

УДК 629.7.05

РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО АЛГОРИТМА РАЗРЕШЕНИЯ КОНФЛИКТНЫХ СИТУАЦИЙ В ВОЗДУШНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПРИ ПОЛЕТЕ МАГИСТРАЛЬНОГО САМОЛЕТА

Н.А. ПЕТРОВ

Статья представлена доктором технических наук, профессором Чинючиным Ю.М.

В статье рассмотрены постановка и решение задачи управления траекторией полета магистрального самолета при динамическом изменении условий полета. Обоснована физико-математическая постановка задачи и предложены алгоритмы решения с использованием современных автоматизированных технологий.

Ключевые слова: динамика условий полета, траектории полета, конфликтные ситуации в воздушном пространстве, алгоритмы и модели разрешения конфликтов.

Постоянный рост объема воздушных перевозок требует увеличения емкости воздушного пространства наряду с необходимостью обеспечения приемлемого уровня безопасности полетов, что в значительной степени связано с регламентацией выполнения полетов в международной и отечественной гражданской авиации. Такие требования обуславливают необходимость совершенствования бортовых средств самолетовождения, которые на современных самолетах являются высокоавтоматизированными интегрированными аппаратно-программными комплексами. Программные средства указанных комплексов основаны на алгоритмическом обеспечении, которое подлежит оптимизации в интересах сокращения потребностей в вычислительных ресурсах и повышения эффективности решения задач траекторного управления.

Существуют различные подходы к решению задачи предупреждения конфликтов, включающие вероятностные оценки различных факторов полета [1], использование теории графов, сетей и ES-алгоритмов (Event-step algorithm) [2]. В настоящей статье применяется предложенный в работе [3] единый подход к формированию траекторий облета опасных областей как стационарных, так и перемещающихся. В последнем случае это могут быть перемещающиеся области нелетной погоды или зоны опасного сближения с другими самолетами. Однако в [3] нахождение траекторий облета выполняется в декартовой системе. В этом случае для бортовой реализации необходимо перевести все данные об окружающей обстановке из географической в декартову систему, определить в ней безопасную траекторию, а затем перевести последнюю в географическую. Кроме существенного увеличения вычислительных операций такие переводы могут приводить к заметным погрешностям результатов, особенно на маршрутах большой протяженности. Особенностью рассматриваемого в настоящей статье подхода является нахождение траектории непосредственно в географической системе координат, т.е. в той же системе координат, в которой задаются представляющие потенциальную опасность объекты.

Постановка задачи

Частной, но весьма важной, задачей самолетовождения является предупреждение конфликтов в воздушном пространстве, включающих недопустимое сближение:

- с опасными погодными условиями;
- с зонами ограничения полетов;
- с другими самолетами.

Для решения этой задачи бортовыми средствами самолетовождения необходимо создание эффективных алгоритмов, обеспечивающих разрешение таких конфликтов в режиме реального времени при полете по маршруту. Рассматриваемый в статье алгоритм предназначен для идентификации и разрешения конфликтных ситуаций для самолета на крейсерском участке полета. Предполагается, что самолет АС1 движется на постоянном заданном эшелоне с постоянной на каждом сегменте между промежуточными пунктами маршрута (ППМ) скоростью. Другие самолеты, с которыми потенциально может произойти опасное сближение, летят на том же эшелоне.

Информация о воздушном движении и метеорологическая информация могут быть получены от других самолетов и иных источников с помощью средств автоматического зависимого наблюдения и от бортового метеорадиолокатора.

Опасные/запрещенные для полетов области задаются на сетке размером 5550 на 3550 точек, покрывающей территорию Европы с шагом $0,01^\circ$. Ограничений на форму опасных/запрещенных для полетов областей не накладывается в отличие от [2], где запрещенные области задаются в виде выпуклых полигонов. Сетка покрывает пространство между параллелями 35° и 65° северной широты и меридианами 15° западной долготы и 40° восточной долготы. В памяти вычислителя сетка представляется двумерным массивом, т.е. каждый узел сетки определяется двумя индексами этого массива. Узлам сетки, попадающим в опасные/запрещенные для полета зоны, присваивается 1, остальным узлам – 0. Далее первые из них будем называть запрещенными областями.

После обнаружения конфликта определяются варианты его разрешения и на навигационном дисплее отображаются альтернативные маршруты облета в горизонтальной плоскости (без изменения заданного эшелона полета).

Особенностью применяемого в работе метода является универсальный подход к решению задачи. Алгоритм управления траекторией, обеспечивающий разрешение конфликтных ситуаций, формируется вне зависимости от физической природы конфликта: метеоусловия, административное ограничение полетов, другой самолет. В последнем случае объект перемещается, поэтому приходится рассчитывать прогнозируемое положение области, где потенциально возможно опасное сближение.

Зона опасного сближения с другим самолетом, назовем его АС2, в горизонтальной плоскости задается кругом радиусом 5 морских миль [4]. В расчетах граница зоны опасного сближе-

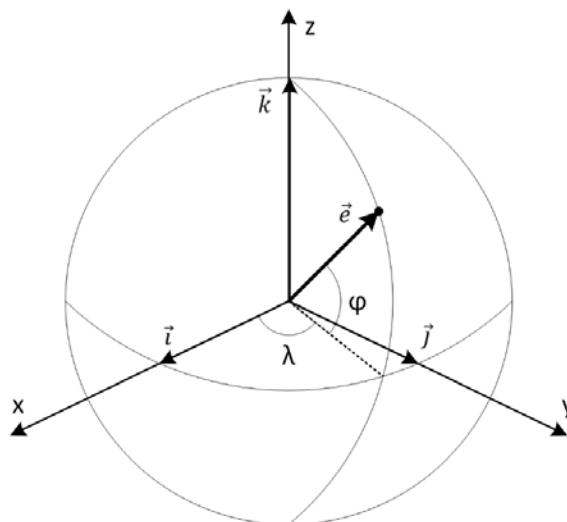


Рис. 1. Определение единичного вектора \vec{e}

ния аппроксимируется многоугольником. Расчеты проводятся в геоцентрической сферической системе координат с базисом $\{\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}\}$ (рис. 1).

Положение любой точки в системе координат можно определить вектором $(R_z + H)\vec{e}$, где R_z – радиус Земли; H – высота полета; \vec{e} – единичный вектор, который при известных значениях широты φ и долготы λ рассчитывается согласно формуле

$$\vec{e} = \{\cos \varphi \cos \lambda; \cos \varphi \sin \lambda; \sin \varphi\}. \quad (1)$$

Географические координаты для рассматриваемой области воздушного пространства определяются по компонентам вектора \vec{e} следующим образом:

$$\begin{aligned} \lambda &= \tan^{-1} \left(\frac{e_y}{e_x} \right); \\ \varphi &= \sin^{-1} e_z. \end{aligned} \quad (2)$$

Прогнозирование области опасного сближения с другим самолетом

В настоящей работе область опасного сближения с другими самолетами аппроксимируется многоугольником с 16 вершинами. Прогнозируемое положение каждой вершины определяется из условия, что при прогнозируемом движении самолетов эта вершина и самолет АС1 оказываются в этом положении одновременно.

Движение каждой вершины многоугольника жестко связано с движением самолета АС2. Если самолет АС2 движется по прямой, то и вершина будет смещаться прямолинейно, если самолет АС2 выполняет разворот, то и весь многоугольник, т.е. каждая его вершина, будет выполнять разворот.

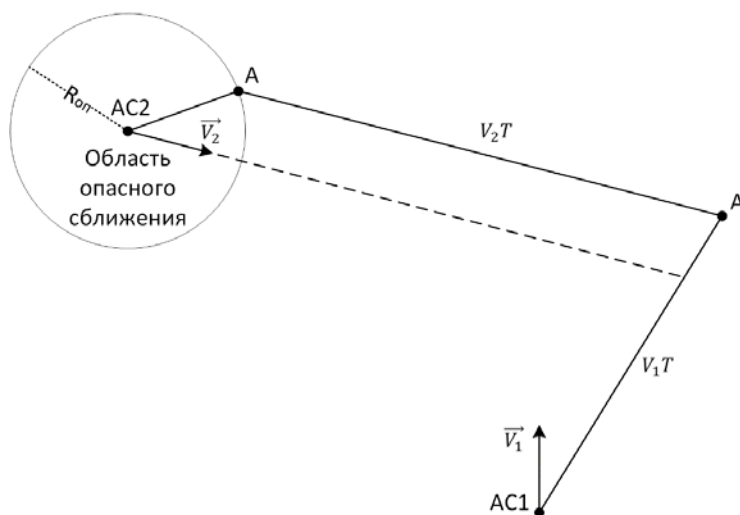


Рис. 2. Схема возможного сближения самолетов в горизонтальной плоскости

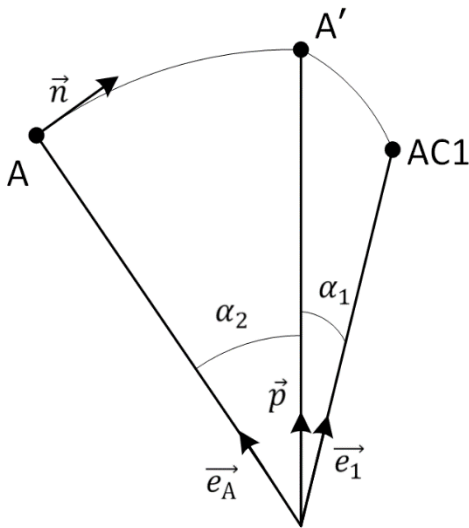
Координаты вершин многоугольника, аппроксимирующего область опасного сближения, при текущем положении самолета АС2 можно найти по формулам:

$$\begin{aligned} \varphi_i &= \sin^{-1} \left(\sin \varphi_{AC2} \cos \left(\frac{R_{оп}}{R_3 + H} \right) + \cos \varphi_{AC2} \sin \left(\frac{R_{оп}}{R_3 + H} \right) \cos \theta_i \right); \\ \lambda_i &= \lambda_{AC2} + \tan^{-1} \left(\frac{\sin \theta_i \sin \left(\frac{R_{оп}}{R_3 + H} \right) \cos \varphi_{AC2}}{\cos \left(\frac{R_{оп}}{R_3 + H} \right) - \sin \varphi_{AC2} \sin \varphi_2} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где θ_i – угол между направлением на север и направлением на i -ю вершину; φ_{AC2} и λ_{AC2} – широта и долгота самолета AC2 соответственно; $R_{оп}$ – радиус области опасного сближения.

Здесь формирование зоны опасного сближения производится в предположении, что самолет AC2 выполняет прямолинейный полет с постоянной скоростью, величина скорости самолета AC1 также постоянна (рис. 2).

Определение географических координат точки A' выполняется в векторной форме, находится единичный вектор \vec{p} , по компонентам которого рассчитываются её географические координаты согласно формулам (2). Единичные векторы \vec{e}_1 и \vec{e}_A , соответствующие положениям самолета AC1 и точки A, рассчитываются по формуле (1).



Полагаем, что вектор \vec{p} находится в плоскости ортодромии и равен

$$\vec{p} = \vec{e}_A \cos \alpha_2 + \vec{n} \sin \alpha_2, \quad (4)$$

где \vec{n} – единичный вектор, лежащий в плоскости ортодромии;

$$\alpha_2 = \frac{V_2 T}{R_3 + H} \quad (5)$$

– угол, на который перемещается точка A в геоцентрической системе координат при прогнозе на время T.

За время T самолет AC1 в этой же системе координат перемещается на угол

$$\alpha_1 = \frac{V_1 T}{R_H}. \quad (6)$$

Рис. 3. Нахождение координат точки A'

Этот угол может быть также определен из соотношения

$$\cos \alpha_1 = (\vec{p}, \vec{e}_1). \quad (7)$$

Подставив в это соотношение выражения (4), (5), (6), получим

$$(\vec{e}_1, \vec{e}_2) \cos \frac{V_2 T}{R_H} + (\vec{e}_1, \vec{n}) \sin \frac{V_2 T}{R_H} = \cos \frac{V_1 T}{R_H}. \quad (8)$$

Углы α_1 , α_2 малы, поэтому с достаточной точностью (с точностью до $\left(\frac{VT}{R_H}\right)^3$) справедливо соотношение

$$(\vec{e}_1, \vec{e}_A) \left(1 - \frac{V_2^2 T^2}{2R_H^2} \right) + (\vec{e}_1, \vec{n}) \frac{V_2 T}{R_H} = 1 - \frac{V_1^2 T^2}{2R_H^2}. \quad (9)$$

После приведения подобных получим канонический вид квадратного уравнения

$$\frac{V_1^2 - V_2^2 (\vec{e}_1, \vec{e}_A)}{R_H^2} T^2 + 2(\vec{e}_1, \vec{n}) \frac{V_2}{R_H} T + 2((\vec{e}_1, \vec{e}_A) - 1) = 0. \quad (10)$$

Решением данного уравнения является момент времени T , соответствующий одновременному достижению точки A' самолетом $AC1$ и точкой A

$$T = \frac{-\vec{e}_1, \vec{n} \frac{V_2}{R_H} + \sqrt{\left(\vec{e}_1, \vec{n} \frac{V_2}{R_H}\right)^2 + 2 \frac{V_1^2 - V_2^2 (\vec{e}_1, \vec{e}_A)}{R_H^2} (1 - (\vec{e}_1, \vec{e}_A))}}{\frac{V_1^2 - V_2^2 (\vec{e}_1, \vec{e}_A)}{R_H^2}}. \tag{11}$$

В предположении, что самолет $AC2$ движется по ортодромии, вектор \vec{n} направлен по касательной к этой ортодромии и однозначно определяется углом курса ψ_2 самолета $AC2$ относительно вектора \vec{m} , лежащего в меридиональной плоскости и направленного на север (рис. 4). Единичный вектор \vec{m} можно определить через векторы \vec{k} и \vec{e}_A по формуле

$$\vec{m} = \frac{\vec{k} - \vec{e}_A \sin \varphi_2}{\cos \varphi_2}. \tag{12}$$

Для нахождения вектора \vec{n} также используется перпендикулярный меридиональной плоскости вектор \vec{n}_2 , равный

$$\vec{n}_2 = (-\sin \lambda_2, \cos \lambda_2, 0). \tag{13}$$

Вектор \vec{n} определяется по формуле

$$\vec{n} = \vec{m} \cos \psi_2 + \vec{n}_2 \sin \psi_2. \tag{14}$$

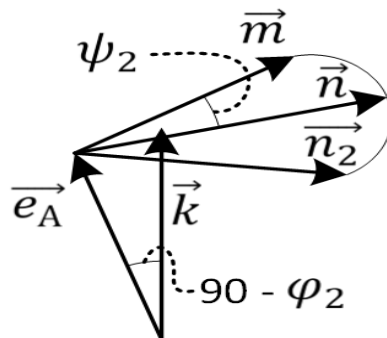


Рис. 4. Определение вектора \vec{n}

Для нахождения вектора \vec{r} , определяющего положение точки A' , подставляем момент времени T из уравнения (11) в уравнение (4). Расчет координат (широты и долготы) этой точки производится по уравнениям (3).

В результате нахождения координат всех 16 вершин многогранника и их соединения прямолинейными отрезками получим прогнозируемое положение многогранника, внутренность которого представляет собой прогнозируемую область опасного сближения.

Получены результаты построения прогнозируемых областей опасного сближения при разных скоростях движения самолета $AC2$ и одинаковых остальных начальных условиях. На рис. 5 показана конфликтная ситуация, в которой запланированная траектория самолета $AC1$ пересекает прогнозируемую область опасного сближения с самолетом $AC2$. Ситуация требует разрешения конфликта путем изменения плана полета самолетом $AC1$.

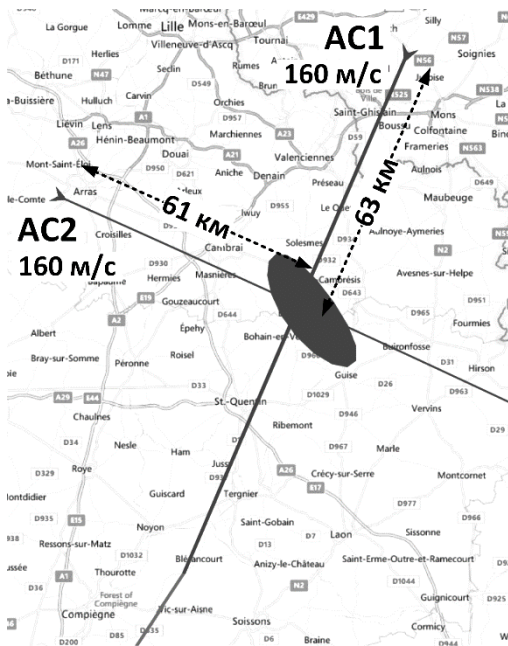


Рис. 5. Прогнозируемая область опасного сближения при $V_2 = V_1$

Для идентификации прогнозируемых областей опасного сближения попадающие в них узлы сетки маркируются цифрой 1, т.е. так же как это делается и для других запрещенных областей.

Облет запрещенных зон

На сетке строится цифровая карта, аналогичная описанной в [3] цифровой «карте безопасности», которая определяет, насколько далеко от запрещенных областей находится каждый узел сетки, лежащий вне этих областей. Карта позволяет также объединять отдельные близлежащие области, не допускающие пролета между ними, в одну запрещенную область.

Каждая запрещенная область маркируется и строится граница безопасности для облета, которая сохраняется в памяти вычислителя. Граница безопасности определяется как некоторая равноудаленная от запрещенной области кривая. В расчетах она задается в виде списка индексов двумерного массива узлов сетки, которым присваивается число, указывающее на расстояние до запрещенной области.

Для нахождения границ используется модифицированный алгоритм трассировки Мура (Moore-Neighbor tracing). Благодаря этому в дальнейших расчетах запрещенную область и её границу можно идентифицировать по одной точке.

Разрешение используемой сетки составляет $0,01^\circ$ и, поскольку размеры одной ячейки малы по сравнению с размерами запрещенных областей, справедливо предположение, что самолет пересечет границу безопасности в узле сетки, лежащем наиболее близко к точке пересечения запланированной траектории полета с этой границей.

Данное предположение позволяет заметно ускорить процесс идентификации конфликтной ситуации. На схеме (рис. 6) показана привязка запланированной траектории полета к узлам сетки (например, точка i траектории переходит в точку j ломаной кривой, представляющей траекторию на сетке). Так траектория анализируется с целью определения точки ее пересечения с границей безопасности, если пересечение имеет место. Надо заметить, что при решении задачи используются не все точки запланированной траектории, а только некоторые с учетом рассматриваемых узлов.

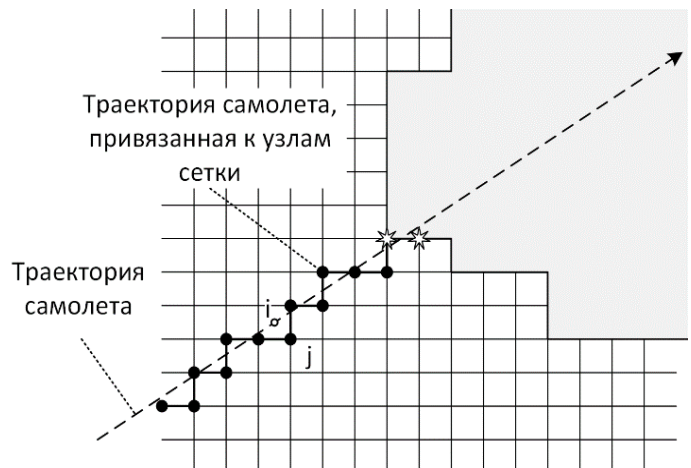


Рис. 6. Определение точки пересечения границы безопасности запрещенной области

Пусть самолет летит по запланированному маршруту. Рассмотрим крейсерский участок полета между ППМ 5 и ППМ 6, на котором обнаружена запрещенная область (рис. 7). С использованием вышеописанного алгоритма идентификации конфликтной ситуации получаем точку S границы безопасности, в которой запланированная траектория полета самолета пересекает эту границу.

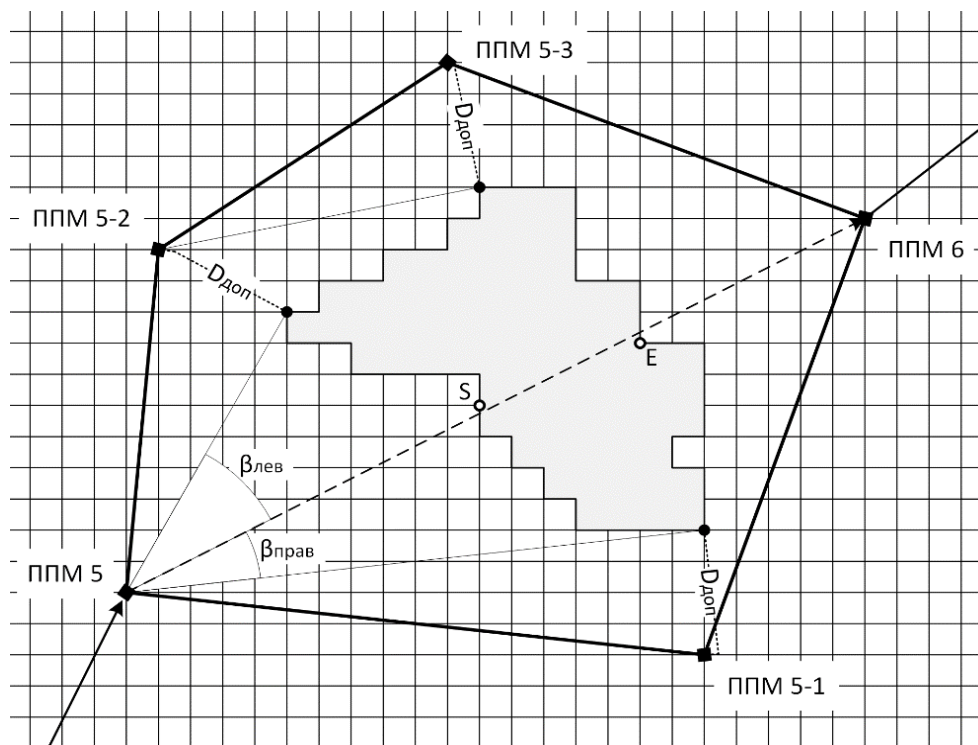


Рис. 7. Построение альтернативных траекторий полета

Далее определяется точка E пересечения запланированной траектории с границей безопасности, но уже за запрещенной областью. Для этого используется тот же частный алгоритм, что и для нахождения точки S .

Для построения возможных траекторий облета определяются крайние точки границы безопасности относительно точки начала облета (ППМ 5). Для этого осуществляется перебор всех точек границы безопасности запрещенной области от точки S до точки E по часовой и против часовой стрелки и расчет углов $\beta_{\text{лев}}$ и $\beta_{\text{прав}}$ соответственно. Для возможного облета запрещенной области слева и справа будет найдено по одной точке, соответствующей максимальному углу β . Поскольку вычисления для левой и правой ветвей не зависят друг от друга, их можно выполнять одновременно, что значительно ускоряет процесс нахождения крайних точек.

Новая точка маршрута для облета запрещенной области задается на некотором удалении $D_{\text{доп}}$ от крайней точки запрещенной области (рис. 7). Все полученные при расчете ППМ привязываются к ближайшему узлу сетки. Эти новые точки маршрута (в данном примере ППМ 5-1 и ППМ 5-2) напрямую соединяются с точкой завершения облета (ППМ 6). Если на траекториях облета вновь происходит пересечение границы безопасности какой-либо запрещенной зоны, то для построения траектории облета повторяется весь вышеописанный алгоритм (в примере таким образом был добавлен новый ППМ 5-3).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Wanke C., Greenbaum D.** Incremental, Probabilistic Decision Making for En Route Traffic Management // 7th ATM Seminar, Barcelona, Spain. – July 2007.
2. **Silbert M.** Comparison of the Event-Step Algorithm to Other Path Planning Methods to Avoid Dynamic 3D Obstacles // AGARD Conf. Proceedings "Air Vehicle Mission Control and Management". – 1992. – No. 504. – 9 p.
3. **Grevtsov N.M., Dymchenko A.A.** Design of Fly-around of Dangerous/Forbidden Zones with Using Digital "Safety Map" // 2nd Intl. Conf. on Interdisciplinary Science for Innovative Air Traffic Management Proceedings, Toulouse, France. – 8-10 July 2013.
4. **Canton R., Refai M., Johnson W., Battiste V.** Development and Integration of Human-Centered Conflict Detection and Resolution Tools for Airborne Autonomous Operations. – 2005.

**DEVELOPMENT OF THE UNIVERSAL ALGORITHM FOR THE AIRSPACE CONFLICTS
RESOLUTION WITH AN AIRPLANE EN-ROUTE****Petrov N.A.**

The paper outlines the formulation and solution of the problem of an airplane trajectory control within dynamically changing flight conditions. Physical and mathematical formulation of the problem was justified and algorithms were proposed to solve it using modern automated technologies.

Key words: flight conditions dynamics, flight trajectory, conflict situations in air space, algorithms and models of conflicts resolution.

Сведения об авторе

Петров Никита Андреевич, 1990 г.р., окончил МФТИ (2013), аспирант МФТИ, младший научный сотрудник ФГУП "ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского", область научных интересов – перспективные методы и технологии самолетовождения и организации воздушного движения.