

В.Т. ГРУМОНДЗ,д-р физ. мат. наук
(МАИ, Москва),**Е.И. КАРПЕЖНИКОВ**

(ГНПП «Регион», Москва),

М.А. ПОЛИЩУК,

магистрант

(МАИ, Москва),

М.В. ПОЛИЩУК,

канд. техн. наук

(ГНПП «Регион», Москва)

maxipol@mail.ru

Алгоритмы построения областей начальных состояний беспилотных планирующих крылатых летательных аппаратов

Построены алгоритмы управления спуском беспилотного планирующего крылатого летательного аппарата с учетом требований, предъявляемых к траектории движения. Представлены результаты расчетов, иллюстрирующие эффективность построенных алгоритмов.

Беспилотный планирующий крылатый летательный аппарат, баллистика, управление, множество начальных состояний, планирование, подвижная цель

Задачи динамики и управления беспилотных планирующих летательных аппаратов (БПЛА) рассмотрены в литературе в основном для ЛА с крылом малого удлинения [1–3]. Между тем в настоящее время все большее значение приобретают БПЛА с крылом большого удлинения [4–6], что позволяет говорить о формировании отдельного класса беспилотных планирующих крылатых летательных аппаратов (БПКЛА). К этому классу относятся некоторые космические ЛА, для которых траектория планирования является одной из возможных, например, при спуске на землю; БПКЛА без двигательной установки, стартующие с самолетов-носителей с различными целями, и др.

В работах [4, 5] рассмотрены вопросы синтеза системы управления БПКЛА. Настоящая работа является продолжением исследования [5], в ней разрабатываются алгоритмы решения одной из важнейших практических задач – построение областей начальных состояний БПКЛА при старте с носителя, движущегося на постоянной высоте с постоянной скоростью. Благодаря данным областям обеспечивается попадание БПКЛА в конечный момент времени в окрестность заданной точки пространства и, в частности, заданной точки земной поверхности.

Задача решается при соблюдении следующих дополнительных условий на траектории движения БПКЛА, существенно усложняющих решение поставленной задачи построения области начальных состояний БПКЛА.

1. Облет заданного конечного набора навигационных точек, расположенных на земной поверхности.
2. Максимизация длины проекции траектории полета на земную поверхность, в частности, максимизация дальности полета БПКЛА.
3. Минимизация потерь суммарной энергии при движении до конечной точки траектории (подробное изложение алгоритмов управления, в том числе алгоритмов минимизации суммарных потерь энергии, представлено в работе [4]).

4. Максимизация модуля вектора скорости и модуля траекторного угла при подходе к этой точке.

Задача минимизации потерь суммарной энергии при движении до конечной точки траектории подробно рассмотрена в работе [4].

Можно выделить два типа решения задачи планирования аппарата на максимальную дальность.

1. На борту ЛА с заданной частотой происходит оптимизация некоторого функционала численными методами, результатом чего является функция управления для некоторого интервала времени (в данном случае функция $n_{y_opt}(t)$).

2. Реализация управления достигается введением соответствующих ограничений управляющих сигналов, полученных, в свою очередь, с помощью дополнений к основному сигналу, используемому при наведении в точку цели, – угловой скорости линии визирования.

Рассмотрим вначале возможные варианты реализации алгоритмов первого типа. Перегрузку n_{y_opt} в этом случае представим в виде полинома второй степени

$$n_{y_opt} = k_1 t^2 + k_2 t + k_3,$$

где t – время; k_1, k_2, k_3 – коэффициенты, вычисляемые оптимизацией целевой функции. Для расчета коэффициентов полинома, представляющего «оптимальный» закон изменения перегрузки на некотором интервале, в этом случае требуются значения скорости, перегрузки, углов Эйлера, а также текущего времени работы программы.

Максимальной дальности полета БПЛА можно добиться за счет реализации на заданном временном интервале следующих подходов: 1) минимизации потерь полной энергии объекта; 2) минимизации потерь высоты; 3) максимизации дальности полета на последовательно расположенных участках траектории; 4) комбинации вариантов 2 и 3 с использованием весовых коэффициентов.

Основная идея методов первого типа – возможность в той или иной мере организовать расчет оптимальной траектории непосредственно на борту ПЛА в зависимости от текущих параметров полета. Теоретически результаты использования такого подхода лучше результатов применения других методов и подходов. Развивая эти методы, можно добиться оптимизации траектории полета с учетом облета заданных навигационных точек. Серьезным недостатком такого подхода является значительное увеличение математических операций, проводимых на борту, в связи с чем использование подобных методов наведения в настоящее время вряд ли осуществимо.

Рассмотрим пример реализации алгоритма второго типа. Наиболее экономным с точки зрения запаса полной энергии является полет, соответствующий режиму максимального аэродинамического качества. Точное выполнение этого режима требует достоверной априорной информации об аэродинамических свойствах объекта управления и, кроме того, комплекса измерительных процедур в процессе полета. В рассматриваемом законе самонаведения используется достаточно простой и в то же время весьма эффективный способ приближения к режиму полета на максимальном аэродинамическом качестве. Алгоритм, реализующий этот закон, состоит в следующем. Для организации сигналов в каналах управления вычисляется абсолютное значение Ω вектора угловой скорости линии визирования цели и устанавливается ограничение модуля этого вектора $\Omega_{гр}$, обеспечивающее движение БПЛА с перегрузкой, близкой к единице. Ограниченные сигналы самонаведения каналов управления перегрузкой n_y вычисляются в следующем виде:

$$\Omega_1 = \Omega_{z1} \Omega_{гр} / \Omega,$$

где Ω_1 – итоговый управляющий сигнал; Ω_{z1} – проекция угловой скорости линии визирования цели на связанную с БПЛА ось z ; $\Omega_{гр}$ – уровень ограничения управляющего сигнала; Ω – угловая скорость линии визирования цели.

В настоящей работе на основе математических моделей [4–6] предложена математическая модель управляемого пространственного движения БПЛА с крылом большого удлинения, разработаны алгоритмы управления, решающие задачу приведения БПЛА в заданную точку с учетом сформулированных дополнительных требований, а также алгоритмы построения областей начальных состояний БПЛА. Результаты проведенных расчетов модельных задач позволяют говорить о существенном улучшении летно-технических характеристик на этапе управляемого планирования гипотетического ЛА с крылом большого удлинения, в том числе о значительном (примерно на 70–80 %) увеличении дальности его полета.

Решение перечисленных задач для БПЛА затруднительно из-за особенностей аэродинамики и динамики аппаратов рассматриваемого класса. Трудности возникают вследствие большого перепада высот между начальной и конечной точками траектории, в связи с жесткими требованиями к точности наведения на точку интереса, из-за больших различий между числами Маха на различных участках полета (в том числе на начальном и конечном участках траектории) и существенных различий аэродинамических характеристик при полете на разных участках траектории, из-за отсутствия участков траектории, где движение является установившимся.

Постановка задачи

Будем называть множеством начальных состояний для заданного БПЛА, заданной конечной точки траектории $T_f^*(x_{gf}^*, y_{gf}^*, z_{gf}^*)$, заданной ε -окрестности точки T_f^* и заданного конечного набора n точек $N = \{N_1, N_2, N_3, \dots, N_n\}$ трехмерного пространства $\{x_g, y_g, z_g\}$, $N_k \in \Upsilon$ (где Υ – горизонтальная плоскость, содержащая точку T_f) такое множество $S_0 = \{V_{xg0}, V_{yg0}, V_{zg0}, x_{g0}, y_{g0}, z_{g0}\}$ в пространстве $S = \{V_{xg}, V_{yg}, V_{zg}, x_g, y_g, z_g\}$, $S_0 \subset S$, для любой точки s_0 которого ($s_0 \in S_0$) существует траектория L_s , такая, что

$$N_k \in \tilde{L}_s^\Upsilon, \quad k = 1, \dots, n, \quad (1)$$

$$\left[(x_{gf} - x_{gf}^*)^2 + (y_{gf} - y_{gf}^*)^2 + (z_{gf} - z_{gf}^*)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \leq \varepsilon, \quad (2)$$

где $\tilde{L}_s^\Upsilon$ – проекция траектории L_s на горизонтальную плоскость Υ .

Точки $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$ и плоскость Υ будем называть навигационными. Через s_k , $k=1, \dots, n$, обозначим точки на траектории L_s , $s_k \in L_s$, проекциями которых на плоскость Υ являются точки N_k , $k=1, \dots, n$.

В данном определении навигационные точки $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$ предполагаются динамически достижимыми. Это означает, что существуют управления, с помощью которых в процессе движения БПКЛА проекция его траектории на навигационную плоскость будет пересекать некоторые достаточно малые окрестности этих точек. На практике требование динамической достижимости навигационных точек накладывает ряд весьма существенных ограничений на аэродинамические и динамические характеристики БПКЛА, его конструктивные параметры и параметры его подсистем, а также параметры его траекторных и угловых движений. Тем самым множество S_0 предполагается множеством начальных точек всех динамически допустимых пространственных траекторий БПКЛА, удовлетворяющих условиям (1), (2). Вопрос о динамической достижимости точек $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$ с точки зрения динамики полета, хотя и вне связи с оптимизацией траекторий, рассмотрен в работах [4, 5]. Навигационные точки задаются заранее как элементы маршрута и влияют на форму и размеры областей начальных состояний.

Индексом « f » отмечены переменные, относящиеся к конечной точке траекторий БПКЛА. Точки s_0 и T_f^* – начальная и конечная точки каждой из возможных траекторий (их левый и правый конец). Точка N_0 является проекцией начальной точки s_0 на плоскость Υ . Точка N_{n+1} совпадает с точкой T_f^* , $N_{n+1} = T_f^*$.

Сформулируем следующую задачу.

Для БПКЛА заданной аэродинамической схемы построить вектор управления $u(x_g, y_g, z_g, V_{x_g}, V_{y_g}, V_{z_g}, \vartheta, \psi, \gamma, s_0, t)$ и множество

$$S_0 : \{x_{g0*} \leq x_{g0} \leq x_{g0**}, y_{g0*} \leq y_{g0} \leq y_{g0**}, z_{g0*} \leq z_{g0} \leq z_{g0**}, V_{0*} \leq V_0 \leq V_{0**}, \Theta_{0*} \leq \Theta_0 \leq \Theta_{0**}, \Psi_{0*} \leq \Psi_0 \leq \Psi_{0**}\}$$

всех начальных состояний. Для каждой точки $s_0 \in S_0$ множества существует устойчивая траектория, выходящая из этой точки. Для траектории выполняются условия (1), (2), а также условия

$$-\Theta_* \leq \Theta_f \leq -\Theta_{**}; \quad -\vartheta_* \leq \vartheta_f \leq -\vartheta_{**}; \quad V_f \geq V_*. \quad (3)$$

На данной траектории функционал $\Delta W = \sum_{k=0}^n \Delta W_k$ (где $\Delta W_k = \Delta \Pi_k + \Delta K_k$ – суммарные потери потенциальной и кинетической энергии на каждом отрезке $\Lambda_k = [N_k, N_{k+1}]$, $k=0, \dots, n$, $N_{k+1} = T_f$) достигает минимума на множестве всех возможных траекторий, удовлетворяющих требованиям (1), (3) и имеющих точки s_0 и T_f^* в качестве начальной и конечной точек.

Здесь ϑ, Θ – углы тангажа и наклона траектории БПКЛА.

Приведенная постановка задачи имеет ряд особенностей. Первая состоит в том, что вместо единственной навигационной точки, обычно называемой точкой интереса (ТИ), или точкой цели, в момент начала движения задается также и некоторый конечный набор из n промежуточных навигационных точек (или областей в окрестности таких точек) на земной поверхности, которые БПКЛА должен облететь в процессе движения, прежде чем достигнет ТИ. Тем самым этот набор, по существу, является элементом закона управления и наведения БПКЛА на ТИ. Кроме того, требуется обеспечение достаточно жестких условий (3) на правом конце траектории и обеспечение стабилизации движений при управлении u на всех участках траектории полета. Наконец, еще одним усложнением в сравнении с аналогичными задачами является то, что суммарная длина проекции на горизонтальную плоскость полученной траектории

не может превышать максимальную дальность планирующего полета аппарата, обусловленную суммарной кинетической и потенциальной энергией, сообщенной ему в момент старта.

Отмеченные особенности постановки требуют разработки принципиально новых алгоритмов расчета возможных областей применения БПЛА. Далее приведены результаты решения задачи о построении множества начальных состояний при управляемом спуске БПЛА в атмосфере для случаев неподвижной и подвижной ТИ.

Будем считать, что БПЛА выполнен по нормальной аэродинамической схеме с Х-образным хвостовым оперением. Оперение предполагается цельноповоротным и раскрывающимся, так что движение БПЛА происходит в двух полетных конфигурациях: на начальном участке траектории после отделения от носителя (при сложенном крыле) и на основном участке в режиме планирования (при раскрытом крыле).

Случай неподвижной ТИ

Алгоритм построения множества начальных состояний для рассматриваемой задачи базируется на выборе ТИ в качестве начальной точки расчета (рис. 1)

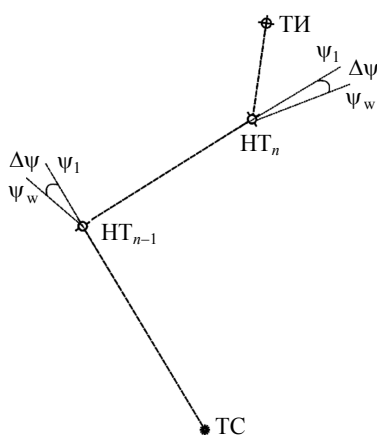


Рис. 1. Проекция заданного маршрута полета БПЛА на горизонтальную плоскость (ТС – точка старта с носителя; HT_n – n-я навигационная точка)

Укрупненный алгоритм построения области S_0 разбивается на следующие основные этапы.

Этап 1. Рассмотрим конечный участок траектории HT_n – ТИ (см. рис. 1). Будем считать, что старт происходит в точке HT_n, а точкой цели является точка ТИ.

Выберем режим сброса, «наихудший» по курсу. Поскольку в боковом канале БПЛА управляется пропорционально соответствующей составляющей угловой скорости линии визирования цели [4, 5], то очевидно, что после завершения переходного процесса по смене курса и завершения маневра (координированного разворота) БПЛА выйдет на прямую траекторию по линии HT_n – ТИ с текущей точкой цели. Движение в этом случае будет происходить с курсовым углом ψ_1 . В идеальном случае этот курс будет соответствовать направлению вектора, начало которого находится в навигационной точке HT_{n-1}, а конец – в точке HT_n. В условиях реальной динамики полета этот курс будет отличаться от ψ_1 . Поскольку разворот БПЛА в сторону точки ТИ будет начинаться в некоторой точке А, лежащей на пересечении траектории движения БПЛА и окружности с заданным радиусом и центром в точке HT_n, то курс будет более выгоден в смысле сохранения полной энергии БПЛА. Введем некоторый запас $\Delta\psi$, добавив его к текущему курсу ψ_1 в противоположную сторону от цели (см. рис. 1), получим новый курс $\psi_w = \psi_1 + \Delta\psi$, который будем считать «наихудшим»

Этап 2. Для выбранного ψ_w найдем минимальный высотнo-скоростной режим, т.е. минимальную высоту и минимальную скорость для этой высоты, достаточные для того, чтобы достичь текущей точки цели из рассматриваемой навигационной точки HT_n при старте с заданным курсом ψ_w . При этих расчетах учитываются ограничения по скорости и углу подхода к конечной точке цели. Подробно этот алгоритм рассмотрен в работе [6].

Высотно-скоростной режим в данной задаче является эквивалентом полной энергии $W_{\Sigma} = W_{\text{кин}} + W_{\text{пот}}$ БПЛА, которая складывается из запасов кинетической и потенциальной энергии:

$$W_{\text{кин}} = \frac{mV^2}{2}, \quad W_{\text{пот}} = mgH,$$

где H , V – текущая высота и скорость полета БПЛА.

По окончании указанных расчетов происходит переход к следующему участку – $\text{НТ}_{n-1} - \text{НТ}_n$.

Этап 3. По алгоритму, описанному на этапе 1, находим ψ_w для точки НТ_{n-1} .

Этап 4. Информация, полученная на этапе 2 алгоритма, дополняет недостающие условия для точки НТ_n , а именно, к двум заранее заданным координатам этой точки в качестве третьей координаты добавляется минимальная высота, рассчитанная на этапе 2. Приняв эту точку за текущую точку цели, можно рассчитать минимально возможный начальный высотно-скоростной режим так, как на этапе 2 алгоритма. Указанная процедура повторяется до тех пор, пока очередная навигационная точка не совпадет с ТС.

Этап 5. В ТС также будем иметь три координаты первой НТ и ограничение по скорости в этой точке. Далее проводится стандартная процедура расчета множества начальных состояний для атаки первой НТ [6], которая заключается в следующем: множество начальных состояний строится в системе координат $O_0X_gY_gZ_g$, начало которой совмещено с центром ТИ, а ось O_0X_g параллельна путевой скорости ТС в начальный момент времени. Алгоритм формирования границ множества начальных состояний включает комплекс моделирования процессов самонаведения для каждого рассматриваемого режима старта, характеризуемого высотой, скоростью и углом наклона траектории в момент старта. В соответствии с методикой формирования границ множества начальных состояний при каждом рассматриваемом режиме старта в горизонтальной плоскости на высоте Y_{g0} из точки начальной номинальной баллистической траектории осуществляется последовательный переход от точки к точке с определенным шагом по «радиусам», наклоненным к оси O_0X_g под углом $\psi_{\text{ОНС}}$. В каждой из этих точек происходит моделирование процесса самонаведения с проверкой соответствия его результатов выбранному критерию по величине промаха. При выполнении критерия осуществляется переход к следующей точке в сторону удаления от начала «радиуса». При невыполнении критерия осуществляется переход с половинным шагом в обратном направлении. После осуществления $n_{\text{ОНС}}$ смен направления движения вдоль «радиуса» в качестве граничной точки принимается самая дальняя от начала «радиуса» точка, в которой выполнялись условия критерия. Затем аналогичное перемещение проводится вдоль следующего «радиуса».

Исходя из расчетов, рекомендуется использовать следующие радиусы: $\psi_{\text{ОНС}} = 0; 15; 30; 45; 60; 90^\circ$.

Таким образом, построен алгоритм расчета множества начальных состояний БПЛА для заданного энергетического режима при заранее определенной навигационными точками траектории. При увеличении количества навигационных точек и усложнении конфигурации их расположения множество начальных состояний БПЛА сужается. Максимальная по площади область применения БПЛА будет получена в случае, когда количество навигационных точек равно нулю.

Как показывает практика, подобные объекты применяются в основном с наиболее отдаленных от ТИ границ множества начальных состояний, поэтому здесь и далее этап 5 предлагается упростить, оставив расчет только наиболее удаленных точек множества. Таким образом, используются следующие радиусы: $\psi_{\text{ОНС}} = 0; 90^\circ$. Это допущение позволяет существенно сократить время и объем вычислений, необходимые для расчета множества.

Случай подвижной ТИ

Алгоритм построения области S_0 начальных состояний в данном случае разбивается на следующие основные этапы.

Этап 1. Построение замкнутого множества M точек, в которых может оказаться ТИ при всех $t > t_0$ (область достижимости цели).

В общем случае это множество может иметь произвольный вид, причем, кроме требований односвязности и непрерывности, никаких других требований к нему не предъявляется. Множество должно быть задано заранее, до момента $t = t_0$ начала движения БПКЛА. В простых случаях, например, если известно, что скорость ТИ постоянна, а сама ТИ остается во все время движения в некоторой плоскости (в частности, горизонтальной), область достижимости легко построить. Она будет представлять собой круг с центром в точке нахождения цели в момент $t = t_0$.

Этап 2. Построение такого подмножества L граничных точек Γ области M , по достижении которого БПКЛА гарантирует, что достигнет и всех остальных (внутренних и граничных) точек области M .

Построение подмножества L в реальных задачах может быть значительно осложнено «неудачным» заданием набора навигационных точек, например последней из них. В том числе эта точка может быть расположена так, что некоторое подмножество L^* точек L окажется вообще недостижимым для БПКЛА рассматриваемой конкретной схемы (рис. 2). Для множеств A и B здесь и далее стрелками показаны направления старта БПКЛА.

В связи с этим возникает необходимость проведения третьего этапа алгоритма.

Этап 3. Выбор среди последовательности точек $N_n, N_{n-1}, N_{n-2}, \dots$ ближайшей к границе Γ , причем такой, для которой область L существует, и ее построение возможно осуществить алгоритмически.

Для реализации этого этапа алгоритма должны быть последовательно рассмотрены предыдущие навигационные точки (($n-1$)-я, ($n-2$)-я, ($n-3$)-я и т.д.), пока не будет найдена точка с требуемыми свойствами (рис. 3).

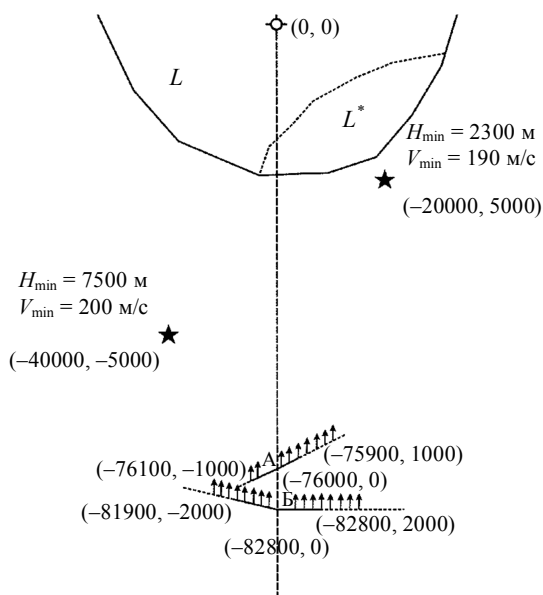


Рис. 2. Пример области недостижимости

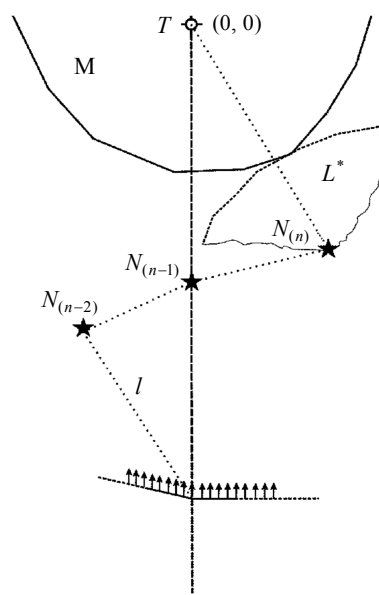


Рис. 3. Схема расположения навигационных точек при исключении областей недостижимости

На рис. 3 $N_n, N_{n-1}, N_{n-2} \dots$ — последовательные навигационные точки; точка T — положение цели в момент $t = t_0$; M — множество точек, в которых может находиться точка цели в конечный момент времени; L^* — множество точек, представляющих собой некоторую область недостижимости для БПКЛА при полете из крайней навигационной точки; кривая l — проекции траектории БПКЛА на горизонтальную плоскость.

Заметим, что третий этап алгоритма, по существу, сводит задачу покрытия всей области M достижимости цели к значительно более простой задаче покрытия ее подмножества $L \subset \Gamma$. Нетрудно проследить некоторую аналогию между этим этапом предлагаемого алгоритма и алгоритмом формирования множества начальных состояний БПКЛА в задаче о достижимости заданного набора навигационных точек.

Этап 4. Выбор представительного набора точек $T_1, T_2, T_3, \dots$ дуги L , $L \subset \Gamma$, проведение для каждой из них расчета множества $S_1, S_2, S_3, \dots$ начальных состояний БПКЛА.

Под представительностью понимается свойство набора точек $T_1, T_2, T_3, \dots$ с достаточной для практики полнотой отражать геометрические свойства границы (форму дуги, ее длину, кривизну в различных частях и т.д.), что необходимо в связи с дискретностью проводимых расчетов. То же относится и к расстояниям между точками $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots$, которые могут выбираться как постоянные числа и интерпретироваться как шаг вычислений.

Алгоритм построения каждого из множества начальных состояний $S_1, S_2, S_3, \dots$ в функции координат точек $T_1, T_2, T_3, \dots$ дуги L для рассматриваемой задачи базируется на выборе в качестве начальной точки расчета последовательно каждой из точек набора $T_1, T_2, T_3, \dots$.

Следующие этапы алгоритма аналогичны приведенным для случая неподвижной ТИ. Отличие состоит в том, что в рассматриваемом случае считается, что старт происходит последовательно в точках $N_n, N_{n-1}, N_{n-2}, \dots$, при этом ТИ являются последовательно точки T_1, T_2, T_3 . Эти точки выбираются как критические, т.е. достигнуть этих точек для БПКЛА максимально сложно. Отсюда следует, что попаданием в точки T_1, T_2, T_3 (принадлежащие области возможных состояний ТИ) обеспечивается попадание в любую другую точку этой области. Объем вычислений в построенном алгоритме существенно больше, чем в алгоритме, построенном для случая неподвижной ТИ.

Методика формирования границ множества начальных состояний включает комплекс моделирования процессов самонаведения для каждого рассматриваемого режима старта, характеризуемого высотой, скоростью и углом наклона траектории в момент старта. Применение данной методики к каждой точке T_1, T_2, T_3 описано в работе [6]. Таким образом, можно получить область начальных состояний для достижения наиболее удаленных границ области М (рис. 4).

Заключительным этапом формирования алгоритма, решающего рассматриваемую задачу, является построение множества $S = \bigcap S_k$, представляющего собой пересечение множеств S_k , построенных для каждой точки дуги и для заданного набора навигационных точек.

В заключение в качестве иллюстрации приведем результаты расчета множества начальных состояний для двух частных модельных случаев, когда скорость движения цели мала, так что область достижимости подвижной цели представляет собой круг малого радиуса. На рис. 5 представлены два множества начальных состояний для случаев облета разного набора навигационных точек.

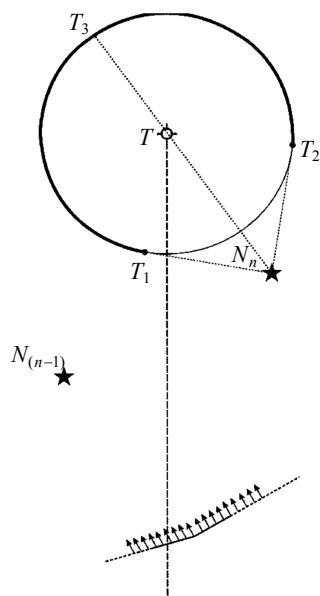


Рис. 4. Методика выбора критических точек и расчета области начальных состояний БПКЛА

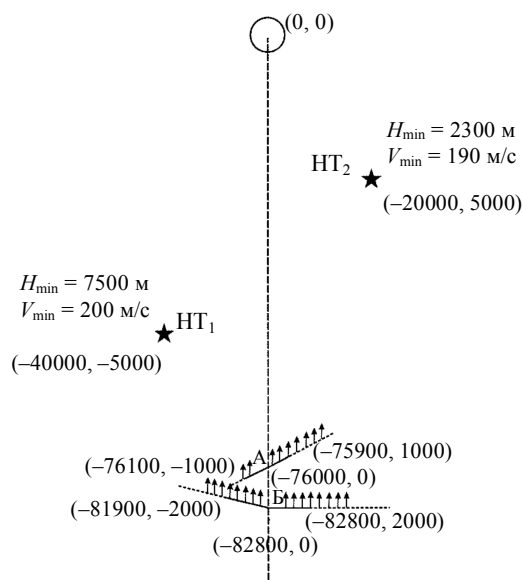


Рис. 5. Частный случай построения множества начальных состояний в задаче с подвижной ТИ

Так, множество А представляет собой множество начальных состояний для полета по траектории, проходящей через две навигационные точки НТ₁ и НТ₂ (см. рис. 5), в то время как множество Б представ-

ляет собой множество начальных состояний для полета по траектории, проходящей через одну навигационную точку HT_2 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грумондз В.Т., Яковлев Г.А. Алгоритмы аэрогидробаллистического проектирования. М.: МАИ, 1994. 304 с.
2. Грумондз В.Т., Половинкин В.В., Яковлев Г.А. Теория движения двусредных аппаратов. Математические модели и методы исследования. М.: Вузовская книга, 2012. 644 с.
3. Соловей Э.Я., Храпов А.В. Динамика систем наведения управляемых авиабомб. М.: Машиностроение, 2006. 328 с.
4. Грумондз В.Т. и др. Синтез системы управления малого беспилотного планирующего летательного аппарата с крылом большого удлинения // Изв. вузов. Авиационная техника. 2012. № 3. С. 22–27.
5. Грумондз В.Т., Полищук М.А., Черторыжская С.С. Выбор параметров аэродинамического и динамического облика беспилотного планирующего летательного аппарата // Вестник МАИ. 2012. Т. 19. № 4. С. 5–12.
6. Грумондз В.Т., Полищук М.А. Алгоритм формирования множества начальных состояний беспилотного планирующего летательного аппарата в задаче о достижимости заданного набора навигационных точек // Вестник МАИ. 2013. Т. 20. № 3. С. 154–159.

Поступила в редакцию 25.07.17

Algorithms of Constructing the Regions of Initial States for Unmanned Winged Gliders

V.T. GRUMONDZ, E.I. KARPEZHNIKOV, M.A. POLISHCHUK, AND M.V. POLISHCHUK

The algorithms of controlled descent for unmanned winged gliders are designed taking into account the requirements to the flight trajectory. The calculation results are represented to show the efficiency of the algorithms.

Unmanned winged gliders, ballistics, control, regions of initial states, gliding, mobile target