

**ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВЫПОЛНЕНИЯ
УПРАВЛЯЕМЫХ ПОТОКОВ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ****О. В. Дегтярев, А. В. Кан, В. С. Орлов (Москва)**

В течение ряда лет в ГосНИИАС разрабатывается программный комплекс имитационного математического моделирования процессов организации и управления воздушным движением (КИМ УВД) в воздушном пространстве (ВП) РФ. Комплекс предназначен для исследований эффективности выполнения полетов и опережающего анализа технических и организационных решений, принимаемых при внедрении перспективных CNS&ATM концепций, а также влияния разрабатываемых альтернативных вариантов построения ключевых подсистем управления воздушным движением (УВД) на эффективность воздушного движения (ВД) /1, 2/. Комплекс позволяет моделировать как все этапы планирования потоков воздушного движения (ПВД), так и этап собственно их выполнения.

Реализованные принципы моделирования этапов планирования и собственно выполнения полетов различны. Для моделирования процессов планирования ПВД реализованы принципы событийного моделирования. Для моделирования же процессов выполнения управляемых полетов это неприемлемо. Система управления полетами, являющаяся многомерной системой с обратной связью, требует полноценного динамического моделирования. Для этого в составе КИМ УВД реализована динамическая модель управляемого потока ВД, служащая инструментом поддержки решения широкого спектра задач анализа и синтеза процессов УВД методами математического моделирования.

Наиболее распространенные задачи, для решения которых могут быть использованы средства моделирования, достаточно условно могут быть разбиты на следующие группы.

– Проведение анализа эффективности использования ВП РФ в целом или отдельного региона, оценка уровня конфликтности потоков ВД в динамике развития воздушной обстановки. Требуется сравнительно незначительный уровень подробности в описании каждого отдельного полета (взлет, трассовый полет, разворот и смена участков маршрута, смена эшелона, маневрирование, посадка), однако количество самолетов (4000–5000) и моделируемый интервал (24 часа и более) значительны.

– Проведение анализа эффективности новых принципов, методов и алгоритмов управления потоками в процессе их выполнения. В качестве примера можно привести задачу исследования эффективности применения того или иного метода предотвращения опасных сближений воздушных судов (ВС) в воздухе в условиях, приближенных к реальной воздушной обстановке и в объемах ВП РФ в целом или отдельного региона. Требуется более детальное описание как динамики полета ВС, так и работы системы управления полетом. При этом общее количество моделируемых самолетов (4000–5000) и моделируемый интервал (24 часа и более) остаются значительными.

– Подробный анализ совместных управляемых полетов в ограниченном объеме ВП, например, моделирование развития воздушной обстановки в районе аэропорта или процесса разрешения множественного конфликта в воздухе. Требуется еще более подробное описание переходных процессов управления ВС, однако не столь большой интервал моделирования (от нескольких минут до часа).

– Решение задач оптимизации, связанных с полетом отдельных ВС (например, синтез четырехмерного маршрута в условиях ограничений на использование ВП). Используемая при оптимизации модель должна максимально подробно описывать летно-

технические характеристики ВС, влияющие на оцениваемые показатели (длину маршрута, продолжительность полета, расход топлива, стоимость, уровень выполнения заданных ограничений). Исследуемый интервал времени может достигать 10–12 часов.

Таким образом, решение различных групп исследовательских задач предъявляют различные требования к используемой динамической модели. Требования по различному уровню подробности описания удовлетворяются путем применения в модели объектно-ориентированного подхода и реализации спектра моделей отдельных подсистем. В демонстрационной части доклада для примера это иллюстрируется на примере описания динамической модели системы управления отдельного ВС.

Одним из ключевых вопросов реализации является проблема быстрогодействия процессов моделирования. Ниже более подробно рассмотрены некоторые решения для обеспечения приемлемого быстрогодействия.

В КИМ УВД реализованы две схемы моделирования процессов выполнения полетов. Первая схема предназначена для моделирования задач, отнесенных к первой группе. Моделирование основано на принципе интерполяции положения ВС в соответствии с плановыми данными (точно или в соответствии с принятой моделью ошибок выполнения плана). Такой подход позволяет обеспечить высокое быстродействие даже при «ускоренном» (до 1:100 – 1:2000) моделировании и при интенсивных потоках ВД в пределах всего ВП РФ. Моделирование позволяет оценить состояние реализации плана полетов, потенциальную конфликтность потока, многочисленные характеристики использования ВП в динамике развития воздушной обстановки.

Вторая схема предназначена для решения остальных групп задач путем реализации собственно динамического моделирования процессов выполнения полетов и работы системы УВД путем численного интегрирования системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих эти процессы.

Однако практическое применение этого варианта моделирования связана с целым рядом вычислительных проблем, вызванных следующими обстоятельствами:

- большое количество ВС в моделируемом потоке ВД (3500–4000 полетов в сутки, 500–700 ВС в воздухе одновременно), высокая размерность системы дифференциальных уравнений, описывающих управляемое движение (достигает нескольких десятков тысяч);
- длительный интервал моделирования (например, в течение суток);
- необходимость моделирования в сферической системе координат (следовательно, многочисленные тригонометрические операции), в том числе при расчете относительных параметров движения ВС;
- необходимость моделирования движения с малым шагом вычисления, по крайней мере, во время маневрирования ВС в горизонтальной и/или вертикальной плоскости;
- реализация в модели ускоренного моделирования (ускорение в несколько десятков раз), которое необходимо при проведении, например, статистического моделирования.

Указанные требования и особенности моделирования приводят к предельно большой вычислительной сложности динамической модели управляемого потока и значительному времени моделирования по сравнению с режимом интерполяции. Некоторые решения, позволившие значительно повысить быстродействие моделирования, следующие.

- 1) Сочетание в одном сеансе моделирования методов интерполяции и численного интегрирования.

2) Гибкое формирование переменного шага решения задачи обнаружения для каждой пары ВС.

Рассмотрим их более подробно.

Сочетание методов интерполяции и численного интегрирования

При выполнении полетов среднемагистральными или дальнемагистральными самолетами, составляющих основную часть полетов в верхнем воздушном пространстве, преобладающую часть полетного времени занимает «слабовозмущенный» полет с выдерживанием плановой траектории на участке маршрута и заданной высоте. Участки с активным маневрированием (сменой направления и/или высоты полета, выполнением маневра уклонения или круга ожидания) соответствуют незначительной части полного полетного времени. В то же время невозмущенный полет не требует подробного моделирования, участки такого полета вполне допустимо моделировать в режиме интерполяции. Без значительной потери точности участки невозмущенного движения могут моделироваться интерполированием. Соответственно весь интервал времени моделирования разбивается на участки интерполяции и интегрирования. Очередной участок интегрирования начинается с началом любого маневра и заканчивается при возвращении ВС на плановую траекторию (и отсутствии необходимости в маневре). После этого начинается очередной участок интерполяции. Основная алгоритмическая проблема состоит в «сшивании» участков интерполяции и интегрирования по времени. Это объясняется тем, что при интерполяции текущее положение ВС определяется в соответствии с текущим модельным временем (определяется участок маршрута, соответствующий этому времени, а с учетом плановой скорости пролета участка определяется и текущее положение ВС на этом участке). Однако после маневра ВС (т. е. при его динамическом моделировании путем численного интегрирования) в точке возврата ВС на плановую траекторию модельное время уже не будет соответствовать плановому для этой точки. Чаще всего из-за маневра происходит задержка по времени полета. При каждом переходе от участка интегрирования на участок интерполяции для каждого ВС эта задержка рассчитывается и принимается во внимание при дальнейшем моделировании.

Реализация гибкого шага решения задачи обнаружения потенциальных парных конфликтов

Задача обнаружения конфликтов требует осуществления проверки близости между любой парой ВС, находящихся в соответствующий момент времени в воздухе. С учетом большого количества ВС это требует существенных затрат машинного времени даже при однократном вычислении. Повторение вычислений на каждом шаге решения задачи приводит к совершенно неприемлемой вычислительной нагрузке.

Очевидно, что при значительном расстоянии между ВС нет необходимости контролировать близость между ними очень часто. С другой стороны, при малых относительных расстояниях необходимо своевременно обнаруживать (прогнозировать) возможное опасное сближение, что требует гораздо более частого вычисления параметров относительного движения. С этой целью задача обнаружения конфликтов была реализована с переменным шагом для каждой пары ВС.

Оценка конфликтов проводится только между ВС, расстояние между которыми меньше заданного. Для удобства хранения информации по всем парам ВС создана матрица рейсов. Она имеет треугольную форму, и в ячейке, соответствующей номерам рассматриваемых ВС, хранится время t_{ij} очередного вычисления относительной дальности и относительная дальность D_{ij} между ними, рассчитанная на момент последней проверки. Для простоты и учета неопределенности в будущем движении при расчете времени очередной проверки принимается гипотеза о том, что ВС летят навстречу друг

другу, а время T проверки соответствует относительному расстоянию между ВС равному радиусу зоны обзора:

$$T = T_{тек} + \frac{D_{отн} - D_{обз}}{V_1 + V_2},$$

где $T_{тек}$ – текущее время моделирования, $D_{отн}$ – относительная дальность между ВС, $D_{обз}$ – дальность обзора.

Если время вылета одного из ВС больше времени прилета другого, то в вычислении относительного расстояния в принципе нет необходимости. Если ВС находятся в зоне обзора друг друга, то оценка конфликтов между ними производится на каждом шаге выработки команды управления.

В результате удается обеспечить ускорение моделирования относительно реального времени в несколько десятков раз, несмотря на большое число одновременно моделируемых ВС (400–500), сравнительно малый шаг численного интегрирования (0,1 сек) при маневрировании, учете динамики пространственного движения ВС и его контура стабилизации, реализации алгоритмов управления полетом каждого ВС, включающего алгоритмы обнаружения опасных сближений и управления для их предотвращения (данные соответствуют ПК P4 (3,2 ГГц, 2 ГБ ОЗУ, NT)).

Для организации и проведения динамического моделирования выполнения управляемых полетов в составе программного обеспечения КИМ УВД реализованы интерфейсные средства подготовки сценария моделирования, организации собственно моделирования, анализа процессов выполнения управляемых полетов, как непосредственно в процессе моделирования, так и после его окончания. Эти средства демонстрируются в докладе.

Пример «экрана» моделирования динамики выполнения управляемых потоков ВД в ВП РФ приведен на рис. 1.

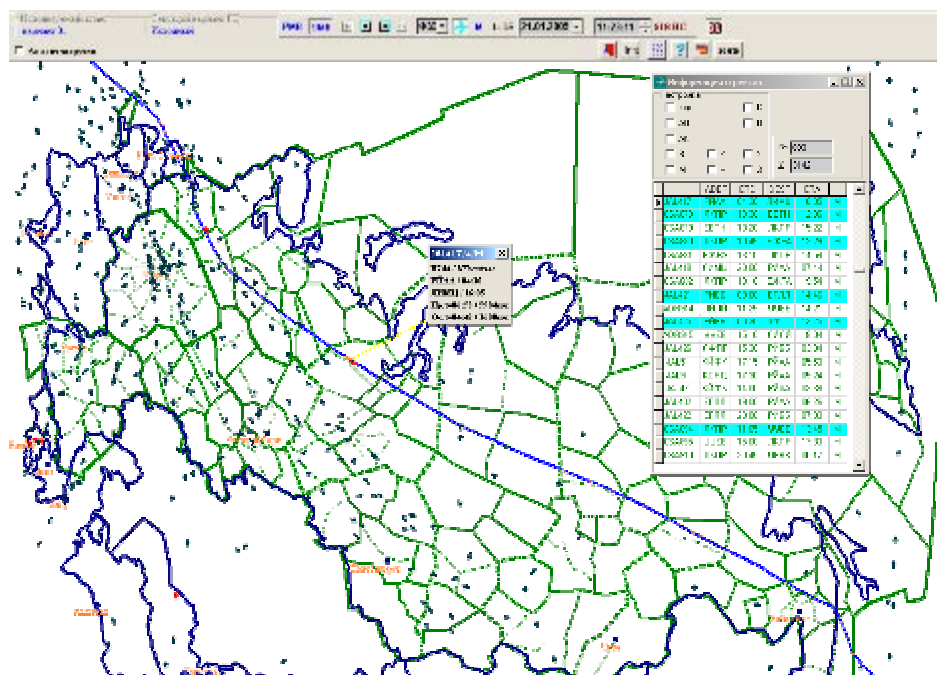


Рис. 1. Графический пользовательский интерфейс динамического моделирования управляемых потоков ВД

Выбор режима моделирования производится при помощи строки меню вызовом соответствующих функций: «полет по плану» или «управляемый поток». Управление процессом моделирования и задание его характеристик осуществляется при помощи управляющей панели (рис. 2).



Рис. 2. Управляющая панель режима моделирования управляемых потоков ВД

В настоящее время описанная динамическая модель, включенная в состав КИМ УВД, используется для решения следующих задач:

- демонстрация особенностей развития динамической обстановки при выполнении полетов в РФ;
- проверка точности и достоверности прогноза потенциальных конфликтов на этапах планирования;
- отработка и исследование децентрализованных алгоритмов предотвращения опасных сближений в рамках перспективных систем УВД, сравнение с централизованными схемами.

Программная реализация модулей динамической модели выполнена в среде DELPHI (версия 7.0.), что определяется такими требованиями к комплексу, как системность, объектная ориентированность, а также наличием активного графического пользовательского интерфейса, использованием больших по размеру баз данных.

Выводы

Реализованные принципы и особенности формирования динамической модели управляемых потоков ВД и организации собственно процесса моделирования позволяют применять ее для решения разносторонних задач, связанных с анализом различных проблем использования воздушного пространства, отработкой алгоритмов управления потоками, проблемами обнаружения и разрешения конфликтных ситуаций в воздухе. Внедрение функции динамического моделирования потоков ВД позволяет расширить возможности КИМ УВД как средства, ориентированного на широкий круг пользователей – специалистов в области систем управления полетом и систем УВД.

Литература

1. Degtyaryev O. V., Egorova V. P., Zubkova I. F., Kan A. V., Chutkov V.A. Regulated Traffic Flow Simulation Tool (RATFST)//16th IFAC Symposium on Automatic control in aerospace. Preprints, 2004. – Vol. 1. – S. 550.
2. О. В. Дегтярев, В. П. Егорова, И. Ф. Зубкова, В.А. Чутков. Комплекс имитационного моделирования потоков воздушного движения//Труды ГосНИИАС. Вопросы авионики. – 2003. – Вып. 2(12).