

ОЦЕНКА РЕАЛИЗУЕМОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ТРАЕКТОРИЙ САМОЛЕТА С ПОМОЩЬЮ БОРТОВОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ¹

Б.С. Алешин, С.Г. Баженов, В.Г. Лебедев, Е.Л. Кулида

Предложена методика прогноза движения самолета, обнаружения потенциальных конфликтных ситуаций и определения реализуемости траекторий, сгенерированных для разрешения конфликтов. Расчет виртуальных полетов самолета вдоль сгенерированных траекторий производится параллельно, в режиме реального времени с помощью математической модели самолета. Предполагается применить данную методику в системе траекторной безопасности, которая обеспечивает интегрированное представление информации о летной ситуации, формирует предупреждения и рекомендации пилотам с целью избежания опасного развития летной ситуации.

Ключевые слова: безопасность, рельеф местности, CFIT, область режимов полета, система управления, рекомендуемая траектория, изменение плана полета, бортовая модель, обнаружение и разрешение конфликтов.

ВВЕДЕНИЕ

Для современного развития воздушного транспорта характерны следующие особенности.

- Постоянное увеличение интенсивности воздушного движения ведет к уменьшению интервалов между самолетами во времени и в пространстве, что, в свою очередь, ведет к увеличению риска столкновений [1]. Чтобы не допустить роста числа авиационных происшествий, должна быть повышена эффективность планирования воздушного движения, а также точность выдерживания траекторий, как по координатам, так и по времени.
- Наблюдаются отход от традиционной организации воздушного движения, основанной на полете по четко определенным трассам, и переход на гибкое управление движением [2], когда воздушному судну выделяется участок пространства, где он может находиться в определенное время, согласно плану полета. При увеличении

степени автономности воздушного судна часть функций по организации и управлению движением и обеспечению траекторной безопасности переходит к бортовым системам самолета. В перспективе, при переходе к концепции «Free Flight», бортовые системы будут играть основную роль в планировании полета и обеспечении траекторной безопасности.

- Поскольку возрастают требования к соблюдению расписания полетов, то полет должен выполняться в большем диапазоне неблагоприятных погодных условий, что ведет к необходимости разработки соответствующих бортовых и наземных средств.

Поскольку безопасность полетов в большой степени зависит от действий экипажа, очень важно, чтобы члены экипажа были обеспечены надежной информацией о летной ситуации. Информация должна быть полной, но не избыточной, чтобы не перегружать экипаж и обеспечивать быстрое и однозначное понимание опасностей и оперативные действия по их устранению. Весьма важно иметь возможности прогноза развития летной ситуации для обеспечения экипажа соответствующей информацией заблаговременно, обратить его внимание на опасные факторы и, в случае необходимости, скорректировать действия экипажа.

¹ Статья написана по материалам доклада на шестой международной конференции «Параллельные вычисления и задачи управления» (РАСО'2012), Москва, 24—26 октября 2012 г.



1. ФУНКЦИИ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ЛЕТНОЙ СИТУАЦИИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРАЕКТОРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТА

В рамках интегрированной системы мониторинга летной ситуации и обеспечения траекторной безопасности полета разрабатываются средства и системы, информирующие экипаж о рельефе местности, возможных препятствиях вдоль предполагаемого маршрута, атмосферных факторах, воздушном движении и формирующие рекомендации, позволяющие экипажу избежать опасных ситуаций [3–6].

Такие системы должны:

- оценивать летную ситуацию в смысле риска столкновения с поверхностью;
- формировать ряд возможных траекторий облета рельефа и препятствий, которые могут быть реализованы самолетом в его текущем состоянии и конфигурации;
- сортировать эти траектории в соответствии с выбранной системой приоритетов;

— анализировать конфликты с факторами метеоусловий и воздушного движения.

Наилучшая траектория рекомендуется экипажу. Для обеспечения функций траекторной безопасности система должна располагать:

- данными о положении и скорости самолета, поступающими от инерциальных и спутниковых систем;
- трехмерной картой рельефа местности;
- заданными маршрутами полета и схемами захода на посадку, получаемыми от системы самолетовождения;
- данными о других участниках воздушного движения, поступающими от бортовых систем и наземных пунктов управления воздушным движением;
- данные о погодных условиях, поступающими от метеолокатора, наземных источников информации и других самолетов.

Система мониторинга летной ситуации и обеспечения траекторной безопасности полета (рис. 1) выполняет следующие функции.

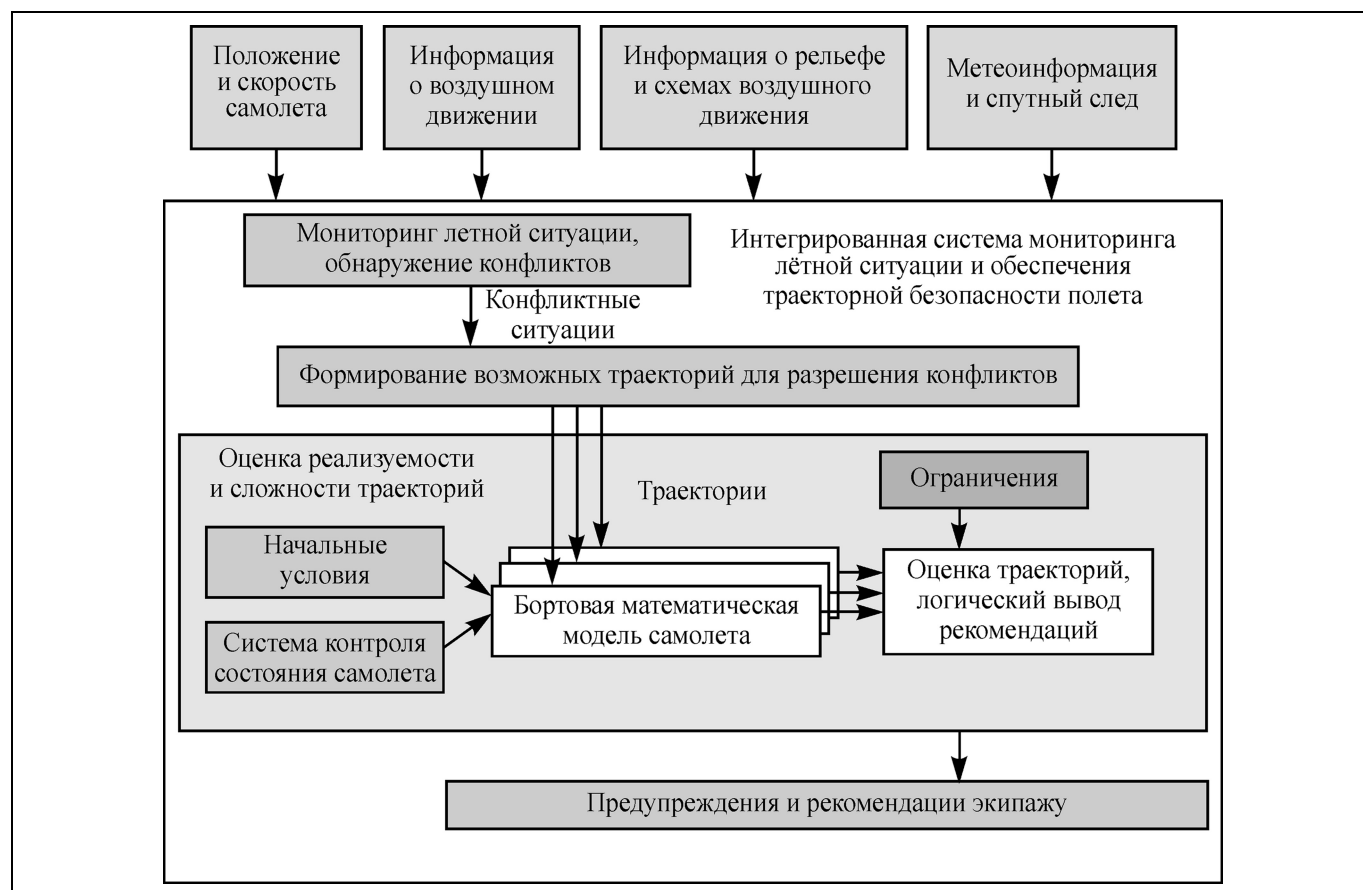
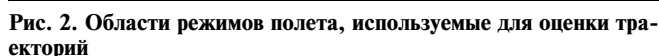


Рис. 1. Интегрированная система мониторинга летной ситуации и обеспечения траекторной безопасности полета



Этап 1. Предварительный расчет основных параметров полета вдоль анализируемой траектории [7, 8] с целью определения области — нормальной, эксплуатационной или предельной, в которой реализуется данная траектория. На рис. 2 показано, каким образом определяется, к какой области относится то или иное значение параметра. Границы областей изображены окружностями, на пересечении которых с линиями параметров указываются значения параметров на границе соответствующей области, например, для нормальной перегрузки N_y или скорости V . В частности, если нормальная перегрузка превышает значение $N_y = 1,3$, то траектория выходит за границу нормальной области, в случае превышения значения $N_y = 1,8$ нарушается граница эксплуатационной области, а при $N_y > 2,5$ траектория выходит за границу предельной области.

Поскольку расчет параметров траектории, выполненный на этапе 1 приближенный, то несколько траекторий с наибольшим приоритетом анализируются более детально с помощью бортовой математической модели самолета. Для этого выполняются виртуальные полеты вдоль траекторий, и полученная информация о параметрах движения используется для выбора траектории.

Задача формирования кратчайшей траектории движения с облетом препятствий рельефа решается на основе поиска кратчайшего пути в графе. Для применения этого подхода траектории движения самолета аппроксимируются с помощью *графа траекторий* (траекториями служат пути графа), среди которых выбирается искомая траектория.



Траектории формируются в ходе циклической процедуры, на каждом шаге которой строится траектория с облетом препятствия на некоторой высоте. Для построения такой траектории, согласно приведенному далее алгоритму, строится кусочно-линейная граница препятствия на выбранной высоте и затем строится траектория облета препятствия. Сначала она строится в плоскости полета, т. е. на высоте, на которой самолет находится в начальном положении. Затем значение высоты облета препятствия увеличивается на заданный размер шага и строится очередная траектория. Процесс построения траекторий заканчивается, когда высота облета становится больше высоты препятствия, т. е. возможен перелет над препятствием из начальной точки в конечную по прямой.

Алгоритм формирования траекторий облета препятствий.

Шаг 1. Формирование кусочно-линейных границ препятствий на выбранной высоте. Для формирования границы препятствий строится равномерная сетка вершин на плоскости. Расстояние между вершинами целесообразно выбрать не менее минимального радиуса R разворота самолета. Это позволит гарантировать возможность облета препятствия по границе.

Назовем вершину *граничной*, если среди ее соседних вершин есть как допустимые вершины, так и недопустимые. Соединив ребрами соседние граничные вершины, получим границы препятствий.

Шаг 2. Сглаживание границ препятствий. Границы препятствия, автоматически сформированные на шаге 1, могут содержать множество изломов. Пример применения алгоритма сглаживания представлен на рис. 3.

Во множество вершин графа траекторий включим все точки изломов сглаженных границ вокруг препятствий, образованных рельефом.

Шаг 3. Учет дополнительных препятствий. Траектории (следовательно, дуги графа) не должны пересекать зоны, в которых полеты запрещены.

Шаг 4. Учет маневренных возможностей самолета. При построении графа учитывается, что в начальной и конечных точках зона, недоступная для полета, представляется окружностями радиуса R , касающимися вектора направления движения. В граф вводятся дополнительные вершины на этих окружностях, чтобы обеспечить поворот на нужный курс в начале и конце маршрута.

Этими вершинами служат:

- точки касания окружности и касательных к ней, проведенных из вершин, лежащих на границах препятствий, если эти касательные не пересекают препятствий;



Рис. 3. Сглаживание границы вокруг препятствия

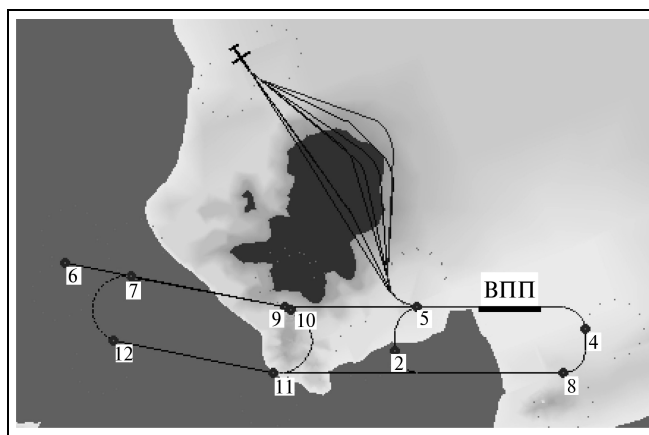


Рис. 4. Набор траекторий облета препятствия на разных высотах

- точки касания общих касательных двух окружностей (в начале и конце маршрута), если эти касательные не пересекают препятствий.

Шаг 5. Формирование ребер графа. Соединяются ребрами все пары видимых вершин.

В результате будут добавлены ребра, соединяющие:

- начальную вершину со всеми видимыми из нее вершинами;
- каждую из конечных вершин со всеми видимыми из нее вершинами;
- все пары видимых вершин разных препятствий.

Шаг 6. Построение траекторий. Поиск кратчайших путей из начальной вершины в конечные в построенном графе.

На рис. 4 кружками и цифрами обозначены точки, из которых реализуется стандартный заход на посадку, и представлены траектории облета препятствия из начальной точки в точку 5, сгенерированные при выборе высоты облета препятствия, начиная с 450 м (исходная высота полета), с

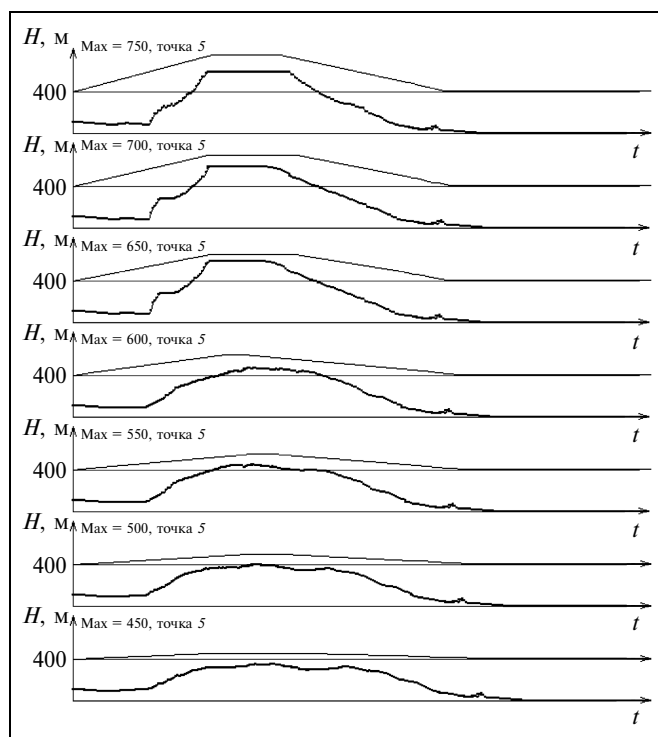


Рис. 5. Графики высоты полета над рельефом для сгенерированных траекторий

шагом 50 м. При значении высоты облета препятствия 750 м генерируется прямолинейная траектория из начальной точки в конечную, и построение траекторий заканчивается. На рис. 5 представлены

графики рельефа и высоты полета по сгенерированным траекториям при различных значениях высоты облета препятствия (Max).

3. ОРГАНИЗАЦИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ ПОЛЕТОВ И АНАЛИЗ ТРАЕКТОРИЙ САМОЛЕТА С ПОМОЩЬЮ БОРТОВОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Общая схема организации анализа траекторий с помощью бортовой математической модели приведена на рис. 6. После того как генератор траекторий сформировал возможные траектории самолета, реализуется виртуальный полет вдоль них. Для этого производится расчет нормальной n_y и продольной n_x перегрузок и угла крена γ , которые используются как входные сигналы системы траекторного управления.

Поскольку примерная зависимость заданных параметров траектории от времени известна заранее, то возможно провести фильтрацию этих сигналов с целью внесения опережения. Исходя из заданной траектории, можно рассчитать заданную высоту H , вертикальную скорость V_y в земной системе координат, нормальную перегрузку n_y . Если эту перегрузку подать как заданную на вход модели «система управления — самолет», то модель отработает перегрузку с запаздыванием, что приведет к ошибкам отработки заданной вертикальной скорости V_y и высоты H . Внесение опережения при фильтрации заданного сигнала значительно

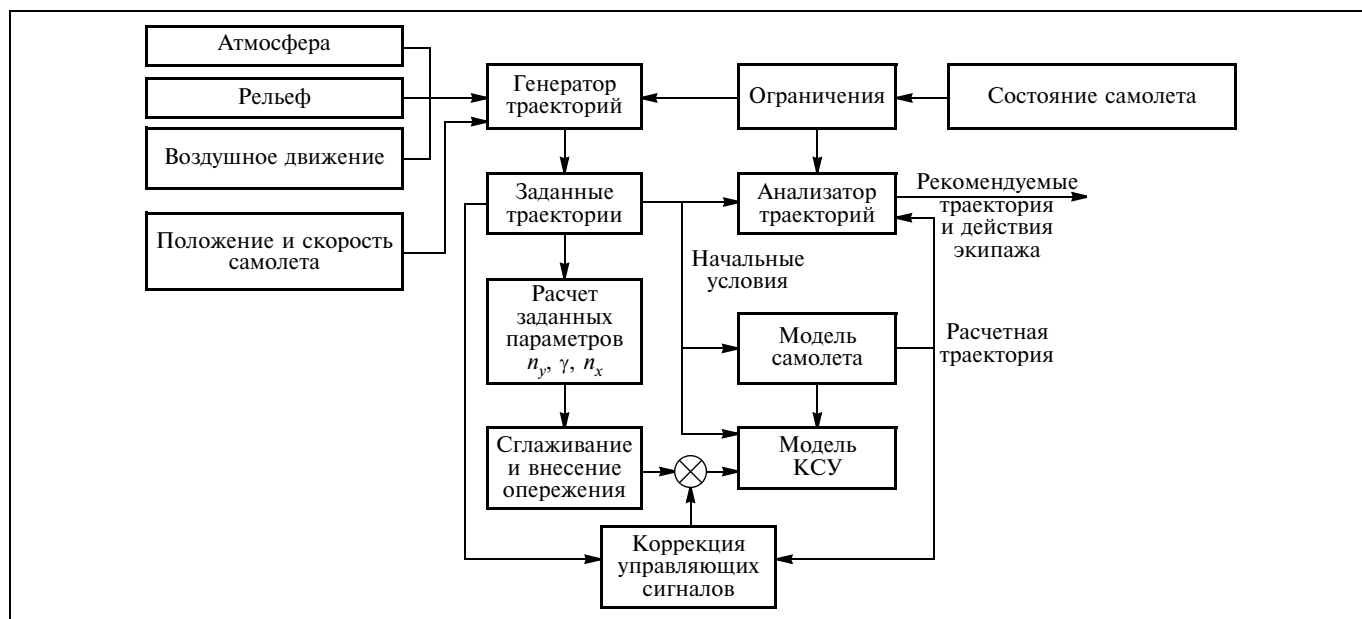


Рис. 6. Общая схема анализа траекторий с помощью бортовой математической модели: КСУ — комплексная система управления

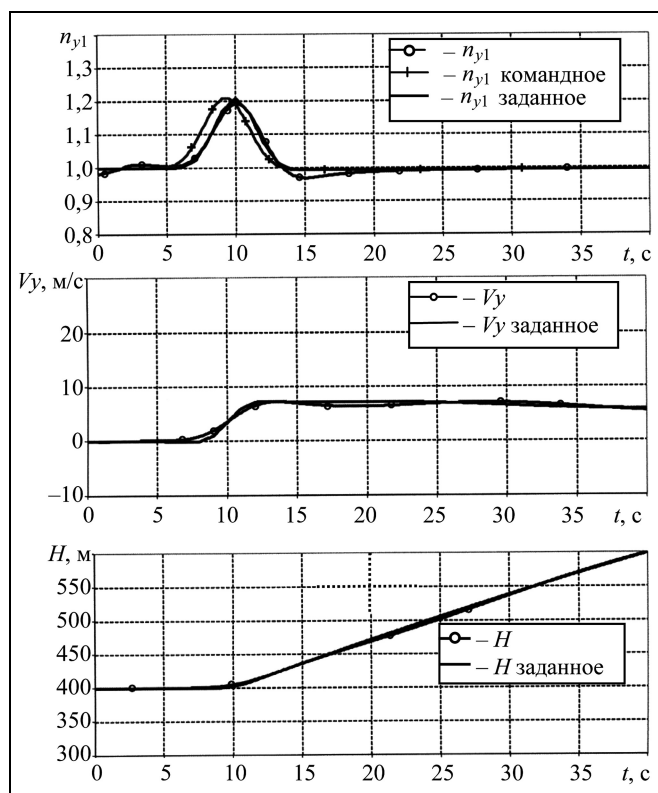


Рис. 7. Обработка заданных параметров траектории при наличии опережения в командном сигнале и коррекции управляющего сигнала по рассогласованию с заданной траекторией

уменьшает запаздывание в отработке заданной перегрузки, и отработка заданных вертикальной скорости и высоты производится гораздо эффективнее. Однако и здесь со временем накапливаются ошибки из-за того, что система работает в разомкнутом контуре. Для устранения этого недостатка применяется коррекция командного сигнала по рассогласованию с заданной траекторией.

Процессы отработки заданной траектории с коррекцией командного сигнала по рассогласованию между расчетной и заданной траекториями приведены на рис. 7. Видно, что модель реализует полет вдоль заданной траектории весьма эффективно, т. е. без запаздывания и с высокой точностью. Аналогичные действия можно провести для бокового канала.

После того, как решен вопрос с отработкой заданной траектории математической моделью, встает вопрос о реализуемости траекторий. Иными словами, необходимо выработать критерии, по которым можно судить, является траектория реализуемой или нет.

Возможны следующие события:

- траектория обрабатывается с заданной точностью без выхода параметров движения за грани-

цы нормальной, эксплуатационной и предельной областей;

- параметры полета остаются внутри предельной области, но самолет не в состоянии отработать заданную траекторию — ошибки отработки превышают допустимые пределы;

- параметры полета остаются внутри предельной области, но происходит столкновение с земной поверхностью;

- параметры полета выходят за границы предельной области.

Отметим, что современные системы управления включают в себя эффективные средства защиты области режимов полета и практически не допускают выход параметров за границы предельной области. Поэтому основным критерием невозможности реализации той или иной траектории в предельной области служит рассогласование между заданной траекторией и траекторией математической модели выше выбранного порога. Однако при работе резервной системы управления выход за границы предельной области возможен. Никаких ограничений параметров движения резервный контур не содержит, поэтому при анализе реализуемости и приемлемости траекторий самолета необходимо учитывать состояние самолета и конфигурацию системы управления.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для отработки структуры системы и алгоритмов проведено математическое моделирование полетов в гористой местности около морского побережья.

Основное назначение системы мониторинга летной ситуации и обеспечения траекторной безопасности заключается в значительном снижении риска столкновения самолета с земной поверхностью. Поэтому в качестве основного сценария рассматривается случай, когда исходная траектория самолета пересекается с земной поверхностью (траектория, обозначенная номером 1 на рис. 8). Система определяет наличие этой опасности, генерирует траектории облета для разрешения конфликта (траектории, обозначенные номерами 2—4, см. рис. 8), анализирует реализуемость и эффективность этих траекторий и выбирает самую предпочтительную для рекомендации пилотам. По результатам виртуальных полетов самолета вдоль этих траекторий можно сказать следующее.

Траектория 1, см. рис. 8. Исходная траектория с номером 1 заканчивается столкновением с землей на 50-й секунде полета.

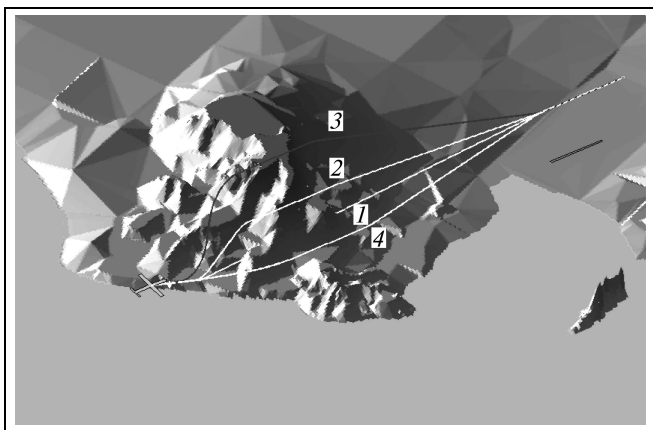


Рис. 8. Исходная конфликтная траектория и траектории разрешения конфликта

Траектория 2, см. рис. 8. Траектория сгенерирована для разрешения конфликта, и облет препятствия производится слева и сверху. Результаты виртуального полета вдоль траектории, полученные с помощью бортовой математической модели, приведены на рис. 9. Заданная нормальная перегрузка

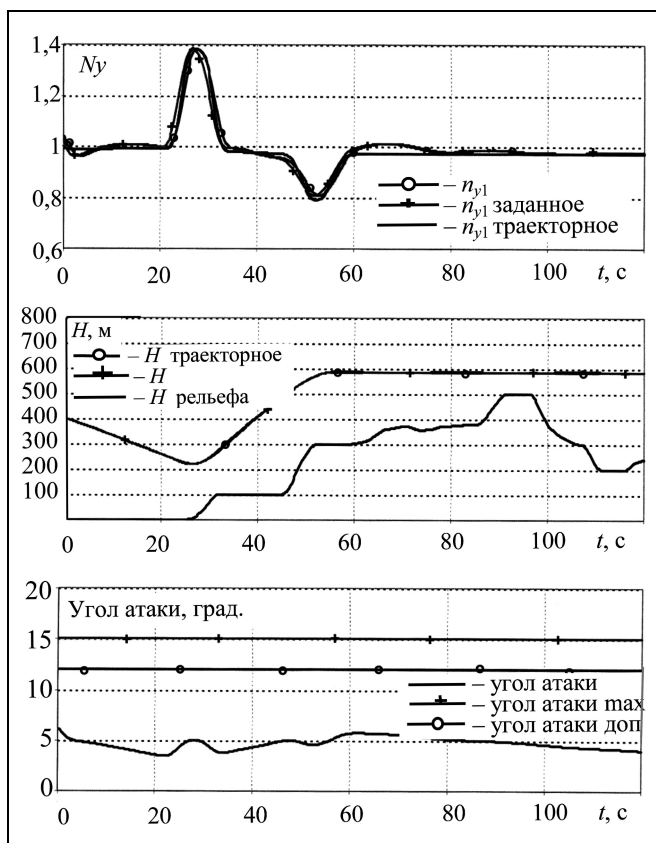


Рис. 9. Параметры виртуального полета вдоль траектории 2

ка обрабатывается с хорошей точностью и без запаздывания вследствие внесения опережения в командный сигнал и коррекции командного сигнала по рассогласованию между заданной и текущей траекториями. При обработке заданной траектории самолет выходит на нормальную перегрузку $n_{y1} \sim 1,4$, т. е. выходит за границу нормальной области, но остается внутри эксплуатационной области.

Траектория 3, см. рис. 8. Траектория сгенерирована для разрешения конфликта, и облет препятствия производится слева и сверху. Результаты виртуального полета демонстрируются на рис. 10. Если выполняется полет с постоянной тягой, то самолету для отработки заданной перегрузки нужно выходить за максимально допустимый угол атаки из-за падения скорости при полете с набором высоты. Ограничитель угла атаки не дает превысить максимально допустимый угол атаки, что ведет к уходу с заданной траектории по высоте. При достижении максимального допустимого рассогласования между заданной и текущей траекторией, система останавливает моделирование и делает заключение, что траектория нереализуема.

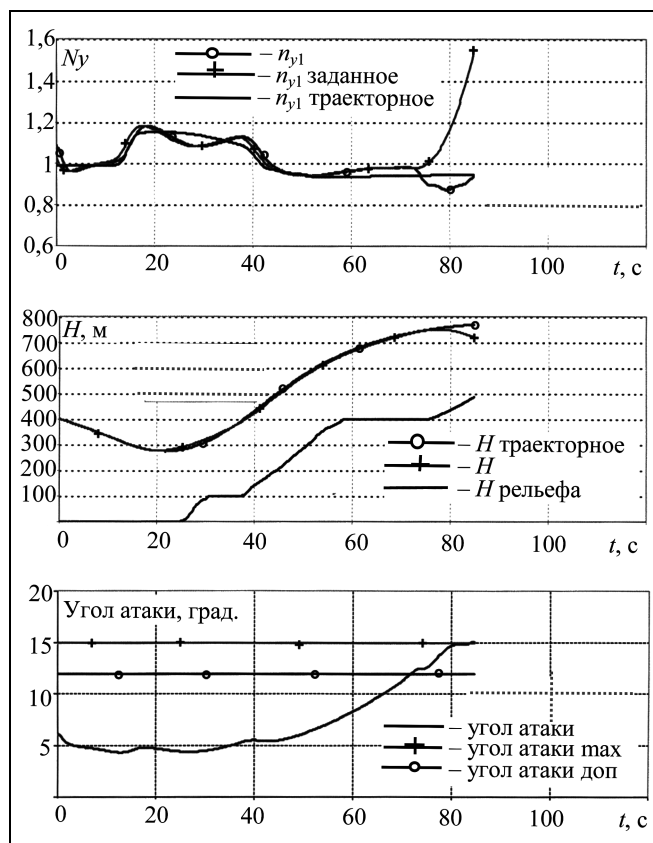


Рис. 10. Параметры виртуального полета вдоль траектории 3



Траектория 4, см. рис. 8. Траектория сгенерирована для разрешения конфликта с рельефом земной поверхности, и облет препятствия производится справа. Результаты предварительного анализа траектории показывают, что полет происходит в нормальной области. Это подтверждается виртуальным полетом самолета вдоль этой траектории, выполненным на математической модели. Параметры полета находятся в пределах нормальной области.

Таким образом, из трех траекторий две реализуемые, одна из которых находится в эксплуатационной области, а другая в нормальной. После анализа траекторий на конфликтность с метеофакторами и воздушным движением, наиболее приемлемая траектория рекомендуется пилоту для отработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика применения бортовой математической модели в рамках интегрированной системы мониторинга летной ситуации и обеспечения траекторной безопасности полета позволяет:

- оценить летную ситуацию в смысле опасности столкновения с земной поверхностью и препятствиями;
- сформировать ряд возможных траекторий трехмерного облета рельефа и препятствий;
- проверить реализуемость сформированных траекторий;
- сортировать траектории в соответствии с выбранной системой приоритетов.

За рамками статьи остались вопросы проведения анализа конфликтности сгенерированных траекторий с факторами погодных условий и воздушного движения.

Отработка бортовой математической модели осуществлялась на стенде ЦАГИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шумилов И.С. Авиационные происшествия. Причины возникновения и возможности предотвращения. — М.: МГТУ, 2006. — 384 с.

2. Глобальный аэронавигационный план. Документ ИКАО 9750 AN/963. Изд. третье. 2007.
3. Баженов С.Г. Интеллектуальная система прогноза посадки самолета и оценки ее реализуемости // Известия Таганрогского государственного радиотехнического университета. — 2004. — Т. 44, № 9. — С. 21—28.
4. Баженов С.Г. Интеллектуальная система формирования и оценки траекторий самолета на этапе предпосадочного маневрирования // Искусственный интеллект. — 2005. — № 4. — С. 65—73.
5. Лебедев В.Г. Система-ассистент экипажа перспективного летательного аппарата // Тр. ИПУ РАН. — М., 2005. — Т. 26. — С. 39—46.
6. Алешин Б.С., Баженов С.Г., Лебедев В.Г., Кулида Е.Л. Использование параллельных процессов для оценки реализуемости и безопасности траекторий магистрального самолета с помощью его бортовой математической модели в интегрированной системе обеспечения безопасности полета // Тр. шестой международной конференции «Параллельные вычисления и задачи управления» / ИПУ РАН. — М., 2012. — Т. 3. — С. 122—137.
7. Бюшгенс Г.С., Студнев Р.В. Динамика продольного и бокового движения самолета. — М.: Машиностроение, 1979.
8. Аэродинамика и динамика полета магистральных самолетов // Под ред. Г.С. Бюшгенса. — М.; Пекин: Авиаиздательство КНР, 1995.
9. Баженов С.Г., Кулида Е.Л., Лебедев В.Г. Формирование бесконфликтных траекторий предпосадочного маневрирования с учетом ограничений на маневренные возможности самолета // Проблемы управления. — 2012. — № 2. — С. 70—75.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Б.В. Павловым.

Борис Сергеевич Алешин — чл.-корр. РАН, ген. директор Центрального аэрогидродинамического института им. проф. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский, ☎ (495) 556-40-50,

Сергей Георгиевич Баженов — канд. техн. наук, нач. отдела, Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский, ☎ (495) 556-40-23, ✉ flight15@tsagi.ru,

Валентин Григорьевич Лебедев — д-р техн. наук, уч. секретарь, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎ (495) 334-92-31, ✉ lebedev@ipu.ru,

Елена Львовна Кулида — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎ (495) 334-92-49, ✉ lenak@ipu.ru.

Не забудьте подписаться!

Подписку на журнал «Проблемы управления» можно оформить в любом почтовом отделении (подписной индекс 81708 в каталоге Роспечати или 38006 в объединенном каталоге «Пресса России»), а также через редакцию с любого месяца, при этом почтовые расходы редакция берет на себя. Отдельные номера редакция высылает по первому требованию.