

УДК 519.7

Р. Н. Кветный, д. т. н., проф.; И. П. Борцова**АЛГОРИТМ ИЗБЕЖАНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ
ЛЕТАЮЩИХ АППАРАТОВ**

Описаны области применения беспилотной техники. Сделан анализ существующих систем избежания столкновений. На основе математической модели движения материальной точки предложен алгоритм избежания столкновения для беспилотных летающих аппаратов. Он может быть основой будущих разработок и алгоритмов в этой области.

Ключевые слова: алгоритм, беспилотный летающий аппарат, материальная точка.

Введение. В настоящее время наблюдается значительный рост интереса к беспилотным летающим аппаратам (БЛА). Отсутствие человека на борту позволяет осуществлять маневры, недоступные для пилотируемых самолётов. Впервые БЛА были применены в разведывательных миссиях во время войны во Вьетнаме. Сегодняшние БЛА используют новейшие технологии, включая камеры, радары и инфракрасные датчики. Они варьируются от малых, дистанционно регулируемых летающих аппаратов, похожих на планеры, до огромных БЛА, которые могут летать самостоятельно на сотни миль для запрограммированных миссий [1 – 4].

Беспилотные летающие аппараты обычно используются для выполнения таких задач, которые не могут быть решены при использовании пилотируемых объектов. Этими задачами являются: мониторинг воздушного пространства, наземных и водных поверхностей, экологического контроля, управление воздушным движением, контроль морской навигации, разработка сетей связи и другие.

Основная проблема при проектировании беспилотных летающих аппаратов заключается в разработке алгоритмов избежания их столкновений.

Анализ предыдущих исследований. Сегодня в мире существуют сотни различных типов и классов БЛА – от миниатюрных, размер которых составляет несколько десятков сантиметров, до больших стратегических транспортных средств. Самыми известными являются системы TCAS [5] и ADS-B [6].

TCAS – это инструмент, который предназначен для предотвращения столкновений между летающими аппаратами в воздушном пространстве. Опыт продемонстрировал пользу и эффективность TCAS. В то же время при использовании TCAS были определены области, в которых дизайн и алгоритмы TCAS требуют улучшения или дальнейшего повышения эффективности TCAS и ее взаимодействия с контроллерами. TCAS также не предотвращает все риски столкновения, и система может вызвать дополнительный риск.

Сегодня особое внимание уделяется беспилотным летающим аппаратам, которые используют системы ADS-B. От других систем ADS-B отличается улучшенными визуальными возможностями: возможностью проводить операции на поверхности, возможностью выполнения операций при любых погодных условиях, сокращением пространства для возможного сближения.

Однако есть много проблем, которые должны быть решены при разработке беспилотных летающих аппаратов, оснащенных такой системой. Во-первых, операторы беспилотных летающих аппаратов и контроллеры не могут полностью управлять полётом, так как они физически не могут видеть все движение вокруг беспилотной системы; во-вторых, алгоритмы избежания столкновений являются несовершенными и не позволяют полностью и при каких-либо условиях избегать столкновений с другими летающими аппаратами. Еще одной не менее важной проблемой при проектировании летающих аппаратов, оснащенных ADS-B является то, что не все существующие алгоритмы и подходы для избежания столкновений согласуются с принципами ADS-B. Таким образом, остро стоит задача улучшения алгоритмов избежания столкновений для беспилотных летающих аппаратов.

Целью работы является совершенствование системы избежания столкновений для беспилотных летающих аппаратов, с помощью алгоритма предотвращения столкновений, основанного на математической модели движения материальной точки.

Материалы и результаты исследований. Движение беспилотного летающего аппарата состоит из поступательного движения его центра масс, которое определяет траекторию полета и вращательного движения вокруг центра масс, задающего угловую позицию беспилотного летающего аппарата относительно инерциального пространства [7]. При движении беспилотного летающего аппарата в атмосфере Земли, эти две составляющие общего движения взаимосвязаны и должны рассматриваться вместе.

В основу математической модели беспилотных летающих аппаратов положена нелинейная система дифференциальных уравнений, описывающих движение БЛА в пространстве.

Введём некоторые определения. Вектором положения называется вектор, проведенный от начала выбранной системы координат в точку расположения аппарата ($\vec{r}_1(t)$ и $\vec{r}_2(t)$ для двух летающих аппаратов соответственно). Вектор положения и скорость его изменения записываются в проекциях на оси выбранной (декартовой или сферической) системы координат. Вектором относительной дальности назовём вектор, который направлен от одного БЛА к другому вдоль линии визирования и по величине равен расстоянию между центрами масс этих БЛА. Это расстояние называется относительной дальностью \bar{D} .

Беспилотный летающий аппарат движется в пространстве вместе с другим летающим устройством. Для получения уравнений относительного движения двух таких летающих аппаратов используем известные положения теоретической механики. Используя приведенные выше определения можно утверждать, что положения летающих аппаратов в каждый момент времени определяется векторами $\vec{r}_1(t)$ и $\vec{r}_2(t)$.

Таким образом, векторы дальности и относительной скорости запишутся:

$$\begin{cases} \bar{D}(t) = \vec{r}_1(t) - \vec{r}_2(t), \\ \bar{V} = \dot{\bar{D}}(t) = \dot{\vec{r}}_1(t) - \dot{\vec{r}}_2(t); \end{cases} \quad (1)$$

Векторные уравнения относительного движения можно представить в виде:

$$\dot{\bar{V}} = \ddot{\bar{D}}(t) = \bar{a}_1(t) - \bar{a}_2(t), \quad (2)$$

где $\bar{a}_1(t), \bar{a}_2(t)$ – векторы ускорений двух БЛА соответственно.

Дальше будем описывать относительное движение летающих аппаратов в связанной системе координат, которая движется относительно инерциальной системы координат. В этом случае переход от абсолютных производных векторов к локальным осуществляется по известным формулам:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \bar{r}}{dt^2} = \ddot{\bar{r}} + 2[\bar{\omega} \dot{\bar{r}}] + [\bar{\omega}[\bar{\omega} \bar{r}]] + [\dot{\bar{\omega}} \bar{r}], \\ \frac{d \bar{r}}{dt} = \dot{\bar{r}} + [\bar{\omega} \bar{r}]; \end{cases} \quad (3)$$

Абсолютное движение летающего аппарата в связанной с летающим аппаратом, который приближается, системе координат, определяется выражениями:

$$\begin{cases} \bar{V}_1 = \bar{V}_2 + \dot{\bar{D}} + [\bar{\omega} \bar{D}], \\ \bar{a}_1 = \bar{a}_2 + \ddot{\bar{D}} + [\bar{\omega}[\bar{\omega} \bar{D}]] + [\dot{\bar{\omega}} \bar{D}] + [2\bar{\omega} \dot{\bar{D}}]; \end{cases} \quad (4)$$

Кинематические и динамические векторные уравнения относительного движения двух БЛА в связанной системе координат получим из (4):

$$\begin{cases} \bar{D} = \bar{V}_1 - \bar{V}_2 - [\bar{\omega}\bar{D}], \\ \bar{D} = \bar{a}_1 - \bar{a}_2 - [\bar{\omega}[\bar{\omega}\bar{D}]] - [\bar{\varepsilon}\bar{D}] - [2\bar{\omega}\bar{D}]; \end{cases} \quad (5)$$

Таким образом, из уравнения относительного движения двух летающих аппаратов можно вычислить, на какое расстояние они переместятся через определенный промежуток времени, какое расстояние будет между ними через определённый промежуток времени, какие координаты они примут через определенный промежуток времени. Разработанный алгоритм избежания столкновений на каждом шаге вычислений учитывает движение одного летающего аппарата относительно другого.

Предположим, что данный летающий аппарат перемещается в горизонтальной плоскости и должен достичь некоторой цели, находясь в той же плоскости.

Навстречу ему движется еще одно летающее устройство. Допустимое расстояние между летающими аппаратами не должно быть меньше, чем некоторое число R . В соответствии с уравнениями относительного движения, считаем беспилотник материальной точкой, которая движется, а другой летающий объект – препятствием, которое стоит на месте. При этом задача заключается в том, чтобы «обойти» это препятствие самым коротким путём.

Спроектируем в конкретном масштабе на плоскость XOY трехмерной сетки оба летающие аппараты. Ячейку, в которую спроектируется второй летающий аппарат, обозначим как препятствие, учитывая и минимальное допустимое расстояние между летающими аппаратами. Обозначаем как препятствие и те квадраты сетки, которые расположены вокруг летающего аппарата и попадают в диапазон недопустимого расстояния между летающими аппаратами. На рисунке 1 показана проекция летающих аппаратов на плоскость XOY .

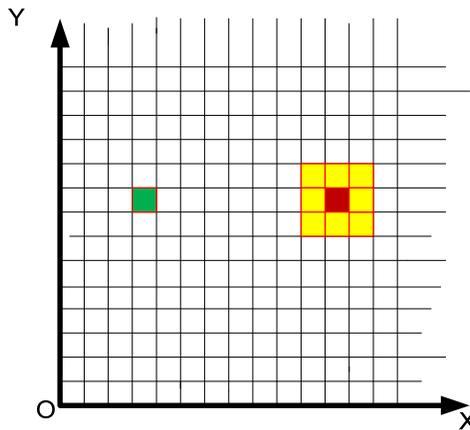


Рис. 1. Проекция летающих аппаратов на плоскость XOY

Алгоритм основывается на принципах:

1. Разбиваем трехмерное пространство на сетку. Конкретный квадрат сетки – это «ячейка», которую может занимать беспилотник (как указывалось выше, мы рассматриваем его как материальную точку).

2. Шаг сетки выбирается таким, который равняется минимальному относительному перемещению одного летающего аппарата по отношению к другому для определенного периода времени, выбранного нами. Поскольку система инерциальная, и мы вычисляем относительное перемещение одного летающего аппарата относительно другого, то считаем, что беспилотник движется со скоростью, которую мы определили как относительную, а другой летающий аппарат стоит на месте. Таким образом, алгоритм избежания столкновений значительно упрощается.

3. Если разница координат $z_1 - z_2$ между данными летающими аппаратами больше или

равна допустимому расстоянию между летающими аппаратами, то движение беспилотника не нужно корректировать. Если разница координат $z_1 - z_2$ между летающими аппаратами меньше, чем допустимое расстояние между ними или равна нулю, тогда нужно искать самый короткий путь обхода препятствия.

Выводы. В настоящее время наблюдается значительный рост интереса к беспилотным летающим аппаратам. В системах избежания столкновений для беспилотных летающих аппаратов актуальной является задача проведения данного летающего аппарата с исходного положения в данную область в нужное время, избегая столкновений с другими летающими аппаратами. Ключевым вопросом при решении этой задачи является разработка алгоритма избежания их столкновений. Предлагаемый алгоритм использует математическую модель относительного движения двух материальных точек. Этот алгоритм может использоваться в навигационных системах, а также в системе ADS-B.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Beylin M. System approach to weapons production in unmanned aviation systems / Beylin M., Burkovsky S. // Management systems, navigation and communication. – 2008. – № 6(2). – Pp. 60 – 61
2. Unmanned Aircraft Systems for the Navy [internet-resource] / Shcherbakov V.–: http://www.uav.ru/articles/naval_uav.pdf
3. Best R. A. Intelligence Technology in the Post-Cold War Era, the Role of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): Report to Congress // Congressional Research Service , 1993. – Pp. 12 – 16.
4. Sterste-Perkins D. Military Unmanned Aerial Vehicles Report to Congress // Congressional Research Service , 1996. – Pp. 11 – 14.
5. Livadas C. High-Level Modeling and Analysis of TCAS [internet-resource] / Livadas C., Lygeros J., Lynch N. – Режим доступа: <http://people.csail.mit.edu/clivadas/pubs/RTSS99.pdf>.
6. Powell J. D Use of ADS-B and perspective displays to enhance airport capacity [internet-resource] / Powell J. D, Jennings Ch., Holforty W. – Режим доступа: <http://waas.stanford.edu/~wwu/papers/gps/PDF/PowellDASC05.pdf>
7. Kumkov S. I. Informational Sets in a Problem of Observation of Aircraft Trajectory / Kumkov S. I., Patsko V. S., Pyatko S. G., Fedotov A. A. // Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics. – 2000. – № 2. – 413 – 434.

Кветный Роман Наумович – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой АИВТ.

Борцова Ирина Петровна – студентка кафедры АИВТ.

Винницкий национальный технический университет.