

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»
Государственный научный центр Российской Федерации

На правах рукописи

Орлов Владимир Станиславович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ
И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ОПАСНЫХ СБЛИЖЕНИЙ В ВОЗДУХЕ В
РАМКАХ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ОрВД**

Специальность 05.13.01 - Системный анализ, управление и обработка информации
(авиационная и ракетно-космическая техника)

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор, академик РАН
Федосов Евгений Александрович

Москва - 2015

Оглавление

Список сокращений	5
Введение	6
Глава 1. Место алгоритмов обнаружения и предотвращения опасных сближений в составе перспективной системы ОрВД	10
1.1 Технические и организационные предпосылки модернизации систем ОрВД	10
1.2 Основные принципы построения перспективной системы ОрВД	11
1.3 Место функции обнаружения и предотвращения опасных сближений в составе системы ОрВД. Нормативная база для ее создания и функционирования	13
1.4 Анализ состояния разработки и внедрения в мире	19
1.5 Выводы	21
Глава 2. Постановка задачи обнаружения и предотвращения опасных сближений	22
2.1 Информационное обеспечение функции самоэшелонирования	22
2.1.1 Техническое оснащение перспективных систем УВД в соответствии с концепцией CNS/ATM.....	24
2.2 Техническая постановка задачи. Особенности применения функции в различных вариантах применения	30
2.2.1 Принципы и правила обеспечения безопасности полетов в современной системе УВД	30
2.2.2 Особенности геометрии опасных сближений при реализации концепции «свободного полета»	31
2.2.3 Обеспечение технических возможностей для децентрализованного управления обнаружением и предотвращением опасных сближений	34
2.3 Математическая постановка задачи децентрализованного управления	35
2.4 Выводы	38
Глава 3. Синтез алгоритмов обнаружения и предотвращения опасных сближений.....	39
3.1. Анализ состояния вопроса. Обзор работ по методам и алгоритмам	39

3.1.1	Обзор алгоритмов обнаружения конфликтов.....	39
3.1.2	Обзор алгоритмов разрешения конфликтов	41
3.2	Пояснения по алгоритму разрешения конфликтов	45
3.3	Описание предложенных алгоритмов	46
3.3.1	Алгоритмы обнаружения конфликтов	46
3.3.2	Алгоритм разрешения конфликтов	57
3.4	Автономный моделирующий комплекс обработки и исследования алгоритмов предотвращения опасных сближений	64
3.4.1	Динамическая модель управляемого движения ВС	68
3.4.2	Принятые критерии и показатели.....	70
3.5	Оценка возможностей и особенностей функционирования алгоритмов	71
3.5.1	Исследование эффективности разрешения конфликтных ситуаций в воздухе методами имитационного моделирования	72
3.5.2	Статистическое моделирование процессов обнаружения и предотвращения опасных сближений.....	75
3.5.3	Оценка эффективности управления для предельно сложных и размерных множественных конфликтов.....	81
3.5.	Выводы.....	84
Глава 4.	Решение вопросов практического применения предлагаемого подхода.....	86
4.1	Включение программной процедуры обнаружения и предотвращения опасных сближений в состав программного обеспечения перспективного самолета.	86
4.1.1	Отображение рекомендаций алгоритма на кабинном дисплее.....	86
4.1.2	Требования к процедуре самоэшелонирования в составе бортовой вычислительной системы	91
4.1.3	Входной и выходной информационный интерфейсы	91

4.2	Предложения по изменению и уточнению правил использования воздушного пространства и управления воздушным движением, связанных с реализацией децентрализованного и смешанного управления	92
4.3	Исследования по оценке эффективности применения процедуры в составе полунатурного комплекса моделирования ИМА	95
4.3.1	Базовый сценарий.....	99
4.3.2	Отражение штатных действий экипажа и диспетчера в конфигурации моделирующего стенда	99
4.3.3	Проведение моделирования процедуры самоэшелонирования.....	101
4.4	Выводы	107
	Заключение и выводы.....	108
	Список литературы	109
	Приложение 1. Параметры алгоритмов	111
	Приложение 2. Требования к интерфейсу КПО ФОРЭС.....	113
	Приложение 3. Список используемых CPDLC сообщений, при использовании функции ACM	119

Список сокращений

АЗН-В-	автоматическое зависимое наблюдение вещательное
ВД -	воздушное движение
ВП -	воздушное пространство
ВС -	воздушное судно
ДВО -	динамическая воздушная обстановка
ИМА -	интегрированная модульная авионика
ОВД -	обслуживания воздушного движения
ОрВД -	Организация воздушного движения
ППМ -	промежуточный пункт маршрута
РЛС -	радио-локационная станция
РЦ -	районный центр
УВД -	управление воздушным движением
УПС -	удаленные пункты связи

ACM -	Airborne Conflict Management
ADS-B-	Automatic Dependent Surveillance-Broadcast
ASA -	Aircraft Surveillance Applications
ASAS -	Aircraft Surveillance Applications System
ATM -	Air Traffic Management
CD -	Conflict Detection
CD&R-	Conflict Detection and Resolution
CDTI -	Cockpit Display Traffic Information
CNS -	Communication, Navigation, Surveillance
CPDLC-	Controller–Pilot Data Link Communications
DME -	Distance Measuring Equipment
FMS -	Flight Management System
ILS -	Instrument Landing System
ITP -	In-Trail Procedures
MLAT-	Multilateration
MLS -	Microwave Landing System
PBN -	Performance-based Navigation
RNP -	Required navigation performance
RTCA -	Radio Technical Commission for Aeronautics
SSEP -	Self-SEParation
TCAS -	Traffic Collision Avoidance System
TIS-B -	Traffic Information Service Broadcast
VOR -	Omni-directional Radio Range

Введение

Современное состояние мировой авиатранспортной системы характеризуется стабильным увеличением объемов авиаперевозок, интенсивности воздушного движения (ВД), которое уже приводит к достижению системой своих предельных возможностей. Оказывается исчерпанной пропускная способность системы. Дальнейшее увеличение интенсивности неизбежно приводит к снижению безопасности полетов, увеличению задержек воздушных судов (ВС) как на земле, так и в воздухе, увеличению расхода топлива и снижению эффективности выполнения полетов, неприемлемому увеличению экологических издержек. С этой проблемой уже столкнулись в регионах с наиболее интенсивным ВД – в Западной Европе и США. Определенные проблемы ощущаются также и в районах РФ с наибольшей интенсивностью полетов – Московском, Санкт-Петербургском, Ростовском. Не случайно, как в Европе, так и в США приняты и выполняются крупнейшие программы модернизации систем организации воздушного движения (ОрВД) – соответственно программы SESAR и NextGen. Принципиальное решение проблем с пропускной способностью системы ОрВД и ее отдельных компонент, а также с обеспечением эффективности выполнения полетов требует внедрения новых методов, схем, алгоритмов управления воздушным движением (УВД).

С середины 90-х годов ведущими национальными и интернациональными авиационными организациями (ICAO, FAA, Eurocontrol, NASA) проводятся активные исследования по формированию обоснованного общего взгляда на проблемы построения и конечную структуру перспективных систем обслуживания воздушного движения (ОВД), по разработке и согласованию программ перехода к принципиально новой организации ВД на основе технологий CNS/ATM. В настоящее время в наиболее экономически развитых регионах (США, Европа) такие программы поэтапно реализуются в соответствии с утвержденными графиками проведения модернизаций и объемов финансирования.

Основная идея перспективной организации ВД состоит в предоставлении пользователям – центрам управления полетами авиакомпаний и пилотам ВС, столько свободы, и, вместе с тем, ответственности при планировании и выполнении рейсов ВС, сколько им необходимо для решения своих экономических задач при условии сохранения высокого уровня безопасности полетов в совместно используемом ВП (условия “свободного полета”). Роль служб организации потоков воздушного движения и УВД - обеспечение безопасности путем введения

минимальных (по времени и дальности) ограничений полетов, строго необходимых для предотвращения перегрузок областей ВП и разрешения конфликтных ситуаций между ВС.

Согласно концепции перспективной усовершенствованной системы УВД (основанной на принципах «Free Flight») [1], пользователи (экипажи) будут иметь большую свободу по изменению (оптимизации) траектории и режимов полета своих ВС, в том числе и непосредственно в полете, по своим собственным операционным критериям при безусловном выполнении ограничений по использованию ВП со стороны системы УВД. Существенным моментом, связанным с применением концепции «Free Flight», является изменение геометрии относительного движения пары ВС.

Переход к перспективным системам ОВД требует создания качественно более высокой технической базы, изменения психологии участников ВД при внедрении новых процедур взаимодействия, предварительного анализа последствий проведения каждого этапа модернизации с использованием методов имитационного моделирования. Однако при современных темпах развития авиации эти затраты необходимы для сохранения приемлемого уровня безопасности полетов и предотвращения угрозы значительного снижения эффективности ОВД.

С точки зрения взаимодействия пилотов ВС и диспетчеров ОВД основными задачами проведения модернизации являются:

- уменьшение частоты и глубины директивных мер диспетчеров ОВД (общего числа вмешательств и степени изменения траекторий ВС) при сохранении высокого уровня безопасности ВД;

- предоставление пилотам ВС свободы выполнения предпочтительной 4-D траектории и гибкого маневрирования в ответ на изменение ситуации в полете, ограниченной только техническими возможностями и оснащенностью ВС, а также минимальными (при угрозе конфликтов) директивными мерами УВД.

В настоящее время широко используется термин «концепция CNS/ATM», который соответствует следующему определению: концепция организации и управления воздушным движением, базирующаяся на внедрении новых средств наблюдения, навигации и связи, и направленных на реализацию максимальной свободы пользователям ВП в управлении собственным движением, предоставляемой благодаря использованию этих средств.

При этом основой средств связи является цифровая ОВЧ-связь «земля – борт» и «борт – борт» с использованием космического или наземного сегмента; средств навигации ВС – инерциальных навигационных систем, корректируемых в первую очередь с использованием спутниковой навигационной системы, и средств наблюдения – прежде всего, средств автоматически зависимого наблюдения (с использованием космического или наземного сегмента), а также средств вторичной радиолокации с использованием режима S.

Ключевыми элементами организации управления, вытекающими из концепции, являются «свободный полет», децентрализация обнаружения и разрешения опасных сближений.

Целью диссертационной работы является разработка метода и алгоритмов обнаружения и предотвращения опасных сближений в воздухе в рамках перспективной системы организации воздушного движения (ОрВД) с учетом требований по безопасности и эффективности выполнения полетов.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи:

- разработка методов обнаружения и предотвращения опасных сближений;
- разработка алгоритмического и программного обеспечения для применения алгоритмов обнаружения и предотвращения опасных сближений, в том числе постановка требований для реализации рекомендаций в кабинной индикации перспективного ВС;
- синтез алгоритмов обнаружения и предотвращения опасных сближений, реализация алгоритмов в «бортовом исполнении» на крейте интегрированной модульной авионики (ИМА).
- разработка модели динамической воздушной обстановки, обеспечивающей принципы перспективной организации системы ОрВД для тестирования и отработки методов и алгоритмов обнаружения и предотвращения опасных сближений в воздухе.

Диссертационная работа состоит из четырех глав.

В первой главе определено место функции обнаружения и предотвращения опасных сближений в составе перспективной системы ОрВД, рассматриваются технические и

организационные предпосылки нового поколения систем связи, навигации и наблюдения (Communication, Navigation, Surveillance – CNS), проводится анализ состояния разработки и внедрения в мире.

Во второй главе сформулирована постановка задачи обнаружения и предотвращения опасных сближений, рассмотрено информационное обеспечения функции самоэшелонирования, даны техническая и математическая постановки задачи.

В третьей главе производится синтез алгоритмов обнаружения и предотвращения опасных сближений, проводится обзор работ по методам и алгоритмам, обосновывается выбор метода потенциальных полей как основы для разработки алгоритмов. Приводится описание предложенных алгоритмов, дается оценка возможностей и особенностей функционирования алгоритмов.

Четвертая глава посвящена вопросам практического применения предлагаемого подхода. Дано описание включения программной процедуры обнаружения и предотвращения опасных сближений в состав программного обеспечения ИМА перспективного самолета. Приведены требования к реализации процедуры в составе бортовой вычислительной системы, дана оценка возможностей и требований к внешним устройствам. Проведены исследования по оценке эффективности применения процедуры в составе полунатурного комплекса моделирования ИМА. Представлены предложения по изменению и уточнению правил использования воздушного пространства и управления воздушным движением, связанных с реализацией децентрализованного и смешанного управления.

Глава 1. Место алгоритмов обнаружения и предотвращения опасных сближений в составе перспективной системы ОрВД

1.1 Технические и организационные предпосылки модернизации систем ОрВД

Технической предпосылкой модернизации системы ОрВД является внедрение нового поколения систем связи, навигации и наблюдения (Communication, Navigation, Surveillance – CNS), ключевой элемент которой - спутниковый сегмент. В докладе комитета по будущим аэронавигационным системам ФАНС (FANS) ИКАО [2] говорится о необходимости перехода от технологии аэронавигационных средств наземного базирования к технологии космического базирования. Применение новых средств обеспечивает более точное взаимодействие между наземными системами и пользователями воздушного пространства на этапах, предшествующих полету, в ходе полета и на завершающей его стадии. Такая информационная обеспеченность позволяет в свою очередь усовершенствовать систему ОрВД. В этой системе будет все шире использоваться автоматизация для снижения накладываемых на функции ОрВД ограничений.

Одним из центральных вопросов, связанных с внедрением новых концепций организации ВД является проблема безопасности полетов и разделения ВС в воздухе. В частности, возникает задача делегирования ответственности за разделение ВС от диспетчера на борт ВС (обеспечения самоэшелонирования). Наиболее важными причинами целесообразности такого решения будут следующие:

- необходимость обеспечения полетов в необслуживаемом воздушном пространстве (в малозаселенных и незаселенных районах);
- реализация идеологии свободных полетов в областях свободных полетов, в районах зональной навигации;
- необходимость снижения загрузки диспетчеров управления воздушным движением (УВД) в интересах повышения пропускной способности системы.

Информационными предпосылками возможности самоэшелонирования являются внедрение широкополосного автоматического зависимого наблюдения (АЗН-В), а также наличие информационной поддержки со стороны диспетчера по цифровым линиям связи. Для реализации этой задачи предполагается наличие в составе перспективной авионики самолетов гражданской авиации системы ASAS (Aircraft Surveillance Applications System). В соответствии с документами [3,4] система ASAS должна выполнять следующие задачи: обработка данных наблюдения, обеспечение эшелонирования, отображение информации на кабинном индикаторе.

Проблема реализации на борту функций ASAS имеет ряд аспектов: организационный, технический, информационный, алгоритмический. Под первым понимается, прежде всего, решение вопросов организации и последовательности действий участников ВД (диспетчеров управления и экипажей ВС), разделение между участниками обязанностей по обнаружению, принятию и выполнению решений, разделение ответственности. К техническим аспектам относятся: обеспеченность аппаратурой и средствами связи, навигации, обнаружения и слежения, вычислительными средствами, специализированными вычислительными и визуальными средствами поддержки принятия решений. В информационном аспекте рассматриваются вопросы информационного обмена между участниками управления разрешением конфликта: состав и особенности информации, ее точность, частота обмена, адресаты и пр. Под алгоритмическим аспектом понимаются правила, схемы и алгоритмы принятия решений, а также собственно алгоритмы, необходимые для поддержки принятия решений, реализуемые как автоматические или автоматизированные процедуры в вычислительных средствах участников ВД (наземных и бортовых).

1.2 Основные принципы построения перспективной системы ОрВД

Появление и внедрение новых перспективных технологий позволяет изменить принципы организации управления воздушным движением. В качестве одного из наиболее существенных изменений может рассматриваться передача большей части функций по организации полетов воздушных судов непосредственно экипажам ВС. Это относится, в том числе, и к решению задачи обнаружения и разрешения конфликтов (опасных сближений) в воздухе.

В зависимости от принятой концепции и степени оборудованности участников управления разрешением конфликтами возможны следующие схемы:

- Полностью централизованная схема разрешения, когда и обнаружение, и решение задачи разрешения конфликта, и принятие решения о разрешении, и выработка и передача команд уклонения выполняются диспетчером на Земле с помощью поддерживающих его работу средств. Экипаж обязан безусловно выполнять команды диспетчера.
- Не полностью централизованная схема. Оборудованные средствами обнаружения ВС на борту решают задачу уклонения, и сообщают свои предложения диспетчеру. Диспетчер при централизованном решении задачи разделения в воздухе может учитывать эти предложения. После решения задачи диспетчер передает команды разрешения конфликта всем ВС, как оборудованным, так и не оборудованным. Оборудованные ВС отрабатывают команды диспетчера независимо от того, изменил или нет диспетчер предложения этого ВС. (Разновидность этой схемы – ВС передают диспетчеру свои предпочтения по направлению движения, которые диспетчер учитывает при решении).
- Полностью децентрализованная схема разрешения, когда и обнаружение, и решение задачи разрешения конфликта (формирование маневра уклонения), и принятие решения производятся на борту ВС экипажем с помощью поддерживающих бортовых средств. За диспетчером УВД остается только контроль и возможность вмешательства в процесс разделения ВС в воздухе в критических ситуациях.
- Смешанная схема, когда часть ВС (полностью оборудованных для самостоятельного разрешения конфликта) разрешают свои конфликты сами, а за другие ВС (необорудованные или оборудованные недостаточно) решение принимает диспетчер.

При любой схеме управления за диспетчером остается контроль за ситуацией в воздушном пространстве и возможность вмешаться (навязать свои команды управления) в процесс разрешения конфликта.

Рассмотренные схемы разрешения конфликтов различаются, прежде всего, распределением ответственности и выполняемых операций между диспетчерскими службами и экипажами и доступной этим операторам информации. Основные особенности каждой схемы, ее преимущества и недостатки приведены на рисунке 1.

1.3 Место функции обнаружения и предотвращения опасных сближений в составе системы ОрВД. Нормативная база для ее создания и функционирования

Бортовая система обеспечения эшелонирования может способствовать выполнению ряда функций по управлению конфликтными ситуациями и синхронизации движения в рамках эксплуатационной концепции ОрВД.

По определению группы экспертов по системам наблюдения и разрешения конфликтных ситуаций (SCRSP Surveillance and Conflict Resolution Systems Panel) "ASAS представляет собой систему ВС, основанную на использовании функции наблюдения в полете, которая оказывает помощь летному экипажу в обеспечении эшелонирования их воздушного судна по отношению к другим ВС. Под видами применения ASAS предусматривается набор эксплуатационных процедур, предназначенных для диспетчеров УВД и летных экипажей, который использует бортовую систему обеспечения эшелонирования в целях достижения поставленной эксплуатационной цели" [5].

Система ASAS вычисляет и отображает результаты приложений функции наблюдения ASA (Aircraft Surveillance Applications), архитектура которой представлена на рисунке 2 [3]. В состав типичной конфигурации системы ASAS коммерческого транспортного ВС будут входить система обработки данных наблюдения и обеспечения эшелонирования, кабинный индикатор информации о воздушном движении, система оповещения и панель управления. Работа функции обработки информации заключается в выполнении расчетов, данных о прогнозируемых линиях пути ВС, о прогнозируемых опасных сближениях, о возможных и рекомендуемых маневрах ВС для уклонения от опасных сближений, а также других расчетов, которые необходимы для конкретных видов применения. Система обработки информации должна обеспечивать выдачу данных о линиях пути других ВС, отображение информации об этих линиях пути на кабинном индикаторе, а также данных, предупреждающих об опасных сближениях и предлагаемых способах их предупреждения.

Централизованная стратегия

1. Управление в РЦ
2. Макроуровень решения. Совместное решение задач предотвращения всех конфликтов в обслуживаемом ВП
3. Обеспечение устойчивости системы на уровне организации управления: предотвращение “эффекта домино”.
4. Формирование команды управления в форме программных траекторий.
5. Пониженные требования к частоте обновления информации и передаче команд.
6. Максимальная загрузка диспетчера.
7. Ограниченные возможности учета предпочтений пользователя.
8. Ограниченные возможности увеличения интенсивности потока ограничения по:
 - ограничения по загрузке диспетчера
 - ограничения по траекториям уклонения

Смешанная стратегия

1. Позволяет снизить загрузку диспетчера
2. Обеспечивает плавный переход от централизованной к децентрализованной схеме
3. Требуется дополнительное информационное взаимодействие между “бортом” и диспетчером
4. Предпосылки для смены устойчивости системы в целом

Децентрализованная стратегия

1. Управление на борту ВС
2. Распределенность мест решения задачи
3. Предпосылки для снижения устойчивости системы, возможность возникновения “эффекта домино”
4. Формирование динамически изменяемой команды управления и произвольных траекторий управления
5. Высокие требования к частоте обновления и точности информации
6. Минимальная загрузка диспетчеров РЦ
7. Возможность учета предпочтений пользователя
8. Повышенные возможности увеличения интенсивности полетов
9. Ограниченные возможности согласования управления отдельными ВС

Рисунок 1. Стратегии разрешения конфликтов (концепция свободных полетов)

Система CDTI (Cockpit Display Traffic Information) будет выполнять функцию интерфейса между системой обработки данных и летным экипажем [5].

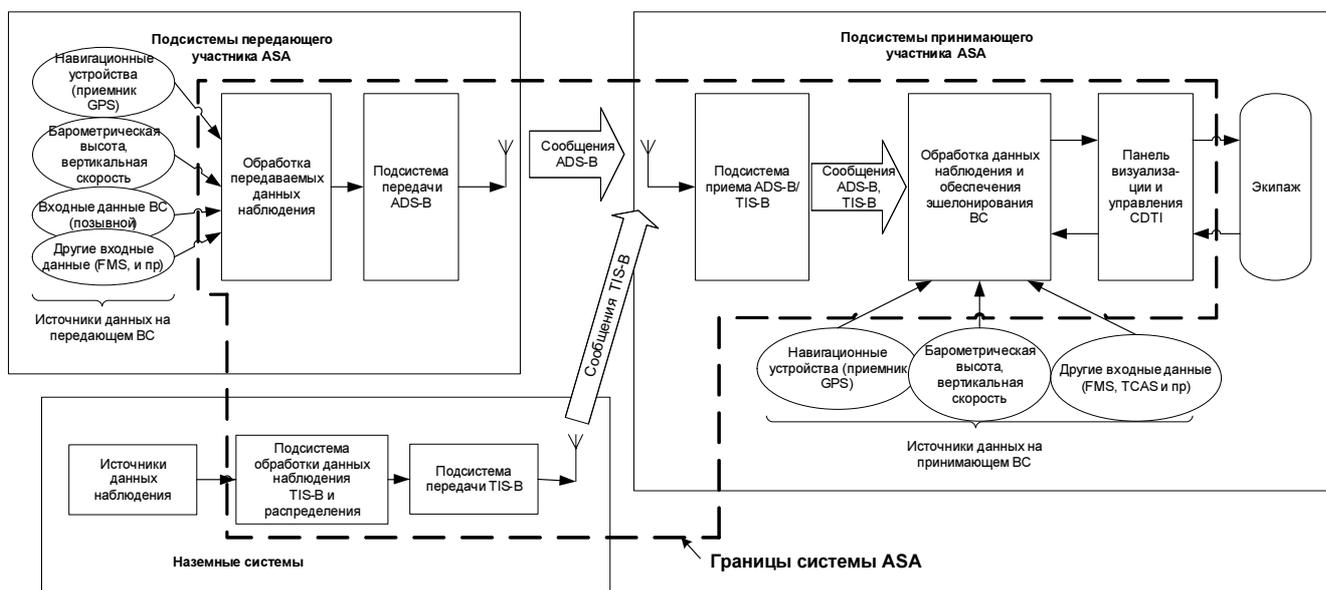


Рисунок 2. Рисунок архитектуры системы ASA

Система ASAS использует данные как о состоянии своего ВС, так и об окружающих ВС. Информация о собственном ВС имеется на борту в полном объеме: навигационная, пилотажная, информация о плане полета. Данные по окружающим ВС поступают на борт либо от наземной системы наблюдения по линиям передачи данных от наземных служб по каналу TIS-B (Traffic Information Service Broadcast), либо непосредственно от самих участников ВД по линии (АЗН-В).

В DO-289[3] приводится список возможных приложений бортовой функции наблюдения.

Среди этих приложений фигурируют приложения обнаружение конфликта (Conflict Detection (CD)), и бортовая система управления конфликтами (Airborne Conflict Management (ACM)). Система управления конфликтами включает в себя обнаружение конфликтов, наблюдение за потенциально возможными конфликтами и выдачу рекомендаций для предотвращения нарушений норм эшелонирования со всеми окружающими ВС. Ранее концепция этой системы обозначалась CD&R (Conflict Detection and Resolution). На трассовой части полета основой для работы этой системы являются два алгоритма обеспечения эшелонирования ВС: *алгоритм обнаружения (прогнозирования) конфликта* и *алгоритм разрешения конфликта*, которые являются темой диссертационной работы.

Общие требования применения бортовой системы управления конфликтами изложены в стандарте RTCA DO-263 [6]. Документом RTCA DO-317 [4] определена система ASAS (Airborne Surveillance Application System – Бортовые Приложения Функции Наблюдения), базирующаяся на алгоритмах обработки принятых сообщений ADS-B, TIS-B.

1.4 Анализ состояния разработки и внедрения в мире

В соответствии с глобальным аэронавигационным планом ИКАО определены модули блочной модернизации авиационной системы, связанные с эшелонированием в полете. Представлены 4 блока модернизации:

В рамках *блока 0* обеспечение функциональных возможностей наблюдения с помощью наземных средств может быть достигнуто с меньшими затратами за счет использования таких средств, как системы ADS-B и MLAT. Оборудование в кабине летного экипажа, поддерживающее ADS-B IN, будет отображать на дисплее окружающие воздушные суда, оснащенные системами ADS-B OUT, оказывая помощь летным экипажам в получении визуальной информации об интересующих их воздушных судах. В этом случае УВД может делегировать некоторые функции обеспечения эшелонирования летным экипажам, использующим метод визуального эшелонирования, чтобы, например, оптимизировать очередность захода на посадку. Применение ИТР с ADS-B позволяет воздушным судам набирать высоту или снижаться с пересечением эшелона полета других воздушных судов, когда требования диспетчеров УВД о процедурном эшелонировании не могут быть выполнены.

В рамках *блока 1* вводятся усовершенствованные функции бортового оборудования, которые вместе с системой связи "диспетчер – пилот" по линии передачи данных (CPDLC) позволяют внедрить новые процедуры, когда летный экипаж использует бортовое оборудование, чтобы установить и поддерживать заданный временной интервал или заданную дистанцию от наблюдаемого воздушного судна, что называется термином "управление интервалом". Вместо применения метода контроля скорости и/или радиолокационных пеленгов авиадиспетчер сохраняет за собой ответственность за эшелонирование, но использует метод управления интервалами для обеспечения более эффективного контроля за разделением воздушных судов и потоком воздушного движения.

В пределах временных рамок *блока 2* предусматривается использование кооперативного эшелонирования, совместно обеспечиваемого УВД и воздушными судами. В соответствии с указаниями диспетчеров управления воздушным движением летные экипажи берут на себя

делегируемую им ответственность за эшелонирование по отношению к ближайшим воздушным судам, указанным авиадиспетчером, чтобы освободить его от обязанностей обеспечивать интервал эшелонирования между этими воздушными судами. За диспетчерами УВД сохраняется ответственность за эшелонирование всех окружающих воздушных судов, которые не оговорены в диспетчерском разрешении на кооперативное эшелонирование. Действия в отношении пар воздушных судов, использующих процедуры продольного эшелонирования при полете по одному маршруту и/или процедуры продольного эшелонирования при схождении маршрутов, будут включать первоначальные виды применения кооперативного эшелонирования.

Усилия в рамках блока 3 направлены на применение системы самоэшелонирования в полете, согласно которому летные экипажи, используя усовершенствованные бортовые системы, несут полную ответственность за эшелонирование своих воздушных судов по отношению ко всем окружающим воздушным судам. Ожидается, что применение эшелонирования в полете на раннем этапе будет осуществляться в воздушном пространстве с низкой плотностью воздушного движения и с использованием средств обеспечения ситуационной осведомленности о воздушном движении и линий передачи данных. При возможности получения дополнительных преимуществ процедуры будут эволюционировать от методов IM, предусматривающих участие авиадиспетчеров и летных экипажей, через систему эшелонирования в полете, затем делегирование обязанностей по эшелонированию и, наконец, к самоэшелонированию под ответственностью летных экипажей.

Внедрение самоэшелонирования (SSEP) выносится за горизонт блока 3 (2028). Такое внедрение требует существенной переработки сложившейся, устоявшейся и глубоко консервативной структуры ОрВД. Требуется изменение подходов к организации воздушного пространства, организации воздушного движения, системе управления воздушным движением, квалификации и переквалификации персонала и пилотов.

Эти эксплуатационные усовершенствования в значительной степени зависят от технической поддержки. Наблюдение с помощью наземных средств может эволюционировать в систему ADS-B OUT и/или технологию MLAT. Для совместного использования информации о траекториях требуются автоматизированные системы ОрВД. В том, что касается бортовых систем, ключевыми компонентами являются первоначально системы ADS-B OUT, затем функциональные возможности ADS-B IN при поддержке CPDLC. Точность и полнота информации при использовании версий 2 и 3 ADS-B будут стимулировать развитие процедур

управления интервалами эшелонирования. Системы в кабине летного экипажа должны обеспечивать достаточные функциональные возможности, позволяющие летному экипажу брать на себя все бóльшие объемы делегируемой авиадиспетчером ответственности за эшелонирование.

1.5 Выводы

1. Внедрение нового поколения систем связи, навигации и наблюдения обеспечивает технические возможности для модернизации системы ОрВД.
2. Существенным изменением системы ОрВД является передача функций по организации полетов воздушных судов непосредственно экипажам ВС. Это относится и к решению задачи обнаружения и разрешения конфликтов (опасных сближений) в воздухе.
3. Функция обнаружения и предотвращения опасных сближений является применением бортовой функции наблюдения. Система управления конфликтами включает в себя обнаружение конфликтов, наблюдение за потенциально возможными конфликтами и выдачу рекомендаций для предотвращения нарушений норм эшелонирования со всеми окружающими ВС.
4. Внедрение самоэшелонирования в глобальном аэронавигационном плане ИКАО выносится за горизонт блока 3 (после 2028 года).

Глава 2. Постановка задачи обнаружения и предотвращения опасных сближений

2.1 Информационное обеспечение функции самоэшелонирования

Имеющееся в настоящее время техническое оборудование систем управления воздушного движения определяет принципы и особенности современной организации УВД. Современные системы УВД основаны на использовании следующих технических средств связи, навигации и наблюдения:

Средства радиотелефонной связи и передачи данных по линии «земля-воздух». Организация взаимодействия между экипажами ВС и наземными службами реализована с использованием радиотелефонной связи в УКВ диапазоне. Управление в отдельном трассовом секторе реализуется на специально отведенной сектору УКВ частоте. Поскольку УКВ связь обеспечивается в пределах прямой видимости, используются удаленные радиостанции (удаленные пункты связи – УПС), передающие по земле информацию по выделенным речевым каналам (арендуемым или специальным).

Средства навигации и посадки. Основой традиционной трассовой навигации является всенаправленная УКВ система VOR. Система состоит из сети стратегически размещенных наземных УКВ-передатчиков и обеспечивает направленное излучение сигналов. Это позволяет осуществлять самолетодвижение при переходе от одного радиомаяка системы к другому. Недостатки: необходимость прямой видимости, наличие пересечений трасс в месте установки маяка, непрямолинейный (зигзагообразный) полет при выполнении рейса. Альтернатива появилась только при вводе в эксплуатацию Глобальной спутниковой системы навигации.

Средства радиолокационного контроля. Контроль за выполнением полетов по воздушным трассам осуществляется с помощью обзорных трассовых радиолокаторов и вторичных РЛС. Для увеличения производительности системы с вторичными радиолокаторами, для повышения точности измерения реализуется S-режим, основывающийся на использовании дискретных (индивидуальных) кодов самолета. Это позволяет обеспечить:

- адресную работу с воздушными судами,
- плавный переход от существующей системы к перспективной,
- высокую точность определения координат самолета (70 м по дальности, 0.02 град. по азимуту),

-основу для организации цифровой связи, в том числе и между самолетами.

Система вторичной радиолокации с режимом S представляет собой объединенную систему обзорной РЛС с активным ответом и линии передачи данных по каналу «земля – воздух – земля» с использованием адресного селективного запроса самолетов. Эта объединенная система позволяет производить обнаружение самолетов и передачу необходимой информации для эффективного управления в зонах с высокой плотностью ВД. Решение задач режима S возможно и с использованием общего канала активного запроса в рамках существующих средств ВРЛ, путем их модернизации. При этом решается проблема синхронного наложения и искажения ответных сигналов, особенно при близком расположении ВС. Использование режима S обеспечивает принципиально новые возможности при организации управления ВД.

Концепция и принципы организации и управления воздушным движением, основанные на указанной технической основе систем УВД имеют серьезные ограничения, которые связаны со следующими недостатками технического обеспечения:

- ограниченная точность оценивания параметров движения,
- ограниченный темп обмена информации,
- зависимость от площади покрытия радиолокационного поля.

В свою очередь это приводит к следующим операционным недостаткам существующей системы УВД:

- неравномерное использование воздушного пространства,
- вынужденные ограничения на выбор не только траектории полета, но и вертикального профиля,
- повышенные требования к разделению ВС в воздухе,
- повышенная загрузка диспетчеров управления,
- невозможность оперативных изменений выполняемого маршрута в ответ на изменение условий выполнения полета.

Как следствие этих особенностей и недостатков, современная система УВД практически достигла своих предельных возможностей по интенсивности ВД и пропускной способности воздушного пространства. Возможности увеличения интенсивности ВД и повышения безопасности полетов практически исчерпаны. Дальнейшее увеличение интенсивности полетов

приведет к снижению эффективности управления: появлению больших задержек в вылете, а также собственно полетных времен (резком увеличении числа кругов ожидания). Кроме того, современная система УВД в силу значительных ограничений в использовании ВП, не позволяет в достаточной степени обеспечивать пользователям собственные предпочтения, оптимизировать режимы и траектории полета.

2.1.1 Техническое оснащение перспективных систем УВД в соответствии с концепцией CNS/ATM

Внедрение технологий CNS/ATM и повышение качества обмена информацией позволит реализовать принципиально новые процедуры организации взаимодействия пилотов и диспетчеров. В перспективе кардинально изменятся стратегии, определяющие, когда именно диспетчер должен предоставить свободу выполнения полета экипажам ВС и когда взять инициативу по управлению ВД в свои руки.

Обеспечение условий безопасности полетов при сокращенных нормах эшелонирования будет достигнуто путем значительного повышения точности навигационных систем, внедрения усовершенствованных бортовых и наземных автоматизированных средств управления ВД на базе технологий CNS/ATM, использования новых принципов организации ВД и правил выполнения полетов.

Техническое оснащение включает технические средства оснащения «борта», диспетчерских пунктов и наземной инфраструктуры системы УВД в целом средствами наблюдения, навигации и связи.

2.1.1.1 Системы связи

В рамках анализа перспектив внедрения концепций CNS/ATM и «Свободный полет» технические системы связи рассматриваются и исследуются в следующих программах:

- «Линия передачи данных диспетчер/пилот» (CPDLC);
- «Система связи следующего поколения» (NEXCOM);
- «Широковещательное Автоматическое Зависимое Наблюдение» (ADS-B).

Исследования при выполнении этих программ показали необходимость усовершенствования и разработки бортового оборудования, в том числе оборудования технологии связи борт/земля и борт/борт для комплексов авионики современных магистральных самолетов с целью повышения безопасного и эффективного их применения в

воздушном пространстве с организацией управления воздушным движением, соответствующей этим концепциям.

Эти требования сводятся к необходимости оснащения комплексов авионики современных самолетов в той или иной комплектации новым бортовым оборудованием из числа:

1) Цифровые линии передачи речи и данных:

- линии передачи данных системы ACARS;
- ОБЧ линия передачи речи и данных режимов 2 и 3 (VDLM2, VDLM3);
- ВЧ линия передачи данных;
- линии передачи данных спутниковой системы SATCOM,
- линии передачи данных диспетчер/пилот CPDLC,
- линии передачи данных системы ATN,
- линии передачи данных приемопередатчика универсального доступа (UAT),
- линия передачи данных режима S (VDLMS),
- ОБЧ линия передачи данных режима 4 (VDLM4) для приложений ADS-B.

2) Аппаратура интеграции и взаимодействия различных линий передачи речи и данных, представляемых системой ACARS, авионикой пакета FANS-1/A, системой ATN, удовлетворяющих требованиям SARPS ICAO.

3) Бортовые системы связи:

-многорежимные приемопередатчики ОБЧ (VDL) линий передачи данных (режимы 2, 3, 4),

-блоки управления связью с добавлением VDL режимов 2 и 3, реализованных со стандартами SARPS ICAO,

-спутниковая система связи SATCOM.

Такие комплектации бортового оборудования продемонстрировали достижимость характеристик, определяющих возможность организации управления полетом ВС в рамках концепции CNS/ATM:

- темп передачи посылок 0.5 до 10 сек на одно сообщение.
- длина сообщения от 112 до 372 бит.

- дальность связи в режиме борт/борт – от 40 до 125 м.миль.
- дальность связи в режиме борт/земля не менее 150 м.миль.

2.1.1.2 Системы навигации

Необходимым условием обеспечения безопасности полетов при сокращенных нормах эшелонирования является соответствующее повышение требований к навигационным характеристикам. В частности, организацией Eurocontrol в конце 90-х г.г. принят обязательный для всех ВС, эксплуатируемых в европейском ВП, стандарт точности навигации (базовой зональной навигации, B-RNAV), соответствующий 5 nm.

Комитет по будущим аэронавигационным системам (FANS) разработал концепцию «навигации, основанной на характеристиках» PBN (Performance-based Navigation). Показателем точности навигации, реализуемой при применении концепции PBN, является уровень требуемых навигационных характеристик (RNP - Required Navigation Performance).

Суть «навигации, основанной на характеристиках» заключается в следующем: «RNP определяет характеристики навигации в пределах некоторого района воздушного пространства и, поэтому, влияет как на воздушное пространство, так и на воздушное судно. RNP предназначены характеризовать воздушное пространство с помощью показателя точности выдерживания навигационных характеристик (типа RNP), которая должна обеспечиваться в пределах этого воздушного пространства. Тип RNP основывается на значении точности выдерживания навигационных характеристик, которое, как ожидается, будет обеспечиваться в течение, по крайней мере, 95% времени всеми типами воздушных судов, выполняющими полеты в пределах этого воздушного пространства».

Расширение возможностей децентрализованного управления, включая децентрализованное разрешение конфликтов, многократно повышает даже эти ужесточенные требования.

Совершенно очевидно, что в перспективной системе УВД в интересах навигации и наблюдения будет широко использоваться глобальная навигационная спутниковая система. Ее применение обеспечивает значительное повышение точность и частоту измерений координат ВС, по сравнению с существующими навигационными средствами (бортовыми навигационными системами, средствами радионавигации).

С учетом этого бортовое оборудование ВС должно обеспечивать возможность использования при навигации данных глобальной спутниковой навигационной системы

(GNSS), а также высокоточных бортовых и наземных радионавигационных датчиков с увеличенной помехозащищенностью:

- всенаправленных радиомаяков УКВ диапазона (VOR);
- оборудования для измерения дальности (DME) с быстрой перестройкой частот;
- инструментальных систем посадки (ILS);
- систем посадки сантиметрового диапазона (MLS);

2.1.1.3 Системы наблюдения

Возложение в современной системе УВД обязанностей по непосредственному управлению воздушным движением (в том числе, для предотвращения опасных сближений) на диспетчера связано с тем, что только он обладает объективной и динамически изменяющейся целостной информацией о воздушной обстановке. В то же время непосредственно на борту ВС информация о параметрах собственного движения имеется. Кроме того, при наличии на борту инерциальной навигационной системы, корректируемой с помощью приемника глобальной позиционной системы, точность определения параметров движения ВС гораздо выше точности информации диспетчера, обеспечиваемой наземными радиолокационными средствами. Для того чтобы эти данные стали доступны и другим участникам системы управления воздушным движением, предназначены системы автоматического зависимого наблюдения.

Концепция автоматического зависимого наблюдения заключается в следующем [7]: информация о местоположении ВС, вырабатываемая его бортовой навигационной системой, по цифровому каналу связи передается для использования системой слежения и управления. По этому же каналу связи (например, по каналу спутниковой связи), может быть обеспечена прямая связь между диспетчером и пилотом. Даже на первых этапах развития систем зависимого наблюдения обеспечивается обновление информации с частотой 0.1 Гц, что во много раз выше возможностей современной системы.

Таким образом, такая концепция АЗН является системой связи, навигации и наблюдения, основанной на спутниковых технологиях.

Информационный обмен такой системы включает команды диспетчера, ответы (запросы) пилота, сообщения собственно АЗН, сообщения о полетной и метеорологической информации. Передаваемые с борта сообщения могут быть трех типов:

1. Основное сообщение передается автоматически широта/долгота (с разрешающей способностью 0.8 угл. сек.), высота (2.4 м). Интервал обновления этих сообщений – 10 сек и менее (до 0.5 – 1.0 сек).

2. Расширенное сообщение выдается по запросу и содержит информацию о дальнейшем ходе полета ВС в соответствии с решением, принятым пилотом. Содержит следующую информацию: следующая контрольная точка маршрута, высота в следующей контрольной точке (2.4 м), первая контрольная точка за следующей, высота в этой точке, курс (0.1 град), инструментальная воздушная скорость/число М (0.5 узла/0.001), вертикальная скорость (0.08 м/сек).

3. Вспомогательное сообщение содержит информацию о скорости ветра и температуре за бортом (величина ветра (2 км/час), направлении ветра (0.7 град), температуре (0.25 град. С). Эти данные передаются только по запросу и необходимы для вычисления путевой скорости этого ВС, а также для сбора и уточнения общей модели реальной метеорологической обстановки.

Сравнение АЗН и радиолокационного наблюдения показывает следующее. АЗН может рассматриваться как перспективная альтернатива радиолокационному наблюдению. Иногда данные АЗН так и называют “псевдорadiолокационными данными”. Вектор наблюдаемых параметров АЗН – это координаты ВС в географической системе координат, в то время как РЛС выдает координаты ВС в полярной системе координат (дальность, азимут).

Преимуществом радиолокационного наблюдения является его независимость (от работы спутниковой навигационной системы, работы бортовых средств навигации и наблюдения). Перекрытием радиолокационных полей радиолокаторов обеспечивается возможность комплексирования (следовательно, повышение точности наблюдения) и дублирования (следовательно, повышение надежности системы).

Несомненными преимуществами АЗН являются:

- возможность совершенствования системы УВД путем автоматизации ее процессов за счет CNS.
- возможность наблюдения и управления даже вне видимости радиолокаторов,
- возможность упреждающего управления на глубину прогноза.

2.1.1.4 Бортовое оборудование

В ближайшие годы планируется полностью завершить внедрение линий цифровой связи, позволяющих увеличить темп и объем передачи информации и обрабатывать ее в наземных и бортовых вычислительных комплексах (голосовая радиосвязь останется для запросов на выполнение операций и подтверждения получения команд, передачи дополнительной информации, советов и предупреждений). Пилоты ВС и диспетчеры УВД в перспективе получат усовершенствованные измерительные, вычислительные и визуальные (дисплейные) средства поддержки принятия решений.

Полное оборудование будет включать:

- линию цифровой связи “воздух-земля”;
- бортовой погодный радар (или доступ к информации наземных метеослужб);
- бортовой дисплей информации о ВД (CDTI);
- средства информации о параметрах движения соседних ВС (в т.ч. автоматического зависимого наблюдения (ADS));
- аппаратуру обнаружения и предупреждения конфликтов (TCAS, CD&R);
- вычислительные средства расчета предпочтительных параметров 4-D траектории полета и маневров уклонения;
- бортовые системы интеллектуальной поддержки принятия решений (DST).

При внедрении перспективных линий передач данных (CPDLC) может быть обеспечено сокращение времени переговоров до 1,5 – 5 мин по сравнению с продолжительностью речевой связи в 16 мин.

Оснащение перспективными бортовыми погодными радарными (в т.ч. метеорадиолокатором FLW WXR, грозоотметчиком (SWMS)) позволяет определять опасные сдвиги ветра впереди ВС и обнаруживать грозовые очаги на маршруте полета. Дальность действия систем SWMS - до 200 м.миль в секторах обзора 120 ° и 360 ° в вертикальной и горизонтальной плоскостях соответственно, частота отображения на экране бортового дисплея информации о грозовых разрядах 0,5 – 2 мин.

При оборудовании ВС аппаратурой TCAS глубина прогноза составляет 2 мин, аппаратурой ADS-B - 10 мин. Интервал передачи данных ADS-B - 12 сек, дальность связи – 120 м.мили.

2.2 Техническая постановка задачи. Особенности применения функции в различных вариантах применения

2.2.1 Принципы и правила обеспечения безопасности полетов в современной системе УВД

Правила обеспечения безопасности полетов в современной системе УВД ориентированы на трассовые полеты и полностью централизованное управление и основаны на правилах эшелонирования. В соответствии с Федеральными правилами при выполнении полетов (прежде всего при выполнении полетов по приборам – ППП) и управлении воздушным движением его участники (экипажи ВС и диспетчеры) должны обеспечивать выполнение правил, обеспечивающих пространственное разделение потоков ВС. Это разделение достигается введением норм вертикального, продольного и бокового эшелонирования.

Современные правила полетов в части обеспечения безопасности полетов имеют следующие принципиальные особенности с точки зрения организации управления разрешением конфликтов:

1. Для максимального упрощения управления и обеспечения безопасности вводится целый ряд ограничений на использование ВП в процессе выполнения полетов, главные из которых следующие:

- эшелонирование высот полета;
- требование выхода на трассу, схода с нее и пролета точек пересечения с другими трассами в горизонтальном направлении;
- требование разрешения на смену высоты, которая дается диспетчером только в безопасных случаях.

2. Благодаря такой структуризации и регламентирования трассового воздушного движения все варианты конфликтных ситуаций на трассовой части ВД сводятся (ограничиваются) по существу к следующим двум «штатным» случаям:

- обгон при полете по одной трассе на одном эшелоне;
- конфликт при пролете двух ВС по двум пересекающимся трассам на одной высоте.

Однако в правилах предусматривается и потенциальная возможность других конфликтов (при невыполнении в полном объеме регламентирующих правил), в частности следующих:

- встречный полет на одном эшелоне,
- обгон не только при горизонтальном полете, но и наборе высоты или снижении.

3. Для выявления конфликтной ситуации используются показатели пространственного и временного эшелонирования: вертикального, продольного, бокового, причем для различных вариантов конфликтов могут использоваться разные показатели.

4. Диспетчер должен выполнять большой объем работ, в частности:

- контролировать выполнение ВС заявленного плана полета,
- контролировать выполнение ВС правил вертикального эшелонирования,
- контролировать воздушную обстановку, оценивать возможность разрешения ВС на смену эшелона, выхода на трассу, схода с трассы и давать такое разрешение,
- выявлять возможность опасных сближений, выработать решения по их предотвращению и вмешиваться в управление (управлять разрешением конфликта).

5. При разрешении конфликта в качестве основной меры рассматривается вертикальное маневрирование со сменой высоты полета, в качестве вспомогательной меры – боковое уклонение. При этом должно быть обеспечено разделение, по высоте соответствующее нормам эшелонирования (300 - 500 м), а боковое эшелонирование – порядка 20 – 30 км.

2.2.2 Особенности геометрии опасных сближений при реализации концепции «свободного полета»

Существенным отличием концепций CNS/ATM и «Свободного полета» от традиционной концепции, ориентированной на трассовые полеты, с точки зрения геометрии и видов конфликтов является появление:

- конфликтов при пересечении под произвольными углами траекторий полета (от попутных до встречных) и при любом высотном режиме как одного, так и другого ВС (горизонтальный полет, набор высоты, снижение);
- возможности параллельного (практически параллельного) полета пары ВС на сколь угодно малом боковом разделении.

Особенности децентрализованного управления сводятся к следующему. Концепция децентрализованного управления базируется на следующей гипотезе. Предполагается, что все множество воздушных судов, находящихся в воздухе, можно разбить на подмножества – кластеры – таким образом, что ВС, находящиеся внутри кластера, связаны задачей разрешения конфликта, а находящиеся в разных кластерах никак не влияют друг на друга. ВС, находящиеся внутри кластера, путем переговоров выбирают оптимальные с точки зрения их собственных предпочтений и компромиссные с точки зрения кластера маневры уклонения. Для определения кластера используются понятия защитной зоны, которые строятся вокруг ВС.

Защитная зона – это цилиндрическая область ВП вокруг ВС (см. рис. 3), определяемая радиусом R_{safe} и высотой $2H_{safe}$. Центр масс ВС находится в центре цилиндра. Нарушение границы этой зоны защитной зоной другого ВС квалифицируется как возникновение конфликта. Размеры защитной зоны на крейсерском этапе полета, рекомендованные ИКАО [2], составляют: радиус защитной зоны $R_{safe} = 9$ км и высота $H_{safe} = 600$ м.

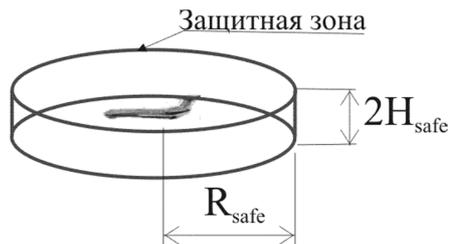


Рисунок 3. Иллюстрация защитной зоны

Возможны три типа маневров уклонения: вертикальный, горизонтальный и маневр скоростью. Маневр скоростью в силу его малой эффективности, как правило, не принимается во внимание. Вертикальный маневр используется в качестве тактического средства, а горизонтальный – стратегического.

При выполнении маневра уклонения ВС может войти в сигнальную зону третьего ВС, связь и конфликт с которым появились только в результате маневра, и создать новую конфликтную ситуацию. Этот эффект носит название “эффект домино” и может отрицательно сказаться на характере выполнения воздушного движения.

Анализ как особенностей геометрии конфликтов, так и возможностей по управлению, предоставляемых технологиями CNS/ATM, показывает следующие принципиальные преимущества и возможности, предоставляемые перспективной системой УВД:

- возможность реализации децентрализованного управления разрешением конфликтов;

- универсальный подход к управлению разрешением конфликта;
- значительное снижение суммарной загрузки диспетчера, за счет:
- гораздо меньшей необходимости контроля за соблюдением правил выдерживания вертикального профиля полета;
- отсутствия необходимости выявления различных вариантов конфликтов (унификация);
- уменьшение числа случаев, которые надо рассматривать (за счет снижения норм разделения).

Введение понятия кластеров позволяет провести декомпозицию большой общей задачи управления воздушным движением и свести ее к решению множества небольших задач с использованием в основном бортовых средств.

Однако в условиях повышенной сложности и плотности воздушного движения децентрализованная концепция может стать неэффективной вследствие вынужденных частых изменений траекторий. Тем самым эффективность этой концепции из-за возможной дестабилизации воздушного потока (появления “эффекта домино”) не может считаться безусловной и требует серьезного исследования.

Конфликты, которые возникают в современной централизованной системе УВД, представляют собой в абсолютном большинстве случаев простые конфликты двух ВС. Это обусловлено структурированными условиями эксплуатации воздушных трасс и эшелонов полета и скоординированными действиями наземных диспетчеров. Такая “дуэльная” задача разрешения конфликтов для двух ВС хорошо изучена с математической (алгоритмической) стороны.

Централизованная стратегия разрешения конфликтов базируется на наличии полной информации о ситуации с групповым конфликтом и благодаря этому обеспечивает в таких сложных задачах с несколькими ВС глобальное решение (на уровне системы) на основе анализа взаимных влияний между всеми возникающими конфликтами. Децентрализованная же стратегия позволяет получить только локальное решение, где каждое ВС разрешает свои конфликты наилучшим способом для своей собственной ситуации.

Однако в условиях реализации концепции «Free Flight» из-за взаимодействия (пересечения) произвольных траекторий, возникающих при распределенном и свободном принятии решений (на борту ВС) различными пользователями, могут возникать более сложные конфликты. В один такой групповой конфликт может быть вовлечено более двух ВС, а

разрешение дуэльного конфликта между одной парой может привести к новому дуэльному конфликту между одним из этих ВС и третьим ВС.

Указанные обстоятельства приводят к необходимости разработки эффективных алгоритмов, работающих в указанных специфических условиях. Совершенно необходимо также провести всесторонние исследования этих алгоритмов, подтверждающих их работоспособность и эффективность в любых возможных условиях. Единственным вариантом проведения таких исследований может рассматриваться имитационное моделирование.

2.2.3 Обеспечение технических возможностей для децентрализованного управления обнаружением и предотвращением опасных сближений

Возможность реализации на практике децентрализованной схемы разрешения конфликтов зависит от двух основных обстоятельств:

1) Техническая обеспеченность пилотов всеми необходимыми данными с необходимой точностью и частотой, а также вычислительными возможностями для поддержки принятия решений в реальном времени на борту ВС.

2) Устойчивостью, эффективностью и точностью собственно процедур и алгоритмов управления разрешением конфликтов.

Реализация перспективных технических средств CNS, как отмечено выше, в достаточном объеме обеспечивает «борт» информацией для поиска и принятия решения по предотвращению опасных сближений между ВС. В частности:

- Комплексование бортовой инерциальной навигационной системы и приемников глобальной навигационной системы обеспечивает данными по координатам (с высокой точностью, определяемой десятками метров) и составляющим вектора скорости ВС (также с высокой точностью – десятые доли м/сек).

- Аппаратура АЗН-В, функционирующая в режиме «борт – борт» обеспечивает данными о координатах и составляющих вектора скорости других ВС, находящихся в окрестности «своего» ВС. Точность определения этих кинематических параметров несколько ниже, чем аналогичных параметров «своего» ВС, что объясняется задержками в передаче и приеме данных. Однако порядок ошибок тот же. Частота поступления информации может быть

обеспечен вполне достаточной - до 1-2 Гц. Радиус окрестности может быть достигнут порядка 150 – 200 км.

- Аппаратура АЗН-В может также обеспечить передачу дополнительной информации о намерениях других ВС, возможно за счет некоторого снижения частоты обмена.

- Цифровые линии связи могут обеспечить периодическую передачу с Земли информации о намерениях других ВС.

Проблема с вычислительными возможностями бортовой вычислительной системы стоит менее остро. В целом при анализе реализуемости конкретных алгоритмов за основу можно исходить из возможностей вычислительных систем современных магистральных самолетов. Если этих характеристик недостаточно, проблема может быть разрешена со сравнительно незначительными экономическими затратами.

Таким образом, технические проблемы организации децентрализованного управления успешно разрешаются. Однако этого недостаточно для принятия решения о переходе на эту схему. Необходимо подтвердить возможность обеспечения эффективности такого управления и возможность обеспечения необходимого уровня безопасности.

2.3 Математическая постановка задачи децентрализованного управления

Бортовая система обеспечения эшелонирования может способствовать выполнению ряда функций по управлению конфликтными ситуациями и синхронизации движения в рамках эксплуатационной концепции ОрВД. На трассовой части полета основой для работы этой системы являются два алгоритма обеспечения эшелонирования ВС: алгоритм обнаружения (прогнозирования) конфликта и алгоритм разрешения конфликта.

Постановка задачи алгоритма обнаружения конфликтов формулируется следующим образом: необходимо выработать предупреждения о том, что в пределах заданной глубины прогнозирования ожидается опасное сближение ВС с другими ВС и опасными областями ВП. Параметры прогнозируемых опасных сближений основываются на информации о текущем векторе состояния и ближайших намерениях ВС. Эти данные предоставляются пилоту для выявления имеющихся конфликтов с другими ВС.

Постановка задачи алгоритма разрешения конфликтов при децентрализованном управлении формулируется следующим образом: необходимо сформировать такой вектор управления $u^*(t)$ своего ВС, при котором соблюдается ненарушение зоны безопасности, а отклонение от плановой траектории было бы минимально на всем интервале управления.

Математическая формализация задачи

Модель объекта

Вектор состояния своего ВС на текущий момент t :

$$S_O = (\lambda_O, \varphi_O, H_O, V_O, \psi_O, V_{hO}),$$

где

λ - широта в геодезической системе координат,

φ - долгота в геодезической системе координат,

H - высота над уровнем моря,

V - горизонтальная составляющая путевой скорости полета,

ψ - курсовой угол вектора скорости,

V_h - вертикальная скорость.

Массив векторов состояния окружающих ВС на текущий момент t . Каждая i -ая строка массива содержит данные по i -му ВС:

$$S_{Si} = (\lambda_{Si}, \varphi_{Si}, H_{Si}, V_{Si}, \psi_{Si}, V_{hSi}).$$

Массив закрытых областей ВП на текущий момент t . Описание каждой области содержит:

$$S_{Mi} = (N_m, T_M, V_m, \psi_m, H_{\min}, H_{\max}),$$

где

N_m - количество точек многоугольника границы,

$T_M = (\lambda_{mi}, \varphi_{mi})$ - текущие координаты каждой точки границы,

V_m - скорость движения области,

ψ_m - курсовой угол движения области,

(H_{\min}, H_{\max}) - диапазон высот.

По этим данным необходимо построить алгоритмы обнаружения потенциального конфликта с зонами опасных метеоявлений.

Модель движения

Маршрут движения своего ВС представлен как двумерный массив данных по плану полета. Каждая i -ая строка массива содержит следующие данные по i -ой опорной точке плана полета:

$$(T_{wpi}, \lambda_{wpi}, \varphi_{wpi}, H_{wpi}, V_{wpi}),$$

где T - плановое время пролета точки.

Уравнения движения ВС:

$$dH/dt = \dot{H}$$

$$dV/dt = \dot{V}$$

$$d\psi/dt = \dot{\psi}$$

$$d\varphi/dt = [V_e \cos\psi + V_w \cos\psi_w]/(R_3 + H),$$

$$d\lambda/dt = [V_e \sin\psi + V_w \sin\psi_w]/[(R_3 + H)\cos\varphi],$$

где φ, λ - широта и долгота текущего положения ВС, V_b – текущая воздушная скорость, V_w – величина ветра, ψ_w – курсовой угол ветра, R_3 – радиус Земли.

Модель измерений

$$S^{изм} = \Phi(S_O, S_{Si}, S_{Mi})$$

Ресурсы управления

$$u(t) = (\psi(t) \quad V(t))^T$$

Критерий

$$J = \left| u(t) - u^{pl}(t) \right| \rightarrow \min_{u(t)},$$

где $u^{pl}(t)$ – вектор управления для выдерживания плановой траектории.

Ограничения

$$d_{crai} \geq R_{safe}, \forall i \in I : t_{crai}(t) < \tau_{acq}, t \in (t_b; t_e),$$

где $d_{cra,i}$ – величина пролета с i -м ВС, R_{safe} – радиус зоны безопасности, $t_{cra,i}$ – время, до наступления пролета с i -м ВС, τ_{acq} – значение времени до наступления пролета, определяющее глубину прогноза, I – множество окружающих ВС в окрестности своего, t_b, t_e – время начала и окончания управления соответственно.

Таким образом, математическая постановка задачи децентрализованного управления отдельным ВС при множественном конфликте: необходимо найти оптимальное управление $u^*(t)$ из условия:

$$u^*(t) = \arg \min_{u(t)} \left\{ \left\| u(t) - u^{Pl}(t) \right\| \mid d_{cra,i} \geq R_{safe}, \forall i \in I : t_{cra,i}(t) < \tau_{acq}, t \in (t_b; t_e) \right\}.$$

Результатом работы алгоритма разрешения конфликта являются две рекомендации (т.е. вектор управления ВС) по направлению полета (рекомендуемые значения угла курса ψ^*) и по скорости полета (рекомендуемые значения продольной воздушной скорости V^*). Далее эти результаты должны отображаться на бортовом дисплее пилота СДП в качестве рекомендаций по управлению ВС для предотвращения опасных ситуаций.

2.4 Выводы

1. Разрабатываемые и внедряемые системы связи, навигации и наблюдения обеспечат техническую возможность организации децентрализованного управления с выработкой команд на борту воздушного судна. Реализуемые технические характеристики данных о воздушном движении на борту ВС по объему, частоте обновления и точности достаточны для эффективного использования разработанных алгоритмов децентрализованного управления.
2. На основе принципов обеспечения безопасности в перспективной концепции ОрВД дано определение конфликтной ситуации и зоны безопасности ВС.
3. Сформулированы техническая и математическая постановка задачи обеспечения безопасности полета в воздухе при переходе к децентрализованной концепции управления.

Глава 3. Синтез алгоритмов обнаружения и предотвращения опасных сближений

3.1. Анализ состояния вопроса. Обзор работ по методам и алгоритмам

3.1.1 Обзор алгоритмов обнаружения конфликтов

Цель алгоритмов обнаружения заключается в выявлении возможного конфликта, связанного с нарушением норм эшелонирования на заданной глубине прогнозирования. При этом необходимо иметь в виду неопределенность (погрешности) модели прогнозируемого движения ВС, которые связаны с двумя главными обстоятельствами:

- погрешности в определении текущего состояния ВС (ошибки измерения);
- неопределенность в модели поведения ВС на прогнозируемом интервале времени.

В соответствии с [9] принято рассматривать три модели прогнозирования траектории ВС, на основе которых формируются методы и алгоритмы обнаружения конфликта между парой ВС: первая модель – «номинальная»; вторая – «наихудший случай» и третья – «вероятностная модель».

В первом случае за прогнозируемую принимается траектория, проходящая через точку, которая соответствует текущим (наиболее вероятным) оценкам положения ВС, и принятой гипотезе дальнейшего движения ВС. Принимаемая гипотеза прогнозируемого движения зависит от временной глубины прогноза, а также информации о дальнейшем выполнении полета. Эти вещи между собой связаны: чем больше глубина прогноза, тем больше влияние неопределенности в последующем поведении ВС. Тем не менее, применительно к задачам ASAS, как это вытекает из нормативных документов [2,3], глубина обнаружения конфликта характеризуется значениями от 2 до 5 мин, максимум - до 6 мин. По крайней мере, на маршруте это позволяет достаточно обоснованно использовать прямолинейную модель прогноза. При этом все погрешности измерения, все отклонения от этой траектории, связанные с погрешностями самолетовождения, должны укладываться в размеры зоны безопасности. Это позволяет, с одной стороны, фиксировать случаи, когда конфликты действительно возможны (не иметь пропусков), с другой - минимизировать «ложные срабатывания», мешающие пилоту.

Когда на глубине прогнозирования ВС пролетают точку перемены маршрута, такой прямолинейной модели прогноза может оказаться недостаточно, и она потребует уточнений (т.е. необходимо будет учитывать не только текущие параметры движения, но и ближайшие намерения ВС).

Применение второй модели соответствует условиям, когда необходимо мириться с непредсказуемостью движения другого ВС. В таком случае приходится предполагать, что ВС может оказаться в любой точке области, соответствующей его маневренным возможностям (см. рис. 4). Понятно, что размер этой области быстро растет с увеличением глубины прогнозирования, вероятность выхода на границы этой области невелика, а вероятность «ложного обнаружения» конфликта велика. Маловероятно, что этот «гарантирующий» подход перспективен для задач самошелонирования магистральных ВС.



Рисунок 4. Иллюстрация модели «наихудший случай» при прогнозе движения

Наконец, третья вероятностная модель прогноза движения ВС является промежуточной между первыми двумя. Прогнозируемое положение ВС описывается трубкой, охватывающей «номинальную», наиболее вероятную траекторию. Размер трубки определяется заданным уровнем вероятности нахождения внутри нее.

В диссертационной работе применяется алгоритм обнаружения, основанный на номинальном подходе. Неопределенность прогнозируемого положения ВС компенсируется небольшой глубиной прогноза и учитывается в размерах зоны безопасности. Обнаружение конфликта производится по текущей траекторной информации и на основе гипотезы о прямолинейном движении ВС. Опасность ситуации со сближением пары ВС проверяется в основном по двум параметрам: величине мгновенного пролета и времени до наступления конфликта. Величина пролета рассчитывается по наименьшему расстоянию между ВС, которое сравнивается с размерами зоны безопасности. Время до наступления конфликта учитывает

запас времени до нарушения границы зоны безопасности. Чем больше времени остается до прогнозируемого нарушения, тем меньшую угрозу оно представляет. При достаточно большом запасе времени (больше 5-6 мин) вообще не следует реагировать на тревогу из-за неопределенности в намерениях движения участников ВД.

Этот же номинальный подход применяется к прогнозированию конфликтных ситуаций с опасными областями ВП.

Опасными областями ВП будем называть закрытые области использования ВП или области погодных ограничений (метеобласть), рассматривать их в общем случае как движущийся, а в частном случае – неподвижный геометрический объем воздушного пространства.

Конфликтом с опасной областью ВП будем считать, когда обнаруженная ситуация при которой траектория ВС на заданной временной глубине пересекает геометрический объем воздушного пространства, соответствующий движущейся опасной области ВП.

3.1.2 Обзор алгоритмов разрешения конфликтов

Алгоритм разрешения конфликта предназначен для выработки рекомендаций по маневру ВС в условиях прогнозируемого нарушения условий эшелонирования.

Главное требование к алгоритму: исполнение вырабатываемых рекомендаций должно обеспечить такое движение ВС, которое приведет к тому, что управляемый самолет не будет нарушать зоны безопасности других ВС, находящихся в его окружении. Таким образом, отличительным свойством алгоритма должна быть возможность разрешения так называемого множественного конфликта, затрагивающего не два ВС (парный конфликт), а три или более ВС. Это связано с тем, что при выполнении маневра уклонения ВС может сблизиться с третьим ВС и создать новую конфликтную ситуацию, которая появится только в результате маневра. Этот эффект носит название “эффект домино” и может отрицательно сказаться на стабильном и гладком выполнении воздушного движения. Требование, связанное с разрешением множественного конфликта, становится актуальным именно в рамках концепции «Free Flight», когда каждый ВС выбирает выгодную для себя траекторию полета, не ограничиваясь установленными трассами. Еще одно требование – алгоритм разрешения конфликта должен обеспечивать возвращение ВС на плановую траекторию, как только это станет возможным с точки зрения безопасности полетов.

Таким образом, выполнение рекомендаций, синтезированных алгоритмом, в условиях наличия обнаруженных конфликтов должно обеспечить, в общем случае, пространственный маневр уклонения с целью предотвращения опасных сближений с другими ВС, а после разрешения конфликта – возвращение на плановую траекторию и ее дальнейшее выдерживание.

Как известно, возможны три типа маневров уклонения: вертикальный (с изменением высоты), горизонтальный (с изменением направления полета) и маневр скоростью. Вертикальный маневр связан со значительными энергозатратами, поэтому используется для предотвращения столкновений в качестве тактической (последней) меры обеспечения безопасности (за несколько десятков секунд до возможного столкновения) в рамках системы TCAS [8]). Система же ASAS имеет дело с конфликтами на несколько большей глубине в 2-6 мин (что определяется, прежде всего, возможностями оборудования АЗН-В). Предпочтительным является горизонтальный маневр, как более комфортный для пассажиров и наименее энергоемкий. Маневр скоростью на имеющейся временной глубине управления малоэффективен. Известно, что допустимый диапазон изменения скорости на крейсерской фазе полета невелик, а, следовательно, малое изменение скорости приведет к затянутому маневру разведения ВС. Кроме того, изменение скорости влечет к повышенным энергозатратам, поэтому эта мера регулирования может рассматриваться в алгоритме разрешения конфликта только как вспомогательная.

Еще одна особенность рассматриваемой задачи определяется применяемым подходом выработки рекомендаций по маневру уклонения. Первый подход – вычислять и предлагать всю траекторию уклонения от начала уклонения до возврата на плановую траекторию. Второй – давать только текущие команды, выполнение которых обеспечивает безопасный полет только на глубину прогноза. На первый взгляд, первый подход предпочтительней. Он позволяет сформировать полную траекторию безопасного уклонения, а также оптимальное в смысле интегрального (на весь маневр) критерия управление; наконец, именно так формируются траектории маневра (так называемые, *S*-траектории), применяемые при централизованном, диспетчерском управлении в трассовом пространстве. Однако задача самоэшелонирования имеет ряд принципиальных особенностей: в каждый текущий момент борт обладает ограниченной информацией как по глубине прогноза, так и его точности. Особенно, это касается намерений и действий других бортов, тем более в условиях множественного конфликта. Ситуация во времени изменяется, что требует довольно частого пересчета оптимизационной задачи. А в условиях реального времени это может привести к

недостаточному быстродействию алгоритмов. С учетом сказанного предлагается решать задачу в рамках второго подхода – рассчитывать «мгновенные» рекомендации.

Для решения задачи децентрализованного управления при разрешении конфликтов различные авторы используют ряд методов: полуопределенного программирования, нейронных сетей, генетические методы, геометрические методы, методы силовых полей и др. [9-22]. Методы, предназначенные для разрешения конфликтов, можно подразделить на две группы, отличающиеся последовательным или параллельным характером управления разрешением конфликта.

Первая группа – последовательное разрешение отдельных парных (дуэльных) конфликтов. Даже если конфликт носит групповой характер и в него вовлечено более двух ВС, каждое отдельное ВС (или диспетчер, вырабатывающий команду управления для него) в каждый текущий момент организует маневр разрешения конфликта с определенным (выбранным) ВС, например, конфликт с которым у него прогнозируется первым. Возможен вариант, когда разрешение отдельного конфликта идет кооперативно, т.е. маневр разрешения согласовывается и распределяется между парой вовлеченных в него ВС. Вторая группа – с одновременным разрешением всех составляющих прогнозируемого множественного конфликта (с одновременным уклонением управляемого ВС от всех других ВС, с которыми у него прогнозируются конфликты).

К первой группе относится метод геометрической оптимизации, вырабатывающий оптимальное управление по разрешению парного конфликта, ко второй – метод потенциальных полей [16, 17].

Метод геометрической оптимизации (геометрический метод) [15]. При использовании этого метода в качестве условия возникновения конфликтной ситуации принимается случай, когда прогнозируемое минимальное расстояние между ВС меньше, чем допустимое (например, меньше стандартного интервала эшелонирования в горизонтальной плоскости, равного 5 милям, возможно с некоторым запасом). Управление по разрешению конфликта сводится к изменению направления вектора относительной скорости от одного ВС таким образом, чтобы новое направление не пересекало защитную зону другого ВС. Это может быть достигнуто путем изменения направления и/или величины скорости полета одного ВС и/или другого ВС. При эффективном разрешении конфликта новое значение минимального расстояния между ВС должно стать равным допустимому расстоянию. В каждый текущий момент времени при

выработке команды разрешения конфликта соответствующего ВС рассматривается только один, самый близкий по прогнозируемому времени наступления конфликт.

Используемая для формирования маневра стратегия основывается на понятии потенциала полей. Это можно пояснить следующим образом: положительные заряды будут притягиваться к фиксированным (неподвижным) отрицательным зарядам, потому что действует взаимное притяжение противоположных зарядов. Наоборот, положительно заряженные частицы отталкиваются друг от друга, т.к. действует взаимное отталкивание между подобными зарядами. В соответствии с этой идеей подход при формировании управления заключается в следующем. Каждому ВС ставится в соответствие положительный заряд. Аэропорту назначения конкретного ВС ставится в соответствие отрицательный заряд. В динамике в каждый текущий момент времени ВС (тело с положительным зарядом) притягивается к аэропорту назначения, и по пути к нему отталкивается от положительных зарядов других, потенциально опасных для него ВС, тем самым формируя маневр разрешения конфликта для этого ВС. Сделанные пояснения являются приближенной физической моделью метода потенциальных полей. Его преимуществом является достаточная простота реализации, а также возможность реализации децентрализованного управления при разрешении конфликтных ситуаций, когда каждый ВС осуществляет разделение в воздухе со всеми конфликтующими с ним ВС. Положительной стороной подхода является то, что благодаря его особенностям при его применении на всех ВС разрешение конфликта, несмотря на децентрализацию принятия решения, по существу является кооперативным в силу того, что отталкивание одинаково заряженных частиц является взаимным. Недостатком алгоритма является большое количество параметров алгоритма, влияющих на эффективность разрешения конфликта, которые необходимо «подбирать» в процессе синтеза.

Судя по публикациям, а также по результатам собственного анализа можно сделать вывод об определенных преимуществах двух методов: геометрического и метода потенциальных полей. Имеющиеся публикации [9,11,15-18] демонстрируют их высокую эффективность при разрешении даже предельно сложных конфликтов. По всей видимости, на их базе целесообразно строить реализуемые (бортовые) алгоритмы. Тем не менее, в существующих источниках отсутствуют достаточно детально описанные расчетные алгоритмы, реализующие предлагаемые подходы.

В диссертационной работе исследуются алгоритмы, основанные на подходах и идеях метода потенциальных полей. Его преимуществом является достаточная простота реализации, а

также возможность одновременного разрешения множественных конфликтов. Положительной особенностью данного подхода является то, что при его применении всеми ВС разрешение конфликта, несмотря на децентрализацию принятия решения, по существу получается кооперативным в силу того, что отталкивание одинаково заряженных частиц взаимно.

3.2 Пояснения по алгоритму разрешения конфликтов

Принцип метода потенциальных полей состоит в том, что объект (управляемое ВС) движется под влиянием искусственных потенциалов, генерируемых как текущей «целью полета», так и «препятствиями» (другими ВС и опасными зонами). Цель вырабатывает потенциал, который притягивает объект в ее сторону, в то время как препятствия вырабатывают потенциалы, которые отталкивают объект от них. Соответственно, суммарная сила отталкивания объекта от всех препятствий - это сумма сил отталкивания от каждого из них. Это позволяет в итоге векторно суммировать силы взаимодействия, независимо от источника возникновения конфликта (см.рис.5). Показателем конфликта служит прогнозируемый пролет – минимальное расстояние, на котором разойдутся объекты, если будут продолжать лететь с неизменяемой скоростью и курсом. Отталкивающий потенциал от каждого препятствия определяется в зависимости от пролета и времени, оставшегося до достижения пролета. Величина силы отталкивания от взаимодействия с другим ВС либо опасными зонами принимается равной величине соответствующего потенциала. Направление силы определяется по линии, соединяющей управляемое ВС и "конфликтующий" объект, в противоположную сторону от конфликтующего объекта. Вектор силы притяжения ВС к осевой линии текущего участка планового маршрута рассчитывается исходя из требования обеспечения такого направления вектора скорости ВС, при котором будет иметь место линейная скорость приближения к плановой траектории, пропорциональная величине бокового отклонения ВС от осевой линии участка маршрута. При расчете величины силы притяжения вводится весовой коэффициент риска, позволяющий учесть снижение влияния силы притяжения при наличии конфликта.

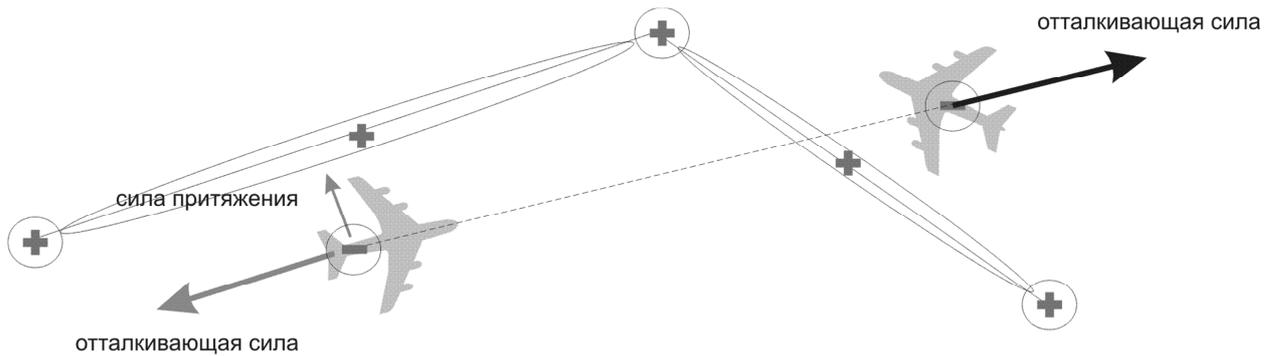


Рисунок 5. Физическая интерпретация метода потенциальных полей

3.3 Описание предложенных алгоритмов

Принятые значения переменных, используемые в описании алгоритмов данного раздела диссертационной работы приведены в приложении 1.

3.3.1 Алгоритмы обнаружения конфликтов

В качестве источником конфликтных ситуаций для своего ВС рассматриваются два вида объектов: окружающие ВС и опасные области воздушного пространства. Далее приведены описания алгоритмов обнаружения конфликтных ситуаций с указанными объектами.

3.3.1.1 Алгоритм обнаружения конфликтов с другими ВС

Конфликт между ВС имеет место при одновременном нарушении двух условий:

1) условие бокового (горизонтального) разделения (эшелонирования), т.е. $D(t) < 2R_{safe}$, где D – дальность между ВС в горизонтальной плоскости, R_{safe} – радиус зоны безопасности;

2) условие вертикального разграничения (эшелонирования), т.е. $|\Delta H(t)| < 4H_{safe}$, где $\Delta H = H_O - H_S$ – разница высот между парой ВС, H_O – высота полета своего ВС, H_S – высота полета другого ВС, $2H_{safe}$ – высота зоны безопасности.

На рисунке 6 представлена относительная геометрия в горизонтальной плоскости для пары ВС. Относительная скорость \vec{V}_{omi} движения своего ВС (BC_O) определяется из треугольника скоростей его \vec{V}_O и i -го встречного ВС (BC_{Si}) \vec{V}_{Si} . Пунктирной линией обозначена относительная траектория полета своего ВС, жирной линией - вектор относительной дальности \vec{D} , серой – пролет d_{cra} между ВС в горизонтальной плоскости. Время до наступления пролета t_{cra} определяется по векторам относительных дальности и скорости движения.

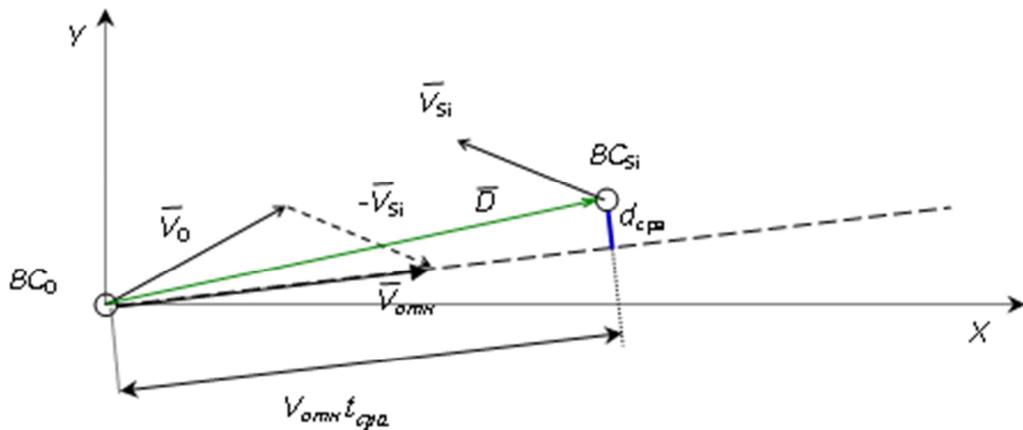


Рисунок 6. Относительная геометрия движения двух ВС в горизонтальной плоскости

Рисунок 7 иллюстрирует относительную геометрию движения пары ВС в вертикальной плоскости. Свое ВС, находясь на высоте H_O , снижается с вертикальной скоростью V_{hO} , а другое i -е ВС поднимается с высоты H_{Si} со скоростью V_{hSi} . В горизонтальной плоскости ВС также сближаются со скоростями \bar{V}_O и \bar{V}_{Si} соответственно.

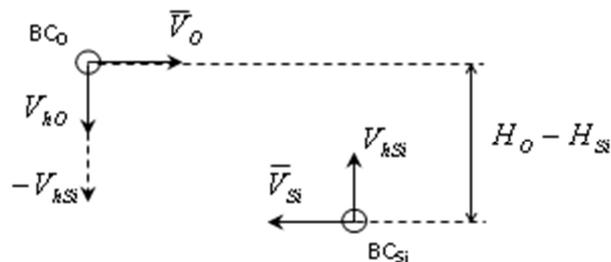


Рисунок 7. Относительная геометрия в вертикальной плоскости

Для иллюстрации пространственного конфликта на рисунке 8 показаны условные траектории движения пары ВС (левый ВС поднимается на соседний эшелон, а правый движется на встречном эшелоне) и зависимости от изменения относительной дальности (жирная линия) и вертикального рассогласования (прерывистая тонкая линия) от времени, соответствующие данному случаю относительного движения. По горизонтали жирной и тонкой прерывистой линией отмечены нормы вертикального и горизонтального эшелонирования ($2R_{safe}$ и $4H_{safe}$). Конфликт прогнозируется на интервале времени, выделенном серым цветом со штриховкой и соответствующем одновременному нарушению условий вертикального и горизонтального разделения.

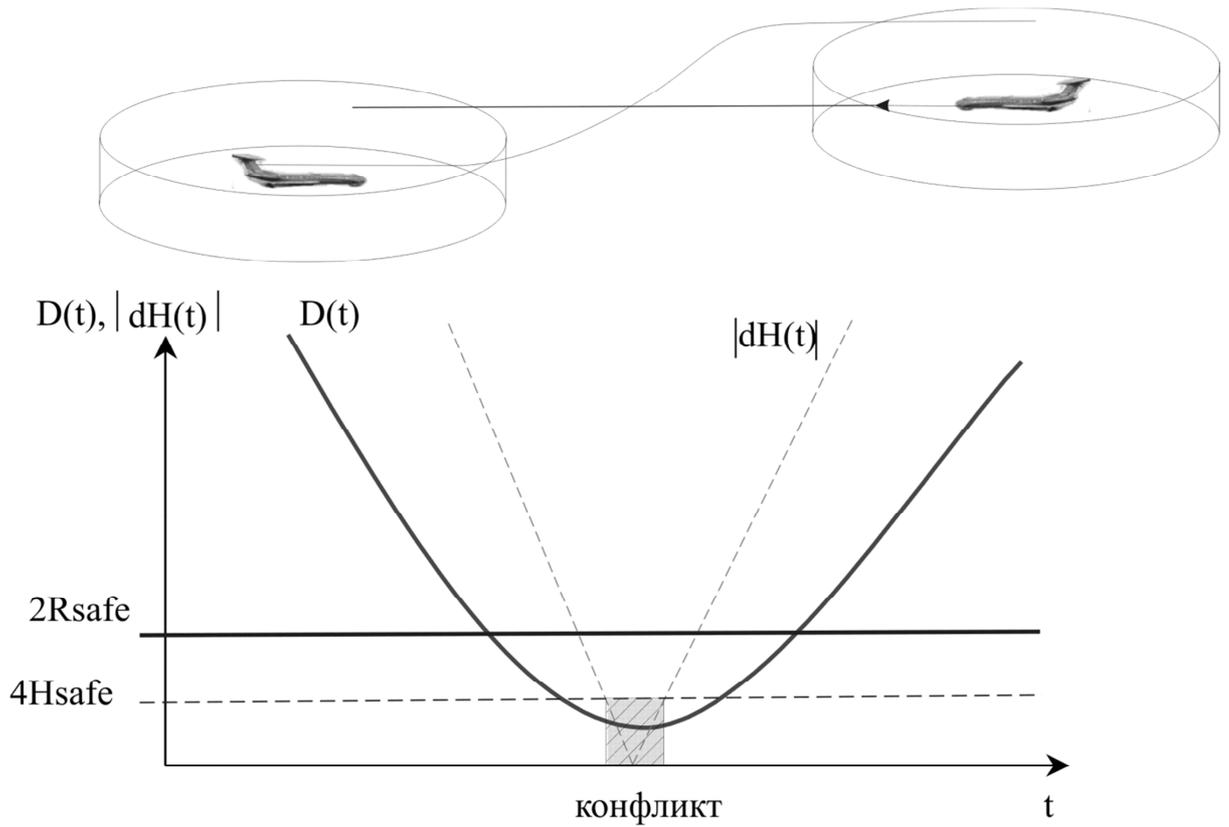


Рисунок 8. Иллюстрация пространственного конфликта

Проверка возможности возникновения конфликта производится попарно последовательно между своим и всеми окружающими ВС. Схема алгоритма обнаружения конфликта для пары ВС (своего и «другого» ВС в его окрестности) и вычисления его характеристик представлена на рисунке 9. Ниже приведены пояснения по частным алгоритмам.

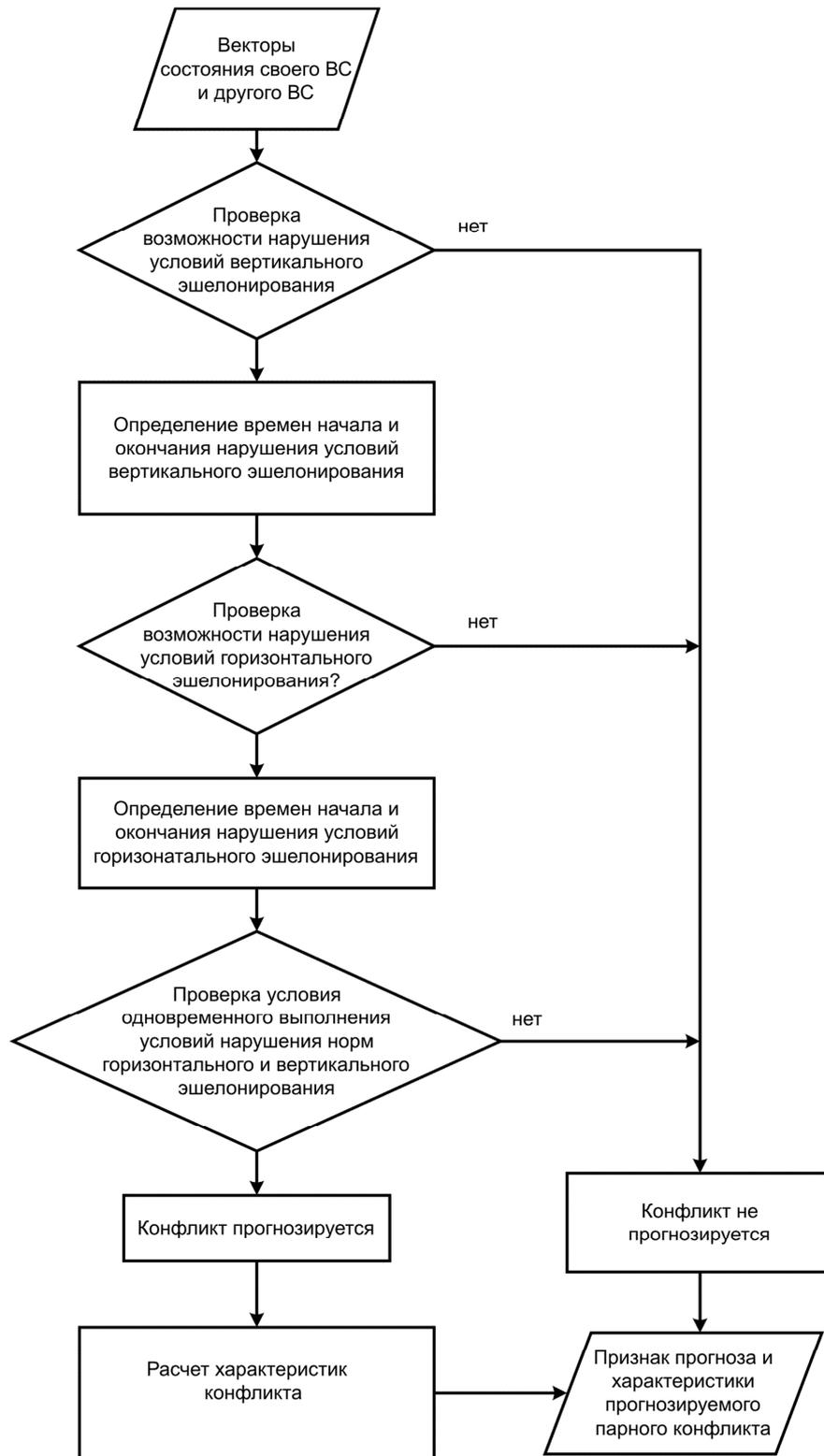


Рисунок 9. Блок-схема алгоритма обнаружения конфликта для пары ВС

Проверка возможности нарушения условий вертикального эшелонирования. Нарушение условий вертикального эшелонирования возможно при близости ВС к нормам вертикального эшелонирования. Проверка разделяется на два случая. Если ВС движутся с изменением относительной высоты, то необходимо проверять возможность нарушения зон с запасом (две нормы вертикального эшелонирования). Если относительная геометрия ВС постоянна, то проверяется нарушение нормы вертикального эшелонирования.

Первое условие – вертикальные скорости ВС не равны, а разница высот меньше двух интервалов вертикального эшелонирования: $V_{h0} \neq V_{hSi}$, $\Delta H < 8H_{safe}$.

Второе условие – вертикальные скорости ВС равны, а разница высот меньше интервала вертикального эшелонирования: $V_{h0} = V_{hSi}$, $\Delta H < 4H_{safe}$.

Определение времен начала и окончания нарушения условий вертикального эшелонирования. Имеет практический смысл только при разных вертикальных скоростях ВС. В этом случае времена начала T_{V0} и окончания T_{V1} нарушения условий вертикального эшелонирования равны:

$$T_{V0} = t + \frac{|\Delta H| - 4H_{safe}}{V_{h0} - V_{hSi}}, \quad T_{V1} = T_{V0} + \frac{4H_{safe}}{V_{h0} - V_{hSi}},$$

где t – текущее время.

Проверка возможности нарушения условий горизонтального эшелонирования. Она выполняется только, если прогнозируется нарушение условий вертикального эшелонирования. Алгоритм заключается в следующем.

1. Предварительно рассчитываются следующие параметры относительного движения в горизонтальной плоскости:

- проекция относительной дальности в горизонтальной плоскости $D_i = \sqrt{x_{Si}^2 + y_{Si}^2}$,
- пролет в горизонтальной плоскости $d_{сра,i} = |D_i| \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}$,
- время, оставшееся до пролета в горизонтальной плоскости $t_{сра,i} = |D_i| \cos \varphi / |V_{rel,i}|$.

В приведенных выше соотношениях $\bar{V}_{rel,i} = (V_{rel,i}^x, V_{rel,i}^y)^T = \bar{V}_O - \bar{V}_{Si}$ – вектор проекции вектора относительной скорости на горизонтальную плоскость; $\cos \varphi = \frac{(\bar{D}_i \bar{V}_{rel,i})}{|\bar{D}_i| |\bar{V}_{rel,i}|}$ – косинус угла между проекциями вектора относительной дальности и вектора относительной скорости на горизонтальную плоскость.

2. Нарушение условий горизонтального эшелонирования прогнозируется, если выполняются условия:

- пролет в горизонтальной плоскости меньше радиуса удвоенной зоны безопасности $d_{cpa,i} \leq 2R_{safe}$,
- пролет прогнозируется в течение глубины времени прогноза Δt_1 , заданного как параметр алгоритма обнаружения: $t_{cpa,i} < \Delta t_1$.

Определение времен начала и окончания нарушения условий горизонтального эшелонирования. Вычисляются следующие характеристики опасного сближения в горизонтальной плоскости:

время начала нарушения условия горизонтального эшелонирования T_{H0} :

$$T_{H0} = t + \frac{V_{rel,i} t_{cpa,i} - \sqrt{2R_{safe}^2 - d_{cpa,i}^2}}{V_{rel,i}},$$

время окончания нарушения условия горизонтального эшелонирования T_{H1} :

$$T_{H1} = T_{H0} + \frac{2\sqrt{2R_{safe}^2 - d_{cpa,i}^2}}{V_{rel,i}}.$$

Проверка условия одновременного выполнения условий нарушения норм горизонтального и вертикального эшелонирования. Условием наличия одновременного нарушения норм вертикального и горизонтального эшелонирования является выполнение двух неравенств: $T_{H1} > T_{V0}$ и $T_{V1} > T_{H0}$.

Расчет характеристик при наличии конфликта.

Время наступления конфликта T_{c0} соответствует моменту, когда впервые происходит пространственный конфликт: $T_{c0} = \max(T_{H0}, T_{V0})$.

Время окончания конфликта T_{c1} - момент, когда впервые условия пространственного конфликта перестали выполняться: $T_{c1} = \min(T_{H1}, T_{V1})$.

Время, оставшееся до конфликта T_c , средний момент времени между началом и окончанием конфликта: $T_c = 0.5(T_{c1} - T_{c0})$.

Положение конфликтующего ВС на момент конфликта рассчитывается экстраполяцией движения ВС на интервал времени T_c .

Выходами алгоритма обнаружения для пары ВС являются: признак наличия конфликта и при его наличии набор характеристик прогнозируемого конфликта, необходимых для использования в алгоритме разрешения, а так же для вывода непосредственно на кабинный дисплей пилота CDTI.

Таковыми характеристиками являются:

- проекция относительной дальности в горизонтальной плоскости D_i ,
- величина пролета в горизонтальной плоскости $d_{cra,i}$,
- время, оставшееся до пролета в горизонтальной плоскости $t_{cra,i}$,
- время, до наступления конфликта T_c ,
- широта, долгота и высота центра конфликтующего ВС на момент конфликта.

3.3.1.2 Алгоритм обнаружения конфликтов ВС с опасными областями воздушного пространства

В качестве опасных областей воздушного пространства могут быть как закрытые области ВП, так и опасные метеообразования. Далее, в качестве обобщения будем рассматривать метеообразования, как наиболее сложный случай движущихся закрытых областей ВП.

В качестве аппроксимирующей модели выбрана призма с многоугольником в основании. Многоугольник задается координатами вершин и скоростью распространения. На настоящем этапе принято условие, что эти параметры известны.

Конфликт прогнозируется, если траектория ВС пересечется в будущем с границами области. Считается, что конфликт имеет место, если одновременно выполняются два условия:

- нарушение ВС границ в горизонтальной плоскости;
- нарушение ВС границ в вертикальной плоскости.

Проверка возможности возникновения конфликта с метеобластями производится попарно последовательно между ВС и окружающими областями. Схема алгоритма обнаружения конфликта с метеобластью и вычисления его характеристик представлена на рисунке 10. Ниже приведены пояснения по частным алгоритмам.

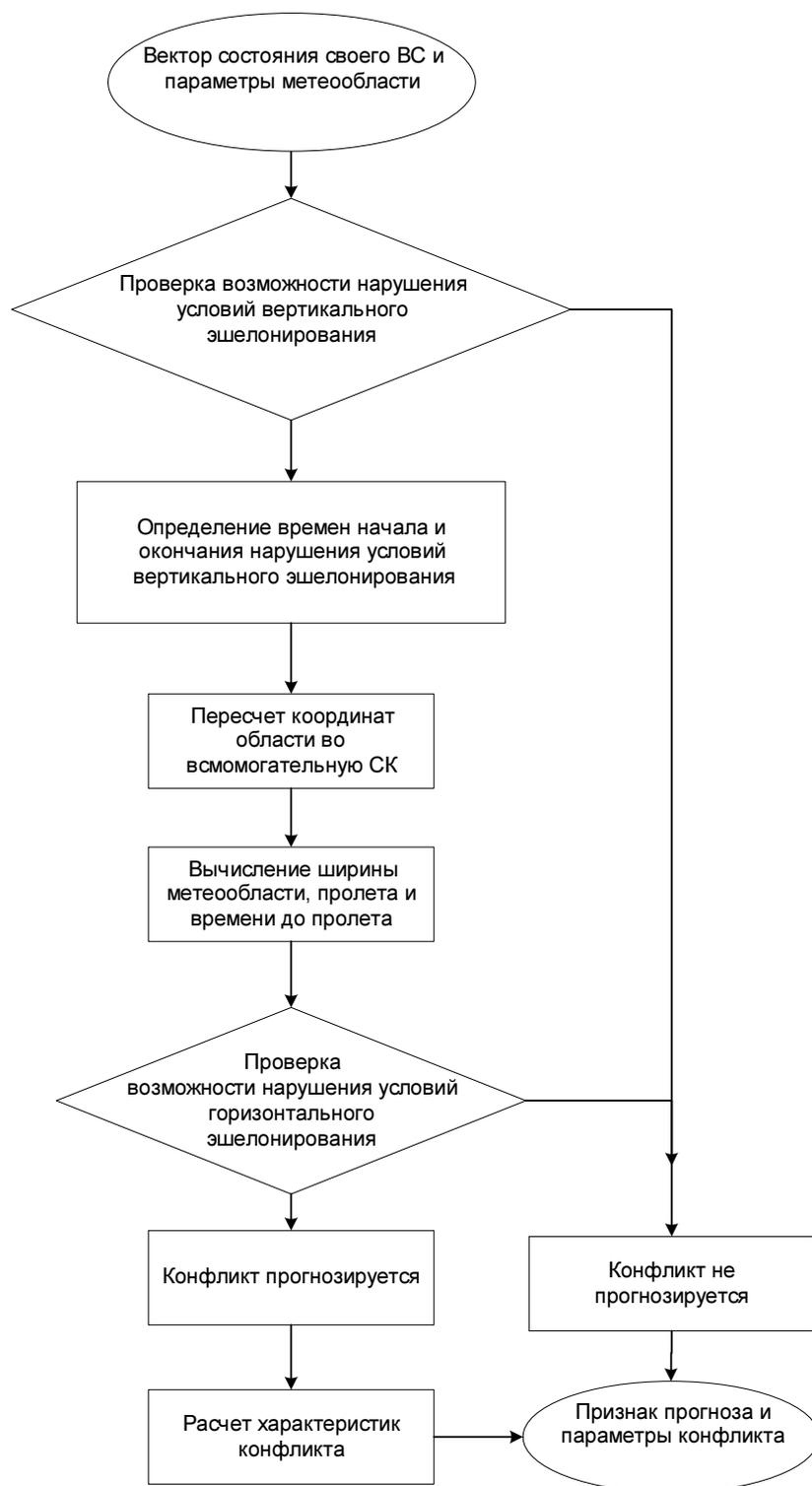


Рисунок 10. Блок-схема алгоритма обнаружения конфликта с метеобластью

Проверка условия нарушения границ в вертикальной плоскости производится из условия нарушения границ области в вертикальной плоскости. Условия выполняются, если прогнозируемая высота полета ВС лежит в диапазоне (H_{\min}, H_{\max}) высот опасной области.

Диапазон времен (t_{\min}^h, t_{\max}^h) , входа и выхода из зоны по высоте определяется путем решения следующих уравнений:

$$(H + V_h t = H_{\min}) \text{ и } (H + V_h t = H_{\max}).$$

Пересчет координат во вспомогательную СК. Для удобства расчетов введена вспомогательная система координат:

- начало – в проекции точки текущего положения ВС на нулевой уровень земного геоида;
- ось X направлена на Восток;
- ось Y направлена на Север;
- ось Z направлена по местной вертикали вверх.

Формулы пересчет координат во вспомогательную СК:

- собственные координаты ВС:

$$X = 0,$$

$$Y = 0,$$

$$Z = H_a.$$

- координаты i -ой точки границы метеобласти:

$$X_{pi} = R * \sin \Psi_{pi}$$

$$Y_{pi} = R * \cos \Psi_{pi}$$

Здесь R – горизонтальная дальность от ВС до этой точки, Ψ_{pi} – курсовой угол ортодромии от ВС на точку границы.

Определение ширины метеобласти и пролета.

Понятия, касающиеся описания конфликта с метеобластью в горизонтальной плоскости:

- Поперечный размер метеобласти – ширина области D в направлении, перпендикулярном вектору относительной скорости (см. рис. 11).

- «Срединная» линия ограничения – линия, параллельная вектору относительной скорости, проведенная так, что ширина частей метеобласти справа и слева одинакова и равна $D/2$.

- Величина пролета h ВС относительно области – расстояние между срединной линией и направлением относительной скорости. Направление – перпендикулярно срединной линии в сторону наиболее удаленной от срединной линии точки той части метеобласти, которая лежит в той же стороне относительно срединной линии, что и линия относительной скорости.

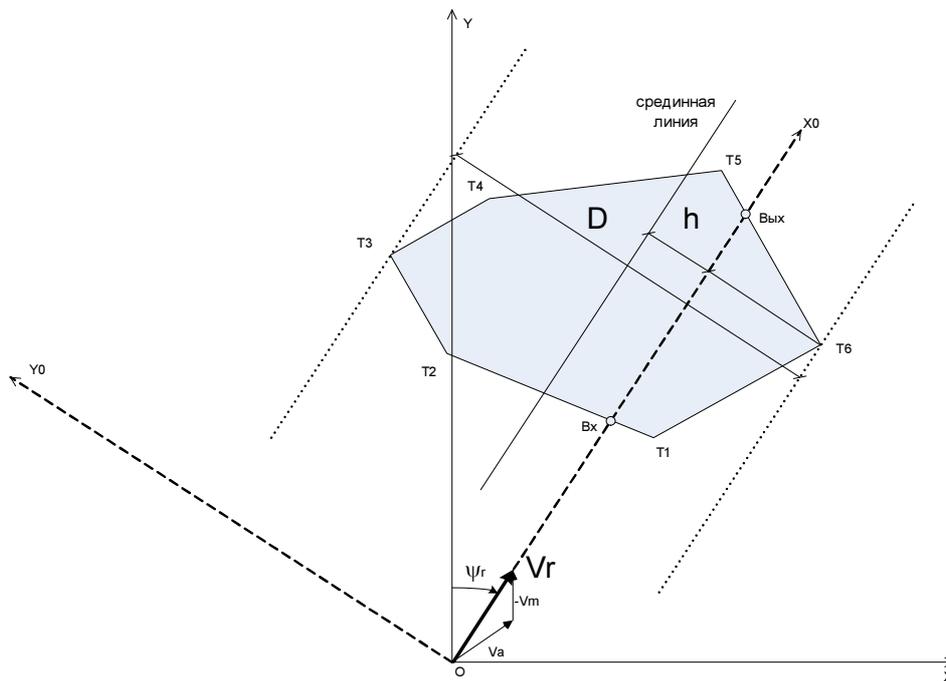


Рисунок 11. Геометрия конфликта с метео областью

На рисунке 11 представлен треугольник горизонтальных скоростей:

V_a , - горизонтальная скорость "своего" ВС,

V_m - прогнозируемая скорость области,

V_r - относительная скорость,

$T_1 - T_6$ - граничные точки области,

D - поперечный размер области,

h - величина пролета ВС относительно области.

Параметры пролета и условия нарушения границ в горизонтальной плоскости:

- *ширина области*

$$D = Y_{\max} - Y_{\min},$$

где Y_{\max} и Y_{\min} – максимальное и минимальное значение координаты Y_0 среди всех лежащих впереди точек области,

- P_c – параметр «средней» линии

отклонение средней линии от направления относительной скорости

$$P_c = (Y_{\max} + Y_{\min})/2,$$

- h – вектор пролета

в условной относительной СК

$$h = (0, -P_c, 0)^T.$$

Замечание: направление пролета ВС относительно средней линии перпендикулярно направлению относительной скорости (вправо относительно движения по вектору относительной скорости, если $P_c > 0$, и влево в противном случае).

- t_h – время до пролета

$$t_h = X_h / V_r,$$

где координата X_h точки пролета определяется по правилу

если $P_c > 0$, то выбирается точка с координатами (X_h, Y_{\min}) ,

если $P_c < 0$, то выбирается точка (X_h, Y_{\max}) .

Условия нарушения выполняются, если $P_c \leq D/2$.

В этом случае определяются еще два временных параметра:

- время $t_{\text{вх}}$ – время входа в область (соответствует точке V_x на рисунке 11);
- время $t_{\text{вых}}$ – время выхода из области (соответствует точке $V_{\text{вых}}$ на рисунке 11).

Признак наличия конфликта:

Конфликт прогнозируется, если одновременно выполняются следующие условия:

- 1) $|P_c| < D/2$,

- 2) интервалы времен $(t_{\text{вх}}, t_{\text{вых}})$ и (t_{\min}^h, t_{\max}^h) пересекаются.

Выходные величины алгоритма:

- признак прогнозируемого «пространственного» конфликта;
- вектор горизонтального промаха $h = (h.x_0 \ h.y_0 \ h.z_0)$;
- время, оставшееся $\Delta t = t_h$ до пролета относительно точки пролета в горизонтальной плоскости;
- признак наличия конфликта в горизонтальной плоскости;
- времена, оставшиеся до начала и окончания конфликта, при наличии конфликта.

3.3.2 Алгоритм разрешения конфликтов

При разрешении конфликтов управление формируется по двум составляющим углу курса и горизонтальной скорости. Приоритетной командой при разрешении конфликта является угол курса, в случаях когда изменения направления полета недостаточно формируется команда по изменению скорости.

3.3.2.1 Расчет угла отклонения ψ^*

Расчет ψ^* должен осуществляться в соответствии с алгоритмами децентрализованного управления согласно модифицированному методу потенциальных полей по данным о прогнозируемом пролете в горизонтальной плоскости $d_{сра}$, получаемым в результате решения задачи обнаружения, и по данным о текущем участке полета ВС, получаемым от системы самолетовождения.

При расчете параметра ψ^* должно быть соблюдено следующее правило разведения ВС, неохватываемое методом потенциальных полей:

Если $d_{сра} < 300\text{м}$, то отворот должен осуществляться таким образом, чтобы вектор относительной скорости начал поворачиваться вправо.

Примечание. Это правило полностью идентично правилу дорожного движения "Помеха справа"

Блок-схема алгоритма вычисления угла отклонения представлена на рисунке 12.

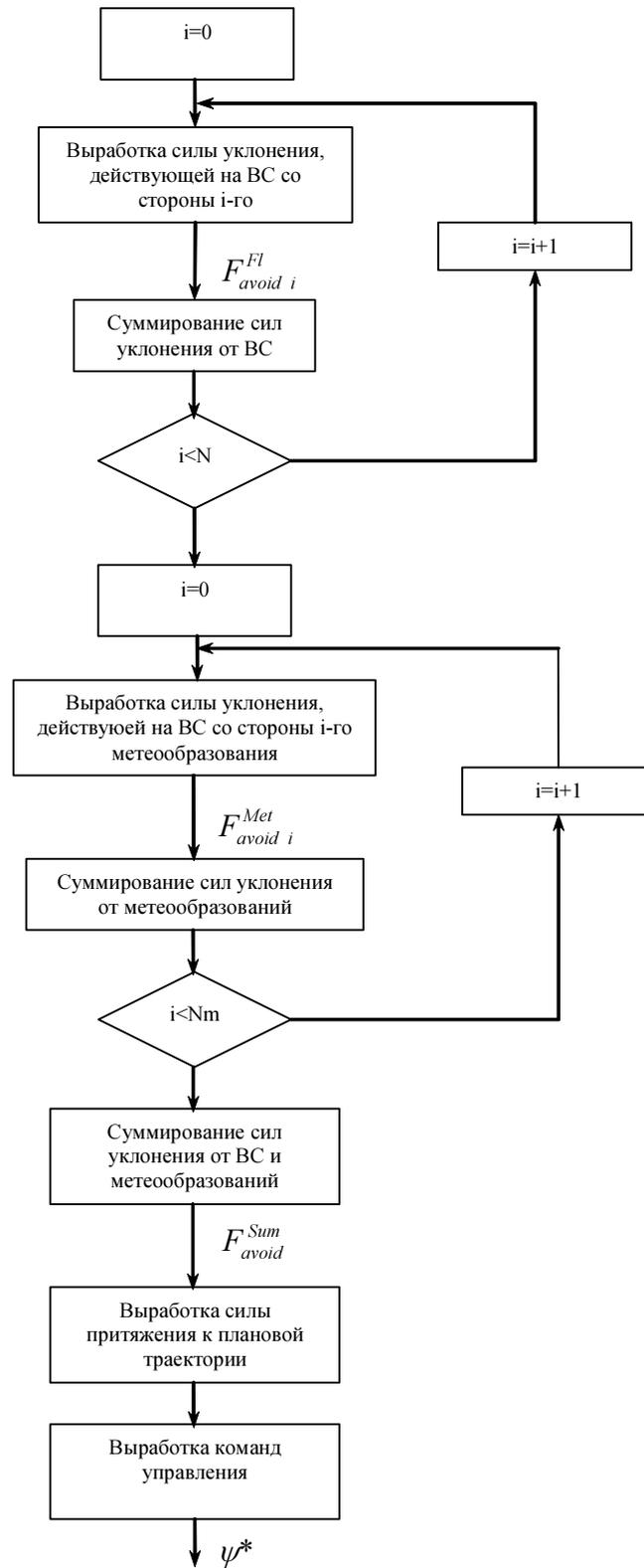


Рисунок 12. Блок-схема алгоритма вычисления угла отклонения

Выработка силы уклонения, действующей на ВС со стороны i -го ВС:

$$\bar{U}_i = \begin{cases} 1, \text{ если } d_{cra i} < d_0 \\ \frac{\arctg(2) - \arctg\left(\frac{4 \cdot d_{cra i}}{d_1 - d_0} - 2 \frac{d_0 + d_1}{d_1 - d_0}\right)}{2 \arctg(2)}, \text{ если } d_{cra i} > d_0 \text{ или } d_{cra i} < d_1 \\ 0, \text{ если } d_{cra i} > d_1 \end{cases}$$

$$\eta(t_{cra i}) = \begin{cases} 0, \text{ при } t_{cra i} > \Delta t_1 \text{ или } t_{cra i} < 0 \text{ и } D_i \geq d_0 \\ (\Delta t_1 - t_{cra i}) / (\Delta t_1 - \Delta t_0), \text{ при } t_{cra i} > \Delta t_0 \\ 1, \text{ при } t_{cra i} \geq 0 \text{ или } t_{cra i} \leq 0 \text{ и } D_i < d_0 \end{cases}$$

$$U_i = \eta' \cdot \bar{U}_i \cdot \eta(t_{cra i})$$

$$\text{Если } \frac{U_i \cdot x_{Si}}{\sqrt{x_{Si}^2 + y_{Si}^2}} \cdot V_{rel i}^y - \frac{U_i \cdot y_{Si}}{\sqrt{x_{Si}^2 + y_{Si}^2}} \cdot V_{rel i}^x > 0, \text{ то } F_{avoid i}^{Fl x} = -\frac{U_i \cdot y_{Si}}{\sqrt{x_{Si}^2 + y_{Si}^2}}, F_{avoid i}^{Fl y} = \frac{U_i \cdot x_{Si}}{\sqrt{x_{Si}^2 + y_{Si}^2}},$$

$$\text{иначе } F_{avoid i}^{Fl x} = \frac{U_i \cdot y_{Si}}{\sqrt{x_{Si}^2 + y_{Si}^2}}, F_{avoid i}^{Fl y} = -\frac{U_i \cdot x_{Si}}{\sqrt{x_{Si}^2 + y_{Si}^2}}.$$

Выработка силы уклонения, действующей на ВС со стороны j -го метеообразования:

Метод расчета силы уклонения от метеообразования аналогичен расчету силы уклонения от ВС.

$$\bar{U}_j^{met} = \begin{cases} 1, \text{ если } h_j < d_0 \\ \frac{\arctg(2) - \arctg\left(\frac{4 \cdot h_j}{d_1 - d_0} - 2 \frac{d_0 + d_1}{d_1 - d_0}\right)}{2 \arctg(2)}, \text{ если } h_j > d_0 \text{ и } h_j < d_1 \\ 0, \text{ если } h_j > d_1 \end{cases}$$

$$\eta(\Delta t_j) = \begin{cases} 0, \text{ при } \Delta t_j > \Delta t_1 \text{ или } \Delta t_j < 0 \\ (\Delta t_1 - \Delta t_j) / (\Delta t_1 - \Delta t_0), \text{ при } \Delta t_j > \Delta t_0 \\ 1, \text{ при } \Delta t_j \geq 0 \text{ или } \Delta t_j \leq 0 \end{cases}$$

$$U_j^{met} = \eta' \cdot \bar{U}_j^{met} \cdot \eta(\Delta t_j)$$

$$F_{avoid j}^{met x} = -U \cdot \sin(\psi_{rj}) \cdot \text{sign}(h_j)$$

$$F_{avoid j}^{met y} = -U \cdot \cos(\psi_{rj}) \cdot \text{sign}(h_j)$$

Суммарная сила отклонения от конфликтующих объектов:

$$\vec{F}_{avoid sum} = \sum_i \vec{F}_{avoid i}^{Fl} + \sum_j \vec{F}_{avoid j}^{met}$$

Выработка силы притяжения к плановой траектории

$$\frac{dp}{dt} = \begin{cases} -\frac{R_S}{D_m} D, \text{ если } |D| < D_m \text{ и } |D| < P_{\max} \\ -\text{sign}(D) \cdot R_S, \text{ если } D_m < |D| < P_{\max} \\ -2\text{sign}(D) \cdot R_S, \text{ если } |D| > P_{\max} \end{cases}$$

где D – отклонение от плановой траектории.

Желательная угловая скорость поворота к траектории:

$$\omega_{\text{жс}} = (\psi + \frac{dp}{dt} / V_0 - \psi_0) / D_k, \text{ где } \psi - \text{текущий курсовой угол.}$$

$$\omega_{\text{lim}} = \begin{cases} \omega_{\text{жс}}, \text{ если } |\omega_{\text{жс}}| < \frac{g \cdot \text{tg}(\gamma)}{V} \\ \text{sign}(\omega_{\text{жс}}) \cdot \frac{g \cdot \text{tg}(\gamma)}{V}, \text{ если } |\omega_{\text{жс}}| > \frac{g \cdot \text{tg}(\gamma)}{V} \end{cases}$$

$$\Delta \psi_a = \omega_{\text{lim}} \cdot (1 - \exp(D_k \cdot \Delta t_y)) / D_k$$

$$\varpi_{\text{lim1}} = \begin{cases} \omega_{\text{lim}} \cdot \left| \left(\psi + \frac{dp}{dt} / V_0 - \psi_0 \right) / \Delta \psi_a \right|, \text{ если } \left| \psi + \frac{dp}{dt} / V_0 - \psi_0 \right| < \Delta \psi_a \\ \omega_{\text{lim}}, \text{ если } \left| \psi + \frac{dp}{dt} / V_0 - \psi_0 \right| \geq \Delta \psi_a \end{cases}$$

Расчет величины силы притяжения к траектории производится следующим образом:

$$F_{\text{line}} = \left(1 - \frac{F_{\text{avoid sum}}}{\eta'} \right) \cdot V \cdot \varpi_{\text{lim1}}$$

Эта сила направлена перпендикулярно скорости, поэтому:

$$F_{line}^X = -\frac{sign(p) \cdot F_{line} \cdot V_y}{V}, \quad F_{line}^Y = \frac{sign(p) \cdot F_{line} \cdot V_x}{V}$$

Выработка команд управления по курсовому углу

$$\vec{F}_{res} = \vec{F}_{avoidsum} + \vec{F}_{line}$$

$$\vec{e}_{\perp} = \left(\frac{V_o^y}{|V_o|}, -\frac{V_o^x}{|V_o|} \right)$$

$$\varpi = \vec{F}_{res} \cdot \vec{e}_{\perp} / V$$

$$\psi^* = \psi + \frac{T_{yup}}{(1 - e^{-T_{yup} \cdot D_k})} \cdot \varpi$$

3.3.2.2 Расчет скорости V^*

Расчет V^* осуществляется в соответствии с алгоритмом, представленном на блок-схеме рисунка 13.

Проверка условия соответствующего боковой близости i -го ВС

Условие определяется логическим И трех условий:

1. условие близости между ВС: $D < D_{min}$,

где D – дальность между парой ВС, D_{min} – параметр бокового эшелонирования;

2. условие нахождения сбоку: $\left| \frac{\Delta y}{\Delta x} \right| > tg\beta^*$,

где β^* - «предельный угол параллельных курсов», параметр алгоритма; Δy и Δx – относительные координаты другого ВС во вспомогательной СК своего ВС, связанной с вектором скорости;

$$\Delta x = x_{Si} \cdot \sin\psi + y_{Si} \cdot \cos\psi ;$$

$$\Delta y = y_{Si} \cdot \sin\psi - x_{Si} \cdot \cos\psi .$$

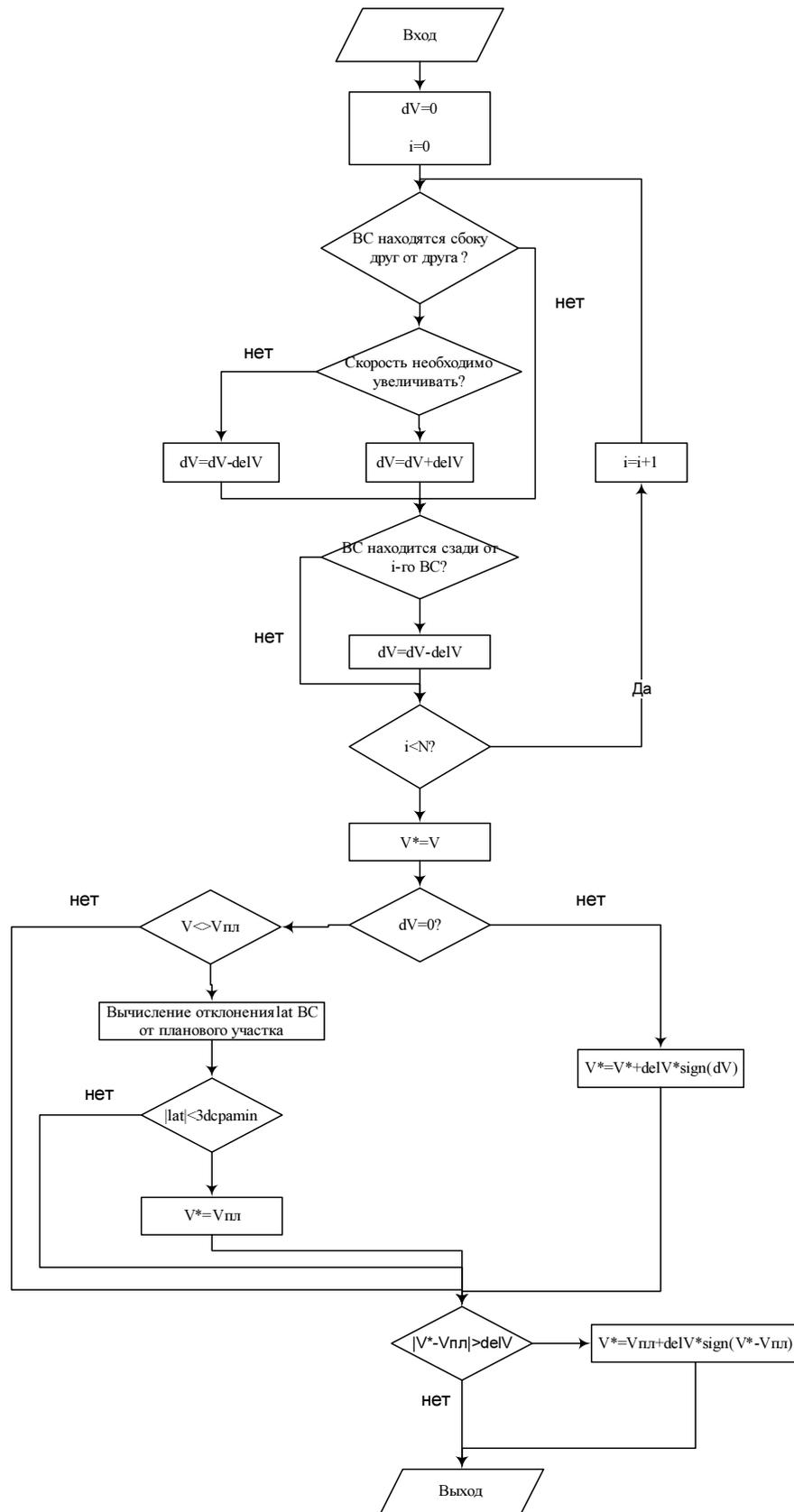


Рисунок 13. Блок-схема алгоритма вычисления скорости

3. условие близкой скорости:

$$|V - V_i| < \varepsilon_v,$$

$$|\psi - \psi_i| < \varepsilon_\psi$$

где V и V_i скорости своего и другого ВС, ψ и ψ_i углы курса своего и другого ВС, ε_v , ε_ψ - параметры близости скорости.

Проверка условия необходимости увеличения скорости при боковой близости

Если $\Delta y > 0$ – ситуация «справа», скорость должна быть увеличена на ΔV^* . При $\Delta y < 0$ – ситуация «слева», скорость должна быть уменьшена на ΔV^* . ΔV^* - возможное изменение скорости, параметр алгоритма.

Проверка условия соответствующего положению ВС сзади от i -го ВС

Условие определяется логическим И трех условий:

1. условие близости между ВС: $D < D^{np}$,

где D^{np} – параметр продольного эшелонирования;

2. условие нахождения сзади, в кильватере другого ВС:

$$\Delta x > 0,$$

$$\left| \frac{\Delta y}{\Delta x} \right| < \operatorname{tg} \beta^* ;$$

3. условие близкой скорости $|V^{nl} - V_{sx}| < V^{np}$,

где V^{nl} – величина плановой скорости своего ВС, V_{sx} – проекция скорости другого ВС на направление скорости своего ВС:

$$V_{sx} = V_{si} \cdot \cos(\psi - \psi_{si}).$$

Выходами алгоритма **разрешения** конфликта являются рекомендации к разрешению конфликта. Они состоят из рекомендуемых параметров маневра уклонения:

1. ψ^* – рекомендуемое значение угла курса.

2. V^* – рекомендуемое значение скорости.

3.4 Автономный моделирующий комплекс отработки и исследования алгоритмов предотвращения опасных сближений

Исследования алгоритма разрешения конфликтных ситуаций проводились на базе созданного в ГосНИИАС автономного моделирующего комплекса отработки и исследования алгоритмов предотвращения опасных сближений [23]. С его помощью можно производить исследования практически любого группового конфликта с учетом всех наиболее существенных ограничений.

При определении структуры моделирующего комплекса отработки и исследования алгоритмов разрешения конфликтных ситуаций (далее - комплекса моделирования) и его программной реализации использовались следующие основные принципы, правила и допущения:

- Моделируется только горизонтальная часть траекторий маршрута, фазы набора высоты и снижения не имитируются. Моделирование производится в условной прямоугольной (горизонтальной) системе координат. Соответственно положение точки определяется двумя прямоугольными координатами.
- Маршрут представляется как набор прямолинейных участков. Соответственно он задается координатами всех точек перемены маршрута от первой до последней. Должны быть заданы также скорости пролета каждого участка.
- Имитатор управляемого полета ВС включает модель выработки команд управления ВС и модель движения ВС.
- Модель движения включает имитатор автопилота угла курса, а также дифференциальные уравнения движения в принятой горизонтальной системе координат. Динамика автопилота описывается апериодическим звеном с насыщением и определяется двумя параметрами:
 - постоянная времени $T = 1/D_K$,
 - максимально развиваемая угловая скорость ω^{\max} разворота по курсу (соответствующая допустимым значениям угла крена при координированном развороте).
- Модель выработки команд управления формирует команду по углу курса, которая должна обеспечить маневр уклонения от опасного сближения, возвращение на плановую

траекторию и движение в соответствии с ней в случае отсутствия прогнозируемых конфликтов.

- Процесс моделирования управляемого полета конкретного ВС начинается в плановое время пролета первой точки маршрута, начальные условия соответствуют координатам первой точки. Процесс моделирования для конкретного ВС завершается в момент «пролета» им конечной точки маршрута.
- Возможность моделирования различных стратегий управления полетом обеспечивается сменой (или настройкой) моделей выработки команд управления. Модель движения ВС при этом едина.
- Организация различных сценариев конфликтов обеспечивается выбором набора полетов из библиотеки полетов. Полет задается номером из библиотеки и определяется:
 - планом полета (последовательностью точек с их координатами, скоростью пролета каждого участка, временем пролета первого участка),
 - боковым отклонением от плановой траектории,
 - линейной ошибкой в измерении собственных координат,
 - линейной ошибкой в измерении координат других ВС.
- В результате однократного моделирования в соответствии со сформированным сценарием рассчитываются и запоминаются следующие характеристики:
 - зависимость пролета между каждой парой ВС в функции от времени,
 - зависимость времени, оставшегося до пролета между каждой парой ВС в функции от времени,
 - зависимость относительного расстояния между парой ВС в функции от времени,
 - время завершения полета для каждого ВС,
 - все пары ВС, по которым прогнозировался конфликт,
 - все пары ВС, по которым произошло опасное сближение.
 - значения реализовавшихся пролетов для каждой пары ВС.

Структура комплекса обеспечивает возможность проведения сравнительных исследований различных алгоритмов разрешения конфликтов. При этом непосредственной командой

управления (командой для контура стабилизации) при разрешении конфликтов является заданный угол курса.

Имитационная модель собственно системы управления выполнением потоков включает имитаторы выработки команд управления и имитаторы системы стабилизации каждого ВС. Имитаторы выработки команд управления должны в общем случае включать имитаторы наземного сегмента (имитаторы диспетчеров управления) и бортового сегмента (имитатор действия экипажа). Принятая структура имитаторов выработки команд управления обеспечивает простую перестройку имитационной модели на конкретные варианты способов, схем, алгоритмов разрешения конфликтных ситуаций.

Значение принимаемого шага моделирования (и связанного с ним шага выработки команд управления) выбирается в пределах от десятых долей секунды до 20-30 сек.

В качестве показателей безопасности потока ВД и эффективности алгоритмов управления рассматриваются следующие показатели:

- Количество «свершившихся» конфликтов при выполнении полетов со строгим выполнением плановых характеристик,
- Количество разрешенных конфликтов из числа прогнозируемых при выполнении управляемых полетов и реализации алгоритмов предотвращения опасных сближений,
- Суммарное количество разрешенных конфликтов (в том числе появившихся при предотвращении других конфликтов в результате эффекта «домино»),
- Количество и острота реализовавшихся конфликтов.

В качестве показателей эффективности системы и алгоритмов разрешения конфликтных ситуаций при их сравнении используются следующие:

- Изменение полетного времени, связанное с управлением в целях разрешения конфликтов,
- Минимальное реализовавшееся расстояние между двумя конфликтующими ВС (пролет),
- Общее число маневров уклонения по всем полетам из потока ВД.

В качестве показателя устойчивости системы разрешения конфликтов целесообразно использовать показатель относительного увеличения потенциальных (прогнозируемых) конфликтов при управлении.

Разработанный программный комплекс соответствует этим требованиям и предназначен для проведения исследований эффективности и безопасности полетов ВС, в том числе при возникновении сложных конфликтных ситуаций.

Комплекс обладает гибкой структурой, позволяющей проводить его модификацию и расширение: исследовать различные алгоритмы управления ВС при разрешении конфликтных ситуаций, формировать различные сценарии моделирования, использовать произвольные плановые маршруты. Гибкость комплекса обеспечивается принятым методом его проектирования – объектно-ориентированным подходом.

Программный комплекс позволяет решить следующие задачи:

- оценить эффективность выполнения заданного модельного потока воздушного движения,
- оценить влияние изменения структуры и параметров потоков на эффективность их выполнения,
- оценить эффективность применения конкретных алгоритмов управления ВС при разрешении конфликтных ситуаций,
- обосновать формирование и выбор требований по безопасности выполнения полетов ВС при оснащении определенными информационными средствами.

На рисунке 14 показана структурная схема программного комплекса. В его состав входят:

- графический интерфейс пользователя;
- моделирующая программа, реализующая имитационную математическую модель системы управления воздушным движением;
- таблицы баз данных библиотеки плановых маршрутов;

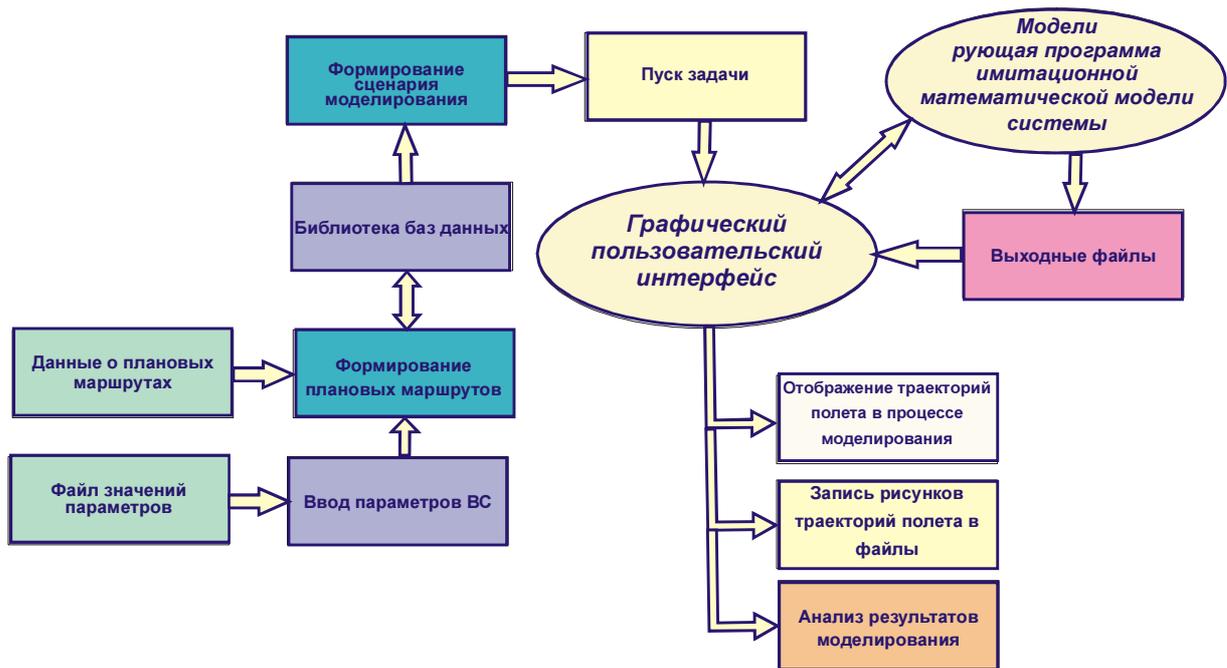


Рисунок 14. Структурная схема программного комплекса

3.4.1 Динамическая модель управляемого движения ВС

В автономном комплексе моделирования в настоящее время реализованы алгоритмы, соответствующие двум методам формирования управляющих воздействий (см. рис.15).

Независимо от реализованного алгоритма в качестве управляющего воздействия (поступающего на вход системы стабилизации) рассматриваются требуемый угол курса $\Delta \psi^*$ и требуемая горизонтальная скорость V^* . На каждом шаге управления $\Delta t_{уп}$ формируются команды управления всеми ВС моделируемого потока ВД. Этот вектор управления поступает в общий блок моделирования движения ВС, где моделируется их движение с заданным шагом интегрирования Δt .

Состояние ВС в текущий момент времени определяется следующими кинематическими параметрами: x, y – координаты ВС в горизонтальной плоскости, V – величина скорости полета, ψ – угол курса.

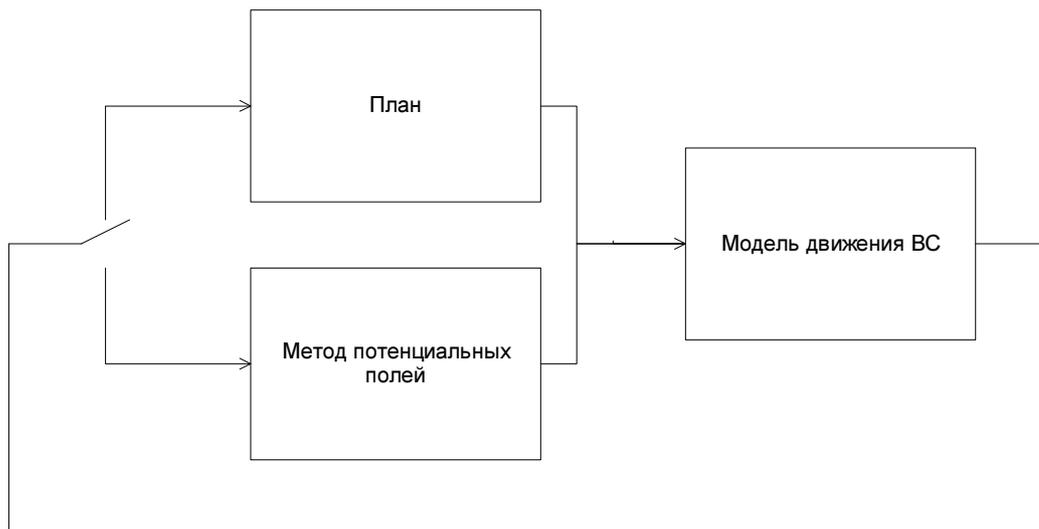


Рисунок 15. Блок-схема имитатора управляемого движения ВС

Текущие значения кинематических параметров движения ВС вычисляются путем интегрирования кинематических уравнений движения ВС методом Эйлера:

$$X(t_{k+1}) = X(t_k) + V_x(t_k) \Delta t;$$

$$Y(t_{k+1}) = Y(t_k) + V_y(t_k) \Delta t;$$

$$\psi(t_{k+1}) = \psi(t_k) + \omega(t_k) \Delta t,$$

где V_x , V_y – проекции вектора скорости ВС на оси прямоугольной системы координат: $V_x(t_k) = V \sin \psi(t_k)$; $V_y(t_k) = V \cos \psi(t_k)$; $\Delta \psi$ - требуемый угол курса (команда управления); ψ - текущий угол курса; $\omega(t_k)$ - угловая скорость поворота вектора скорости ВС. С учетом ограничения $\omega_{огр}$ на располагаемую величину скорости изменения курсового угла, угловая скорость рассчитывается как

$$\omega(t_k) = \begin{cases} D_K \cdot [\Delta \psi - \psi(t_k)] & \text{при } |D_K \cdot [\Delta \psi - \psi(t_k)]| \leq \omega^{\max}; \\ \omega^{\max} \operatorname{sign}(D_K \cdot [\Delta \psi - \psi(t_k)]) & \text{при } |D_K \cdot [\Delta \psi - \psi(t_k)]| > \omega^{\max}; \end{cases}$$

ω_{max} - ограничение по угловой скорости поворота вектора скорости при координированном развороте, рассчитывается как $\omega^{\max} = \frac{g \operatorname{tg} \gamma}{V}$.

3.4.2 Принятые критерии и показатели.

При оценке уровня безопасности (уровня «конфликтности») потока ВД, при проведении исследований по оценке эффективности различных методов и алгоритмов управления и анализе результатов используются следующие показатели безопасности и эффективности:

- *Минимальное расстояние между ВС.* Этот показатель (величина пролета) характеризует достигаемый уровень безопасности и эффективность алгоритма управления. Естественно, успешным можно назвать такое управление, при котором для всех пар ВС обеспечивается минимальное расстояние не меньше заданного радиуса безопасности. В том случае, когда этого обеспечить не удастся, тем не менее, более эффективной можно считать ту стратегию и тот алгоритм, при котором обеспечивается наибольшая величина пролета. Этот показатель вычисляется непосредственно в процессе моделирования.
- *Увеличение длины пройденного пути* по сравнению с длиной невозмущенной траектории. Этот показатель позволяет косвенным образом оценивать эффективность стратегии управления, в том числе дополнительные затраты топлива, связанные с маневром уклонения.
- *Увеличение полетного времени полета* по сравнению с временем полета по невозмущенной траектории. Этот показатель также позволяет косвенным образом оценивать эффективность стратегии управления, в том числе дополнительные затраты топлива, связанные с маневром уклонения.

Эти два показателя могут быть вычислены постфактум путем сравнения результатов моделирования двух вариантов: с разрешением конфликтов и при жестком выдерживании плановой траектории. Реализовавшаяся длина траектории и общее полетное время для каждого варианта вычисляются в процессе моделирования.

- *Общее число пар ВС, по которым произошло «обнаружение» потенциального конфликта* алгоритмами обнаружения систем управления ВС. Вычисление этого показателя должно быть реализовано в процессе моделирования.
- *Общее число состоявшихся конфликтов (нарушений зоны безопасности).* Вычисление этого показателя должно быть реализовано в процессе моделирования.

Очевидно, что для обеспечения возможности вычисления показателей и последующего сравнения результатов моделирование должно проводиться с одинаковыми для различных

стратегий управления (в том числе управление с выдерживанием плановой траектории) параметрами движения ВС.

3.5 Оценка возможностей и особенностей функционирования алгоритмов

Для проведения собственно динамического моделирования процессов управления необходимо предварительно сформировать конкретный модельный плановый "поток ВД", состоящий из некоторого числа ВС, выполняющих полеты в соответствии с заданными маршрутами (планами полетов). Формирование сценария заключается в выборе конкретной комбинации маршрутов полета (из имеющейся библиотеки маршрутов), а также задания ряда характеристик и параметров.

Каждый маршрут характеризуется своим трехмерным планом полета, включающим информацию о количестве ППМ, их координатах, средней скорости полета между ними и расчетного времени пролета каждой точки.

Описание плана полета ниже представляется в виде таблицы со следующими столбцами:

№ - порядковый номер ППМ (количество участков маршрута равно $N-1$, где N – количество точек маршрута);

T – расчетное время пролета i -го ППМ (может быть рассчитано исходя из координат соседних точек и скорости полета на участке);

X , Y – горизонтальные координаты ППМ в км. в принятой СК;

V – скорость полета в точке и на последующем участке в км/ч.

Соответственно план полета имеет следующий вид:

№	T	X	Y	V
1	T_0	X_0	Y_0	V_0
...				
i	T_i	X_i	Y_i	V_i
...				
N	T_k	X_n	Y_n	V_n

Исследование алгоритмов разрешения конфликтных ситуаций в рамках созданного комплекса моделирования проводилось путем организации различных вариантов модельного потока ВД, состоящего из различного числа ВС, выполняющих полеты по разным маршрутам. Выбор конкретной комбинации маршрутов (из библиотеки маршрутов) обеспечивал формирование конкретного сценария для исследования интересующего вопроса.

Исследования алгоритмов проводилось в следующих направлениях:

1. исследование эффективности разрешения конфликтных ситуаций в воздухе методами имитационного моделирования;
2. статистическое моделирование процессов обнаружения и предотвращения опасных сближений;
3. оценка эффективности управления для предельно сложных и размерных множественных конфликтов.

3.5.1 Исследование эффективности разрешения конфликтных ситуаций в воздухе методами имитационного моделирования

При исследовании эффективности разрешения конфликтных ситуаций в воздухе методами имитационного моделирования принято использовать два подхода к формированию моделируемых сценариев. Первая группа сценариев основана на моделировании условных ситуаций, которые на практике может и маловероятны, но являются характерными для анализа особенностей процесса разрешения конфликта с той или иной стороны, либо моделируют наиболее сложные условия для разрешения конфликта. Вторая группа позволяет смоделировать ситуацию, близкую к реальной, соответствующую близкому к реальному потоку ВД. В разработанном комплексе реализована возможность простого формирования (и последующего моделирования) сценариев, относящихся к первой группе.

В качестве основных показателей безопасности и эффективности разрешения конфликтов приняты две величины: расстояние пролета одного ВС относительно другого и величина запаздывания в выполнении планового полета, вызванного разрешением конфликтов.

Ниже приведены некоторые характерные примеры моделирования.

Пример 1. Соответствует случаю полета четырех пар ВС, летящих прямолинейно по траекториям, которые пересекаются в одной точке под углом 90° друг к другу. Каждая из четырех пар ВС летит по одной траектории, но с разной скоростью – одно ВС обгоняет другое. Встреча всех восьми ВС происходит в одной точке. Данный сценарий имитирует предельно усложненный вариант трассового полета. Цель моделирования – исследовать эффективность алгоритма в предельно сложных условиях группового конфликта, когда встреча происходит на встречных и пересекающихся курсах, причем ситуация усугубляется фактами обгона одних ВС другими.

На рисунке 16 сплошными линиями показаны плановые траектории полета ВС, а прерывистыми - реализовавшиеся траектории, окружностями показаны зоны безопасности ВС. На рисунке зафиксированы несколько последовательных положений ВС в порядке развития ситуации. При моделировании ситуация развивалась следующим образом. Практически одновременно с обгоном медленных ВС быстрыми прогнозируются конфликты со встречными ВС. Медленные ВС отклоняются от траектории, при этом вытесняя обгоняющих сильнее в сторону. После пролета места пересечения плановых траекторий и завершения обгона все ВС возвращаются к своим плановым маршрутам. Все конфликтные ситуации разрешаются успешно без нарушения норм эшелонирования.

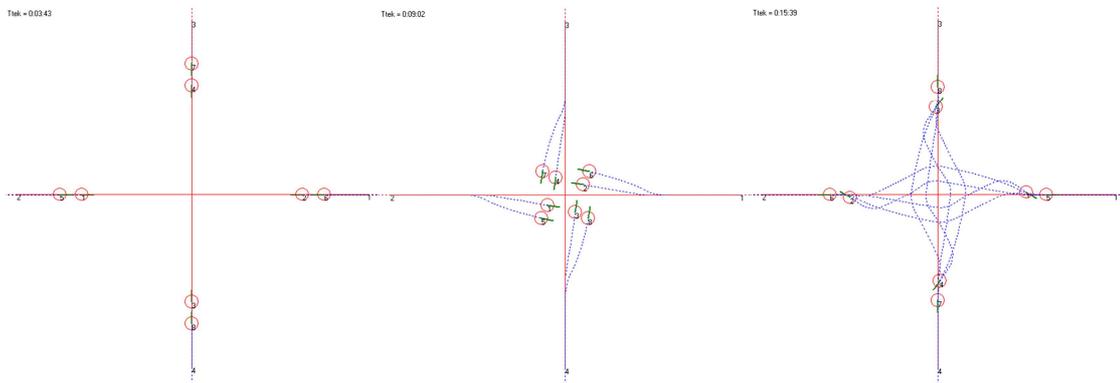


Рисунок 16. Геометрия конфликта

Пример 2. Соответствует сценарию полета двух фронтальных пересекающихся под прямым углом потоков ВД. В каждом потоке все четыре ВС летят с продольными интервалами от 0 до 40 км с одной скоростью и с боковым интервалом, равным 20 км. Этот сценарий имитирует возможную ситуацию предельно сложного и плотного ВД в условиях свободных полетов, характеризующегося серьезными ограничениями для бокового маневрирования.

В ходе выполнения сценария последовательно возникают конфликты. Первый парный конфликт прогнозируется между ВС №2 и 5, далее прогнозируется конфликт между №1-6, при разрешении ВС №6 смещается влево, прижимаясь к возвращающемуся на план ВС №5 и вытесняет его влево от его плановой траектории. Далее ВС №6 возвращению к плановой траектории мешают прогнозируемые опасные сближения с ВС №3 и далее - с ВС №4. Для предотвращения конфликта ВС №6 продолжает лететь на удалении от плановой траектории, ВС №3 незначительно отклоняется влево. И ВС №6 начинает возвращаться на плановую траекторию после прекращения угрозы с ВС №4.

Результаты моделирования при управлении всеми ВС по алгоритму МПП показали высокую эффективность метода. На рисунке 17 (положения ВС для ряда моментов времени) видно, что в данных ситуациях не произошло ни одного опасного сближения и после разрешения конфликта все ВС вернулись на свои плановые траектории.

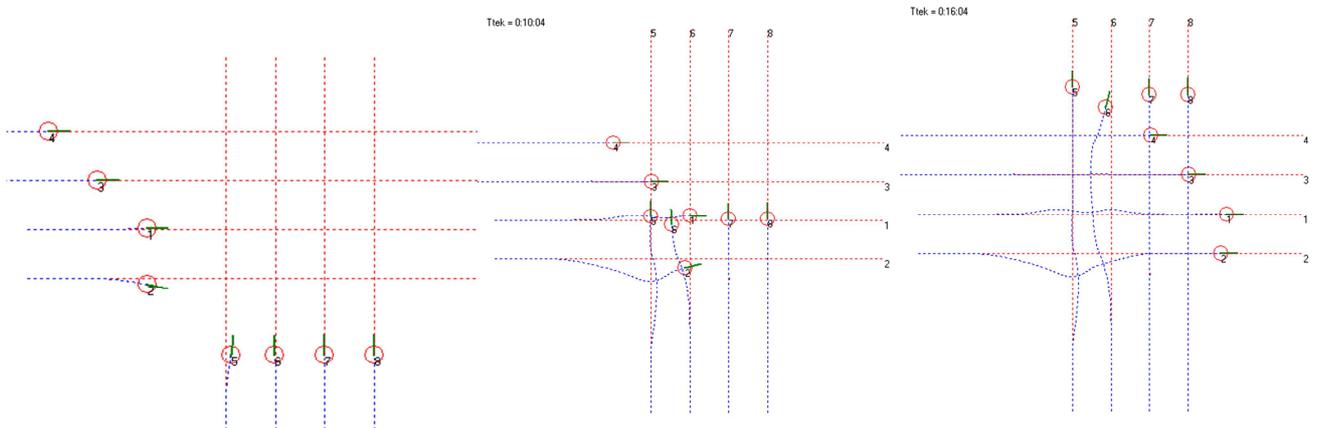


Рисунок 17. Геометрия конфликта

Пример 3. Соответствует полету двух ВС на сходящихся траекториях с близкими скоростями, причем в точку схождения ПППМ они приходят одновременно с одинаковыми скоростями и близкими курсовыми углами. Данный сценарий характерен для трассовых полетов. Целью моделирования была проверка алгоритма в особых ситуациях, где рационально маневрировать скоростью.

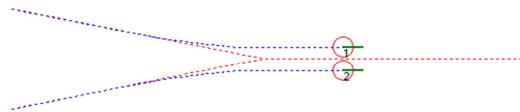


Рисунок 18. Геометрия конфликта

На рисунке 18 показан результат моделирования при управлении только направлением полета. Оба ВС при сближении равномерно удаляются от своей плановой траектории, которая у них совпадает на втором участке, и летят параллельно, соблюдая нормы эшелонирования (что в условиях трассовых полетов неприемлемо). На рисунке 19 показано развитие ситуации при управлении с использованием рекомендаций по изменению скорости полета. В этом случае при

обнаружении опасного сближения ВС №1 замедляется, а ВС №2 ускоряется еще при подлете к ППМ, маневр разведения дополняется отклонением ВС №2 от плановой траектории. Нормы эшелонирования в данном примере соблюдены (а способ обеспечения эшелонирования близок к возможному разрешению конфликта диспетчером УВД).



Рисунок 19. Геометрия конфликта

Проведенное исследование эффективности разрешения конфликтных ситуаций продемонстрировало эффективность предложенных алгоритмов как на сценариях, моделирующих наиболее сложные условия для разрешения конфликта так и на сценариях, имитирующих близкие к реальным условиям.

3.5.2 Статистическое моделирование процессов обнаружения и предотвращения опасных сближений

Моделирование процессов разрешения конфликтных ситуаций проводится только в горизонтальной плоскости, поэтому ошибки по высоте не рассматриваются. Ошибки горизонтальных составляющих скорости определяются как ошибками по величине скорости ΔV так и ошибками по углу курса $\Delta \psi$. Для простоты при моделировании требуемые параметры ошибок целиком обеспечиваются заданием ошибок по величине скорости.

С учетом проведенного ранее анализа точности траекторной информации при моделировании принимались следующие параметры ошибок измерения составляющих координат и скорости:

- СКО при оценке местоположения – 50 м,
- СКО при оценке скорости - 0.1 м/с.

Таким образом, для реализации были выбраны следующие параметры статистического моделирования:

- общее количество реализаций $KP=20$;
- СКО ошибок измерения и точности управления:

- собственных ошибок измерения: $\sigma_x^C=50$ м, $\sigma_y^C=50$ м, $\sigma_v^C=0.1$ м/с.
- флуктуационных ошибок измерения: $\sigma_x^{фл}=10$ м, $\sigma_y^{фл}=10$ м, $\sigma_v^{фл}=0.01$ м/с.
- начального положения $\sigma_x^0=1000$ м, $\sigma_y^0=1000$ м.
- максимальное значение ошибки по времени вылета $T_{max}=120$ с.

В рамках диссертационной работы было проведено статистическое моделирование ряда сценариев (вариантов геометрии множественных конфликтов). Проведенное статистическое моделирование сценариев различной геометрии, включающих от 2-х до 6-ти ВС не показало значительного влияния погрешностей измерения на характер и эффективность управления, для этих сценариев не было выявлено опасных сближений, приводящих к нарушению зон безопасности, несмотря на наличие этих погрешностей.

Однако, с увеличением размерности множественного конфликта влияние ошибок измерения и начальных траекторных отклонений на эффективность управления возрастает. Для иллюстрации ниже приведены результаты статистического моделирования варианта. Моделируемый сценарий соответствует случаю полета четырех пар ВС, летящих прямолинейно по траекториям, пересекающимся в одной точке под углом 90° друг к другу (рисунок 20 – положение ВС в два момента времени при полете по плану). Каждая из четырех пар ВС летит по одной траектории и в одном направлении, но с разной скоростью - одно ВС обгоняет другое. Встреча всех восьми ВС происходит в одной точке. Цель моделирования – исследовать эффективность алгоритма в предельно сложных условиях группового конфликта, когда встреча происходит на встречных и пересекающихся курсах, причем ситуация усугубляется фактами обгона одних ВС другими и наличием ошибок измерения и погрешностей выдерживания плановой траектории (что приводит к нарушению геометрической симметричности сценария).

Планы полета каждого из восьми ВС следующие:

ВС №1

№	T	X	Y	V
1	0:00:00	-100	0	600
2	0:20:00	100	0	600

ВС №5

№	T	X	Y	V
1	0:00:00	-120	0	720
2	0:20:00	120	0	720

ВС №2

№	T	X	Y	V
1	0:00:00	100	0	600
2	0:20:00	-100	0	600

ВС №6

№	T	X	Y	V
1	0:00:00	120	0	720
2	0:20:00	-120	0	720

BC №3

№	T	X	Y	V
1	0:00:00	0	-100	600
2	0:20:00	0	100	600

BC №7

№	T	X	Y	V
1	0:00:00	0	120	720
2	0:20:00	0	-120	720

BC №4

№	T	X	Y	V
1	0:00:00	0	100	600
2	0:20:00	0	-100	600

BC №8

№	T	X	Y	V
1	0:00:00	0	-120	720
2	0:20:00	0	120	720

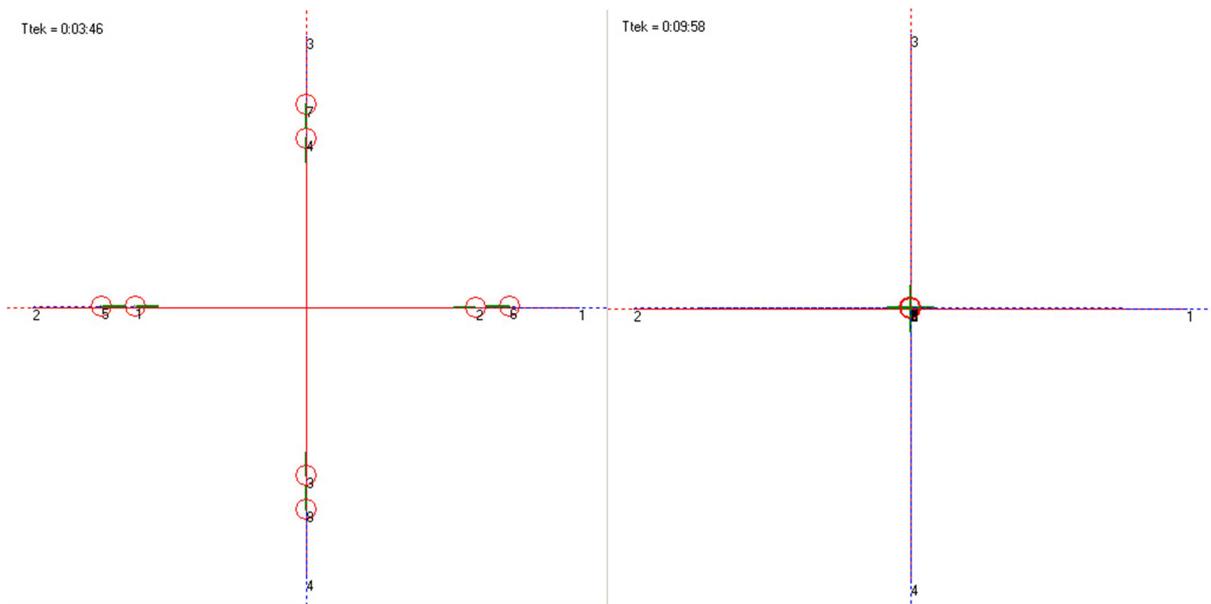


Рисунок 20. Геометрия конфликта. Полет по плану

Результаты проведенного сеанса статистического моделирования, состоящего из 20 реализаций представлены в таблице 1. В ней по каждой реализации указаны суммарное увеличение полетного времени $\Sigma\Delta T$ (в формате мм:сс) и пройденного пути $\Sigma\Delta L$ (в км) по сравнению с их плановыми значениями, количество спрогнозированных парных конфликтов $N_{пр}$, количество свершившихся парных конфликтов (зафиксированных нарушений зон безопасности) $N_{конф}$.

Таблица 1. Результаты статистического моделирования

№ реал	$\Sigma \Delta T$	$\Sigma \Delta L$, км	Nпр	Nконф
1	03:17	34.78	28	0
2	12:51	130.07	18	0
3	05:18	55.97	28	0
4	05:36	61.53	27	0
5	13:46	145.93	16	0
6	08:44	91.18	22	0
7	13:46	149.26	22	0
8	03:19	34.75	28	0
9	09:48	103.79	22	0
10	09:10	100.31	17	1
11	03:28	37.10	28	0
12	07:14	77.01	28	0
13	12:17	130.50	23	0
14	08:38	94.10	21	0
15	07:19	78.60	23	0
16	10:18	115.57	23	0
17	12:39	137.29	19	0
18	10:38	113.67	18	0
19	09:51	104.16	25	1
20	14:17	155.80	19	0

Из анализа данных по реализациям видно, что значения показателей эффективности управления значительно изменяются от реализации к реализации. Суммарное увеличение полетного времени изменяется от 3 до 14 минут, суммарное увеличение пройденного пути изменяется от 35 до 156 км, количество прогнозируемых в процессе выполнения полетов парных конфликтов меняется от 16 до 28. Это указывает на возможность значительного влияния случайных факторов и погрешностей на характеристики процесса разрешения опасных сближений для такого многомерного и симметричного сценария.

В таблице 2 представлены статистические характеристики (математическое ожидание m_x , СКО σ_x , максимальное и минимальное значения) для указанных четырех характеристик эффективности управления, полученные в результате обработки результатов моделирования по всем реализациям.

Таблица 2. Статистические характеристики показателей эффективности

	m_x	σ_x	Max	Min
ΔL , км	97.568	38.527	155.8	34.75
ΔT , с	546	215.362	854	197
Nпр	22.75	4.089	28	16
Nконф	0.10	0.09	1	0

Анализ результатов показывает в целом успешное предотвращение опасных сближений, в то же время в двух реализациях из 20 наблюдается по одному нарушению зон безопасности. Ниже представлен результат более подробного анализа процессов управления в одной из этих реализаций (№10).

Геометрия разрешения конфликта представлена на рисунке 21 (с указанием положения ВС для ряда моментов времени).

Результаты моделирования представлены в таблице 3 (здесь и далее в таблицах результатов приводятся пройденный путь L (км) и полетное время T (в формате чч:мм:сс), при управлении по плану, пройденный путь L , полетное время T , минимальные расстояния пролета для каждого ВС при управлении выбранным методом и показатели эффективности управления - увеличение пути ΔL и полетного времени ΔT по сравнению с плановыми значениями; интегральные показатели – суммарное увеличение пути и времени полета).

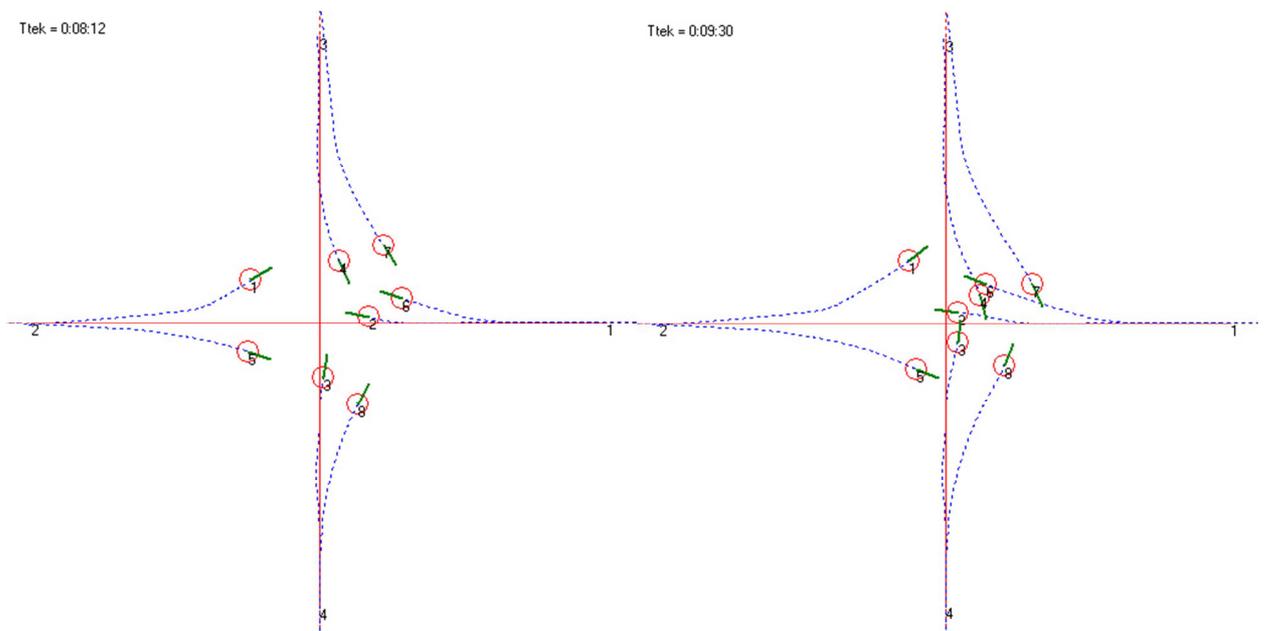


Рисунок 21. Геометрия разрешения конфликта реализация №10

Из приведенных результатов видно, что при таком варианте реализовавшихся ошибок измерения и отклонений система управления, основанная на рассматриваемом алгоритме, не в полной мере справилась с поставленной задачей - произошло опасное сближение, между ВС№4 и ВС№6 до 4.1 км (рисунок 21, момент времени 0:09:30).

Таблица 3. Результаты моделирования (реализация №10)

ВС №	План		метод МПП				
	L, км.	T	L	T	Dmin	ΔL	ΔT
1	200.33	0:20:00	227.96	0:22:49	10.9	27.63	0:02:49
2	200.33	0:20:00	204.05	0:20:22	9	3.72	0:00:22
3	200.33	0:20:00	202.05	0:20:11	9	1.72	0:00:11
4	200.33	0:20:00	207.04	0:20:41	4.1	6.71	0:00:41
5	240.4	0:20:00	248.85	0:20:43	10.8	8.45	0:00:43
6	240.4	0:20:00	245.4	0:20:26	4.1	5	0:00:26
7	240.4	0:20:00	255.95	0:21:18	10.7	15.55	0:01:18
8	240.4	0:20:00	271.93	0:22:40	10.7	31.53	0:02:40
						Σ 100.31	0:09:10

Поскольку исходной причиной нарушения зон безопасности ВС в этих реализациях является "неблагоприятное" сочетание случайных факторов, необходимо произвести более детальный анализ. В таблице 4 представлены систематические ошибки измерения по каждой составляющей вектора состояния R и отклонения начальных положений ВС относительно своих плановых траекторий.

Таблица 4. Величины ошибок измерения и отклонения в реализации №10

№ВС	$\Delta X, м$	$\Delta Y, м$	$\Delta V, м/с$	$\Delta T_0, с$	$\Delta X_0, м$	$\Delta Y_0, м$
1	40.189	67.135	-0.057	10.7	-754.932	-1251.35
2	43.916	-102.158	0.035	1.9	-1046.05	-86.741
3	-10.114	-77.414	-0.072	5.5	306.802	-397.756
4	26.795	-23.102	-0.062	14.5	-545.592	-206.283
5	73.31	19.515	-0.043	5.4	-654.27	1298.867
6	31.12	-31.299	-0.006	28.8	157.479	-494.591
7	-64.556	44.263	-0.07	9.9	-700.658	-1204.99
8	-76.326	51.024	-0.085	19.8	58.554	-1097.93

Нарушение симметричности в начальных условиях (свойственных плановым данным) приводит к неблагоприятному развитию ситуации в районе точки встречи. Алгоритм, основанный на методе потенциальных полей, в таких сложных многомерных ситуациях может не справиться. Нарушение зон безопасности может происходить из-за неблагоприятного наложению сил отталкивания, действующих на ВС. Влияние начальных отклонений ВС от плановых характеристик проявляется в изменении дальнейших траекторий полета (траекторий маневров уклонения), что также сказывается на увеличении пройденного пути и полетного времени.

Использование режима статистического моделирования позволило провести более глубокий анализ эффективности управления с учетом случайных погрешностей и выявить существенное увеличение их влияния с ростом размерности множественного конфликта.

Проанализировано функционирование алгоритма децентрализованного управления, основанного на методе потенциальных полей при разрешении сложного множественного конфликта. Выявлено, что в этих условиях наблюдается существенное влияние случайных факторов на характер и эффективность работы алгоритма предотвращения опасных сближений (вплоть до появления реализаций, характеризующихся нарушением зон безопасности). Целесообразно провести исследование в предельно сложных, размерных ситуациях.

3.5.3 Оценка эффективности управления для предельно сложных и размерных множественных конфликтов

Проведенные исследования оценки эффективности алгоритма разрешения конфликтных ситуаций показали высокую эффективность работы даже в предельно сложных случаях. Однако, статистическое моделирование выявило ситуации, с которыми алгоритм может не справиться. Целью данного исследования является выявление причин возникновения таких случаев, а также выработка предложений по их преодолению.

Моделируемый сценарий соответствует случаю симметричного группового конфликта, в который включены шесть ВС, летящие с одинаковой скоростью по прямолинейным траекториям, проходящим через начало системы координат и повернутым относительно друг друга равномерно на угол 60° . Планы полета всех шести ВС пересекаются одновременно в одной точке.

Планы полета следующие:

ВС №1

№	T	X	Y	V
1	0:00:00	-100	0	600
2	0:20:00	100	0	600

ВС №4

№	T	X	Y	V
1	0:00:00	50	-86,6	600
2	0:19:59	-50	86,6	600

ВС №2

№	T	X	Y	V
1	0:00:00	100	0	600
2	0:20:00	-100	0	600

ВС №5

№	T	X	Y	V
1	0:00:00	-50	86,6	600
2	0:19:59	500	-86,6	600

BC №3

№	T	X	Y	V
1	0:00:00	50	86,6	600
2	0:19:59	-50	-86,6	600

BC №6

№	T	X	Y	V
1	0:00:00	-50	-86,6	600
2	0:19:59	50	86,6	600

Для усложнения условий работы алгоритма была нарушена симметричность геометрии сценария: для части BC (№3,5,6) заданы следующие начальные положения, отличающиеся от плановых:

№ BC	3	4	6
X ₀ , км	40	-40	-60
Y ₀ , км	80	80	-90

Рисунок 22 показывает, что из-за нарушения симметричности в начальных условиях BC пролетают точку пересечения плановых траекторий в разное время, несколько смещаются "точки встречи" отдельных пар BC.

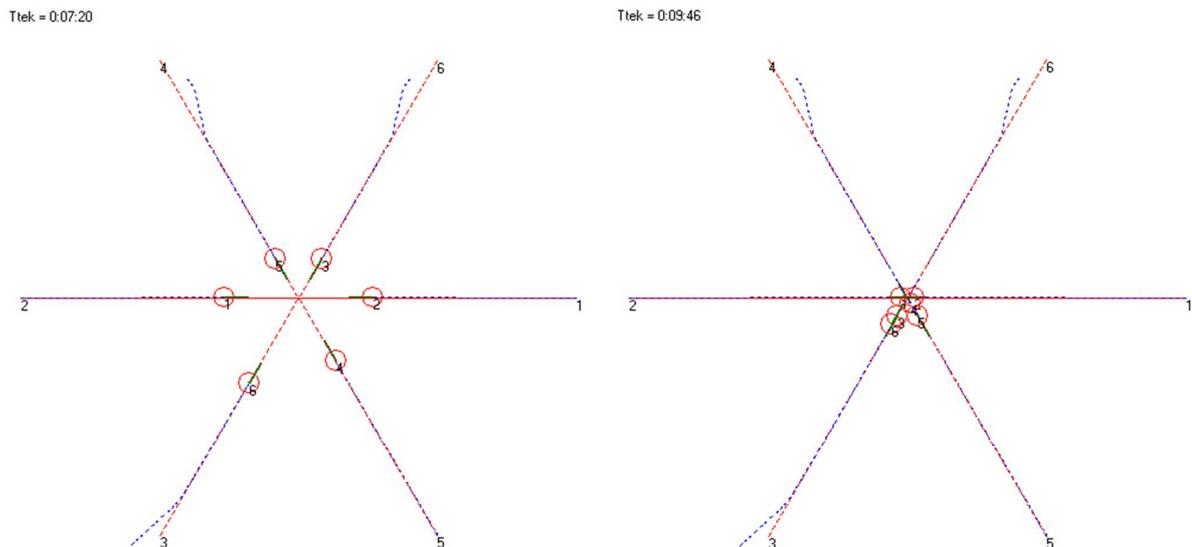


Рисунок 22. Геометрия конфликта. Полет по плану.

Моделирование с управлением BC методом потенциальных полей показало, что происходит недопустимое сближение BC №3 и BC№5. (см. рис. 23 при Tтек=0:09:29).

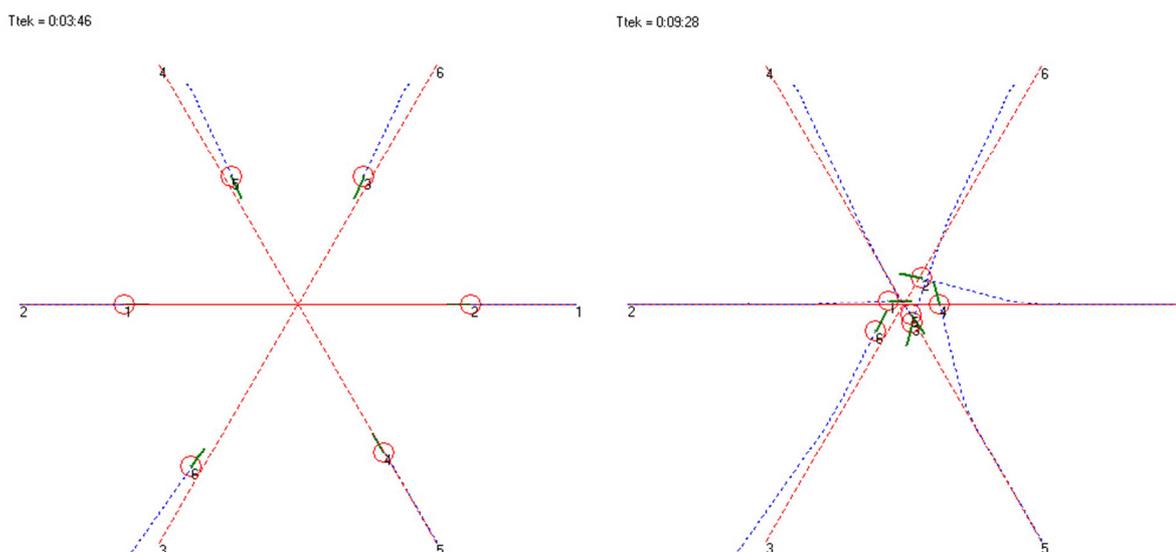


Рисунок 23. Геометрия конфликта. Управление МПП.

Причина заключается в высокой плотности ВС в районе точки встречи и неблагоприятной "интерференции" сил отталкивания, действующих на эти ВС. Результаты моделирования приведены в таблице 5.

Таблица 5. Результаты моделирования

ВС №	План		метод ПП		
	L, км.	T	L	T	Dmin
1	200.33	0:20:00	200.70	0:20:02	8.8
2	200.33	0:20:00	202.22	0:20:11	9.9
3	190.42	0:19:00	191.23	0:19:05	2.8
4	200.33	0:19:59	202.73	0:20:14	10.1
5	190.42	0:19:00	191.16	0:19:04	2.8
6	209.26	0:20:53	208.82	0:20:50	8.8
1			0.37	0:00:02	
2			1.89	0:00:11	
3			0.81	0:00:05	
4			2.4	0:00:15	
5			0.74	0:00:04	
6			-0.44	-0:00:03	
			Σ	5.77	0:00:34

Для уверенного разрешения множественного конфликта этого сценария можно предложить увеличить параметры зон безопасности алгоритма. Увеличив эти значения с 8 км. до 16 км. для зоны безопасности и от 12 км. до 24 км. для тревожной зоны, нарушения защитных зон не наблюдаться (см.рис. 24).

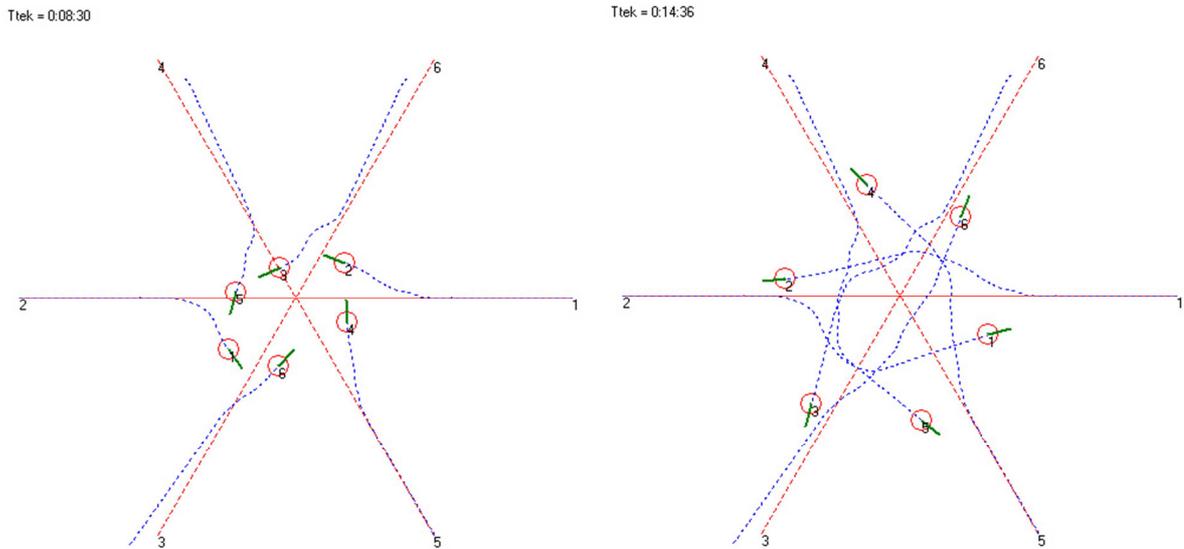


Рисунок 24. Геометрия конфликта. Управление МПП с измененными параметрами алгоритма. ($d_0=16$ км, $d_1=24$ км)

В целом по результатам моделирования предельно сложных и размерных сценариев множественных конфликтов можно прийти к следующим выводам. При предельной плотности воздушного движения возможны ситуации, когда алгоритм управления при выбранных ранее параметрах не обеспечивает выполнение требований по безопасности. Выходом может быть увеличение параметров продольного и бокового эшелонирования, производимое при диагностике сложного конфликта и разрешении (рассредоточение области разрешения множественного конфликта). Ценой за это увеличение будет, увеличение пройденного пути и полетного времени.

3.5. Выводы

1. Проведен обзор методов обнаружения и разрешения опасных сближений. В качестве метода обнаружения опасных сближений применяется алгоритм, основанный на номинальном подходе. Алгоритмы разрешения конфликтов, основан на подходах и идеях метода потенциальных полей.
2. Приведено описание алгоритмов, синтезированных на основе предложенных методов.
3. Для проведения исследований алгоритмов разработан автономный моделирующий комплекс отработки и исследования алгоритмов предотвращения опасных сближений.

4. Созданные алгоритмы обнаружения и разрешения опасных сближений обеспечивают пролет одного ВС относительно другого на расстоянии не менее 8 км, в условиях сложных множественных конфликтов, включающих большое (до 8-10 и более) количество ВС и при предельно сложной геометрии конфликта (пересечение двух плотных потоков ВС, схождение в одной точке и в одно время ВС, летящих в разных направлениях, конфликт с сочетанием пересечений и обгонов нескольких ВС в одной точке и т.д.). Команды управления формируются в автономном режиме, без согласования с другими участниками ВД.

5. Предложенные алгоритмы по своей вычислительной сложности реализуемы даже с учетом современной вычислительной оснащенности борта. Проведенные исследования вычислительной загрузки продемонстрировали, что программная составляющая функции самоэшелонирования может быть реализована в составе программного обеспечения бортовой авионики ВС.

Глава 4. Решение вопросов практического применения предлагаемого подхода

4.1 Включение программной процедуры обнаружения и предотвращения опасных сближений в состав программного обеспечения перспективного самолета.

4.1.1 Отображение рекомендаций алгоритма на кабинном дисплее

Одной из целей практического применения является поиск наиболее подходящих для восприятия пилотов вариантов отображения конфликтов на кабинном дисплее полетной информации (CDTI – Cockpit Display of Traffic Information).

За основу отображаемых символов окружающих ВС и параметров конфликта были приняты символы, предложенные и используемые в отчете компании NLR [24] (см.рис.25), на который ссылаются стандарты RTCA [4]. Результаты работы алгоритмов обнаружения и выработки рекомендаций представляются пилоту на навигационном дисплее для дальнейшего использования при принятии решений.

Здесь "шевронами" обозначены окружающие ВС. В формулярах над ними информация о высоте, скорости, рейсе, направлении вертикальной скорости. Конфликтующий самолет окрашен в красный цвет, а в его формуляр добавлена информация о времени до встречи. Зона опасного сближения отмечена красной пунктирной окружностью с центром предполагаемого нахождения конфликтующего самолета в прогнозируемое время максимального сближения. Красная дуга на курсовой шкале отмечает зону "запретных" курсовых углов, усугубляющих конфликт, светло-коричневой дугой – курсы, на которых могут возникнуть конфликты с другими ВС. Рекомендуемый курсовой угол отмечен пунктирной розовой прямой. Другие символы прямого отношения к конфликту не имеют.

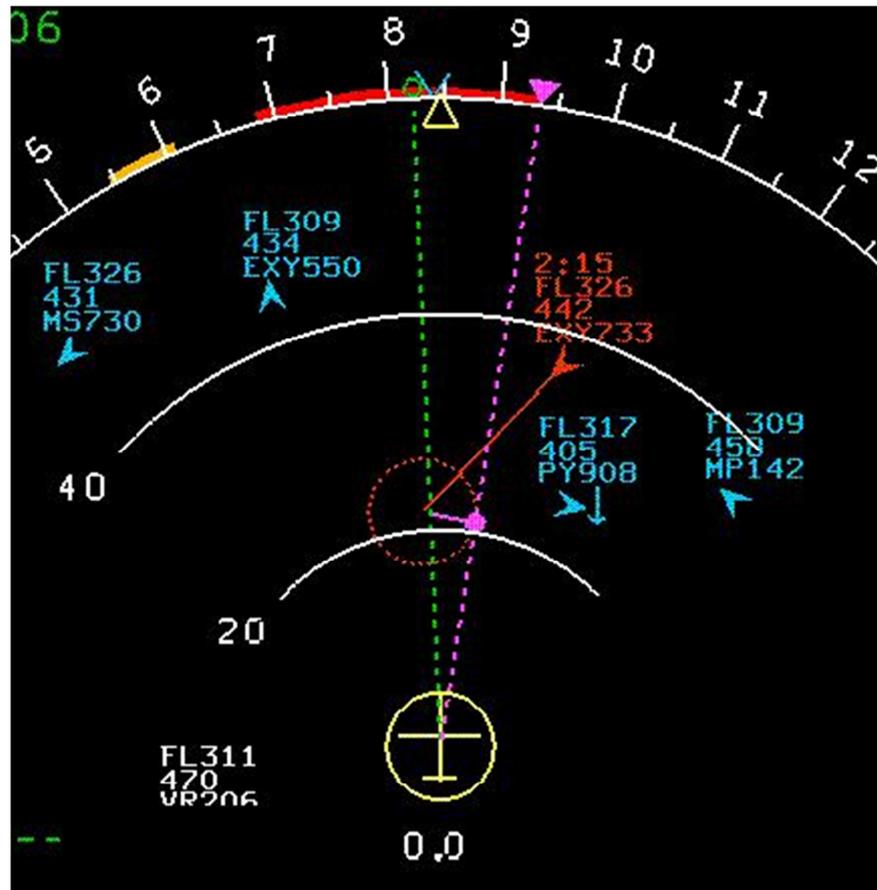
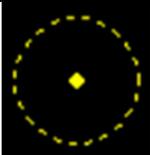


Рисунок 25. Символы ВС и параметров конфликтной ситуации NLR

В таблице 6 представлены выбранные графические примитивы и возможные варианты индикации предупреждающей информации о вероятном конфликте на экране навигационного дисплея.

Представляет интерес рассмотреть "картинку" индикации при наличии множественного конфликта и других вариантах прорисовки зоны конфликта. Предложенные примитивы реализованы на прототипе навигационного дисплея «своего» ВС. Координаты центра окружности опасного сближения совпадают с координатами конца траектории конфликтующего самолета (см.рис. 26). Здесь, как и в упомянутом отчете NRL, прогнозируется положение опасной зоны вокруг «чужого» самолета.

Таблица 6. Примитивы для навигационного дисплея для индикации конфликтов

Примитив	Тип	Цвет	Тип линии	Толщина линии	
Зона опасного сближения	Окружность радиусом 8-9км (5 морских миль)	желтый, красный	пунктир	1 пиксель	
Прогнозируемая траектория конфликтующего ВС	линия	желтый	пунктир	1 пиксель	
Символы «целевого» самолета	Шеврон, направлен острым углом по вектору скорости	светло-голубой, желтый, красный	сплошная	1 пиксель	
Формуляр конфликтующего ВС	время до сближения, идентификатор, высота в км, направление вертикальной скорости «↑», «↓», «-»;	желтый, красный	текст	1 пиксель	

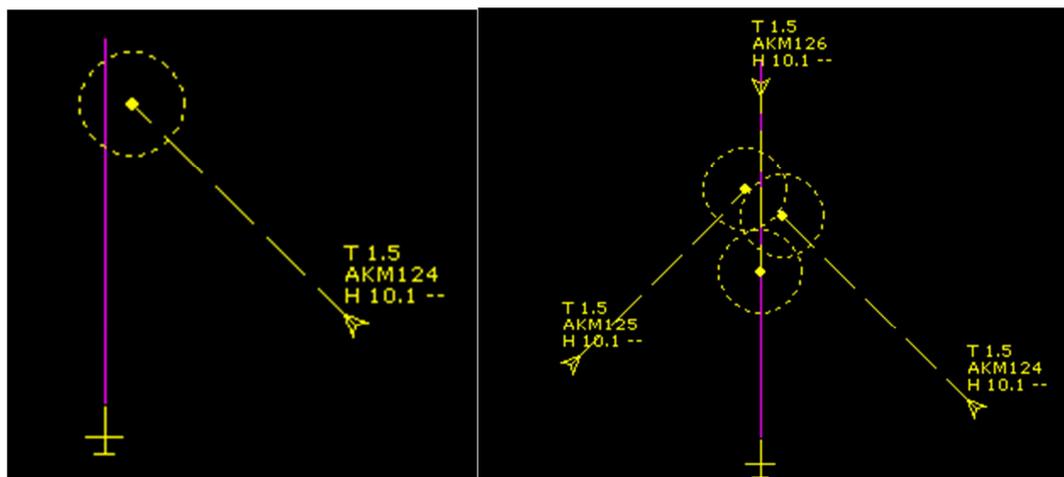


Рисунок 26. Вид парного (слева) и множественного (справа) конфликтов

Предложенные графические примитивы были использованы при индикации конфликтных ситуаций на прототипе кабины перспективного ВС. На рисунке 27 представлено отображение воздушной обстановки в полете на момент прогноза опасного сближения. В центре окружности в форме треугольника указано расположение своего ВС. Стрелками указаны окружающие ВС на интервале высот между соседними эшелонами полета. В зафиксированной на рисунке геометрии расположения ВС прогнозируется нарушение нормы эшелонирования между своим ВС и рейсом TSO33. Прямо по курсу от своего ВС пунктиром отображена окружность радиусом 9 км (что соответствует нормам эшелонирования) с центром в месте прогнозируемого конфликта. Центр этой окружности пунктирной линией соединен с символом конфликтующего ВС, рядом с которым в рамке высвечен формуляр с характеристиками прогнозируемой конфликтной ситуации. В верхней строчке формуляра указано время до нарушения норм безопасности (04:21), во второй разность высот в десятках метров (+00), в третьей код конфликтующего ВС. На шкале курсов (окружность самого большого радиуса) жирными линиями выделены два диапазона закрытых углов курса, полет с которыми будет приводить к конфликтам (113°-138°) и (152°-161°). Сверху в правом углу диапазона закрытых углов курса символом «заданного курса»  показано рекомендуемое значение курса (161°) для уклонения от опасного сближения.



Рисунок 27. Модель навигационного дисплея кабины

Таким образом, пилоту выдается *предупреждение* об опасности нарушения норм эшелонирования при полете с текущим курсом. Показаны диапазоны курсовых углов, с которыми либо продолжится текущий конфликт, либо появятся новые. Информация об *обнаруженном* прогнозе конфликта выводится как графически, в виде места опасного сближения и окружности зоны безопасности, так в виде параметров опасного сближения в формуляре. Для помощи в принятии решения по уклонению, на шкале курсов символ «заданного курса» перемещается на рекомендуемое алгоритмом *предотвращения* опасного сближения значение.

Для наглядности на рисунке показана достаточно простая воздушная обстановка, однако было проведено моделирование и сложных сценариях с множественными потенциальными конфликтами ВС с другими ВС и опасными метеобластями, когда успешное самоэшелонирование пилотом без помощи системы самоэшелонирования становится практически невозможным.

4.1.2 Требования к процедуре самоэшелонирования в составе бортовой вычислительной системы

Программная реализация процедуры самоэшелонирования получила название «Функция обнаружения и разрешения опасных сближений ВС с другими ВС в воздухе» (КПО ФОРОС). Разработка требований к модулю функционального ПО проводилось в соответствии с требованиями КТ-178В. Документ представляет собой проект рабочей версии "Требований к компоненту программного обеспечения функции ИМА "Обнаружение и разрешение опасных сближений ВС с другими ВС в воздухе".

Создан полный пакет документов включающий следующие документы жизненного цикла ПО:

- Описание проекта ПО;
- Спецификация требований к компоненте ПО;
- План сертификации ПО;
- План разработки ПО;
- План управления конфигурацией ПО;
- План гарантии качества ПО;
- План верификации ПО;
- Каталог среды жизненного цикла ПО;
- Исходный код ПО;
- Результаты верификации.

В рамках разработки требований сформулированы системные, функциональные и эксплуатационные требования к КПО «ФОРОС».

4.1.3 Входной и выходной информационный интерфейсы

Состав входных и выходных данных для КПО «ФОРОС» приведены в приложении 2 диссертационной работы.

Входной интерфейс КПО должен получать информацию от следующих источников:

- бортовой приемник АЗН-В (ИНТРФ:АЗН.ФОРОС),
- подсистема самолетовождения (ИНТРФ:ПЛП.ФОРОС),

- бортовой приемник TIS-B (ИНТРФ:МЕТ.ФОРОС).

Интерфейсы выходных данных должны передавать информацию для следующим блокам:

- индикации конфликтных ситуаций (ИНТРФ:ФОРОС.ИКС),
- документирования (ИНТРФ:ФОРОС.ДОК).

4.2 Предложения по изменению и уточнению правил использования воздушного пространства и управления воздушным движением, связанных с реализацией децентрализованного и смешанного управления

В этом разделе приведены определения и правила использования ВП, необходимые для реализации децентрализованного и смешанного управления воздушным движением. Эти предложения сделаны на основе анализа международных нормативных документов.

В соответствии с нормативными документами [2, 3, 25] функции обнаружения и разрешения конфликтов на борту ВС обеспечивает бортовая функция управления конфликтами ACM (Airborne Conflict Management).

Самозешелонированием считается ситуация, в которой пользователь воздушного пространства самостоятельно выполняет функции эшелонирования относительно одного или более источников опасности. На борту ВС самозешелонирование обеспечивает функция разрешения конфликтов в воздухе ACM (Airborne Conflict Management).

При полном самозешелонировании пользователь воздушного пространства выполняет функции эшелонирования относительно всех источников опасности. В этом случае обслуживание по обеспечению эшелонирования не требуется, однако могут задействоваться другие службы ОрВД, включая службы стратегического управления конфликтными ситуациями.

Приведем возможные изменения в организации воздушного движения:

1) Предоставление возможности самозешелонирования на основе бортовых средств, включая бортовое наблюдение, обеспечиваемое ADS-B, и передачи ответственности за эшелонирование пилоту в установленном воздушном пространстве.

2) Самозешелонирование на основе бортовых средств: летные экипажи обеспечивают выдерживание интервалов эшелонирования своих воздушных судов относительно всех

воздушных судов, находящихся поблизости. Диспетчер не несет ответственности за эшелонирование.

Первые виды эксплуатационных применений ADS-B в интересах эшелонирования предназначены для использования в океаническом воздушном пространстве и воздушном пространстве с низкой плотностью движения.

К числу характерных видов применения самоэшелонирования на основе бортовых средств относятся:

а) самоэшелонирование на основе бортовых средств в воздушном пространстве, контролируемом органами УВД;

б) самоэшелонирование на основе бортовых средств в выделенном воздушном пространстве на маршруте;

с) самоэшелонирование на основе бортовых средств в воздушном пространстве на маршруте в условиях выполнения полетов воздушными судами с различным составом бортового оборудования;

д) свободный полет по океаническим трекам.

Для начального применения функции самоэшелонирования выбрано автономное воздушное пространство, которое является выделенным воздушным пространством на маршруте полета ВС.

Автономное воздушное пространство. В автономном воздушном пространстве все воздушные суда должны иметь оборудование АСМ и возможность самостоятельного обеспечения эшелонирования в характерных условиях конкретной операционной зоны. Система АСМ и операторы воздушного судна должны быть в состоянии осуществлять переход к выполнению полетов по различным правилам без указаний со стороны диспетчерских служб.

Каждое отдельно взятое воздушное судно транслирует информацию о координатах и намерениях, включая все решения по конфликтным ситуациям. Другие пользователи действуют на основании этой информации. Диспетчерские службы, управляя воздушным движением, могут предоставлять другие услуги, например, управление потоком воздушного движения и оказание помощи в переходе из одного воздушного пространства в другое.

В соответствии с DO-289 [3] выполнение процедуры самоэшелонирования (АСМ) для автономного ВП делится на следующие стадии:

- 1) Пуск системы АСМ.
- 2) Настройка на полет с поддержкой АСМ.
- 3) Выполнение полета с работающей АСМ.
- 4) Завершение полета с поддержкой АСМ.

Участниками процедуры АСМ являются:

- 1) Экипаж ВС.
- 2) Диспетчер УВД.

Экипаж ВС выполняет следующие действия на каждой стадии выполнения процедуры самоэшелонирования.

1) Стадия пуска системы АСМ:

- включение и функциональный контроль оборудования АСМ.

2) Стадия настройки на полет с поддержкой АСМ

- запрос и получение разрешения от диспетчера УВД на полет с поддержкой АСМ,
- ввод исходных данных,

3) Стадия исполнения:

- периодический контроль за окружающим трафиком по экрану кабинного дисплея,
- при возникновении предупреждения низкого уровня (привлечение внимания к вероятному усложнению воздушной обстановки) повышение внимания к потенциальному «нарушителю», анализ и прогнозирование обстановки, планирование возможных действий при дальнейшем усложнении обстановки,

- при возникновении предупреждения среднего уровня (растет вероятность нарушения норм эшелонирования) своевременный выбор и, при необходимости, выполнение маневра и доклад диспетчеру о решении выполнения маневра,

- при возникновении предупреждения высшего уровня (растет вероятность опасного сближения) немедленное выполнение маневра, и, как можно более быстрое оповещение диспетчера о маневре.

4) Стадия завершения:

- доклад диспетчеру УВД о завершении маневра, разрешении конфликта и продолжении полета по плану,

- при выходе из зоны автономных полетов передача ответственности за эшелонирование диспетчеру.

Диспетчер УВД выполняет следующие действия на каждой стадии выполнения процедуры самоэшелонирования.

1) Стадия пуска системы АСМ:

- не участвует.

2) Стадия настройки на полет с поддержкой АСМ:

- определяет границы зоны свободных полетов для автономного/неконтролируемого воздушного пространства.

- выдает разрешение и подтверждает нормы эшелонирования для входа в автономное/неконтролируемое воздушное пространство.

3) Стадия выполнения полета с работающей АСМ:

- контролирует зону ответственности в штатном режиме, при необходимости может связываться с экипажем.

4) Этап завершение полета с поддержкой АСМ:

- Принимает на себя ответственность за обеспечение эшелонирования.

- Возобновляет стандартную рабочую процедуру.

Список используемых CPDLC сообщений, при выполнении процедуры самоэшелонирования приведен в приложении 3.

4.3 Исследования по оценке эффективности применения процедуры в составе полунатурного комплекса моделирования ИМА

В рамках диссертационной работы было проведено полунатурное моделирование с применением разработанной функции самоэшелонирования. Были поставлены следующие цели проведения исследования:

- 1) Функциональная апробация выполнения процедуры эшелонирования в автономном воздушном пространстве в условиях потенциального множественного конфликта.
- 2) Демонстрация взаимодействия пилота и диспетчера во время выполнения процедуры АСМ.

Инструментом проведения исследований бортовых функций CNS является разработанный в ГосНИИАС Комплексный Исследовательский Стенд полунатурного имитационного моделирования систем Управления Воздушным Движением (КИС УВД). Стенд КИС УВД предусматривает как исследование бортовых функций с набором статистики и проведением множества экспериментов в режиме ускоренного времени (fast time simulation), так и демонстрацию использования бортовых функций с использованием человека в контуре.

Основной целью проектирования стенда КИС УВД являлось создание инструмента проведения комплексных исследований, прежде всего, в интересах отработки новой функциональности борта, демонстрации применения, анализа характеристик человеко-машинного интерфейса (как пилота, так и диспетчера) и оценки потенциальной выгоды применения.

Стенд предназначен для проведения моделирования в интересах исследований новой функциональности борта, новых технических и программных средств поддержки работы экипажа, новых методов и способов выполнения эффективных и безопасных полетов. В состав стенда интегрируется макет кабины перспективного воздушного судна ДКС ИМА 9/11 разработки Пилотажно-исследовательского Центра (ПИЦ, г. Жуковский) и макет кабины самолета МС-21 разработки ГосНИИАС. Наличие в составе стенда моделей всех участников планирования и управления воздушным движением, позволяет использовать его как инструмент для оценки перспективных концепций, методов, способов, технологий организации ВД и их компонент, а также оценок по соответствию им бортового оборудования перспективных ВС.

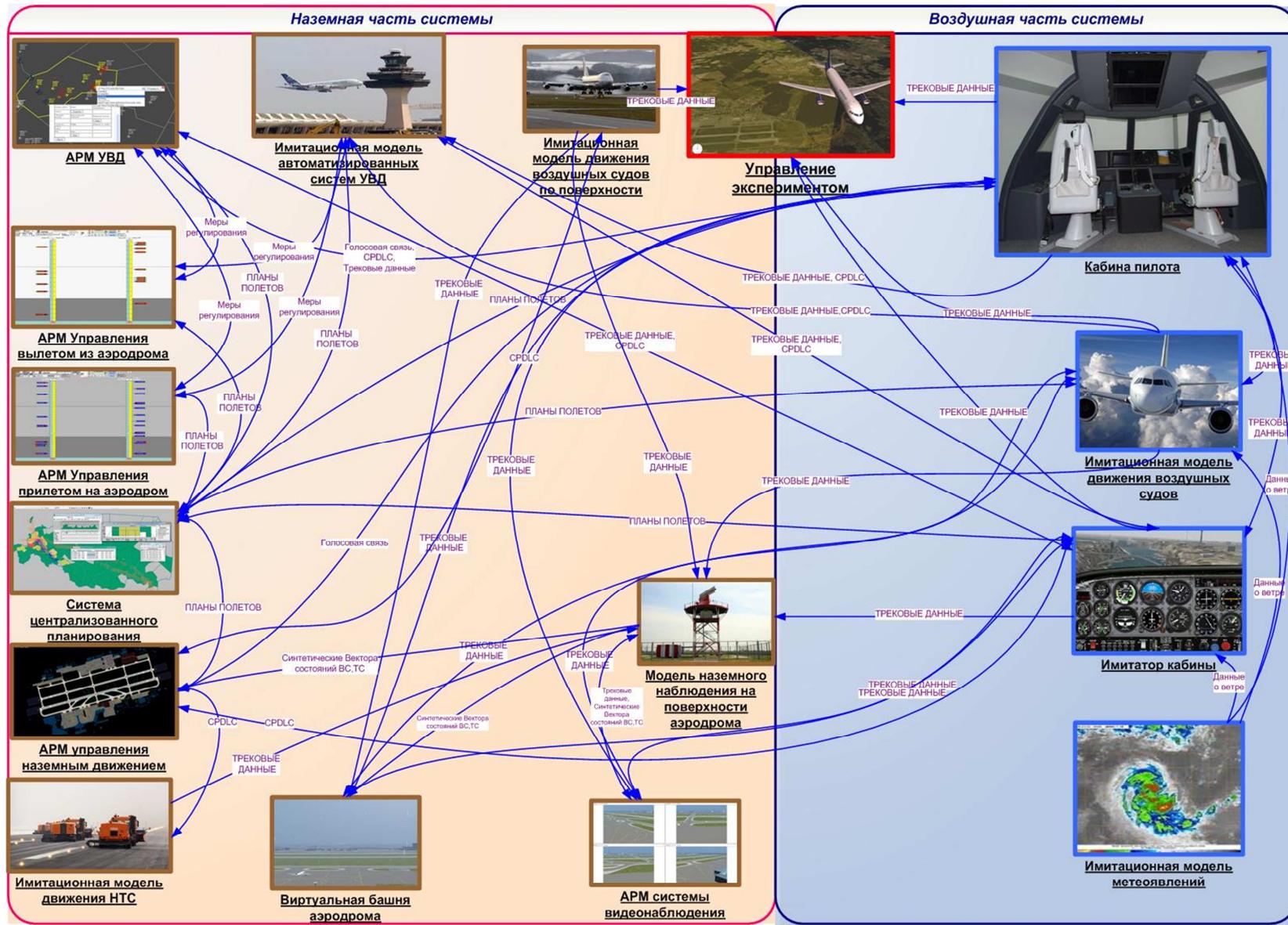


Рисунок 28. Структурно-функциональная схема стенда КИС УВД

Структурно-функциональная схема стенда приведена на рисунке 28. На схеме компоненты стенда представлены прямоугольниками и объединены в две группы: воздушную и наземную части системы. На схеме также указаны информационные потоки между элементами системы (синие стрелки с указанием типа данных и формата передачи).

Для проведения моделирования процедуры самоэшелонирования в составе стенда КИС УВД использованы следующие компоненты:

1. Макет АРМ диспетчера УВД;
2. Стенд прототипирования борта ВС (или СВС);
3. Модель движения воздушных судов (внешней воздушной обстановки (ВВО));
4. АРМ управления экспериментом (включает диспетчер сообщений).

Конфигурация функционально-программных модулей, подключаемых при проведении исследований процедуры самоэшелонирования, приведена на рисунке 29.



Рисунок 29. Конфигурация программных модулей КИС УВД для проведения исследований процедуры АСМ

4.3.1 Базовый сценарий

В качестве области свободных маршрутов выбирается сектор ВП. Моделируется поток ВС, загружающий выбранный сектор. Принимается, что все ВС в секторе оборудованы аппаратурой АЗН-В. Для демонстрации процедуры эшелонирования плановая высота полета «своего» самолета (СВС) изменена на высоту полета во встречном направлении.

Находясь под контролем диспетчера УВД выбранного сектора, экипаж осуществляет запрос на выполнение процедуры самоэшелонирования. После получения разрешения *управление СВС осуществляется в соответствии с рекомендациями бортового алгоритма эшелонирования.*

Изложенный сценарий является базовым и используется при настройках и тестировании функциональности, реализуемой на стенде.

В соответствии со стадиями выполнения процедуры самоэшелонирования штатный сценарий взаимодействия между экипажем и диспетчером УВД приведен на рисунке 30.

4.3.2 Отражение штатных действий экипажа и диспетчера в конфигурации моделирующего стенда

При проведении моделирования, в соответствии со стадиями выполнения процедуры самоэшелонирования, на компонентах стенда КИС УВД производятся следующие действия.

1. АРМ диспетчера УВД.

- На этапе пуска системы АСМ не участвует.
- На этапе настройки на полет с поддержкой АСМ определяет границы зоны автономного ВП, дает разрешение на выполнение процедуры АСМ.
- На этапе выполнения полета с работающей АСМ не участвует.
- На этапе завершения полета с поддержкой АСМ принимает борт СВС в зону ответственности и возобновляет стандартную рабочую процедуру.

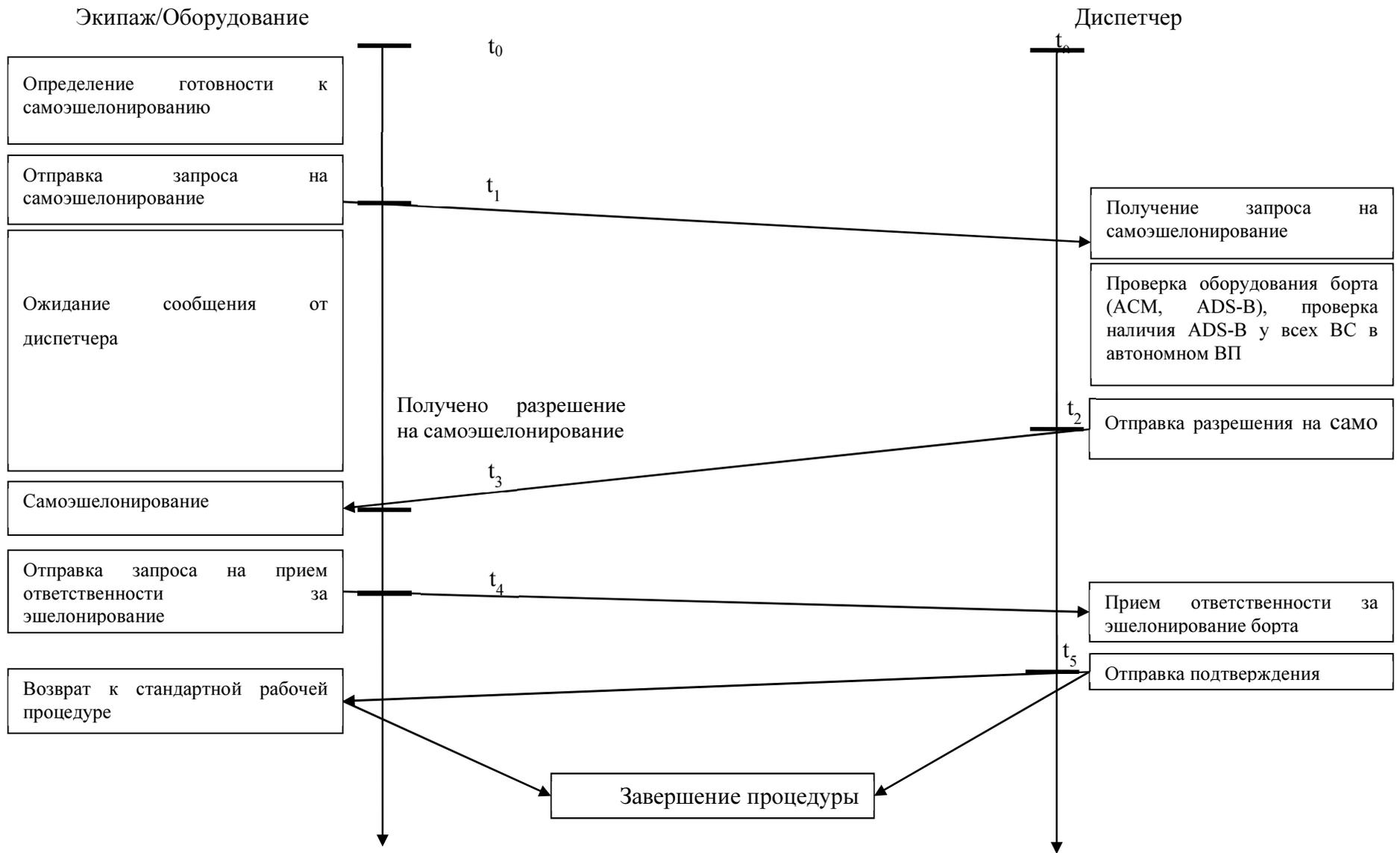


Рисунок 30. Циклограмма взаимодействия пилота и диспетчера во время выполнения процедуры ACM

2. На стенде прототипирования борта ВС (СВС) выполняются следующие действия:

- В стадии настройки на полет с поддержкой АСМ экипаж СВС отправляет диспетчеру УВД (АРМ УВД) запрос на выполнение процедуры самоэшелонирования. И при получении разрешения включает режим индикации «самоэшелонирование».

- На этапе выполнения полета с работающей АСМ экипаж СВС контролирует воздушное движение, при возникновении предупреждений принимает решения о выполнении или отклонении выполнения маневров уклонения.

- На этапе завершения полета с поддержкой АСМ, экипаж СВС запрашивает у диспетчера УВД принятие в зону ответственности, при получении подтверждения отключает режим индикации «самоэшелонирование».

3. Модель движения воздушных судов (внешней воздушной обстановки (ВВО))

Во время эксперимента модель ВВО работает в фоновом режиме, отправляя данные о внешней воздушной обстановке СВС и АРМ диспетчера УВД.

4. АРМ управления экспериментом

Во время выполнения процедуры АСМ на АРМ управления экспериментом от участников моделирования автоматически приходит информация об эксперименте для последующего ее анализа.

4.3.3 Проведение моделирования процедуры самоэшелонирования

Процесс проведения моделирования представлен в виде снимков экранных форм с моделей, участвующих в проведении эксперимента.

На рисунке 31 показан общий вид АРМ диспетчера УВД, желтым цветом показан сектор ВП, принятый в эксперименте за область автономного воздушного пространства. Оператор АРМ УВД контролирует сектор ответственности на мониторе АРМ и взаимодействует с оператором СВС.

Вид стенда прототипирования борта ВС, через который пилот-оператор управляет ВС показан на рисунке 32. В левом верхнем углу расположен пилотажный дисплей, в правом – навигационный дисплей. Внизу слева показано окно МСДУ, справа – вертикальный профиль.

Операторы СВС и АРМ УВД взаимодействует друг с другом по каналу CPDLC.

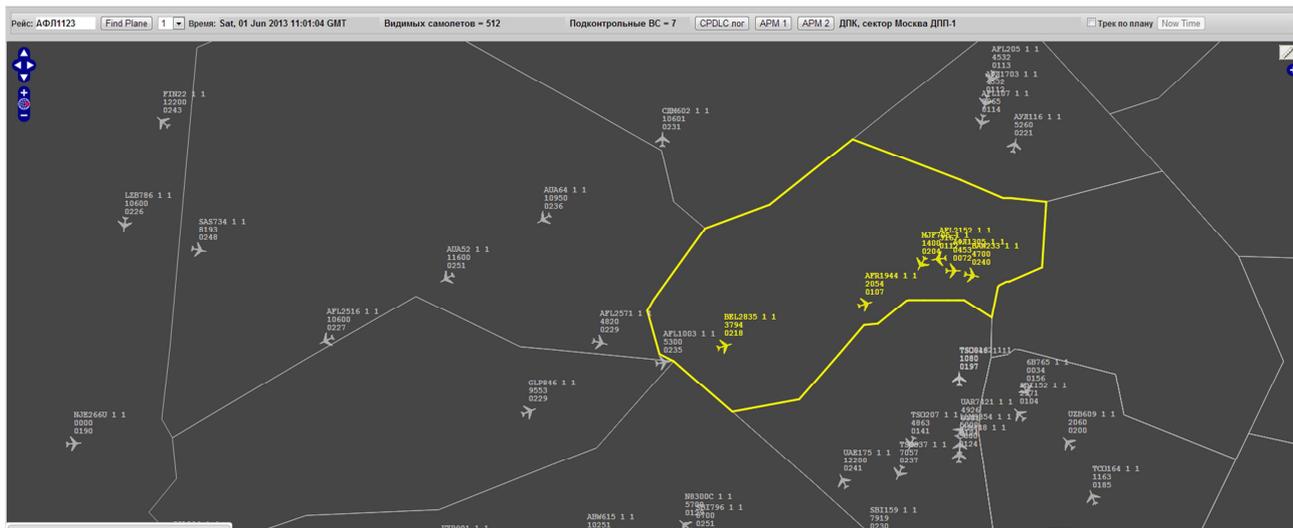


Рисунок 31. Область автономного ВП

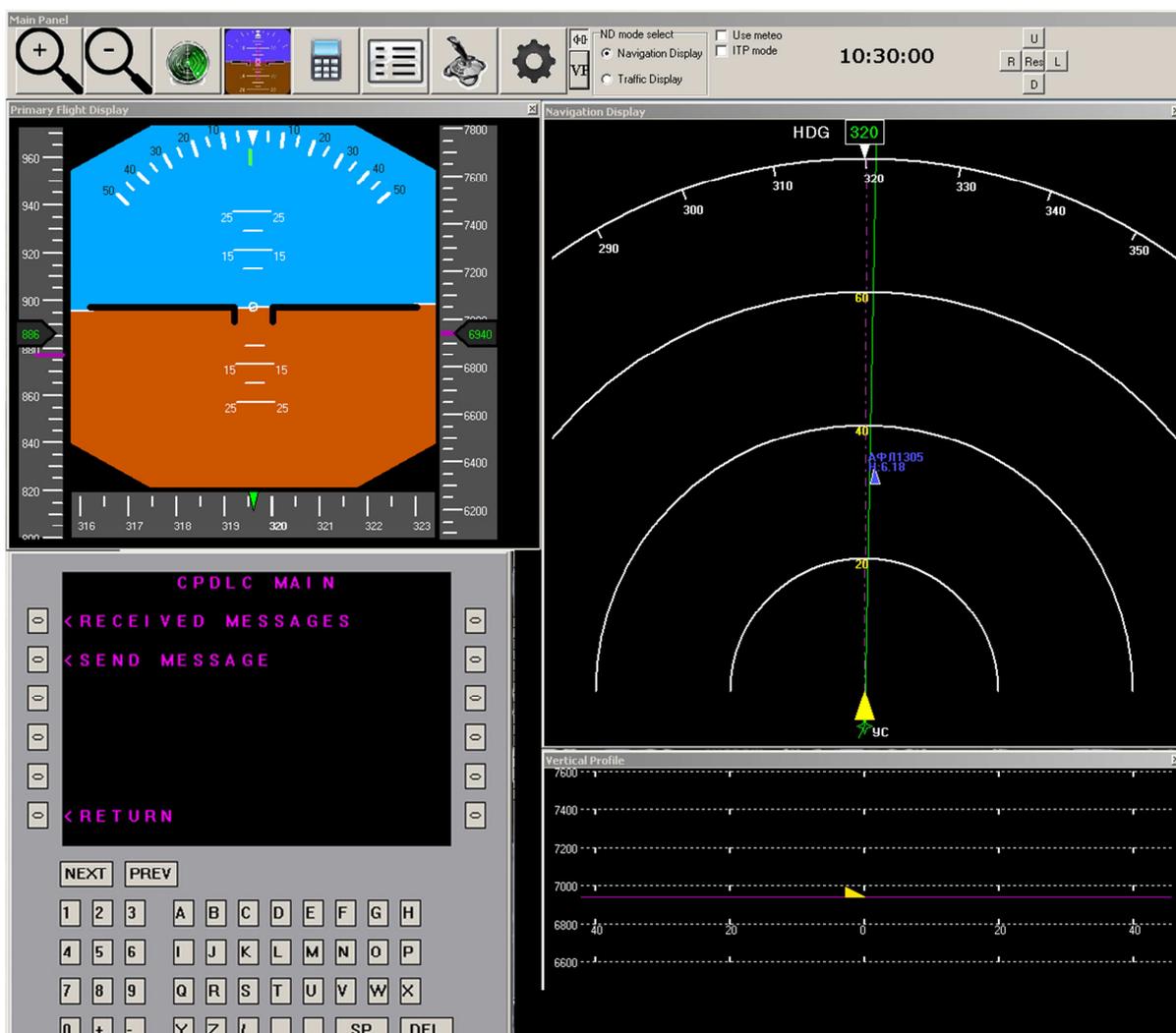


Рисунок 32. Главное окно модели СВС

В стадии настройки на полет с поддержкой АСМ экипаж СВС отправляет диспетчеру УВД (АРМ УВД) запрос на выполнение процедуры самоэшелонирования (рисунок 33).



Рисунок 33. Запрос на самоэшелонирование (Нажатие кнопки SEND);

При получении запроса на самоэшелонирование на экране АРМ УВД возникает окно CPDLC с запросом на самоэшелонирование, на карте символ ВС, отправившего запрос, выделено желтым цветом и обведено окружностью коричневого цвета с радиусом 50 км (рисунок 34).

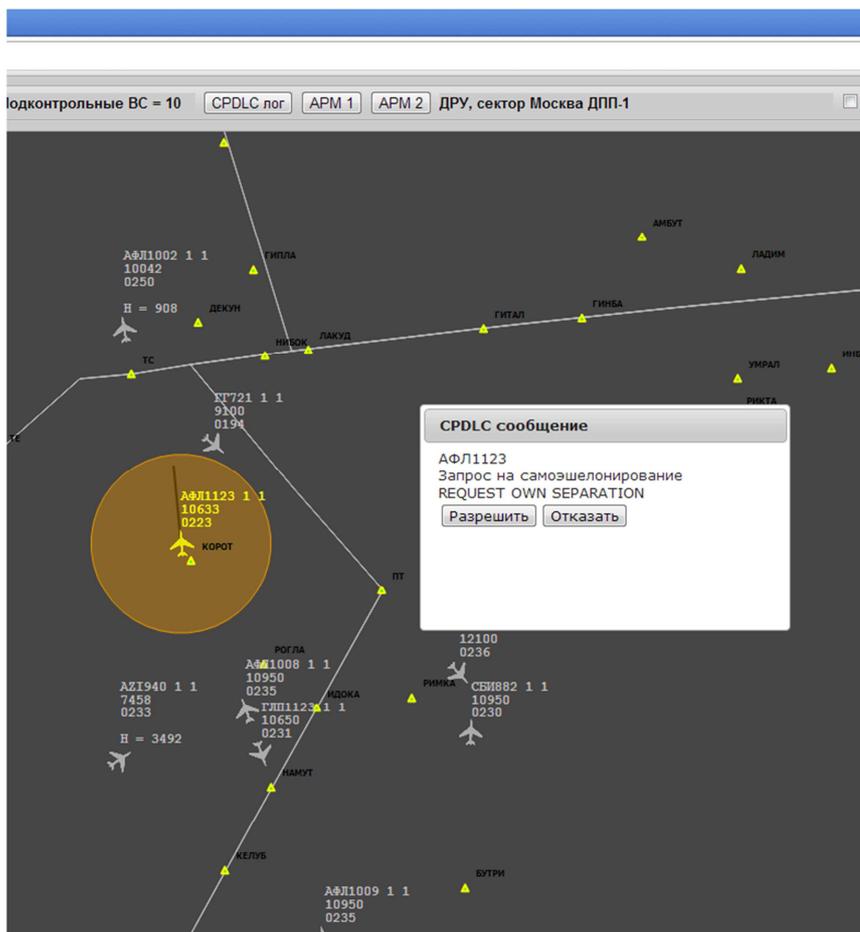


Рисунок 34. Главное окно модели АРМ УВД

По нажатию оператором АРМ УВД кнопки «Разрешить» формируется CPDLC ответ (рисунок 35)

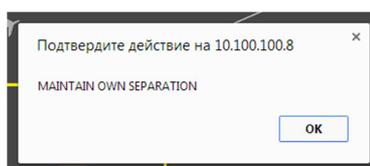


Рисунок 35. Окно обработки сообщений CPDLC модели АРМ УВД

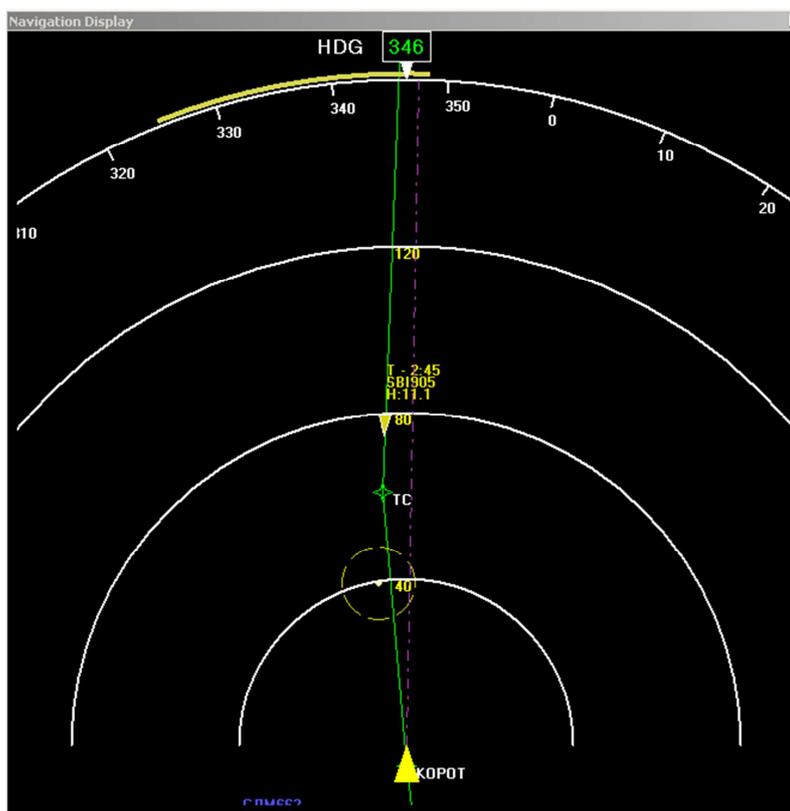
Прием и подтверждение команды диспетчера УВД оператором СВС (рисунок 36) означает переход ВС к стадии выполнения полета. По нажатию кнопки АССЕРТ формируется CPDLC ответ на АРМ УВД.



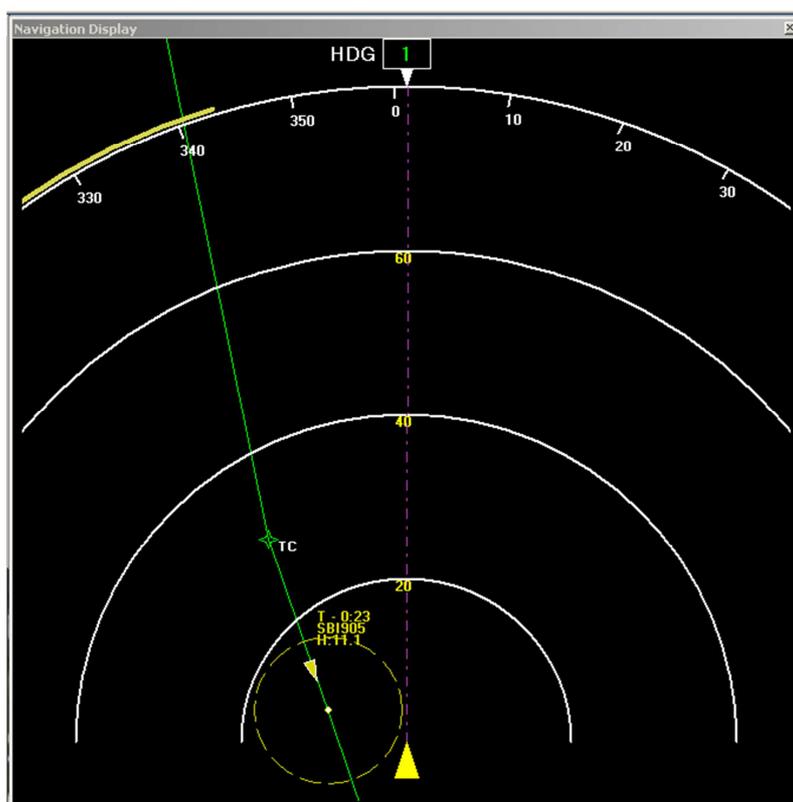
Рисунок 36. Окно MCDU модели CBC

На этапе выполнения стадии «выполнение полета в соответствии с процедурой самоэшелонирования» экипаж ВС наблюдает за развитием воздушной обстановки и при возникновении прогноза об опасном сближении выполняет рекомендуемые маневры.

На макете навигационного дисплея CBC отображается следующая информация: символ ВС, с которым прогнозируется опасное сближение, заливается желтым цветом, в точке прогноза опасного сближения возникает окружность желтого цвета с радиусом зоны безопасности, на шкале курсов высвечивается дуга желтого цвета закрытых диапазонов курса. На рисунке 37 а) показан момент начала прогноза опасного сближения, на рисунке 37 б) – момент облета своим ВС встречного конфликтующего ВС SBI905.



a)



б)

Рисунок 37. Навигационный дисплей модели СВС в момент прогноза конфликта

4.4 Выводы

1. Разработаны и использованы на прототипе кабины перспективного ВС графические примитивы и варианты индикации предупреждающей информации о вероятном конфликте на экране навигационного дисплея.
2. Разработанный бортовой алгоритм оформлен в виде Си-модуля как COTS-средство, предполагающее возможность его независимой интеграции в вычислительную среду открытой архитектуры интегрированной модульной авионики (ИМА).
3. Сформулированы предложения по изменению и уточнению правил использования воздушного пространства и управления воздушным движением, связанных с реализацией децентрализованного и смешанного управления
4. Проведена функциональная апробация выполнения процедуры эшелонирования в автономном воздушном пространстве. На полунатурном стенде отработано взаимодействие пилота и диспетчера во время выполнения процедуры самоэшелонирования.

Заключение и выводы

Основным итогом диссертационной работы является разработка и исследование алгоритмов обнаружения и предотвращения опасных сближений в воздухе в рамках перспективной системы организации воздушного движения. Основные результаты работы выносимые на защиту:

1. Разработан метод обнаружения и предотвращения опасных сближений в воздухе, на его основе построены бортовые алгоритмы обнаружения и предотвращения опасных сближений ВС с другими ВС и опасными метеообразованиям.
2. Выпущены требования к компоненте программного обеспечения функции обнаружения и разрешения опасных сближений (КПО «ФОРОС») в соответствии с требованиями КТ-178В. КПО «ФОРОС» реализована в виде Си-модуля как COTS-средство в виде бортового приложения под управления ОСРВ VxWorks AE653 на прототипе крейта ИМА.
3. Разработан автономный исследовательский комплекс для отработки и исследования алгоритмов. На нем проведены исследования эффективности КПО «ФОРОС». Проведенные исследования подтвердили эффективность алгоритма обнаружения и предотвращения опасных сближений в воздухе как с другими ВС, так и с опасными метео образованиями.
4. Разработаны рекомендации по отображению информации о конфликтных ситуациях на кабинном дисплее полетной информации (CDTI – Cockpit Display of Traffic Information). Предложенные рекомендации реализованы на полунатурном стенде прототипирования ИМА.
5. Разработаны предложения по изменению и уточнению правил использования воздушного пространства и управления воздушным движением, связанных с реализацией децентрализованного и смешанного управления.
6. Проведено полунатурное моделирование функционирования бортовой функции самоэшелонирования на комплексном исследовательском стенде полунатурного имитационного моделирования интегрированных систем управления воздушным движением (КИС УВД).

Список литературы

1. Концепция и системы CNS/АТМ в гражданской авиации /Под ред. Г.А.Крыжановского. М.: ИКЦ «Академкнига», 2003.
2. Глобальная эксплуатационная концепция ОрВД. Одиннадцатая аэронавигационная конф., док. AN-Conf/11-WP/4. Монреаль, 2003.
3. Minimum Aviation System Performance Standards for Aircraft Surveillance Applications (ASA), Volume 2, RTCA DO-289 , RTCA, Inc., 2003
4. Minimum Operational Performance Standards (MOPS) For Aircraft Surveillance Applications System (ASAS), DO-317, RTCA, Inc.,2009.
5. Делегирование полномочий по эшелонированию, преимущества и требуемые изменения. Одиннадцатая аэронавигационная конф., док. AN—Conf/11—WP/68, Монреаль, 2003.
6. Application of airborne conflict management: detection, prevention, & resolution, DO-263, RTCA Inc., 2000.
7. Minimum Aviation System Performance Standards For Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B), RTCA/DO-242A, RTCA, Inc., 2002.
8. ACAS, brochure ACASA/WP6.1/015, EUROCONTROL, 1999.
9. Kuchar J.K., Yang L.C. A Review of Conflict Detection and Resolution Modeling Methods //IEEE Trans, on Intelligent Transportation Systems. 2000. V.1.№4. P.179-189.
10. Architecture of National Airspace System (NAS). Concepts for Future NAS Operations. Department of Transportation, FAA, USA, 1996.
11. Nogami J., Nakasuka S., Hori K. Real-time Decision Support for Air Traffic Management, Utilizing Concept Learning //AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf.,Boston, 1998.
12. Mondoloni S., Conway S. An Airborne Conflict Resolution Approach Using a Genetic Algorithm //AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf., Montreal, 2001
13. Bilimoria K.D., Lee H.Q., Mao Z.H., et al. Comparison of centralized and decentralized conflict resolution strategies for multipl-aircraft problems //AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf., Denver, 2000.

14. Hoekstra J.M. M., Gent M., Ruigrok M. Conceptual Design of Free Flight with Airborne Separation Assurance //AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf., Boston, 1998.
15. Bilimoria K.D. A Geometric Optimization Approach to Aircraft Conflict Resolution //AIAA Guidance, Navigation and Control Conf., Denver, 2000.
16. Zeghal K. A Review of Different Approaches based on Force Fields for Airborne Conflict Resolution //AIAA Guidance, Navigation and Control Con., Boston, 1998.
17. Eby M.S. A Self-Organizational Approach for Resolving Air Traffic Conflicts // The Lincoln Laboratory J. 1994. V.7.№2.
18. Wallace E. Kelly I. Advances in Force Field Conflicts Resolution Algorithms //AIAA Guidance, Navigation and Control Conf., Denver, 2000.
19. Frazzoli E., Mao Z.H., Oh J.H., et al. Resolution of Conflicts Involving Many Aircraft via Semi-definite Programming //J. Guidance, Control and Dynamics. 2001 V.24.№1.
20. Дегтярев О.В., Орлов В.С., Пучков Б.В. Разработка бортовых алгоритмов обнаружения и децентрализованного разрешения опасных сближений в воздухе, основанных на методе потенциальных полей //Сб. тр. междунар. симпоз. «Интеллектуальные системы» (INTELS'2010). Владимир, 2010.
21. Кумков С.И., Пятко С.Г. Задача обнаружения и разрешения конфликтных ситуаций в автоматизированной системе управления воздушным движением //Научный вестник «НИИ Аэронавигации», 2013.
22. Исаев В.К., Золотухин В.В. Некоторые задачи 2D-маневрирования самолета с целью обеспечения вихревой безопасности // Вестник МАИ. – 2009.
23. Богатырев Д.Ю., Дегтярев О.В., Орлов В.С. Применение функции ASAS в системе кабинной индикации ВС //Сб. тр. междунар симпоз. «Интеллектуальные системы» (INTELS'2012). Вологда, 2012.
24. Отчет компании National Aerospace Laboratory NLR. <http://hosted.nlr.nl/public/hosted-sites/freeflight/main.htm>
25. Модули блочной модернизации авиационной системы, связанные с эшелонированием в полете. AN-Conf/12-WP/11, Монреаль, 2012 г.

Приложение 1. Параметры алгоритмов

Идентификатор	Наименование	принятое значение	размерность
d_0, R_{safe}	Диаметр 'зоны безопасности'	8	км
H_{safe}	Высота 'зоны безопасности'	300	м
R_{al}	Диаметр 'тревожной зоны'	150	км
H_{al}	Высота 'тревожной зоны'	600	м
η'	Максимальное значение отталкивающего потенциала	3	
d_{err}	Точность определения горизонтального пролета	300	м
d_1	Диаметр зоны начала реагирования	12	км
Δt_0	Время, оставшееся до пролета, соответствующее максимальной реакции на опасное сближение	3	мин
Δt_1	Максимальное время, оставшееся до пролета, для реакции на опасное сближение	5	мин
φ_{max}	Пороговое значение угла между векторами относительной дальности и скорости	45	град
\square	Максимальный угол крена при координированном развороте	25	град
D_m	Боковое отклонение ВС от осевой линии маршрута, требующее максимальной скорости возвращения	1	км
P_{max}	Отклонение от плановой траектории, требующее наискорейшего возвращения	8	км
R_s	Максимальная линейная скорость приближения к плановой траектории	50	м/с

Идентификатор	Наименование	принятое значение	размерность
D_v	Расстояние между парой ВС, на котором должен срабатывать блок управления скоростью	25	км
ε_v	Различие скоростей между парой ВС, при котором должен срабатывать блок управления скоростью	20	м/с
ε_ψ	Различие направления скоростей между парой ВС, при котором должен срабатывать блок управления скоростью	10	град
β_v	Предельный угол параллельных курсов	45	град
$D^{пр}$	параметр продольного эшелонирования	20	км
$V^{пр}$	Параметр продольного эшелонирования	10	м/с
ΔV	Значение изменения скорости	8,3	м/с
d_0^{met}	Минимальное расстояние от центра области ограничения	$D_i/2$	
d_1^{met}	Расстояние 'реакции'	$D_i/2+$ Δd	
Δt_0^{met}	Время, соответствующее «полной» реакции на опасное сближение с областью	15	мин
Δt_1^{met}	Максимальное время, оставшееся до пролета области, для реакции на опасное сближение	30	мин
D_k	Добротность контура управления	0.02	1/с
Δt_y	Шаг времени при прогнозе конфликтов	2	с

Приложение 2. Требования к интерфейсу КПО ФОРΟΣ

Входной интерфейс ИНТРФ:АЗН.ФОРΟΣ

Приоритет – высокий

Тип интерфейса – передача данных в реальном времени.

Период обращения – 1 сек.

Данные о местоположении собственного ВС и о местоположении окружающих ВС должны быть актуальны на момент времени обращения к ним.

Характеристики данных

Массив переменных размерностью (1,7) о местоположении собственного ВС в системе координат WGS-84:

№ п.п	Физическое содержание	Обозначение, размерность	Идентификатор	Тип	Диапазон
1	идентификатор ВС	AC_ident ₀	AC_ident	INT	
2	широта центра масс ВС в геодезической системе координат	λ_0 [град]	L	FLOAT	[0,360)
3	долгота центра масс ВС в геодезической системе координат	φ_0 [град]	B	FLOAT	[-180,180)
4	высота над уровнем моря	H ₀ [м]	H	FLOAT	(0,15000)
5	горизонтальная составляющая путевой скорости полета	V ₀ [м/с]	V	FLOAT	(30,350)
6	курсовой угол вектора скорости	ψ_0 [град]	Ksi	FLOAT	[-180,180)
7	вертикальная скорость	V _{h0} [м/с]	Vh	FLOAT	(-10,10)

Переменные:

№ п.п	Физическое содержание	Обозначение, размерность	Идентификатор	Тип	Диапазон
1	количество окружающих ВС	Ns	Ns	INT	[0,150]

Массив переменных размерностью (Ns, 7) о местоположении окружающих ВС в системе координат WGS-84 (показана i- ая строка массива)

№ п.п	Физическое содержание	Обозначение, размерность	Идентификатор	Тип	Диапазон
1	идентификатор ВС	AC_ident _i	Surr(i, 1)	INT	

2	широта центра масс в геодезической системе координат	λ_{Si} [град]	Surr(i, 2)	FLOAT	[0,360)
3	долгота центра масс в геодезической системе координат	φ_{Si} [град]	Surr(i, 3)	FLOAT	[-180,180)
4	высота над уровнем моря	H_{Si} [м]	Surr(i, 4)	FLOAT	(0,15000)
5	горизонтальная составляющая путевой скорости полета	V_{Si} [м/с]	Surr(i, 5)	FLOAT	(30,350)
6	курсовой угол вектора скорости	ψ_{Si} [град]	Surr(i, 6)	FLOAT	[-180,180)
7	вертикальная скорость	V_{hSi} [м/с]	Surr(i, 7)	FLOAT	(-10,10)

Входной интерфейс ИНТРФ:ПЛП.ФОРОС

Приоритет – высокий.

Тип интерфейса – передача данных в реальном времени.

Период обновления данных – не более 2-х секунд.

Характеристики данных

Массив переменных размерностью (2,6) о текущем участке плана полета собственного ВС в системе координат WGS-84 (показана i - ая строка массива)

№ п.п	Физическое содержание	Обозначение, размерность	Идентификатор	Тип	Диапазон
1	плановое время пролета ОПМ	T_{wpi} [чч:мм:сс]	Point(i, 1)	TDATE TIME E	
2	широта ОПМ в геодезической системе координат	λ_{wpi} [град]	Point(i, 2)	FLOAT	(0,360]
3	долгота ОПМ в геодезической системе координат	φ_{Si} [град]	Point(i, 3)	FLOAT	(-180,180]
4	высота полета на участке, следующим за i -ой ОПМ	H_{wpi} [м]	Point(i, 4)	FLOAT	(0,15000)
5	путевая скорость полета на участке, следующим за i -м ОПМ	V_{wpi} [м/с]	Point(i, 5)	FLOAT	(30,350)
6	курсовой угол участка	ψ_{Si} [град]	Point(i, 6)	FLOAT	(-180,180]

Входной интерфейс ИНТРФ:МЕТ.ФОРОС

Приоритет – высокий

Тип интерфейса – передача данных в реальном времени.

Период обращения – 1 сек.

Характеристики данных

Переменные:

№ п.п	Физическое содержание	Обозначение, размерность	Идентификатор	Тип	Диапазон
1	количество областей ограничений	Ns	Ns	INT	[0,20]

Массив переменных размерностью (N_s ,) о местоположении областей административных и метеорологических ограничений. (показан i -й набор)

№ п.п	Физическое содержание	Обозначение, размерность	Идентификатор	Тип	Диапазон
1	Скорость движения области	V_{mi} [м/с]		FLOAT	
2	Курсовой угол вектора скорости движения области	ψ_{mi} [град]		FLOAT	(-180,180]
3	Нижняя граница области	H_{min} [м]		FLOAT	(0,15000)
4	Верхняя граница области	H_{max} [м]		FLOAT	(0,15000)
5	Количество точек ограничения	N_{s_i}		INT	
6	Массив пар (широта, долгота) точек ограничения	$\lambda_{i,j}, \varphi_{i,j}$ [град, град]		FLOAT FLOAT	(0,360] (-180,180]

Выходной интерфейс ИНТРФ:ФОРΟΣ.ИКС

Приоритет – высокий.

Тип интерфейса – передача данных в реальном времени.

Период обновления данных – не более 2-х секунд.

Характеристики данных

Переменные

№ п.п	Физическое содержание	Обозначение, размерность	Идентификатор	Тип	Диапазон
1	рекомендуемое значение угла курса	ψ^* [град]	Ksi_rec	FLOAT	(-180..180]
2	рекомендуемое значение скорости полета	V^* [м/с]	V_rec	FLOAT	(30..350)
3	количество окружающих ВС	Ns	Ns	INT	(0,150)
4	количество конфликтующих ВС	Nc	Nc	INT	(0,150)
5	количество конфликтующих	Ncl	Ncl	INT	[0,20]

	областей				
--	----------	--	--	--	--

Массив переменных размерностью $(N_s, 7)$ о местоположении окружающих ВС относительно собственного ВС в условной географической системе координат (УГСК), (показана i - ая строка массива)

№ п.п	Физическое содержание	Обозначение размерность	Идентификатор	Тип	Диапазон
1	идентификатор ВС	AC_ident i	SurrOwn($i, 1$)	INT	
2	координата центра масс	xSi [м]	SurrOwn($i, 2$)	FLOAT	(0...150000)
3	координата центра масс	ySi [м]	SurrOwn($i, 3$)	FLOAT	(0...150000)
4	относительная высота	zSi [м]	SurrOwn($i, 4$)	FLOAT	(-2000...2000)
5	горизонтальная составляющая путевой скорости полета	VSi [м/с]	SurrOwn($i, 5$)	FLOAT	(30..350)
6	курсовой угол вектора скорости	ψ Si [град]	SurrOwn($i, 6$)	FLOAT	(-180..180)
7	вертикальная скорость	VhSi [м/с]	SurrOwn($i, 7$)	FLOAT	(-10..10)

Массив переменных размерностью $(N_c, 8)$ о местоположении и параметрах конфликта с ВС, с которыми прогнозируется опасное сближение, (i -ая строка массива содержит данные по i -му конфликтующему ВС)

№ п.п	Физическое содержание	Обозначение размерность	Идентификатор	Тип	Диапазон
1	идентификатор ВС	AC_ident i	Confl($i, 1$)	INT	
2	проекция относительной дальности на горизонтальную плоскость	Di [м]	Confl($i, 2$)	FLOAT	(0...200000)
3	величина горизонтального пролета (пролета в горизонтальной плоскости)	dcpai [м]	Confl($i, 3$)	FLOAT	(0...10000)
4	время, оставшееся до пролета в горизонтальной плоскости	tcpai [с]	Confl($i, 4$)	FLOAT	(0...300)
5	время конфликта ВС	Tci [с]	Confl($i, 5$)	FLOAT	
6	координата центра масс ВС на момент конфликта	xexti [м]	Confl($i, 6$)	FLOAT	(0...10000)
7	координата центра масс ВС на момент конфликта	yexti [м]	Confl($i, 7$)	FLOAT	(0...10000)
8	координата центра масс ВС на момент конфликта	zexti [м]	Confl($i, 8$)	FLOAT	(-300...300)

Массив переменных размерностью ($Nc1, 11$) о параметрах конфликта с областями, с которыми прогнозируется опасное сближение, (i -ая строка массива содержит данные по i -ой конфликтующей области)

№ п.п	Физическое содержание	Обозначение размерность	Идентификатор	Тип	Диапазон
1	признак наличия пространственного конфликта	Confi	Confl_Oivp(i,1)	INT	0-нет 1-да
2	признак наличия конфликта в горизонтальной плоскости	Hori	Confl_Oivp(i,2)	INT	0-нет 1-да
3	признак наличия конфликта в вертикальной плоскости	Verti	Confl_Oivp(i,3)	INT	0-нет 1-да
4	ширина области	Di [м]	Confl_Oivp(i, 4)	FLOAT	(0...200000)
5	время начала конфликта с областью	Tc0i [с]	Confl_Oivp(i, 5)	FLOAT	(0...2000)
6	время окончания конфликта с областью	Tc1i [с]	Confl_Oivp(i, 6)		(0...2000)
7	величина горизонтального пролета (пролета в горизонтальной плоскости)	hci [м]	Confl_Oivp(i, 7)	FLOAT	(0...30000)
8	время, оставшееся до пролета в горизонтальной плоскости	thi [с]	Confl_Oivp(i, 8)	FLOAT	(0...2000)
9	X составляющая вектора пролета	xcpai [м]	Confl_Oivp(i, 9)	FLOAT	(-20000...20000)
10	Y составляющая вектора пролета	ycpai [м]	Confl_Oivp(i, 10)	FLOAT	(-20000...20000)
11	Z составляющая вектора пролета	zcpai [м]	Confl_Oivp(i, 11)	FLOAT	(-1000...1000)

Массив переменных размерностью ($Nc+Nc1,4$), с данными о закрытых областях запрещенных курсовых углов.

№ п.п	Физическое содержание	Обозначение размерность	Идентификатор	Тип	Диапазон
1	Источник опасности	Typei	Closed_arc (i,1)	INT	1- ВС 2- Область
2	Номер объекта в списке	Identi	Closed_arc (i,2)	INT	
3	левый угол дуги	φbegi [град]	Closed_arc (i,3)	FLOAT	(-180..180)
4	правый угол дуги	φendi [град]	Closed_arc (i,4)	FLOAT	(-180..180)

Выходной интерфейс ИНТРФ: ФОРΟΣ.ДОК

Приоритет – высокий.

Тип интерфейса – передача данных в реальном времени.

Период обновления данных – не более 2-х секунд.

Характеристики интерфейса

Переменные

№ п.п	Физическое содержание	Обозначение размерность	Иденти- фикатор	Тип	Диапазон
1	рекомендуемое значение угла курса	ψ^* [град]	Ksi_rec	FLOAT	(-180..180]
2	рекомендуемое значение скорости полета	V^* [м/с]	V_rec	FLOAT	(30..350)
3	широта центра масс ВС в геодезической системе координат	λO [град]	L	FLOAT	(0..360]
4	долгота центра масс ВС в геодезической системе координат	ϕO [град]	B	FLOAT	(-180..180]
5	высота над уровнем моря	HO [м]	H	FLOAT	(0..15000)
6	горизонтальная составляющая путевой скорости полета	VO [м/с]	V	FLOAT	30..500
7	курсовой угол вектора скорости	ψO [град]	Ksi	FLOAT	(-180..180]
8	вертикальная скорость	VhO [м/с]	Vh	FLOAT	(-10..10)

Приложение 3. Список используемых CPDLC сообщений, при использовании функции АСМ

1. Запрос на выполнение самоэшелонирования в процедуре АСМ.

REQUEST OWN SEPARATION

2. Запрос на прием под диспетчерский контроль в процедуре АСМ.

REQUEST ATC SEPARATION

3. Указание приступить к выполнению процедуры самоэшелонирования в процедуре АСМ.

MAINTAIN OWN SEPARATION TO [XXX]

XXX – точка, до которой выполняется самоэшелонирование.

Пример: MAINTAIN OWN SEPARATION TO DWAGS