

Решение задачи следования за целью автономным летательным аппаратом¹

Аннотация. Решается задача управления летательным аппаратом (ЛА) в процессе следования за объектом (целью), движущимся по криволинейной траектории в плоскости тангажа. Предложена схема работы автономной системы управления, основанная на реализации правил имитирующих поведение летчика в соответствии с текущими и прогнозными состояниями ЛА и цели. Приведена общая схема интеллектуального управления, реализующая некоторое множество стратегий, правил выбора угла тангажа и двухпозиционное переключение скоростей полета. В экспериментальной части работы моделируется следование за целью в условиях наличия помех в виде ветровой нагрузки.

Ключевые слова: автономный летательный аппарат, преследование, интеллектуальное управление, правила управления, искусственная нейронная сеть, моделирование.

Введение

Одним из фундаментальных результатов математической теории управления является принцип максимума Л.С. Понтрягина [1]. Н.Н. Красовским и представителями его научной школы создана теория позиционных игр, в основе которой лежит правило экстремального прицеливания [2]. Связь между задачами преследования-убегания раскрывается теоремой об альтернативе [3, 4], которая утверждает, что в рамках принятой формализации всегда, при подходящем выборе классов стратегий игроков, разрешима одна и только одна из указанных задач. В работах [5, 6] рассматриваются дифференциальные игры преследования нескольких управляемых объектов группой управляемых объектов. В том числе задачи простого преследования жестко скоординированных убегающих, с фазовыми ограничениями. В работах [1, 2, 7] рассматривалась игровая задача преследования одного убегающего объекта (далее по тексту, цель), движущегося в горизонтальной плоскости, другим управляемым объектом (далее по тексту, ЛА). Задача «мягкой посадки» [8]

ставила своим условием обеспечение равенства не только для геометрических координат объекта, но и для скоростей, и производных более высокого порядка. При этом процесс разбивается на три этапа: на первом реализуется сближение по геометрическим координатам, на втором — переход в точку с попаданием на след в плоскости, на третьем — преследование по следу.

Предложенные в перечисленных работах математические постановки задач управления и методы их решения требуют больших затрат времени и не могут быть реализованы непосредственно на борту малых аппаратов в виду ограниченности возможностей вычислительных устройств и программного обеспечения. Поэтому представляется актуальной проблема построения эффективного управления автономного летательного аппарата при наличии ресурсных ограничений.

Ранее автором была рассмотрена задача проводки ЛА по заданному маршруту как задача преследования цели в условиях ветровой нагрузки [9], при этом минимизация отклонений от эталонной траектории осуществлялась с помощью простых правил. В настоящей статье

¹Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ № 14-07-31020, № 15-07-00925.

проводится обобщение выполненных ранее отдельных работ автора в области интеллектуального управления автономным летательным аппаратом. Принципиальным отличием является обобщенная постановка задачи следования за целью, детальная проработка продукционных правил управления, рассмотрение движения по заранее неизвестной криволинейной траектории и проведение новых обобщающих экспериментов в части решения задач преследования.

Решение задачи преследования одним автономным объектом основано на действиях, имитирующих поведение летчика (человека-оператора) и заключающееся в выборе стратегий, реализуемых наборами правил при ограничениях на управление и с учетом действующих возмущений. Такой подход позволяет достичь приемлемых результатов управления простыми средствами, что существенно для реализации режима реального времени непосредственно на борту автономного ЛА. Автономность ЛА определяется наличием на его борту встроенных устройств определения текущего местоположения и специализированных вычислителей для расчета необходимых переменных и прогнозирования места встречи с целью.

1. Постановка задачи следования за целью

Следуя работам [1, 2, 7], рассмотрим задачу следования одного объекта (ЛА) за другим управляемым объектом (целью) в горизонтальной плоскости. Индексом p будем помечать переменные управляемого объекта, а индексом c – цели. Цель движется по заранее неизвестной криволинейной траектории со скоростью v_c . Цель преследователя – сначала достичь равенства координат (стратегия сближения), а затем, пройти путь движения цели с минимальным отклонением (стратегия следования). Дано общее время следования за целью T_c . При этом не будем требовать равенства скоростей в месте встречи, что имеет место в задаче «мягкой посадки» [8]. В частном случае, траектория движения цели может быть кусочно-линейной [9-10]. Состояние ЛА и цели в произвольный момент времени t описываются векторами текущих параметров:

$$Q_p(t) = (x_p(t), y_p(t), v_p(t), \theta_p(t)),$$

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

где $x_p(t), y_p(t), x_c(t), y_c(t)$ – координаты, $v_p(t), v_c(t)$ – скорости, $\theta_p(t), \theta_c(t)$ – углы тангажа ЛА и цели. Полагаем, что в начальный момент времени известны координаты $x_p(0) = x_p^{(0)}$, $y_p(0) = y_p^{(0)}$, $x_c(0) = x_c^{(0)}$, $y_c(0) = y_c^{(0)}$. Для реализации стратегий сближения и следования за целью достаточно ограничиться наличием у преследователя двух скоростей $v_{p1} = v_c$ и $v_{p2} > v_c$.

Угол тангажа θ_p устанавливается в допустимых пределах $[\theta_{p\min}, \theta_{p\max}]$. Во время следования догоняющий знает координаты свои и цели в каждый текущий момент времени. ЛА следует за целью, руководствуясь выбранной стратегией и возможностями варьирования параметров управления (скорости, угла тангажа). В результате ветровых возмущений возможно отклонение ЛА от траектории следования, причем существенное, что инициирует сближение с повышенной скоростью.

Пусть $P(t)$ и $C(t)$ – координаты ЛА и цели, а $d(P(t), C(t))$ – расстояние между ними в момент времени t . Задача следования заключается в построении такого управления $U(t) = (v_p(t), \theta_p(t))$ на временном отрезке $[0, T_c]$ при наличии возмущений и ограничениях на управление, что

$$\int_{t=0}^{T_c} d(P(t), C(t)) dt \rightarrow \min.$$

Задача сближения заключается в построении такого управления $U(t) = (\theta_p(t))$ на временном отрезке $[T_i, T_j]$ при наличии возмущений, что $d(P(T_j), C(T_j)) < \varepsilon_{\min}$ и $T_j \rightarrow \min$, где T_i, T_j – время начала и конца сближения, $\varepsilon_{\min}$ – минимальное целевое расстояние между ЛА и убегающим объектом, $v_p = v_{p2} > v_c$ – скорость ЛА.

2. Решение задачи определения места встречи на основе окружности Аполлония

В случае кусочно-линейного движения цели решение задачи определения места встречи может быть получено геометрически с исполь-

зованием окружности Аполлония [9-10]. Задачи простого преследования с линией жизни рассмотрены Л.А. Петросяном [11].

Задача линейного сближения состоит в определении угла тангажа преследователя θ_p для встречи с целью. Пусть известны: начальные координаты: $(0,0)$, (a,b) и скорости движения v_c, v_p цели и преследователя соответственно, причем $v_p > v_c$. Полагаем также, что цель движется прямолинейно по направлению, определяемому углом θ_c . Здесь система координат проходит через точку положения цели. Требуется найти прогнозируемую точку встречи (x,y) и направление перемещения (угол тангажа) θ_p преследователя. Решение задачи поясняется на Рис. 1. В работе [9] показано, что уравнение окружности, являющейся местом встречи преследователя и цели, имеет вид:

$$\left(x - \frac{a \cdot v_c^2}{v_c^2 - v_p^2}\right)^2 + \left(y - \frac{b \cdot v_c^2}{v_c^2 - v_p^2}\right)^2 = \left(\frac{v_p \cdot v_c \cdot \sqrt{a^2 + b^2}}{v_p^2 - v_c^2}\right)^2.$$

Здесь $d_x = \frac{a \cdot v_c^2}{v_c^2 - v_p^2}$ - смещение центра окружности по оси абсцисс, а $d_y = \frac{b \cdot v_c^2}{v_c^2 - v_p^2}$ - по оси ординат, $R = \frac{v_p \cdot v_c \cdot \sqrt{a^2 + b^2}}{v_p^2 - v_c^2}$ - радиус окружности.

Из построений на Рис. 1 следует, что $\operatorname{tg} \theta_c = \frac{y}{x}$, откуда получаем квадратное уравнение:

$$(1 + \operatorname{tg}^2 \theta_c) x^2 - 2(d_x + \operatorname{tg} \theta_c \cdot d_y) x + d_x^2 + d_y^2 - R^2 = 0, \quad (1)$$

решение которого дает пару значений координаты $x = (x_1, x_2)$. Ей соответствует пара значений ординаты $y = (y_1, y_2)$, а с учетом соотношения:

$$\operatorname{tg} \theta_p = \frac{y - b}{x - a}, \quad (2)$$

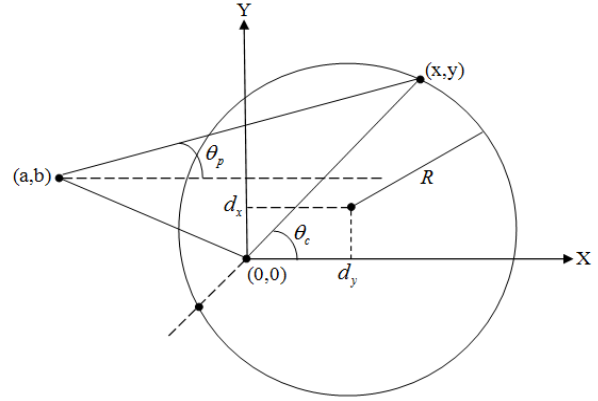


Рис. 1. Пояснения к задаче преследования-убегания на плоскости

можно вычислить и пару искомых углов $\theta_p = (\theta_p^1, \theta_p^2)$.

Доопределяя направление перемещения цели (к наблюдателю или от него) можно найти стратегию поведения преследователя. В случае, когда цель меняет направление движения (кусочно-линейное), применяется стратегия параллельного сближения [11], основанная на перепланировании движения преследователя путем вычисления новых углов атаки.

3. Решение задачи прогнозирования движения цели на основе нейронной сети

Реализация нейросетевого преследования на основе одной и двух нейронных сетей в задаче «мягкой посадки» приведены, например, в работах [8, 12]. Решение задачи о мягкой посадке здесь строится на основе нейросетевого контроллера, который состоит из трех слоев нейронов прямого распространения. Для настройки параметров нейронной сети используются генетические алгоритмы, эталонные модели и алгоритмы обратного распространения ошибки. Приводятся примеры численной реализации задачи преследования. Нейро-контроллер состоит из двух нейронных сетей, генерирующих управление преследователя.

В отличие от этого рассмотрим решение задачи преследования, опирающиеся на результаты, полученные автором в работе [13]. В случае криволинейного движения для прогнозирования значений временного ряда будем использовать ИНС прямого распространения с сигмои-

дальной функцией активации $\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$.

Преследователь наблюдает за целью, накапливая данные, и в некоторый момент времени T_0 начинает преследовать цель на основе знания ее текущего состояния и прогноза движения. Пусть известны значения координат цели $(x_c(t_i), y_c(t_i))$ в моменты времени $t_i = t_0, \dots, t_j$, $t_j = T_0$. Ставится задача прогнозирования n последующих значений координат цели $(x_c(t_i), y_c(t_i))$, где $t_i = t_{j+1}, \dots, t_{j+n}$.

Ограничимся случаем $n = 1$, т.к. долгосрочный прогноз теряет свою актуальность. Выполняется обучение ИНС на имеющихся данных. Для сканирования временного ряда скользящим окном будем использовать m значений. Число входов первого слоя равно $2m$, что соответствует двум векторам координат цели на плоскости, охватываемых окном. Число нейронов второго слоя подбирается экспериментально. Третий слой содержит два нейрона для прогнозирования координат (x, y) следующей точки (Рис. 2).

Для обучения ИНС используется метод обратного распространения ошибки. При подаче на вход нейронной сети m значений, добиваемся получения на выходе прогнозного значения $(m + 1)$. На Рис. 3 представлены результаты проведенных экспериментов по прогнозированию траектории движения цели средствами Matlab. Светлой линией обозначена реальная траектория цели, темной – прогнозная.

Как показывают эксперименты, нейронная сеть достаточно уверенно прогнозирует элементы временного ряда. При сближении с целью в реальном времени, необходимо сравнивать полученные прогнозные значения и реальные координаты цели и при необходимости проводить переобучение сети. После прогноза координат цели необходимо дать математическое описание траектории движения цели для решения задачи определения точки встречи. Воспользуемся способом приближения кривой параметрическим кубическим сплайном $S(x, t)$, описание которого приведено в работе [13]. Для нахождения точки встречи ЛА с целью необходимо решить следующую задачу для спрогнозированного участка траектории:

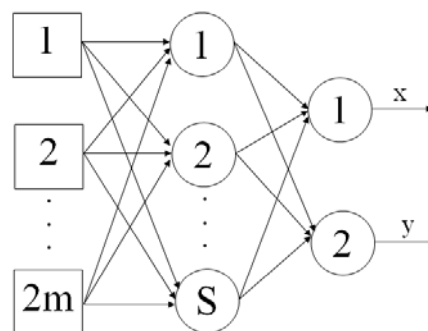


Рис. 2. Архитектура ИНС для прогнозирования движения

$$\begin{cases} S(x_c, \tau) = x_p(t_i) + v_p \tau \cos(\theta_p) \\ S(y_c, \tau) = y_p(t_i) + v_p \tau \sin(\theta_p) \end{cases}, \quad (3)$$

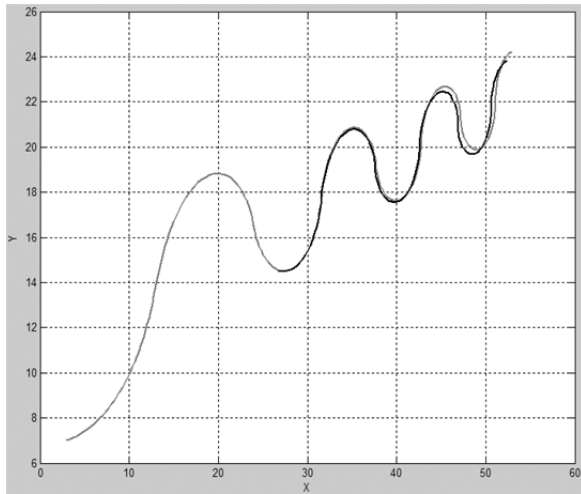
где $\tau \in [0, 1]$ – параметр, нормализующий время.

Решение системы (3) позволяет вычислить угол θ_p преследования цели. Здесь целесообразно применить метод Ньютона, который легко реализуется и подходит для вычислений на борту ЛА в реальном времени. Отсутствие решения означает, что ЛА не успевает догнать цель на спрогнозированном интервале. В таком случае ЛА для определенности может лететь в последнюю спрогнозированную точку $x_c(t_{i+1}), y_c(t_{i+1})$. Соответствующий угол θ_p находим следующим образом:

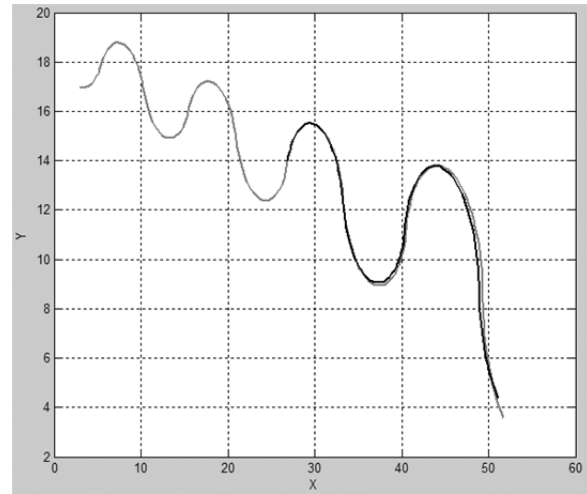
$$\frac{y_c(t_{i+1}) - y_p(t_i)}{x_c(t_{i+1}) - x_p(t_i)} = \tan(\theta_p), \quad (4)$$

4. Описание системы управления ЛА на основе продукционных правил

В основу решения задачи положены принципы построения динамических интеллектуальных систем, предложенные Г.С. Осиповым в работе [14]. Особенность подхода в том, что с одной стороны объекты образуют систему, удовлетворяющую определениям классических динамических систем автоматического управления, а с другой динамика может быть описана средствами представления знаний в виде продукционных правил, а состояния – параметрами и переменными, имеющими логический или лингвистический характер. Одна из реали-



а)



б)

Рис. 3. Результаты экспериментов прогнозирования движения цели

заций этой задачи применительно к задаче преследования представлена в работе [9].

Предлагается схема системы интеллектуального управления автономным ЛА, представленная на Рис. 4.

Существенную роль здесь играет выбор правил управления на основе текущих данных о состояниях ЛА и цели. Модель ЛА, как объекта системы автоматического управления, содержит стабилизирующий контур, который получает задания на установление угла тангажа и отрабатывает их в условиях возмущающих ветровых воздействий.

Приведем набор расширенных правил управления.

В правилах, представленных ниже, запись вида (А,В,С) обозначает «известно значение А» и «известно значение В» и «известно значение С». Списком добавляемых и удаляемых фактов предшествует служебное слово «ТО», а следующее далее выражение вида $x:=a$ означает «в текущем состоянии базы данных присвоить переменной x значение a ». Индекс t при переменной означает привязку к текущему времени. Используются следующие обозначения.

$Angle1(d, x_p, y_p, x_c, y_c, \theta_c, v_p, v_w)$ – функция, вычисляющая угол по формулам (1)-(2); $Angle2(\theta_c, \theta_w, v_p, v_w)$ – функция, вычисляющая угол для минимального бокового отклонения по формуле $\arcsin\left(\frac{v_w(t)}{v_p(t)} \sin(\theta_c(t) + \theta_w(t))\right)$, где

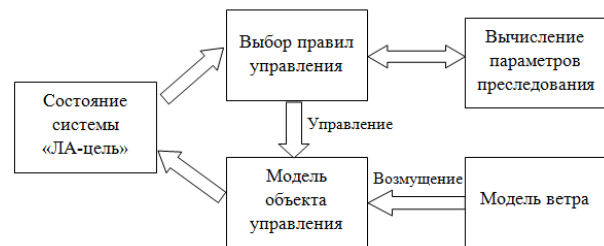


Рис. 4. Схема системы интеллектуального управления ЛА

$d(t)$ – расстояние между ЛА и целью в момент времени t , $\theta_c(t)$ – угол тангажа цели, $\theta_w(t)$ – угол ветра относительно оси ОХ, v_p – скорость ЛА, v_w – скорость ветра. Положим Δt – продолжительность одного такта работы системы; $\varepsilon_{\min}$ – минимальное расстояние, означающее, что цель достигнута; $\varepsilon_{\max}$ – расстояние, начиная с которого происходит сближение.

Правила замыкания

Правила осуществляют вычисление и подготовку необходимых для последующих расчетов данных, доопределяющих текущее состояние объекта управления (блок вычисления параметров преследования, Рис. 4)

ЕСЛИ $(x_p(t), y_p(t), x_c(t), y_c(t))$ ТО

$$d(t) = \sqrt{(x_p(t) - x_c(t))^2 + (y_p(t) - y_c(t))^2};$$

ЕСЛИ

$$(d(t), x_p(t), y_p(t), x_c(t), y_c(t), \theta_c(t), v_p(t), v_c(t))$$

ТО угол сближения $\theta'_p(t) :=$

$$\text{Angle1}(d(t), x_p(t), y_p(t), x_c(t), y_c(t), \theta_c(t), v_p(t), v_c(t));$$

ЕСЛИ $(\theta_c(t), \theta_w(t), v_p(t), v_w(t))$ ТО угол следования $\theta''_p(t) := \text{Angle2}(\theta_c(t), \theta_w(t), v_p(t), v_w(t))$.

Правила переходов

Правила определяют переход системы в новое состояние в результате импульса управления с заданной периодичностью. Координаты очередной текущей точки определяются интерполяцией координат двух соседних точек.

ЕСЛИ $(x_p(t), v_w(t), \theta_p(t), \theta_w(t))$ ТО
 $x_p(t + \Delta t) = x_p(t) + v_p(t) \cos(\theta_p(t)) +$
 $v_w(t) \cos(\theta_w(t));$

ЕСЛИ $(y_p(t), v_w(t), \theta_p(t), \theta_w(t))$ ТО
 $y_p(t + \Delta t) = y_p(t) + v_p(t) \sin(\theta_p(t)) +$
 $v_w(t) \sin(\theta_w(t)).$

Правила выбора цели

Правила осуществляют выбор цели в зависимости от текущих параметров системы.

ЕСЛИ $(d(t) \geq \varepsilon_{\max})$ ТО цель «Сближение с целью» = «активна»; «Следование за целью» = «неактивна»;

ЕСЛИ $(d(t) \leq \varepsilon_{\min})$ ТО цель «Сближение с целью» = «достигнута»; «Следование за целью» = «активна».

Правила управления

Правила осуществляют выбор из множества допустимых управлений в соответствии с текущей целью. Система содержит следующие правила:

ЕСЛИ (цель = «Сближение с целью») ТО
 $v_p(t) = v_{p1}(t) = v_c(t)$, $\theta_p(t) = \theta'_p(t)$;

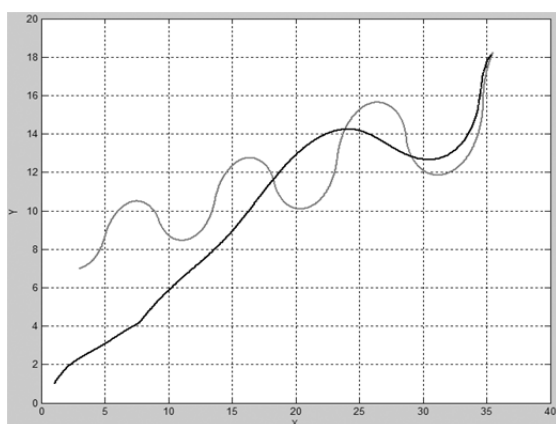
ЕСЛИ (цель = «Следование за целью») ТО
 $v_p(t) = v_{p2}(t)$, $\theta_p(t) = \theta''_p(t)$.

Правила выполняются до тех пор, пока не будет исчерпано время T_c .

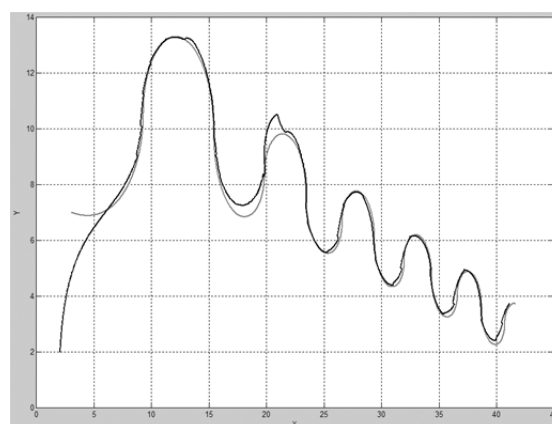
5. Моделирование задачи следования за целью на основе продукционных правил

Моделирование следования ЛА за целью в неспокойной атмосфере осуществляется с помощью программного обеспечения MATLAB и системы Simulink. Рассматривается случай, при котором на летательный аппарат воздействует встречный ветер. Среднеквадратичное значение продольной составляющей ветра $\sigma_\tau = 4$ м/с.

На Рис. 5а представлены траектории движения цели (светлая кривая) и ЛА (темная кривая), полученные в результате моделирования задачи сближения. Скорость цели $v_c = 30$ м/с, скорость ЛА $v_p = v_{p2} = 40$ м/с. Пройденное расстояние измеряется в километрах. Из рисунка видно, что ЛА осуществляет вполне логичные действия по сближению с целью, завершая полет, догнав цель. На Рис. 5б показаны результаты моделирования задачи следования за целью.



а) задача сближения



б) задача следования

Рис. 5. Сравнение траекторий движения ЛА и цели

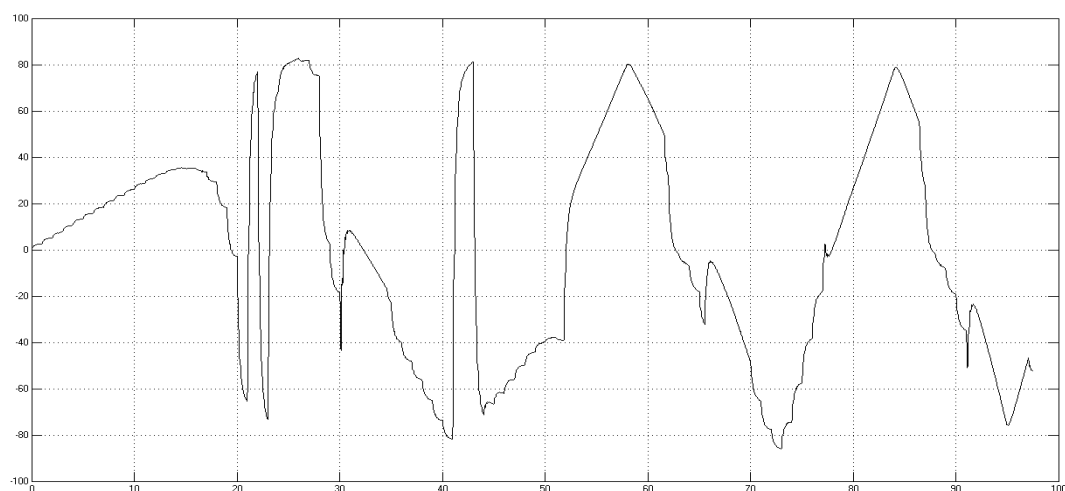


Рис. 6. График изменения угла тангажа БПЛА $\theta_p(t)$

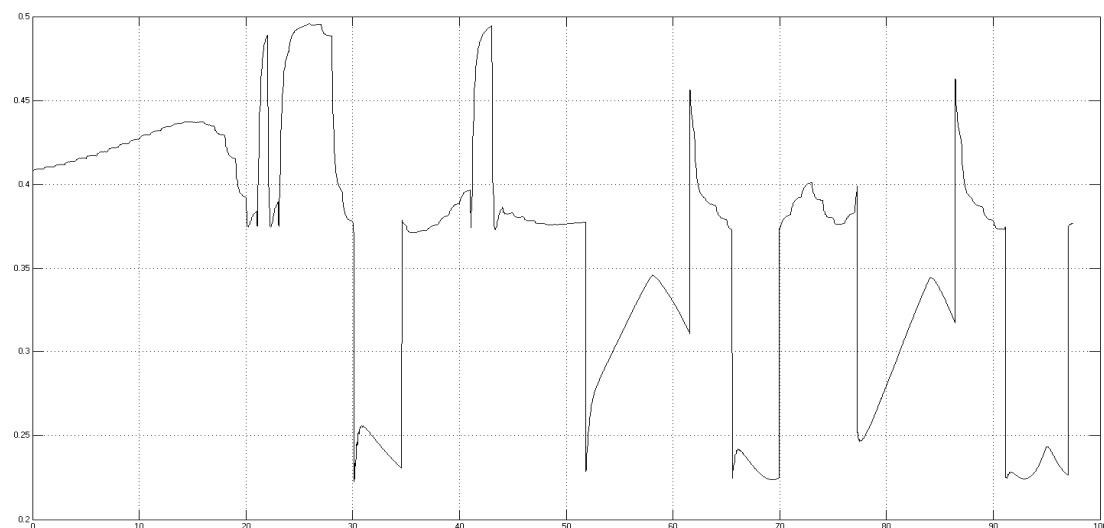


Рис. 7. График изменения скорости ЛА с ветровой нагрузкой $v_p(t)$

ЛА сначала сближается с целью, а затем следует за ней, отклоняясь в допустимых пределах от ее траектории. Скорость цели $v_c = 30$ м/с, скорость ЛА $v_p = v_{p2} = 45$ м/с.

На Рис. 6 и Рис. 7 показаны примеры моделирования изменения угла тангажа и скорости ЛА с учетом ветровой нагрузки для задачи следования, видны моменты переключения режимов сближения и следования.

Заключение

В настоящей работе приведен краткий обзор работ в области управления ЛА и предложено решение задачи следования за целью на основе принципов интеллектуального управления с

представлением знаний в виде продукционных правил. Рассмотрена общая схема управления, реализующая некоторое множество стратегий и правил при ограничениях на управление и с учетом действующих возмущений. Предложенный способ предоставляет широкие возможности для управления автономными летательными аппаратами в процессе следования за целью, в том числе позволяет оптимизировать суммарное отклонение от траектории на основе простых правил. Использование ИНС и аппроксимации кубическими сплайнами позволяет получать приемлемое по точности решение выбора угла тангажа в условиях дефицита времени и необходимости оперативных действий, вызванных отклонениями при ветровых воздействиях.

Моделирование процессов сближения ЛА с целью и следования за нею в системе Simulink при наличии ветровой нагрузки, показало, что предложенная система управления, достаточно уверенно и быстро устраняет возникающие рассогласования между ЛА и целью.

Литература

1. Понтрягин Л. С. Математическая теория оптимальных процессов / Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. – М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., изд. 3-е, 1976. – 392 с.
2. Красовский Н. Н. Игровые задачи о встрече движений / Н. Н. Красовский. – М.: Наука, 1970. – 420 с.
3. Красовский Н.Н., Субботин А.И. Альтернатива для игровой задачи движения // Прикл. математика и механика. – 1970. – 34, № 6, с. 1005–1022.
4. Красовский Н.Н., Субботин А.И. Позиционные дифференциальные игры. – М.: Наука, 1974. – 455 с.
5. Ухоботов В.И., Зайцева О.В. Игровая задача импульсной встречи со смешанным ограничением на управление второго игрока. - Вестник ЮУрГУ, № 19, 2007. Серия Математика, физика, химия, выпуск 9, с. 55-60
6. Вагин Дмитрий Александрович. Преследование жестко скоординированных убегающих: дис. ...канд. физ.-мат. наук: 01.01.02: Ижевск, 2003. – 102 с. – <http://www.dslib.net/dif-uravnenia/presledovanie-zhestko-skoordinirovannyh-ubegajuwih.html>
7. Айзекс Р. Дифференциальные игры / Р. Айзекс. Под ред. М. И. Зеликина с предисловием Л. С. Понтрягина. – М.: Мир, 1967. – 479с.
8. Муниб М. Б. Численная реализация нейросетевого управления в задаче о мягкой посадке. – Динамические системы, том 1(29), 1 (2011), с. 157-168
9. Абрамов Н.С., Хачумов М.В. Моделирование проводки по маршруту беспилотного летательного аппарата как задачи преследования цели. – Авиакосмическое приборостроение, № 9, 2013, с.9-22.
10. Хачумов М.В. Определение точки встречи беспилотного летательного аппарата с преследуемой целью. – Сборник статей XVII международной научно-практической конференции "Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике" (22-23 мая 2014 г. Санкт-Петербург), Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2014, с. 85-88.
11. Петросян Л.А. Дифференциальные игры преследования. - Л.: ЛГУ, 1977. - 222 с.
12. Муниб М.Б. Нейросетевое управление в задачах преследования. – Вісник НТУ "ХПІ». 2013. №38(1011), с.50-54
13. Хачумов М.В. Задача автоматического управления летательным аппаратом в процессе преследования цели. – Программные системы: теория и приложения № 5(23), 2014, с. 67–77. – http://psta.psriras.ru/read/psta2014_5_67-77.pdf
14. Осипов Г.С. Динамические интеллектуальные системы. - Искусственный интеллект и принятие решений, №1, 2008, с.47-54

Хачумов Михаил Вячеславович. Научный сотрудник ИСА РАН. Окончил Российский университет дружбы народов в 2009 году. Кандидат физико-математических наук. Автор 25 печатных работ. Область научных интересов: искусственный интеллект, системы управления, кластеризация, слабоструктурированные данные. E-mail: khmike@inbox.ru