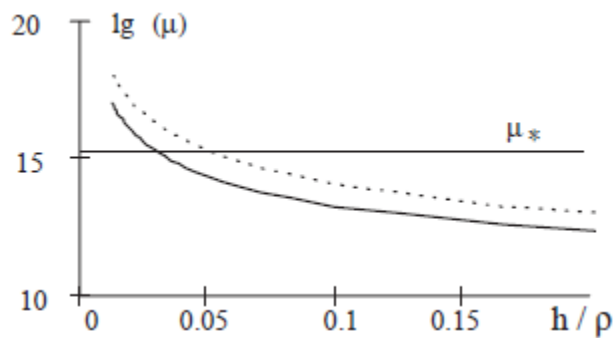


Рисунок 56 - Обусловленность задачи (50) при  $J = 1$ ,  $N_\varphi = 1$ ,  $N_\lambda = 1$ ,  $N_R = 0$

Указанные значения скоростей принадлежат диапазону, когда, собственно, и возникает проблема различения надводных и воздушных объектов; при однопозиционном наблюдении скорость объекта непосредственным образом влияет на наблюдаемость задачи, что делает интересным размещение графиков, построенных для разных скоростей, на одном рисунке для сравнения. Если иметь в виду условие (31), видно, что вычислительная устойчивость решения задачи (50) при использовании чисел расширенной (long double) точности (аппаратно реализуемой современными ЭВМ) гарантируется до, примерно,  $h/\rho = 0.03$  при скорости 20 м/с и до, примерно,  $h/\rho = 0.05$  при скорости 10 м/с. Таким образом, можно констатировать, что гарантированная устойчивость решения задачи (50) при однопозиционном наблюдении имеет место лишь для сравнительно небольшой области навигационного пространства.

Перейдём к рассмотрению качества оценки имея в виду условия (53) и (55). Рисунок 57 даёт представление об областях, где согласно этим условиям имеет место устойчивость итерационного процесса нелинейного оценивания.

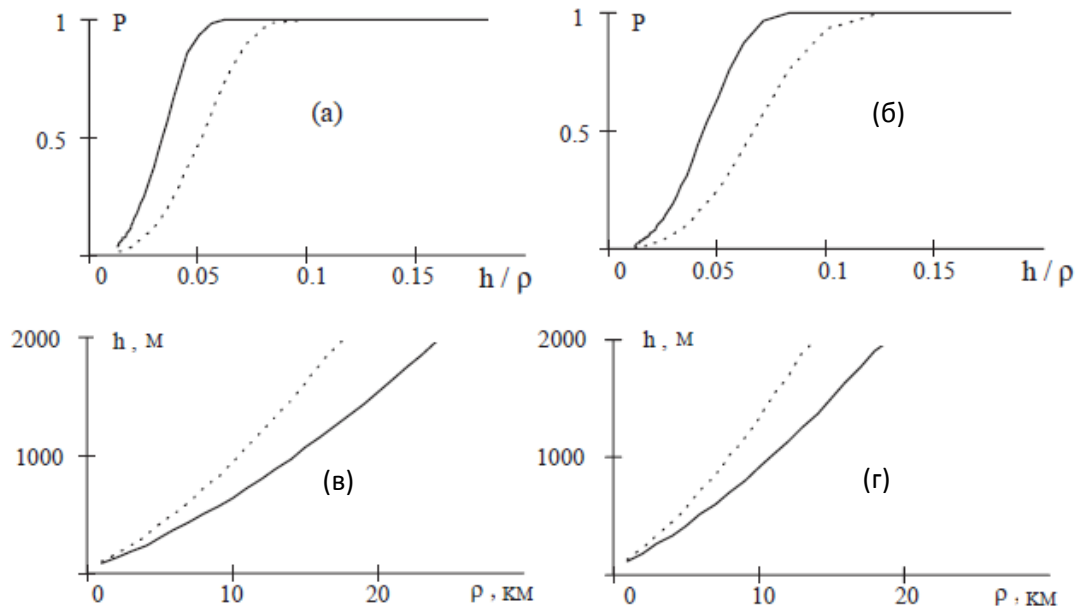


Рисунок 57 - Области устойчивого решения задачи (50) при  $J = 1$ ,  $N_\varphi = 1$ ,  $N_\lambda = 1$ ,  $N_R = 0$

На рисунках 57а и 57б показаны значения  $P$ , вычисленные для различных значений отношения  $h/\rho$  при скоростях объекта 20м/с (сплошная линия) и 10м/с (точки). При этом считается, что  $\xi_r$  равномерно распределено на интервале  $[-6.25м, 6.25м]$ ,  $\xi_\psi$  равномерно распределено в интервале  $[-0.03^\circ, 0.03^\circ]$  (рисунок 57а) и что  $\xi_r$  равномерно распределено на интервале  $[-12.5м, 12.5м]$ ,  $\xi_\psi$  равномерно распределено в интервале  $[-0.06^\circ, 0.06^\circ]$  (рисунок 57б). Видно, что, например, при меньшей ошибке измерений и скорости 20м/с условие (55) при  $P_* = 0.99$  выполняется, начиная с  $h/\rho = 0.06$ , т.е. для объектов, удалённых на расстояние 10 км, устойчивое решение задачи гарантируется для высот  $>600$ м. На рисунках 57в и 57г показаны соответствующие границы собственно пространства, где возможно устойчивое решение задачи (выше соответствующего графика, условие (53) при  $a=2$ ). При этом моделирование снова проводилось при скоростях объекта 20м/с

(сплошная линия) и 10 м/с (точки) и при погрешностях измерений  $\xi_r \in [-6.25\text{ м}, 6.25\text{ м}]$ ,  $\xi_\psi \in [-0.03^\circ, 0.03^\circ]$  (рисунок 57в) и  $\xi_r \in [-12.5\text{ м}, 12.5\text{ м}]$ ,  $\xi_\psi \in [-0.06^\circ, 0.06^\circ]$  (рисунок 57г). Видно, что, скажем, при меньшей измерительной ошибке при скорости 20 м/с и дальности 20 км устойчивость итерационной процедуры гарантируется для объектов, движущихся относительно станции на высоте, примерно  $h > 1400\text{ м}$ , а на дальности 10 км – примерно  $h > 650\text{ м}$ .

Оставаясь в рамках системы с одной РЛС рассмотрим модель задачи (50) с расширенным динамическим диапазоном, характеризуемую значениями  $N_\varphi = 2$ ,  $N_\lambda = 2$ ,  $N_R = 0$ . При этом будем иметь в виду то же равномерное движение объекта со скоростями 10 м/с (сплошная линия) и 20 м/с (точки) и те же свойства измерений, что и выше.

На рисунке 58 показаны значения десятичных логарифмов чисел обусловленности нормированной по столбцам матрицы  $\tilde{H}^T \tilde{R}^{-1} \tilde{H}$ . Имея в виду условие (31) видим, что обусловленность задачи при значения десятичных логарифмов чисел обусловленности нормированной по столбцам матрицы  $\epsilon_1 \approx 10^{-20}$  существенно выше критической при всех актуальных для практики значениях  $h/\rho$ .

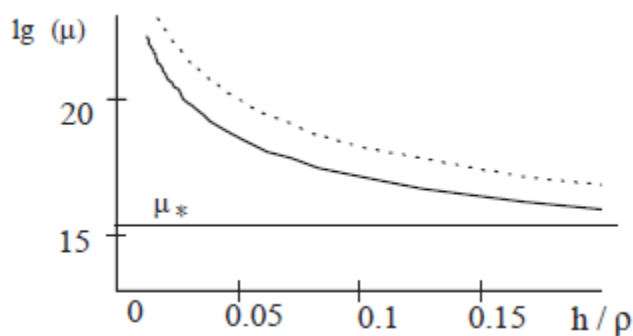


Рисунок 58 - Обусловленность задачи (50) при  $J = 1$ ,  $N_\varphi = 2$ ,  $N_\lambda = 2$ ,  $N_R = 0$

Рисунок 59 иллюстрирует, согласно условиям (53) и (55), области устойчивого решения задачи. При этом 59а и 59в – для  $\xi_r \in [-6.25\text{ м}, 6.25\text{ м}]$  и

$\xi_\psi \in [-0.03^\circ, 0.03^\circ]$ , 59б и 59г – для  $\xi_r \in [-12.5\text{ м}, 12.5\text{ м}]$  и  $\xi_\psi \in [-0.06^\circ, 0.06^\circ]$ . Видно, что свойства указанных областей (чрезмерно жёсткие условия на величину  $h/\rho$ ) делают однопозиционное наблюдение с расширенным динамическим диапазоном (даже при использовании для решения задачи оценки вычислений высокой точности  $\varepsilon_1 \ll 10^{-20}$ ) неосуществимым на практике.

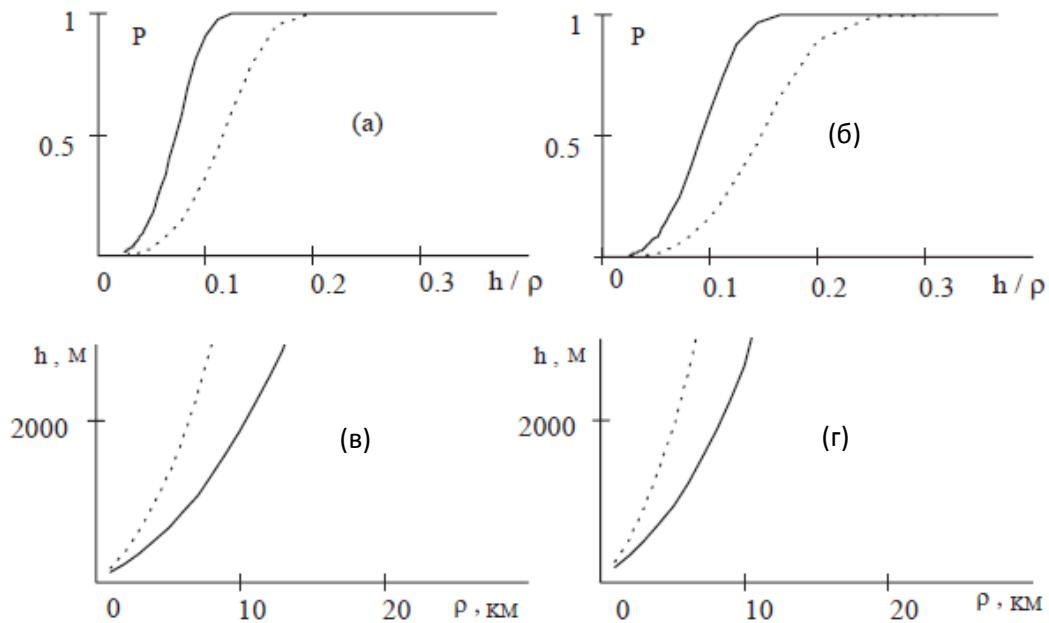


Рисунок 59 - Области устойчивого решения задачи (50) при  $J = 1$ ,  $N_\varphi = 2$ ,  $N_\lambda = 2$ ,  $N_R = 0$

*Двухпозиционное наблюдение.* Перейдём к системе, состоящей из двух РЛС. Имея в виду те же свойства ошибок измерений и движения объекта и руководствуясь в том числе соображениями сравнения, построим априорные оценки разрешимости задачи (50) теперь уже при двухпозиционной информационной базе.

Пусть имеются две РЛС, расположенные на одинаковой высоте и отстоящие друг от друга на расстояние 5 км. Пусть объект движется прямолинейно и равномерно в направлении на середину линии, соединяющей станции, перпендикулярно ей. Радиолокационные наблюдения проводятся на интервале 30 с с периодом 3 с (то есть в оценке участвуют по 10 измерений от каждой станции).

Руководствуясь указанной моделью движения и измерений, рассмотрим задачу (50) с простым и расширенным динамическим диапазоном при  $J=2$ ,  $N_\varphi=1$ ,  $N_\lambda=1$ ,  $N_R=0$  (сплошные линии на графиках) и  $J=2$ ,  $N_\varphi=2$ ,  $N_\lambda=2$ ,  $N_R=0$  (точки).

На рисунке 60 показаны десятичных логарифмов чисел обусловленности нормированной по столбцам матрицы  $\tilde{H}^T \tilde{R}^{-1} \tilde{H}$ . Видно, что обусловленность задачи при двухпозиционном наблюдении в обоих случаях (простой и расширенный динамический диапазон) существенно ниже критической в достаточно широком диапазоне значений  $h/\rho$ .

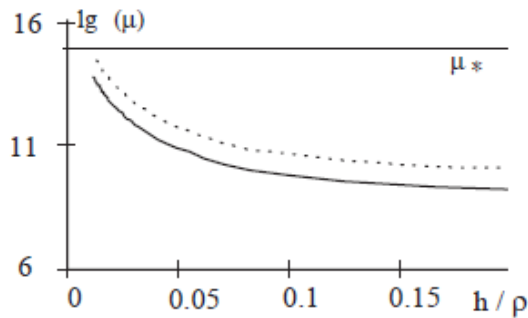


Рисунок 60 - Обусловленность задачи (50) при  $J=2$ ,  $N_\varphi=1$ ,  $N_\lambda=1$ ,  $N_R=0$  (сплошная линия)

и  $J=2$ ,  $N_\varphi=2$ ,  $N_\lambda=2$ ,  $N_R=0$  (точки)

Рисунок 61 иллюстрирует, согласно условиям (53) и (55), области устойчивого решения задачи. При этом 61а и 61в – для  $\xi_r \in [-6.25м, 6.25м]$  и  $\xi_\psi \in [-0.03^\circ, 0.03^\circ]$ , 61б и 61г – для  $\xi_r \in [-12.5м, 12.5м]$  и  $\xi_\psi \in [-0.06^\circ, 0.06^\circ]$ . Видно, что, во-первых, эти области у рассматриваемых моделей практически идентичны (сплошная линия и точки практически совпадают), и, во-вторых, занимают весьма высокий диапазон значений  $h/\rho$ . Скажем, для меньшей измерительной погрешности устойчивость решения рассматриваемой задачи имеет место до, примерно  $h/\rho = 0.027$ .

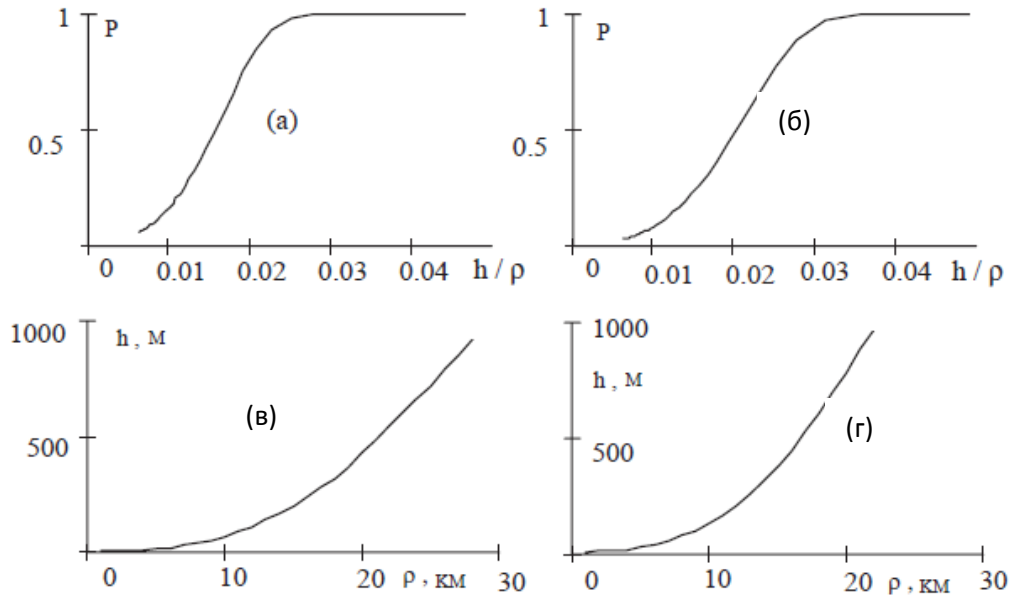


Рисунок 61 - Области устойчивого решения задачи (50) при  $J = 2$ ,  $N_\varphi = 1$ ,  $N_\lambda = 1$ ,  $N_R = 0$  и

$$J = 2, N_\varphi = 2, N_\lambda = 2, N_R = 0$$

Двухпозиционное наблюдение существенно расширяет множество наблюдаемых траекторий объектов, в частности, позволяет поставить задачу с расширенным динамическим диапазоном изменения радиальной координаты объекта  $R$  (т.е. высоты объекта), то есть наблюдать объект при  $N_R > 0$  (напомним, что для однопозиционного наблюдения такая задача является ненаблюдаемой).

Рассмотрим задачу (50) при следующих характеристиках модели:  $J = 2$ ,  $N_\varphi = 1$ ,  $N_\lambda = 1$ ,  $N_R = 1$  (сплошные линии рисунков) и  $J = 2$ ,  $N_\varphi = 2$ ,  $N_\lambda = 2$ ,  $N_R = 1$  (точки). На рисунке 62 показаны значения десятичных логарифмов чисел обусловленности нормированной по столбцам матрицы  $\tilde{H}^T \tilde{R}^{-1} \tilde{H}$ . Видно, что обусловленность задачи при двухпозиционном наблюдении с моделью  $J = 2$ ,  $N_\varphi = 1$ ,  $N_\lambda = 1$ ,  $N_R = 1$  ниже критической, а с моделью  $J = 2$ ,  $N_\varphi = 2$ ,  $N_\lambda = 2$ ,  $N_R = 1$  - существенно выше (для  $\varepsilon_1 \approx 10^{-20}$ ).

Рисунок 63 иллюстрирует, согласно условиям (53) и (55), области устойчивого решения задачи. При этом 63а и 63в - для  $\xi_r \in [-6.25\text{м}, 6.25\text{м}]$  и



$\xi_{\psi} \in [-0.03^{\circ}, 0.03^{\circ}]$ , 63б и 63г – для  $\xi_r \in [-12.5\text{ м}, 12.5\text{ м}]$  и  $\xi_{\psi} \in [-0.06^{\circ}, 0.06^{\circ}]$ .

Видно, что как и при  $N_R = 0$ , эти области у рассматриваемых двух моделей практически идентичны и имеют широкий диапазон значений  $h/\rho$ .

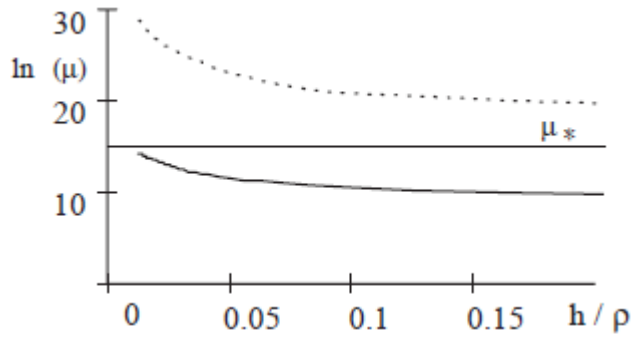


Рисунок 62 - Обусловленность задачи (50) при  $J = 2$ ,  $N_{\varphi} = 1$ ,  $N_{\lambda} = 1$ ,  $N_R = 1$  (сплошная линия) и  $J = 2$ ,  $N_{\varphi} = 2$ ,  $N_{\lambda} = 2$ ,  $N_R = 1$  (точки)

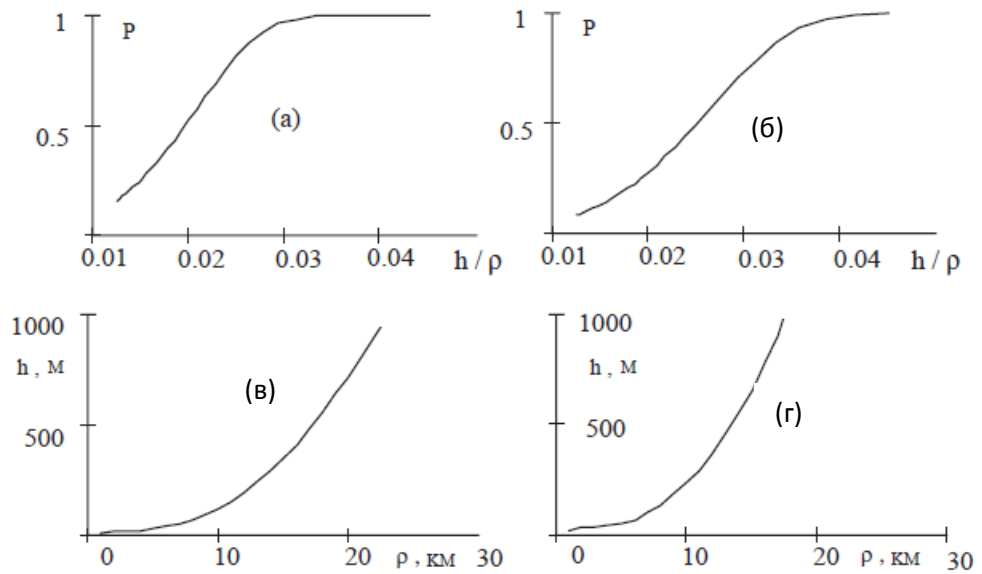


Рисунок 63 - Области устойчивого решения задачи (50) при  $J = 2$ ,  $N_{\varphi} = 1$ ,  $N_{\lambda} = 1$ ,  $N_R = 1$  и

$$J = 2, N_{\varphi} = 2, N_{\lambda} = 2, N_R = 1$$

Тем не менее, ещё раз обратившись к рисунку 62, отметим, что для реализации на практике модели  $J = 2$ ,  $N_\varphi = 2$ ,  $N_\lambda = 2$ ,  $N_R = 1$  необходимо предъявление повышенных требований к точности вычислительного устройства, что способно существенно ограничить применимость модели такого типа.

В целом на основании представленного материала можно констатировать, что расширение информационной базы при переходе от одно- к двухпозиционному наблюдению позволяет, конечно же, качественно расширить диапазон возможных движений объектов и наблюдаемую область навигационного пространства.

*Трёх- и многопозиционное наблюдение.* Что касается перспективы качественного изменения разрешимости задачи в лучшую сторону при дальнейшем увеличении количества РЛС, то оптимизм в этом направлении ограничивается уже при исследовании задачи для трёх станций.

На рисунке 64 представлены значения десятичных логарифмов чисел обусловленности нормированной по столбцам матрицы  $\tilde{H}^T \tilde{R}^{-1} \tilde{H}$  для двух- ( $J = 2$ , сплошная линия) и трёхпозиционного ( $J = 3$ , точки) наблюдения при описанных выше движениях объекта и свойствах измерений.

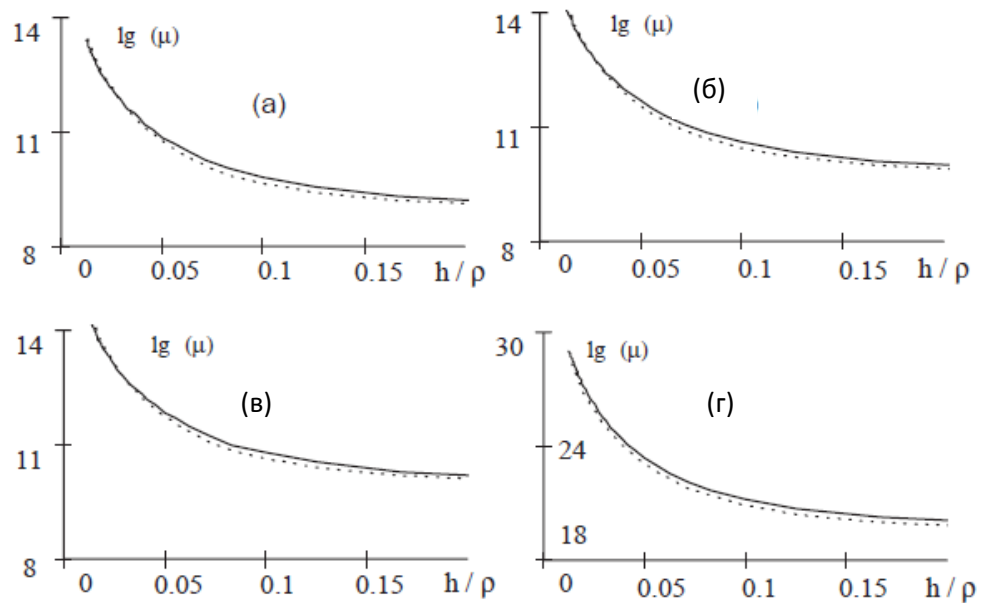


Рисунок 64 - Обусловленность задачи при двух- (сплошная линия) и трёхпозиционном наблюдении (точки)

При этом в случае трёх станций они располагались в вершинах равностороннего, со стороной 5 км, треугольника. Обусловленность задачи вычислялась для моделей  $N_\varphi = 1, N_\lambda = 1, N_R = 0$  (рисунок 64а),  $N_\varphi = 1, N_\lambda = 1, N_R = 0$  (рисунок 64б),  $N_\varphi = 2, N_\lambda = 2, N_R = 0$  (рисунок 64в) и  $N_\varphi = 2, N_\lambda = 2, N_R = 1$  (рисунок 64г). Видно, что свойства обусловленности различных типов моделей при двух и трёх станциях практически идентичны. Что касается свойств среднеквадратичной ошибки погрешности оценивания и размеров порождаемой ею областей устойчивого решения, то они при указанных двух конфигурациях системы РЛС также практически совпадают (рисунок 65), а некоторые различия можно отнести, по-видимому, на счёт статистики (в силу несколько большего объёма измерительной информации в трёхпозиционной системе при равных интервалах наблюдения).

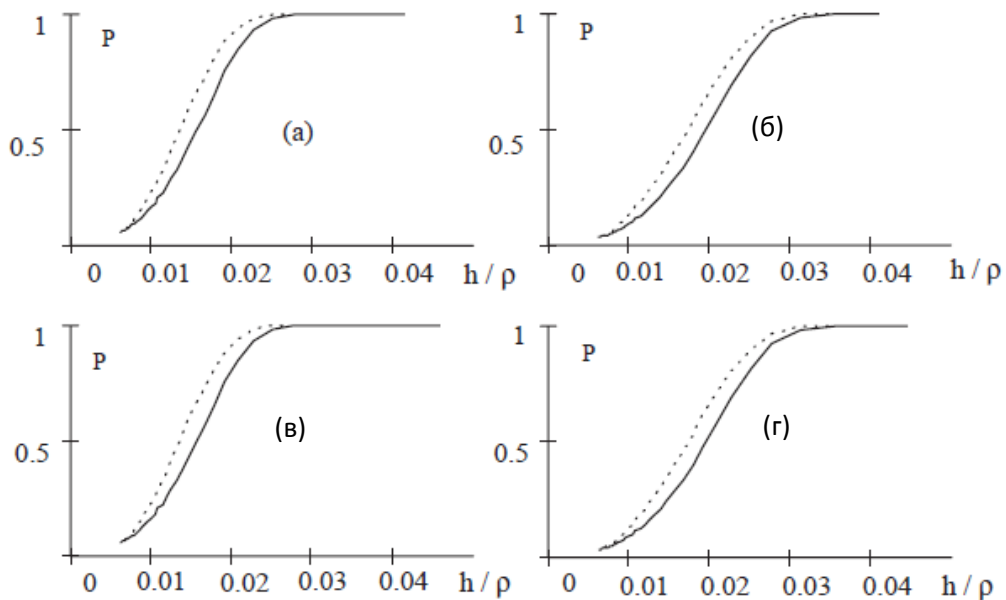


Рисунок 65 - Области устойчивого решения задачи при двух- (сплошная линия) и трёхпозиционном наблюдении (точки)

Подводя итог описанию априорных (теоретических) оценок разрешимости рассматриваемой задачи наблюдения, сведём рассмотренное множество моделей в таблицу 18. Можно сделать вывод, что постановка задачи наблюдения воздушных объектов двухкоординатными измерителями корректна как в случае одно-, так и многопозиционного наблюдения для достаточно широкого спектра траекторий движущихся в поле действия системы РЛС объектов.

Таблица 18 - Варианты моделей задачи (50)

Тип модели	Измерения			Оценки				
	$r_1, \psi_1$	$r_2, \psi_2$	$r_3, \psi_3$	$\varphi, \lambda$	$a_1^{(\varphi)}, a_1^{(\lambda)}$	$a_2^{(\varphi)}, a_2^{(\lambda)}$	$R$	$a_1^{(R)}$
1	+			+	+		+	
2	+			+	+	+	+	
3	+	+		+	+		+	
4	+	+		+	+		+	+
5	+	+		+	+	+	+	
6	+	+		+	+	+	+	+
7	+	+	+	+	+		+	
8	+	+	+	+	+		+	+
9	+	+	+	+	+	+	+	
10	+	+	+	+	+	+	+	+

Для оценивания количественных характеристик качества решения рассматриваемой задачи необходима непосредственная имитация её решения для некоторого множества характерных ситуаций (апостериорная оценка разрешимости). Некоторые результаты такой имитации приведены ниже.

#### 4.3.2 Апостериорные оценки разрешимости задачи

Имитационное моделирование задачи выполнялось в следующих условиях:  $\xi_r$  равномерно распределено на интервале  $[-6.25\text{м}, 6.25\text{м}]$ ,  $\xi_{\psi_r}$  равномерно распределено в интервале  $[-0.03^\circ, 0.03^\circ]$ . В качестве метода решения задачи примем метод наименьших квадратов с процедурной моделью типа (30). Основной целью представленного ниже исследования стала оценка количественных

характеристик качества решения задачи. Хотя результаты исследования носят частный характер, они достаточно точно и полно представляют исследуемый феномен рассматриваемой задачи трёхкоординатного наблюдения двухкоординатными измерителями, что подтвердилось при проведении всего объёма численных экспериментов.

*Однопозиционное наблюдение.* Рассмотрим задачу (50) при  $J=1$ ,  $N_\varphi=1$ ,  $N_\lambda=1$ ,  $N_R=0$  (то есть в соответствии с моделью типа 1 таблицы 18). Пусть объект движется прямолинейно и равномерно на постоянной высоте относительно станции 500м со скоростью 20м/с, а измерения проводятся в течение 300с с интервалом 3с, то есть оценка производится в так называемом скользящем интервале и число измерений, участвующих в оценке, равно 100. Как показал предыдущий качественный анализ, движение такого типа является, в принципе, наблюдаемым и процедурно разрешимым в рамках рассматриваемой модели (рисунки 56, 57).

Рассмотрим свойства задачи при различных курсах движения объекта относительно станции (рисунок 66).

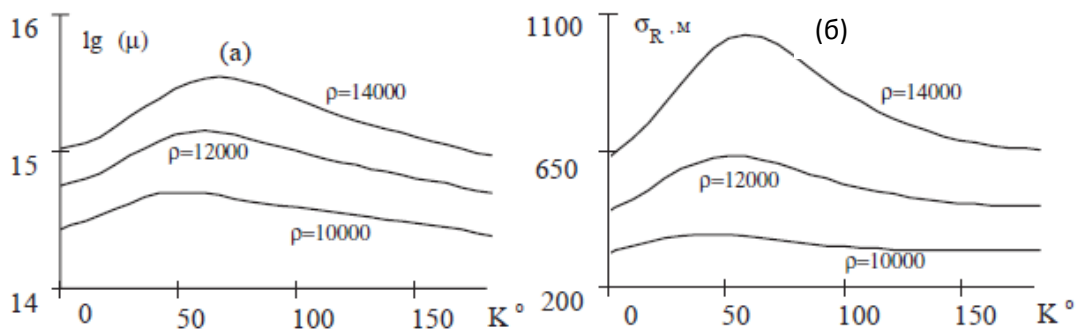


Рисунок 66 - Зависимость числа обусловленности (а) и среднеквадратичной погрешности оценки высоты (б) от курса объекта

На рисунке 66 показаны зависимости десятичных логарифмов чисел обусловленности нормированной по столбцам матрицы  $\tilde{H}^T \tilde{R}^{-1} \tilde{H}$  (рисунок 66а) и

среднеквадратичных погрешностей оценивания высоты (рисунок 66б) от различных курсов движения при различных удалениях объекта от станции (10, 12 и 14 км). Видно, что наилучший с точки зрения условий наблюдения курс соответствует движению объекта «на станцию» (курс  $180^\circ$ ), а наихудший курс равен  $45^\circ$  для близких объектов и несколько смещается в сторону возрастания при их удалении (для очень удалённых объектов приближаясь к  $90^\circ$ ).

Далее имеется в виду движение объекта наилучшим курсом (на РЛС), задавая тем самым нижнюю границу количественных характеристик оценивания.

На рисунке 67 показаны результаты имитационного решения задачи при  $J=1$ ,  $N_\varphi=1$ ,  $N_\lambda=1$ ,  $N_R=0$ , а именно – значения погрешностей оценивания сферических координат в пересчёте на дальность (рисунок 67а), скорости (рисунок 67б) и высоты объекта (рисунок 67в). Здесь же приведены значения величины  $P$ , вычисленные согласно (54) (рисунок 67г).

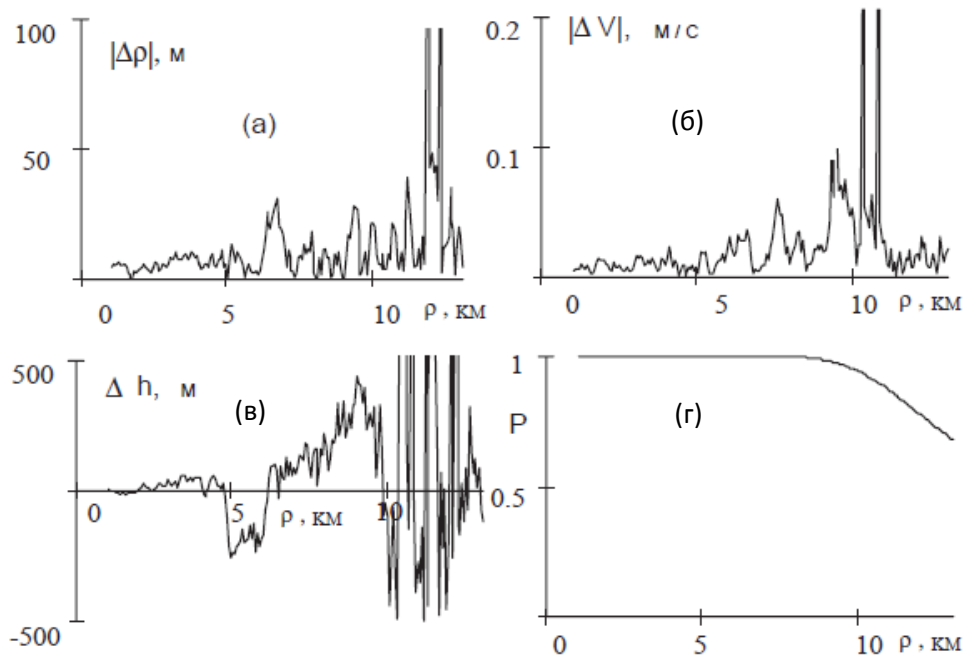


Рисунок 67 - Решение задачи на прямолинейной траектории (модель типа 1, таблица 18)

Из рисунка видно, что в ближней зоне (до 5 км) погрешность нахождения положения объекта на сфере составляет порядка 15 м, погрешность определения

скорости около  $0.03\text{ м/с}$ , погрешность определения высоты составляет порядка  $100\text{ м}$ . Видно, что решение задачи носит устойчивый характер до дальности, примерно,  $10\text{ км}$ , что полностью подтверждает тезис об области устойчивого решения, формулируемый согласно условию (55) при  $P_* = 0.99$  (это нетрудно заметить, сопоставляя графики 67а, 67б, 67в с графиком 67г). Следует также отметить тот факт, что, как показывает эксперимент, вычислительная устойчивость решения задачи метода наименьших квадратов для модели типа 1 (таблица 18) имеет место даже в той части пространства, где не выполняется условие (31), то есть наблюдаемая расходимость алгоритма обусловлена лишь нарушением (55).

С точки зрения потребностей практики представляется интересным также изучение свойств решения рассматриваемой задачи при наблюдении маневрирующих объектов, что в данном случае означает наблюдение объекта, когда свойства его движения не вполне адекватны описывающей их модели (типа 1).

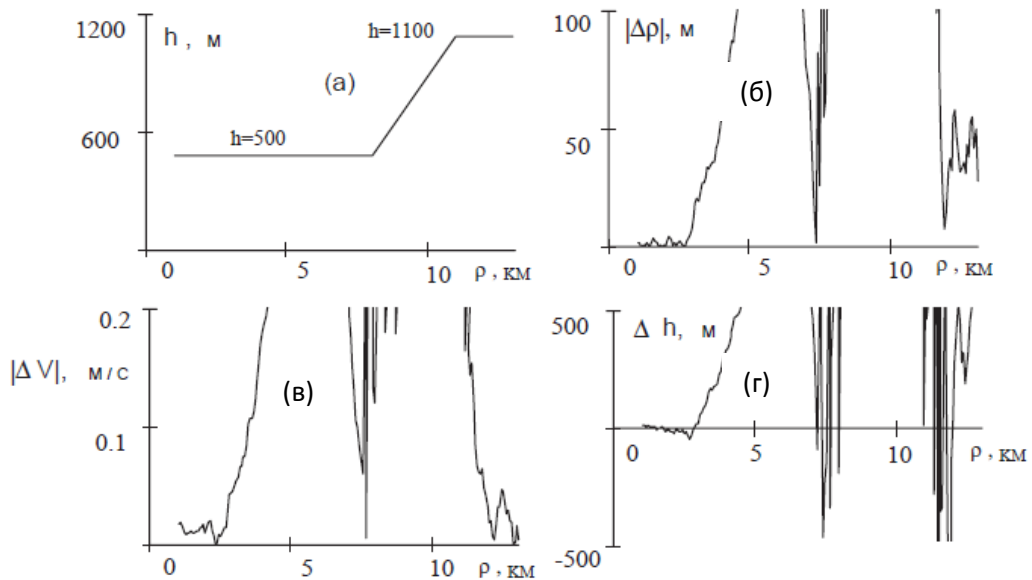


Рисунок 68 - Решение задачи на траектории с манёвром (модель типа 1, таблица 18)

Пусть объект движется по траектории, изображённой на рисунке 68а – прямолинейной, со скоростью  $20\text{ м/с}$  на сфере и манёвром – со скоростью  $3\text{ м/с}$  –

по высоте. Видно (рисунки 68б, 68в, 68г), что устойчивая работа алгоритма оценивания наблюдается лишь на тех участках траектории, где в оценке не участвуют измерения, полученные при маневрировании цели, особенно при больших удалениях объекта. Аналогичная картина наблюдается и при значительных манёврах объекта по сферическим координатам. Вместе с тем, хотя ужесточённые требования к классу траекторий и способны ограничить применимость моделей типа 1, следует отметить и характерность указанного класса траекторий для значительного числа реальных ситуаций.

Что касается решения задачи при однопозиционном наблюдении с использованием модели типа 2 (то есть при  $J = 1$ ,  $N_\varphi = 2$ ,  $N_\lambda = 2$ ,  $N_R = 0$ ), то, как и следовало ожидать (анализируя рисунки 58 и 59), такая попытка не приводит к положительному результату (алгоритмы расходятся).

*Двухпозиционное наблюдение.* Рассмотрим задачу (50) при  $J = 2$ ,  $N_\varphi = 1$ ,  $N_\lambda = 1$ ,  $N_R = 0$  (то есть в соответствии с моделью типа 3, таблица 18). Как и ранее, будем полагать, что объект движется по прямой на постоянной высоте, со скоростью 20м/с, а расстояние между станциями равно 5км. Также условимся, что верны принятые ранее свойства измерений, причём их число, участвующих в оценке (скользящем окне), уменьшим со 100 до 10 от каждой РЛС (то есть набор данных производится в течение всего 30с). Как показывают результаты моделирования, наилучшие и наихудшие условия наблюдения с точки зрения расположения и курса объекта в двухпозиционной задаче также могут быть выделены, но они не носят регулярного характера, зависят от расстояния, а в ближней зоне (до 10-12 км) можно говорить, что условия наблюдения практически равнозначны при любых курсах и положениях цели.

На рисунке 69 показаны значения величины  $P$ , вычисленные согласно (54), в зависимости от отношений  $h/\rho$  и  $b/\rho$ , где  $b$  - расстояние между станциями (база). Данный график может быть использован в качестве своеобразной диаграммы, показывающей, при каких значениях высоты, удалённости и базы гарантируется устойчивое решение задачи наблюдения с моделью типа 3. Так,



например, при базе  $b = 5$  км устойчивое наблюдение объекта, удалённого на 20 км может быть осуществлено на высотах не ниже, приблизительно, 600 м.

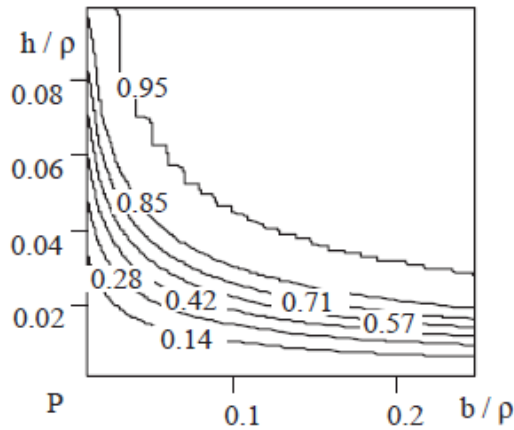


Рисунок 69 - Зависимости величины  $P$  от величины базы, высоты и удалённости объекта (модель типа 3, таблица 18)

На рисунке 70 показаны результаты имитационного решения задачи двухпозиционного (с моделью типа 3) наблюдения объекта, движущегося равномерно со скоростью 20 м/с на постоянной высоте 500 м по направлению на центр системы станций перпендикулярно базе, а именно – значения погрешности оценивания сферических координат в пересчёте на дальность (рисунок 70а), скорости (рисунок 70б) и высоты объекта (рисунок 70в). Здесь же приведены значения величины  $P$ , вычисленные согласно (54) (рисунок 70г). Видно, что на дальности 10 км погрешность нахождения положения на сфере равна, примерно, 5 м, погрешность определения скорости составляет порядка 0.3 м/с, погрешность определения высоты равна, приблизительно, 70 м. Кроме того, решение задачи носит устойчивый характер до дальности, примерно, 27 км, что соответствует значению  $P \approx 0.7$  (рисунок 70г); это позволяет сделать вывод о том, что в данной задаче условие (55) описывает область устойчивого решения с большим запасом (напомним, что условия (31) и (55) являются условиями достаточного типа).

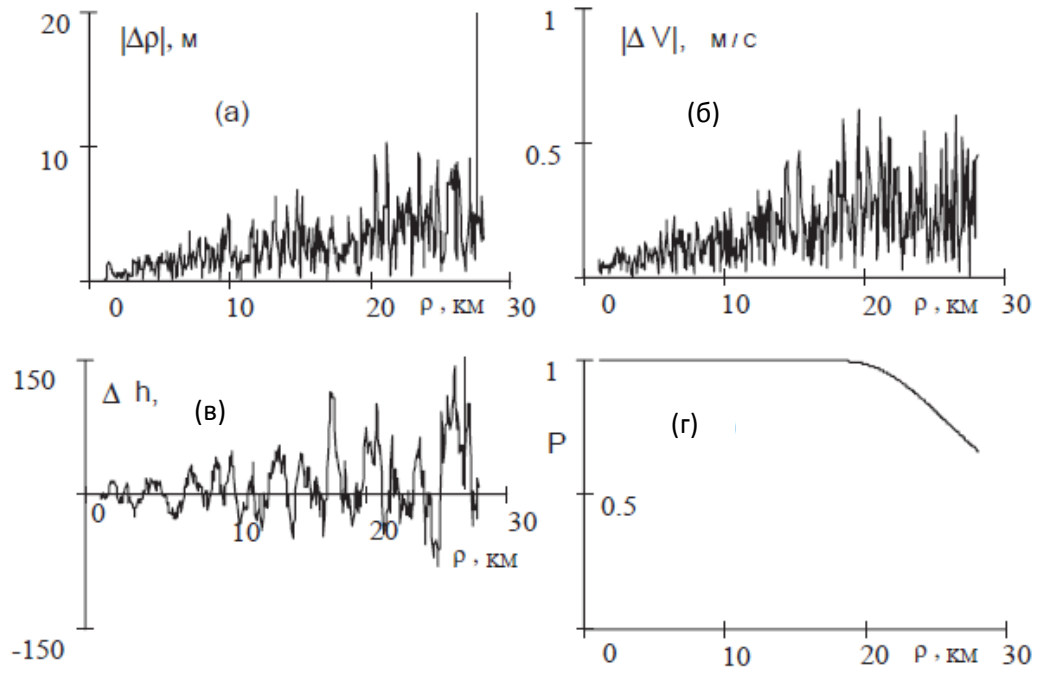


Рисунок 70 - Решение задачи на прямолинейной траектории (модель типа 3, таблица 18)

Рассмотрим свойства решения рассматриваемой задачи при наблюдении маневрирующих объектов. Пусть объект движется по траектории, изображённой на рисунок 71а – прямолинейной, со скоростью 20м/с на сфере и манёвром – со скоростью 3м/с – по высоте.

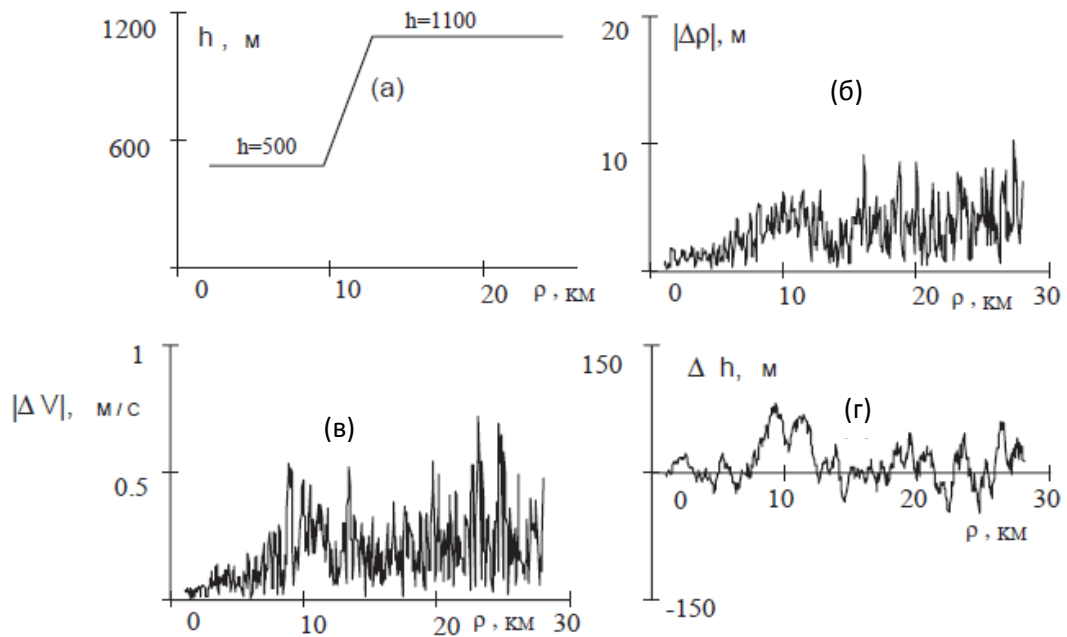


Рисунок 71 - Решение задачи на траектории с манёвром по высоте (модель типа 3, таблица 18)

Видно, что и при манёвре по высоте наблюдается устойчивая работа алгоритма оценивания, при этом погрешности оценки координат маневрирующего объекта вполне сравнимы (рисунок 71) при прочих равных условиях с погрешностями оценки координат объекта, движущегося адекватно модели типа 3 (то есть на постоянной высоте).

Примерно та же картина наблюдается и при движении объекта на постоянной высоте при умеренном его маневрировании по сферическим координатам (рисунок 72). Анализируя указанный материал, можно сделать вывод о том, что модель типа 3 в одинаковой степени пригодна для наблюдения объектов как движущихся прямолинейно и равномерно, так и умеренно маневрирующих.

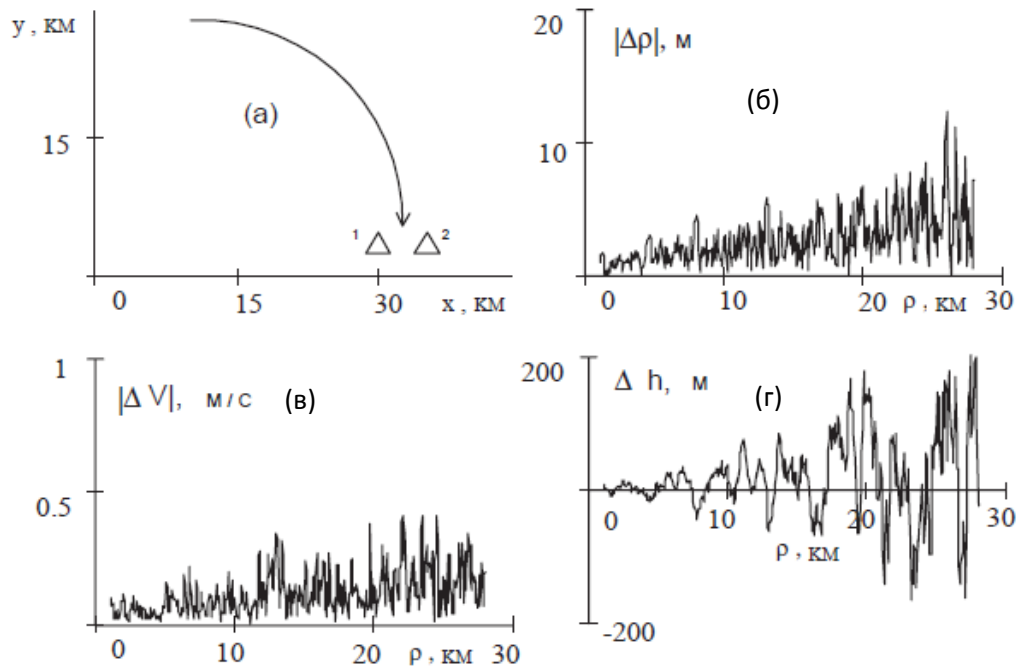


Рисунок 72 - Решение задачи на траектории с манёвром по сферическим координатам (модель типа 3, таблица 18)

Рассмотрим задачу (50) при двухпозиционном наблюдении с моделью другого типа – 4 (таблица 18), то есть при  $J = 2$ ,  $N_\varphi = 1$ ,  $N_\lambda = 1$ ,  $N_R = 1$ . Полагая, что свойства обусловленности задачи с моделью типа 4 в принципе идентичны соответствующим свойствам задачи с моделью типа 3, ограничимся в данном

случае лишь построением порождённых ими значений  $P$  (рисунок 73). Видно, что, например, при базе 5км устойчивое наблюдение объекта, удалённого на 20км может быть осуществлено на высотах не ниже, приблизительно, 800м.

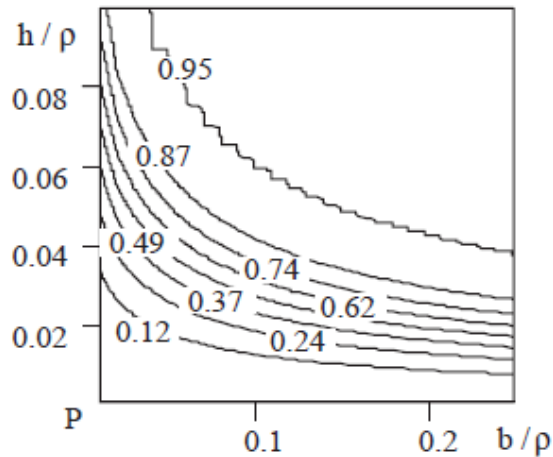


Рисунок 73 - Зависимости величины  $P$  от величины базы, высоты и удалённости объекта (модель типа 4, таблица 18)

На рисунке 74 показаны результаты имитационного решения задачи с моделью типа 4 для объекта, движущегося прямолинейно и равномерно со скоростью 20м/с на постоянной высоте 500м по направлению на центр системы станций перпендикулярно базе. Видно, что на дальности 10км погрешность нахождения положения на сфере равна, примерно, 5м, погрешность определения скорости составляет порядка 0.3м/с, погрешность определения высоты равна, приблизительно, 150-200м. Решение носит устойчивый характер до дальности, примерно, 20км, что соответствует значению  $P \approx 0.8$  (рисунок 74д). Для умеренно маневрирующих объектов имеет место качественно сходная картина.

Рассмотрим задачу (50) при двухпозиционном наблюдении с моделью типа 5 (таблица 18), то есть при  $J = 2$ ,  $N_\varphi = 2$ ,  $N_\lambda = 2$ ,  $N_R = 0$ . Результаты моделирования иллюстрируются рисунками 75 и 76. Видно (рисунок 76), что на дальности 10 км погрешность определения положения объекта на сфере равна, приблизительно, 7м, погрешность определения скорости – 1м/с, погрешность определения высоты – 70м, погрешность определения ускорения равна,

приблизительно,  $0.07\text{м/с}^2$ . Решение задачи носит устойчивый характер до дальности, приблизительно,  $27\text{км}$ , что соответствует значению  $P \approx 0.7$  (рисунок 76д). Та же картина наблюдается и при имитации решения для маневрирующих объектов.

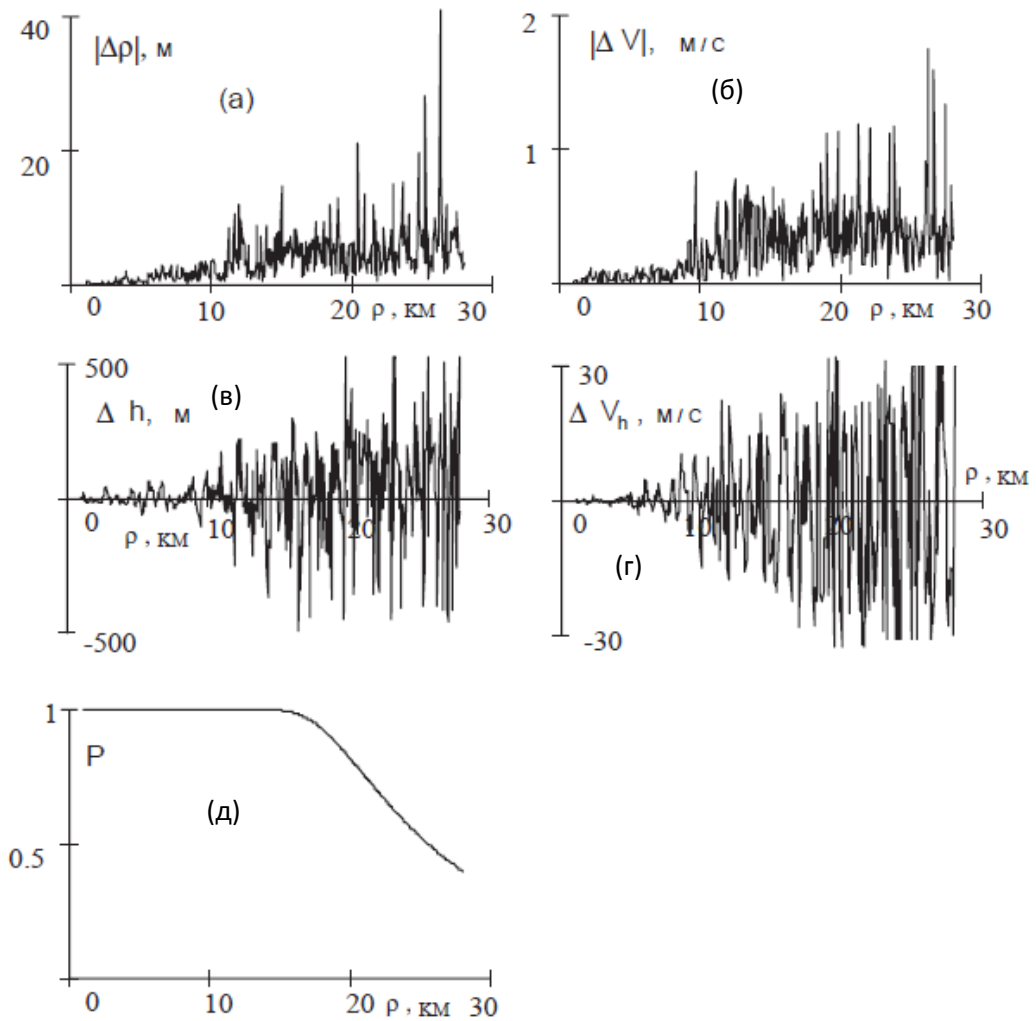


Рисунок 74 - Решение задачи на прямолинейной траектории (модель типа 4, таблица 18)

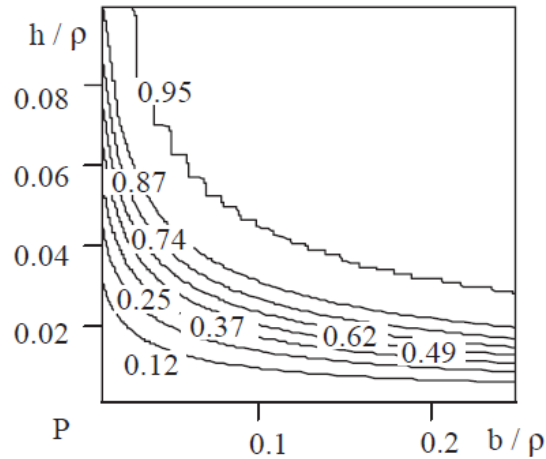


Рисунок 75 - Зависимости величины  $P$  от величины базы, высоты и удалённости объекта (модель типа 5, таблица 18)

Что касается попытки реализации двухпозиционного наблюдения с моделью типа 6, при  $J = 2$ ,  $N_\phi = 2$ ,  $N_\lambda = 2$ ,  $N_R = 1$ , то, как и следовало ожидать (по результатам априорного анализа для такой модели не выполняется условие (31)), она приводит к расходимости соответствующих процедур оценивания.

В целом по результатам моделирования задачи двухпозиционного наблюдения следует отметить её процедурную разрешимость для целого ряда характерных ситуаций. С точки зрения потребностей практики из множества рассмотренных моделей наиболее подходящими являются модели типа 3 и 5, как имеющие наилучшие показатели точности оценивания.

*Трёх- и многопозиционное наблюдение.* Численное моделирование задачи (50) для трёх и более РЛС показало её эквивалентность двухпозиционному случаю.

Завершая обзор результатов численного моделирования задачи (50), сведём их в таблицу 19.

Несмотря на принципиальную и процедурную разрешимость задачи (50) в целом ряде характерных ситуаций, конечная точность модельных представлений обуславливает и значительную неопределённость в оценках характеристик движения, особенно ярко проявляющуюся при идентификации высоты наблюдаемого объекта (нерегулярный характер оценок при малых значениях  $h/\rho$

проявляется в основном в оценках радиальной компоненты вектора состояния, в то время как угловые компоненты сохраняют приемлемые для практики свойства (достаточно долго).

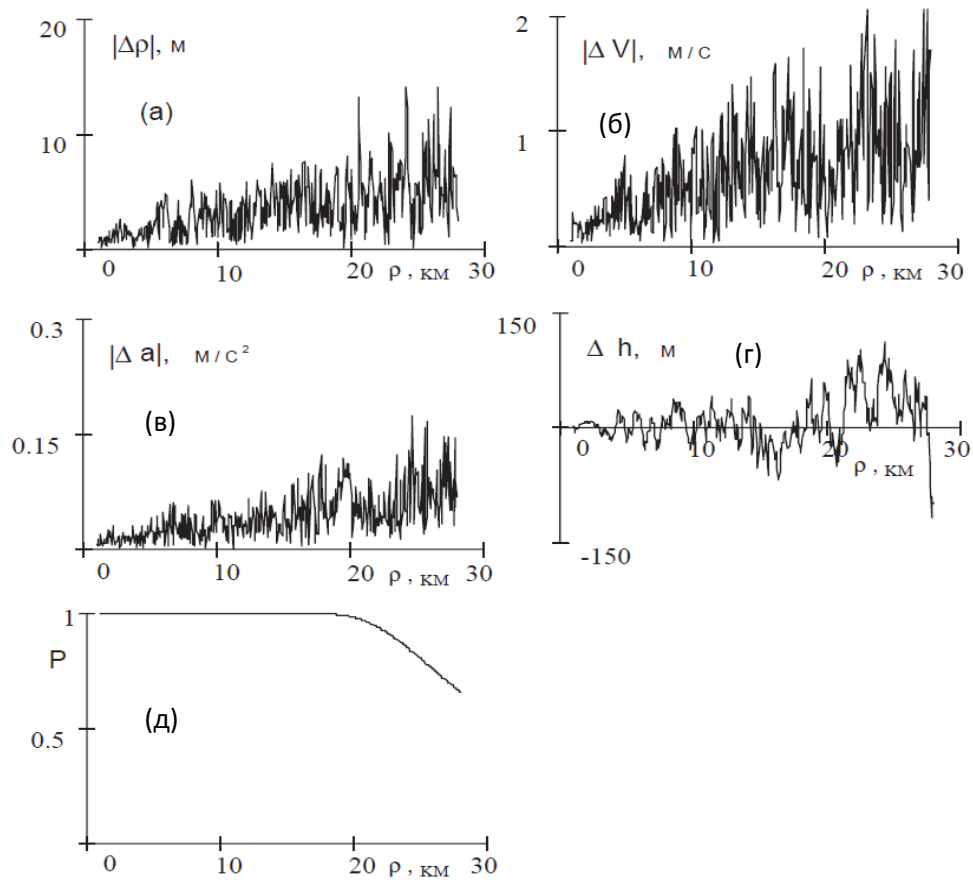


Рисунок 76 - Решение задачи на прямолинейной траектории (модель типа 5, таблица 18)

Таблица 19 - Свойства вариантов моделей задачи (50)

Тип модели	Условие (31)	Условие (55)	Разрешимость	Устойчивость решения при маневрировании	Качество оценки
1	+	+	+	-	плохое
2	-	-	-	-	
3	+	+	+	+	хорошее
4	+	+	+	+	среднее
5	+	+	+	+	хорошее
6	-	+	-	-	
7	+	+	+	+	хорошее
8	+	+	+	+	среднее
9	+	+	+	+	хорошее
10	-	+	-	-	

Другими словами, имея в виду актуальную для СУДС задачу селекции воздушных целей, оценка высоты сама по себе недостаточна для достоверного отнесения наблюдаемого объекта к классу воздушных. Для решения этой проблемы может быть применено несколько различных подходов.

#### 4.4 Метод решения задачи распознавания воздушных объектов

Характерным свойством рассматриваемой задачи (50) является нерегулярность оценок радиальной координаты (т.е. высоты) маловысотных удалённых объектов, что связано с плохой обусловленностью системы, исходной нелинейностью задачи и конечной точностью измерений. Эта особенность задачи продемонстрирована на рисунке 77, на котором приведена оценка высоты надводного объекта (рисунок 77а) и воздушных объектов, движущихся на высоте 100 м (рисунок 77б) и 200 м (рисунок 77в) для случая двух РЛС, измеряющих дальность с погрешностью  $\pm 5$  м и азимут с погрешностью  $\pm 0.1^\circ$  (при  $J = 2$ ,  $N_\phi = 1$ ,  $N_\lambda = 1$ ,  $N_R = 0$ , то есть в соответствии с моделью типа 3 таблицы 18).

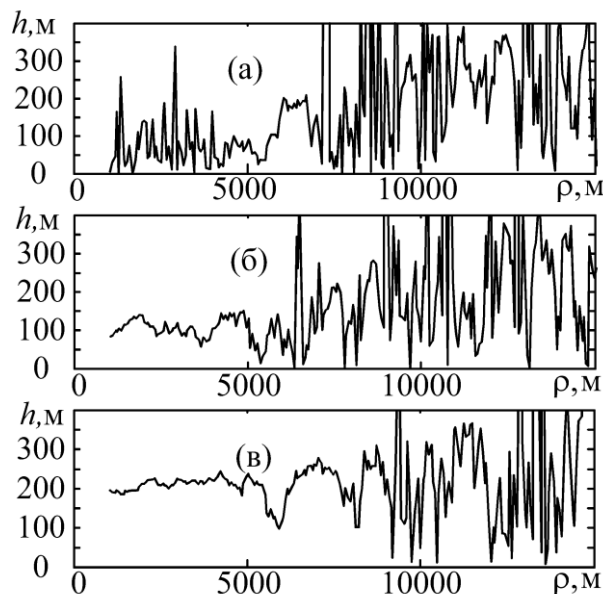


Рисунок 77 - Пример оценки высоты объекта по мере удаления от радаров (модель типа 5, таблица 18)



Видно, что начиная с некоторого расстояния от системы радаров воздушный объект становится (по оценке высоты) неотличимым от морского: в данном случае это 5 км для объекта с высотой 100 м и 9 км для объекта с высотой 200 м. Сами оценки высоты носят «изрезанный» характер со случайными выбросами. Такая картина является побудительным мотивом наряду с оцениванием собственно высоты объекта определять дополнительно ещё и «высотный класс» объекта, то есть диапазон высот, которому принадлежит траектория объекта.

Были исследованы несколько подходов к решению этой задачи. Первый из них связан с оценкой вероятности принадлежности объекта к тому или иному высотному диапазону. Второй обеспечивает селекцию воздушных объектов, оценивая степень принадлежности объекта к классу воздушных с использованием идей, положенных в основу нечетких систем. Третий дополняет задачу оценки высоты оценкой высотного диапазона объектов, используя идею алгоритмов с обучением и модельные представления искусственных нейронных сетей.

#### 4.4.1 Вероятностная оценка «надводный-воздушный»

Центральным свойством рассматриваемой задачи (50) является нерегулярность оценок радиальной координаты (особенно хорошо просматриваемая для маловысотных удаленных объектов), обусловленная исходной нелинейностью задачи и конечной точностью измерений и не позволяющая однозначно отнести наблюдаемый объект к тому или иному высотному классу. Сущность предлагаемого метода вероятностной оценки типа «надводный-воздушный» заключается в сравнении оценок высоты наблюдаемого объекта с оценками высоты объекта, заведомо не являющегося воздушным.

Введем для каждого наблюдаемого объекта соответствующий ему фиктивный объект с вектором навигационных параметров  $s^*(t_k) = (\varphi^*(t_k), a_1^{(\varphi)*}, \lambda^*(t_k), a_1^{(\lambda)*}, R^*)^T$ , таким что  $\varphi^*(t_k) = \hat{\varphi}(t_k)$ ,  $a_1^{(\varphi)*} = \hat{a}_1^{(\varphi)}$ ,  $\lambda^*(t_k) = \hat{\lambda}(t_k)$ ,  $a_1^{(\lambda)*} = \hat{a}_1^{(\lambda)}$ ,  $R^* = R_3 + h^*$ , где  $R_3$  - радиус Земли на уровне моря,  $h^*$  -

высота объекта, не считающегося воздушным (было принято  $h^* = 15\text{ м}$ ). Пусть  $z^{(j)*}(t_k)$  – вектор фиктивного  $k$ -го измерения  $j$ -й станцией, формируемый с учетом  $s^*(t_k)$  и известных статистик инструментальных радиолокационных измерительных погрешностей  $\xi_r^{(j)}(t_k)$ ,  $\xi_\psi^{(j)}(t_k)$ . Назовем вектор  $\hat{s}^*(t_k)$ , получаемый посредством решения задачи для фиктивного объекта, т. е. на базе вектора фиктивных измерений  $z^{(j)*}(t_k)$  вектором оценки состояния фиктивного объекта, а  $\hat{h}^* = \hat{R}^* - R_3$  – оценкой высоты фиктивного объекта.

Для того чтобы сравнить оценки высот наблюдаемого и соответствующего ему фиктивного объекта, сформируем в каждый момент времени  $t_k$  по  $N$  векторов фиктивных измерений  $z^{(j)*}(t_k)$  и произведем оценку высоты фиктивного объекта  $\hat{h}^*$  для каждого из них, после чего определим их (оценок высот) среднее значение

$$\hat{h}_{\text{cp}}^* = \sum_{i=1}^N \hat{h}_i^* / N.$$

Принимая во внимание все изложенное, можно предположить, что если наблюдаемый объект – воздушный, то оценки его высоты  $\hat{h}$  будут устойчиво попадать в область

$$\hat{h} > \hat{h}_{\text{cp}}^*. \quad (56)$$

Таким образом, если для наблюдаемого объекта в процессе решения рассматриваемой задачи (50) частота выпадения оценок высоты  $\hat{h}$ , удовлетворяющих условию (56), будет превышать некоторое пороговое значение  $P^*$ , то данный объект можно считать воздушным, отождествив вероятность этого с частотой выпадения условия (56).

#### 4.4.2 Нечёткая оценка «надводный-воздушный»

Ограничим возможные диапазоны высот понятиями «надводный» и «воздушный». Опишем проблему оценки высотного диапазона в терминах задач систем нечеткой логики. Пусть  $\hat{h}_i = \hat{R}_i - R_3$  - оценка высоты объекта над уровнем моря, полученная в момент времени  $t_i$  ( $\hat{R}_i$  - оценка радиальной компоненты вектора  $s(t_i)$ ,  $R_3$  - радиус Земли на уровне моря). С учетом особенности задачи будем считать, что основными информативными признаками, дающими представление о «высотном классе» объекта, являются оценка его высоты и сравнительный характер (степень «изрезанности», «нерегулярности») оценок высоты в различные моменты времени. Введем лингвистическую переменную  $P_h$  «оценка высоты объекта» с термами «большая» и «малая» и функциями принадлежности типа «дополнение», определёнными на универсальном множестве  $h \in [0,100]$ :

$$\mu_{\text{малая}}(h) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a_h(h - c_h))},$$

$$\mu_{\text{большая}}(h) = \frac{1}{1 + \exp(-a_h(h - c_h))}.$$

Пусть  $\Delta_i = 2 \left| \hat{h}_i - \hat{h}_{i-1} \right| / \left| \hat{h}_i + \hat{h}_{i-1} \right|$  - относительная разность между соседними оценками высоты. Введем лингвистическую переменную  $P_\Delta$  «разность соседних оценок высоты объекта» с термами «большая» и «малая» и функциями принадлежности термов типа «дополнение», определёнными на универсальном множестве  $\Delta \in [0,1]$ :

$$\lambda_{\text{малая}}(\Delta) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a_\Delta(\Delta - c_\Delta))},$$

$$\lambda_{\text{большая}}(\Delta) = \frac{1}{1 + \exp(-a_\Delta(\Delta - c_\Delta))}.$$

Пусть переменные  $P_h$  и  $P_\Delta$  обрабатываются машиной нечеткого вывода типа Сугено [10], на вход которой подаются величины  $\hat{h}_i$  и  $\Delta_i$ , а на выходе формируется

числовое значение  $u_i$  - степень принадлежности наблюдаемого объекта к диапазону высот «воздушный» (считается, что  $u_i = 0$  для надводных объектов и  $u_i = 1$  для воздушных объектов). Машина нечеткого вывода работает согласно системе правил, представленной в таблице 20.

Таблица 20 - Система правил машины нечеткого вывода типа Сугено, распознающей воздушные объекты

№	$P_h$	$P_\Delta$	$u$
1	большая	большая	0
2	большая	малая	1
3	малая	большая	0
4	малая	малая	0

Согласно этой системе правил решение о том, что объект воздушный, принимается в случае, если оценка высоты объекта достаточно велика, чтобы выделить его из надводных (морских) и при этом она регулярна - относительная разность между соседними оценками незначительна. В противном случае принимается решение о том, что объект не является воздушным.

Работу нечеткого алгоритма идентификации воздушных объектов можно, таким образом, окончательно представить схемой, показанной на рисунке 78.

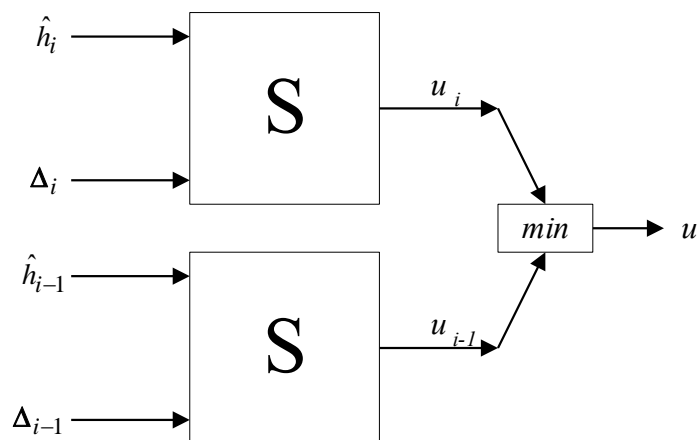


Рисунок 78 - Схема работы нечеткого алгоритма идентификации воздушных объектов

Здесь  $\hat{h}_i$  и  $\Delta_i$  - величины, характеризующие свойства оценки высоты объекта в момент времени  $t_i$  (вход); если  $\hat{h}_i > 100$ , то этот вход принимается равным 100, если  $\Delta_i > 1$ , то этот вход принимается равным 1;  $u_i$  - определённая системой типа Сугено  $S$  в момент времени  $t_i$  степень принадлежности наблюдаемого объекта к диапазону высот «воздушный». Из величин  $u_i$  и  $u_{i-1}$  выбирается минимальное значение, которое и принимается за окончательное (выход). Выбор минимального из двух соседних  $u_i$  необходим для повышения устойчивости работы системы (для фильтрации случайных выбросов). Настройка описанной системы состоит в задании параметров функций принадлежности  $a_h, c_h, a_\Delta, c_\Delta$ .

Возможна модельная интерпретация рассмотренной нечеткой системы типа Сугено  $S$  (рисунок 78 и таблица 20) нейро-нечеткой сетью (рисунок 79). Сеть состоит из пяти слоёв [14].

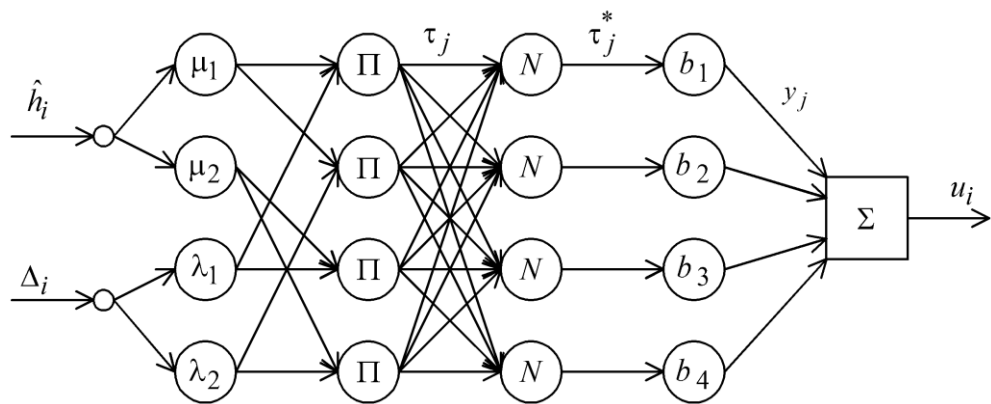


Рисунок 79 - Схема нейро-нечеткой сети, распознающей воздушные объекты

В узлах первого слоя  $\mu_1, \mu_2, \lambda_1, \lambda_2$  вычисляются значения функций принадлежности  $\mu_{\text{малая}}, \mu_{\text{большая}}, \lambda_{\text{малая}}, \lambda_{\text{большая}}$  соответственно.

Узлы  $\Pi$  второго слоя (четыре узла) соответствуют посылкам четырёх возможных нечетких правил:

-  $P_h = \text{«малая»}$  И  $P_\Delta = \text{«малая»}$ ,

- $P_h = \text{«малая»}$  И  $P_\Delta = \text{«большая»}$ ,
- $P_h = \text{«большая»}$  И  $P_\Delta = \text{«малая»}$ ,
- $P_h = \text{«большая»}$  И  $P_\Delta = \text{«большая»}$ .

Каждый узел второго слоя соединен с теми узлами первого слоя, которые формируют посылки соответствующего правила. Выходом каждого узла второго слоя является степень выполнения  $j$ -го правила  $\tau_j$ , которая рассчитывается как произведение входных сигналов.

Узлы  $N$  третьего слоя (четыре узла) рассчитывают относительную степень выполнения каждого нечеткого правила по формуле

$$\tau_j^* = \frac{\tau_j}{\sum_{k=1}^4 \tau_k}.$$

Узлы  $b_1, b_2, b_3, b_4$  четвертого слоя формируют заключения нечетких правил. Каждый узел соединен с одним узлом третьего слоя и рассчитывает вклад одного нечеткого правила в выход сети по формуле  $y_j = b_j \tau_j^*$ .

Единственный узел пятого слоя агрегирует результат, полученный по разным правилам, суммируя вклады всех правил  $u_i = \sum_{k=1}^4 y_j$ .

Обучение нейро-нечеткой сети (рисунок 79) состоит в настройке коэффициентов функций принадлежности  $a_h, c_h, a_\Delta, c_\Delta$  и коэффициентов  $b_1, b_2, b_3, b_4$  узлов четвертого слоя. Обучение может быть проведено с применением трёх различных стратегий.

*Стратегия 1.* Обучение полностью экспертным способом. В этом случае все коэффициенты назначаются экспертом.

*Стратегия 2.* Обучение на обучающей выборке с экспертным формированием заключений нечетких правил. В этом случае коэффициенты  $b_1, b_2$

,  $b_3$ ,  $b_4$  назначаются экспертом, а коэффициенты  $a_h$ ,  $c_h$ ,  $a_\Delta$ ,  $c_\Delta$  определяются настройкой системы на обучающей выборке.

*Стратегия 3.* Обучение полностью на обучающей выборке. В этом случае все коэффициенты системы определяются настройкой на обучающей выборке.

Обучающая выборка формируется следующим образом. Моделируется решение задачи (50) при движении объекта на различных высотах, в том числе и при движении надводного объекта. В результате получают оценки высоты объекта типа изображенных на рисунке 77, формирующие входные данные обучающей выборки. Соответствующие им выходные данные обучающей выборки формируются экспертом: если характер оценки высоты объекта дает возможность отличить его от надводного, считается что система выдаёт значение  $u_i = 1$ , и значение  $u_i = 0$  в противном случае. На рисунке 80 показан пример формирования фрагмента такой обучающей выборки.

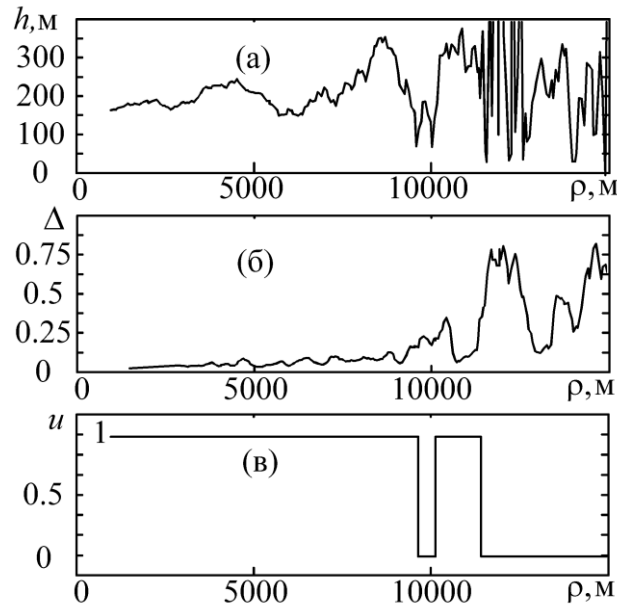


Рисунок 80 - Пример формирования обучающей выборки из оценок высоты, относительной разности соседних оценок высоты (вход) и степени принадлежности объекта к диапазону высот «воздушный» (выход)

Здесь 80а – оценка высоты наблюдаемого объекта по мере его удаления от системы радаров (движение объекта моделируется на высоте 200 м), 80б – относительная разность соседних оценок высоты, 80в – решение эксперта о возможности выделить объект как воздушный: оценки высоты позволяют устойчиво сделать это до дальности, приблизительно, 10 км ( $u_i = 1$ ), далее следует короткая зона неопределённости ( $u_i = 0$ ), после чего до дальности, приблизительно, 11.5 км объект снова может быть отнесен к воздушным ( $u_i = 1$ ), после чего следует сплошная зона неопределенности ( $u_i = 0$ ).

Накапливая данные для различных высот движения объекта и множества возможных траекторий формируют общую обучающую выборку, на базе которой и обучают нейро-нечеткую сеть (рисунок 79) в рамках стратегии 2 или стратегии 3, пользуясь известными методами обучения сетей такого типа [14, 15].

#### 4.4.3 Нейроподобная оценка высотного диапазона

С учётом хорошо просматриваемой в численных экспериментах нерегулярности оценок радиальной координаты, обусловленной исходной нелинейностью (в измерениях) задачи (50) и конечной точностью измерений, предлагается наряду с оцениванием собственно высоты объекта определять дополнительно ещё и диапазон высот, которому с известной (заданной) степенью достоверности принадлежит траектория объекта. Здесь представляются продуктивными идеи алгоритмов с обучением, характерные для задач нейроинформатики, и, соответственно, модельное представление (расширение) исходной задачи наблюдения (50) с помощью характерных для нейроинформатики структур.

Пусть вектор  $s(t_i)$  - вектор состояния, полученный по результатам решения задачи (50). Пусть  $\hat{h}_i = \hat{R}_i - R_3$  - оценка высоты объекта над уровнем моря, полученная в момент времени  $t_i$  ( $\hat{R}_i$  - оценка радиальной компоненты вектора  $s(t_i)$ ),



$R_3$  - радиус Земли на уровне моря). Множество из  $w$  векторов  $\{\hat{s}(t_i)\}$ , где  $\hat{s}(t_i)_2$  - оценки вектора состояния  $s(t_i)$  в моменты времени  $t_i$  будем называть серией оценок координат объекта длиной  $w$ . Будем говорить, что объект принадлежит классу (диапазону высот)  $V_x$  (т. е. выше  $x$ ), если серия оценок его высоты такова, что  $\hat{h}_i > x$  для всех  $i = \overline{1, w}$  и классу  $N_x$  (ниже  $x$ ), если его высоты  $\hat{h}_i < x$  для всех  $i = \overline{1, w}$ .

Опишем модель задачи оценки принадлежности классу в терминах нейронной информатики [11]. Рассмотрим участок сети (рисунок 81), определяющей, принадлежит ( $B=1$ ) или не принадлежит ( $B=0$ ) объект классу  $V_x$ .

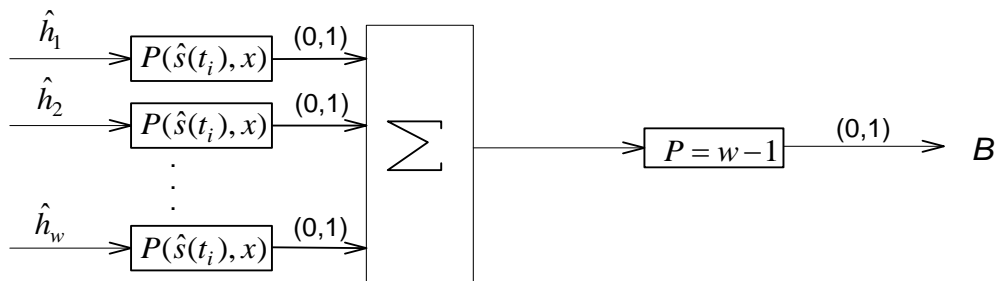


Рисунок 81 - Конфигурация сети, определяющей принадлежность объекта к тому или иному диапазону высот

Здесь  $\hat{h}_1, \hat{h}_2, \dots, \hat{h}_w$  - оценки высоты объекта в последовательные моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_w$ . Серия оценок высоты поступает на входы пороговых элементов, со значениями порогов  $P$ , являющимися функциями вектора состояния  $\hat{s}_i$  и  $x$ . Выходы пороговых элементов суммируются, и сумма обрабатывается пороговым элементом со значением порога  $P=w-1$ . Таким образом, на выходе сети формируется значение  $B=1$ , если все  $w$  значений оценок высот больше некоторых порогов  $P(\hat{s}(t_i), x)$ . Аналогичная сеть может описывать задачу оценки принадлежности классу  $N_x$ , с той лишь разницей, что последний пороговый элемент будет иметь порог  $P=0$ , а на выходе сети будет формироваться значение  $B=0$ , если все  $w$  значений оценок высот меньше некоторых порогов  $P(\hat{s}(t_i), x)$ , что

и будет отождествляться с положительным решением о принадлежности объекта классу  $N_x$ . В добавление к вышесказанному отметим, что при реализации рассматриваемого подхода на практике целесообразно руководствоваться следующим правилом: если сеть выдает положительный ответ о принадлежности объекта к нескольким классам, являющихся подмножествами друг друга, то выбирается наиболее узкий из них.

Обучение указанной сети состоит в определении значений порогов  $P(\hat{s}(t_i), x)$ , то есть в построении гиперповерхности  $P(\varphi(t_k), a_1^{(\varphi)}, a_2^{(\varphi)}, \dots, \lambda(t_k), a_1^{(\lambda)}, a_2^{(\lambda)}, \dots) + P_* = 0$  для каждого значения высоты  $x$ . Традиционная нейроинформатика оперирует множеством хорошо изученных алгоритмов обучения. При этом, однако, эти традиционные методы обучения как правило, не апеллируют к физической сущности описываемого явления – обычно считается, что она уже заложена в самой конфигурации соответствующей нейронной сети. Поэтому здесь предлагается применить для обучения сети (рисунок 81) специальный подход, учитывающий особенности рассматриваемой задачи наблюдения.

Зафиксируем точку  $(\varphi(t_k), a_1^{(\varphi)}, a_2^{(\varphi)}, \dots, \lambda(t_k), a_1^{(\lambda)}, a_2^{(\lambda)}, \dots)$ , и считая известными характеристики распределений случайных измерительных ошибок  $\xi_r^{(j)}(t_k)$ ,  $\xi_\psi^{(j)}(t_k)$ , произведем в указанной точке  $\gamma$  имитационных решений задачи (50) для каждого интересующего нас значения высоты  $x$ . Получив тем самым для каждого  $x$  по  $\gamma$  значений оценок высоты  $\hat{h}_i$ , определяем значение среднего и среднеквадратичного отклонения указанной выборки  $\{\hat{h}_i\}_x$ :

$$\bar{h}_x = \frac{\sum_{k=1}^{\gamma} \hat{h}_{(k)}}{\gamma},$$

$$\hat{\sigma}_x^2 = \frac{\sum_{j=1}^{\gamma} (\hat{h}_{(j)} - \bar{h}_x)^2}{\gamma - 1},$$

где  $\hat{h}_{(k)}$  - значение  $k$ -го элемента в рассматриваемой выборке  $\{\hat{h}_i\}_x$ . То обстоятельство, что распределение выборки  $\{\hat{h}_i\}_x$  близко к нормальному (это подтверждается и анализом гистограмм в численных экспериментах), дает возможность утверждать, что, например,  $\hat{h}_{(k)} \in [\bar{h}_x - 0.7\sigma_x, \bar{h}_x + 0.7\sigma_x]$  с вероятностью, примерно, 0.5 и  $\hat{h}_{(k)} \in [\bar{h}_x - 2\sigma_x, \bar{h}_x + 2\sigma_x]$  с вероятностью, примерно, 0.99. Указанный подход используется для получения значений порогов  $P(\varphi(t_k), a_1^{(\varphi)}, a_2^{(\varphi)}, \dots, \lambda(t_k), a_1^{(\lambda)}, a_2^{(\lambda)}, \dots)$ . В соответствии с изложенным, примем, что  $P = \bar{h}_x + 2\sigma_x$ , в точке  $(\varphi(t_k), a_1^{(\varphi)}, a_2^{(\varphi)}, \dots, \lambda(t_k), a_1^{(\lambda)}, a_2^{(\lambda)}, \dots)$  с вероятностью 0.99 определяет принадлежность объекта классу  $V_x$ , а  $P = \bar{h}_x - 2\sigma_x$  - его принадлежность классу  $N_x$ .

При построении реальной системы целесообразна интерпретация изложенного выше подхода, предполагающая обучение системы в процессе её эксплуатации, а именно: пороги  $P(\hat{s}(t_i), x)$  вычисляются (по мере наблюдения объекта) в точках  $(\varphi(t_k), a_1^{(\varphi)}, a_2^{(\varphi)}, \dots, \lambda(t_k), a_1^{(\lambda)}, a_2^{(\lambda)}, \dots)$ , соответствующих реальным оценкам вектора  $s(t_i)$ .

#### 4.5 Результаты численного моделирования задачи распознавания воздушных объектов

Ниже представлены некоторые фрагменты численных экспериментов, демонстрирующие особенности разработанных моделей задачи распознавания воздушных объектов: вероятностной, нечеткой и нейроподобной, доопределяющих исходную задачу (50). В первой модели вероятность принадлежности объекта к классу воздушных интерпретируется частотой. Во второй используется оценка на основе системы нечётких правил. Третья (нейроподобная) модель позволяет с заданной вероятностью оценить высотный диапазон наблюдаемого объекта, в том числе с точки зрения его принадлежности к классу надводных или воздушных.

### 4.5.1 Вероятностная оценка «надводный-воздушный»

Численное моделирование задачи выполнялось для случая системы наблюдения, состоящей из двух радаров, отстоящих друг от друга на 5 км и расположенных на высоте, равной высоте фиктивного объекта (15 м). Каждый радар характеризуется погрешностями измерения дальностей  $\xi_r^{(j)}(t_k)$  и азимутов  $\xi_\psi^{(j)}(t_k)$ , равномерно распределенных, соответственно, в интервалах  $[-6; 6]$  м и  $[-0.1; 0.1]^\circ$  и с периодом вращения антенны 3с. Задача (50) решалась для случая  $J = 2$ ,  $N_\phi = 1$ ,  $N_\lambda = 1$ ,  $N_R = 0$  (то есть в соответствии с моделью типа 3, табл. 16); эта модель даёт самую качественную и устойчивую оценку высоты из всех рассмотренных, поэтому представленный здесь результат по распознаванию воздушного объекта можно рассматривать как наилучший из возможных. Было принято, что наблюдаемый объект движется на высоте  $h$  со скоростью 20 м/с из точки, проекция которой на земную поверхность совпадает с проекцией середины отрезка, соединяющего радары, в направлении, перпендикулярном этому отрезку (рисунок 82). Число измерений от каждого радара  $m$ , участвующих в решении задачи (50), равно десяти.

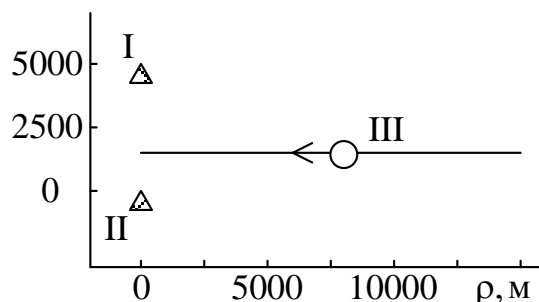


Рисунок 82 - Моделируемая траектория движения объекта. I, II – радиолокационные станции, III – движущийся объект

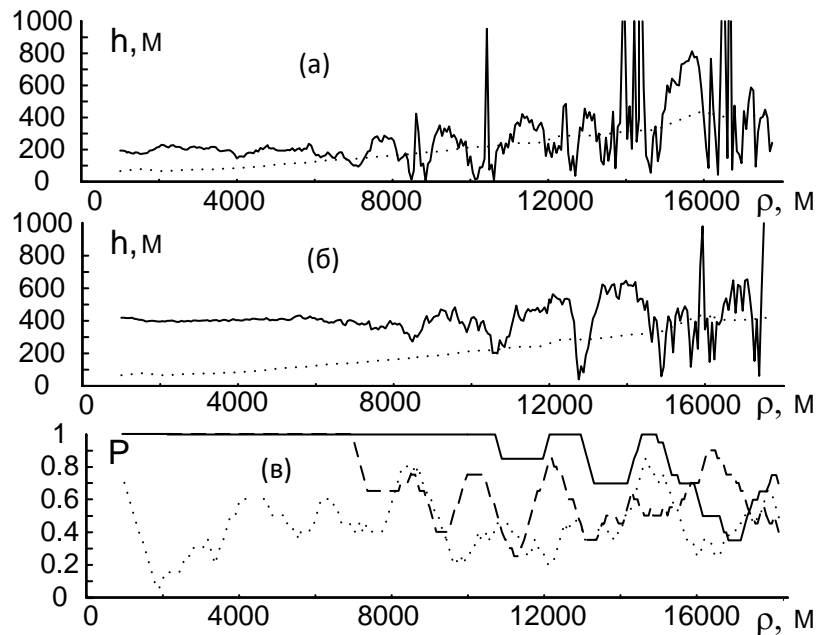


Рисунок 83 - Результаты численного моделирования задачи и вероятностной оценки «надводный-воздушный»

Результаты решения задачи приведены на рисунке 83. Так, на рисунке 83а показаны оценки высоты наблюдаемого объекта  $\hat{h}$  (сплошная линия) для случая, когда его высота равна 200м, и средние значения оценок высоты фиктивного объекта  $\hat{h}_{cp}^*$  (точки), вычисленные при  $N = 400$ ; то же самое показано на рисунке 83б для случая высоты наблюдаемого объекта 400м. Результаты оценивания частоты выпадения 20-ти последних (по времени) оценок высоты  $\hat{h}$ , удовлетворяющих условию (56) для высот 15м (точки), 200м (пунктир) и 400м (сплошная линия), даны на рисунке 83в.

Из рисунка 83в видно, что для объекта, не являющегося воздушным ( $h = 15$  м), значения  $P$  не превышают 0.9, что дает основание установить это значение в качестве порогового при принятии решения. Объект, движущийся на высоте 200м (в данной конкретной реализации), уверенно выделяется как воздушный до дальности, приблизительно 7 км, а движущийся на высоте 400 м – до дальности 11 км. Это соответствует и оценкам разрешимости задачи, рассмотренными в п. 4.3.

#### 4.5.2 Нечёткая оценка «надводный-воздушный»

Численное моделирование задачи выполнялось в условиях, соответствующих предыдущему случаю: информационной базой СУДС являются два радара кругового обзора, находящихся на расстоянии 5 км друг от друга с периодом обращения 3с и погрешностями измерения дальностей  $\xi_r^{(j)}(t_k)$  и азимутов  $\xi_\psi^{(j)}(t_k)$ , равномерно распределенных, соответственно, в интервалах  $[-6; 6]$  м и  $[-0.1; 0.1]^\circ$ . Задача (50) решалась для случая  $J = 2$ ,  $N_\varphi = 1$ ,  $N_\lambda = 1$ ,  $N_R = 0$  (то есть в соответствии с моделью типа 3, таблица 18). Количество измерений от каждой станции было принято равным 10 и 20 (то есть измерения набираются в течение 30 секунд и одной минуты). Наблюдаемый объект движется по траектории, показанной на рисунке 82.

На рисунке 84 показаны результаты оценки высоты объекта по решению задачи (50) (левая колонка рисунков) и соответствующие оценки его высотного диапазона нечеткой системой рисунка 78 (правая колонка рисунков). Здесь  $\rho$  - расстояние от объекта до линии, соединяющей радиолокационные станции,  $h$  - высота объекта,  $u$  - степень принадлежности объекта к диапазону высот «воздушный».

Задача моделировалась для объектов, движущихся на высоте 100м (рисунки 84а и 84б), 200м (рисунки 84в и 84г) и 300м (рисунки 84д и 84е). Параметры функций принадлежности задавались равными  $a_h = 0.1$ ,  $c_h = 20$ ,  $a_\Delta = 2.5$ ,  $c_\Delta = 0.4$ . Сплошные графики соответствуют количеству измерений 20, точки соответствуют количеству измерений 10. Из рисунка 84 видно, что, например, уверенное выделение воздушного объекта, движущегося на высоте 100м возможно до дальности  $\approx 2500$  м при 10 измерениях и до дальности  $\approx 6000$  м при 20 измерениях (рисунок 84б). Для объекта, движущегося на высоте 300м, выделение

его как воздушного возможно до дальности  $\approx 10\ 000$  м при 10 измерениях и до дальности  $\approx 12\ 000$  м при 20 измерениях (рисунок 84е).

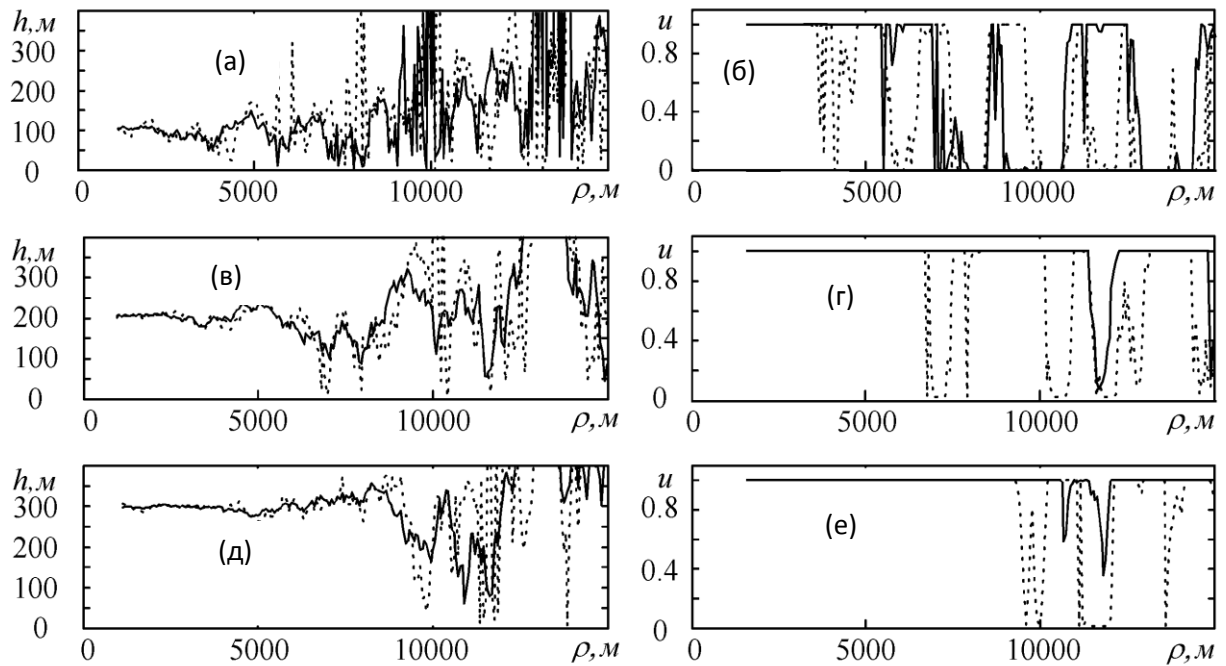


Рисунок 84 - Результат численного моделирования задачи оценки типа «надводный-воздушный» нечеткой системой типа Сугено

На рисунке 85 показаны результаты решения задачи оценки высоты объекта (левая колонка рисунков) и оценки его высотного диапазона нейро-нечеткой сетью рисунка 79 (правая колонка рисунков). Обучение системы проводилось в рамках стратегии 3, то есть все коэффициенты системы определяются настройкой на обучающей выборке. Объем обучающей выборки составил около 10 000 значений «вход-выход», полученных при моделировании движения объекта по различным траекториям. При этом параметры функций принадлежности приняли следующие значения:  $a_h = 0.11$ ,  $c_h = 20.21$ ,  $a_{\Delta} = 2.51$ ,  $c_{\Delta} = 0.43$ ; коэффициенты узлов четвертого слоя приняли следующие значения:  $b_1 = 0.62$ ,  $b_2 = -0.05$ ,  $b_3 = 1.02$ ,  $b_4 = 0.16$ . Следует отметить, что коэффициент  $b_3$  близок к единице, а остальные коэффициенты четвертого слоя близки к нулю (с точностью до погрешности обучения системы).

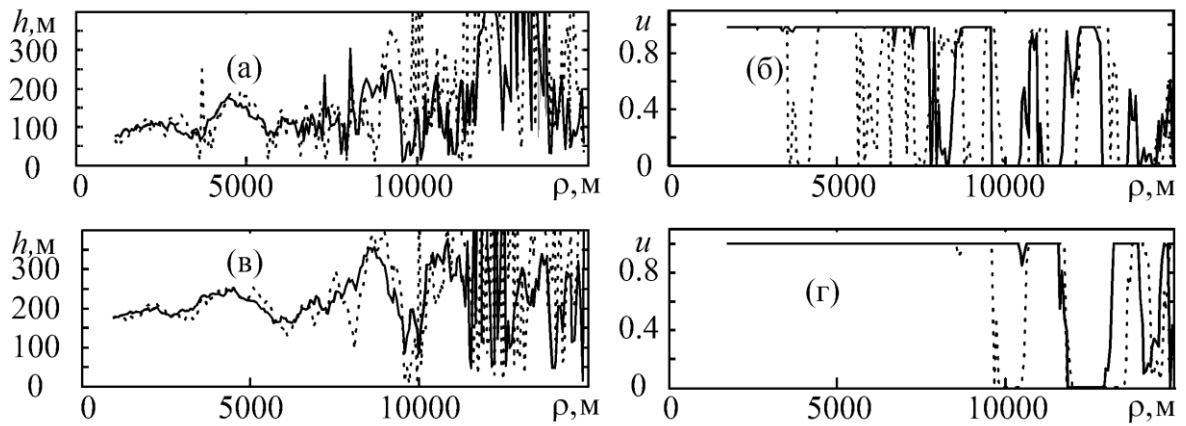


Рисунок 85 - Результат численного моделирования задачи оценки типа «надводный-воздушный» нейро-нечёткой сетью

Такие значения коэффициентов узлов четвёртого слоя подтверждают корректность системы правил таблицы 18, а, также, возможность упрощения сети рисунка 79 за счёт исключения четвёртого слоя и перехода к стратегии обучения 2, когда настройкой на обучающей выборке останется определить только значения коэффициентов второго слоя.

Задача моделировалась для объектов, движущихся на высоте 100 м (рисунки 85а и 85б) и 200 м (рисунки 85в и 85г). Сплошные графики соответствуют количеству измерений 20, точки соответствуют количеству измерений 10. Из рисунков видно, что, например, уверенное выделение воздушного объекта, движущегося на высоте 100м возможно до дальности  $\approx 3000$  м при 10 и до дальности  $\approx 7000$  м при 20 (рисунок 85б). Для объекта, движущегося на высоте 200 м, выделение его как воздушного возможно до дальности  $\approx 9000$  м при 10 и до дальности  $\approx 12000$  м при 20 (рисунке 85г). Такие дальности (по сути - границы применимости метода нечёткой оценки «надводный-воздушный») вполне соответствуют размерам зон ответственности в акваториях морских портов, что позволяет говорить о пригодности предлагаемого подхода к селекции воздушных объектов для судоводительской практики.



### 4.5.3 Нейроподобная оценка высотного диапазона

Численное моделирование задачи выполнялось для моделей типа 1, 3, 4 и 5 таблицы 18. При моделировании погрешности измерения дальностей  $\xi_r^{(j)}(t_k)$  и азимутов  $\xi_\psi^{(j)}(t_k)$ , были равномерно распределены, соответственно, в интервалах  $[-6; 6]$ м и  $[-0.1; 0.1]^\circ$ . Период поступления информации был выбран равным 3с. Траектория движения объекта была задана прямолинейной и равномерной со скоростью 20м/с на постоянной высоте по направлению на станцию (модель типа 1) или на центр системы станций, как на рисунке 82 (модели типа 3, 4 и 5). Число измерений от каждой станции, участвующих в оценке, равно 100 для модели типа 1 и 10 для моделей типа 3, 4 и 5.

На рисунках 86, 87 и 88 представлены результаты обучения сети рисунка 81 (определения значений порогов  $P(\hat{s}(t_i), x)$ ) для моделей типа 1, 3 и 4 соответственно (результат обучения сети для модели 5 практически аналогичен результату для модели 3). Моделирование проводилось для  $\gamma=500$  имитационных решений задачи (50) для  $x = 500$ м (сплошная линия),  $x = 300$ м (штрихпунктир) и  $x = 15$ м (точки). Высоту 15 метров будем считать максимально возможной высотой для надводного объекта. Таким образом, принадлежность к классу  $V_{15}$  будет означать классификацию объекта как воздушного.

На рисунках 86а и 86б показаны определённые для модели типа 1 (однопозиционного наблюдения) значения среднего для выборки  $\{\hat{h}_i\}_x$  при  $\xi_r^{(j)}(t_k) \in [-6; 6]$ м,  $\xi_\psi^{(j)}(t_k) \in [-0.1; 0.1]^\circ$  (86а) и при  $\xi_r^{(j)}(t_k) \in [-12; 12]$ м,  $\xi_\psi^{(j)}(t_k) \in [-0.2; 0.2]^\circ$  (86б); на рисунках 86в и 86г – значения среднеквадратичного отклонения указанной выборки при тех же условиях. Рисунки 86д и 86е иллюстрируют порождаемый этими оценками результат определения порогов  $P(\hat{s}(t_i), x)$  для уровня достоверности 0.99 ( $2\sigma$ ). Видно, что, например, при меньших значениях измерительных ошибок разделение по критерию «выше-ниже» целей, движущихся на высотах 300м (штрихпунктир) и 500м (сплошная линия графиков), возможно

при принятом уровне достоверности до дальности  $\approx 3500\text{м}$ , а выделение цели на высоте  $300\text{м}$  как воздушной возможно до дальности  $\approx 1700\text{м}$  (рисунок 86д). При больших ошибках результат, естественно, несколько ухудшается (рисунок 86е).

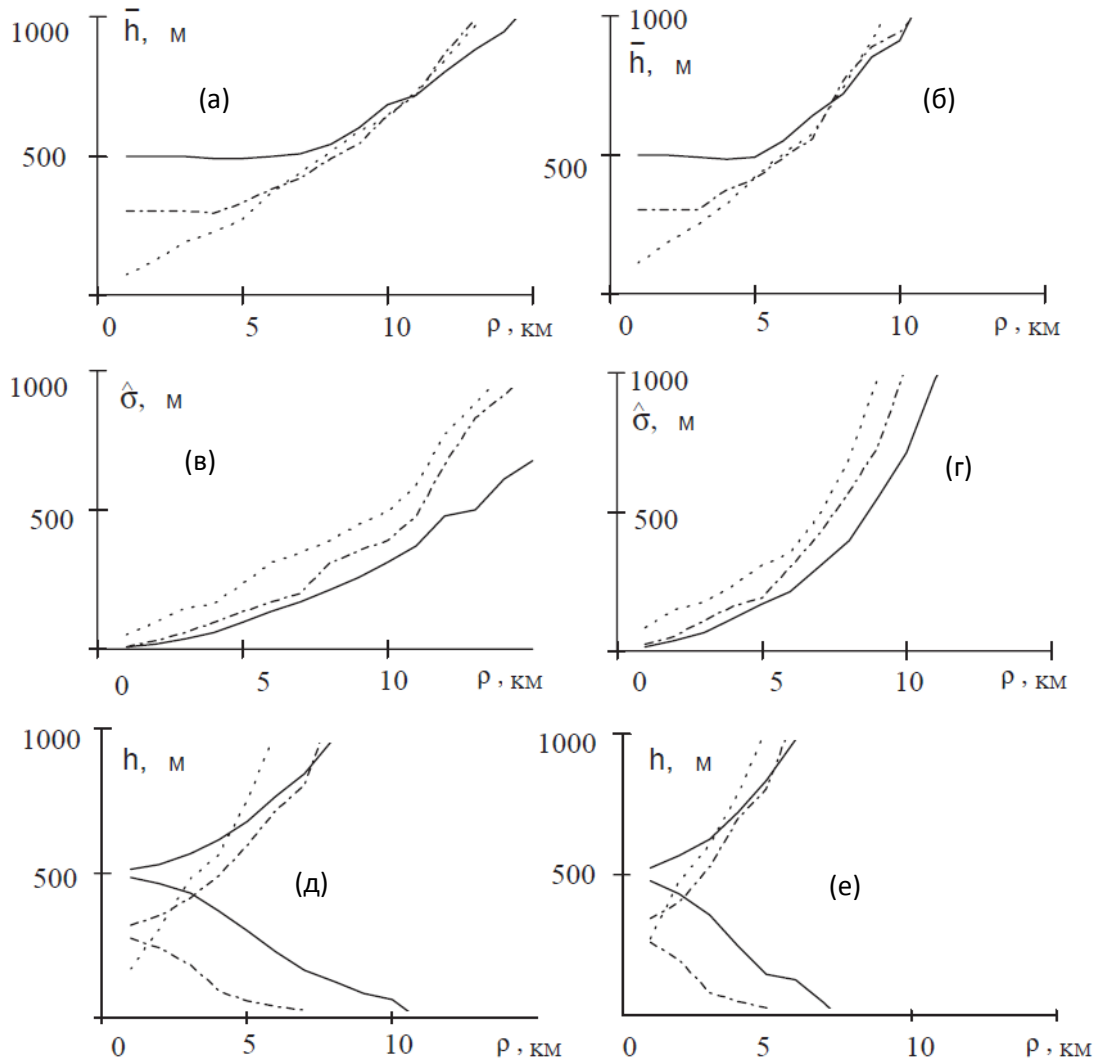


Рисунок 86 - Результат обучения сети для модели типа 1, таблица 18

Перейдём к двухпозиционному наблюдению. На рисунке 87 показаны результаты определения среднего для выборки  $\{\hat{h}_i\}_x$  (рисунки 87а и 87б), среднеквадратичного отклонения указанной выборки (рисунки 87в и 87г) и значений порогов  $P(\hat{s}(t_i), x)$  для уровня достоверности  $0.99$  ( $2\sigma$ ) для модели типа 3.

Моделирование проводилось при  $\xi_r^{(j)}(t_k) \in [-6; 6]\text{м}$ ,  $\xi_\psi^{(j)}(t_k) \in [-0.1; 0.1]^\circ$  (левая колонка графиков) и при  $\xi_r^{(j)}(t_k) \in [-12; 12]\text{м}$ ,  $\xi_\psi^{(j)}(t_k) \in [-0.2; 0.2]^\circ$  (правая

колонка графиков). Видно, что при меньших значениях измерительных ошибок разделение по критерию «выше-ниже» целей, движущихся на высотах 300м (штрихпунктир) и 500м (сплошная линия графиков), возможно при принятом уровне достоверности до дальности  $\approx 19000$ м, а выделение цели на высоте 300м как воздушной возможно до дальности  $\approx 9700$ м (рисунок 87д). При больших измерительных ошибках эти показатели, что естественно, несколько хуже (рисунок 87е).

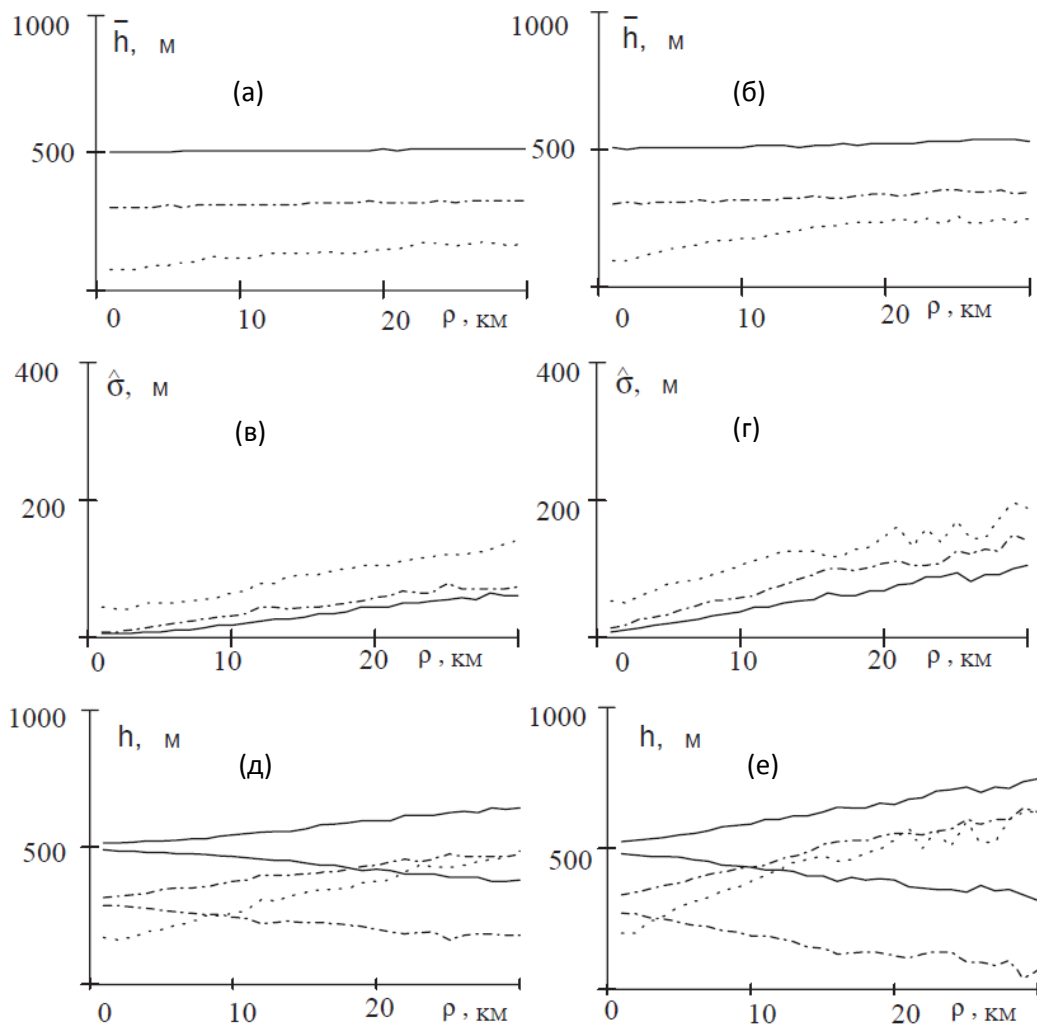


Рисунок 87 - Результат обучения сети для модели типа 3, таблица 18

На рисунке 88 показаны результаты обучения сети при тех же условиях для модели типа 4. Видно, что в силу меньшей устойчивости решения соответствующей задачи оценивания (см. п. 4.3) полученные в результате обучения

сети пороговые значения  $P(\hat{s}(t_i), x)$  также несколько хуже, чем для модели типа 3. Так, например, при меньших измерительных ошибках дальность выделения цели, движущейся на высоте 500м как воздушной, составляет  $\approx 10300$ м, а при высоте цели 300м эта дальность равна  $\approx 8500$ м.

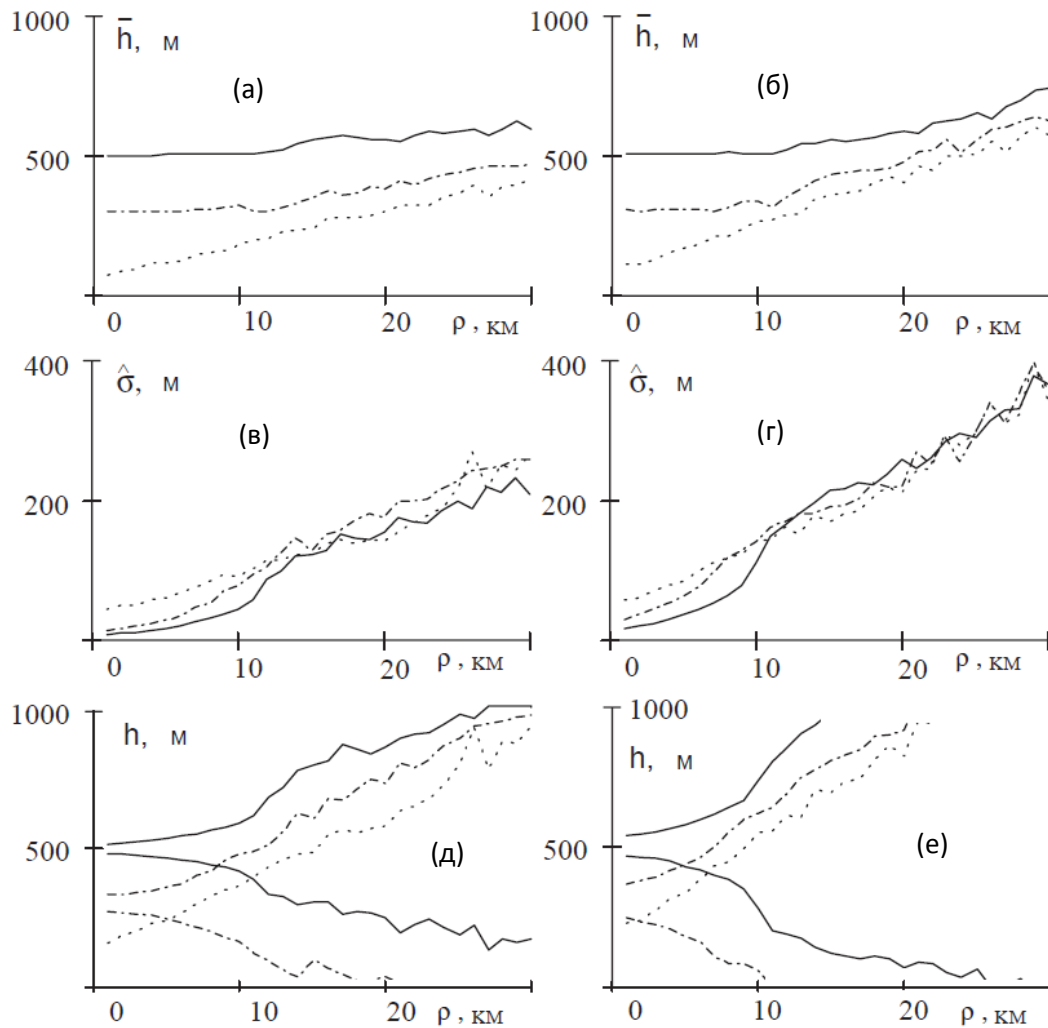


Рисунок 88 - Результат обучения сети для модели типа 4, таблица 18

Перейдём к результатам моделирования работы непосредственно алгоритма оценки высотного диапазона.

Для всех типов моделей (1, 3, 4 и 5) обучение сети (рисунок 81) проводилось для классов  $V_x$  и  $N_x$  при  $x = 15$  м,  $x = 100$  м,  $x = 200$  м, ...,  $x = 1000$  м на  $\gamma = 500$  имитационных решениях задачи (50). Длина серии оценок, поступающих на вход сети равна  $w = 10$ . Моделируемое движение объектов – такое же, как и ранее:

прямолинейное, равномерное со скоростью 20м/с, на постоянной высоте по направлению на станцию (при однопозиционном наблюдении) или на центр системы станций.

На рисунке 89 показаны результаты моделирования алгоритма оценивания и параллельной работы сети рисунка 81.

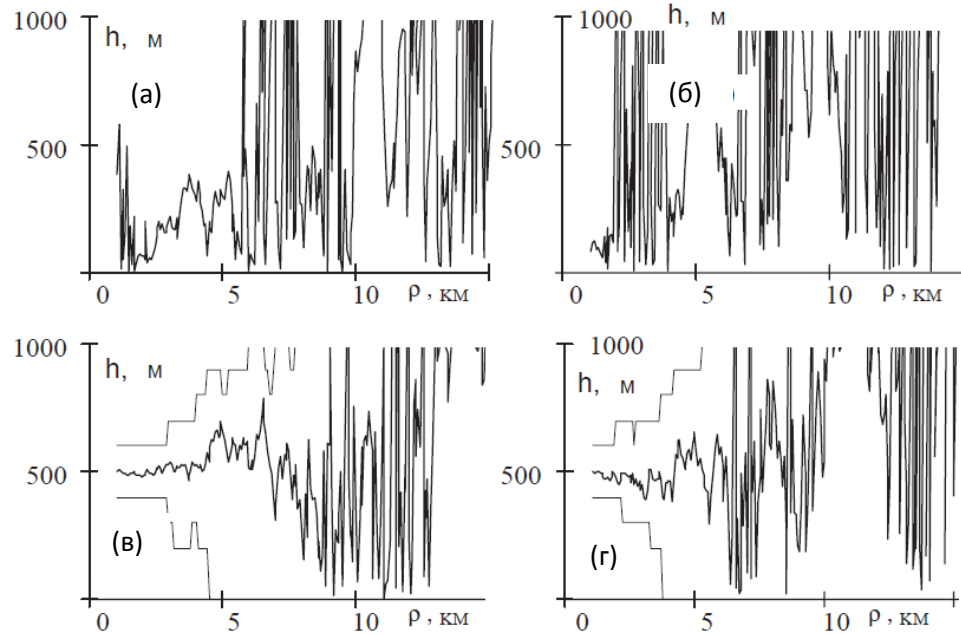


Рисунок 89 - Результаты применения процедуры оценки высотного диапазона объекта для модели типа 1, таблица 18

При  $\xi_r^{(j)}(t_k) \in [-6; 6]m$ ,  $\xi_\psi^{(j)}(t_k) \in [-0.1; 0.1]^\circ$  (левая колонка графиков) и при  $\xi_r^{(j)}(t_k) \in [-12; 12]m$ ,  $\xi_\psi^{(j)}(t_k) \in [-0.2; 0.2]^\circ$  (правая колонка графиков) для модели типа 1 (однопозиционное наблюдение). При этом движение объекта происходит на высотах 15м (морской объект, два верхних рисунка) и 500м (два нижних рисунка). Видно, что для надводного объекта алгоритм оценивания постоянно расходится, что не даёт сделать заключение о его высотном диапазоне (рисунки 89а, 89б), для воздушного объекта такое заключение возможно. Так, например, при меньших ошибках измерений вывод о принадлежности объекта к классу воздушных  $V_{15}$

можно сделать до дальности  $\approx 4500\text{м}$ , а о принадлежности к высотному диапазону  $400\text{м} < h < 600\text{м}$  до дальности  $\approx 3000\text{м}$  (рисунки 89в).

Двухпозиционное наблюдение даёт, естественно, более оптимистичные результаты (рисунки 90 и 91).

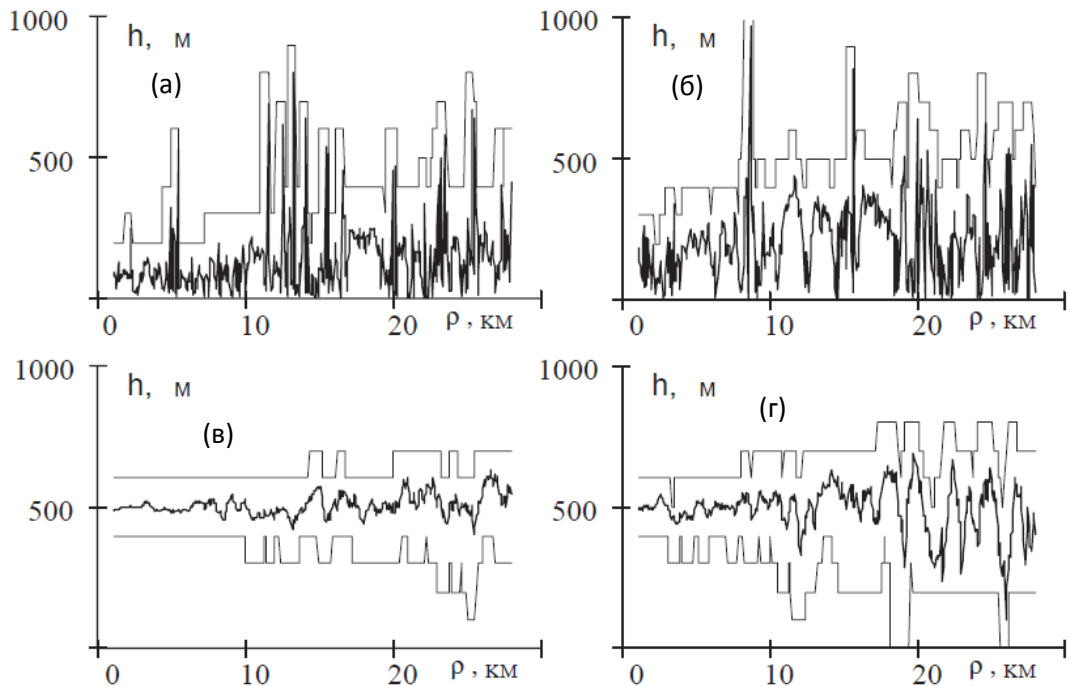


Рисунок 90 - Результаты применения процедуры оценки высотного диапазона объекта для модели типа 3, таблица 18

На рисунке 90 показаны результаты имитационного моделирования алгоритма оценивания и параллельной работы сети рисунка 81 при  $\xi_r^{(j)}(t_k) \in [-6; 6]\text{м}$ ,  $\xi_\psi^{(j)}(t_k) \in [-0.1; 0.1]^\circ$  (левая колонка графиков) и при  $\xi_r^{(j)}(t_k) \in [-12; 12]\text{м}$ ,  $\xi_\psi^{(j)}(t_k) \in [-0.2; 0.2]^\circ$  (правая колонка графиков) для модели типа 3 (двухпозиционное наблюдение). Движение объекта происходит на высотах 15м (морской объект, два верхних рисунка) и 500м (два нижних рисунка). Видно, что при двухпозиционном наблюдении некоторые выводы относительно высотного диапазона наблюдаемого объекта можно сделать как для воздушных, так и для морских целей.

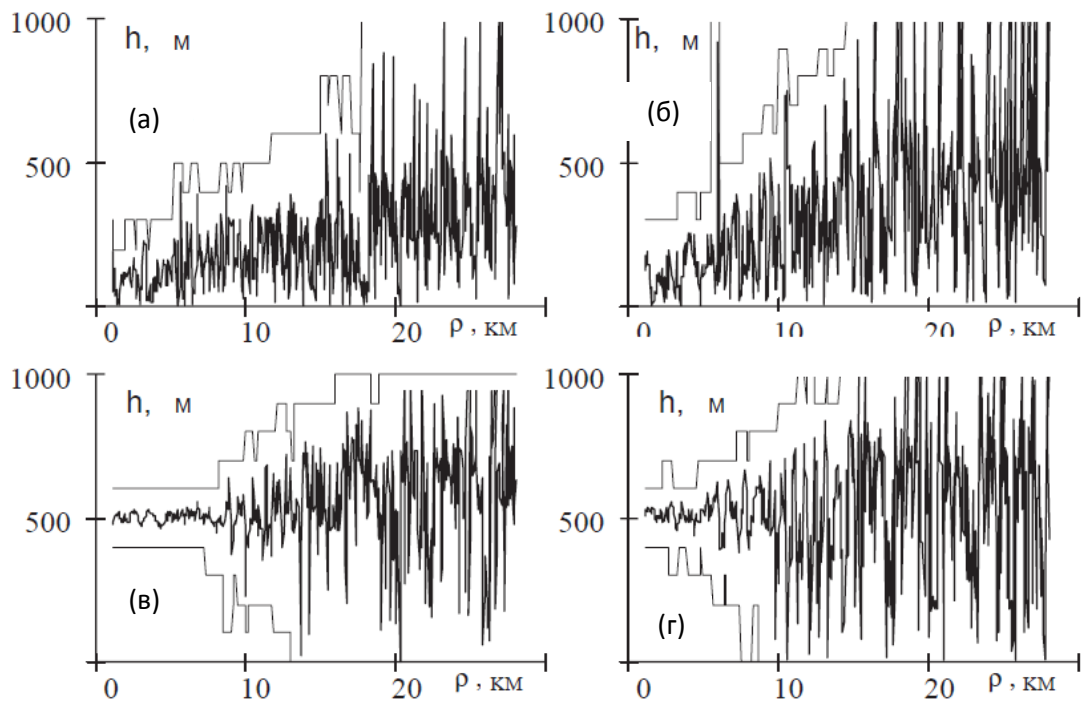


Рисунок 91 - Результаты применения процедуры оценки высотного диапазона объекта для модели типа 4, таблица 18

Так, например, при меньших ошибках измерений морские объекты, движущиеся на дальности 10 000м можно с уверенностью (исключая случайные выбросы) отнести к классу «ниже 300м» (рисунок 90а), а объекты, движущиеся на высоте 500м можно отнести к высотному диапазону  $400\text{м} < h < 600\text{м}$  до дальности  $\approx 10\ 000\text{м}$  (рисунок 90в).

Несколько хуже по всем показателям ведёт себя в рассматриваемой задаче модель типа 4 (рисунок 91). Моделирование проводилось для тех же значений параметров движения объекта и измерений, что и выше соответственно. Так, например, при меньших ошибках измерений надводные объекты, наблюдаемые на дальности 10000м можно отнести к классу «ниже 500м» (рисунок 91а), а объекты, движущиеся на высоте 500м, отнести к высотному диапазону  $400\text{м} < h < 600\text{м}$  до дальности  $\approx 7000\text{м}$  (рисунок 91в). Вывод о принадлежности такого объекта к классу воздушных при меньших измерительных погрешностях можно сделать до дальности, приблизительно, 12000м (рисунок 91в).

О результатах моделирования задачи оценки высотного диапазона для модели типа 5 можно сказать, что в целом они идентичны результатам для модели типа 3. Что касается решения указанной задачи для трёх- и многопозиционного наблюдения, то, как показывают проведённые исследования, результаты его почти идентичны соответствующим результатам для системы наблюдения из двух станций.

В целом по данным проведённых вычислительных экспериментов можно сделать вывод о конструктивной разрешимости модельных представлений нейроструктурами расширенной задачи (50) и о её как принципиальной, так и процедурной разрешимости в таком аспекте.

#### **4.6 Краткие итоги главы 4**

Четвертая глава настоящей работы посвящена комплексному теоретико-численному исследованию разрешимости задачи определения параметров движения наблюдаемого объекта в трёхмерном навигационном пространстве в условиях одно- или многопозиционного двухкоординатного наблюдения (измерений наклонной дальности и азимута).

Разрешимость поставленной задачи наблюдения интерпретируется как совокупность двух понятий: общесистемной разрешимости или наблюдаемости по Калману, разрешимости в условиях конечной точности модельных представлений (представления чисел в ЭВМ и инструментальных погрешностей измерений).

В условиях естественного отсутствия точной информации о силах и моментах, действующих на наблюдаемый объект и обуславливающих его траекторию движения на интервале наблюдения, традиционно принято эволюцию координат объекта описывать простейшими полиномиальными моделями. В рамках этой традиции формализуется и рассматриваемая в работе задача, причём с учётом особенностей класса рассматриваемых объектов модели их движения ограничиваются полиномами второй степени. Указанные модельные представления естественным образом приводят к постановке задачи наблюдения в



виде системы «состояние-измерение» классической структуры. При этом с целью сужения класса ненаблюдаемых опорных решений предлагается её интерпретация в сферической (географической) системе координат. Также отмечается, что сужение класса ненаблюдаемых решений, очевидно, происходит при реализации идеи многопозиционного наблюдения, при этом при её обсуждении затрагивается не только статико-статистический аспект, но и динамический, являющийся наиболее интересной стороной этой идеи.

В качестве основного метода решения рассматриваемой задачи наблюдения объектов в трёхмерном навигационном пространстве предлагается метод наименьших квадратов, к которому приводит её (задачи) конечномерная модельная интерпретация (в виде системы алгебраических линейных уравнений). В рамках анализа разрешимости задачи при конечной точности модельных представлений предлагается подход к априорному определению областей устойчивости решения, являющихся следствием влияния измерительных погрешностей. Указанный подход основывается на апелляции к обуславливающим МНК уравнениям и их статистико-вероятностной интерпретации. Те же МНК представления позволяют построить области процедурной разрешимости задачи в условиях конечной длины разрядной сетки современных ЭВМ.

В рассмотренной задаче наблюдения воздушных объектов, как и в рассматриваемом классе задач наблюдения вообще, имеет место проблема достоверности априорной информации о характеристиках случайных немоделируемых параметров задачи и случайных инструментальных погрешностей измерений. Вместе с тем, выбранный метод решения задачи - метод наименьших квадратов - характеризуется сравнительно низкой чувствительностью к точности задания ковариационной матрицы, особенно при большом количестве обрабатываемых измерений. Качество решения рассмотренной задачи наблюдения почти не снижается в тех случаях, когда коэффициенты ковариационной матрицы отличаются от характеристик соответствующих шумов в 3-5 раз, заметный эффект наступает лишь при недостоверности коэффициентов ковариационной матрицы от

одного порядка, что не характерно для практики. Что касается смещения математических ожиданий шумов, то в рассматриваемой задаче они характеризуются величинами, соизмеримыми с геометрическими размерами объекта, что делает их влияние не существенным. Эти ситуации неоднократно проигрывались при постановке вычислительных экспериментов.

Некоторые результаты проведённого исследования, наглядно, кратко и совокупно отражающие ряд свойств моделей рассматриваемой задачи (50) с точки зрения перспектив их реализации как части программного обеспечения реальных СУДС, приведены в таблице 21.

В главе показано, что в условиях конечности точности модельных представлений сама по себе оценка высоты наблюдаемого объекта не даёт возможности уверенно классифицировать его как воздушный, особенно, если наблюдается маловысотный удалённый объект. Поэтому с целью достижения максимальной степени формализации результатов с точки зрения их практического использования в СУДС предлагается также дополнить конечномерные представления рассматриваемой задачи наблюдения специально разработанными «под неё» моделями: вероятностной моделью распознавания воздушных объектов, в которой вероятность отождествляется с частотой, нечеткими и нейронечеткими системами, нейроподобными структурами.

Последние две модели апеллируют, в свою очередь, к идеям обучения. Указанные доопределения позволяют конструктивно перейти от оценки высоты объекта в исходной задаче к оценке его высотного диапазона (горизонта), и, в частности, к задаче распознавания (селекции) воздушных объектов. В контексте обеспечения навигационной безопасности коллективного движения морских судов такая интерпретация позволяет решить проблему генерации ложных тревог, когда воздушные объекты ошибочно принимаются за морские.

Таблица 21 - Некоторые свойства задачи (50)

Тип модели	1	3	4	5
Информационная база	Дальность, азимут (одна РЛС)	Дальность, азимут (две РЛС)	Дальность, азимут (две РЛС)	Дальность, азимут (две РЛС)
Оцениваемые параметры	$\varphi(t_k), a_1^{(\varphi)}, \lambda(t_k), a_1^{(\lambda)}, R(t_k),$	$\varphi(t_k), a_1^{(\varphi)}, \lambda(t_k), a_1^{(\lambda)}, R(t_k),$	$\varphi(t_k), a_1^{(\varphi)}, \lambda(t_k), a_1^{(\lambda)}, R(t_k), a_1^{(R)}.$	$\varphi(t_k), a_1^{(\varphi)}, a_2^{(\varphi)}, \lambda(t_k), a_1^{(\lambda)}, a_2^{(\lambda)}, R(t_k).$
Область устойчивого решения по отношению «высота-дальность»	$h/\rho > 0.05$	$h/\rho > 0.02$	$h/\rho > 0.025$	$h/\rho > 0.02$
Погрешность оценки высоты при высоте 500м, дальности 10км и скорости объекта 20м/с	400м	70м	100-150м	70м
Погрешность оценки места при высоте 500м, дальности 10км и скорости объекта 20м/с	30м	5м	5м	5м
Погрешность оценки скорости при высоте 500м, дальности 10км и скорости объекта 20м/с	0.1м/с	0.25м/с	0.5м/с	1м/с
Идентификация воздушных целей при высоте 500м, скорости 20м/с, до дальности	4.8км	27км	12км	27км
Работа по маневрирующим целям	-	+	+	+

Основные результаты, представленные в главе 4, были опубликованы в статьях [28, 46, 47, 49, 54, 58, 78, 81, 189], отражены в патенте на изобретение [86].

## **Глава 5. Некоторые особенности функционирования СУДС как программных комплексов**

### **5.1 Особенности программной архитектуры СУДС**

Обратимся к обсуждению вопросов декомпозиции, модельной интерпретации и механизмов практической реализации рассмотренных выше задач в реальных СУДС. В том случае, если СУДС строится на базе одной или нескольких РЛС кругового обзора, то выделяются следующие этапы обработки измерительной информации (см. п. 1.3):

- Получение измерительной информации и «введение» её в память ЭВМ с помощью аналого-цифровых устройств (первичная обработка данных);
- Обеспечение обнаружения, захвата, сопровождения целей и оценки нужных параметров (вторичная обработка данных);
- В случае необходимости обеспечение компрессии информации (как непосредственно измерительной, так и любой другой), оптимизации её передачи по сетям ЭВМ, либо внутри архитектуры одной многопроцессорной вычислительной машины и дальнейших процедурных манипуляций (третичная обработка данных).

Следует отметить, что в настоящее время, как правило, ни в аппаратной части, ни в программном обеспечении все эти этапы вовсе не обязательно реализуются как отдельные блоки. Используемая здесь исторически сложившаяся (пришедшая из предметной области аналоговой радиотехники) терминология просто представляет собой особый язык для представления уровня и способа обработки информации и их обсуждения.

Рассмотрим один из механизмов реализации указанных этапов при построении СУДС на основе цифровой техники.

Пусть система состоит из одной РЛС. Тогда программная архитектура навигационных функций СУДС может быть представлена следующей схемой (рисунок 92).

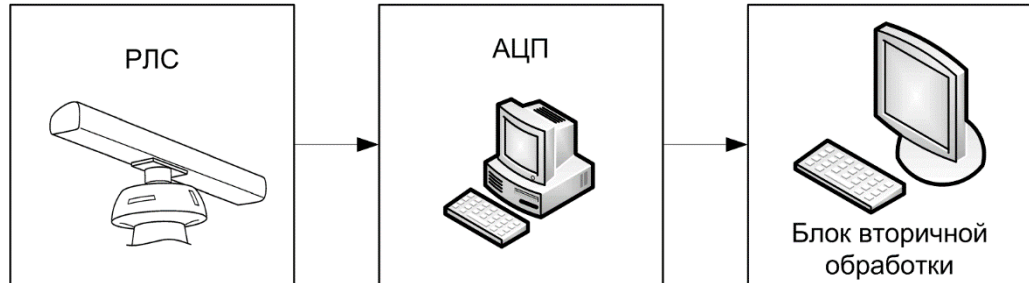


Рисунок 92 - Архитектура компьютеризированной радиолокационной системы наблюдения

Получаемый с помощью антенно-фидерного оборудования, несущий информацию о навигационном пространстве отражённый радиосигнал обрабатывается с помощью аналого-цифровых устройств (АЦП), и интерпретируется в виде двумерного массива в памяти ЭВМ (матрицы амплитуд), представляя собой при этом в каждый момент времени множество кортежей

$$\{r_i, \psi_j, a_{ij}\}, i = \overline{1, N_r}, j = \overline{1, N_\psi}, \quad (56)$$

где  $N_r, N_\psi$  - количество дискретов (доменов) по расстоянию и углу, на которые разбивается зона ответственности СУДС (навигационное пространство),  $r_i, \psi_j$  - соответствующие  $ij$  дискрету (домену) значения расстояния и азимута, причём, как правило,  $r_i = i \times \Delta r, \psi_j = j \times \Delta \psi$  - соответствующее  $ij$  домену значение амплитуды радиолокационного эхо-сигнала. При этом  $N_r \times \Delta r$  - максимальное расстояние действия РЛС (зависящее от её шкалы дальности),  $N_\psi \times \Delta \psi = 360^\circ$  (если используется РЛС кругового обзора). Обновление массива, соответствующего (56), происходит динамически - по одной линейке  $\psi_j$ , либо посекторно (несколько линеек за раз). Совокупность процедур получения, передачи и АЦП-интерпретации

радиолокационного сигнала является, в данном случае, контуром первичной обработки информации. Сгенерированное в нём множество (56) является базовым для работы всех остальных навигационных функций СУДС, определяя тем самым исключительную автономность этого контура.

Дальнейшая обработка радиолокационной информации связана, прежде всего, с реализацией процедур сопровождения траектории объекта, направленных на углубленную по сравнению с первичной обработкой формализацию РЛС-сигнала, а именно - на отождествление реального физического объекта, и, соответственно, его РЛС-образа с некоторой точкой фазового пространства  $(r, \psi)$  в момент каждого облучения объекта антенной. Результатом работы алгоритма сопровождения является массив векторов  $(r, \psi)_k$ , отождествляемый с измеренными значениями азимута и расстояния до цели в каждый момент времени.

Полученный массив измерений  $(r, \psi)_k$ , поступает на вход процедур оценивания различного типа, результатом работы которых является оценка вектора состояния наблюдаемого объекта  $\hat{s}$  в каждый момент времени. Совокупность процедур сопровождения и оценки является, в данном случае, контуром вторичной обработки информации.

Аналого-цифровое преобразование радиолокационного эхо-сигнала с высокой частотой и большим диапазоном дискретизации приводят к значительным объемам получаемых данных (матрицы амплитуд), что в ряде случаев делает невозможной их передачу между компонентами распределённой информационной системы в условиях ограниченной пропускной способности сетевого оборудования. Это требует предварительного анализа этих ограничений и принятия соответствующих мер (выбора нужных параметров дискретизации, ограничения секторов обзора и шкалы дальности РЛС и т.п.). В приложении В приведены некоторые результаты экспериментов по измерению скорости передачи данных в распределённых информационных системах, построенных на базе программных платформ и оборудования общего назначения.

Анализ программной архитектуры навигационных функций компьютеризированной РЛС делает очевидной некоторую диалектику понятий «сопровождение» и «оценка». Дело в том, что алгоритмическую основу того и другого этапа составляют процедуры, направленные на фильтрацию измерительных ошибок, причём зачастую реализующие даже одну и ту же модель, и их различие состоит лишь в том, какая информация с их выхода является основной - об измерениях или об оценке. В связи с этим на практике нередки случаи, когда процедуры оценивания вообще отсутствуют в системе как отдельная часть архитектуры, а в качестве оценки  $\hat{s}$  выступают данные выхода процедуры сопровождения.

При увеличении числа РЛС в системе их радиолокационный сигнал может комплексироваться двумя способами.

В первом подходе оцифрованный эхо-сигнал (каждой РЛС по отдельности) используется процедурами сопровождения для формирования массива векторов  $(r, \psi)_k$ , отождествляемого с измеренными значениями азимута и расстояния до цели в каждый момент времени относительно каждой из РЛС. Полученные таким образом измерения поступают на вход процедур их комплексирования согласно различным схемам, для формирования в памяти блоков необходимого формата. При этом измерительная информация может находиться и обрабатываться как внутри одной машины, так и быть принадлежностью сети ЭВМ. Совокупность процедур комплексирования является, в данном случае, контуром третичной обработки информации. Затем реализуется та же совокупность действий, что и в случае с системой, состоящей из одной РЛС - измерения поступают на вход процедур оценивания.

Во втором подходе комплексирование (третичная обработка) проводится непосредственно на уровне оцифрованных РЛС-образов. При этом результатом комплексирования и информационной базой для реализации всех остальных функций является также двумерный массив в памяти ЭВМ, похожей на (56)

структуры, получаемый с помощью различных подходов, и являющийся конкатенацией массивов (56) от каждой РЛС.

Выбор в пользу того или иного способа комплексирования измерений, получаемых разными РЛС, действующими в рамках единой информационной системы, зависит прежде всего от задач, стоящих перед системой в целом, и от её аппаратного обеспечения. Первый подход характеризуется минимальными требованиями к пропускной способности сетевого оборудования (см. п. 5.2), второй – более устойчивой и достоверной работой алгоритмов сопровождения траектории объекта.

Из изложенного становится понятной некоторая условность выделения вторичного и третичного уровня обработки информации в современной цифровой технике. Более целесообразно и оправдано говорить об аппаратно-программном уровне, отождествляя его с первичным, и чисто программном, подразумевая в нём и вторичную, и третичную обработку информации.

## **5.2 Визуализация навигационной информации на рабочем месте судоводителя**

При функционировании бортовой или береговой СУДС центральным звеном взаимодействия «наблюдаемый объект - система» является судоводитель (оператор СУДС), который на основании поступающих к нему данных осуществляет контроль своего района ответственности с учётом правовых и технических норм [140]. Автоматизированное рабочее место оператора характеризуется графическим интерфейсом [93, 111], центральной задачей которого является формирование, последовательное наложение и отображение четырёх изображений:

- статического изображения карты и навигационных ориентиров;
- меняющегося по мере обзора радиолокационного образа, формируемого РЛС;



- меняющегося по мере обработки РЛС образа и других источников данных (например, АИС) набора меток целей;
- дополнительной информации, связанной с обеспечением навигационной безопасности движения и сервисными функциями системы.

Формирование каждого из этих изображений имеет свои особенности. Так, изображение карты является фоновым и меняется только при изменении наблюдаемого оператором участка зоны ответственности и масштаба изображения. Следующий слой - изображение РЛС-образа - есть результат специального преобразования меняющейся во времени матрицы амплитуд отражённого эхо-сигнала. Частота его обновления определяется периодом обращения радара и требованиями к дружелюбности интерфейса. Наконец, слои изображений меток целей и дополнительной навигационной информации формируются по результатам вторичной обработки РЛС сигнала и дополнительных источников данных (АИС) и обновляются по мере эволюции координат наблюдаемых объектов и других данных о них.

Остановимся на задачах визуализации изображения РЛС-образа и информации о возможном опасном сближении судов подробнее.

### 5.2.1 Визуализация данных радиолокационного наблюдения

При отображении измерительной информации, содержащейся в матрице амплитуд  $A$  обычно применяется порогово-амплитудный принцип визуализации типа

*если  $a_{ij} > p_{ij}$ , то дискрет  $ij$  - отображается,*

где  $a_{ij}$  - элемент матрицы амплитуд отражённого эхо-сигнала, соответствующий  $i$ -му дискрету по дальности и  $j$ -му номеру линейки (дискрету по углу)  $i = \overline{1, N_r}$ ,  $j = \overline{1, N_\psi}$ , а  $p_{ij}$  - соответствующее  $ij$ -му дискрету значение порога визуализации. Элементами, изображающими тот или иной  $ij$ -дискрет, в зависимости от масштаба

изображения могут выступать точки, четырёхугольники или окружности. Координаты  $x(i, j)$ ,  $y(i, j)$  элемента изображения связываются при этом со значениями  $i, j$ , например, следующими соотношениями:

$$x(i, j) = c_x - (i \cdot \delta_r \cdot \sin(j \cdot 2\pi / N_\psi) / m),$$

$$y(i, j) = c_y - (i \cdot \delta_r \cdot \cos(j \cdot 2\pi / N_\psi) / m),$$

где  $c_x, c_y$  - координаты в изображении точки, отождествляемой с РЛС,  $\delta_r$  - величина дискрета по дальности,  $m$  - величина, характеризующая масштаб изображения.

Центральной проблемой при формировании РЛС-образа является вопрос о назначении порогов визуализации  $p_{ij}$ , являющийся, по сути, вопросом о выборе критерия выделения полезной составляющей радиолокационного эхо-сигнала на фоне помех. Задаваясь таким критерием, необходимо учитывать, что отражённый эхо-сигнал, поступающий на вход радар-процессора, представляет собой сложную композицию постоянных и случайных составляющих [88, 95 и др.]: сигналов, отражаемых от наблюдаемого объекта; сигналов, отражаемых от подстилающей поверхности (моря); шумов, обусловленных атмосферными помехами; тепловых шумов высокочастотного тракта РЛС и шумов в электрических сетях. С учётом физически ориентированных представлений, будем рассматривать пороги визуализации двух видов:

- постоянный порог  $p_{ij} = c$  для всех  $i, j$ ;
- адаптивный порог  $p_{ij} = a/i^2 + b$ .

Коэффициенты  $a, b$  и  $c$  могут при этом выбираться как оператором вручную, так и настраиваться автоматически посредством реализации оптимизирующей процедуры

$$\frac{\partial(u(c)/N_r)}{\partial(c/c_{\max})} = 1, \quad \frac{\partial^2(u(c)/N_r)}{\partial(c/c_{\max})^2} < 0 \quad (57)$$

для постоянного порога, и

$$\frac{\partial(u(a,b)/N_r)}{\partial(b/b_{\max})} = 1, \quad \frac{\partial^2(u(a,b)/N_r)}{\partial(b/b_{\max})^2} < 0$$

$$\frac{\partial(u(a,b)/N_r)}{\partial(a/a_{\max})} = 1, \quad \frac{\partial^2(u(a,b)/N_r)}{\partial(a/a_{\max})^2} < 0 \quad (58)$$

для адаптивного порога. Здесь  $N_r$  - число дискретов на выбранной линейке,  $u$  - число на этой линейке дискретов, для которых  $a_{ij} < p_{ij}$ ;  $a_{\max}$ ,  $b_{\max}$ ,  $c_{\max}$  - максимальные возможные значения коэффициентов  $a$ ,  $b$  и  $c$ , в данном случае  $b_{\max} = c_{\max} = \max_i(a_{ij})$ ,  $a_{\max} = \max_i((a_{ij} - b) \cdot i^2)$ . Предлагаемая процедура позволяет находить значения визуализирующих коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $c$  конкретного радиолокационного образа  $A$  достаточно быстро и эффективно.

Рассмотренный подход к визуализации радиолокационного образа был реализован в действующем макете компьютеризированной РЛС [33-35], имеющем следующие технические характеристики:

- ширина диаграммы направленности антенны РЛС  $1.5^\circ$  по азимуту и  $35^\circ$  по высоте;
- период обращения антенны РЛС 2.5 секунд;
- длина зондирующего импульса 50 метров;
- частота следования посылок 820 Гц;
- частота дискретизации АЦП до 50 МГц;

Рисунок 93 иллюстрирует одну из реализаций процедуры нахождения порогов визуализации отражённого эхо-сигнала  $p_{ij}$  для случаев постоянного (левая колонка) и адаптивного (правая колонка) порогов.

На рисунке 93а показаны значения амплитуд  $a_{ij}$  отражённого эхо-сигнала на выбранной линейке в зависимости от номера дискрета по дальности  $i$  (сплошная линия) и рассчитанный согласно (57) постоянный порог (точки), соответствующий нужным значениям величины  $u(c)/N_r$  (рисунок 93в) и сглаженным значениям

производной  $u' = \frac{\partial(u(c)/N_r)}{\partial(c/c_{\max})}$  (рисунок 93д). Аналогично, на рисунке 93б показаны

амплитуды и рассчитанный для них согласно (58) адаптивный порог, соответствующий требуемым  $u(a,b)/N_r$  при  $b=c$  (рисунок 93г) и

$u' = \frac{\partial(u(a,b)/N_r)}{\partial(a/a_{\max})}$  (рисунок 93е). Видно, что предлагаемый способ для

автоматизированного назначения порогов визуализации позволяет достаточно корректно выделять на фоне помех как удалённые (цель 2), так и близко лежащие (с помощью адаптивного порога, цель 1) цели.

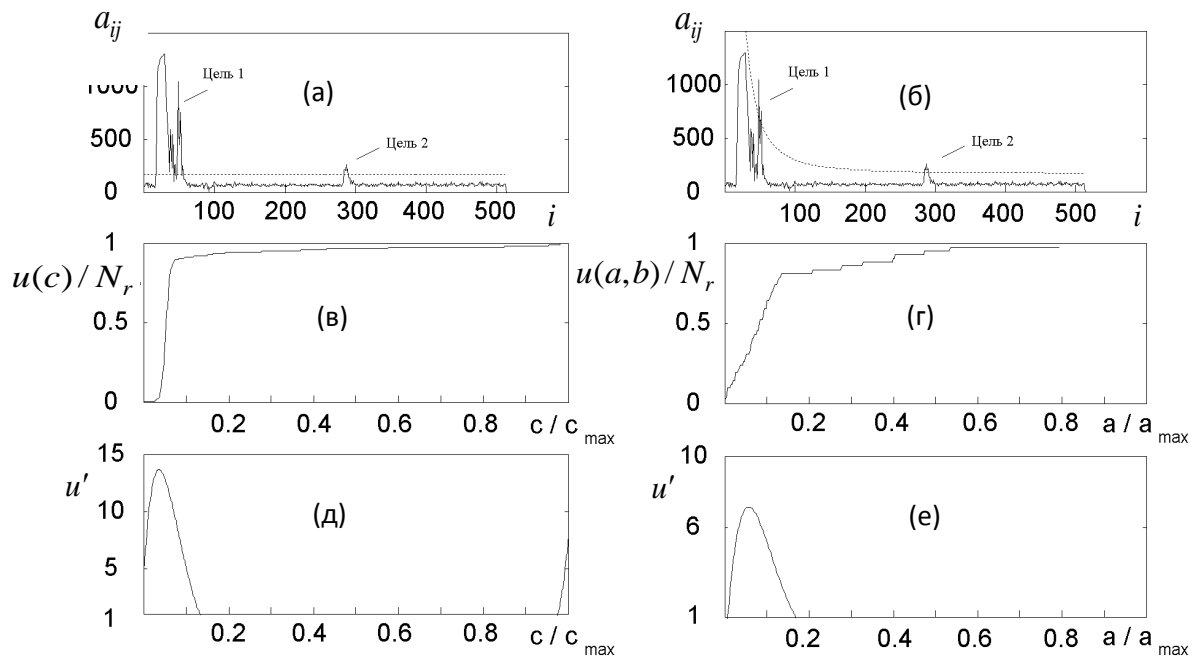


Рисунок 93 - Результаты натурального эксперимента по определению значений постоянного и адаптивного порогов визуализации отражённого эхо-сигнала

В качестве визуальной метки сопровождаемого объекта в системах наблюдения на море обычно используется изображение «кружка со стрелкой» (рисунок 94), где центр круга характеризует оцененные координаты наблюдаемого объекта, а стрелка – его скорость и направление движения.

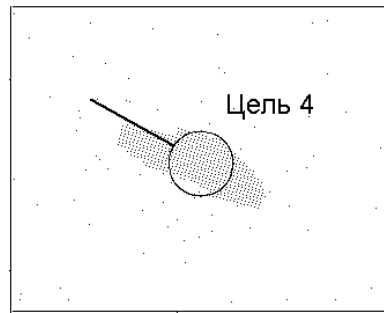


Рисунок 94 - Радиолокационное изображение объекта и его метки

На рисунке 94 показан пример такой метки на фоне изображения отражённого эхо-сигнала, визуализация которого происходила по методу (58). В целом, как свидетельствует наработанная на созданном макете [33-35] практика, рассмотренный в настоящей работе подход к решению проблемы визуализации радиолокационного образа акватории вполне удовлетворяет современным требованиям, предъявляемым к ресурсоёмкости, дружелюбности и эргономичности пользовательского интерфейса.

### **5.2.2 Визуализация информации, предоставляемой системой предупреждения об опасном сближении судов**

Как уже было отмечено, управление движением морских судов имеет свою особую специфику, состоящую в том, что вся ответственность за судно лежит на судоводителе (капитане). Оператор СУДС также несёт персональную ответственность за инциденты, произошедшие в его зоне контроля. Поэтому работа СУДС и собственно управление судном не могут быть полностью автоматизированными. С другой стороны, постоянный рост трафика, размеров и скоростей судов повышает нагрузку на судоводителей и операторов СУДС, у них остается всё меньше времени для принятия решений, что является побудительным мотивом автоматизации контроля за движением судов с целью повышения безопасности движения. Таким образом, главной проблемой функционирования как береговых СУДС, так и бортовых судоводительских средств поддержки

принятия решения является необходимость обеспечения участия оператора в процессе контроля за движением одновременно с высокой степенью автоматизации этого процесса. Это требует разработки специальных подходов и методов, обеспечивающих совместную работу операторов и автоматики. В настоящее время эта проблема решается путём визуализации сводной навигационной информации различными способами.

Традиционным подходом к такой визуализации является отображение опасных и безопасных значений вектора скорости управляемого судна. Например, известны классические модели Митрофанова [220] и Дегрэ, Лефевра [185] (рисунок 95).

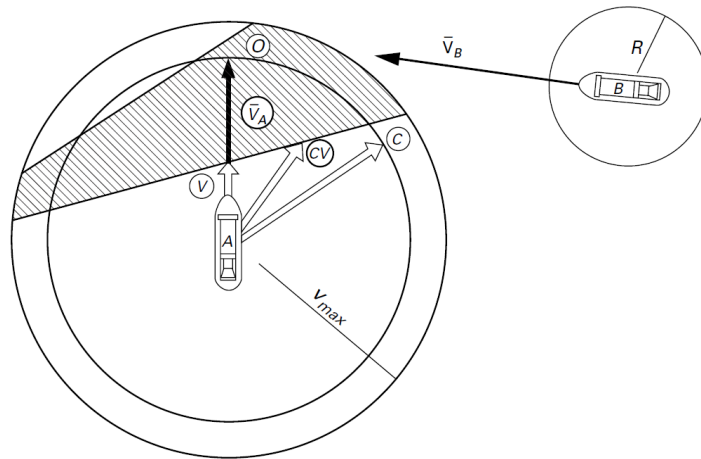


Рисунок 95 - Идея модели области маневра Дегрэ и Лефевра

Модель строится на основе представлений относительного движения двух судов, подробно рассмотренных в п. 3.2.2. Элементы рисунок 95 имеют следующий смысл:  $A$  – управляемое судно,  $B$  – судно-цель.  $\vec{V}_A$  - вектор скорости управляемого судна,  $\vec{V}_B$  - вектор скорости судна-цели. Видно, что  $\vec{V}_A$  находится в опасной (заштрихованной) зоне.  $V$  - вектор скорости, соответствующий безопасному движению управляемого судна без изменения курса.  $CV$  - вектор скорости, соответствующий безопасному движению управляемого судна, когда изменяются и скорость, и курс.  $C$  - вектор скорости, соответствующий безопасному движению

управляемого судна, когда изменяется только курс. Представление информации об опасных и безопасных параметрах движения управляемого судна рассмотренным способом даёт возможность облегчить экспертное (интуитивное) принятие решения судоводителем.

В настоящей работе предлагается доопределить традиционные модельные представления с учетом разработанных в главе 3 моделей, позволяющих осуществить переход от двухуровневой градации «опасный-безопасный» к многоуровневой и нечеткой. Совмещение классических моделей (рисунок 95) с многоуровневыми моделями оценки уровня опасности «судно-судно» с цветовой интерпретацией (красный, желтый) опасных и безопасных скоростей и курсов движения даёт возможность обеспечить оператору СУДС и судоводителю принятие наиболее подходящего для конкретной обстановки решения для обеспечения навигационной безопасности коллективного движения судов (тому или иному изменению параметров движения судна), оставляя, вместе с тем, место для интуитивной экспертной компоненты.

Известна работа [233], в которой рассматривается наиболее близкий из известных аналог такого подхода. На рисунке 96 показан пример визуализации очень опасных (красные), менее опасных (розовые), нежелательных (серые) и безопасных (белые) значений вектора скорости управляемого судна.

В данном случае градация «красный-розовый» обусловлена размерами корабельного домена, а «белый-серый» - правилами судоходства МППСС. В отличие от подхода-аналога в настоящей диссертационной работе разделение уровней опасности основано на траекторных свойствах движения, что отвечает особенностям внешнего наблюдения при реализации модели в береговой системе управления движением судов и характеру задач, возложенных на неё.

Рассмотрим модельный пример, иллюстрирующий суть предлагаемой методики визуализации опасных и безопасных параметров движения управляемого судна.

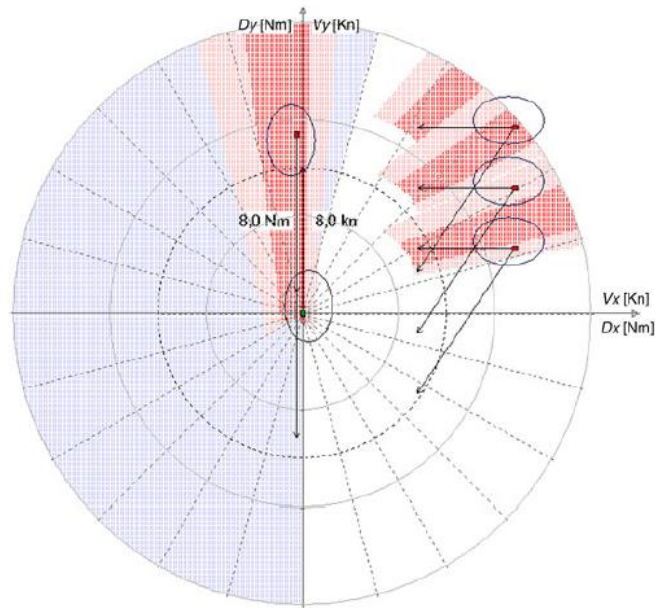


Рисунок 96 - Значения вектора скорости, соответствующие различным уровням (красный, розовый, серый и белый) опасности при движении судна

На рисунке 97 показаны моделируемые положения управляемого судна ( I ) и двух судов-целей. Одно из них ( II, находится в точке с относительными координатами (3000, 3000) м) движется прямолинейно и равномерно с вектором скорости (-5, -5) м/с, второе ( III, находится в точке с относительными координатами (1000, 400) м) – движется с вектором скорости (-5, 0) м/с и маневрирует.

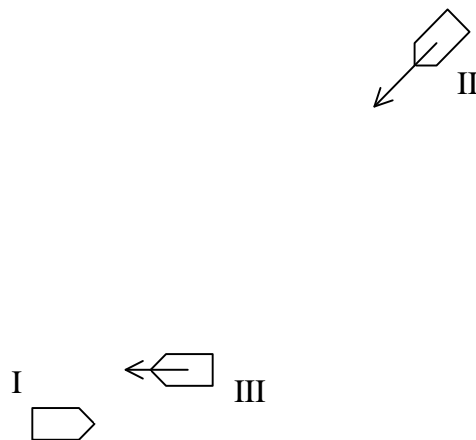


Рисунок 97 - Расположение и скорости судов-целей (II и III) и управляемого судна (I)



Визуализация опасных и безопасных возможных скоростей и курсов движения управляемого судна (I) для навигационной ситуации рисунка 97 показана на рисунке 98.

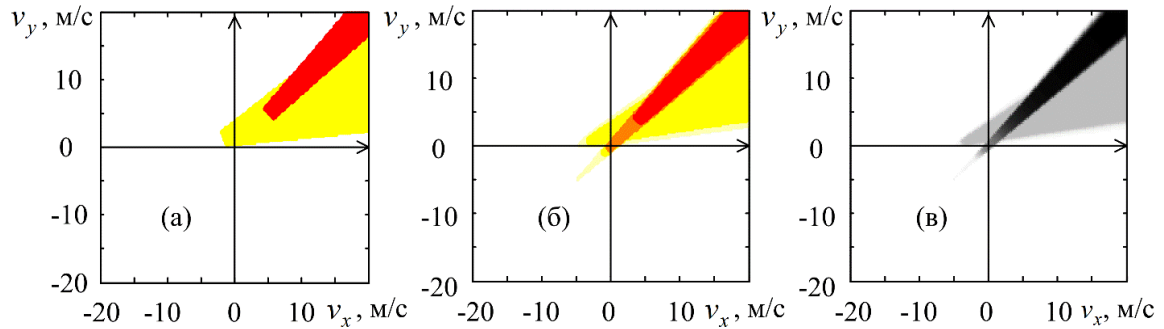


Рисунок 98 - Визуализация опасных и безопасных скоростей и курсов движения для навигационной ситуации рисунка 97

На рисунке 98а показаны значения  $v_x$ ,  $v_y$  - компонент вектора скорости судна (I), рисунок 97, соответствующие уровням опасности GREEN (белая зона), YELLOW (жёлтая зона) и RED (красная зона), определёнными упрощённой трёхуровневой моделью таблицы 12 (см. п. 3.3.2 и 3.3.3). Пороговое значение времени  $T^*$  принималось равным 300с. В данном случае красная зона создаётся судном, движущимся прямолинейно и равномерно (II), а жёлтая – маневрирующим судном (III).

На рисунке 98б показаны значения компонент вектора скорости судна ( I ), соответствующие различным уровням опасности, определёнными двухуровневой нечёткой системой типа Сугено, таблица 15. (см. п. 3.3.4.5) и функциями принадлежности, показанными на рисунке 51 (см. п. 3.4.3.3). Цветовая гамма рисунка подобрана согласно таблице 22.

Рисунок 98в аналогичен рисунку 98б, но показывает значения уровней опасности соответствующими оттенками серого цвета.

Таблица 22 - Цветовая гамма для визуализации уровня опасности движения судна при его оценке двухуровневой нечёткой системой

№	Уровень опасности	Цвет точки
1	$1.7 < u \leq 2$	красный
2	$0.9 < u \leq 1.7$	оранжевый
3	$0.49 < u \leq 0.9$	ярко-жёлтый
4	$0.05 < u \leq 0.49$	бледно-жёлтый
5	$u \leq 0.05$	белый

Данные, представленные на рисунке 98, наглядно представляют опасные и безопасные курсы и скорости движения управляемого судна, что позволяет судоводителю (оператору береговой СУДС) легко принять решение и не допустить опасного сближения.

Было проведено моделирование предлагаемой методики визуализации опасных и безопасных параметров движения управляемого судна на данных о реальном движении судов. На рисунке 99 показано положение и скорости судов в заливе Находка. Красным цветом показаны покоящиеся суда, а, также, суда, движущиеся прямолинейно и равномерно. Жёлтым цветом показаны маневрирующие суда. Длина стрелки соответствует скорости движения судна, а направление стрелки – курсу судна. Синими кружками (1-5) показано моделируемое положение управляемых судов, для которых выполняется визуализация.

На рисунке 100 показаны результаты визуализация опасных и безопасных возможных скоростей и курсов движения моделируемых управляемых судов 1-5, рисунок 99 (Примечание: некоторые суда-цели, по которым также производился расчёт, находятся за границами рисунка 99).

Первая строчка рисунков (100а, 100б, 100в) соответствует судну 1, вторая – судну 2 и т.д. При этом в первой колонке рисунков показаны значения компонент вектора скорости моделируемого судна, соответствующие уровням опасности GREEN (белая зона), YELLOW (жёлтая зона) и RED (красная зона),

определёнными упрощённой трёхуровневой моделью таблицы 12 (см. п. 3.3.2 и 3.3.3) для порогового значения времени  $T^* = 300\text{с}$ .

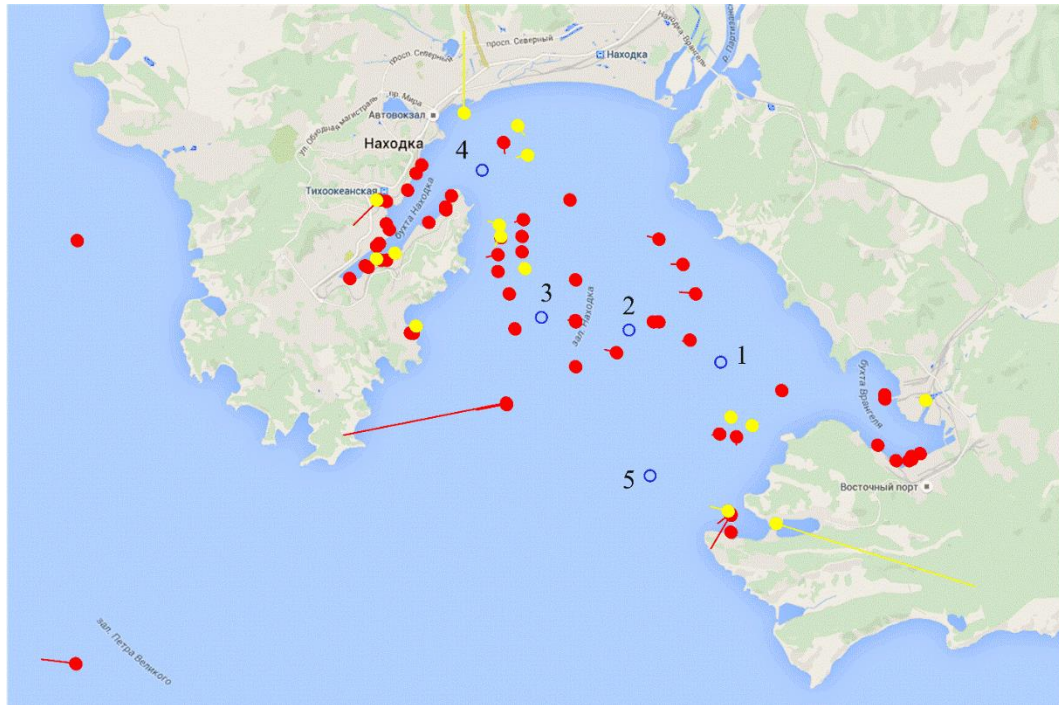


Рисунок 99 - Расположение судов в заливе Находка. Синими кружками показаны моделируемые суда, для которых выполняется визуализация опасных и безопасных параметров движения

Во второй колонке рисунка 100 - значения компонент вектора скорости моделируемого судна, соответствующие различным уровням опасности, определёнными двухуровневой нечёткой системой типа Сугено, таблица 15 (см. п. 3.3.4.5) и функциями принадлежности, показанными на рисунке 51 (см. п. 3.4.3.3). Значения цветов для различных уровней опасности заданы таблицей 19. Третья колонка рисунка 100 аналогична второй, но уровень опасности показан различными оттенками серого цвета. Видно, что, например, для судна 3 окружающая навигационная обстановка такова, что безопасным является лишь движение курсом на юг (рисунки 100ж, 100з, 100и); для судна 4 безопасный выход из залива на юг сильно затруднён, хотя и возможен (рисунки 100к, 100л, 100м); для

судна 5 вполне возможно безопасное движение в сторону пирса на юго-восток, но при этом скорость движения должна быть невелика (рисунки 100и, 100о, 100п).

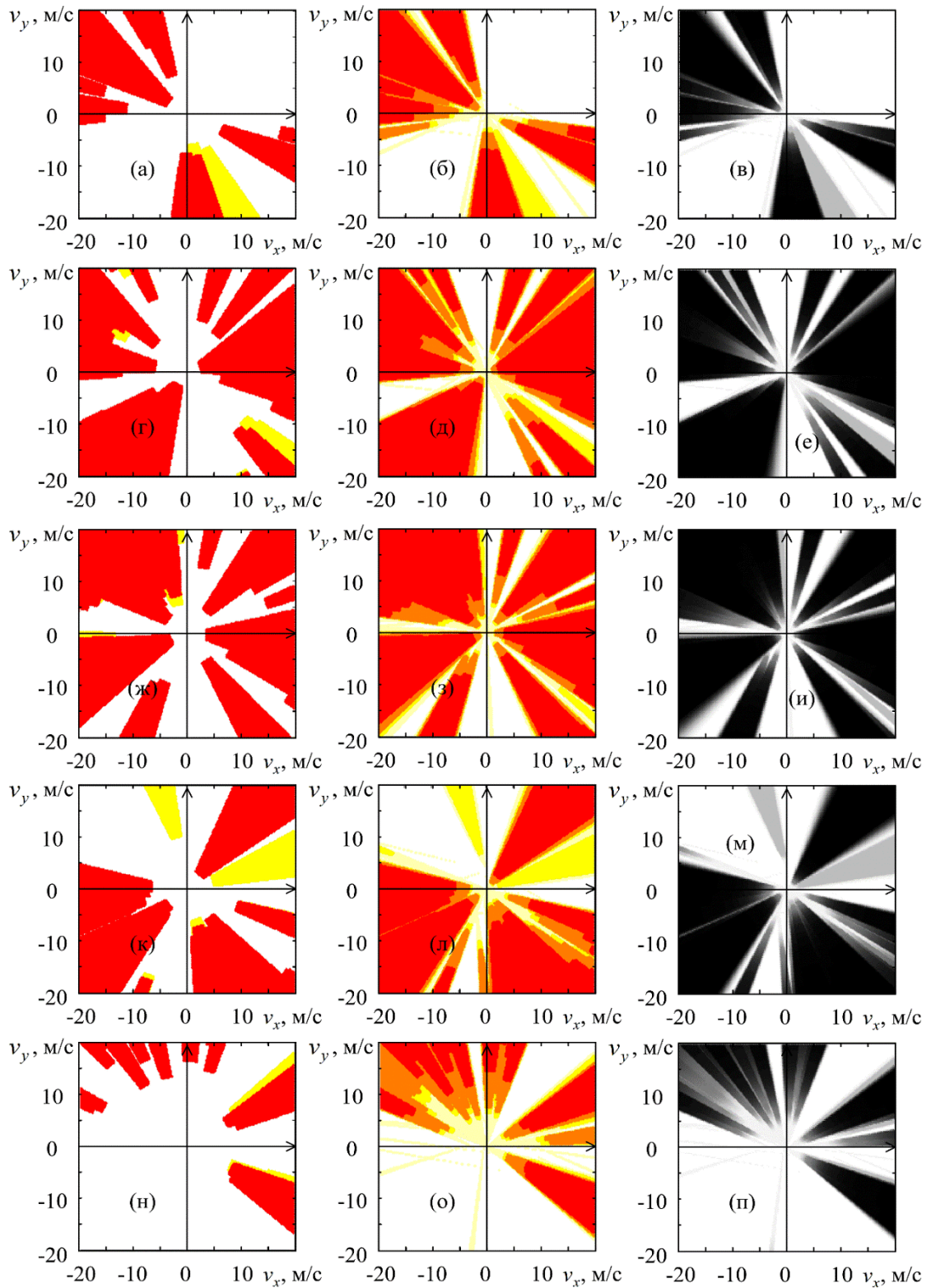


Рисунок 100 - Результаты моделирования визуализации опасных и безопасных скоростей и курсов движения

В целом предлагаемая методика визуализации опасных и безопасных параметров движения управляемого судна применима как в бортовой системе поддержки принятия решений, так и в береговых системах управления движением судов и позволяет решить задачу о выборе судоводителем (оператором СУДС) той или иной траектории движения судна. Кроме того, по степени заполнения и насыщенности цветов диаграммы опасных и безопасных параметров движения можно судить о психологической нагрузке на судоводителей в той или иной навигационной обстановке.

### **5.3 Краткие итоги главы 5**

Пятая глава посвящена рассмотрению некоторых аспектов функционирования программной компоненты СУДС. Информационная база и целевое назначение систем управления движением судов определяют специфическую архитектуру СУДС как программного комплекса. Как правило, СУДС представляет собой распределённую информационную систему, отдельные компоненты которой связаны с помощью сетевого оборудования. Основу информационной базы СУДС составляют радиолокационные станции (РЛС) кругового обзора и приёмопередатчики Автоматической идентификационной системы (АИС).

Автоматизированное рабочее место оператора является главной составляющей пользовательского интерфейса СУДС. Принято, что оно отражает следующую информацию: статическое изображение карты акватории, меняющееся по мере обновления изображение радиолокационного образа, меняющееся по мере обработки информации изображение меток наблюдаемых объектов и дополнительную навигационную информацию, способствующую принятию диспетчерских решений.

Формирование изображения радиолокационного образа требует решения специфической задачи выделения полезной составляющей радиолокационного

эхо-сигнала на фоне помех. В работе предложен метод автоматизированного выбора параметров для порогово-амплитудного способа визуализации данных РЛС. Метод реализован и апробирован на действующем макете компьютеризированной РЛС.

В условиях высокой интенсивности трафика судоводителям и операторам СУДС требуются особые инструменты поддержки принятия решений. В работе предложен метод визуализации информации о навигационной обстановке на акватории, сочетающий в себе классические подходы Митрофанова и Дегрэ, Лефевра и разработанный в главе 3 настоящей работы комплекс математических моделей многоуровневой оценки риска опасного сближения судов. Предложенный подход позволяет наглядно представлять информацию об опасных и безопасных параметрах движения судов на рабочем месте оператора СУДС и судоводителя. Одновременная визуализация полученных данных «на берегу» и «на борту» даёт возможность обеспечить согласование действий оператора СУДС и судоводителя, что соответствует современному развитию СУДС по пути углубления интеграции с судовыми системами и береговыми службами (е-навигация). Кроме того, разработанная модель представления информации о навигационной обстановке на акватории позволяет оценить эмоциональную нагрузку на судоводителей. Это открывает перспективную возможность постановки и решения задачи оценки степени опасности той или иной схемы движения конкретной акватории и выработки рекомендаций по изменению схемы движения в сторону менее опасных конфигураций.

Основные результаты, представленные в главе 5, были опубликованы в статьях [79, 84, 88], отражены в зарегистрированных программных средствах [33-36].

## **Глава 6. Сбор и обработка данных о движении судов на морских акваториях**

Модели, методы и алгоритмы, реализуемые современными СУДС, привлекают внимание большого количества исследователей. Разработка наиболее эффективных алгоритмов, обеспечивающих максимальную безопасность движения судов, является актуальной инженерной и научной проблемой.

Вывод о применимости, эффективности и надежности того или иного метода обеспечения безопасности движения может быть сделан по результатам экспериментов. Постановка натуральных экспериментов, связанных с движением судов, как правило, ведёт к значительным временным, организационным и материальным затратам; нередко такие натурные эксперименты вообще не осуществимы. Поэтому как в исследовательской работе, так и при отладке конкретных СУДС, зачастую прибегают к вычислительным экспериментам и моделированию движения судов [15, 16, 91, 92, 103-105, 132, 133, 148 и др.].

Моделирование движения в принципе решает задачу оценки работы алгоритмов в типичных ситуациях. Вместе с тем, при отработке алгоритмов, связанных с коллективным движением, важно «проиграть» их работу в ситуациях, характерных для конкретной акватории. Простое моделирование траекторий движения судов, даже с привлечением экспертов (судоводителей, диспетчеров), не может гарантировать полноту вычислительного эксперимента. Это является побудительным мотивом создания баз данных, хранящих ретроспективную информацию о реальном движении судов на той или иной акватории и использования её при изучении работы алгоритмов СУДС. Например, идея такого подхода использована авторами работы [228]. Особенно важно использование данных о реальном движении судов при обучении интеллектуальных подсистем СУДС. Зачастую только таким способом можно обеспечить валидность их настраиваемых параметров.

Заключительная глава настоящей работы посвящена описанию информационной системы, используемой для сбора данных о движении судов в акваториях морских портов в исследовательских целях.

### **6.1 Программный комплекс для сбора данных о движении морских судов**

Для исследования задач коллективного движения судов требуются наборы данных, содержащие координаты нескольких судов, одновременно движущихся и оказывающих влияние на безопасность движения друг друга, то есть расположенных на одной акватории. Требуются непрерывные выборки данных продолжительностью порядка 1 часа и более с небольшим интервалом между положениями судов (не более 1-2 минут). Кроме того, учитывая типичные размеры судов, точность определения координат должна быть не хуже нескольких десятков метров. Дополнительными важными для последующего анализа параметрами движения являются скорость и курс судна.

Данные о движении судов на конкретной акватории могут быть получены различными способами: с установленного на судне или берегу радара, с помощью визуального мониторинга (видеокамера) или от автоматической идентификационной системы (АИС).

Рассмотрим преимущества и недостатки каждого метода в отдельности.

*Радар.* Применение радара позволяет получать информацию обо всех объектах, находящихся в его зоне видимости, независимо от типа рассматриваемого судна и оборудования, работающего на нём. При этом точность получаемых данных зависит только от характеристик используемого радара, данные не могут быть искажены наблюдаемым судном. Зона, наблюдаемая радаром, определяется его местоположением, так как используемые для морской навигации радары работают только в пределах прямой видимости. Важным моментом при использовании радара является сложность обработки получаемых



данных в условиях зашумленности: качество поступающих данных сильно зависит от погодных условий.

*Видеокамера.* Использование видео наблюдения в целях автоматического определения параметров движения судна требует решения чрезвычайно сложной задачи распознавания объектов на изображении (хотя подобная задача в значительно упрощённом виде решается и для обработки сигнала от радара). Видео наблюдение, как и использование радара, ограничено местом расположения оборудования; кроме того, в отличие от радара, его невозможно применять в ночное время и при плохих метеоусловиях. Данный метод может рассматриваться только как теоретически возможный, но практически трудно реализуемый и мало полезный. Тем не менее, само по себе видео наблюдение может эффективно использоваться для визуального контроля движения судов в светлое время суток [116-117].

*АИС.* АИС (Автоматическая идентификационная система) - в судоходстве система, служащая для идентификации судов, их габаритов, курса и других данных с помощью радиоволн ОВЧ/УКВ — диапазона. Существуют два класса АИС. АИС класса А обеспечивает надёжную передачу сообщений о своём судне другим судам с системой АИС благодаря особому, гарантирующему доставку пакетов информации, протоколу. АИС класса В гарантируют, что вы получите информацию от приёмника класса А, но не обещают, что другое судно «услышит» вас – только если на вас останется свободное место в протоколе передачи. В Международном Регламенте Радиосвязи закреплено для использования в целях АИС два канала: AIS-1 (87В — 161,975 МГц) и AIS-2 (88В — 162,025 МГц), которые должны использоваться повсеместно, за исключением регионов с особым частотным регулированием. Пропускная способность каждого канала — до 2000 сообщений в минуту. В соответствии с Конвенцией SOLAS 74/88 установка АИС является обязательной для судов водоизмещением свыше 300 регистровых тонн, совершающих международные рейсы, судов водоизмещением более 500 регистровых тонн, не совершающих международные рейсы и всех пассажирских

судов. Суда и яхты с меньшим водоизмещением могут быть оборудованы устройством АИС класса В. Передача данных осуществляется на международных каналах связи AIS 1 и AIS 2 в протоколе SOTDMA (англ. Self Organizing Time Division Multiple Access). Применяется частотная модуляция с манипуляцией GMSK [125].

Для информации, передаваемой через АИС существует строгая регламентация о периодах отправки данных о судне (см. таблицу 23).

Таблица 23 - Периоды отправки данных через АИС

Тип судна	Период отправки
Судно на якоре или в процессе швартовки, перемещающееся со скоростью не более 3 узлов	3 минуты
Судно на якоре или в процессе швартовки, перемещающееся со скоростью более 3 узлов	10 секунд
Суда идущие со скоростью до 14 узлов	3 — 10 секунд
Суда идущие со скоростью от 14 до 23 узлов	2 — 6 секунд
Суда идущие со скоростью свыше 23 узлов	2 секунды
Спортивные плав средства	30 секунд

Использование информации от АИС имеет целый ряд очевидных преимуществ: относительная простота обработки информации о местоположении судов, высокая точность координат (точность определения координат по GPS/ГЛОНАСС составляет примерно 10 метров), использование радиочастот не требующих прямой видимости, радиус зоны покрытия зависит от высоты установки антенны и может составлять до 40 миль. Однако существует и ряд недостатков: не все суда оснащены устройствами АИС, в случае неисправности или преднамеренного вмешательства в работу оборудования АИС может выдавать неверные координаты судна, которые невозможно проверить. Кроме того, система АИС не позволяет получать информацию об иных плавучих объектах: айсберги, упавшие в воду грузы и другие представляющие опасность для мореплавания объекты.

В настоящее время, учитывая особенности каждого метода, управление портами осуществляется как правило с применением одновременно нескольких методов, что позволяет использовать преимущества каждого метода и нивелировать недостатки их отдельного применения. Вместе с тем, задача моделирования движения в интересах научных исследований предъявляет меньшие требования к надёжности и достоверности используемой информации, чем задача непосредственного управления движением, поэтому можно ограничиться использованием наиболее простого и доступного метода, которым является получение данных с АИС.

Получение данных напрямую с АИС связано с проблемой приобретения или получения физического доступа к соответствующему оборудованию, что является сложной задачей для исследовательских коллективов, не имеющих налаженных творческих связей с промышленной средой, особенно на начальном этапе научной работы. Вместе с тем, существуют интернет сайты, которые публикуют в открытом доступе (или по подписке) информацию о движении судов, полученную через сеть приёмников сигналов АИС (ряд сайтов позволяют любому владельцу приёмника АИС передавать данные на их сайт с помощью специализированных программ). Использование таких сайтов позволяет полностью отказаться от использования реального оборудования, что даёт ряд очевидных преимуществ: минимальные финансовые затраты на получение информации, отсутствие ограничений по местоположению оборудования для сбора данных, возможность получения информации о сотнях портов по всему миру. Из недостатков стоит отметить: не гарантированность постоянной работы сервиса, небольшая частота обновления информации (порядка 1-5 минут).

Примерами таких сайтов являются [www.marinetraffic.com](http://www.marinetraffic.com), [www.vesseltracker.com](http://www.vesseltracker.com), [www.vesselfinder.com](http://www.vesselfinder.com), [shipfinder.co](http://shipfinder.co). Указанные сайты достаточно похожи по предоставляемой информации (это обусловлено единым основным источником информации, которым является передатчик АИС) и реализации со стороны клиента, однако различаются как зоной охвата

(определяемой источниками информации), так и условиями получения информации (определяется лицензией).

Рассмотрим каждый сайт более подробно.

[www.vesseltracker.com](http://www.vesseltracker.com) - для просмотра положений судов требуется регистрация (что осложняет автоматическую загрузку данных), кроме того, при бесплатной регистрации доступна информация только по пассажирским судам, что делает данный сайт мало пригодным для сбора необходимых данных.

[www.vesselfinder.com](http://www.vesselfinder.com) - информация представлена в свободном доступе, однако на данном сайте нет информации о судах, находящихся в портах Дальнего Востока России.

[shipfinder.co](http://shipfinder.co) - информация представлена в свободном доступе, зона покрытия аналогична сайту [www.vesselfinder.com](http://www.vesselfinder.com).

[www.marinetraffic.com](http://www.marinetraffic.com) - информация представлена в свободном доступе, имеет достаточно большую зону покрытия, в том числе – порты юга Дальнего Востока России.

Учитывая зону покрытия и условия предоставления информации, в качестве информационной базы разработанной системы сбора данных был выбран сайт [www.marinetraffic.com](http://www.marinetraffic.com), который позволяет получать данные бесплатно и без регистрации. Кроме того, данные с этого сайта включают в себя достаточно много служебной информации о судне (название, флаг, длина и MMSI номер). Сбор данных с сайта и обработка их до вида, пригодного для моделирования движения судов, является основной задачей разработанной информационной системы.

Рассмотрим сайт [www.marinetraffic.com](http://www.marinetraffic.com) более подробно (рисунок 101).

Сайт в наглядном виде предоставляет информацию о судах, находящихся в зоне действия приёмников АИС, которые передают информацию на его серверы. На странице с картой (в качестве основной карты используется Google Map) можно выбрать любой интересующий нас регион, однако данные по судам доступны далеко не для всех портов. Информация на сайте обновляется достаточно редко: намного реже указанных в таблице 22 обязательных периодов отправки данных.

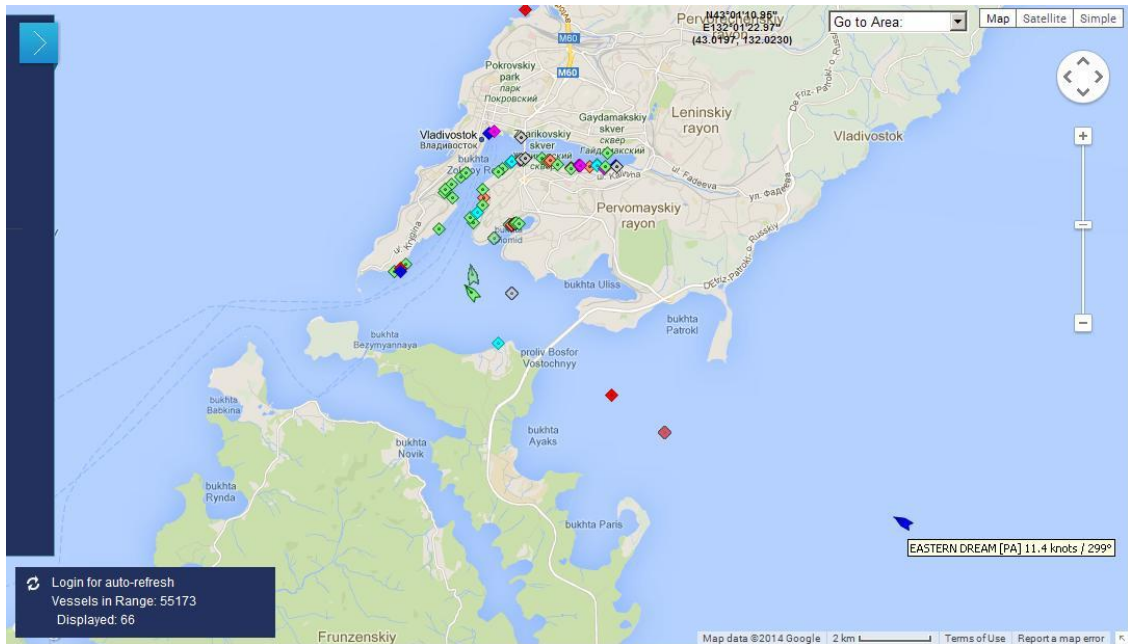


Рисунок 101 - Акватория порта Владивосток, отображаемая сайтом [www.marinetraffic.com](http://www.marinetraffic.com)

Кроме того, информация по каждому судну даётся с указанием возраста данных в минутах от текущего момента. Это приводит к тому, что данные, полученные в одном сеансе диалога с сайтом, могут относиться для разных судов к разным моментам времени (например, может быть указано, что информация о судне «1» получена 5 минут назад, а о судне «2» 3 минуты назад). Эта особенность делает такую информацию не пригодной для использования без предварительного её накопления и обработки. Кроме того, на сайте явно указано, что информация с сайта не может быть использована для нужд обеспечения безопасности движения судов, так как не обладает необходимой полнотой и актуальностью. Тем не менее, данные с указанного сайта достаточно точны для применения в задачах моделирования коллективного движения судов в исследовательских целях.

К сожалению, указанный сайт также не обладает публичным интерфейсом для выгрузки данных о судах. Поэтому для сбора данных потребовалось разработать специальный программный модуль [41]. Программа анализирует запросы, на базе которых браузер отображает карту с находящимися на ней судами. В ходе анализа был установлен минимальный набор запросов, позволяющий получить информацию о судах, находящихся на определённой акватории.

Данные, получаемые с сайта системой, представляют собой запись следующего вида:

```
[ ... ,
[43.06146, 131.7068, "NADEZHDA", 9, 30, 21, "RU", 273199300, 109, 1],
[43.021, 131.7477, "NEKSU", 7, 266, 12, "MN", 457073000, 66, 3],
[43.07449, 131.7513, "VLADIMIR VYSOTSKIY", 8, 37, 72, "RU", 273152400,
152, 4],
... ].
```

В данном случае запись - это строка. Например, для акватории порта Владивосток она содержит информацию в среднем о 80 судах и её длина около 5500 символов.

Сопоставляя информацию, отображаемую на сайте, был определён формат полученных данных:

43.06146 — широта судна в десятичных долях,  
131.7068 — долгота судна в десятичных долях,  
"NADEZHDA" — название судна,  
9 — тип судна,  
30 — курс судна,  
21 — скорость судна (указана в узлах, умноженных на 10),  
"RU" — флаг судна,  
273199300 — MMSI идентификатор судна,  
109 — длина судна в метрах,  
1 — возраст данных в минутах от текущего момента.

Объём собираемых данных можно оценить следующим образом. Данные загружаются каждую минуту, что составляет  $24 \cdot 60 \cdot 30 = 43200$  записей в месяц. Средний размер записи по типичной акватории юга Дальнего Востока России (например, порта Владивосток) около 5 КБ. Таким образом, за месяц собираются данные объёмом примерно 220 МБ. Такой объём данных вполне может быть

обработан обычной настольной рабочей станцией без необходимости привлечения специализированного оборудования.

Разработанная система сбора данных реализует разделение процедур сбора данных с сайта и загрузки их в базу данных. Это позволяет решить ряд технических задач функционирования системы: отслеживание изменения формата данных, их недоступности, объединение данных, загруженных разными серверами, сохранение полной исходной информации на случай необходимости повторной обработки. На рисунке 102 показана принципиальная схема разработанной системы.

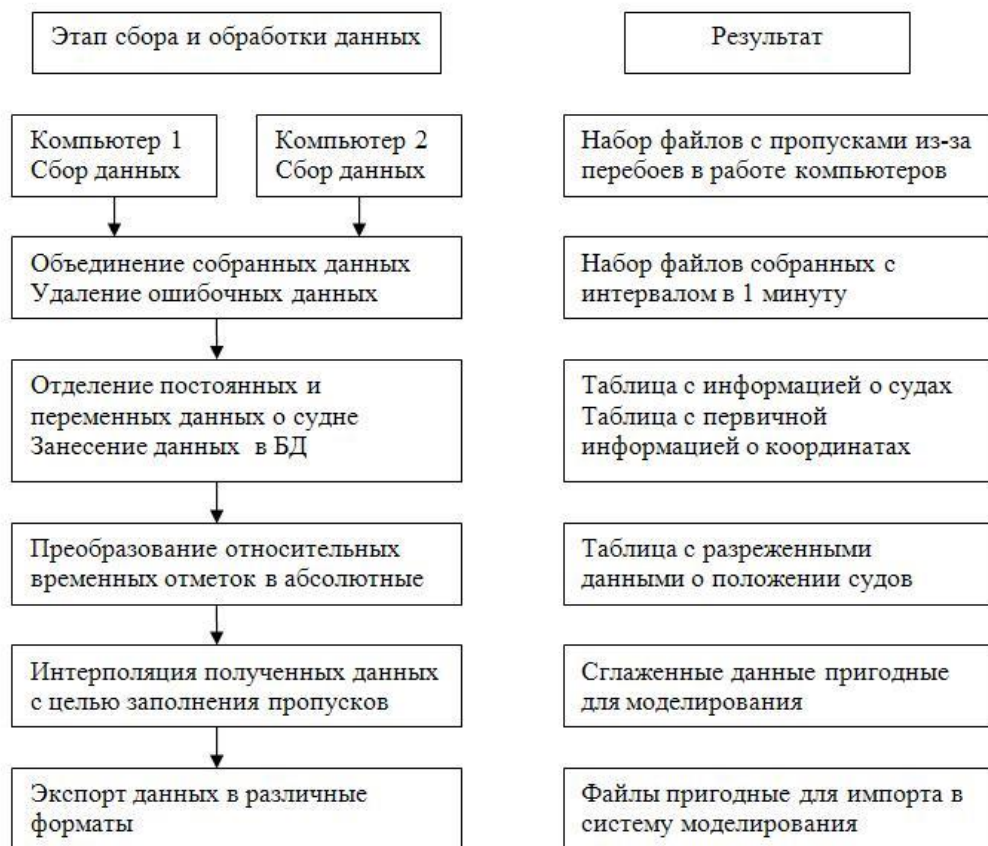


Рисунок 102 - Структура информационной системы сбора данных о движении судов

Полученные данные о судах проходят обработку для приведения к истинным временным отметкам (с точностью до минуты). При этом отбрасывается множество дублирующихся данных, которые возникают, например, если с сайта в первую минуту получена информация с возрастом в 2 минуты, а во вторую минуту



получена информация об этом же судне с возрастом в 3 минуты. В этом случае обе записи относятся к одному и тому же моменту времени и, соответственно, не несут никакой дополнительной информации. Например, статистика, собранная за сентябрь 2013 года показала, что из примерно 1 600 000 записей с информацией о положении судна, лишь 512 000 (примерно треть) являются уникальными.

В настоящее время имеется возможность использования системы для сбора данных по любым акваториям, представленным на сайте [www.marinetraffic.com](http://www.marinetraffic.com). Например, с помощью разработанной системы были собраны данные по движению судов на акватории портов Владивосток и Находка, использованные в настоящей работе (рисунки 53, 54, 99, 103).

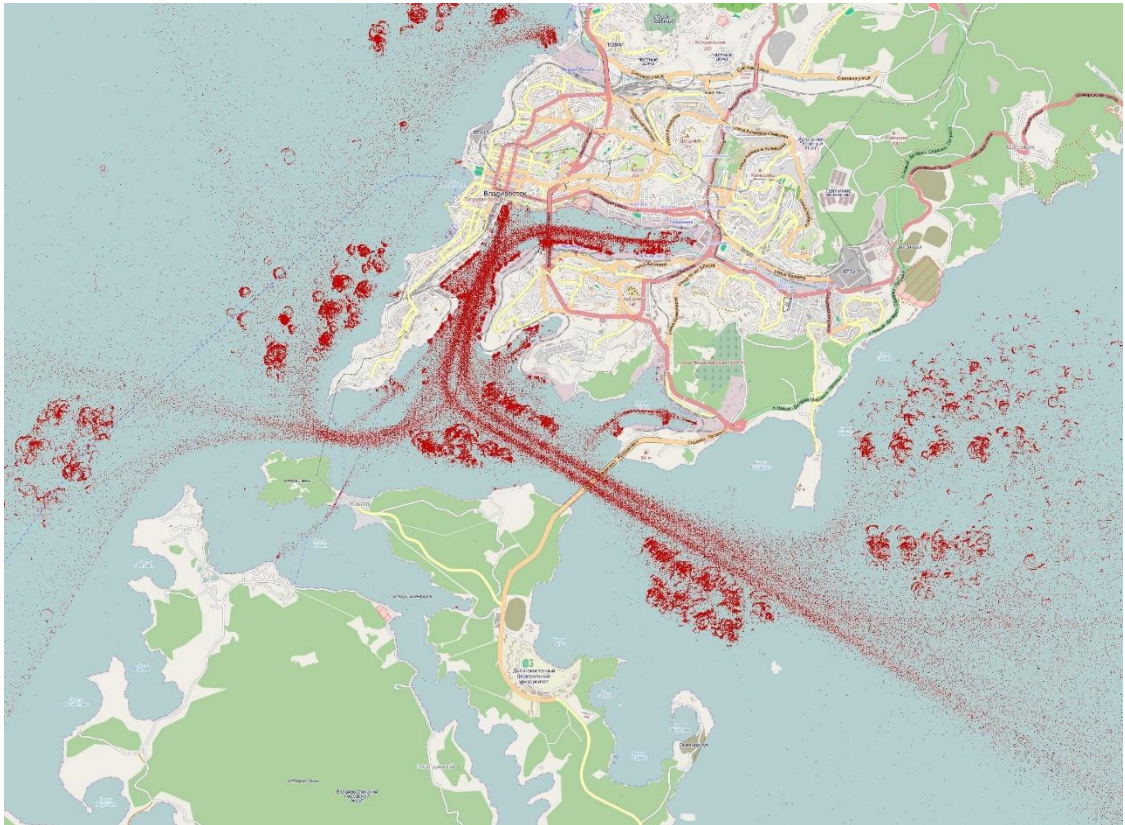


Рисунок 103 - Данные о движении судов в акватории порта Владивосток летом 2013 года. Хорошо видны характерные траектории движения (фарватеры) и места постоянных якорных стоянок



Вообще, данные, собираемые системой, представляют собой исключительную ценность для проведения исследований в области обеспечения навигационной безопасности коллективного движения судов.

## 6.2 Имитационное моделирование траекторий движения судов на морских акваториях

В предыдущем разделе (см. п. 6.1) был рассмотрен подход к сбору и обработке данных трафика морской акватории, состоящий в использовании открытых интернет-источников.

Проблемой, возникающей при использовании данных с такого рода ресурсов, является чрезмерная разреженность данных (например, на <http://www.marinetraffic.com> координаты судов обновляются не чаще одного раза в минуту (см. рисунок 104), что недостаточно для моделирования решения, например, задач о распознавании опасного сближения судов).

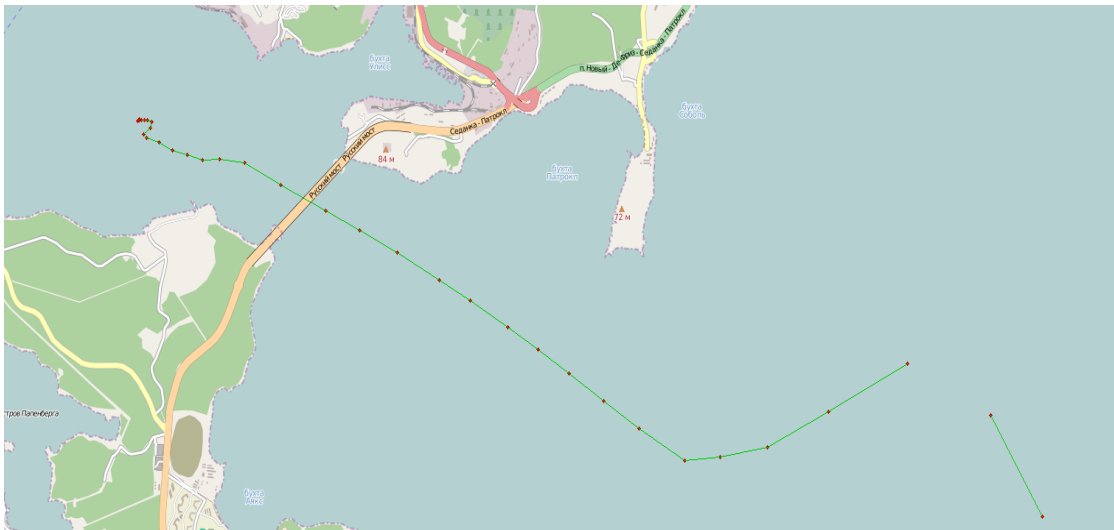


Рисунок 104 - Пример точек траектории судна, движущегося в проливе Босфор Восточный. Красные точки – координаты судна, полученные с сайта <http://www.marinetraffic.com>. Судно начинает движение в проливе (слева направо) и выходит в Уссурийский залив

Для получения данных о движении судна с большей частотой необходимо прибегнуть к их интерполяции. При этом такая интерполяция требует восстановления не просто геометрии траектории (как это делается, например, в имитационных моделях, используемых в различных тренажёрах [17, 103-105, 126, 158, 168 и др.]), а учета навигационной специфики движения судов, состоящей в сочетании прямолинейных и маневренных участков движения [171]. В связи с этим широко известные методы интерполяции (например, полиномиальная интерполяция или интерполяция сплайнами) в рассматриваемой задаче не применимы. Это является побудительным мотивом разработки модели интерполяции траектории движения судов на основе набора данных о координатах, скоростях и курсах их движения.

Исходными данными для разработанной модели интерполяции является набор из  $i$  точек, в которых известны координаты и компоненты вектора скорости движения судна  $x(t_i)$ ,  $y(t_i)$ ,  $v_x(t_i)$ ,  $v_y(t_i)$ . Разобьём каждый отрезок траектории на два участка: участок прямолинейного и равномерного движения и участок равноускоренного движения.

Рассмотрим один из отрезков траектории (рисунок 105).

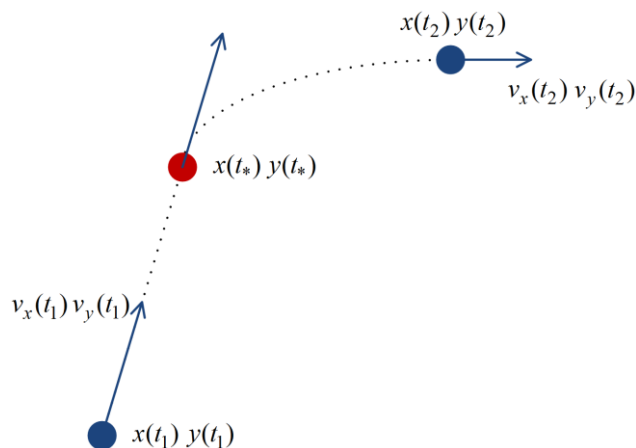


Рисунок 105 - Модельные представления траектории движения судна. Синим отмечены известные величины, красным – неизвестные

Не теряя общности, будем считать, что из точки  $x(t_1), y(t_1)$  в точку  $x(t_*) , y(t_*)$  судно движется прямолинейно и равномерно со скоростью  $v_x(t_1), v_y(t_1)$ . Из точки  $x(t_*) , y(t_*)$  судно начинает движение со скоростью  $v_x(t_1), v_y(t_1)$  и движется равноускорено в точку  $x(t_2), y(t_2)$ , достигая при этом скорости  $v_x(t_2), v_y(t_2)$ .

Величины  $x(t_1), y(t_1), v_x(t_1), v_y(t_1), x(t_2), y(t_2), v_x(t_2), v_y(t_2)$  - известны. Величины  $x(t_*), y(t_*), t_1, t_*, t_2$  - неизвестны. Имеют место следующие кинематические уравнения движения:

$$\begin{aligned}x(t_*) &= x(t_1) + v_x(t_1)(t_* - t_1), \\y(t_*) &= y(t_1) + v_y(t_1)(t_* - t_1), \\x(t_2) &= x(t_*) + v_x(t_1)(t_2 - t_*) + \frac{a_x(t_2 - t_*)^2}{2}, \\y(t_2) &= y(t_*) + v_y(t_1)(t_2 - t_*) + \frac{a_y(t_2 - t_*)^2}{2}.\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}a_x &= \frac{v_x(t_2) - v_x(t_1)}{t_2 - t_*}, \\a_y &= \frac{v_y(t_2) - v_y(t_1)}{t_2 - t_*}.\end{aligned}$$

Полагая для определённости, что  $t_1 = 0$  и подставляя последние два уравнения в первую систему, получим следующую систему линейных алгебраических уравнений:

$$As = b,$$

где

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -v_x(t_1) & 0 \\ 0 & 1 & -v_y(t_1) & 0 \\ 1 & 0 & -(v_x(t_1) + v_x(t_2))/2 & (v_x(t_1) + v_x(t_2))/2 \\ 0 & 1 & -(v_y(t_1) + v_y(t_2))/2 & (v_y(t_1) + v_y(t_2))/2 \end{bmatrix},$$

$$s = \begin{bmatrix} x(t_*) \\ y(t_*) \\ t_* \\ t_2 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} x(t_1) \\ y(t_1) \\ x(t_2) \\ y(t_2) \end{bmatrix}.$$

Решая эту систему уравнений, получим полный набор параметров для интерполяции данных траектории движения судна с любой частотой на отрезке движения из точки  $x(t_1), y(t_1)$  в точку  $x(t_2), y(t_2)$ . Случаи, когда рассматриваемая система уравнений вырождена, соответствуют исключительным ситуациям, при которых описанная модель не может быть использована. Таким вырожденным случаем является, например, ситуация, когда скорости движения судна  $v_x(t_1), v_y(t_1)$  и  $v_x(t_2), v_y(t_2)$  равны нулю. В этом случае интерполяция траектории в интервале времени  $[t_1, t_2]$  может быть выполнена исходя из простых геометрических соображений.

Описанная модель может быть применена как для доопределения данных реального трафика акватории, так и при формировании наборов моделируемых траекторий движения по узловым точкам, соответствующих тем или иным характерным навигационным ситуациям.

### 6.3 Краткие итоги главы 6

Заключительная глава посвящена обзору программного инструментария, созданного для проведения научных исследований в области обеспечения безопасности коллективного движения судов. Разработанный программный комплекс для сбора данных трафика морских акваторий из открытых интернет-источников позволяет формировать массивы ретроспективных данных о движении судов. Полученные таким образом данные могут использоваться при планировании и постановке вычислительных экспериментов, позволяют испытывать разрабатываемые модели, методы и алгоритмы на реальных траекториях движения

судов по конкретной акватории. Это обеспечивает возможность верификации создаваемых методик на предмет пригодности для работы в конкретных условиях и идентификацию границ их применимости. Приведены примеры собранных данных.

Особенностью собираемых данных является их разреженность. В главе предложена модель для доопределения (интерполяции) собранных данных о движении с учетом специфики задач внешнего наблюдения.

Основные результаты, представленные в главе 6, были опубликованы в статьях [21, 22, 39], отражены в зарегистрированных программных средствах [41].

## Заключение

**Итоги выполненного исследования.** Основной проблемой, решению которой посвящена настоящая работа, является обеспечение безопасности коллективного движения судов на морских акваториях в условиях высокой интенсивности движения.

В контексте этой проблемы в работе рассмотрены следующие задачи:

- задача идентификации модели движения объекта;
- задача многоуровневой (дискретной и непрерывной) оценки возможности опасного сближения судов;
- задача трёхкоординатного наблюдения движущегося объекта двухкоординатными измерителями и связанная с ней задача распознавания удалённых маловысотных низкоскоростных воздушных объектов;
- задача визуализации навигационной информации на рабочем месте оператора СУДС и судоводителя;
- задача сбора данных о движении судов на конкретных морских акваториях;
- задача имитационного моделирования траекторий движения судов.

При их исследовании получены следующие основные результаты:

- разработан и исследован метод идентификации модели движения объекта на основе идей нечёткой логики и связанный с ним комплекс математических моделей задачи сопровождения траектории движущегося объекта;
- разработан комплекс математических моделей многоуровневой оценки возможности опасного сближения судов дискретного и непрерывного типа, последние – на основе идей нечеткой логики;
- разработана и исследована математическая модель задачи двухкоординатного наблюдения движущегося объекта трёхкоординатными измерителями и связанный с ней численный метод априорной оценки разрешимости задач наблюдения в условиях погрешностей измерений и вычислений;

- разработан комплекс математических моделей задачи распознавания удалённых маловысотных низкоскоростных воздушных объектов и численные методы решения задачи;
- разработана и исследована математическая модель и связанный с ней численный метод визуализации радиолокационной информации на рабочем месте оператора СУДС и судоводителя;
- предложена математическая модель и связанный с ней численный метод визуализации информации, предоставляемой системой предупреждения об опасном сближении судов на основе идентификации зон, соответствующих опасным и безопасным параметрам движения судна;
- создан программный комплекс, предназначенный для сбора данных о движении судов на конкретной акватории;
- предложена имитационная модель траектории движения судна.

В целом по представленным в работе результатам можно сделать вывод о конструктивности предлагаемых идей и методик, их потенциальной востребованности как исследовательской, так и отраслевой средой и вполне осуществимой современными техническими средствами возможности построения на их основе реальных систем управления движением судов.

**Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.** Решённые в работе задачи имеют перспективы дальнейшей разработки.

Так, перспективным направлением дальнейших исследований задачи идентификации модели движения объекта представляется изучение поведения разработанного алгоритма сопровождения при обучении описанных нечетких систем на обучающей выборке, полученной путем моделирования различных классов типичных (эталонных) траекторий движения судна или путем извлечения информации из базы данных, хранящей трафик конкретной акватории.

В задаче многоуровневой (дискретной и непрерывной) оценки возможности опасного сближения судов перспективным является исследование альтернативных

моделей опасных ситуаций, подходов к фаззификации задачи и обучению соответствующих нечётких систем.

В задаче трёхкоординатного наблюдения движущегося объекта двухкоординатными измерителями представляется интересным дальнейшее исследование закономерностей поведения системы в области малых отношений «высота/дальность».

Модель представления информации, разработанная в рамках решения задачи визуализации навигационной информации на рабочем месте оператора СУДС и судоводителя позволяет оценить эмоциональную нагрузку на судоводителей. Это открывает перспективную возможность постановки и решения задачи оценки степени опасности той или иной схемы движения конкретной акватории и выработки рекомендаций по изменению схемы движения в сторону менее опасных конфигураций.

Информационная система, разработанная при решении задачи сбора данных о движении судов на конкретных морских акваториях, предполагает возможность усовершенствования и доработки с целью увеличения её удобства использования и производительности.

Модель, разработанная в рамках решения задачи имитационного моделирования траекторий движения судов, предполагает возможность доопределения для отражения тех или иных особенностей движения судов различных типов.

Автор выражает глубокую признательность научному консультанту работы, своему научному руководителю на протяжении двух десятков лет. Также хочется выразить благодарность своим коллегам - сотрудникам Института автоматизации и процессов управления, сотрудникам, студентам и аспирантам Дальневосточного федерального университета, Морского государственного университета им. адм. Г.И. Невельского, Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. А также всем, кто помогал автору в его работе.



## Список литературы

1. *Акмайкин, Д.А.* Совместное определение параметров цели с помощью судовой РЛС и транспондера АИС / Д.А. Акмайкин, Д.Б. Хоменко // Эксплуатация морского транспорта. - 2010. - №4. - С. 48-51.
2. *Ануфриев, К.С.* Современные тенденции построения интегрированных навигационных систем / К.С. Ануфриев // Эксплуатация морского транспорта. - 2011. - №4. - С. 27-30.
3. *Артамонов, В.С.* Навигационное сопровождение маломерных судов для обеспечения безопасности судоходства / В.С. Артамонов, Д.А. Скороходов, А.Л. Стариченков // Проблемы управления рисками в техносфере. - 2011. - №1. - С. 113-118.
4. *Астреин, В.В.* Системы предупреждения столкновения судов, тенденции развития (к 40-летию МППСС-72) / В.В. Астреин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. - 2012. - №1. - С. 7-17.
5. *Бакулев, П.А.* Многомодельный алгоритм сопровождения траектории маневрирующей цели по данным обзорной РЛС / П.А. Бакулев, М.И. Сычев, Нгуен Чонг Лыу // Радиотехника. - 2004. - №1.
6. *Баскин, А. С.* Береговые системы управления движением судов / А.С. Баскин, Г.И. Москвин. - М.: Транспорт, 1986.
7. *Березин, М.А.* Параметрическая идентификация класса нечетких систем с помощью устойчивого рекуррентного алгоритма / М.А. Березин, Ф.Ф. Пащенко // Прикладная информатика. – 2011. - №6. – С. 111-116.
8. *Борисов, Е.Г.* Комплексование координатной информации в бортовой многодатчиковой системе наблюдения / Е.Г. Борисов, Л.С. Турнецкий // Информационно-управляющие системы. - 2012. - №2. - С. 67-73.
9. *Борисова, Н.Ф.* Интеллектуальные технологии для обеспечения безопасности судоходства / Н.Ф. Борисова, Д.А. Скороходов, А.Л.

- Стариченков // Транспорт Российской Федерации. - 2010. - №1. - С. 32-35.
10. *Борисова, Л.Ф.* Факторы безопасности мореплавания в мобильной системе управления судоходством / Л.Ф. Борисова, А.А. Соловьев // Вестник Мурманского государственного технического университета. - 2013. - №3. - С. 591-600.
  11. *Букатый, В.М.* Нетрадиционный метод выяснения ситуации сближения судов / В.М. Букатый, С.Ю. Морозова // Эксплуатация морского транспорта. – 2012. – №1. – С. 18-21.
  12. *Букатый, В.М.* Точностные характеристики метода непосредственного определения дистанции кратчайшего сближения судов по информации от АИС / В.М. Букатый, С.Ю. Морозова // Эксплуатация морского транспорта. - 2012. - №2. - С. 9-15.
  13. Пат. 2262466 Российская Федерация. Способ распознавания опасного сближения двух судов [Текст] / Ванюков В.Ю., Парфентьев О.С., Гриняк В.М.; заявитель и патентообладатель ИАПУ ДВО РАН, ОАО Норфес; заявл. 22.03.2004; опубл. 20.10.2005, Бюл. №29.
  14. *Васильев, К.К.* Моделирование алгоритмов навигации и управления для автономных необитаемых подводных аппаратов / К.К. Васильев, Д.А. Гурман // Автоматизация процессов управления. - 2013. - №3. - С. 27-31.
  15. *Васьков, А.С.* Решение задач управления судном методами программирования движения / А.С. Васьков, А.С. Жук // Эксплуатация морского транспорта. - 2010. - №3. - С. 34-38.
  16. *Васьков, В.А.* Поэтапная аппроксимация уравнений задания траектории движения судна / В.А. Васьков, А.А. Мироненко // Эксплуатация морского транспорта. - 2010. - №3. - С. 21-26.
  17. *Викулин, П.В.* Алгоритм безопасного движения судна по контрольным точкам маршрута / П.В. Викулин // Журнал университета водных коммуникаций. - 2011. - №1. - С. 109-113.

18. *Владимиров, В.В.* Подход к проблеме прогноза динамики маневра судна / В.В. Владимирова, П.А. Захарченко, Н.С. Звягинцев // Эксплуатация морского транспорта. - 2012. - №1. - С. 11-14.
19. *Ворошилина, Е.П.* Алгоритмы сопровождения подвижных объектов / Е.П. Ворошилина, Е.П. Ворошилин, В.И. Тисленко // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. - 2009. - Т.2. - С. 53-58.
20. *Гаврилов, В.В.* Выявления опасностей объектов водного транспорта методом формализованной оценки безопасности / В.В. Гаврилов, Д.С. Семионичев // Журнал университета водных коммуникаций. - 2012. - №4. - С. 124-131.
21. *Головченко, Б.С.* Информационная система сбора данных о движении судов на морской акватории / Б.С. Головченко, В.М. Гриняк // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. - 2014. - №2. - С 156-162.
22. *Головченко, Б.С.* Информационная система сбора данных трафика морской акватории / Б.С. Головченко, В.М. Гриняк // Научно-техническая информация. Сер. 2. Информационные процессы и системы. – 2014. - №8. – С.24-28.
23. *Головченко, Б.С.* Нечёткая система предупреждения об опасном сближении морских судов / Б.С. Головченко, В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. - 2015. - №1. – С. 15-25.
24. *Григорьев, Ю.Д.* Точность и надежность навигации при определении местоположения судна в условиях коррелированных измерений / Ю.Д. Григорьев, С.А. Митягин // Журнал университета водных коммуникаций. - 2011. - №3. - С. 136-140.
25. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2014619101 Российская Федерация. Автоматизированный генератор карт морских акваторий [Текст] / Гриняк В.М.; заявитель и патентообладатель

- ВГУЭС; опубл. 09.09.2014.
26. *Гриняк, В.М.* Информационные технологии обеспечения безопасности на морских акваториях в ограниченных водах / В.М. Гриняк // 54 региональная научно-техническая конференция творческой молодёжи Дальнего Востока. - Владивосток. - 22-23 ноября 2006г. - МГУ им. адм. Г.И. Невельского. - С. 119-123.
  27. *Гриняк, В.М.* Информационные технологии обеспечения безопасности на морских акваториях в условиях высокой интенсивности движения / В.М. Гриняк // Сборник докладов региональной научно-технической конференции, посвящённой 115-летию морского образования на Дальнем Востоке. - Владивосток, 2005. - С. 59-64.
  28. *Гриняк, В.М.* Исследование пространственной задачи навигации в условиях неполной измерительной информации / В.М. Гриняк // Дальневосточный математический журнал. - 2000. - №1. - С. 93-101.
  29. *Гриняк, В.М.* Математические модели и алгоритмы систем управления движением судов / В.М. Гриняк. - LAP Lambert Academic Publishing, 2015. 176с.
  30. *Гриняк, В.М.* Математические модели и методы обеспечения навигационной безопасности коллективного движения судов / В.М. Гриняк. - Владивосток: Изд-во Владивостокского государственного университета экономики и сервиса, 2015. 174с.
  31. *Гриняк, В.М.* Нечёткая система распознавания опасного сближения судов / В.М. Гриняк // Транспорт: наука, техника, управление. – 2014. - №6. – С. 6-10.
  32. *Гриняк, В.М.* Представление информации в системах радиолокационного наблюдения с современным графическим интерфейсом / В.М. Гриняк // Материалы VI международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Интеллектуальный потенциал вузов – на развитие Дальневосточного региона России». Владивосток. Изд. ВГУЭС. – 2004. - С.

- 56-59.
33. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2012617929 Российская Федерация. Программа «Радар-процессор ADC» [Текст] / Гриняк В.М.; заявитель и патентообладатель ВГУЭС; опубл. 31.08.2012.
  34. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2012618192 Российская Федерация. Программа «VControl 2» [Текст] / Гриняк В.М.; заявитель и патентообладатель ВГУЭС; опубл. 10.09.2012.
  35. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2013615218 Российская Федерация. Программа «VControl Demo» [Текст] / Гриняк В.М.; заявитель и патентообладатель ВГУЭС; опубл. 30.05.2013.
  36. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2014619102 Российская Федерация. Программный имитатор отражённого РЛС сигнала морской акватории [Текст] / Гриняк В.М.; заявитель и патентообладатель ВГУЭС; опубл. 09.09.2014.
  37. *Гриняк, В.М.* Разработка и исследование алгоритмов сопровождения маловысотных движущихся объектов / В.М. Гриняк // Дальневосточная математическая школа-семинар имени ак. Е.В. Золотова. Тезисы докладов. – Владивосток, 27 августа - 2 сентября 2000. – С. 33-34.
  38. Пат. 2499278 Российская Федерация. Способ сопровождения траектории движущегося судна [Текст] / Гриняк В.М.; заявитель и патентообладатель ВГУЭС; заявл. 19.07.2012; опубл. 20.11.2013, Бюл. №32.
  39. *Гриняк, В.М.* Информационная система сбора данных о движении воздушных объектов гражданской авиации / В.М. Гриняк, А.И. Будников // Транспорт: наука, техника, управление. - 2015. - №8. - С. 44-47.
  40. *Гриняк, В.М.* Многоуровневая модель идентификации опасных ситуаций береговыми системами управления движением судов / В.М. Гриняк, Л.В. Герасименко, А.С. Девятисильный // Навигация и гидрография. – 2015. - №40. – С.29-37.

41. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2014663201 Российская Федерация. Система сбора данных о движении морских судов [Текст] / Гриняк В.М., Головченко Б.С.; заявитель и патентообладатель ВГУЭС; опубл. 18.12.2014.
42. *Гриняк, В.М.* Нейро-нечёткая обучаемая система распознавания опасного сближения судов / В.М. Гриняк, Б.С. Головченко, А.С. Девятисильный // Информационные технологии. – 2014. - №9. – С.68-73.
43. *Гриняк, В.М.* Распознавание опасных ситуаций системами управления движением судов / В.М. Гриняк, Б.С. Головченко, В.Н. Малько // Транспорт: наука, техника, управление. - 2011. - №8. - С. 42-45.
44. *Гриняк, В.М.* Алгоритм мультимодельного сопровождения траектории движения судна с нечетким критерием детекции маневра / В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный // Вестник Мурманского государственного технического университета. - 2012. - №3. - С. 568-574.
45. *Гриняк, В.М.* Динамические и статические алгоритмы оценивания в обратных задачах динамики движущихся объектов / В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный // Дальневосточная математическая школа-семинар имени ак. Е.В. Золотова. Тезисы докладов. – Владивосток, 28 августа - 3 сентября 1999.
46. *Гриняк, В.М.* Идентификация воздушных объектов в системах управления движением судов / В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный // Транспорт: наука, техника, управление. - 2012. - №8. - С. 38-40.
47. *Гриняк, В.М.* Классификация движущихся объектов типа «надводный-воздушный» в лингвистических переменных / В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. - 2013. - №8. - С. 20-25.
48. *Гриняк, В.М.* Модельные представления задачи оценки риска опасного сближения морских судов / В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный // Третья международная научно-практическая конференция «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных

- систем» (ИКМ МТМТС 2015). - Санкт-Петербург, 1 июля 2015. - С. 39-46.
49. *Гриняк, В.М.* Нейро-нечеткая обучаемая система распознавания воздушных объектов / В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный // Информационные технологии. – 2013. - №11. – С. 58-63.
  50. *Гриняк, В.М.* Нейро-нечеткая модель оценки характера движения при многомодельном сопровождении траектории судна / В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный // Материалы конференции «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2012). - Санкт-Петербург, 9-11 октября 2012. - С. 778-786
  51. *Гриняк, В.М.* Нейро-нечеткая модель сопровождения траектории судна обзорной РЛС / В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. - 2013. - №8. - С. 14-21.
  52. *Гриняк, В.М.* Нейронечеткая система экспертной оценки риска опасного сближения морских судов / В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный // Вестник компьютерных и информационных технологий. - 2015. - №10. - С. 23-28.
  53. *Гриняк, В.М.* Нечёткая система предупреждения об опасном сближении морских судов / В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный // Известия РАН. Теория и системы управления. - 2016. - №2. – С. 93-103.
  54. *Гриняк, В.М.* Нечеткая система распознавания воздушных объектов / В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный // Вестник компьютерных и информационных технологий. - 2013. - №7. - С. 9-14.
  55. *Гриняк, В.М.* Нечеткая система распознавания опасного сближения судов на морских акваториях / В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный // Вестник компьютерных и информационных технологий. - 2014. - №11. - С. 36-42.
  56. *Гриняк, В.М.* Нечеткая система экспертных оценок характера движения судна / В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный // Информационные технологии. - 2012. - №8. - С. 66-70.
  57. *Гриняк, В.М.* Прогнозирование опасных ситуаций при управлении движением на море / В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный // Известия РАН. Теория и системы управления. - 2004. - №3. - с. 127-136.

58. *Гриняк, В.М.* Распознавание воздушных объектов двухкоординатными измерителями / В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный // Эксплуатация морского транспорта. - 2012. - №3. - С. 37-40.
59. *Гриняк, В.М.* Система экспертного оценивания состояния навигационной безопасности морской акватории на основе нейро-нечёткой сети / В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный // Проблемы управления. - 2015. - №4. - С. 58-65.
60. *Гриняк, В.М.* Экспертное оценивание состояния безопасности морской акватории с помощью нейро-нечёткой сети / В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. - 2015. - №12. - С. 3-11.
61. *Гриняк, В.М.* Нечёткая обучаемая система предупреждения об опасном сближении судов / В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный, Б.С. Головченко // Материалы конференции «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2014). - Санкт-Петербург, 7-9 октября 2014. - С. 39-46.
62. *Гриняк, В.М.* Численный сингулярный анализ полиномиальной модели регрессии / В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный, В.М. Дорожко, А.А. Малов // Дальневосточная математическая школа-семинар имени ак. Е.В. Золотова. Тезисы докладов. - Владивосток, 2002. - С. 72-73.
63. *Гриняк, В.М.* Определение сопротивления движению морских судов методом инерционных пробегов / В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный, В.М. Дорожко // Международная научно-техническая конференция, посвящённая 110-летию морского образования в Приморье "Наука - морскому образованию на рубеже веков". Тезисы докладов. - Владивосток, 2000.
64. Пат. 2309082 Российская Федерация. Способ предотвращения опасного сближения двух судов в ограниченных водах без изменения линии движения [Текст] / Гриняк В.М., Дорожко В.М.; заявитель и патентообладатель ВГУЭС; заявл. 20.07.2005; опубл. 27.10.2007, Бюл. №30.
65. Пат. 2309083 Российская Федерация. Способ распознавания опасного



- сближения двух маневрирующих судов [Текст] / Гриняк В.М., Дорожко В.М.; заявитель и патентообладатель ВГУЭС; заявл. 12.12.2005; опубл. 27.10.2007, Бюл. №30.
66. *Гриняк, В.М.* Модели обеспечения безопасности на морских акваториях в условиях высокой интенсивности движения / В.М. Гриняк, В.М. Дорожко, Н.В. Лоскутов, О.В. Кириченко // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. - 2004. - №9. – С. 6-8.
67. *Гриняк, В.М.* Алгоритм расчёта адаптивного порога при визуализации информации компьютеризированной РЛС кругового обзора / В.М. Гриняк, В.Н. Малько // Информационные системы и технологии: Материалы международной научно-технической конференции. – Красноярск, май 2012. – С.140-148.
68. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2014611405 Российская Федерация. Компьютерный симулятор коллективного движения судов [Текст] / Гриняк В.М., Медведев С.А.; заявитель и патентообладатель ВГУЭС; опубл. 03.02.2014.
69. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2014611509 Российская Федерация. Модуль формирования и отображения карты морской акватории [Текст] / Гриняк В.М., Медведев С.А.; заявитель и патентообладатель ВГУЭС; опубл. 04.02.2014.
70. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2014611410 Российская Федерация. Модуль расчета моделируемых траекторий движения судов [Текст] / Гриняк В.М., Сиринов С.В.; заявитель и патентообладатель ВГУЭС; опубл.03.02.2014.
71. *Гриняк, В.М.* Имитационное моделирование задачи сопровождения траектории движущегося объекта / В.М. Гриняк, М.В. Трофимов // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. - 2012. - Т.1. - №2. - С. 397-404 (материалы конференции).
72. *Гриняк, В.М.* Модель вероятностного типа для задачи предупреждения об

- опасном сближении морских судов / В.М. Гриняк, М.В. Трофимов // Транспорт: наука, техника, управление. – 2015. - №10. – С.18-22.
73. *Гриняк, В.М.* Нейро-нечёткое распознавание воздушных объектов системами управления движением судов / В.М. Гриняк, М.В. Трофимов // IV межвузовская научно-практическая конференция студентов и аспирантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России». – Санкт-Петербург, 2013. - С.231-240.
74. *Гриняк, В.М.* Нечеткое сопровождение траектории движения судна / В.М. Гриняк, М.В. Трофимов // Журнал университета водных коммуникаций. - 2012. - №1. - С. 119-124.
75. *Гриняк, В.М.* Оценка характера движения морских судов в лингвистических переменных / В.М. Гриняк, М.В. Трофимов // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. - 2012. - №5. - С. 22-26.
76. *Гриняк, В.М.* Имитационное моделирование задачи сопровождения траектории движущегося объекта / В.М. Гриняк, М.В. Трофимов, Д.С. Шматков // Материалы XIV международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Интеллектуальный потенциал вузов – на развитие Дальневосточного региона России и стран АТР». Владивосток. Изд. ВГУЭС. – 2012. - С. 56-59.
77. *Девятисильный, А.С.* Нейросетевой алгоритм сопровождения судов в системах управления движением / А.С. Девятисильный, В.М. Гриняк // Информационные технологии. - 2012. - № 3. - С. 70-74.
78. *Девятисильный, А.С.* Идентификация воздушных объектов двухкоординатными измерителями / А.С. Девятисильный, В.М. Дорожко, В.М. Гриняк // Измерительная техника. - 2004. - №11. - С. 19-21.
79. *Девятисильный, А.С.* Информационно-технологические аспекты обеспечения безопасности движения на морских акваториях / А.С.

- Девятисильный, В.М. Дорожко, В.М. Гриняк // НТИ. Сер. 2. Информационные процессы и системы. - 2003. - №7. – С. 11-14.
80. *Девятисильный, А.С.* К оценке силы сопротивления при неустановившемся движении морского объекта / А.С. Девятисильный, В.М. Дорожко, В.М. Гриняк // Дальневосточный математический журнал. - 2002. - №2. - С. 277-284.
81. *Девятисильный, А.С.* Нейроподобные алгоритмы высотной классификации движущихся объектов / А.С. Девятисильный, В.М. Дорожко, В.М. Гриняк // Информационные технологии. - 2001. - №12. – С. 45-51.
82. *Девятисильный, А.С.* Определение гидродинамического сопротивления по траекторным данным инерционного движения объекта / А.С. Девятисильный, В.М. Дорожко, В.М. Гриняк // Журнал технической физики. - 2003. - №2. - С. 38-42.
83. *Девятисильный, А.С.* Оценка гидродинамического качества движения морского объекта по внешним траекторным измерениям / А.С. Девятисильный, В.М. Дорожко, В.М. Гриняк // Письма в Журнал технической физики. - 2003. - №19. - С. 21-25.
84. *Девятисильный, А.С.* Радиолокационный комплекс для измерения волнообразующих свойств морских судов / А.С. Девятисильный, В.М. Дорожко, В.М. Гриняк // Измерительная техника. - 2005. - №3. - С. 46-48.
85. *Девятисильный, А.С.* Система экспертных оценок состояния безопасности на морских акваториях / А.С. Девятисильный, В.М. Дорожко, В.М. Гриняк, О.В. Кириченко, Н.В. Лоскутов // Информационные технологии. - 2004. - №11. - С. 48.
86. Пат. 2206104 Российская Федерация. Способ распознавания удаленных воздушных объектов [Текст] / Девятисильный А.С., Дорожко В.М., Гриняк В.М.; заявитель и патентообладатель ИАПУ ДВО РАН; заявл. 28.05.2001; опубл. 10.06.2003, Бюл. №16.
87. Пат. 2220871 Российская Федерация. Способ сравнительной оценки

- волнообразующих свойств морских судов [Текст] / Девятисильный А.С., Дорожко В.М., Гриняк В.М.; заявитель и патентообладатель ИАПУ ДВО РАН; заявл. 28.03.2002; опубл. 10.01.2004, Бюл. №1.
88. *Девятисильный, А.С.* Технология компьютерного моделирования радиолокационного эхосигнала / А.С. Девятисильный, В.М. Дорожко, В.М. Гриняк // Информационные технологии. - 2002. - №3. - С. 42-49.
89. *Девятисильный, А.С.* Информационные модели систем управления безопасностью движения в насыщенных судопотоках / А.С. Девятисильный, В.М. Дорожко, Н.В. Лоскутов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. - 2007. - №1. - С. 114-128.
90. *Дегтярев, О.В.* Методы и особенности математического моделирования систем организации воздушного движения / О.В. Дегтярев, И.Ф. Зубкова // Известия РАН. Теория и системы управления. - 2012. - №4. - С. 62.
91. *Дерябин, В.В.* Модель счисления пути судна в условиях воздействия внешних факторов / В.В. Дерябин // Эксплуатация морского транспорта. - 2011. - №1. - С. 33-39.
92. *Дерябин, В.В.* Применение нейронной сети в модели счисления пути судна / В.В. Дерябин // Эксплуатация морского транспорта. - 2011. - №3. - С. 20-27.
93. *Дмитриев, В.И.* Автоматизированное рабочее место судоводителя – настоящее и будущее / В.И. Дмитриев, О.В. Соляков, Н.В. Турецкий // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2014. - №4. – С.42-47.
94. *Дорожко, В.М.* Имитационная модель радиолокационного эхо-сигнала / В.М. Дорожко // Дальневосточный математический журнал. - 2001. - №1. – С. 98-113.
95. *Дорожко, В.М.* Информационная технология обработки радиолокационных наблюдений в задаче выделения локальных источников судна / В.М. Дорожко // Информационные технологии. - 2006. - №9. - С. 52-59.
96. *Дорожко, В.М.* Идентификация начального этапа экстренного торможения

- морского судна / В.М. Дорожко // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2010. - №4. - С. 73-78.
97. *Дорожко, В.М.* Радиолокационная регистрация начального этапа разгона морского судна / В.М. Дорожко // Измерительная техника. - 2010. - №6. - С. 23-28.
98. *Дорожко, В.М.* Экспертные представления об основных ситуационных моделях коллективного движения судов / В.М. Дорожко, А.Н. Лебедева // Проблемы управления. - 2006. - №4. - С. 43-49.
99. *Дургарян, И.С.* Идентификация объектов в информационно-управляющих системах / И.С. Дургарян, Ф.Ф. Пащенко, А.Ф. Пащенко, Г.А. Пикина // Датчики и системы. – 2014. - №10. – С. 13-21.
100. *Егоров, И.Б.* Концепция зон навигационной безопасности и её применение в судовождении / И.Б. Егоров, В.А. Логиновский // Эксплуатация морского транспорта. - 2012. - №3. - с. 13-17.
101. *Ермаков, С.В.* Формализация и содержание понятия «навигационная ситуация» / С.В. Ермаков // Эксплуатация морского транспорта. - 2012. - №4. - С. 17-21.
102. *Ершов, А.А.* Маневры для избежания или снижения опасности столкновений судов / А.А. Ершов // Эксплуатация морского транспорта. - 2009. - №3. - С. 21-23.
103. *Жук, А.С.* Конструирование и моделирование программных движений судна / А.С. Жук // Эксплуатация морского транспорта. - 2010. - №4. - С. 41-45.
104. *Жук, А.С.* Программирование движения судна на основе уравнений кривых второго порядка / А.С. Жук // Эксплуатация морского транспорта. - 2011. - №2. - С. 25-29.
105. *Жук, А.С.* Формирование программных траекторий судна на основе составных сплайнов Эрмита / А.С. Жук // Эксплуатация морского транспорта. - 2013. - №1. - С. 26-31.
106. *Зайцев, А.И.* Перспективы внедрения автоматизированной системы

- управления движением маломерного флота на морских акваториях (на примере черноморского побережья России) / А.И. Зайцев, С.В. Рудых, А.А. Сикарев // Журнал университета водных коммуникаций. - 2012. - №2. - С. 156-163.
107. *Захаров, К.В.* Динамическая настройка алгоритма обнаружения маневра морской цели / К.В. Захаров // Автоматизация процессов управления. - 2011. - №4. - С. 23-30.
108. *Калман, Р.* Очерки по математической теории систем / Р. Калман, П. Фалб, М. Арбиб. - М.: Едиториал УРСС, 2010. 400 с.
109. *Каретников, В.В.* Совершенствование системы управления судами с использованием автоматизированных идентификационных систем на внутренних водных путях / В.В. Каретников, А.А. Сикарев // Журнал университета водных коммуникаций. - 2010. - №3. – С. 93-96.
110. *Кислицын, А.В.* О повышении безопасности мореплавания путем интеграции систем наблюдения различных ведомств, занимающихся морской деятельностью / А.В. Кислицын, М.В. Буйневич, В.В. Метелицин // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2008. - №8. - С. 49-53.
111. *Клячко, Л.М.* Метод управления движением корабля с «советчиком» судоводителю / Л.М. Клячко, Г.Э. Острцов // Морской вестник. - 2010. - №2. - С. 39-40.
112. *Коноплев, М.А.* Применение аппарата нечеткой логики для определения понятия «безопасная скорость» / М.А. Коноплев // Эксплуатация морского транспорта. - 2008. - №3. - С. 37-41.
113. *Коноплев, М.А.* Применение аппарата нечеткой логики для определения уровня опасности столкновения / М.А. Коноплев // Эксплуатация морского транспорта. – 2009. – №2. – с. 34-39.
114. *Круглов, В.В.* Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов. - М.: Физматлит, 2001. 224с.
115. *Кузьмин, С.З.* Основы теории цифровой обработки радиолокационной

- информации / С.З. Кузьмин. М.: Сов. радио, 1974. - 431 с.
116. *Лавров, Е.В.* Генерация панорамного изображения в судовой автоматизированной системе визуального наблюдения / Е.В. Лавров // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2013. - №3. – С.33-37.
  117. *Лавров, Е.В.* Локализация объектов на изображении морского горизонта / Е.В. Лавров // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2013. - №2. – С.22-26.
  118. *Лентарёв, А.А.* Развитие концепции зоны навигационной безопасности / А.А. Лентарёв // Вестник Морского государственного университета. Серия «История морской науки, техники и образования». – 2011. – № 50. – С. 98-109.
  119. *Лентарёв, А.А.* Системы управления движением судов / А.А. Лентарёв. - Калининград: Всесоюзный институт повышения квалификации Минрыбхоза СССР, 1985.
  120. *Лоусон, Ч.* Численное решение задач метода наименьших квадратов / Ч. Лоусон, Р. Хенсон. - М.: Наука. - 1986.
  121. *Лукомский, Ю.А.* Особенности координированного управления судном при сближении с движущимся объектом / Ю.А. Лукомский, А.Г. Шпекторов // Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ". - 2010. - №2. - С. 17-25.
  122. *Магомедов, И.А.* Оптимальные алгоритмы управления траекторным движением морского подвижного объекта / И.А. Магомедов, К.Д. Курбанмагомедов // Известия Института инженерной физики. - 2010. - №16. - С. 49-54.
  123. *Малеев, П.И.* Особенности, состояние и перспективы развития е-навигации морских объектов / П.И. Малеев, Н.И. Леденев // Навигация и гидрография. – 2012. - №33. – С. 16-20.
  124. *Малышев, А.Н.* Введение в вычислительную линейную алгебру / А.Н. Малышев. - Новосибирск: Наука, 1991.

125. *Маринич, А.Н.* Судовая автоматическая идентификационная система АИС / А.Н. Маринич. - М.: Судостроение, 2004. 180 с.
126. *Маслов, И.О.* Моделирование траекторий движения судна для проработки лоцманской проводки / И.О. Маслов, Б.В. Афанасьев // Эксплуатация морского транспорта. - 2012. - №3. - С. 29-32.
127. *Матохин, А.В.* Принципы оценки рисков, связанных с гидрометеорологическими факторами, при планировании плавания судна в стесненных водах / А.В. Матохин // Бюллетень транспортной информации. - 2013. - №8. - С. 29-36.
128. *Маттис, А.В.* Оптимальное управление движением морских подвижных комплексов / А.В. Маттис // Автоматизация процессов управления. - 2011. - №1. - С. 88-92.
129. *Махин, В.П.* Влияние волнения на движение судна в условиях ветра / В.П. Махин, А.Н. Страшко // Эксплуатация морского транспорта. - 2010. - №2. - С. 29-31.
130. *Медич, Дж.* Статистически оптимальные линейные оценки и управление / Дж. Медич. - М.: Энергия, 1973. 440 с.
131. Международные правила предупреждения столкновений судов в море 1972 (МППСС-72). – М.: РКонсульт, 2004. 80 с.
132. *Мироненко, А.А.* Динамическим синтез программного движения судна / А.А. Мироненко // Эксплуатация морского транспорта. - 2012. - №1. - С. 7-11.
133. *Мироненко, А.А.* Модель программного движения судна в стеснённых водах / А.А. Мироненко // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2013. - №2. - С. 65-70.
134. *Модеев, Р.Н.* СУДС - ядро информационной системы порта / Р.Н. Модеев // Морские порты. - 2010. - №8.
135. *Моисеев, Г.А.* Безопасность морского судоходства / Г.А. Моисеев // Транспорт: наука, техника, управление. - 2010. - №12. - С. 43-45.
136. *Некрасов, С.Н.* Оценка и прогнозирование опасных навигационных ситуаций



- / С.Н. Некрасов, И.В. Капустин, М.С. Старов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. - 2013. - №2. - С. 98-100.
137. *Некрасов, С.Н.* Влияние погрешностей в информации автоматических идентификационных систем на навигационные риски столкновения судов в море / С.Н. Некрасов, М.С. Старов // Журнал университета водных коммуникаций. - 2012. - №1. - С. 136-140.
138. Новости компании ТРАНЗАС // Морской вестник. - 2011. - №1. - С. 43-46.
139. *Нырков, А.П.* Алгоритм управления движением судов, идущих пересекающимися курсами / А.П. Нырков, П.В. Викулин // Журнал университета водных коммуникаций. – 2011. - №1. – С. 100-105.
140. *Павлыгин, Э.Д.* Многоагентное моделирование и визуализация окружающей обстановки морского судна / Э.Д. Павлыгин, П.И. Соснин // Автоматизация процессов управления. - 2010. - №2. - С. 3-12.
141. *Паринов, П.П.* Способ контроля безопасности движения крупнотоннажных судов в порту Санкт-Петербург / П.П. Паринов // Эксплуатация морского транспорта. - 2009. - №4. - С. 22-24.
142. *Погосов, С.Г.* Безопасность плавания в портовых водах / С.Г. Погосов. - М.: Транспорт, 1977.
143. *Пуцинский, С.Н.* Формирование эталонных радиолокационных портретов надводных кораблей с использованием ограниченного набора экспериментальных данных / С.Н. Пуцинский // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2014. - №2. – С.13-19.
144. Радарный процессор «RP-3.2» [Электронный ресурс] – Режим доступа <http://www.mkis.su/catalog?gn=21> (01.09.2015)
145. *Ростопшин, Д.Я.* О проблемах использования данных автоматической идентификационной системы в задачах управления движением судов / Д.Я. Ростопшин, Д.А. Антонова // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2007. - №9. - С. 55.

146. *Рыбас В.Н.* Алгоритм обработки радиолокационных данных о маневрирующих объектах / В.Н. Рыбас // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. - 2006. - № 105. - С. 69-76.
147. *Рябченко, Р.Б.* Идентификация промахов, обеспечивающая безопасность плавания в стесненных водах / Р.Б. Рябченко, В.В. Шутов, В.И. Меньшиков В.И. // Эксплуатация морского транспорта. - 2010. - №3. - С. 38-40.
148. *Сазонов, А.Е.* Прогнозирование траектории движения судна при помощи нейронной сети / А.Е. Сазонов, В.В. Дерябин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. - 2013. - № 3. - С. 6-13.
149. *Сафонов, В.О.* Основы современных операционных систем / В.О. Сафонов. - Издательство: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 584с.
150. *Седова, Н.А.* Формализация международных правил предупреждения столкновений судов в море с помощью логических систем / Н.А. Седова // Бюллетень транспортной информации. - 2013. - №6. - С. 10-12.
151. *Седова, Н.А.* Формирование лингвистических переменных для задач судовождения / Н.А. Седова // Эксплуатация морского транспорта. - 2013. - №2. - С. 19-23.
152. *Семушин, И.В.* Устойчивые алгоритмы фильтрации для систем судовождения и управления судном / И.В. Семушин, Ю.В. Цыганова, К.В. Захаров // Автоматизация процессов управления. - 2012. - №1. - С. 37-46.
153. *Сесин, А.Е.* Математическая модель эхо-сигналов морской поверхности, наблюдаемых бортовыми локаторами летательных аппаратов / А.Е. Сесин, Д.А. Шепета // Информационно-управляющие системы. - 2010. - №2. - С. 21-25.
154. *Скороходов, Д.А.* Принципы и категории обеспечения безопасности мореплавания / Д.А. Скороходов, Л.Ф. Борисова, З.Д. Борисов // Вестник Мурманского государственного технического университета. - 2010. - №4-1.

- С. 719-729.
155. *Смоленцев, С.В.* Формализация задачи расхождения судов в море на основе теории мультиагентной системы / С.В. Смоленцев // Эксплуатация морского транспорта. - 2011. - №2. - С. 19-24.
  156. *Смоленцев, С.В.* Концепция автоматизированной интеллектуальной системы расхождения судов / С.В. Смоленцев, Б.В. Афанасьев, А.Е. Филяков, Д.В. Куниц // Эксплуатация морского транспорта. - 2012. - №4. - С. 11-14.
  157. *Сосулин, Ю.Г.* Теоретические основы радиолокации и радионавигации / Ю.Г. Сосулин. - М. Издательство: Радио и связь, 1992. – 304с.
  158. *Сотников, И.И.* Об одной постановке задачи о построении рационального маршрута движения судна и необходимых для его реализации управляющих воздействий / И.И. Сотников, Ю.И. Юдин, А.В.И. Середя // Наука и техника транспорта. - 2009. - №2. - С. 17-23.
  159. *Степанов, О.А.* Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Часть 1. Введение в теорию оценивания / О.А. Степанов. - СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. – 509с.
  160. *Степанов, О.А.* Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Часть 2. Введение в теорию фильтрации. / О.А. Степанов. - СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2012. – 417с.
  161. *Тедонзонг, Т.Э.* Изменчивость маневренной полосы движения судна с учетом гидрометеорологических условий / Т.Э. Тедонзонг // Журнал университета водных коммуникаций. - 2010. - №3. - С. 104-109.
  162. *Тихонов, В.И.* Квазиоптимальное слежение за маневрирующими объектами / В.И. Тихонов, И.С. Теплинский // Радиотехника и электроника. - 1989. - №4. – С. 792-797.
  163. *Тропин, Б.Л.* Информационное обеспечение механизма предвидения в структурах управления состоянием безопасности судна / Б.Л. Тропин, А.С.

- Кузьминых, В.И. Меньшиков, Н.М. Путинцев // Вестник Мурманского государственного технического университета. - 2009. - №1. - С. 20-23.
164. *Фарина, А.* Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей / А. Фарина, Ф. Студер. - М.: Радио и связь, 1993. 320с.
165. *Чуркин, В.И.* Оптимальное управление расхождением судов / В.И. Чуркин // Известия РАН. Теория и системы управления. - 1999. - №2. - С. 61-67.
166. *Штовба, С.Д.* Проектирование нечетких систем средствами MatLab / С.Д. Штовба. - М.: Горячая линия телеком, 2007. 288с.
167. *Юдин, Ю.И.* Механизм предвидения в организационно-технических системах управления судовыми ключевыми операциями / Ю.И. Юдин // Наука и техника транспорта. - 2007. - №1. – С. 74-81.
168. *Юдин, Ю.И.* Моделирование управляемого движения судна по произвольной траектории / Ю.И. Юдин, С.В. Пашенцев // Эксплуатация морского транспорта. - 2012. - №3. - С. 32-37.
169. *Юдин, Ю.И.* Основные закономерности в характере движения судна, стоящего на якоре / Ю.И. Юдин, С.О. Петров, С.Н. Холичев // Вестник Мурманского государственного технического университета. - 2013. - №1. - С. 183-186.
170. *Юдин, Ю.И.* Использование идентифицированных математических моделей судна для обеспечения безопасности судовождения / Ю.И. Юдин, А.Г. Степахно, А.Н. Гололобов // Вестник Мурманского государственного технического университета. - 2009. - №1. - С. 10-12.
171. *Aarsæther, K.G.* Adding the human element to ship manoeuvring simulations / K.G. Aarsæther, T. Moan // Journal of Navigation. – 2010. – Vol. 63. - №4. - P. 695–716.
172. *Benedict, T.R.* Synthesis of an optimal set of radar track-while-scan smoothing equations / T.R. Benedict, G.R. Bordner // IRE Trans, on AC-1. - July 1962. - P. 27-32.
173. *Benford, H.* A Half century of maritime technology, 1943–1993 - written by a

- group of authorities / H. Benford, W.A. Fox. - Jersey City, N.J.: Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1993.
174. *Benjamin, M.* COLREGS-based navigation of autonomous marine vehicles / M. Benjamin, J. Curcio // IEEE/OES autonomous underwater vehicles. – 2004 - P. 32–39.
  175. *Berle, F.J.* Multi Radar Tracking and Multi Sensor Tracking in Air Defense Systems / F.J. Berle // Proc. International Radar Symposium, Bangalore, India, October 9 -12, 1983. Institution of Electronics and Telecommunication Engineers. - 1983. - P. 316 -321.
  176. *Bilik, I.* Maneuvering target tracking in the presence of glint using the nonlinear Gaussian mixture Kalman filter / I. Bilik, J. Tabrikian // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. - 2010. - Vol. 46. - №1. - C. 246-262.
  177. *Calvert, E.S.* Manoeuvres to ensure the avoidance of collision / E.S. Calvert // Journal of Navigation. – 1960. – Vol. 13. – P. 127–137.
  178. *Cannell, W.P.* Collision avoidance as a game of co-ordination / W.P. Cannell // Journal of Navigation. – 1981. – Vol. 34. - P. 220–239.
  179. *Chang, K.Y.* A method for searching optimal routes with collision avoidance on raster charts / K.Y. Chang, G.E. Jan, I. Parberry // Journal of Navigation. – 2003. – Vol. 56. - P. 371–384.
  180. *Churkin, V.I.* Procedures for ship collision avoidance / V.I. Churkin, Yu.I. Zhukov // OCEANS'98 Conference Proceedings. – 1998. - Vol. 2. – P. 857–860.
  181. *Coldwell, T.G.* Marine traffic behaviour in restricted waters / T.G. Coldwell // Journal of Navigation. – 1983. – Vol. 36. – P. 430–444.
  182. *Colley, B.A.* Manoeuvring times, domains and arenas / B.A. Colley, R.G. Curtis, C.T. Stockel // Journal of Navigation. – 1983. – Vol. 36. – P. 324–328.
  183. *Curtis, R.G.* The automatic detection of reallife ship encounters / R.G. Curtis, E.M. Goodwin, M. Konyn // Journal of Navigation. – 1987. – Vol. 40. - P. 355–365.
  184. *Davis, P.V.* A computer simulation of marine traffic using domains and arenas / P.V. Davis, M.J. Dove, C.T. Stockel // Journal of Navigation. – 1980. – Vol. 33. –

- P. 215–222.
185. *Degre, T.* A collision avoidance system / T. Degre, X. Lefevre // *Journal of Navigation*. – 1981. – Vol. 34. – P. 294–302.
  186. *Devyatisil'nyi, A.S.* A radar system for measuring the wave-forming properties of ships / A.S. Devyatisil'nyi, V.M. Dorozhko, V.M. Grinyak // *Measurement Techniques*. – 2005. – Vol. 48. - №3. – P. 271-274.
  187. *Devyatisilny, A.S.* Determination of hydrodynamic drag from a trajectory of inertial ship motion / A.S. Devyatisilny, V.M. Dorozhko, V.M. Grinyak // *Technical Physics*. – 2003. – Vol. 48. - №2. – P. 172-176.
  188. *Devyatisilny, A.S.* Estimating hydrodynamical drag of a seagoing vessel by data of remote trajectory measurements / A.S. Devyatisilny, V.M. Dorozhko, V.M. Grinyak // *Technical Physics Letters*. – 2003. – Vol. 29. - №10. – P. 801-803.
  189. *Devyatisil'nyi A.S., Dorozhko V.M., Grinyak V.M.* Identifying airborne objects with two-coordinate meters / A.S. Devyatisil'nyi, V.M. Dorozhko, V.M. Grinyak // *Measurement Techniques*. – 2004. – Vol. 47. - №11. – P. 1061-1064.
  190. *Dove, M.J.* An automatic collision avoidance and guidance system for marine vehicles in confined waters / M.J. Dove, R.S. Burns, C.T. Stockel // *Journal of Navigation*. – 1986. – Vol. 39. – P. 180–190.
  191. *El-Kader, F.A.* An integrated navigation system for Suez Canal (SCINS) / F.A. El-Kader, M.S.A. El-Soud, K. El-Serafy, E.A. Hassan // *Journal of Navigation*. – 2003. – Vol. 56. - №2. – P. 241–255.
  192. *Fujii, Y.* Studies in marine traffic engineering: traffic capacity / Y. Fujii, K. Tanaka // *Journal of Navigation*. – 1971. – Vol. 24. - P. 543–552.
  193. *Goodwin, E.M.* A statistical study of ship domains / E.M. Goodwin // *Journal of Navigation*. – 1975. - Vol. 28. - P. 328–341.
  194. *Goossens, L.H.J.* Operational benefits and risk reduction of marine accidents domains / L.H.J. Goossens, C.C. Glansdorp // *Journal of Navigation*. – 1998. - Vol. 51. - №3. - P. 368–381.
  195. *Grinyak, V.M.* Fuzzy collision avoidance system for ships / V.M. Grinyak, A.S.

- Devyatisil'nyi // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2016. – Vol. 55. - №2. – P. 249-259.
196. *Grinyak, V.M.* Prediction of emergency situations in marine traffic control / V.M. Grinyak, A.S. Devyatisil'nyi // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2004. – Vol. 43. - №3. – P. 448-457.
197. *Grinyak, V.M.* Determination of hydrodynamic drag from a trajectory of inertial ship motion / V.M. Grinyak, V.M. Dorozhko // XXXII Summer School-Conference “Advanced Problems in Mechanics”. St. Petersburg, Russia. - 2004. - P. 39.
198. *Grinyak, V.M.* Multi-model target tracking with fuzzy logic maneuver detector / V.M. Grinyak, M.V. Trofimov // Proceeding of 2012 Sino-Russian Academic Conference. Topic: Information Science and Technology. Shenyang. – 2012. - P. 87-89.
199. *Groves, P.D.* The complexity problem in future multisensor navigation and positioning systems: a modular solution / P.D. Groves // Journal of Navigation. – 2014. - Vol. 67. - №2. - P. 311–326.
200. *Hansen, M.G.* Empirical ship domain based on AIS data / M.G. Hansen, T.K. Jensen, T. Lehn-Schiøler, K. Melchild, F.M. Rasmussen, F. Ennemark // Journal of Navigation. – 2013. - Vol. 66. - №6. - P. 931–940.
201. *Hong, X.* Autonomous ship collision free trajectory navigation and control algorithms / X. Hong, C.J. Harris, P.A. Wilson // Proceedings of 1999 7th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. ETFA '99. - 1999. - P. 923–929.
202. Patent DE 4123898 A1. Dreidimensional arbeitendes radarsystem / Hudel P. (Пат. 4123898 ФРГ. Трехкоординатная радиолокационная система / Hudel P.; заявитель и патентообладатель Symens; опубл 18.07.91).
203. *Hughes, C.T.* Vessel traffic services (VTS): Are we ready for the new millenium? / C.T. Hughes // Journal of Navigation. - 1998. - Vol. 51. - №3. - P. 404-420.
204. *Hughes, C.T.* When is a VTS is not a VTS / C.T. Hughes // Journal of Navigation. - 2009. - Vol. 62. - №3. - P. 439-442.

205. *Hsu, H.* The AIS-assisted collision avoidance / H. Hsu, N.A. Witt, J.B. Hooper, A.P. McDermott // *Journal of Navigation*. - 2009. - Vol. 62. - №4. - P. 657-670.
206. *Hwang, C.N.* The integrated design of fuzzy collision-avoidance and h $\infty$ - autopilots on ships / C.N. Hwang // *Journal of Navigation*. – 2002. - Vol. 55. – P. 117–136.
207. *Hwang, C.N.* The design of fuzzy collision avoidance expert system implemented by h1-autopilot / C.N. Hwang, J.M. Yang, C.Y. Chiang // *Journal of Marine Science and Technology*. – 2001. – Vol. 9. - P. 25–37.
208. *Iijima, Y.* Results of collision avoidance manoeuvre experiments using a knowledge-based autonomous piloting system / Y. Iijima, H. Hagiwara // *Journal of Navigation*. – 1991. - Vol. 44. - P. 194–204.
209. *Ito, M.* Collision avoidance control of ship with genetic algorithm / M. Ito, F. Zhang, N. Yoshida // *Proceedings of the 1999 IOOO international conference on control applications*. – 1999. - P. 1791–1796.
210. *James, M.K.* Modelling the decision process in computer simulation of ship navigation / M.K. James // *Journal of Navigation*. – 1986. - Vol. 39. - P. 32–48.
211. *Jones, K.D.* Application of a manoeuvre diagram to multi-ship encounters / K.D. Jones // *Journal of Navigation*. – 1974. - Vol. 27. - P. 19–27.
212. *Kemp, J.* Behaviour patterns in crossing situations / J. Kemp // *Journal of Navigation*. – 2009. - Vol. 62. - №3. - P. 443-453.
213. *Lamb, W.G.P.* Multiple encounter avoidance manoeuvres / W.G.P. Lamb, J.M. Hunt // *Journal of Navigation*. – 2000. - Vol. 53. - №1. - P. 181-186.
214. *Lee, H.J.* Development of collision avoidance system by using expert system and search algorithm / H.J. Lee, K.P. Rhee // *Journal of International Shipbuilding Progress*. – 2001. – Vol. 48. - P. 197–212.
215. *Lee, Y.I.* A collision avoidance system for autonomous ship using fuzzy relational products and COLREGS / Y.I. Lee, Y.G. Kim // *Proceedings of Intelligent Data Engineering and Automated Learning (IDEAL) 2004: 5th International Conference, Exeter, UK*. – 2004. - P. 247–252.
216. *Lebkowski, A.* Intelligent ship steering system / A. Lebkowski, R. Smierzchalski,



- W. Gierusz, K. Dziedzicki // International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. – 2008. – Vol. 2. - №1. – P. 63-68.
217. *Liu, Y.H.* A fuzzy-neural inference network for ship collision avoidance / Y.H. Liu, C.J. Shi // Proceedings of the 4th international conference on machine learning and cybernetics, Guangzhou, China. - 2005. – Vol. 8. – P. 4754-4759.
218. *Merz, A.W.* Collision avoidance systems and optimal turn manoeuvres / A.W. Merz, J.S. Karmakar // Journal of Navigation. – 1976. - Vol. 29. – P. 160–174.
219. *Miele, A.* Optimal control of a ship for collision avoidance manoeuvres / A. Miele, T. Wang, C.S. Chao, J.B. Dabney // Journal of Optimization Theory and Applications. – 1999. – Vol. 103. – P. 495–519.
220. *Mitrofanov, O.* An anti-collision indicator / O. Mitrofanov // Journal of Navigation. – 1968. - Vol. 21. – P. 163–170.
221. *Nabaa, N.* Estimate fusion for 2D search sensors / N. Nabaa, R.H. Bishop // AIAA Guidance, Navigation and Control Proceedings. - 1995. - Vol. 1. - P. 677 -684.
222. *Nauk, D.* Foundations of neuro-fuzzy systems / D. Nauk, F. Klawonn, R. Kruse. – John Wiley & Sons, – 1997. 305 c.
223. *Perera, L.P.* Fuzzy logic based decision making system for collision avoidance of ocean navigation under critical collision conditions / L.P. Perera, J.P. Carvalho, C. Guedes Soares // Journal of Marine Science and Technology. – 2011. – Vol. 16. - №1. – P. 84-99.
224. *Petersen, E.* Simulator studies on a collision avoidance display that facilitates efficient and precise assessment of evasive manoeuvres in congested waterways / E. Petersen, K. Inoue, M. Tsugane // Journal of Navigation. – 2003. - Vol. 56. - P. 411–427.
225. *Pietrzykowski, Z.* The ship domain - a criterion of navigational safety assessment in an open sea area / Z. Pietrzykowski, J. Uriasz // Journal of Navigation. - 2009. - Vol. 62. - №1. - P. 93 -108.
226. *Rawson, A.* Practical application of domain analysis: port of London case study / A. Rawson, E. Rogers, D. Foster, D. Phillips // Journal of Navigation. – 2014. -

- Vol. 67. - №2. - P. 193-209.
227. *Romer, H.* Marine accident frequencies-review and recent empirical results / H. Romer, H.J.S. Petersen, P. Haastrup // *Journal of Navigation*. – 1995. - Vol. 48. - №3. - P. 410-424.
228. *Silveira, P.A.M.* Use of AIS data to characterise marine traffic patterns and ship collision risk off the coast of Portugal / P.A.M. Silveira, A.P. Teixeira, G. Guedes Soares // *Journal of Navigation*. – 2013. – Vol. 66. – №6. – P. 879-898.
229. *Smeaton, G.P.* Developing an intelligent marine navigation system / G.P. Smeaton, F.P. Coenen // *Computing & Control Engineering Journal*. – 1990. – Vol. 1. - №2. - P. 95–103.
230. *Smierzchalski, R.* Evolutionary trajectory planning of ships in navigation traffic areas / R. Smierzchalski // *Journal of Marine Science and Technology*. – 1999. – Vol. 4. - P. 1–6.
231. *Szlapczynski, R.* A new method of ship routing on raster grids, with turn penalties and collision avoidance / R. Szlapczynski // *Journal of Navigation*. – 2006. – Vol. 59. - P. 27–42.
232. *Szlapczynski R.* A unified measure of collision risk derived from the concept of a ship domain / R. Szlapczynski // *Journal of Navigation*. – 2006. – Vol. 59. - P. 477–490.
233. *Szlapczynski, R.* A target information display for visualising collision avoidance manoeuvres in various visibility conditions / R. Szlapczynski, J. Szlapczynska // *Journal of Navigation*. – 2015. - Vol.68. – P. 1041-1055.
234. *Tam, C.K.* Collision risk assessment for ships / C.K. Tam, R. Bucknall // *Journal of Marine Science and Technology*. - 2010. - Vol. 15. - №3. - P. 257-270.
235. *Tam, Ch.K.* Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters / Ch.K. Tam, R. Bucknall, A. Greig // *Journal of Navigation*. - 2009. - Vol. 62. - №3. - P. 455-476.
236. *Tijardovic, I.* The use of AIS for collision avoidance / I. Tijardovic // *Journal of Navigation*. - 2009. - Vol. 62. - №1. - P. 168-172.

237. *Wawruch, R.* Testing the quality of information on tracked vessels in a VTS centre with GNSS / R. Wawruch, J. Cydejko, M. Dziewicki // *Journal of Navigation.* - 1999. - Vol. 52. - №2. - P. 252-258.
238. *Wilson, P.A.* A Line of sign counteraction navigation algorithm for ship encounter collision avoidance / P.A. Wilson, C.J. Harris, X. Hong // *Journal of Navigation.* - 2003. - Vol. 56. - №1. - P. 111-121.
239. *Xinggu, Zh.* A study on the application of pulse doppler radar in VTS / Zh. Xinggu // *Journal of Navigation.* - 1998. - Vol. 51. - №2. - P. 237-242.
240. *Zeng, X.* Evolution of the safe path for ship navigation / X. Zeng // *Applied artificial intelligence.* – 2003. – Vol. 17. - №2. - P. 87–104.
241. *Zhu, X.* Domain and its model based on neural networks / X. Zhu, H. Xu, J. Lin // *Journal of Navigation.* – 2001. – Vol. 54. – P. 97–103.

## Приложение А. Акты об использовании результатов работы

### УТВЕРЖДАЮ



Проректор научной работе  
Морского государственного университета  
им. адм. Г. И. Невельского  
д. ф. м. н., профессор  
О. А. Букин  
«21» июня 2016 г.

### АКТ

об использовании результатов  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

### ГРИНЯКА ВИКТОРА МИХАЙЛОВИЧА

Настоящим удостоверяется, что научные результаты диссертационной работы Гриняка В.М. «Разработка математических моделей обеспечения безопасности коллективного движения морских судов», представляемой на соискание ученой степени доктора технических наук, используются в учебной и научной работе Морского государственного университета им. адм. Г.И. Невельского при подготовке кадров и проведении исследований в области судовождения и эксплуатации водного транспорта.

Начальник Учебно-методического центра  
конвенционной подготовки,  
профессор кафедры судовождения, д. т. н.

А. А. Лентарёв

21 июня 2016 г.

УТВЕРЖДАЮ

Врио проректора по науке и  
инновациям ДВФУ

О.Л. Щека

«10» июля 2016 г.

8

**АКТ**

об использовании результатов  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

**ГРИНЯКА ВИКТОРА МИХАЙЛОВИЧА**




Комиссия в составе:

- председатель – руководитель образовательной программы «Технология программирования» по направлению 02.03.03 «Математическое обеспечение и администрирование информационных систем», магистерской программы «Разработка программно-информационных систем» по направлению 09.04.04 «Программная инженерия», зав. кафедрой прикладной математики, механики, управления и программного обеспечения И.Л. Артемьева, д.т.н., профессор,
- члены комиссии – доцент кафедры прикладной математики, механики, управления и программного обеспечения Е.И. Антонова, к.т.н., доцент,  
- доцент кафедры прикладной математики, механики, управления и программного обеспечения С.Н. Остроухова, к.т.н.

составили настоящий акт о том, что научные результаты диссертационной работы Гриняка В.М. «Разработка математических моделей обеспечения безопасности коллективного движения морских судов», представляемой на соискание учёной степени доктора технических наук, используются в учебном процессе кафедры прикладной математики, механики, управления и программного обеспечения Школы естественных наук ДВФУ при подготовке курсовых работ, выпускных квалификационных работ бакалавров и магистерских диссертаций студентов кафедры, обучающихся по направлениям 02.03.03 – «Математическое обеспечение и администрирование информационных систем», 09.04.04 «Программная инженерия».

Председатель комиссии

Члены комиссии:

 – И.Л. Артемьева  
 – Е.И. Антонова  
 – С.Н. Остроухова

«10» июля 2016 г.



## Приложение Б. Работа СУДС в заливе Находка

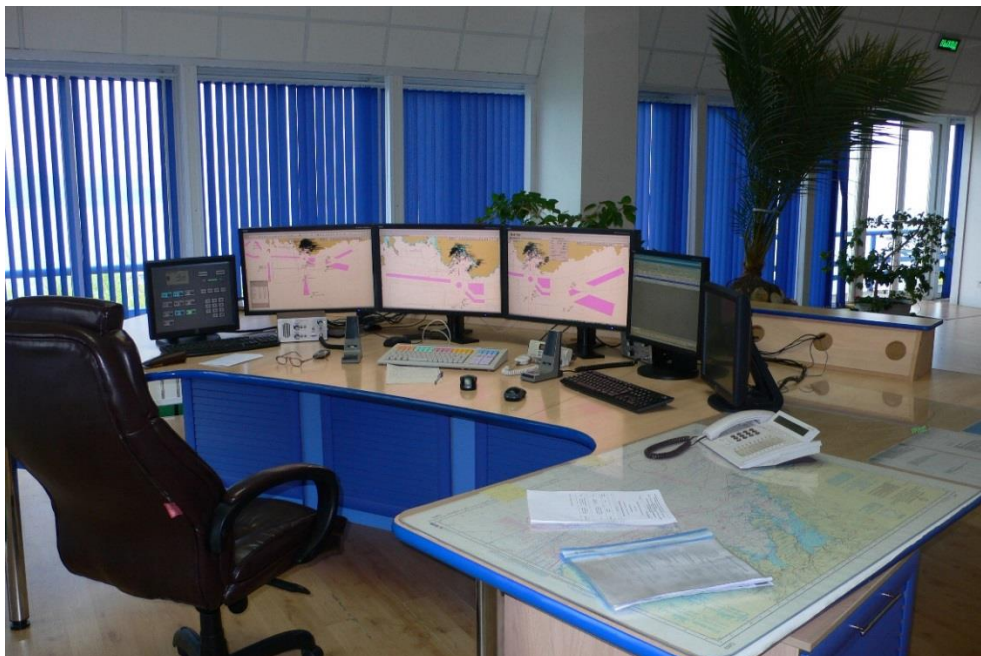


Рисунок Б.1 - Рабочее место оператора СУДС в заливе Находка



Рисунок Б.2 - Автоматизированное рабочее место оператора СУДС «НАВИ-Харбор» (разработчик – компания «Транзас»). Видна зона ответственности СУДС в заливе Находка



Рисунок Б.3 - Представление информации о наблюдаемых объектах в СУДС «НАВИ-Харбор». Показана навигационная обстановка в районе бухт Врангеля и Козьмина (залив Находка)



Рисунок Б.4 - Судно большого размера входит в Восточный Порт (залив Находка)

## **Приложение В. Об ограничении разрешения компьютеризированных РЛС кругового обзора**

Несмотря на развитость современных спутниковых средств навигации (например, Автоматическая идентификационная система (АИС) в судовождении [145]), радиолокационные станции продолжают составлять информационную основу систем наблюдения за морским и воздушным движением, так как способны обеспечить бесперебойность и автономность их функционирования. Например, береговые и бортовые системы управления движением судов обязательно включают в себя одну или несколько РЛС кругового обзора [138, 142, 143].

В настоящее время характерна компьютеризация РЛС, состоящая в их сопряжении с ЭВМ с помощью специальных аналого-цифровых устройств (радар-процессоров [144]). Радиолокационный отражённый эхо сигнал оцифровывается и «вводится» в память ЭВМ (первичная обработка сигнала). Получаемые таким образом первичные цифровые данные передаются другим компонентам информационной системы (как правило – распределённой) для вторичной обработки (см. также п. 5.1).

Инструментальная компонента погрешности измерений координат наблюдаемых объектов обычно связывается с такими характеристиками РЛС как ширина диаграммы направленности, длина волны, длина зондирующего импульса и частота посылок [157]. Компьютеризация РЛС и, как следствие, переход от аналогового (непрерывного) к цифровому (дискретному) представлению информации вводит дополнительный фактор, влияющий на инструментальную погрешность измерений РЛС.

Аналого-цифровое преобразование исходного эхо-сигнала характеризуется частотой и диапазоном его дискретизации. Высокая частота и большой диапазон дискретизации очень желательны, так как позволяют достигать высокой точности измерения координат наблюдаемых объектов и решать дополнительные задачи (например, выделять объекты на фоне помех, распознавать тип объекта по его



радиолокационному образу, оценивать метеоусловия и т.п.) [88]. Вместе с тем, высокие характеристики частоты и диапазона дискретизации приводят к значительным объемам получаемых данных. Суть проблемы в том, что передача данных от блока первичной обработки к блоку вторичной обработки распределённой информационной системы имеет ограничения по скорости, обусловленные характеристиками используемых компьютеров, программной платформы и сетевого оборудования. В условиях этих ограничений выбор тех или иных параметров аналого-цифрового преобразования исходного эхо-сигнала представляет собой актуальную задачу.

Промышленные системы наблюдения строятся с использованием специализированных ЭВМ и программных платформ, что определяет их высокую стоимость и ограниченную доступность специалистов-разработчиков и эксплуатационников нужной квалификации. Поэтому, если решаемые системами наблюдения задачи не предъявляют высоких требований к надёжности и защищённости (например, научно-исследовательские задачи), целесообразно обратиться к типовым компьютерам и программному обеспечению общего назначения.

В настоящем разделе исследуются ограничения характеристик систем наблюдения, создаваемых на основе компьютеризированных РЛС кругового обзора с использованием компьютерного оборудования и программных платформ общего назначения и связанных с конечностью скорости передачи данных в распределённых информационных системах.

Пусть имеется типовая РЛС кругового обзора с периодом обращения антенны  $T_\psi$  и частотой посылок  $\nu_\psi$  (частота дискретизации по азимуту). При таких значениях количество линеек на один оборот антенны (то есть количество дискретных значений азимута) будет равно  $N_\psi = \nu_\psi T_\psi$ .

Пусть шкале дальности РЛС соответствует время приёма линейки  $T_r$ . Пусть каждая линейка преобразуется аналого-цифровым устройством с частотой дискретизации  $\nu_r$  в массив значений. Тогда число элементов в этом массиве

значений (то есть количество дискретных значений дальности) у каждой линейки будет равно  $N_r = v_r T_r$ .

Один оборот антенны РЛС формирует радиолокационный образ наблюдаемого пространства, который путём аналого-цифрового преобразования представляется в виде матрицы амплитуд отражённого эхо-сигнала  $A$ , формируемая как отражение в память ЭВМ множества кортежей (56), с количеством строк, равным  $N_\psi$  и количеством столбцов, равным  $N_r$ . Матрица амплитуд обновляется с каждым оборотом антенны, то есть один раз за время  $T_\psi$ .

Система наблюдения, построенная на базе такой РЛС имеет следующую архитектуру (рисунок 92). Электрические видео- и синхронизирующие сигналы РЛС подаются на вход подключенного к ЭВМ аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Полученная в результате такой первичной обработки матрица амплитуд  $A$  передаётся по сетевому протоколу другой ЭВМ для вторичной обработки, включающей в себя сопровождение траекторий наблюдаемых объектов, определение их параметров движения и визуализацию навигационной обстановки в пользовательском интерфейсе.

В общем случае производительность современных типовых ЭВМ достаточна для решения базовых задач первичной и вторичной обработки сигнала. Вместе с тем, имея в виду большой объём матрицы  $A$  и её частое обновление, передача данных от блока первичной обработки к блоку вторичной обработки по сетевому протоколу является «узким местом» рассматриваемой системы радиолокационного наблюдения.

Архитектура современных программных платформ (операционных систем) позволяет обеспечить построение распределённых информационных систем путём использования многозадачности и передачи данных между процессами. Эти процессы, составляющие программную основу распределённой информационной системы, могут быть запущены параллельно друг другу и обмениваться данными как на одной, так и на различных ЭВМ, соединённых сетью. В современных

программных платформах имеется целый ряд инструментов для обмена данными между процессами [149].

*Интерфейс динамического обмена данными (DDE интерфейс).* DDE интерфейс предоставляет набор инструментов и сообщений, посылаемых между приложениями, использующими общую память, чтобы известить приложение об изменении данных. Приложения могут использовать протокол DDE как для однократной передачи данных, так и для непрерывного обмена, в котором приложения посылают сообщения друг к другу, как только новые данные становятся доступны. Как правило, этот способ используется для передачи небольших объёмов данных.

*Почтовые слоты (mail slots).* Mail slots – это специальные области памяти, для доступа к которым используются стандартные API функции операционной системы для работы с файлами. Любой процесс может выполнять роль mail slot сервера, создавая слот. Процесс, выполняющий роль mail slot клиента, подключается к уже существующему слоту. Этот слот может располагаться как на текущем, так и на удалённом компьютере. И клиент, и сервер могут осуществлять как чтение, так и запись данных.

*Именованные каналы (pipes).* Именованные каналы используются для гарантированной передачи данных между двумя процессами, это своего рода «выделенная линия» между процессами. Одна из программ выполняет роль pipe сервера, создавая канал и записывая туда данные, вторая программа – роль pipe клиента, подключаясь к каналу (который может располагаться как на текущем, так и на удалённом компьютере) и читая данные. Достоинство этого способа – возможность обеспечить синхронизацию клиента и сервера.

*Сокеты (sockets).* Сокеты – абстрактные объекты, предоставляющие интерфейс для обмена данными между процессами. Каждый процесс может создать серверный сокет и привязать его к какому-нибудь порту операционной системы. Другой процесс создаёт клиентский сокет и подсоединяется к нему, после чего становится возможной передача данных через файловый дескриптор. Каждый

сокет характеризуется своим сетевым адресом, что даёт возможность передавать данные между процессами, запущенными на различных компьютерах.

*Файлы, отображаемые в память (memory mapped files).* Это способ работы с файлами, при котором всему файлу или его части ставится в соответствие определённый участок оперативной памяти. Для высокопроизводительного обмена данными между процессами используются непостоянные (non-persisted) файлы, отображаемые в память, которые не связаны с исходным файлом на диске. В этом случае фактически операционной системой создаётся общая память, доступ к которой процессы получают через файловый дескриптор. Достоинство этого способа – платформонезависимость.

Имея в виду особенности функциональности системы радиолокационного наблюдения, для программной реализации обмена данными между блоками первичной и вторичной обработки наиболее подходящим является механизм именованных каналов (pipes). Его характеризует возможность синхронизировать работу блока вторичной обработки (pipe клиента) с обновлением данных блока первичной обработки (pipe сервером). При этом следует отметить методологическую общность работы ядра операционной системы при реализации различных механизмов обмена данными между процессами, что приводит к близости их производительности и ресурсоёмкости, в том числе – в разрезе различных операционных систем.

Была поставлена задача об оценке характерной скорости передачи данных от блока первичной к блоку вторичной обработки при использовании механизма именованных каналов (pipes). Это, в свою очередь, позволяет оценить возможные предельные значения частот дискретизации радиолокационного образа по азимуту  $v_{\psi}$  и дальности  $v_r$ , определяющих размерность матрицы амплитуд  $A$ .

Оценку характерной скорости передачи данных от pipe сервера к pipe клиенту будем проводить по результатам натурных испытаний. Имеются две ЭВМ, соединённые локальной сетью. На одной из них запускается программа-сервер, создающая именованный канал и генерирующая и записывающая в него данные.

На второй ЭВМ запускается программа-клиент, читающая данные из именованного канала.

Скорость передачи данных определяется не только конфигурацией ЭВМ и сетевых устройств, но и используемой операционной системой, и степенью загрузки ресурсов ЭВМ другими системными и прикладными задачами. Для анализа скорости передачи данных в различных условиях реализуем следующие тестовые сценарии.

*Сценарий 1.* Работа клиента и сервера без дополнительной нагрузки.

*Сценарий 2.* Параллельно клиенту и серверу запускается проигрывание видеофайлов с жёсткого диска.

*Сценарий 3.* Параллельно клиенту и серверу запускается проигрывание видеофайлов из сети.

*Сценарий 4.* Параллельно клиенту и серверу запускаются ресурсоёмкие приложения.

Первый сценарий условно моделирует идеальный вариант работы системы наблюдения как программного продукта. Второй, третий и четвертый – различные аспекты загрузки ресурсов ЭВМ (процессор, память, сеть). В четвертом сценарии роль ресурсоёмкого приложения выполняли компьютерные игры с богатой функциональностью.

При постановке натурного эксперимента использовались ЭВМ со следующими характеристиками: процессор Intel Core i5 с частотой 2.5 ГГц, память 4 Гбайт, сетевой адаптер со скоростью 1Гбит/с, ОС Win7(64). Такие характеристики вполне соответствуют определению «типовая ЭВМ общего назначения».

На рисунке В.1 показаны графики, характеризующие значения скорости передачи данных  $C$  от  $\text{pipe}$  сервера к  $\text{pipe}$  клиенту. Рисунок В.1а соответствует первому сценарию, В.1б, В.1в и В.1г – второму, третьему и четвертому. В момент времени  $t = 0$  последовательно запускались процессы сервера и клиента, в момент времени  $t = 20$  с, после стабилизации распределения ресурсов ЭВМ, начиналось

логирование данных. Из графиков видно, что скорость передачи данных составляет порядка 50 мегабайт в секунду (что более чем в 2 раза меньше теоретически возможной, обусловленной характеристиками используемого сетевого адаптера 1Гбит/с). При этом имеют место колебания скорости порядка 5-10%. Значения скорости передачи данных близки во всех четырёх сценариях, то есть скорость передачи данных не зависит явно от загрузки ресурсов ЭВМ, если загрузка не экстремально велика.

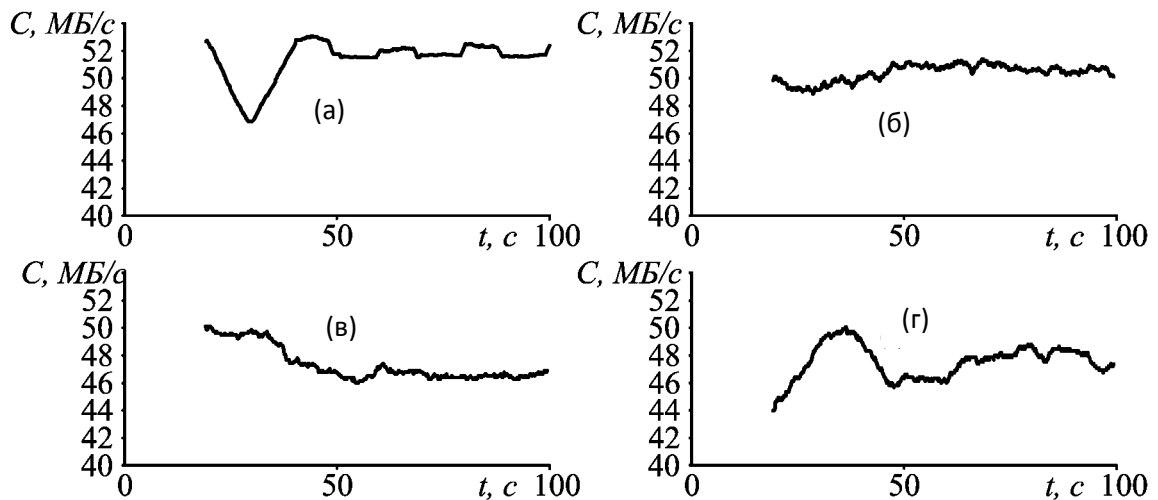


Рисунок В.1 - Скорость передачи данных клиент – сервер (результаты натурных измерений)

Значения размерности матрицы амплитуд отражённого эхо-сигнала  $A$  - количество строк  $N_{\psi}$  и количество столбцов  $N_r$  - при известных размере одного элемента матрицы  $s$  (определяется диапазоном дискретизации), скорости передачи данных от блока первичной обработки к блоку вторичной обработки  $C$  и периоде обращения антенны РЛС  $T_{\phi}$  связаны соотношением:

$$N_r = \frac{CT_{\psi}}{sN_{\psi}}.$$

Разрешения по углу и дальности, обусловленные дискретизацией и выраженные в метрах, при размерности матрицы амплитуд  $N_{\psi} \times N_r$  равны,

соответственно,  $\delta_\psi = 2\pi r / N_\psi$  и  $\delta_r = R / N_r$  где  $r$  - расстояние до наблюдаемого объекта,  $R$  - максимальная дальность работы РЛС (определяемая выбранной шкалой дальности).

Рисунок В.2 иллюстрирует возможные значения погрешностей измерения координат наблюдаемых объектов, если скорость передачи данных от блока первичной обработки к блоку вторичной обработки  $C$  составляет оцененные 50 Мбайт/с, период обращения антенны РЛС  $T_\phi$  равен 3с, а размер одного элемента матрицы амплитуд  $s$  равен 2 байта.

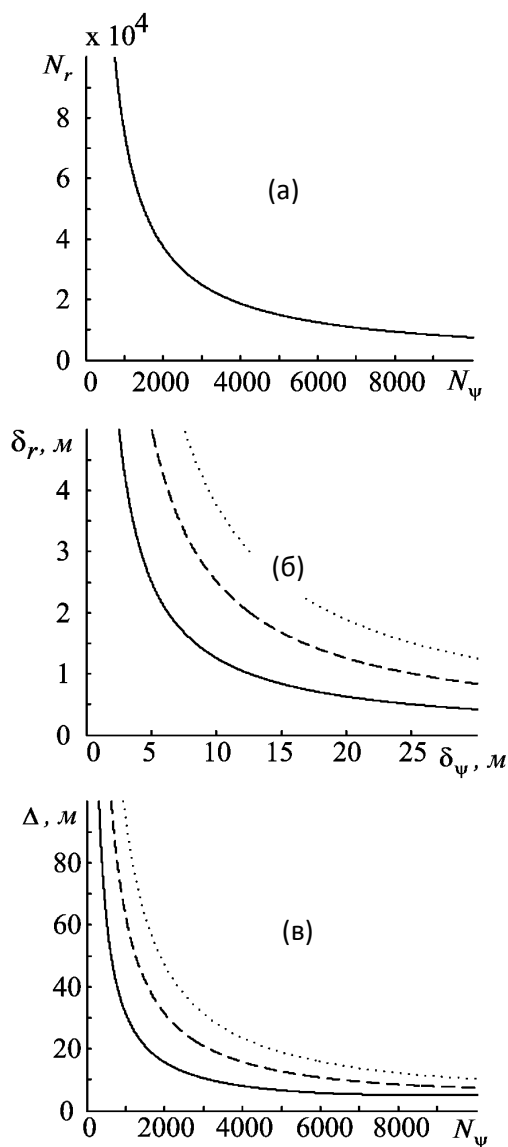


Рисунок В.2 - Размеры матрицы амплитуд, разрешения по углу и дальности и соответствующие погрешности измерения координат

На рисунке В.2а показана зависимость максимального количества столбцов  $N_r$  от количества строк  $N_\psi$  при указанных значениях. Например, если частота посылок РЛС соответствует 4000 линеек на один оборот антенны, то максимально возможное количество дискретных значений дальности равно, приблизительно, 20 000.

На рисунке В.2б показана зависимость разрешения по дальности  $\delta_r$  от разрешения по углу  $\delta_\psi$  при  $R = 30$  км и  $r = 5$  км (сплошная линия),  $r = 10$  км (пунктир),  $r = 15$  км (точки). Видно, что, например, для объекта, находящегося на удалении  $r = 5$  км, при разрешении по углу  $\delta_\psi$  равном 4 метрам разрешение по дальности  $\delta_r$  равно 3 метрам.

На рисунке В.2в показана зависимость погрешности измерения координат объекта  $\Delta = \sqrt{\delta_\psi^2 + \delta_r^2}$  от количества строк  $N_\psi$  матрицы амплитуд при  $R = 30$  км и  $r = 5$  км (сплошная линия),  $r = 10$  км (пунктир),  $r = 15$  км (точки). Видно, что, например, для объекта, находящегося на расстоянии  $r = 15$  км при количестве линеек  $N_\psi = 5000$ , погрешность измерения местоположения составляет 20 метров. Как показывают приведённые результаты экспериментов и расчётов, реально достижимая на типовой ЭВМ со скоростью сетевого адаптера 1 Гбит/с скорость передачи данных составляет порядка 50 Мбайт/с. В этом случае обусловленная дискретизацией РЛС сигнала погрешность измерения координат наблюдаемых объектов на характерных дальностях 10-15 км составляет порядка 15-20 м. Такие погрешности достаточны для решения многих задач наблюдения, связанных, например, с оценкой навигационной обстановки и обеспечением безопасности коллективного движения наблюдаемых объектов.

Для задач, требующих на порядок меньшей погрешности измерения координат  $\sim 1$  м, для постоянной передачи к блоку вторичной обработки полной матрицы амплитуд необходима на два порядка большая скорость передачи данных  $\sim 5$  Гбайт/с, недостижимая для типового сетевого оборудования общего назначения.



Решение таких задач требует разработки специальных приёмо-передающих устройств и алгоритмов обработки данных.