

ИНВАРИАНТНАЯ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КОНФЛИКТНЫМИ СИТУАЦИЯМИ ВОЗДУШНЫХ КОРАБЛЕЙ НА ЭТАПЕ ЗАХОДА НА ПОСАДКУ

В.В. Павлов, А.Е. Волков, Д.А. Волошенко

Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины

Рассмотрен вопрос необходимости создания системы управления конфликтными ситуациями воздушных кораблей на этапе захода на посадку. Предлагается идея применения сетецентрических технологий для создания новой структуры системы управления воздушным движением в области гражданской авиации с целью обеспечения высокого гарантированного уровня безопасности полетов. Предложен подход к решению задачи, основанный на исследованиях в области дифференциальных игр и теории инвариантности.

Ключевые слова: сетецентрическая система, безопасность полетов, инвариантность, конфликтные ситуации, дифференциальные игры, свободный полет.

Розглянуто питання необхідності створення системи керування конфліктними ситуаціями повітряних кораблів на етапі заходу на посадку. Пропонується ідея застосування мережецентричних технологій для створення нової структури системи керування повітряним рухом в галузі цивільної авіації з метою забезпечення високого гарантованого рівня безпеки польотів. Запропоновано підхід до вирішення завдання, заснований на дослідженнях в області диференціальних ігор та теорії інваріантності.

Ключові слова: мережецентрична система, безпека польотів, інваріантність, конфліктні ситуації, диференціальні ігри, вільний політ.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии со сформулированной стратегией развития организации воздушного движения Европейская организация по безопасности аэронавигации среди приоритетных направлений отвела важное место разработке новых принципов управления воздушным движением (УВД) и организации воздушного пространства, которые призваны обеспечить высокую пропускную способность сети маршрутов и возможность выполнять полеты по наиболее эффективным траекториям при гарантированном уровне безопасности, которого требуют современные авиационные стандарты.

Современные требования к УВД заключаются в следующем: увеличение пропускной способности системы УВД; гибкое использование воздушного пространства; возможность выполнять полеты по оптимальным траекториям; динамическая коррекция планов полетов; уменьшение временных задержек прибытия рейсов; минимизация отклонения самолетов от запланированных траекторий; обеспечение высокого гарантированного уровня безопасности полетов; упрощение и унификация процедур взаимодействия «земля-самолет-земля» и т.д.

Для реализации этих требований была разработана концепция “FreeFlight” [1].

Основным заданием концепции “FreeFlight” является повышение эффективности воздушного движения в целом и оптимизация выполнения полета отдельного воздушного корабля (ВК) путем предоставления экипажу полной свободы в выборе траектории движения с соблюдением гарантированного уровня безопасности. Главной идеей концепции свободного полета «FreeFlight» является предоставление экипажу возможности выбирать траекторию полета по маршруту, скорости и профилю полета по приборам в большей степени, чем это позволяют правила визуального полета. Но такая автономность должна эффективно сосуществовать с надежностью безопасного расхождения ВК средствами бортовой аппаратуры.

Постепенный переход к полетам по произвольным маршрутам [2], который предусмотрено осуществить в течение ближайших 10–15 лет, несет в себе дополнительные трудности, такие, как рост количества и сложности потенциально-конфликтных ситуаций, возникающих между ВК. Все это влечет за собой снижение уровня безопасности полетов и, соответственно, именно этим обусловлена актуальность данной темы.

Соответственно, ставится задача создания математического и программного аппарата, позволяющего эффективно решать сложные конфликтные ситуации с произвольным количеством задействованных ВК, что является чрезвычайно актуальным для режима FreeFlight. Необходимым условием для обеспечения этого процесса является четкая координация действий между всеми ВК, согласно установленной последовательности решения конфликта.

Целью данной работы является разработка способа и системы решения конфликтных ситуаций ВК на маршрутах полета, этапах взлета и посадки, с условием обеспечения гарантированного уровня безопасности полетов, и применением сетцентрических технологий, основываясь на теории инвариантности.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Необходимость проводимых в работе исследований подтверждается тем, что современное состояние мировой авиатранспортной системы характеризуется стабильным увеличением объемов авиаперевозок, которое уже приводит к достижению системой своих предельных возможностей. Дальнейшее увеличение интенсивности воздушного движения неизбежно приводит к снижению безопасности полетов, увеличению задержек ВК как на земле, так и в воздухе, увеличению расхода топлива и снижению эффективности выполнения полетов, неприемлемому увеличению экологических издержек. Повышение интенсивности движения в европейской сети воздушных маршрутов непосредственно влияет на увеличение количества потенциально-конфликтных ситуаций, о чем свидетельствуют статистические данные. Как следствие, наземные диспетчерские центры испытывают значительные перегрузки при регулировании потоков воздушного движения.

Столкновение ВК в воздухе друг с другом вызывает большое число катастроф, поэтому очень важна количественная оценка безопасности полета величиной допустимого риска столкновения воздушных судов. Однако, даже с помощью высокоэффективных и высоконадежных систем УВД невозможно обеспечить необходимую безопасность полетов. Дело в том, что до сих пор часть земной поверхности не охвачена зоной действия систем УВД, а кроме того, существующие системы УВД не позволяют надежно контролировать полеты на малых высотах и в труднодоступных для наблюдения регионах земного шара.

Одной из самых важных причин опасных сближений ВК является то, что диспетчер принимает решения по прогнозированию и определению конфликтов на основании неполной информации в условиях дефицита времени.

Ожидаемым результатом данной работы является создание новой универсальной системы управления конфликтными ситуациями воздушных кораблей, построенной на сетцентрических технологиях и на принципах теории инвариантности, которая позволит удовлетворить современным требованиям организации воздушного движения (ОВД) по обеспечению гарантированного уровня безопасности полетов.

Попытки провести классификацию современных методов и алгоритмов решения конфликтных ситуаций между ВК можно найти в работе [3]. Обобщенный вид этой классификации имеет весьма обширную и распределенную структуру и позволяет сделать несколько важных выводов:

- значительная часть методов и алгоритмов рассчитана на конфликтные ситуации с участием только двух ВК, а для более сложных случаев использует попарный перебор, при этом не учитывается возможное влияние решения одного конфликта на другие конфликты, которые расположены сравнительно недалеко по времени и расстоянию;

- наибольшая эффективность решения конфликтов достигается при использовании распределенных наземно-бортовых систем, которые пока полноценно не реализованы.

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ

Глобальный аэронавигационный план Международной организации гражданской организации (ИКАО) на 2013–2028 года предусматривает повышение уровня безопасности и обслуживания в аэронавигации за счет создания новых систем предотвращения опасных сближений ВК, основанных на управлении цифровой аэронавигационной информацией (ЦАИ) [4]. Управление ЦАИ позволит сократить время, необходимое для распространения информации о статусе воздушного пространства, обеспечить более эффективное использование воздушного пространства, повысить качество передачи данных, упростить процедуры проверки данных, организовать поток воздушного движения с минимальными задержками, осуществлять мониторинг за эксплуатационной средой на этапе полета в целях обеспечения своевременной выдачи предупреждений об увеличении

риска для безопасности полетов. Все это является технологической основой при создании новых систем предотвращения столкновений ВК.

Необходимо помнить, что одним из самых обширных классов систем управления является класс дифференциально-игровых систем или динамических игр [5].

В настоящее время достаточно хорошо развита теория динамических игр. Существующие подходы — прямые методы Л.С. Понтрягина, правило экстремального прицеливания Н.Н. Красовского, метод групповых операторов Б.Н. Пшеничного, техника, связанная с основными уравнениями теории дифференциальных игр Р. Айзекса, метод решающих функций, позиционные дифференциальные игры Н.Н. Красовского — А.И. Субботина и ряд других эффективных процедур, позволяют исследовать широкие классы конфликтно-управляемых процессов на предмет игрового сближения траекторий. Весьма разнообразны и убедительны методы уклонения от встречи: метод маневра обхода Л.С. Понтрягина — Е.Ф. Мищенко, методы постоянных и переменных направлений, метод инвариантных подпространств, рекурсивный метод и др.

Однако, большинство методов, в том числе и самые распространенные методы, предложенные Н.Н. Красовским в работе [6], где рассматривается игровая задача уклонения жестко скоординированных убегающих в шаре от группы инерционных преследователей и приводится подробный математический анализ этой проблемы, описывают только линейные и стационарные системы, в то время как полет самолета и конфликт ВК являются динамическим нелинейным процессом.

Большое внимание рассмотрению конфликтно-управляемых процессов уделено в работах А.А. Чикрия [7, 8]. Приведем предлагаемый им пример конфликтно-управляемого процесса в евклидовом пространстве. Для этого рассмотрим конфликтно-управляемый процесс в конечномерном евклидовом пространстве R^n , $n \geq 2$:

$$z(t) = g(t) + \int_0^t \Omega(t, \tau) (u(\tau), v(\tau)) d\tau.$$

Вектор-функция $g(t)$, $g: R_+ \rightarrow R^n$, $R_+ = \{t: t \geq 0\}$, измерима по Лебегу и почти везде ограничена, матричная функция $\Omega(t, \tau)$ определена в треугольнике $\Delta = \{(t, \tau): t \geq \tau \geq 0\}$, измерима по t и суммируема по τ для каждого $t \in R_+$. Блок управления задается функцией $\varphi(u, v)$, $\varphi: U \times V \rightarrow R^n$, непрерывной по совокупной переменных на прямом произведении непустых компактов U и V , $U \in K(R^m)$, $V \in K(R^l)$, m, l — натуральные числа. Допустимые управления игроков $u(\tau)$, $u: R_+ \rightarrow U$, и $v(\tau)$, $v: R_+ \rightarrow V$ — это измеримые функции времени.

Задано терминальное множество M^* цилиндрического вида: $M^* = M_0 - M$, где M_0 — линейное подпространство в R^n , а M — компакт из ортогонального дополнения L к M_0 в R^n , $M \in K(L)$.

Первый игрок (u) стремится вывести траекторию процесса на терминальное множество за кратчайшее время, а второй (v) — максимально оттянуть этот момент.

Указанный выше пример конфликтно-управляемого процесса имеет подробное описание и подходит для многих систем. Однако, он сложно

применим для современной авиации, также, как и работы Н.Н. Красовского, так как описывает линейные системы и процессы, в то время, как полет ВК и конфликтная ситуация являются динамическими нелинейными процессами. К тому же, не учтены здесь и особенности распределенной среды, в которой находятся ВК, влияние внешних факторов и возмущений, математическая модель самого ВК.

Несмотря на значительные результаты в области автоматического управления движениями комплексов летательных аппаратов, актуальными остаются работы по формированию алгоритмов управления, разработке структуры и исследованию динамических систем управления этими комплексами. Объектом управления здесь является строй летательных аппаратов, имеющий вид потока одиночных объектов или звеньев. При полете самолетов строем одной из наиболее важных проблем является проблема безопасности (предотвращения опасных сближений) взаимодействующих объектов группы.

В силу ряда причин задача автоматического управления полетом воздушных судов в групповом порядке представляет собой одну из наиболее сложных и специфических научно-технических проблем авиации, требующую комплексного решения. Характерной особенностью управления группой летательных аппаратов является нестационарность параметров полета. Вопросами автоматизации управления полетом строя активно занимались В.А. Боднер, А.А. Красовский, Ю.П. Доброленский, В.Г. Тарасов, С.В. Петров. В работах этих ученых были сформулированы общие требования к системам автоматического управления группой самолетов, представлено математическое описание строя как объекта управления, проведены исследования задачи управления самолетами в группе, даны технические предложения по построению систем управления строем самолетов.

В работе В.А. Боднера [9] подробно рассматривается вопрос решения конфликтных ситуаций ВК с позиции управления строем самолетов. Приводится подробная математическая модель строя самолетов, на основе которой можно сделать вывод, что непосредственное управление строем, учет интервала между самолетами, учет математической модели каждого из самолетов, определение ведущего и ведомых самолетов, соблюдение равенства скоростей и ускорений, высоты и курса — все это очень близко к проблеме расхождения ВК в воздухе и необходимости соблюдения норм эшелонирования. Однако, создание системы решения конфликтных ситуаций на основании управления полетом строя самолетов не получило своего развития из-за технических и принципиальных трудностей ее создания: необходимости учета нелинейных динамических нестационарных условий полета, существенных недостатков современных систем обмена данными между ВК.

Руфус Айзекс в своей работе, посвященной теории дифференциальных игр [10], очень подробно и интересно рассматривает задачи преследования, что соответствует и конфликтам ВК. Им подробно рассматриваются различные виды преследований, подходы к решению этих задач, критерии оптимальности их выполнения. Стратегии решения задачи преследования Айзекс разделяет на дискретные, аналитические и геометрические. Отдельно

им ставится задача преследования как задача качества с некоторым критерием оптимальности. Работу Айзекса можно считать основополагающей в теории дифференциальных игр, как и его задачу преследования-убегания, которая является одним из примеров постановки задачи решения конфликтной ситуации ВК.

Необходимо помнить и о том, что поскольку в контуре управления ВК участвует пилот, то в качестве основы для разрешения навигационных конфликтов целесообразно использовать теорию технических эргатических организмов. Вопросы конфликтов в технических эргатических системах очень подробно рассмотрены в работе В.В. Павлова [11]. Там же приводится и подробное описание понятия функционального гомеостаза.

В настоящее время существует много публикаций, посвященных исследованию процессов управления сближением конфликтующих подвижных объектов. При этом в большинстве известных работ рассматривается такая ситуация, когда о положении подвижных объектов и их управлении имеется полная информация. Значительно меньшее число работ посвящено рассмотрению тех случаев, когда измерения координат объектов управления производятся при наличии помех, относительно которых предполагается их стохастическая природа с известными вероятностными характеристиками.

В работе В.М.Кунцевича [12] делается акцент на случаи управления сближением конфликтующих объектов, когда определение фазовых координат объектов управления осуществляется с учетом стохастической природы имеющихся помех. Рассматривается также случай наличия неконтролируемых помех, свойства которых зависят от фазовых координат, что характерно для подвижных объектов в трехмерном пространстве. Автором рассматривается подход к решению проблемы, основанный на минимальных инвариантных множествах динамической системы, подверженных воздействию аддитивных ограниченных возмущений. Показано и доказано, что учет помех приводит к увеличению окрестности фазовых координат и, соответственно, — к возникновению зон неопределенностей положения объекта в пространстве.

В процессе решения задач по модернизации современных систем УВД и повышению безопасности полетов необходимо уделять достаточное внимание и вопросам, в которых рассматривается использование математических моделей для планирования, оптимизации и корректировки полета, а также систем устранения конфликтных ситуаций на земле и в воздухе, учитывающих необходимость обеспечения вихревой безопасности [13].

Необходимо помнить, что после посадки самолета требуется время для затухания образовавшихся вихрей и зон турбулентности (рис. 1.). Это вызывает время ожидания, которое к тому же зависит от многих метеоусловий: наличия поперечных воздушных потоков, атмосферной турбулентности, температуры воздуха и т.д. Желание минимизировать задержки и увеличить пропускную способность упирается в проблему возникновения вихрей и спутного следа от приземляющихся самолетов.

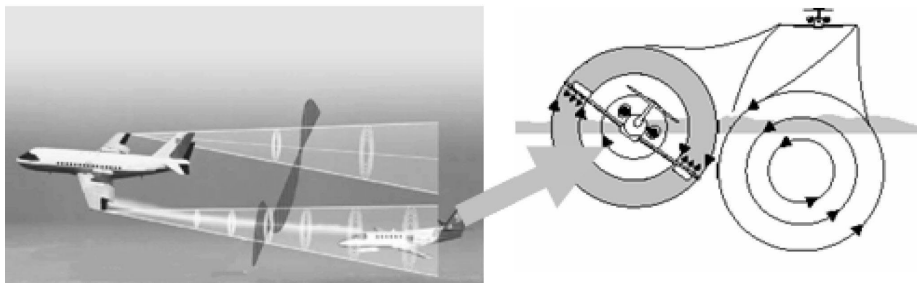


Рис. 1. Модель вихря, образующегося за летящим самолетом

Одним из важных направлений исследований в области организации УВД является целесообразность применения регулярной сетки для структурирования воздушных потоков (рис. 2 и 3) [13]. Регулярная сетка совмещает в себе две идеи: повторяющуюся структуру воздушных потоков и наличие выделенных слоев с параллельными маршрутами следования.

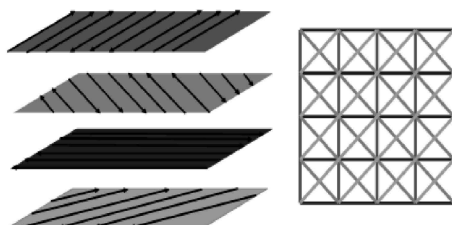


Рис. 2. Вертикально расположенные слои регулярной сетки и её горизонтальная структура

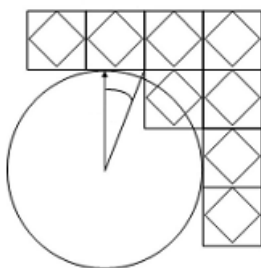


Рис. 3. Процесс присоединения самолета к регулярной сетке

Одним из обобщенных методов повышения безопасности полетов за счет уменьшения рисков конфликтных ситуаций является внедрение и применение концепции зональной навигации [14]. Суть зональной навигации в следующем. Применение все более сложного бортового навигационного оборудования, навигационных средств космического базирования и автономных инерциальных навигационных систем предполагает возможность осуществления выгодной замены полета от одного навигационного средства к другому на протяжении постоянных маршрутов по такой форме, по которой выполняется полет ВК по наиболее прямому маршруту между пунктами вылета и назначения. Зональная навигация предусматривает траекторию планового полета, которую можно задавать и в горизонтальной плоскости в виде маршрута, и в вертикальной — через высоты прохождения пунктов маршрута, углов и градиентов наклона

траектории. Кроме того, можно задавать пространственно-временную траекторию, а не время прохождения некоторых пунктов.

Проблема внедрения зональной навигации состоит в том, что необходимо обеспечить полет по свободным траекториям с высокой точностью ее соблюдения и соответствием установленным в конкретном регионе требованиям. Соответственно, возникает проблема нормативного урегулирования и технического обеспечения полетов по зональной навигации, что требует больших материальных затрат.

Проведенный анализ последних исследований позволяет сделать следующие выводы.

— Проблемой всех методов и алгоритмов обнаружения и предотвращения конфликтов является неопределенность прогнозируемого положения самолетов, обусловленная погрешностями оценки текущей воздушной обстановки, неадекватностью математических моделей, описывающих движение самолета, влиянием ветра, навигационными погрешностями, ошибками управления, а также непредсказуемыми изменениями траектории, связанными с коррекцией движения пилотом или наземной системой УВД.

— Время прогноза является важнейшим фактором в системах обнаружения и предотвращения конфликтов. С одной стороны, с увеличением времени прогноза резко снижается достоверность оценки ситуации. С другой стороны, с уменьшением времени прогноза сокращается время принятия решения и ограничивается количество возможных вариантов устранения конфликта. Рассмотренные методы характеризуются большими временными затратами, что не решает проблемы повышения безопасности.

— При разработке методов обнаружения и оценки конфликтов естественным является желание получить аналитические выражения для оценки характеристик алгоритмов. Аналитические выражения позволяют более точно оценивать вероятность конфликта. Рассмотренные подходы и методы решения задачи обнаружения конфликтов достаточно сложные и для получения аналитического решения нужно сделать существенные упрощения, чтобы записать выражения, позволяющие произвести их алгоритмизацию и компьютерную реализацию. Эти методы не дают адекватного математического описания для прогнозирования развития неопределенности будущего положения самолетов на участках маневрирования.

— Значительное количество методов и алгоритмов решения конфликтных ситуаций рассчитаны на участие только двух ВК, а для более сложных случаев рассматриваются варианты парного перебора. При этом в парном переборе не учитывается влияние решения одного конфликта на другие.

— Основной проблемой рассмотренных работ является то, что они рассматривают стохастические подходы к решению задачи определения конфликтов, рассматривают только оценку их вероятности и не решают непосредственно задачу предотвращения конфликтов.

Именно эти вышеперечисленные проблемы и недоставки и являются нерешенной частью общей проблемы, для решения которой необходимо искать новые подходы и методы в области систем и процессов управления.

ИНВАРИАНТНАЯ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КОНФЛИКТНЫМИ СИТУАЦИЯМИ ВОЗДУШНЫХ КОРАБЛЕЙ

Опишем подробно современный процесс обнаружения конфликта и его разрешения с предлагаемыми изменениями для реализации новой системы управления. Процессы обнаружения конфликта и его разрешения, как правило, разделены. Сигнал обнаружения является стартовым для начала работы алгоритма решения конфликта.

Универсальный алгоритм определения наличия конфликтной ситуации показан в работе [3]. Нами предлагается дополнить его алгоритмом определения приоритетов ВК в процессе конфликта. Система приоритетов позволяет ускорить процесс поиска оптимального маневра, поскольку содержит предварительно оцененное значение оптимизационного функционала для данного маневра. Такой алгоритм определения «пассивного/активного» (или «приоритетного») ВК для выполнения маневра представлен на рисунке 4.

Далее следует непосредственно процесс работы алгоритма решения конфликтной ситуации ВК и избегания опасного сближения (рис. 5).

При определении параметров необходимых маневров следует использовать построение математических функций областей управляемости каждого ВК для определения его возможностей. Решение этой задачи основывается на построении графиков зависимостей управляющих характеристик ВК друг от друга. Используется математический аппарат кинематики и динамики полета ВК [15] с учетом аэродинамических характеристик каждого ВК. Приведа результаты к выводу сил путем взятия производных, получим:

$$\begin{aligned} \ddot{L} &= F_1(\theta, \psi, m, P, \alpha, \beta, X, \gamma, Y, Z, \delta) = \\ &= F_1(t, (H, L, Z, m(t)), (\theta, \psi, \delta)^{u'}, (\alpha, \beta, \gamma)^{u''}, (\delta_{pred}, \delta_{zak})^{u'''}), (V_1, V_2, V_3); \\ \ddot{H} &= F_2(\theta, m, P, \alpha, \beta, X, \gamma, Y, Z, \delta) = \\ &= F_2(t, (H, L, Z, m(t)), (\theta, \delta)^{u'}, (\alpha, \beta, \gamma)^{u''}, (\delta_{pred}, \delta_{zak})^{u'''}), (V_1, V_2, V_3); \\ \ddot{Z} &= F_3(\theta, \psi, m, P, \alpha, \beta, X, \gamma, Y, Z, \delta) = \\ &= F_3(t, (H, L, Z, m(t)), (\theta, \psi, \delta)^{u'}, (\alpha, \beta, \gamma)^{u''}, (\delta_{pred}, \delta_{zak})^{u'''}), (V_1, V_2, V_3), \end{aligned}$$

где $(\theta, \psi, \delta)^{u'}$ — параметры элементов траекторного управления; $(\alpha, \beta, \gamma)^{u''}$ — параметры элементов кинематического управления; $(\delta_{pred}, \delta_{zak})^{u'''}$ — параметры элементов аэродинамического управления.

Подставив аэродинамические данные конкретных ВК и построив функции зависимостей управляющих характеристик, получим графики, пример которых приведен на рисунках 6 и 7.

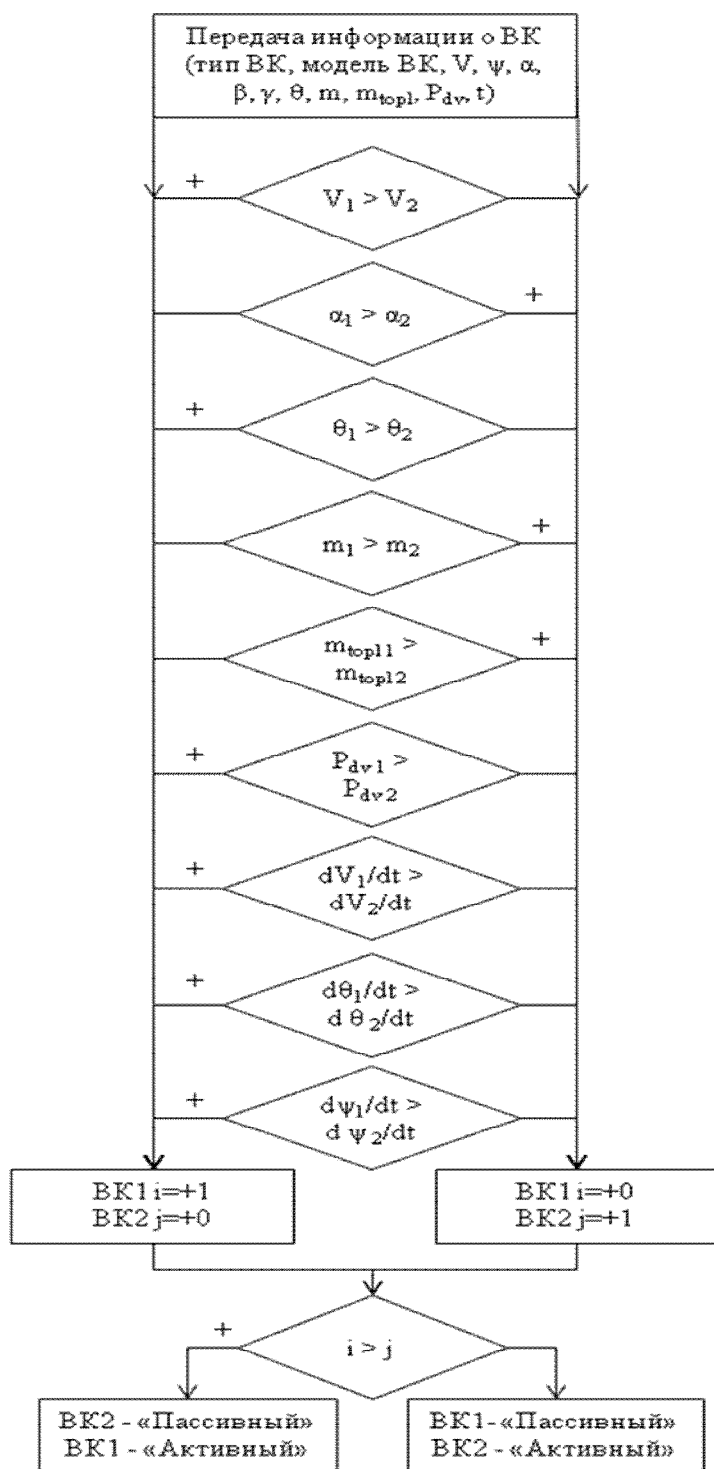


Рис. 4. Алгоритм определения «пассивного/активного» ВК

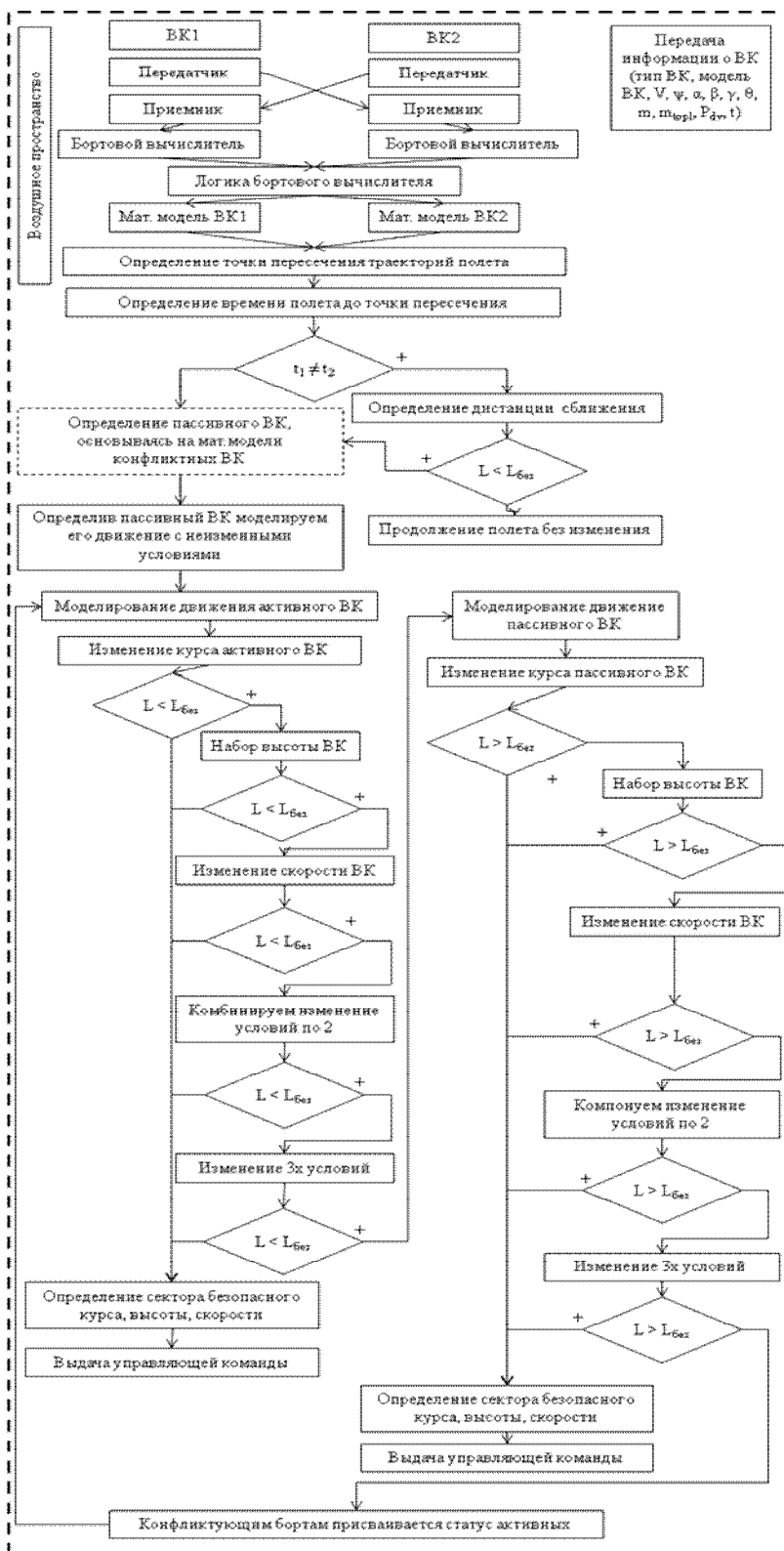


Рис. 5. Алгоритм решения конфликтной ситуации ВК и избегания опасного сближения

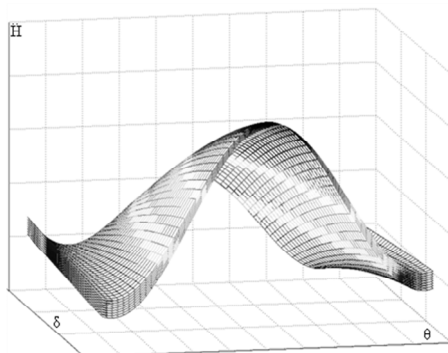


Рис. 6. Влияние параметров траекторного управления ВК на вызываемое ускорение

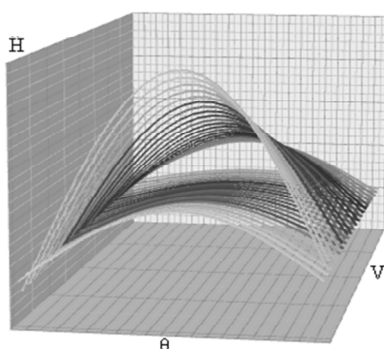


Рис. 7. Область управляемости ускорением ВК в зависимости от скорости и наклона траектории

Необходимо отметить, что современная система управления воздушным движением, является управляемой динамической системой, информация о ее состоянии периодически уточняется и обновляется. Траектория движения управляемых объектов — самолетов, является непрерывной и математически описывается непрерывными уравнениями динамики. Анализ воздушной обстановки, которая составляется и прогнозируется, а также принятие решения по предотвращению прогнозируемого конфликта, выполняются в дискретные моменты времени. Таким образом, задача предотвращения конфликтов имеет гибридную структуру, в которой дискретно-временной процесс анализа и принятия решений соединен с непрерывной динамикой процесса реализации решения. Такая гибридная структура должна производить команды, которые могут быть реализованы бортовой системой управления полетом, основанной на сетцентрических технологиях управления.

Поэтому, новая концепции УВД и предлагаемая технология управления конфликтными ситуациями предполагают применение современных технологий связи, навигации, наблюдения (CNS), позволяющих обеспечить самолет точной навигационной информацией глобальной системы спутниковой навигации (GNSS), а также наличие информационной связи с ближайшими самолетами с использованием автоматического независимого наблюдения в режиме радиопередачи и цифрового канала передачи данных

(рис. 8) [16]. Особенности такой современной системы является применение высокоскоростных линий передачи данных со специальным видом модуляции, широкое применение глобальной системы спутниковой навигации на всех стадиях полета, гибкое, скоординированное использование воздушного пространства с учетом всех участников и унификация систем обработки данных с целью последующей интеграции в региональные и глобальные сети. Это позволит повысить точность траекторной оценки, осуществить достоверное прогнозирование потенциально конфликтных ситуаций на время от 10 до 30 минут, что даст возможность реализовать стратегию кооперативного предотвращения конфликта с применением критериев оптимальности, которые учитывают движение всех конфликтующих самолетов.

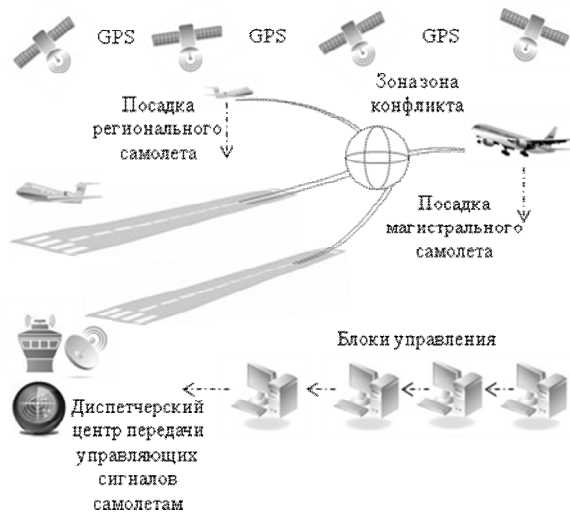


Рис. 8. Обобщенная структура сетевидной системы управления конфликтами

Такая реализованная система управления в итоге получит название сетевидной системы управления, так как будет иметь интеллектуальную распределенную структуру (рис. 9).

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ОПАСНОГО СБЛИЖЕНИЯ ВК

Вероятность конфликта определяется как вероятность того, что расстояние между двумя самолетами станет меньше некоторого установленного порога. Задача системы предотвращения конфликтов состоит в том, чтобы удерживать значение вероятности конфликта ниже некоторого допустимого уровня.

Математическое описание процесса определения и предотвращения опасного сближения ВК выглядит следующим образом [2, 3, 9, 15].

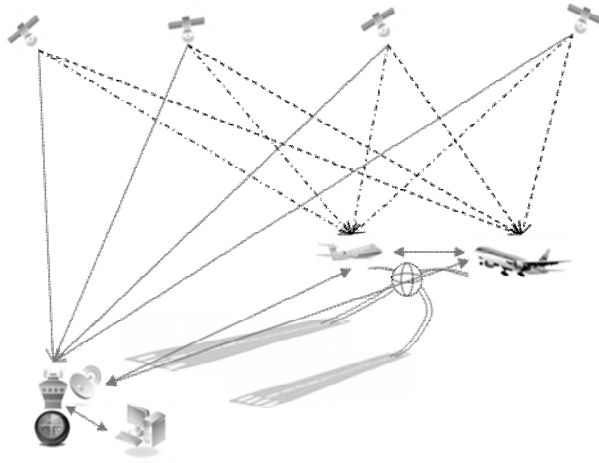


Рис. 9. Линии связи в структуре сетевидной системы управления конфликтными ситуациями

В общем виде, если движение двух ВК в пространстве задано векторами скоростей \vec{V}_1 и \vec{V}_2 , то максимальное сближение самолетов (расстояние расхождения) определяют из выражения:

$$r_{\min} = \vec{V}_{12} * \vec{d} / V_{12},$$

где $\vec{V}_{12} = \vec{V}_1 - \vec{V}_2$ — вектор относительной скорости; \vec{d} — вектор расстояния между самолетами.

Время достижения максимального сближения определяется:

$$t_{\min} = 1 / V_{12} * \sqrt{d^2 - r_{\min}^2}.$$

Расстояние между самолетами:

$$d(t) = (V_{\text{отн}}^2 t^2 - 2d_0 V_{\text{сбл}} t + d_0^2)^{1/2},$$

где $V_{\text{отн}} = (V_1^2 - 2V_1 V_2 \cos\varphi + V_2^2)^{1/2}$ — относительная скорость самолетов; $V_{\text{сбл}} = V_1 \cos\theta_1 - V_2 \cos(\theta_1 + \varphi)$ — скорость сближения самолетов; θ_1 — пеленг второго самолета относительно направления полета первого; φ — относительный курс; d_0 — расстояние между самолетами в начальный момент времени.

Время до наибольшего сближения:

$$t_{\text{сбл}} = d_0 V_{\text{сбл}} / V_{\text{отн}}^2.$$

Расстояние между самолетами $d_{\text{сбл}}$ в момент наибольшего сближения:

$$d_{\text{сбл}} = d_0 V_H / V_{\text{отн}}^{1/2},$$

где $V_H = V_2 \sin(\theta_1 + \varphi) - V_1 \sin\theta_1$ — составная относительной скорости, направленная перпендикулярно к линии, которая соединяет самолеты.

В случае пересечения трас полета двух самолетов, и если известны их координаты, то расстояние между самолетами можно определить:

$$L_{12} = \sqrt{[x_1(t) - x_2(t)]^2 + [y_1(t) - y_2(t)]^2},$$

где x и y — координаты самолетов.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РЕШЕНИЯ КОНФЛИКТНОЙ СИТУАЦИИ САМОЛЕТОВ НА ЭТАПЕ ПОСАДКИ

Пусть в начальный момент времени t_0 в некоторой зоне полетов ограниченного размера Q находится множество из n самолетов:

$$P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_n\}.$$

Будем считать, что в начальный момент времени t_0 положение всех самолетов из множества P определяется случайным образом, но так, чтобы между самолетами не возникало конфликтных ситуаций на интервале времени (t_0, t_b) , где t_b — некоторый момент буферного времени. Также предположим, ни один из самолетов из множества P , двигаясь по плану, не успеет выйти за границы зоны полетов, и ни один из самолетов не зайдет в зону полетов извне на промежутке времени (t_0, t_g) , где t_g — некоторый граничный момент времени, на который прогнозируется траектория каждого самолета. Значит, множество P можно считать неизменным на интервале времени (t_0, t_g) . Допустим, что методы и алгоритмы определения конфликтной ситуации являются известными. Тогда пусть существует достаточно большое количество обнаруженных конфликтных пар самолетов P_i и P_j на промежутке времени (t_b, t_g) , для которых не выполняется условие безопасного эшелонирования:

$$L(P_i, P_j, t) \geq L_n, \quad t \in (t_b, t_g),$$

где $L(P_i, P_j, t)$ — расстояние между самолетами P_i и P_j в момент времени t ; L_n — норма безопасного эшелонирования самолетов.

Кроме того, предположим, что плотность самолетов в зоне полета сравнительно большая, поэтому ситуацию можно рассматривать как групповую конфликтную ситуацию.

Решение конфликтной ситуации заключается в определении для каждого конфликтующего самолета $P_i \in P$ таких траекторий, которые бы обеспечивали отсутствие пересечений со всеми другими самолетами из множества P на интервале времени (t_b, t_g) . При этом полученное решение должно соответствовать глобальному оптимуму по критерию минимального отклонения самолетов от начальных траекторий.

Задачу определения оптимального маневрирования по устранению конфликтной ситуации можно сформулировать как задачу оптимального управления динамической системой. Оптимальность определяется как минимизация затрат при выполнении маневрирования по предотвращению потенциально конфликта при заданных ограничениях.

При оптимизации безопасных маневров используют следующие основные критерии: различные меры пространственного отклонения от первоначальной траектории; минимум безопасного расстояния между конфликтующими ВК; временное отклонение от запланированного прибытия в точку; продолжительность маневра; степень отклонения управляющих скоростных и угловых параметров; расход топлива; приоритеты ВК; приоритеты типов маневров; комфорт пассажиров; сложность маневров.

Глобальный оптимум по критерию минимального отклонения самолетов от начальных траекторий — это один из основных критериев оптимальности варианта решения конфликтной ситуации [3, 4]. В его качестве выступает

показатель, который характеризует отклонения конфликтующих самолетов от начальных планов полета, а именно, площадь необходимого маневра

$$S = \int_{x_0}^{x_k} |y_0(x) - y_k(x)| dx,$$

где $y_k(x)$, $y_0(x)$ — начальные и маневровые линии пути самолета на плоскости, x_0 , x_k — координаты точки начала и конца маневра. Площадь маневра учитывает временные и пространственные потери на выполнение маневра, но не учитывает временную разницу с планом после завершения маневра.

Решение игровой задачи уклонения-преследования предлагается решать и с точки зрения теории инвариантности [17]. Необходимо определять стратегию преследуемого игрока (P_i) таким образом, чтобы состояние дифференциальной игры было инвариантным к стратегии игрока-преследователя (P_j). При этом качество изменения инвариантного состояния стратегии преследуемого игрока (P_i) и дифференциальной игры в целом должно быть оптимальным с точки зрения минимизации некоторых условных критериев (например, глобального оптимума).

В работе [17] показан пример решения такой задачи с помощью теории нелинейной инвариантности и доказана рациональность и перспективность такого подхода. Существенным преимуществом является то, что такое решение основывается на применении в нелинейных динамических системах в распределенной среде, каковым и является самолет в целом. Отметим также, что использование для синтеза эргатической системы управления движением ВК метода нелинейной интегральной инвариантности позволяет обеспечить наибольшие возможности для проявления свойств функционального гомеостаза.

Соответственно, вариант решения поставленной задачи решения конфликтной ситуации самолетов с помощью теории инвариантности будет звучать так: для существования решения данной дифференциальной игры уклонения-преследования (решения конфликтной ситуации самолетов) в некоторой области необходимо и достаточно, чтобы для параметра управления динамическим процессом изменения инвариантного состояния дифференциальной игры возможно было выбрать такое значение, которое обеспечит существование функции Ляпунова для такой замкнутой системы.

Проведено соответствующее моделирование, позволяющее проанализировать такой подход к решению задачи конфликтной ситуации ВК (рис. 10).

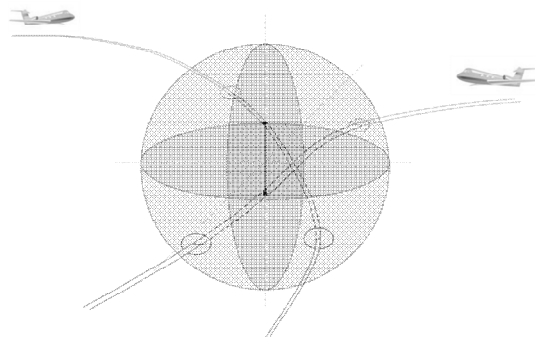


Рис. 10. Зона возникновения конфликтной ситуации ВК на этапе посадки

Результаты моделирования и итогового расхождения воздушных кораблей при возникшей угрозе столкновения с помощью новой сетцентрической системы управления конфликтными ситуациями, с учетом глобального оптимума, основанной на теории инвариантности, показали очень обнадеживающие и перспективные результаты (рис. 11).

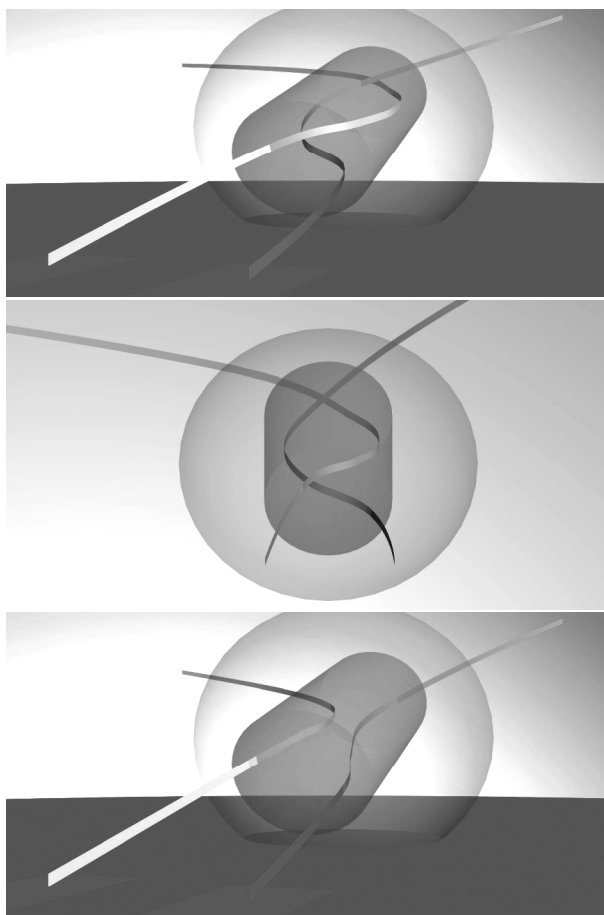


Рис. 11. Модели области зоны конфликтной ситуации ВК с её успешным решением

Выводы

Рассматривая процесс конфликта воздушных кораблей через призму дифференциальных игр, можно сделать вывод, что конструктивное аналитическое решение удастся построить лишь для игр с двумя убегающими. Для большего числа убегающих оптимальное поведение игроков находится только численно. Но и численное исследование возможно только для количества игроков не более пяти, иначе задачи уже трудноразрешимы. Сложность этих задач становится очевидной, если учесть тот факт, что принятие решений в них должно происходить в режиме реального времени. Следовательно, методы и алгоритмы, реализующие принятие решений, должны быть весьма быстрыми.

Движение самолета является управляемым процессом, поэтому параметры траектории его полета коррелированы во времени. Такой подход позволяет более адекватно учитывать динамику полета при прогнозировании траектории на участках наиболее опасного сближения самолетов. Корреляционная зависимость позволяет получить более достоверный прогноз траектории полета.

Большинство используемых сейчас методов решения конфликтной ситуации, ее моделирования и решения описывают только линейные и стационарные системы, в то время как полет самолета и конфликт ВК является динамическим нелинейным процессом.

Основной проблемой при разработке систем предотвращения конфликтной ситуации является достоверное прогнозирование воздушной обстановки, которое зависит, в первую очередь, от степени адекватности принятой математической модели движения самолета реальному процессу воздушного движения. При прогнозировании случайного процесса основными факторами, влияющими на неопределенность будущего положения самолета, считаются ошибки учета ветра и его изменчивость, навигационные ошибки, ошибки пилотирования и системы управления полетом, непредвиденные перепланировки маршрута полета. Особо следует отметить неопределенность будущего положения самолета из-за ошибок моделирования процесса его полета. Причиной ошибки может быть несоответствие принятых предположений реальным условиям полета или неопределенность значений параметров принятой модели. В некоторых случаях математическая модель не может быть решена аналитически. Тогда решение находится численным приближением, ошибка которого также вносит свою долю неопределенности. Соответственно, это вызывает вопрос о внесении в модель конфликтно-управляемого процесса не только детерминированной, но и стохастической неопределенности.

Наибольшая эффективность решения конфликтов достигается при использовании распределенных наземно-бортовых систем. К сожалению, на данный момент такие системы полноценно не реализованы. В данной работе предлагается структура такой системы.

Несмотря на сравнительную простоту необходимого тактического маневра во взаимодействиях конфликтующих ВК, математическое решение задачи отыскания соответствующих оптимальных траекторий представляет собой достаточно сложную задачу. Ее специфика заключается в неоднозначности искомых траекторий, в том числе из-за немонотонности поведения параметров целевых объектов, и поэтому освещение рассматриваемого вопроса приобретает смысл поиска общего подхода к получению точных решений в зависимости от конкретных требований.

Важным недостатком современных систем обнаружения конфликта ВК является то, что в модели прогнозируемого движения ВК не учитывается неопределенность, связанная с двумя главными обстоятельствами: погрешностями в определении текущего состояния ВК и неопределенностью в модели поведения ВК на прогнозируемом интервале времени. Именно поэтому вокруг ВК необходимо строить виртуальную защитную зону неопределенности в виде сферической области. И в данном случае

конфликтом будет считаться уже именно нарушение границ этой зоны зоной другого ВК.

В условиях наличия обнаруженных конфликтов алгоритм решения конфликтных ситуаций ВК должен формировать рекомендации, которые должны обеспечить, в общем случае, пространственный маневр уклонения с целью предотвращения возможного опасного сближения ВК, а после разрешения конфликта — обеспечить возвращение ВК на плановую траекторию и ее дальнейшее выдерживание. При этом в процессе выдачи рекомендаций по выполнению маневра должны учитываться критерии оптимальности.

Это перспективная задача, требующая своего решения. В данной работе предложены новые подходы к решению этой задачи.

1. Евроконтроль. Аэрокосмическая стратегия для участников ЕКГА. — ИКАО: 2001. — 91 с.
2. Харченко В.П. Риски столкновения и эшелонирование воздушных кораблей / В.П. Харченко, Г.Ф. Аргунов, С.А. Загора и др. — К.: НАУ, 2011. — 326 с.
3. Загора С.А. Анализ методов решения конфликтных ситуаций в условиях свободного полета / С.А. Загора. — Вестник Национального авиационного университета, 2005, № 1. — С. 42–74.
4. Глобальный аэронавигационный план ИКАО на 2013–2028 года. — Канада, 2013.
5. Красовский Н.Н. Позиционные дифференциальные игры / Н.Н. Красовский, А.И. Субботин. — М.: Наука, 1974. — 458 с.
6. Красовский Н.Н. Игровые задачи о встрече движений / Н.Н. Красовский. — М.: Наука, 1970. — 424 с.
7. Чикрий А.А. Гарантированный результат в игровых задачах управления движением / А.А. Чикрий. — М.: Труды института математики РАН, 2010. — С. 223–232.
8. Пшеничный Б.Н. Задача об уклонении от встречи в дифференциальных играх / Б.Н. Пшеничный, А.А. Чикрий. — М.: Журнал вычислительной математики и физики, 1974, № 6. — С. 1416–1426.
9. Боднер В.А. Системы управления летательными аппаратами / В.А. Боднер. — М.: Машиностроение, 1973. — 501 с.
10. Айзекс Р. Дифференциальные игры / Руфус Айзекс. — М.: Мир, 1967. — 480 с.
11. Павлов В.В. Конфликты в технических системах / В.В. Павлов. — К.: Вища школа, 1982. — 183 с.
12. Кунцевич В.М. Оптимальное управление сближением конфликтующих подвижных объектов в условиях неопределенности / В.М. Кунцевич, А.В. Кунцевич. — К.: Кибернетика и системный анализ, 2002, №2. — С. 95–104.
13. Золотухин В.В. Некоторые актуальные задачи управления воздушным движением / В.В. Золотухин, В.К. Исаев, Б.Х. Давидсон. — М.: Труды МФТИ, 2009, № 3. — С. 94–114.
14. Харченко В.П. Решение конфликтных ситуаций между воздушными кораблями маневрированием курса самолета / В.П. Харченко, Д.В. Васильев. — Вестник Национального авиационного университета, 2011, № 2. — С. 15–20.
15. Мхитарян А.М. Динамика полета / А.М. Мхитарян, П.С. Лазнюк, В.С. Максимов и др. — М.: Машиностроение, 1978. — 424 с.
16. Бочкарев В.В. Концепция и системы CNS/ATM в гражданской авиации / В.В. Бочкарев, В.Ф. Кравцов, Г.А. Крыжановский. — М.: Академкнига, 2003. — 415 с.
17. Павлов В.В. Инвариантность и автономность нелинейных систем управления / В.В. Павлов. — К.: Наукова думка, 1971. — 272 с.

INVARIANT NET-CENTRIC CONTROL SYSTEM FOR CONFLICT AVOIDANCE OF AIRCRAFTS IN THE LANDING PHASE

V.V. Pavlov, A.E. Volkov, D.A. Voloshenyuk

International Research and Training Center for Information Technologies and Systems of National Academy of Sciences of Ukraine and Ministry of Education and Science of Ukraine

Introduction. The article discusses the question of the need to create a control system of conflict situations between the aircrafts in the landing phase.

The purpose of this research is to create a method and system of conflict resolution between the aircrafts on the route of flight, takeoff and landing phases with the condition to provide a high and guaranteed level of flight safety. The approach considered in the article will be based on the principles of using the network-centric technologies and the theory of invariance.

Results. The expected result of this work is to create a new universal control system of conflict situations between the aircrafts based on network-centric technologies and principles of the theory of invariance, which will meet all the requirements of modern air traffic management (ATM) to provide a guaranteed level of safety.

Conclusion. Summarizing the results it is shown that a new approach to the problem of creating a control system of conflict situations between the aircrafts based on research in the field of differential games and the theory of invariance is proposed.

Keywords: net-centric system, flight safety, invariance, conflict situations, differential games, free flight.

1. *Eurocontrol. Airspace Strategy for the ECAC States*. ICAO: 2001, 91 p. (in Russian).
2. Harchenko V.P., Argunov G.F, Zakora S.A. et al. *The risks of collision and the flight level of aircrafts*. K.: NAU, 2011, 326 p. (in Russian).
3. Zakora S.A. Classification of conflict resolution modeling methods for free flight. *Bulletin of the National Aviation University*, 2005, no. 1, pp. 42–74 (in Russian).
4. *The ICAO Global Air Navigation Plan for 2013–2028 years*. ICAO: Canada, 2013. (in Russian).
5. Krasovskiy N.N., Subbotin A.I. *The positional differential games*. Moscow: Science, 1974, 458 p. (in Russian).
6. Krasovskiy N.N. *Game Problems of counter movements*. Moscow: Science, 1970, 424 p. (in Russian).
7. Chikriy A.A. The guaranteed result in game problems of traffic control. M.: *Proceedings of the RAS Institute of Mathematics*, 2010, pp. 223–232. (in Russian).
8. Pshenichnyiy B.N., Chikriy A.A. The problem of collision avoidance in differential games. M.: *Bulletin of Computational Mathematics and Physics*, 1974, no. 6, pp. 1416–1426 (in Russian).
9. Bodner V.A. *Aircraft Control System*. M.: Mashinostroenie, 1973, 501 p. (in Russian).
10. Ayzeks R. *The differential games*. M.: Mir, 1967, 480 p. (in Russian).
11. Pavlov V.V. *The conflicts in technical systems*. K.: Vischa shkola, 1982, 183 p. (in Russian).
12. Kuntsevich V.M. Optimal control of convergence of conflicting moving objects under uncertainty. K.: *Cybernetics and systems analysis*, 2002, no. 2, pp. 95–104 (in Russian).
13. Zolotuhin V.V. Some actual problems of air traffic control. M.: *Proceedings of MFTI*, 2009, no. 3, pp. 94–114 (in Russian).

14. Harchenko V.P. Aircraft conflicts resolution by course maneuvering. *Bulletin of the National Aviation University*, 2011, no. 2, pp. 15–20 (in Russian).
15. Mhitaryan A.M. *Aircraft flight dynamics*. M.: Mashinostroenie, 1978. 424 p. (in Russian).
16. Bochkarev V.V., Kravtsov V.F., Kryizhanovskiy G.A. *The concept and systems of CNS/ATM in civil aviation*. M.: Akademkniga, 2003, 415 p. (in Russian).
17. Pavlov V.V. *The invariance and autonomy of nonlinear control systems*. K.: Naukova Dumka, 1971, 272 p. (in Russian).

Получено 23.02.2015