

Решение задачи группового преследования цели в условиях возмущений (пространственный случай)¹

Аннотация. Обобщены результаты решения задач коллективного преследования цели, охватывающие стратегический и тактический уровни поведения участников сцены. Предложенный подход основан на сочетании методов интеллектуального и геометрического управления динамическими объектами, в качестве которых выступают беспилотные летательные аппараты. В процессе решения поставленных задач летательные аппараты применяют стратегии поведения в возмущенной среде, реализуемые предложенными правилами выбора углов ориентации и скоростей полета. Приведена структурная схема моделирования процесса преследования, учитывающая математические модели летательных аппаратов и ветровой нагрузки. Выполнены экспериментальные исследования по решению задач в условиях возмущенной среды.

Ключевые слова: Беспилотный летательный аппарат, интеллектуальное управление, правила управления, групповое взаимодействие, преследование цели, дифференциальные игры, моделирование.

Введение

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (ЛА) и их группировки широко используются для решения сложных задач в различных прикладных областях, например, для поиска и преследования целевых динамических объектов, облета и мониторинга больших территорий за ограниченное время [1, 2]. Применение групп аппаратов требует выработки алгоритмов совместных действий на стратегическом уровне управления при относительной независимости принятия решений каждым аппаратом на тактическом уровне. Задача взаимодействия на этих уровнях поведения коалиций была рассмотрена в работе [3]. Изучение стратегий поведения летательных аппаратов при решении сложных целевых задач в условиях непредсказуемых естественных помех представляет повышенный интерес [4].

Одним из инструментов искусственного интеллекта, который активно применяется в системах управления роботизированных устройств,

включая автономные ЛА, являются продукционные правила (продукции), реализующие принцип ситуационного управления. Достоинствами продукционных систем являются: модульность – отдельные правила могут быть добавлены в базу знаний, изменены или удалены независимо от других; естественность – правила задают управления, имитирующие действия человека-оператора. Продукции просты в реализации, но позволяют создавать сложные и адаптивные стратегии поведения.

Актуальной является задача разработки и внедрения продукционных систем на борту автономных ЛА в виду ограниченности возможностей их вычислительных комплексов. В работе [5] рассматривается реализация сложного адаптивного поведения самолета, выполняющего полетное задание на заданной территории. Автором [6] предложена система управления ЛА, основанная на применении нечетких правил, реализуемых на нейронных сетях. Модель интеллектуального управления стыковкой космического аппарата, основанная на правилах замыкания, переходов, выбора цели, управления, рассмотрена в

¹Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 16-11-00048).

работе [7]. Аналогичные исследования в этом направлении выполнены для управления движением наземных мобильных роботов [8, 9].

В настоящей работе предлагаются правила для решения задачи преследования цели группой ЛА в возмущенной среде. В том случае, когда скорость движения цели выше скоростей преследователей, только взаимодействие группы преследователей позволяет в некоторых случаях, зависящих от первоначального расположения участников, окружить и «захватить» цель.

Ранее задачи преследования цели решались автором для случая одного преследователя и одного убегающего [10, 11], а также для коалиций ЛА на плоскости [12, 13]. Настоящая работа является расширением и обобщением этих исследований для трехмерного случая с несколькими преследователями и одним убегающим. Предлагаются стратегии действий участников игры преследования-убегания, моделируется их коллективное поведение. Задача решается методами, сочетающими геометрические расчеты, принцип максимума Л.С. Понтрягина, интеллектуальное управление для имитаций действий пилотов и компьютерное моделирование процессов управления современными программными средствами.

1. Постановка задачи

Дадим постановку двух задач преследования, следуя работе [13], но с расширением на трехмерный случай.

Пусть объект (ЛА) c , интерпретируемый далее как «цель», преследуется группой ЛА $P = \{p_1, \dots, p_n\}$, причем $n \geq 2$. Индексами p и c будем помечать переменные преследователей и цели, соответственно. Введем неподвижную базовую (земную) систему координат (БСК) $X_G Y_G Z_G$. В БСК будем отслеживать текущие положения центров масс ЛА в процессе преследования. Ориентация ЛА задается тремя углами (углы тангажа θ , рыскания ψ и крена γ) в системе координат, связанной с летательным аппаратом, начало которой совпадает с центром масс, а оси параллельны осям X_G , Y_G и Z_G БСК. В целях упрощения угол крена в решении задачи не участвует.

Преследователю p_i в момент времени t известны переменные, описывающие состояние цели:

$$Q_c(t) = (x_c(t), y_c(t), z_c(t), v_c(t), \theta_c(t), \psi_c(t)),$$

где $x_c(t), y_c(t), z_c(t)$ – координаты цели; v_c – скорость цели; $\theta_c(t), \psi_c(t)$ – углы тангажа и рыскания, задающие ориентацию.

Аналогично, цель имеет полную информацию о преследователях:

$$Q_{p_i}(t) = (x_{p_i}(t), y_{p_i}(t), z_{p_i}(t), v_{p_i}(t), \theta_{p_i}(t), \psi_{p_i}(t)).$$

В результате ветровой нагрузки, возможно существенное отклонение ЛА от своих маршрутов следования. Преследователи и цель руководствуются собственными стратегиями и допустимыми правилами управления.

Рассмотрим две базовые задачи преследования цели, имеющие важное прикладное значение.

Задача 1 («Захват» цели). Пусть $\forall i, v_{p_i} = v_p < v_c$, $X_i(t) = (x_{p_i}(t), y_{p_i}(t), z_{p_i}(t))$ и $Y(t) = (x_c(t), y_c(t), z_c(t))$ – координаты преследователей p_i и цели c , а $d(X_i(t), Y(t))$ – расстояние между ними в момент времени t . Задача преследования («Захвата» цели) заключается в построении такого управления $U_i(t) = (\theta_{p_i}(t), \psi_{p_i}(t))$ для каждого ЛА в группе на временном отрезке $[0, T]$ при наличии возмущений, что $\exists i: d(X_i(T), Y(T)) < \varepsilon_{\min}$ и $T \rightarrow \min$.

Величина $\varepsilon_{\min}$ – минимальное целевое расстояние между преследователем и убегающим объектом. Игра преследования считается оконченной в момент времени T , когда произошла встреча (сближение координат) хотя бы одного преследователя p_i с целью, что считается «захватом» убегающего. Положительное для преследователей решение задачи существует только в некоторых случаях, когда группе удастся окружить цель.

Задача 2 (Следование за целью). Пусть $\forall i, v_{p_i} \geq v_c$. Необходимо осуществить сближение группы ЛА, имеющей некоторое случайное расположение, с целью и полет рядом с ней в течение заданного времени наблюдения T . В дальнейшем ограничимся наличием у преследователей двух скоростей $v_{p_i} = (v_p^{(1)}, v_p^{(2)})$, причем $v_p^{(1)} > v_c$, $v_p^{(2)} = v_c$.

Задача заключается в построении такого управления $U_{p_i}(t) = (v_{p_i}(t), \theta_{p_i}(t), \psi_{p_i}(t))$ для

каждого P_i на временном отрезке $[0, T]$, что

$$\int_{t=0}^T d(X_i(t), Y(t)) dt \rightarrow \min \quad \text{при ограничении:}$$

$\forall i, d(X_i(t), Y) \geq \varepsilon$, где ε – допустимое значение сближения преследователей с целью.

Для решения Задач 1-2 предлагаются метод прогнозирования точки встречи преследователя и убегающего и стратегии, имитирующие действия пилота в условиях ветровых возмущений.

2. Вычисление места встречи преследователя с целью

Рассмотрим движение двух летательных аппаратов (преследователя p и убегающего c) на соответствующих локальных участках между двумя точками смены направления убегающего в идеальных условиях без трения и возмущений. Поставим задачу построения оптимального управления $U_p(t) = (\theta_p(t), \psi_p(t))$ для перехода системы $x_c(t), y_c(t), z_c(t), x_p(t), y_p(t), z_p(t), \theta_p(t), \psi_p(t)$ из начального состояния в конечное за минимальное время T . При этом $x_c(T) = x_p(T), y_c(T) = y_p(T), z_c(T) = z_p(T)$. В данной задаче параметрами являются: $v_p, v_c, \theta_c, \psi_c$. Обозначим $u_1(t) = \theta_p(t), u_2(t) = \psi_p(t)$.

Дадим математическое описание движения центров масс ЛА в невозмущенной среде:

$$\begin{aligned} \dot{x}_p &= v_p \cos u_1 \cos u_2; & \dot{x}_c &= v_c \cos \theta_c \cos \psi_c; & x_c &= x_{c0} + v_c \cos \theta_c \cos \psi_c \cdot t; \\ \dot{y}_p &= v_p \sin u_1; & \dot{y}_c &= v_c \sin \theta_c; & y_c &= y_{c0} + v_c \sin \theta_c \cdot t; \\ \dot{z}_p &= v_p \cos u_1 \sin u_2; & \dot{z}_c &= v_c \cos \theta_c \sin \psi_c; & z_c &= z_{c0} + v_c \cos \theta_c \sin \psi_c \cdot t, \end{aligned}$$

где $x_c(0) = x_{c0}, y_c(0) = y_{c0}, z_c(0) = z_{c0}, x_p(0) = x_{p0}, y_p(0) = y_{p0}, z_p(0) = z_{p0}$.

Введем переменные: $x = x_p - x_c, y = y_p - y_c, z = z_p - z_c$.

Таким образом, получим:

$$\begin{aligned} f_1 &= \dot{x}(t) = \dot{x}_p(t) - \dot{x}_c(t); & f_2 &= \dot{y}(t) = \dot{y}_p(t) - \dot{y}_c(t); & f_3 &= \dot{z}(t) = \dot{z}_p(t) - \dot{z}_c(t); \\ x(0) &= x_0 = x_{p0} - x_{c0}; & y(0) &= y_0 = y_{p0} - y_{c0}; & z(0) &= z_0 = z_{p0} - z_{c0}; \\ x(T) &= 0; & y(T) &= 0; & z(T) &= 0; & J = T \rightarrow \min. \end{aligned}$$

Будем решать задачу, применив принцип максимума Л.С. Понтрягина. Составим Гамильтониан: $H = \psi_1 f_1 + \psi_2 f_2 + \psi_3 f_3$, где ψ_1, ψ_2, ψ_3 – функции времени

$$\psi'_1 = \frac{\partial \psi_1}{\partial t} = -\frac{\partial H}{\partial x} = 0; \quad \psi_1 = c_1; \quad \psi'_2 = \frac{\partial \psi_2}{\partial t} = -\frac{\partial H}{\partial y} = 0;$$

$$\psi_2 = c_2; \quad \psi'_3 = \frac{\partial \psi_3}{\partial t} = -\frac{\partial H}{\partial z} = 0; \quad \psi_3 = c_3.$$

Дифференцируя H по u_1, u_2 , получим оптимальные значения: $u_1 = \theta_p = \text{const}, u_2 = \psi_p = \text{const}$. Модель движения преследователя принимает вид:

$$x_p(t) = x_{p0} + v_p \cos u_1 \cos u_2 \cdot t;$$

$$y_p(t) = y_{p0} + v_p \sin u_1 \cdot t;$$

$$z_p(t) = z_{p0} + v_p \cos u_1 \sin u_2 \cdot t.$$

С учетом $x_c(T) = x_p(T), y_c(T) = y_p(T), z_c(T) = z_p(T)$ можно найти точку встречи преследователя и убегающего и соответствующие углы θ_p и ψ_p для преследователя.

В работе [14] показано, что решение задачи определения точки встречи ЛА и цели на плоскости может быть получено на основе построения окружности Аполлония. Рассмотрим пространственный случай.

Задача состоит в определении углов тангажа и рыскания преследователя для встречи с целью, наблюдаемой средствами технического зрения. Пусть известны: начальные координаты $(x_{c0}, y_{c0}, z_{c0}), (x_{p0}, y_{p0}, z_{p0})$ и скорости

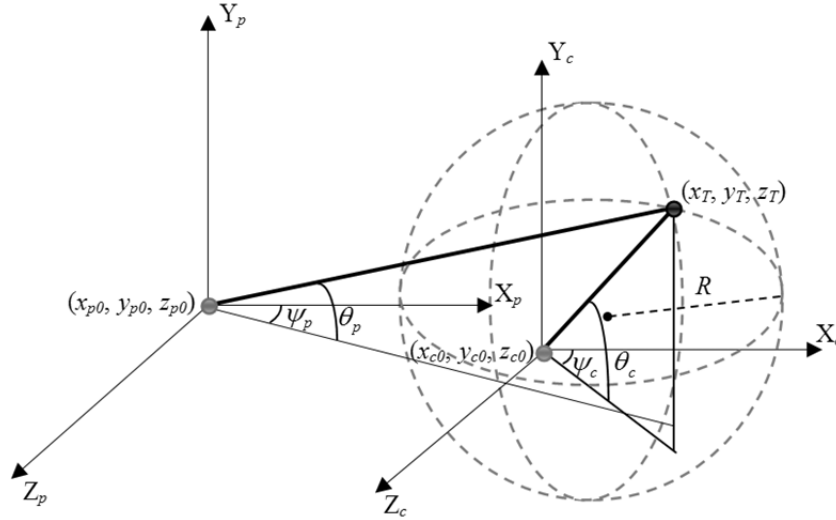


Рис. 1. Пояснения к задаче преследования-убегания в пространстве

движения v_c , v_p цели и преследователя соответственно, причем, $v_p > v_c$. Полагаем также заданным направление перемещения цели (углы тангажа θ_c и рыскания ψ_c). Требуется найти прогнозируемую точку встречи (x_T, y_T, z_T) и направление перемещения (углы тангажа θ_p и рыскания ψ_p) преследователя. Решение задачи поясняется Рис. 1. Время T , требуемое для встречи, одинаково для ЛА и цели:

$$\frac{\sqrt{(x_T - x_{p0})^2 + (y_T - y_{p0})^2 + (z_T - z_{p0})^2}}{v_p} = \frac{\sqrt{(x_T - x_{c0})^2 + (y_T - y_{c0})^2 + (z_T - z_{c0})^2}}{v_c}.$$

Уравнение сферы (назовем ее сферой Аполлония), являющейся местом встречи преследователя и цели, имеет вид:

$$(x_T - d_x)^2 + (y_T - d_y)^2 + (z_T - d_z)^2 = R^2,$$

$$d_x = \frac{v_c^2 \cdot x_{p0} - v_p^2 \cdot x_{c0}}{v_c^2 - v_p^2}; \quad d_y = \frac{v_c^2 \cdot y_{p0} - v_p^2 \cdot y_{c0}}{v_c^2 - v_p^2};$$

$$d_z = \frac{v_c^2 \cdot z_{p0} - v_p^2 \cdot z_{c0}}{v_c^2 - v_p^2};$$

$$R = \frac{v_p \cdot v_c \cdot \sqrt{(x_{p0} - x_{c0})^2 + (y_{p0} - y_{c0})^2 + (z_{p0} - z_{c0})^2}}{v_p^2 - v_c^2}.$$

Из построений на Рис. 1 следует:

$$z_T = z_{c0} + (x_T - x_{c0}) \cdot \operatorname{tg} \psi_c;$$

$$y_T = y_{c0} + (x_T - x_{c0}) \cdot \frac{\operatorname{tg} \theta_c}{\cos \psi_c}.$$

Подставляя эти выражения в уравнение сферы, получим квадратное уравнение, решение, которого дает пару значений координаты $x_T = (x_{T1}, x_{T2})$. Ей соответствует пара значений $y_T = (y_{T1}, y_{T2})$, $z_T = (z_{T1}, z_{T2})$. С учетом соотношений

$$\operatorname{tg} \psi_p = \frac{(z_T - z_{p0})}{(x_T - x_{p0})}; \quad \operatorname{tg} \theta_p = \sin \theta_p \cdot \frac{(y_T - y_{p0})}{(z_T - z_{p0})}$$

можно вычислить искомые углы θ_p и ψ_p . Таким образом, уточняя направление перемещения цели (к наблюдателю или от него) можно найти стратегию поведения преследователя.

В случае, когда цель меняет направление движения, применяется стратегия «параллельного сближения» [14], основанная на перепланировании движения преследователя путем вычисления новых углов ориентации. Предложенный метод вычисления точки встречи и стратегия параллельного сближения можно применить для решения задачи преследования цели и следования по заданному маршруту для группы ЛА в неспокойной воздушной среде.

3. Решение задачи «захвата» цели

Пусть $\forall i, v_{pi} = v_p < v_c$. В общем случае p_i и c - интеллектуальные противники с противо-

положительными интересами. Для оценки ситуации и расчета разумного направления движения игроков предлагается использовать геометрический подход, связанный с построением сфер Аполлония.

Положительное решение задачи для преследователей однозначно существует, когда группе ЛА удастся окружить цель, при этом образуется замкнутая область, ограниченная пересекающимися сферами Аполлония, препятствующими движению цели. Таким образом:

1. Если убегающий расположен внутри замкнутой области, то он не спасается.

2. Если область, ограниченная пересекающимися сферами Аполлония – незамкнутая, необходимо осуществить проверку существования луча, исходящего из точки расположения цели и не пересекающегося ни с одной из сфер Аполлония. При положительном исходе цель спасается. Обозначим такой вектор $\vec{F}_{esc}$.

3. В более сложной ситуации необходимы дополнительные проверки, связанные с продолжением игры до положительного решения одной из противодействующих сторон.

Если некоторые сферы в момент времени $t = t_k$ пересекаются, то под воздействием ветровой нагрузки в последующий момент $t = t_{k+1}$ они могут оказаться непересекающимися и, наоборот, непересекающиеся сферы могут пересечься. Таким образом, замкнутость границы, препятствующей движению цели, может быть нарушена, и однозначный исход в условиях возмущений предсказать заранее невозможно.

Ответ на вопрос об исходе получим в каждом конкретном случае путем моделирования процесса преследования-убегания, для чего необходимо учесть реальные характеристики модели ЛА и возмущающие воздействия.

Рассмотрим стратегии поведения участников игры преследования-убегания для общего случая (случайное начальное расположения игроков).

Пусть d_i – расстояние между преследователем p_i и целью c . Определим сумму векторов $\vec{F}_{res} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i$, исходящих из точки расположения цели c и совпадающих с направлениями от p_i к c , как показано на Рис. 2, где $|\vec{F}_i| = \frac{1}{d_i}$ (чем

дальше ЛА, тем меньше он влияет на стратегию движения цели), r_i – радиусы сфер Аполлония для соответствующих преследователей p_i .

Определим следующие стратегии поведения объектов задачи, описываемые правилами. Стратегия убегающего игрока: если существует вектор $\vec{F}_{esc}$, то двигаться по его направлению, определяемому вектором $\vec{F}_{res}$. Стратегия преследователей (действует одновременно для всех p_i):

1. Если прогнозируемая траектория движения цели (прогноз делается при условии, что c не изменит своего направления, т.е. $\theta_c(t_{i+1}) = \theta_c(t_i)$, $\psi_c(t_{i+1}) = \psi_c(t_i)$) пересекается с соответствующей сферой Аполлония, то преследователь p_i должен двигаться в точку встречи.

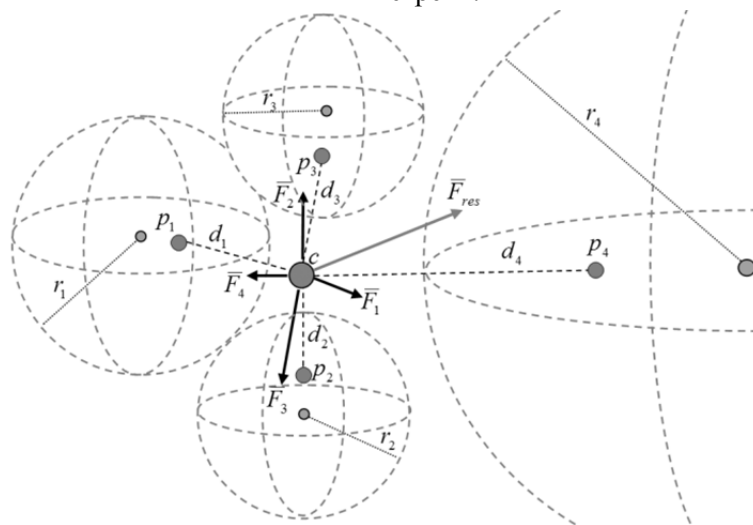


Рис. 2. Преследование цели группой ЛА

2. Если пересечение со сферой Аполлония для p_i отсутствует, то строится прогноз движения цели на k шагов вперед, и p_i двигается с некоторым опережением в прогнозируемую точку $(x_c(t_{i+k}), y_c(t_{i+k}), z_c(t_{i+k}))$.

4. Описание системы продукционных правил для управления ЛА

В работе [10] представлена схема интеллектуальной системы управления автономным ЛА, в которой учтена модель ветровых возмущений и отмечена существенная роль выбора правил управления.

Приведем набор правил для преследователя p_i для Задачи 2. Пусть запись вида $(A, B, C...)$ обозначает «известно значение A » и «известно значение B » и «известно значение C ».... Выражение вида $x := a$ означает «в текущем состоянии базы данных присвоить переменной x значение a ».

Пусть $F_1(d_i, Q_{pi}(t), Q_c(t))$ – функция, вычисляющая углы сближения $\theta_{pi}^{(1)}(t)$, $\psi_{pi}^{(1)}(t)$ для встречи с целью на соответствующей сфере Аполлония, при этом $v_{pi} > v_c$; $F_2(Q_{pi}(t), Q_c(t), v_{wi}(t))$ – функция, вычисляющая угол следования за целью $\theta_{pi}^{(2)}(t)$, $\psi_{pi}^{(2)}(t)$ с учетом ветровой нагрузки [11], при этом $v_{pi} = v_c$. Здесь d_i – расстояние между p_i и целью, $v_{wi} = (v_{wi}^{(x)}, v_{wi}^{(y)}, v_{wi}^{(z)})$ – ветровая нагрузка. Положим Δt – продолжительность такта (шага) перемещения объекта; ε – минимальное расстояние, означающее, что произошло сближение с целью.

Правила замыкания осуществляют вычисление и подготовку необходимых для последующих расчетов данных, доопределяющих текущее состояние объекта управления:

ЕСЛИ $(Q_{pi}(t), Q_c(t))$ ТО

$$d_i(t) := \sqrt{(x_{pi}(t) - x_c(t))^2 + (y_{pi}(t) - y_c(t))^2 + (z_{pi}(t) - z_c(t))^2};$$

ЕСЛИ $(d_i(t), Q_{pi}(t), Q_c(t))$ ТО

$$\theta_{pi}^{(1)}(t) := F_1^{(\theta)}(t), \psi_{pi}^{(1)}(t) := F_1^{(\psi)}(t);$$

ЕСЛИ $(Q_{pi}(t), Q_c(t), v_{wi}(t))$ ТО

$$\theta_{pi}^{(2)}(t) := F_2^{(\theta)}(t), \psi_{pi}^{(2)}(t) := F_2^{(\psi)}(t).$$

Правила переходов определяют переход системы в новое состояние в результате импульса управления с шагом Δt :

ЕСЛИ $(Q_{pi}(t), Q_c(t), v_{wi}(t))$ ТО

$$x_{pi}(t + \Delta t) :=$$

$$= x_{pi}(t) + v_{pi}(t) \cos(\theta_{pi}(t)) \cos(\psi_{pi}(t)) + v_{wi}^{(x)}(t),$$

$$y_{pi}(t + \Delta t) :=$$

$$= y_{pi}(t) + v_{pi}(t) \cos(\theta_{pi}(t)) \sin(\psi_{pi}(t)) + v_{wi}^{(y)}(t),$$

$$z_{pi}(t + \Delta t) := z_{pi}(t) + v_{pi}(t) \sin(\theta_{pi}(t)) + v_{wi}^{(z)}(t).$$

Правила выбора цели осуществляют выбор цели в зависимости от текущих параметров системы:

ЕСЛИ $(d_i(t) > \varepsilon)$ ТО задача «сближение» :=

«активна», «следование» := «неактивна»;

ЕСЛИ $(d_i(t) \leq \varepsilon)$ ТО задача «сближение» :=

«неактивна», «следование» := «активна».

Правила управления осуществляют выбор из множества допустимых управлений в соответствии с выполнением текущей цели:

ЕСЛИ (задача «сближение» = «активна») ТО

$$v_{pi}(t) := v_p^{(1)}(t), \theta_{pi}(t) := \theta_{pi}^{(1)}(t), \psi_{pi}(t) := \psi_{pi}^{(1)}(t);$$

ЕСЛИ (задача «следование» = «активна»)

$$\text{ТО } v_{pi}(t) := v_p^{(2)}(t), \theta_{pi}(t) := \theta_{pi}^{(2)}(t), \psi_{pi}(t) := \psi_{pi}^{(2)}(t).$$

5. Модель ЛА как объекта управления

Для проведения экспериментальных исследований и проверки предложенных стратегий необходимо выбрать математическую модель ЛА. Воспользуемся системами стабилизации углов тангажа и рыскания, общая схема которых представлена на Рис. 3 [10], где:

θ_G, θ_C – заданное и текущее значения угла тангажа ЛА;

ψ_G, ψ_C – заданное и текущее значения угла рыскания ЛА;

$W_{HA}(s), W_{DA}(s)$ – передаточные функции рулевого привода канала высоты и направления;

$W_{\omega_{gz}/\Delta\delta_H}$ – передаточная функция от руля высоты к угловой скорости тангажа;

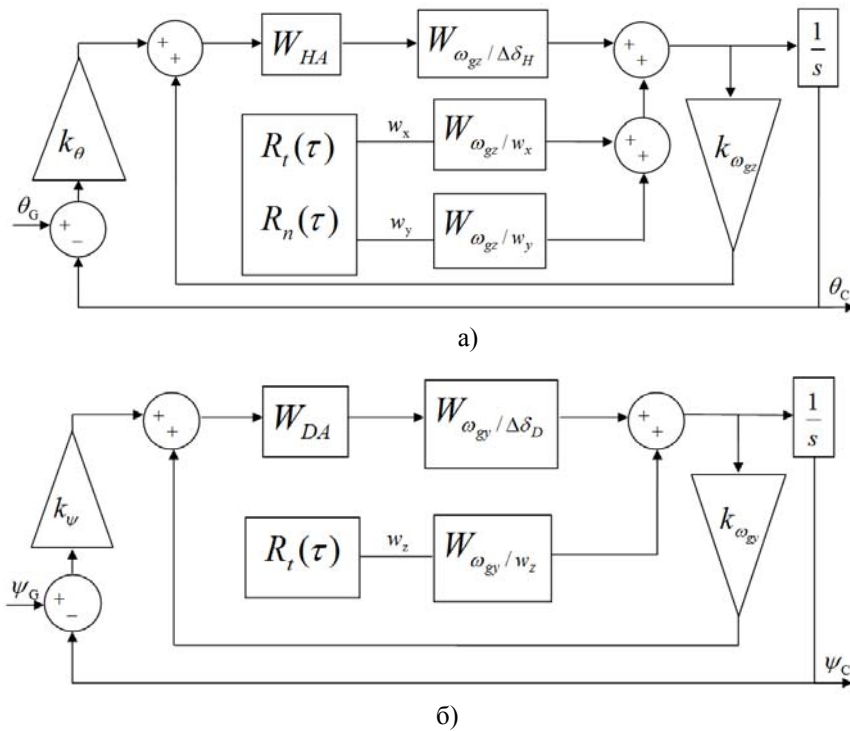


Рис. 3. Структурная схема стабилизации углов ориентации

а – стабилизация угла тангажа; б – стабилизация угла рыскания

W_{ω_{gz}/δ_D} – передаточная функция от руля направления к угловой скорости рыскания;

w_x, w_z – составляющие ветра, генерируются с помощью функции $R_t(\tau)$ [10];

w_y – составляющая ветра, генерируется с помощью функции $R_n(\tau)$ [10];

$W_{\omega_{gz}/w_x}, W_{\omega_{gz}/w_y}, W_{\omega_{gv}/w_z}$ – передаточные функции от ветра к угловым скоростям;

k_θ – передаточное число (коэффициент передачи) автопилота по углу тангажа;

k_ψ – передаточное число автопилота по углу рыскания;

$k_{\omega_{gz}}$ – передаточное число автопилота по угловой скорости тангажа;

$k_{\omega_{gv}}$ – передаточное число автопилота по угловой скорости рыскания.

Введем обозначения:

a, b с различными индексами – параметры модели боковой динамики, зависящие от типа ЛА и режима полета;

c, d, f, T, ζ с различными индексами – параметры модели продольной динамики, зависящие от типа ЛА и режима полета.

Передаточные функции для бокового движения ЛА:

$$W_{\omega_{gv}/\Delta\delta_D}(s) = \frac{b_{\omega_{gv}}^{(0)}s^3 + b_{\omega_{gv}}^{(1)}s^2 + b_{\omega_{gv}}^{(2)}s + b_{\omega_{gv}}^{(3)}}{\Delta_B},$$

$$W_{\omega_{gv}/w_z}(s) = \frac{b_{\omega_{gv}/w_z}^{(0)}s^3 + b_{\omega_{gv}/w_z}^{(1)}s^2}{\Delta_B},$$

$$\Delta_B = s^4 + a_{B_1}s^3 + a_{B_2}s^2 + a_{B_3}s + a_{B_4}.$$

Передаточные функции для продольного движения ЛА:

$$W_{\omega_{gz}/\Delta\delta_D}(s) = \frac{f_c(T_1 + 1)}{T^2s^2 + 2T\zeta s + 1},$$

$$W_{\omega_{gz}/w_x}(s) = \frac{(c_{\dot{x}} - c_{\dot{y}}d_{\dot{x}})s + c_{\dot{x}}d_{\dot{y}} - c_{\dot{y}}d_{\dot{x}}}{T^2s^2 + 2T\zeta s + 1}$$

$$W_{\omega_{gz}/w_y}(s) = \frac{(c_{\dot{y}}b_{\dot{y}} - c_{\dot{y}})s}{T^2s^2 + 2T\zeta s + 1}.$$

Описанные передаточные функции легко встраиваются в структуру модели системы управления ЛА.

6. Моделирование полета группы ЛА с учетом ветровой нагрузки

Общая схема моделирования процесса преследования цели для нескольких преследователей и одного убегающего в системе MATLAB Simulink с учетом ветровых нагрузок приведена на Рис 4. Схема включает: математические модели траекторного движения участников, учитывающие ветровую нагрузку и блоки, вычисляющие направления их движения. Модель траекторного движения преследователя в пространстве приведена на Рис. 5.

Назначение основных блоков модели преследователя для плоского случая описано автором в работе [13]. В настоящей работе на Рис. 5 сделаны некоторые поправки модели с учетом трехмерного пространства.

Проведем экспериментальные исследования задачи преследования-убегания с использованием выбранной модели ЛА в условиях возмущенной воздушной среды. Моделирование осуществляется с помощью системы MATLAB Simulink и программного обеспечения, разработанного на С#.

На Рис. 6 представлены результаты одного эксперимента по моделированию Задачи 1 («захват» цели). Показаны расположения участников сцены (цель – черный маркер, преследователи – серые маркеры) и вычисленные сферы Аполлония на начальном (Рис. 6, а) и конечном (Рис. 6, б) участках моделирования. При этом начальные расположения участников сцены выбирались случайным образом. Как показывает моделирование, после нескольких итераций (Рис. 6, б) цель в данном конкретном случае убегает, применив, установленные правила.

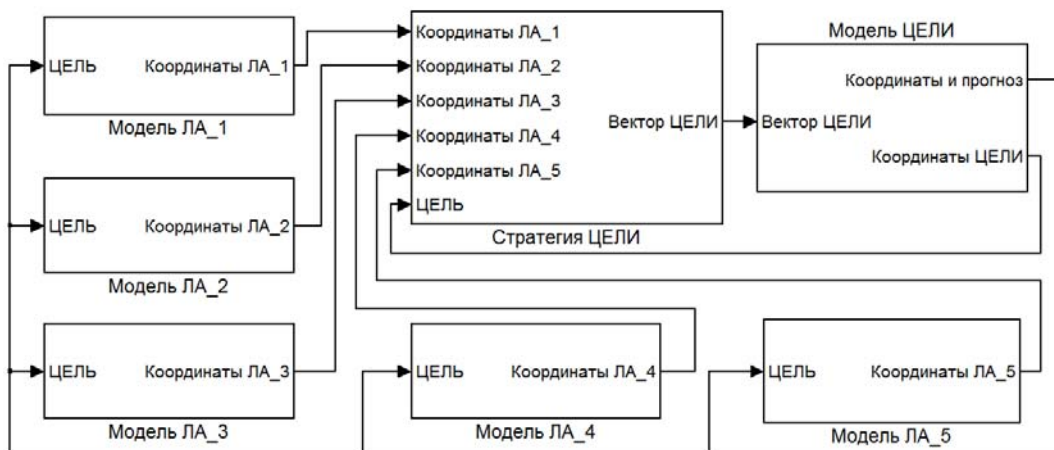


Рис. 4. Схема моделирования преследования цели группой ЛА

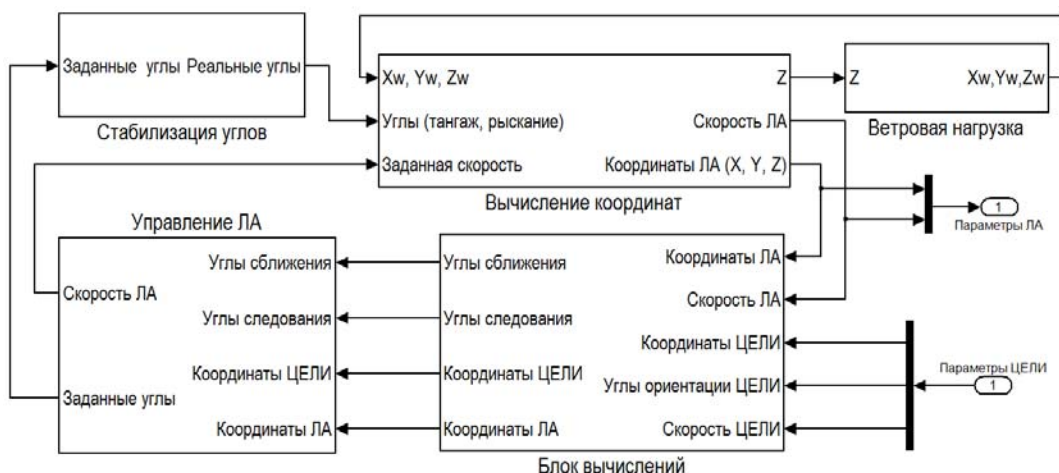


Рис. 5. Схема моделирования траекторного движения преследователя

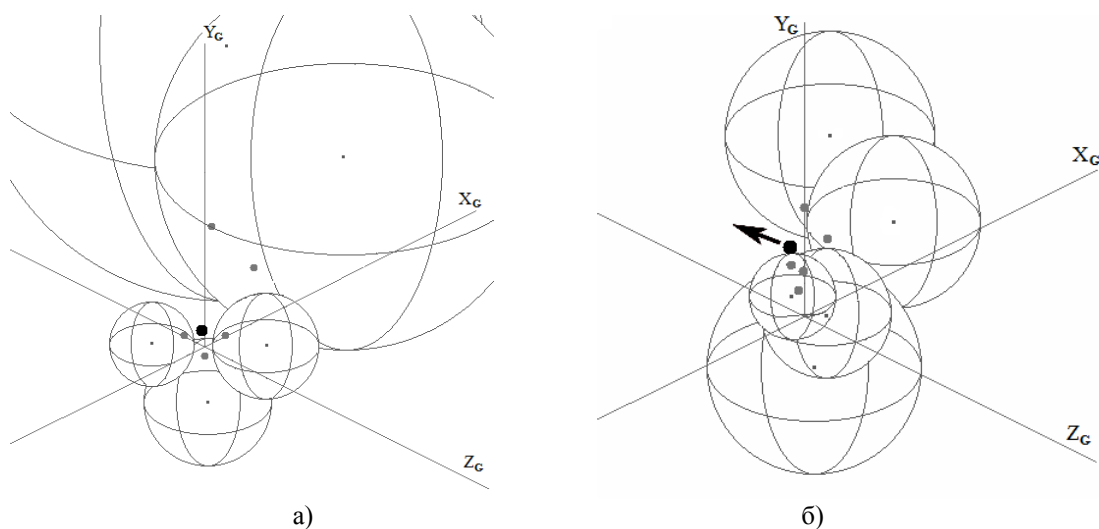


Рис. 6. Моделирование преследования цели группой ЛА

а – начало преследования; б – завершающая стадия (цель убегает)

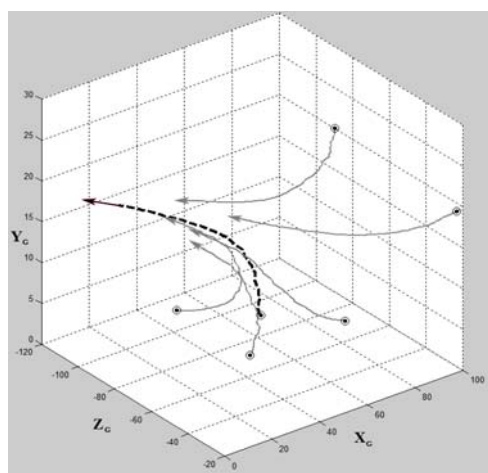
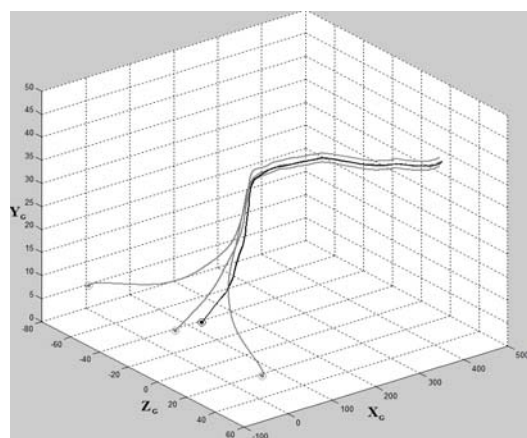


Рис. 7. Траектории движения цели и ЛА (Задача 1)

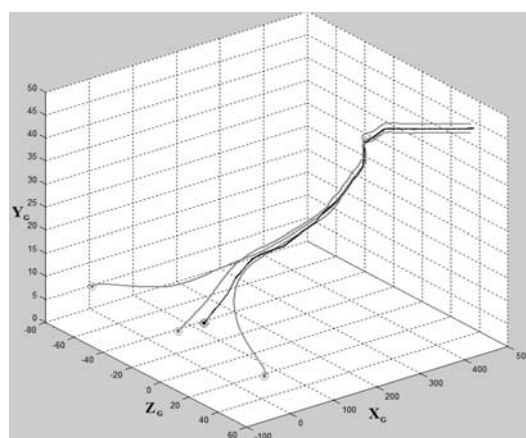
На Рис. 7 для наглядности представлены траектории движения цели (прерывистая темная кривая) и преследователей (светлые кривые) для того же самого примера.

На Рис. 8 отмечены случайные начальные расположения ЛА и представлены траектории их движения для двух примеров решения задачи следования за целью (Задача 2). Видно, что преследователи (серые кривые) сначала сближаются с целью (темная кривая), а затем следуют за ней.

Рис. 7 и Рис. 8 демонстрируют влияние ветровой нагрузки на реальную траекторию движения ЛА, причем заложенные в систему управления правила успешно справляются с поставленными задачами.



а)



б)

Рис.8. Траектории движения цели и ЛА (Задача 2)

Заключение

В статье дано обобщение исследований автора, выполненных в области моделирования теоретико-игровых задач преследования-убегания. Рассмотрены две задачи преследования динамической цели группой летательных аппаратов в условиях возмущенной воздушной среды. Для решения поставленных задач преследователи применяют стратегии поведения, реализуемые правилами выбора углов ориентации и скоростей полета, имитирующие действия человека-оператора. Для построения оптимального управления между точками смены направления игроков применяются принцип максимума Л.С. Понтрягина и геометрический подход. Участники сцен были описаны математическими моделями на основе передаточных функций, что позволило провести моделирование процессов сближения ЛА с целью. Проведенные экспериментальные исследования показали, что предложенные стратегии и реализующие их правила задают естественное поведение объектов в пространстве в условиях ветровых возмущений.

Литература

1. Huang Q., Yao J., Li Q., Zhu Y. Cooperative searching strategy for multiple unmanned aerial vehicles based on modified probability map // *Communications in Computer and Information Science*. Sept. 2016. Vol.644. P. 279-287.
2. Daingade S., Sinha A. Nonlinear cyclic pursuit based cooperative target monitoring // *Distributed Autonomous Robotic Systems. The 11th International Symposium*. 2014. Vol.104. P. 17-30.
3. Панов А.И., Яковлев К.С. Взаимодействие стратегического и тактического планирования поведения коалиций агентов в динамической среде // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2016. № 4. С. 68-78.
4. Veselov G., Sklyarov A., Sklyarov S. Synergetic approach to the quadrotor helicopter control in an environment with external disturbances // *Proceedings of 2016 International Siberian Conference on Control and Communications «SIBCON-2016»* (May 12-14, 2016 Russia, Moscow). 2016. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491680.
5. Stroud D. Adaptive Simulated Pilot Phillip // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 1998. Vol.21, No.2. P.352-354.
6. Прокопьев И.В. Автоматизация системы автономного управления беспилотным летательным аппаратом // *Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»*. 2010. Т.1. С. 420-422.
7. Смирнов С.В. Модель интеллектуального управления космическими аппаратами средствами наземных станций командно-измерительных систем // *Авиакосмическое приборостроение*. 2008. №6. С. 42-49.
8. Xavier J. A., Selvakumari S. R. Behavior architecture controller for an autonomous robot navigation in an unknown environment to perform a given task // *International Journal of Physical Sciences*. 2015. Vol.10. P. 182-191.
9. Pandey A., Parhi D. R. Multiple mobile robots navigation and obstacle avoidance using minimum rule based ANFIS network controller in the cluttered Environment // *International Journal of Advanced Robotics and Automation*. 2016. No.1. 11 p.
10. Абрамов Н.С., Макаров Д.А., Хачумов М.В. Управление пространственным движением летательного аппарата по заданному маршруту // *Автоматика и телемеханика*. 2015. №6. С. 153-166.
11. Хачумов М.В. Решение задачи следования за целью автономным летательным аппаратом // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2015. №2. С. 45-52.
12. Khachumov M.V. The problem of target pursuit by a group of unmanned flight vehicles // *Proceedings of 2016 International Siberian Conference on Control and Communications «SIBCON-2016»* (May 12-14, 2016 Russia, Moscow). 2016. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491698.
13. Хачумов М.В. Задачи группового преследования цели в условиях возмущений // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2016. №2. С. 46-54.
14. Петросян Л.А., Рихсиев Б.Б. Преследование на плоскости. М.: Наука, 1991. 95 с.

Хачумов Михаил Вячеславович. Научный сотрудник ИСА ФИЦ ИУ РАН. Окончил Российский университет дружбы народов (РУДН) в 2009 году. Кандидат физико-математических наук. Количество печатных работ: более 40. Область научных интересов: искусственный интеллект, интеллектуальное управление, дифференциальные игры, кластерный анализ, метрика. E-mail: khmike@inbox.ru

The problem of group pursuit of a target in a perturbed environment (spatial case)

M.V. Khachumov

Abstract. The generalization of the results obtained by the author for the solution of collective pursuit problems, covering the strategic and tactical levels of participants' behavior is given. The proposed approach is based on a combination of methods of intelligent and geometric control of dynamic objects, which we assume are unmanned aerial vehicles. In the process of problem solving, each aircraft implements behavioral strategies by following the proposed rules of orientation angles and velocity selection. Pontryagin's maximum principle and a geometric approach are applied to construct the control angles. The general simulation scheme of the pursuit process that takes into account the mathematical models of FVs and the wind disturbances is provided and experimental researches for the solution of the specified problems is modeled in a perturbed environment.

Keywords: Unmanned aerial vehicles, intelligent control, control rules, group interactions, pursuit of a target, differential games, simulation.

References

1. Huang Q., Yao J., Li Q., Zhu Y. Cooperative searching strategy for multiple unmanned aerial vehicles based on modified probability map // *Communications in Computer and Information Science*. Sept. 2016. Vol.644. P. 279-287.
2. Daingade S., Sinha A. Nonlinear cyclic pursuit based cooperative target monitoring // *Distributed Autonomous Robotic Systems. The 11th International Symposium*. 2014. Vol.104. P. 17-30.
3. Panov, A.I., K.S. Yakovlev. 2016. Vzaimodejstvie strategicheskogo i takticheskogo planirovaniya povedeniya koalitsii agentov v dinamicheskoy srede [On interaction of strategic and tactical planning for the coalition of agents in dynamic environment]. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie reshenij* [Artificial intelligence and decision-making] 3:68-78.
4. Veselov G., Sklyarov A., Sklyarov S. Synergetic approach to the quadrotor helicopter control in an environment with external disturbances // *Proceedings of 2016 International Siberian Conference on Control and Communications «SIBCON-2016»* (May 12-14, 2016 Russia, Moscow). 2016. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491680.
5. D. Stroud. Adaptive Simulated Pilot Phillip // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 1998. Vol.21, No.2. P.352-354.
6. Prokopyev, I. V. 2010. Avtomatizatsiya sistemy avtonomnogo upravleniya bespilotnym letatel'nyy apparatom [Automation of autonomous unmanned aerial vehicle control system]. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo»* [Proceedings of the International Symposium "Reliability and quality"] 1:420-422.
7. Smirnov, S. V. 2008. Model' intellektual'nogo upravleniya kosmicheskimi apparatami sredstvami nazemnykh stancij komandno-izmeritel'nykh sistem [The model of spacecraft intelligent control by means of ground stations for command and measuring systems]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace Instrument-Making] 6:42-49.
8. Xavier J. A., Selvakumari S. R. Behavior architecture controller for an autonomous robot navigation in an unknown environment to perform a given task // *International Journal of Physical Sciences*. 2015. Vol.10. P. 182-191.
9. Pandey A., Parhi D. R. Multiple mobile robots navigation and obstacle avoidance using minimum rule based ANFIS network controller in the cluttered Environment // *International Journal of Advanced Robotics and Automation*. 2016. No.1. 11 p.
10. Abramov, N.S., D.A. Makarov, M.V. Khachumov. 2015. Upravlenie prostranstvennym dvizheniem letatel'nogo apparata po zadannomu marshrutu [Controlling flight vehicle spatial motion along a given route]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control] 6:153-166.
11. Khachumov, M.V. 2015. Reshenie zadachi sledovaniya za cel'yu avtonomnym letatel'nyy apparatom [The solution of the problem of the target following by the autonomous aircraft]. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie reshenij* [Artificial intelligence and decision-making]. 2:45-52.
12. Khachumov M.V. The problem of target pursuit by a group of unmanned flight vehicles // *Proceedings of 2016 International Siberian Conference on Control and Communications «SIBCON-2016»* (May 12-14, 2016 Russia, Moscow). 2016. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491698.
13. Khachumov, M.V. 2016. Zadachi gruppovogo presledovaniya celi v usloviyakh vozmushchenij [Problems of group pursuit of a target in a perturbed environment]. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie reshenij* [Artificial intelligence and decision-making]. 2:46-54.
14. Petrosyan, L.A., B.B. Rikhsiev. 1991. Presledovanie na ploskosti [Planar Pursuit]. Moscow: Nauka. 95 p.

Khachumov Mikhail Vyacheslavovich. Researcher at ISA FRC CSC RAS. Graduated from Peoples' Friendship University of Russia in 2009. Candidate of Physical and Mathematical Sciences. The author of about 40 scientific papers. Research interests: artificial intelligence, intelligent control, differential games, cluster analysis, metrics. E-mail: khmike@inbox.ru