

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)

**АВТОРЕФЕРАТ**

Диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2015год

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии Государственном научно-исследовательском институте авиационных систем (ФГУП «ГосНИИАС»)

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

Официальные оппоненты: **Рудельсон Лев Ефимович**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический  
университет гражданской авиации» (МГТУ ГА)

**Исаев Вячеслав Константинович**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
«Центральный аэрогидродинамический институт имени  
профессора Н.Е. Жуковского» (ФГУП «ЦАГИ»), главный  
научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Государственная корпорация по организации воздушного  
движения в Российской Федерации»

Защита диссертации состоится “ 11 ” июня 2015 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.12 при ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: **125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское ш., д. 4, Учёный совет МАИ.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МАИ по ссылке: [http://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=56332](http://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=56332)

Автореферат разослан “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2015 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.12,  
кандидат технических наук, доцент



В.В. Дарнопых

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена разработке и исследованию алгоритмов обнаружения и предотвращения опасных сближений в воздухе в рамках перспективной системы организации воздушного движения. Определение бортовой системы приложений функции наблюдения ASAS (Aircraft Surveillance Applications System) дано на одиннадцатой аэронавигационной конференции ИКАО. Агентством RTCA выпущены стандарты DO-289, определяющий минимальные требования для авиационных приложения наблюдения ASA (Aircraft Surveillance Applications) и DO-317 для приложений функции наблюдения ASAS. В настоящее время проводится прототипирование бортовой процедуры управления конфликтами ACM (Airborne Conflict Management).

**Актуальность работы.** Необходимость разработки алгоритмов обнаружения и предотвращения опасных сближений в воздухе вызвана переходом к новым принципам организации воздушного движения (ОрВД). Для поддержания высокого уровня социальных критериев, система ОрВД должна обеспечивать надлежащие показатели безопасности полетов, технической надежности парка воздушных судов (ВС), авиационной безопасности, охраны и контроля состояния воздушной среды. В рамках перспективной системы организации воздушного движения, ответственность за обеспечение бесконфликтных траекторий делегируется от диспетчера экипажу ВС. Этой задачу решают в Европе в рамках программы SESAR и в США в рамках программы NextGen. Согласно рабочим документам двенадцатой аэронавигационной конференции ИКАО переход к кооперативному эшелонированию в полете, совместно обеспечиваемому службами УВД (Управления Воздушным Движением) и воздушными судами, запланирован на 2023 год, а на самоэшелонирование после 2028 года. Математически и алгоритмически задача самоэшелонирования начала серьезно прорабатываться зарубежными исследователями в 1990-х годах, концепция этой системы обозначалась CD&R (Conflict Detection and Resolution). Предложен целый ряд схем, методов и алгоритмов обнаружения и разрешения конфликтов, проведены исследования эффективности их работы при разрешении сложных конфликтных ситуаций. В числе наиболее исследованных методов следует отметить геометрический метод (Bilimogia K.D.), (T. Miquel, F. Mora-Camino, and K. Achaibou), метод потенциальных (силовых) полей (Eby, Martin S.), (Zeghal K.), (Wallace E. Kelly I), метод полуопределенного программирования (Frazzoli E., Mao Z.H., Oh J.H., Feron E). Они различаются математическим аппаратом, принятыми критериями, объемом используемой при решении информации.

**Цель работы.** Основной целью диссертационной работы является разработка и исследование 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.

Задача обеспечения безопасности при децентрализованном управлении, когда каждое ВС самостоятельно обеспечивает эшелонирование с окружающими ВС, формулируется следующим образом: необходимо сформировать такой вектор управления ВС, при управлении которым соблюдаются нормы эшелонирования перспективной системы ОрВД, а отклонение от плановой траектории было бы минимально.

В диссертации поставлены и решены следующие основные задачи:

- 1) разработка методов обнаружения и предотвращения опасных сближений;
- 2) 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;
- 3) синтез алгоритмов обнаружения и предотвращения опасных сближений, реализация алгоритмов в «бортовом исполнении» на крейте интегрированной модульной авионики (ИМА).

4) 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. При этом проведены исследования по оценке эффективности предложенных алгоритмов, как на тестовых примерах, так и в составе полунатурного комплекса моделирования ИМА.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования является перспективная система организации воздушного движения. Предметом исследования являются методы обнаружения и предотвращения опасных сближений в воздухе в рамках перспективной децентрализованной схемы организации воздушного движения.

**Методы исследования.** В работе использованы методы системного анализа, методы математического моделирования, имитационного моделирования, теории вероятностей, математической статистики.

**Научная новизна.** В диссертационной работе получены следующие новые результаты:

- разработан ряд методов самолетовождения, отличающихся тем, что обеспечивают точное исполнение плана, учет случайных факторов, учет мер регулирования УВД, полет по свободным маршрутам;
- разработана модель воздушной обстановки, отличающаяся тем, что предоставляет данные для сопоставительного анализа эффективности движения потоков ВС по различным методам управления;
- разработаны алгоритмы обнаружения и предотвращения опасных сближений в воздухе, отличающиеся тем, что обеспечивают соблюдение норм эшелонирования не только с окружающими ВС, но и с зарытыми областями воздушного пространства (ВП);
- проведено полунатурное моделирование полета ВС, оборудованного бортовой системой управления конфликтами в рамках будущей системы организации воздушного движения.

**Практическая значимость.** Практическая ценность работы заключается в том, что разработанные алгоритмы обнаружения и предотвращения опасных сближений востребованы в гражданской авиации при переходе к перспективным принципам организации воздушного движения. Создан комплексный исследовательский стенд системы управления воздушным движением для исследования перспективных методов и алгоритмов. Разработанное программное обеспечение реализовано в бортовом исполнении на крейте платформы ИМА на стенде виртуального прототипирования.

**Достоверность результатов,** полученных в диссертационной работе, подтверждается корректным использованием аналитических и имитационных моделей и современных методов оптимизации, соответствием точности приближенных математических моделей точности исходных данных и результатов расчетов; сопоставлением результатов расчетов, полученных аналитически и с помощью имитационной модели, значительным объемом выполненных в работе вычислений, результаты которых являются непротиворечивыми и укладываются в рамки существующих представлений теории оптимизации.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались на 12 конференциях, обсуждались на научных семинарах в Государственном научно-исследовательском институте авиационных систем (ГосНИИАС). Исследования были поддержаны Федеральным Агентством по промышленности (Шифр «Конфликт») и РФФИ (проект 11-08-00841-а). Результаты диссертационной работы были представлены на международных аэрокосмических салонах МАКС-2011 и МАКС-2013.

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в статьях [1-3] в журналах, входящих в Перечень ВАК и в трудах научных конференций [4-15]. Всего по теме диссертации опубликовано 14 работ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав основной части, заключения, списка использованных источников. Общий объем работы составляет 119 страниц машинописного текста, 37 рисунков, 6 таблиц.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.13.01: проведена разработка, обоснование и тестирование методов и алгоритмов обнаружения и предотвращения опасных сближений в воздухе с применением современных компьютерных технологий.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приводится обзор современного состояния мировой авиатранспортной системы, выявляются проблемы системы связанные с ростом интенсивности воздушного движения. Обоснована актуальность предложенных методов, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, представлены положения, выносимые на защиту, описана структура диссертационной работы, приведены постановки решаемых задач.

Исследуемая в диссертационной работе децентрализованная концепция организации воздушного движения позволяет перенести задачи обнаружения и предотвращения опасных сближений с земли на борт, снизив тем самым нагрузку на диспетчеров, сохраняя уровень безопасности с повышением пропускной способности системы.

В работе предложено применение модифицированного метода потенциальных полей, как основа бортовой функции управления конфликтами как с воздушными судами, так и с опасными метеообразованиями.

**В первой главе** рассматриваются технические и организационные предпосылки нового поколения систем связи, навигации и наблюдения (Communication, Navigation, Surveillance – CNS), являющиеся основой модернизации системы ОрВД. 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. Одним из центральных вопросов, связанных с внедрением новых концепций организации воздушного движения (ВД) является проблема безопасности полетов и разделения ВС в воздухе. 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 малонаселенных и ненаселенных районах);
- реализация идеологии свободных полетов в областях свободных полетов, в районах зональной навигации;
- необходимость снижения загрузки диспетчеров управления воздушным движением 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 наблюдения ASAS (Aircraft Surveillance Applications System). В соответствии с документами ИКАО система ASAS должна выполнять следующие задачи: обработка данных наблюдения, обеспечение эшелонирования, отображение информации на кабинном индикаторе. Для обеспечения самоэшелонирования предназначена бортовая функция управления конфликтами ACM (Airborne Conflict Management).

Приведены основные принципы построения перспективной системы УВД, дано краткое описание структуры системы УВД как системы управления.

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.

Переход к перспективным системам ОрВД 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.

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.**

Описано место функции обнаружения и предотвращения опасных сближений в составе системы управления, приведена нормативная база для создания и работы бортовой функции наблюдения ASAS и функции управления конфликтами ACM. Требования к бортовым алгоритмам управления конфликтами опубликованы в 2000 году агентством RTCA в DO-263 (Application Of Airborne Conflict Management: Detection, Prevention, & Resolution). В 2003 году RTCA выпустило стандарт DO-289 (Minimum Aviation System Performance Standards for Aircraft Surveillance Applications (ASA)), определяющий минимальные требования для авиационных приложения наблюдения ASA. В 2009 году опубликован стандарт DO-317 (Minimum Operational Performance Standards (MOPS) For Aircraft Surveillance Applications System (ASAS) для приложений функции наблюдения ASAS. В настоящее время проводится прототипирование бортовой процедуры управления конфликтами ACM (Airborne Conflict Management).

Бортовая система обеспечения эшелонирования может способствовать выполнению ряда функций по управлению конфликтными ситуациями и синхронизации движения в рамках эксплуатационной концепции ОрВД. Система ASAS представляет собой подсистему 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. Система ASAS вычисляет и отображает результаты приложений функции наблюдения ASA (Aircraft Surveillance Applications). 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. Система CDTI (Cockpit Display Traffic Information) будет выполнять функцию интерфейса между системой обработки данных и летным экипажем.

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 большие объемы делегируемой авиадиспетчером ответственности за эшелонирование.

В диссертационной работе решается задача разработки и исследования бортового приложения функции наблюдения – функции обнаружение и разрешение опасных сближений ВС в воздухе в рамках перспективной системы ОрВД.

### **Во второй главе**

Рассмотрено информационное обеспечение функции ASAS. 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 ADS-B (A3H-B).

Дана техническая постановка задачи обеспечения самоэшелонирования. 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.

Во многом по этим причинам применительно к перспективным системам УВД используются другие универсальные показатели конфликта – пересечение траектории полета одного ВС зоны безопасности второго. Рассматривается в большинстве источников, в качестве зоны безопасности цилиндр с заданным радиусом безопасности  $R_b$  и высотой  $2H_b$ . Соответственно показатели безопасности сводятся к двум основным:

- показатель бокового разделения  $R_b$ ,
- показатель вертикального разделения  $2H_b$ .

В качестве маневров уклонения рассматриваются все три возможных маневра:

- маневры в горизонтальной плоскости (боковое уклонение, маневр скоростью – разгон/торможение),
- маневр по высоте.

Основным маневром рассматривается боковое уклонение как наиболее экономичный.

На трассовой части полета основой для работы этой системы являются два алгоритма обеспечения эшелонирования ВС: *алгоритм обнаружения (прогнозирования) конфликта* и *алгоритм разрешения конфликта*. Цель алгоритмов обнаружения заключается в выявлении возможного конфликта, связанного с нарушением норм эшелонирования на заданной глубине прогнозирования. *Постановка задачи* алгоритма формулируется следующим образом: необходимо выработать предупреждения о том, что в пределах заданной глубины прогнозирования ожидается опасное сближение ВС с другими ВС. Параметры прогнозируемых опасных сближений основываются на информации о текущем векторе состояния и ближайших намерениях своего ВС. Эти данные предоставляются пилоту для выявления имеющихся конфликтов с другими ВС.

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. *Постановка задачи* обеспечения безопасности при децентрализованном управлении формулируется следующим образом: необходимо сформировать вектор управления своего ВС, при котором соблюдается ненарушение зоны безопасности, а отклонение от желаемой плановой траектории было бы минимально.

Математическая постановка задачи децентрализованного управления отдельным ВС при множественном конфликте формулируется следующим образом: найти оптимальное управление  $u^*(t)$  из условия

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

где  $u$  – вектор управления по двум каналам – каналу курса и скорости,  $u^*(t)$  – сформированный вектор управления ВС,  $u^{pl}(t)$  – вектор управления для выдерживания плановой траектории,  $d_{cpai}$  – величина пролета с  $i$ -м ВС,  $R_{safe}$  – радиус зоны безопасности,  $t_{cpai}$  – время, до наступления пролета с  $i$ -м ВС,  $\tau_{acq}$  – 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.

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

Проведен анализ соответствия функции самоэшелонирования техническим требованиям к приложениям наблюдения. Разработанное в диссертационной работе бортовое приложение соответствует определениям экспертов по системам наблюдения и разрешения конфликтных ситуаций.

В стандарте RTCA DO-289 приводится список возможных приложений бортовой функции наблюдения, среди этих приложений фигурирует приложение обнаружения конфликта CD (Conflict Detection) и бортовая система управления конфликтами 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.

Таким образом, представленная постановка задачи соответствует техническим требованиям к перспективной системе функции наблюдения. Разработанные алгоритмы соответствуют приложениями обнаружения (CD) и управления конфликтами (ACM).

**В третьей главе** представлен синтез алгоритмов обнаружения и предотвращения опасных сближений.

В диссертационной работе обосновано применение алгоритма обнаружения, основанного 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. При достаточно большом запасе времени (больше 5-6 мин) вообще не следует реагировать на тревогу из-за неопределенности в намерениях движения участников ВД.

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

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. 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).

Судя по публикациям, а также по результатам собственного анализа можно сделать вывод об определенных преимуществах двух методов: геометрического и метода потенциальных полей. Имеющиеся публикации 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.

- Метод геометрической оптимизации (геометрический метод). При использовании этого метода в качестве условия возникновения конфликтной ситуации принимается случай, когда прогнозируемое минимальное расстояние между ВС меньше, чем допустимое. 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. В каждый текущий момент времени при выработке команды разрешения конфликта соответствующего ВС рассматривается только один, самый близкий по прогнозируемому времени наступления конфликт.

- Модифицированный метод потенциальных полей. Алгоритм был впервые предложен в 1994 году и в дальнейшем рассматривался и исследовался в целом ряде работ. Используемая для формирования маневра стратегия основывается на понятии потенциала полей.

Преимуществом метода потенциальных полей является достаточная простота реализации, а также возможность реализации децентрализованного управления при разрешении множественных конфликтных ситуаций. Положительной стороной подхода является то, что благодаря его особенностям при применении на всех ВС разрешение конфликта, несмотря на децентрализацию принятия решения, по существу является кооперативным. Недостатком алгоритма является большое количество параметров алгоритма, влияющих на эффективность разрешения конфликта, которые необходимо «подбирать» в процессе синтеза.

Идея метода потенциальных полей исходит из физической аналогии движения заряженных частиц. Используемая для формирования маневра стратегия основывается на понятии потенциала полей заряженных тел. На движущиеся отрицательные заряды (имитирующие ВС) действуют силы притяжения к фиксированным (неподвижным) положительным зарядам (имитирующим

очередные промежуточные точки маршрута) в силу взаимного притяжения противоположных зарядов. Наоборот, отрицательно заряженные тела отталкиваются друг от друга, т.к. действует взаимное отталкивание между подобными зарядами (рис 3).

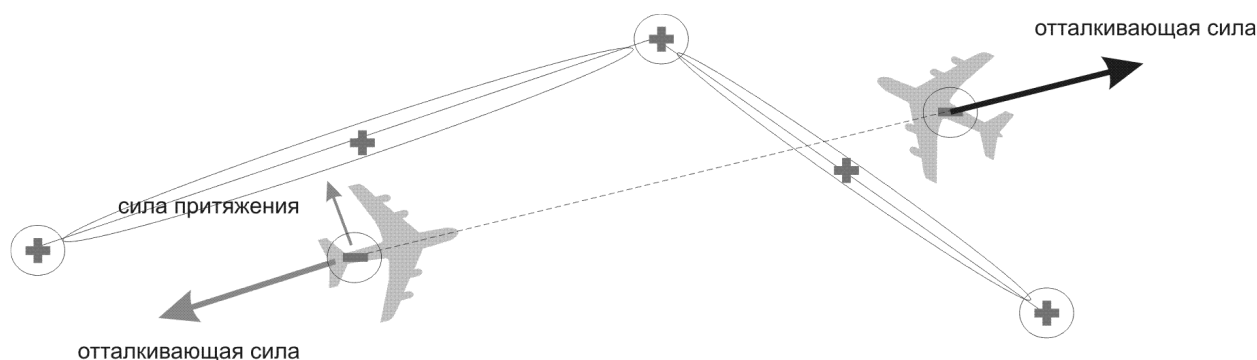


Рисунок 3 Физическая интерпретация метода потенциальных полей

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. 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.

В работе приводится описание разработанных алгоритмов обнаружения и разрешения конфликтов. Производится оценка возможностей и особенностей функционирования разработанных алгоритмов.

Методическая оценка эффективности функционирования предложенных алгоритмов обнаружения и разрешения конфликтных ситуаций проводилась с использованием типовых исследовательских сценариев, начиная от простых конфликтов между двумя ВС до предельно сложных, с участием в одном конфликте значительного числа ВС (до восьми и более). 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. 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.

Пример 1. Трассовый полет. Соответствует случаю полета четырех пар ВС, летящих прямолинейно по траекториям, которые пересекаются в одной точке под углом  $90^\circ$  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 рис. 4 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.

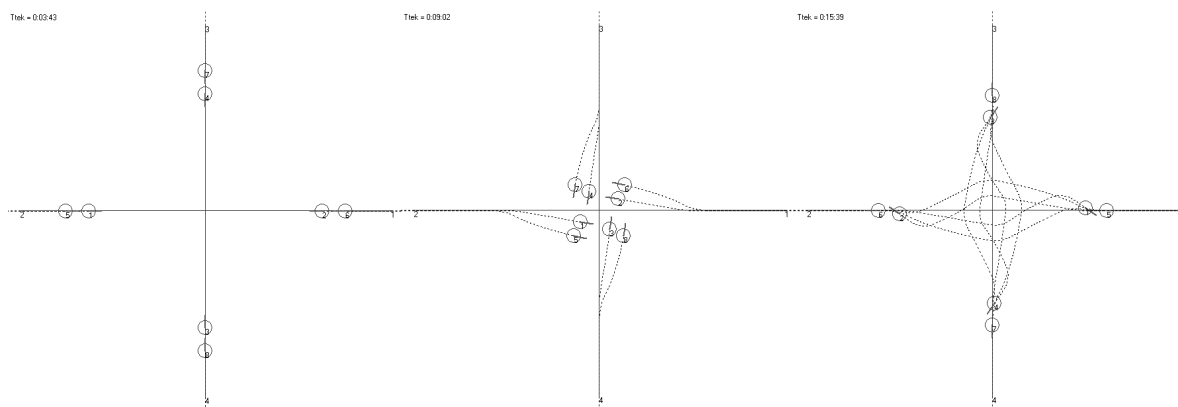


Рисунок 4. Геометрия разрешения конфликта (пример 1)

В таблицах 1-3 представлены результаты, соответствующие случаю полета с выдерживанием плановой траектории (план) и по методу потенциальных полей (МПП). Для варианта управления МПП приведены длина пути, полетное время и минимальное расстояние относительно ближайшего ВС для каждого ВС, участвовавшего в сценарии.

Таблица 1. Результаты моделирования пример 1

ВС №	План		МПП		
	L, км.	T	L	T	Dmin
1	200.33	0:20:00	201.61	0:20:07	8.7
2	200.33	0:20:00	201.61	0:20:07	8.7
3	200.33	0:20:00	201.61	0:20:07	8.7
4	200.33	0:20:00	201.61	0:20:07	8.7
5	240.40	0:20:00	244.36	0:20:19	8.7
6	240.40	0:20:00	244.36	0:20:19	8.7
7	240.40	0:20:00	244.36	0:20:19	8.7
8	240.40	0:20:00	244.36	0:20:19	8.7

Пример 2. Свободный полет. 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 рис. 5 (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.

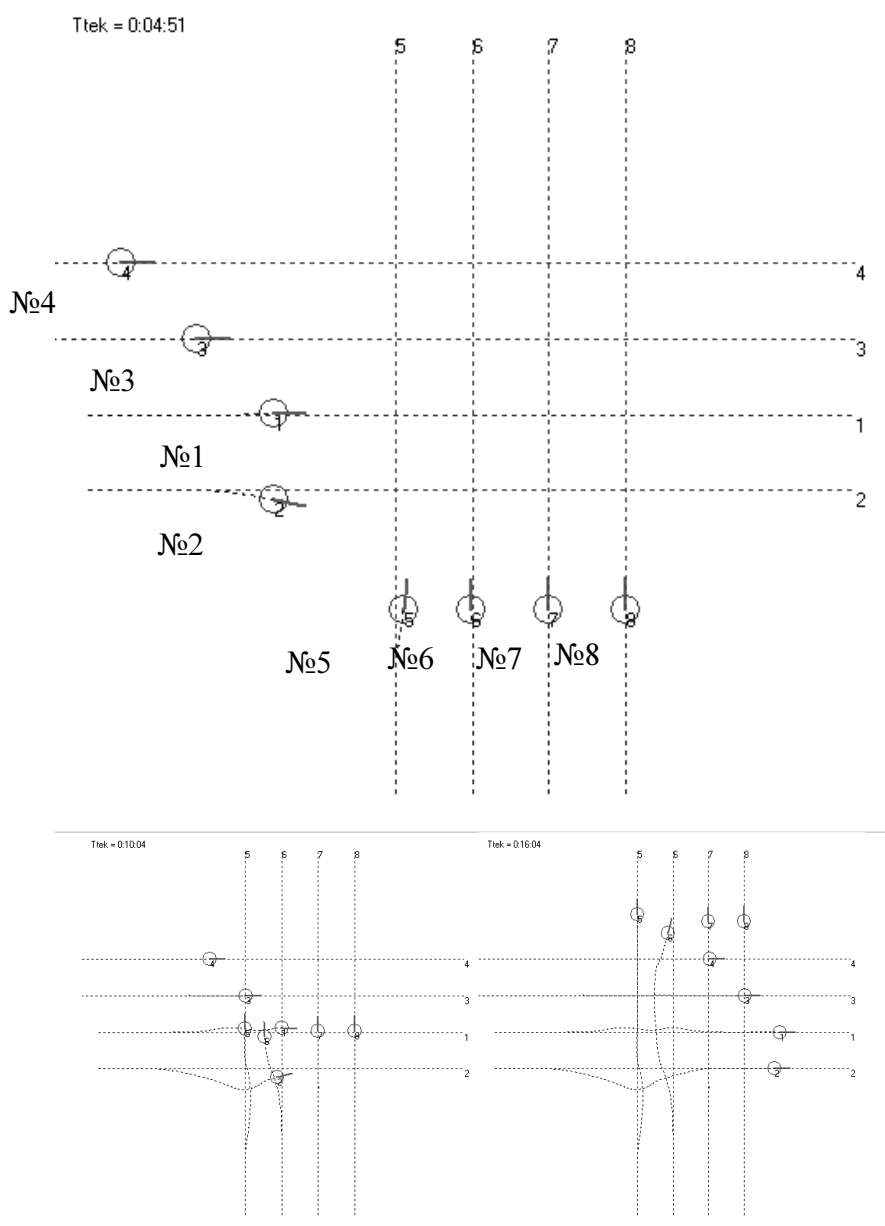


Рисунок 5. Геометрия разрешения конфликта (пример 2)

Таблица 2. Результаты моделирования пример 2

ВС №	План		МПП		
	L, км.	T	L	T	Dmin
1	200.33	0:20:00	201.33	0:20:05	9.2
2	200.33	0:20:00	200.99	0:20:03	9.2
3	200.33	0:20:00	201.10	0:20:04	9.2
4	200.33	0:20:00	201.18	0:20:05	9.2
5	200.33	0:20:00	201.37	0:20:06	9.2
6	200.33	0:20:00	201.05	0:20:04	9.2
7	200.33	0:20:00	201.34	0:20:06	9.2
8	200.33	0:20:00	201.46	0:20:06	9.2

Пример 3. Слияние трасс. Соответствует полету двух ВС на сходящихся траекториях с близкими скоростями, причем в точку схождения ППМ 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.

На рис. 6 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 рис. 7 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). Геометрический метод без доработок не в состоянии разрешить конфликт, поэтому сравнение с ним не производилось.

Таб. - 01304



Рисунок 6. Геометрия конфликта без управления скоростью (пример 3)

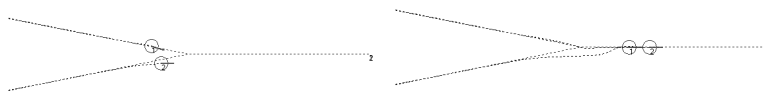


Рисунок 7. Геометрия разрешения конфликта (пример 3)

Таблица 3. Результаты моделирования пример 3

ВС №	План		МПП		
	L, км.	T	L	T	Dmin
1	202.31	0:20:11	191.98	0:22:59	10.3
2	202.31	0:20:11	202.51	0:17:41	10.3

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Организация децентрализованного управления ВС при разрешении конфликтных ситуаций и реализующие такое управление алгоритмы обеспечивают эффективное предотвращение опасных сближений. 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. Имеется принципиальная возможность реализации эффективного управления как при современной структуре и интенсивности потоков ВД в ВП РФ, так и при переходе на перспективные принципы «свободных полетов».

2. Разрабатываемые и внедряемые системы связи, навигации и наблюдения уже в ближайшие годы 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.

3. Предложенные алгоритмы по своей вычислительной сложности реализуемы даже с учетом современной вычислительной оснащенности борта. Проведенные исследования вычислительной загрузки продемонстрировали, что программная составляющая функции самозшелонирования может быть реализована в составе программного обеспечения бортовой авионики ВС. Бортовой алгоритм МПП оформлен в виде Си-модуля как COTS-средство, предполагающее возможность его независимой интеграции в вычислительную среду открытой архитектуры интегрированной модульной авионики (ИМА).

**В четвертой главе** разработаны требования к модулю функционального ПО "Обнаружение и разрешение опасных сближений ВС с другими ВС в воздухе" в соответствии с требованиями КТ-178В "Требований к компоненту программного обеспечения функции ИМА "Обнаружение и разрешение опасных сближений ВС с другими ВС в воздухе". Представлены системные

требования к функциональному назначению, к средам аппаратно-программной и операционной реализаций, к режимам работы, к составу данных информационного взаимодействия и к уровню критичности. К программно-алгоритмической реализации представлены функциональные требования. Представлены требования и характеристики входного и выходного интерфейсов.


На основе представленных требований разработан КПО «ФОРОС», работающая на крейте ИМА под управлением операционной системы реального времени VxWorks AE653.

Отработка макета КПО «ФОРОС» производилась на стенде полунатурного моделирования, ключевыми элементами которого являются следующие подсистемы:

- имитационная модель динамической воздушной обстановки (МДВО). МДВО включает в себя модели диспетчерских пунктов управления, обеспечивающих управление потоком воздушного движения (ВД) со стороны системы УВД, множество моделей ВС, выполняющих полеты по заданным маршрутам, представляющее собой собственно управляемый поток ВД и модель «своего» ВС, на котором проводилось функциональное тестирование бортовых алгоритмов и прототипирование системы индикации;

- полунатурная модель воздушного судна, включающая прототип кабины ВС со своим оборудованием (вычислительные средства, имитаторы средств наблюдения, навигации и связи, органы управления и визуализации, система отображения закабинной обстановки).

Первая подсистема разработана ФГУП «ГосНИИАС», а вторая – ФГУП «Пилотажно-исследовательский центр». В рамках исследований разработаны варианты 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, на который ссылаются стандарты RTCA. Результаты работы алгоритмов обнаружения и выработки рекомендаций представляются пилоту на навигационном дисплее для дальнейшего использования при принятии решений.

На прототипе кабины ВС, по сформулированным предложениям, реализован вывод информации от системы ASAS. На рис. 9 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 ( $113^{\circ}$ - $138^{\circ}$ ) и ( $152^{\circ}$ - $161^{\circ}$ ). Сверху в правом углу диапазона закрытых углов курса символом «заданного курса»  показано рекомендуемое значение курса ( $161^{\circ}$ ) для уклонения от опасного сближения.

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 ASAS становится практически невозможным.



Рисунок 9. Модель навигационного дисплея кабины

Исследования по оценке эффективности применения процедуры самоэшелонирования проводились с использованием разработанного во ФГУП «ГосНИИАС» комплексного исследовательского стенда полунатурного имитационного моделирования интегрированных систем управления воздушным движением (КИС УВД). Основное назначение стенда – проведение моделирования в интересах исследований новой функциональности борта, новых технических и программных средств поддержки работы экипажа, новых методов и способов выполнения эффективных и безопасных полетов. КИС УВД состоит из математических (имитационных) моделей отдельных подсистем и программно-аппаратных макетов отдельных подсистем, предусматривающих участие в их работе человека-оператора. Стенд КИС УВД позволяет настраивать конфигурацию исходя из применяемых задач.

Участниками процедуры АСМ являются экипаж ВС и диспетчер УВД. При моделировании процедуры АСМ использованы следующие модули КИС УВД, имитирующие действия участников:

1) Макет АРМ диспетчера УВД, представляет собой программно-аппаратный макет, который обеспечивает выполнение оператором стенда всех основных функций по управлению ВД, которые выполняет реальный диспетчер на трассе, подходе, в зоне аэродрома.

2) Стенд прототипирования борта ВС (кабина ИМА). Макет кабины перспективного магистрального самолета, включает:

- приборную панель макетируемого самолета с кабинными дисплеями, элементами управления и настройки,
- макеты элементов управления полетом,
- кресла пилотов,



- приборную стойку (консоль), в которой размещаются образцы элементов ИМА, выполненные по требованиям крейтовой технологии ИМА (бортовые вычислители с системным и функциональным программным обеспечением).

3) Модель внешней воздушной обстановки (ВВО) имитирует движения воздушных судов, выполняющих свои задачи в воздухе. В состав имитируемых этой моделью ВС не входит то ВС, которое имитируется с помощью стенда прототипирования (с реальной кабиной).

С рабочих мест диспетчера УВД и кабины возможно создание, трансляция и прием CPDLC сообщений. Модель ВВО так же обладает возможностью приема и автоматической обработки CPDLC сообщений.

4) АРМ управления экспериментом (включает диспетчер сообщений), выполняет интегрирующую функцию для всего стенда, выступая в качестве арбитра, который регулирует ход моделирования и обеспечивает информационное взаимодействие между всеми компонентами стенда. В его задачи входит обеспечение автоматизированной и полной подготовки к проведению исследований (подготовка сценария), и обеспечение возможности проведения процессов моделирования, информационного взаимодействия всех подсистем и выдачи результатов.

Конфигурация функционально-программных модулей, подключаемых при проведении исследований процедуры АСМ, приведена на рисунке 10.

При проведении полунатурного моделирования сформулированы правила использования воздушного пространства и управления воздушным движением, связанные с реализацией децентрализованного и смешанного управления.

Рассмотрены изменения в организации воздушного движения, связанные с изменением схемы управления воздушным движением:

1) *смешанное* управление предоставляет возможности самоэшелонирования на основе бортовых средств, включая бортовое наблюдение, обеспечиваемое ADS-B, и передачи ответственности за эшелонирование пилоту в установленном воздушном пространстве в условиях выполнения полетов воздушными судами с различным составом бортового оборудования;

2) *децентрализованное* управление обеспечивает самоэшелонирование 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. Самоэшелонирование осуществляется в выделенном воздушном пространстве на маршруте.

Дано определение *автономного воздушного пространства*, где все воздушные суда должны иметь оборудование АСМ и возможность самостоятельного обеспечения эшелонирования в характерных условиях конкретной операционной зоны.

Предложены стадии выполнения процедуры АСМ для автономного ВП, разработан штатный сценарий и фразеология взаимодействия экипажа и диспетчера для процедуры АСМ.

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

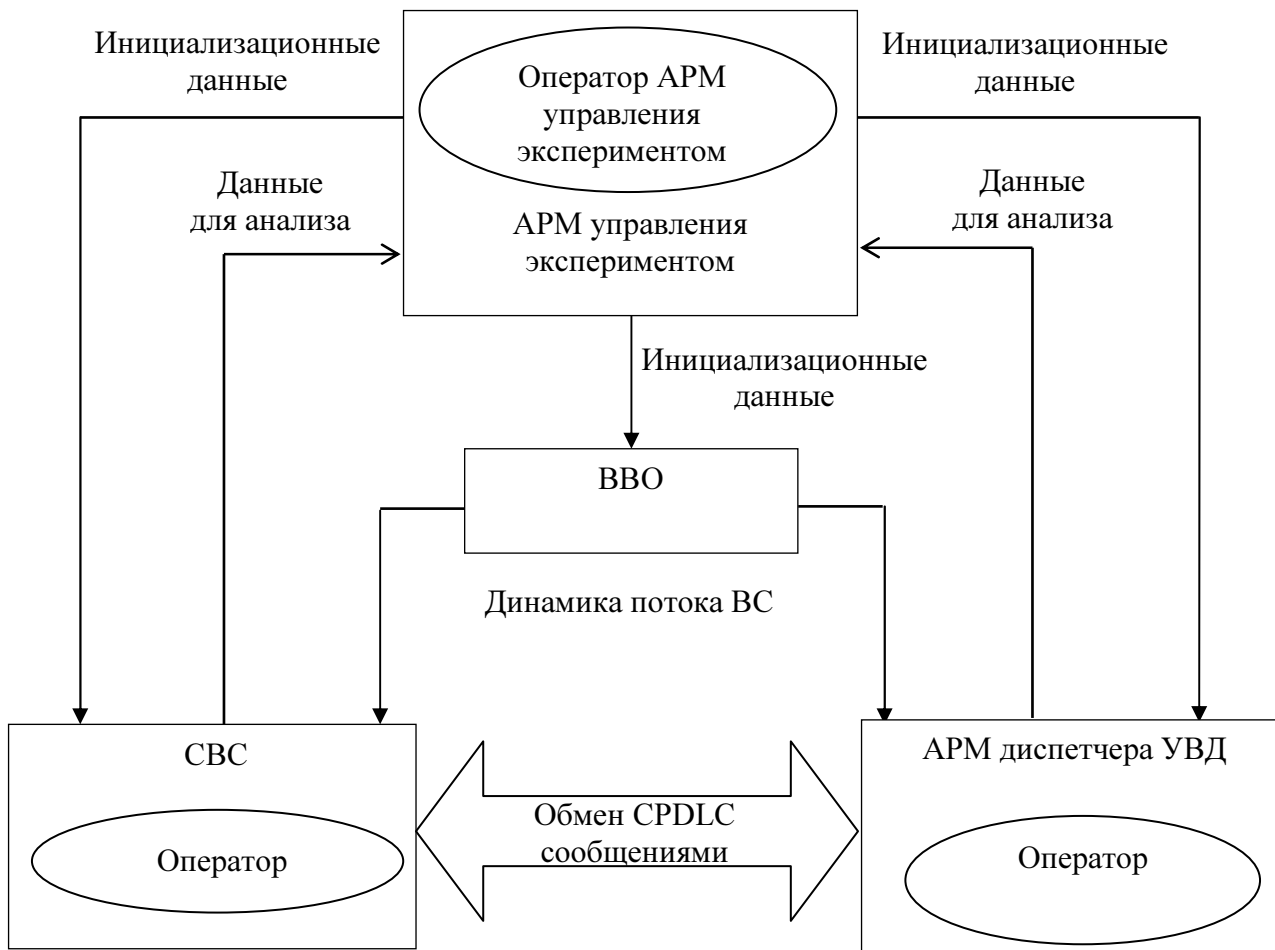


Рисунок 10. Конфигурация программных модулей КИС УВД для проведения исследований процедуры АСМ

№ п.п.	Стадии процедуры АСМ	Диспетчер УВД	Экипаж ВС
1	Пуск системы АСМ		При влете в область свободных маршрутов борт отправляет диспетчеру УВД запрос на самоэшелонирование
2	Настройка на полет с поддержкой АСМ	Если борт оборудован системой самоэшелонирования и все ВС в окрестности оборудованы системой АЗН-В, то диспетчер УВД дает разрешение борту на выполнение самоэшелонирования	
3	Выполнение полета с работающей АСМ		При получении разрешения на выполнение самоэшелонирования борт выполняет полет, самостоятельно обеспечивая бесконфликтность.

№ п.п.	Стадии процедуры АСМ	Диспетчер УВД	Экипаж ВС
4	Завершение полета с поддержкой АСМ		При приближении борта к границе области свободных маршрутов, борт докладывает диспетчеру УВД о готовности к завершению самоэшелонирования.
5		Диспетчер УВД принимает борт под свой контроль и отправляет борту подтверждение о принятии под управление	

В соответствии с разработанными предложениями на стенде КИС УВД проведено моделирование, с целью:

- 1) Функциональной апробации выполнения процедуры эшелонирования в автономном воздушном пространстве в условиях потенциального множественного конфликта.
- 2) Демонстрации взаимодействия пилота и диспетчера во время выполнения процедуры АСМ.

### **ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ**

**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 метообразованиям.
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).

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**В изданиях рекомендованных ВАК для опубликования основных научных результатов диссертации:**

1. О. В. Дегтярев, В. С. Орлов. Алгоритмы обнаружения и децентрализованного разрешения опасных сближений самолетов в воздухе, основанные на методе потенциальных полей. // Известия РАН. Теория и системы управления, Москва, «Издательство «Наука»», 2013, № 5, с. 39–59.
2. В.С. Орлов. Отображение информации о конфликтных ситуациях на кабинном индикаторе воздушного судна, // Научный вестник МГТУ ГА, 2013, № 195, с.79-86.
3. А. В. Людомир, В. С. Орлов. Имитационное моделирование динамической воздушной обстановки в управляемом воздушном пространстве. // Прикладная информатика, 2014, № 5 (53) 2014, с.89-97.

**В прочих изданиях:**

4. О.В. Дегтярев, А.В. Кан, В.С. Орлов. Проблемы моделирования процессов выполнения управляемых потоков воздушного движения. // Материалы конференции «ИММОД 2005» том 2, 2005 г.
5. М.В.Бахиркин, Д.И.Грознов, В.С. Орлов, Б.В.Пучков. Разработка комплекса тестирования подсистемы обнаружения и разрешения опасных сближений ВС. // Сборник трудов конференции «Чкаловские чтения», 2007 г.
6. М.В. Бахиркин, Д. И. Грознов, И.В. Ковернинский, С.В. Малахов, М.Ю. Ольшанский, В.С. Орлов, Б.В. Пучков Исследование функциональных приложений самолетной функции наблюдения с использованием симулятора платформы ИМА. // Сборник докладов международной конференции «Новые рубежи АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ», 2007 г.
7. И.В. Ковернинский, В.С. Орлов, Б.В. Пучков. Отработка алгоритмического и программного обеспечения автономной функции эшелонирования на стенде виртуального прототипирования бортовой авионики. // Сборник трудов международного симпозиума «Интеллектуальные системы» (INTELS-2008), 2008 г.
8. М.В.Бахиркин, В.С. Орлов. Распределенная модель динамической воздушной обстановки. // Материалы конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика». ИММОД-2009, 2009 г.
9. М.В.Бахиркин, В.С. Орлов. Распределенная модель динамической воздушной обстановки. // Материалы XVI Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2009), Алушта, 2009 г.
10. О.В. Дегтярев, В.С. Орлов, Б.В. Пучков. Разработка бортовых алгоритмов обнаружения и децентрализованного разрешения опасных сближений в воздухе, основанных на методе потенциальных полей. // Сборник трудов международного симпозиума «Интеллектуальные системы» (INTELS-2010), 2010 г.
11. Д.Ю.Богатырев, О.В.Дегтярев, В.С.Орлов. Применение функции ASAS в системе кабинной индикации ВС. // Сборник трудов международного симпозиума «Интеллектуальные системы» (INTELS-2012), 2012 г.
12. В.С. Орлов. Разработка модели ошибок самолетовождения, основанного на требуемых навигационных характеристиках (RNP). // Тезисы докладов. 11-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2012», МАИ. 2012 г.
13. А.В. Людомир, В.С.Орлов. Универсальный алгоритм выработки команд самолетовождения имитационной модели ВС // Материалы конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика». ИММОД-2013. – Казань: Изд-во «Фэн» Академии наук РТ, 2013.-Т.2.
14. V.Orlov. Simulation of airborne conflict management (ACM). // Conference proceedings, Integrated Communications, Navigation and Surveillance (ICNS) Conference, ICNS 2014, Herdon, VA, USA, 2014 г.

15. В.С. Орлов. Моделирование ошибок навигации в воздушном пространстве с заданным уровнем требуемых навигационных характеристик (RNP). // Сборник трудов международного симпозиума «Интеллектуальные системы» (INTELS-2014), 2014 г.

**Свидетельства о государственной регистрации программ**

16. О.В. Дегтярев, В.П. Егорова, И.Ф. Зубкова, А.В. Кан, В.С. Орлов. Программный комплекс имитационного моделирования процессов организации и управления воздушным движением (КИМ УВД). Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005612007 от 08.08.2005.

17. В.С. Орлов. Компонент программного обеспечения функции обнаружения и разрешения опасных сближений в воздухе воздушного судна (ВС) с другими ВС (КПО ФОРЭС). Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2014663097 от 21.12.2014.

Множительный центр МАИ (НИУ)

Заказ от «11» апреля 2015 г.

Тираж 100 экз.