

УДК 004.896

РЕШЕНИЕ ТРАЕКТОРНЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ ГРУППЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ, ОСНОВАННОЕ НА ПРАВИЛАХ

М.В. Хачумов (*khmike@inbox.ru*)
ИСА ФИЦ ИУ РАН, Москва

Аннотация. Рассматриваются две траекторные задачи в условиях возмущений: преследование цели и следование по заданному маршруту. В качестве объектов выступают беспилотные летательные аппараты (ЛА), математические модели которых задаются передаточными функциями. Задача преследования цели заключается в сближении группы ЛА, имеющей некоторое случайное расположение, с целью и полета рядом с ней в течение заданного периода времени. Цель, имеющая меньшую скорость, стремится уклониться от преследователей. В задаче отработки заданного маршрута каждый аппарат следует по своей траектории полета, заданной движением соответствующей эталонной («имитационной») цели. В процессе решения задач ЛА применяют некоторое множество стратегий поведения в возмущенной среде, реализуемых правилами выбора углов ориентации и скоростей полета. Приведены примеры основных групп правил для преследователя и структурная схема моделирования процесса преследования. В экспериментальной части работы моделируются ситуации, характерные для решения указанных задач.¹

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

Введение

Одним из инструментов искусственного интеллекта, который активно применяется в системах управления, являются продукционные правила (продукции), реализующие принцип ситуационного управления. Достоинствами продукций являются: модульность – каждое правило не зависит от других; модифицируемость – правило может быть заменено или удалено вне зависимости от других; естественность –

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-07-00925).

приближенность к тому к тому, как действует человек.

Укажем несколько характерных примеров управления роботизированными системами, основанного на правилах. В работе [Stroud, 1998] рассматривается отработка сложного движения самолета-перехватчика с помощью 15 основных правил. Автором [Прокопьев, 2010] предложена система управления ЛА, основанная на применении нечетких правил, реализуемых на нейронных сетях. Модель интеллектуального управления стыковкой космического аппарата, основанная на правилах, которые включают правила замыкания, переходов, выбора цели, управления, рассмотрена в работе [Смирнов, 2008]. Много исследований в этом направлении выполнено для управления движением наземных мобильных роботов, моделью которых является тележка [Ротштейн, 1999], [Евстигнеев, 2014].

В настоящей работе решаются задачи управления траекторным движением группы ЛА для преследования цели и следования по заданному маршруту в возмущенной среде. Решение задачи преследования динамической цели изучается в рамках теории дифференциальных игр [Friesz, 2010], [Lin, 2013], [Li, 2006]. Предложенные в этих работах математические постановки оптимизационных задач управления и существующие точные и приближенные методы их решения требуют больших затрат времени. В виду ограниченности возможностей вычислительных устройств и программного обеспечения автономных ЛА является актуальной задача построения простых в реализации, но эффективных алгоритмов управления, основанных на правилах. В работах [Дьяченко, 2012], [Li, 2012] отмечается эффективность группового применения ЛА при проведении мониторинга больших территорий и поиска целевых объектов за ограниченное время.

Ранее задачи преследования цели и следования по заданному маршруту решались автором для случая одного преследователя и одного убегающего [Хачумов, 2015], [Хачумов и др., 2015]. Полученные результаты позволили перейти вплотную к разработке стратегий поведения и экспериментальному моделированию процессов решения задачи для группы ЛА.

1 Постановка задачи

Рассмотрим две базовые задачи, имеющие прикладное значение.

Задача 1 (Преследование цели). Рассмотрим задачу преследования объекта c , обозначаемого дальше «цель», группой ЛА $P = \{p_1, \dots, p_N\}$, $N \geq 2$. Верхними индексами p и c будем помечать переменные ЛА и

цели, соответственно. Объекты p_i и c осуществляют простое движение между соседними точками смены направления с постоянными скоростями $v_i^{(p)}$, $v^{(c)}$; углами тангажа $\theta_i^{(p)}(t)$, $\theta^{(c)}(t)$ и рыскания $\psi_i^{(p)}(t)$, $\psi^{(c)}(t)$, задающими ориентацию. Преследователю p_i в момент времени t_i известны: скорость $v^{(c)}(t)$; углы ориентации $\theta^{(c)}(t)$, $\psi^{(c)}(t)$; координаты цели $x^{(c)}(t)$, $y^{(c)}(t)$, $z^{(c)}(t)$. Аналогично, цель имеет полную информацию о преследователях. Пусть $\forall i, v_i^{(p)} \geq v^{(c)}$, $X_i(t)$ и $Y(t)$ – координаты ЛА p_i и цели c , а $d(X_i(t), Y(t))$ – расстояние между ними в момент времени t . 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 $v_i^{(p)} = (v^{(p1)}, v^{(p2)})$, причем $v^{(p1)} = v^{(c)}$, $v^{(p2)} > v^{(c)}$. В результате ветровой нагрузки возможно отклонение ЛА от своего маршрута, причем существенное.

Задача заключается в построении такого управления $(v_i^{(p)}(t), \theta_i^{(p)}(t), \psi_i^{(p)}(t))$ для каждого p_i на временном отрезке $[0, T]$,

что $\int_{t=0}^T d(X_i(t), Y(t)) dt \rightarrow \min$ при ограничении: $\forall i, d(X_i(t), Y) \geq \varepsilon$,

где ε – допустимое значение сближения летательных аппаратов с целью.

Задача 2 (Следование по заданному маршруту). Пусть траектория летательного аппарата p_i задана движением эталонной цели $c_i \in \{c_1, \dots, c_N\}$ и представлена последовательностью опорных точек $(x_{ij}^{(c)}, y_{ij}^{(c)}, z_{ij}^{(c)})$, $j=1, \dots, M$. Известно желаемое время прохождения опорных точек $t_{ij}^{(c)}$, $i=1, \dots, N$, $j=1, \dots, M$ и всего маршрута в целом $T_i^{(c)}$. При этом ветровая нагрузка существенно влияет на движение ЛА, вызывая ее отклонение от заданного маршрута. Пусть $X_i(t)$ и $Y_i(t)$ – координаты p_i и соответствующей эталонной c_i , а $d(X_i(t), Y_i(t))$ – расстояние между ними в момент времени t .

Задача заключается в построении такого управления $(v_i^{(p)}(t), \theta_i^{(p)}(t), \psi_i^{(p)}(t))$ для каждого ЛА в группе на временном отрезке

$$[0, T_i^{(p)}], \text{ что } \int_{t=0}^{T_i^{(p)}} d(X_i(t), Y_i(t)) dt \rightarrow \min .$$

Предлагается решение поставленных задач, основанное на действиях, имитирующих поведение пилота в условиях ветровых возмущений. В работе [Khachumov, 2015] показано что решение задачи определения точки встречи ЛА и цели может быть получено геометрическим способом на основе построения сферы Аполлония. В случае, когда цель меняет направление движения, применяется стратегия «параллельного сближения», основанная на перепланировании движения преследователя путем вычисления новых углов атаки. В настоящей работе решается задача построения системы продукционных правил и моделирование группового преследования цели.

2 Описание системы управления ЛА на основе продукционных правил

В работе [Хачумов, 2015] 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 . Запись вида $\langle A, B, C... \rangle$ обозначает «известно значение A » и «известно значение B » и «известно значение C ».... Спискам добавляемых и удаляемых фактов предшествует служебное слово «ТО», а выражение вида $x := a$ означает «в текущем состоянии базы данных присвоить переменной x значение a ». Индекс t при переменной означает привязку к текущему времени.

$F_1(d_i, x_i^{(p)}, y_i^{(p)}, z_i^{(p)}, x^{(c)}, y^{(c)}, z^{(c)}, \theta^{(c)}, \psi^{(c)}, v_i^{(p)}, v^{(c)})$ – функция, вычисляющая углы сближения $\theta_i^{(p)}(t)$, $\psi_i^{(p)}(t)$ для встречи с целью на сфере Аполлония; $F_2(\theta^{(c)}, \psi^{(c)}, v_i^{(p)}, \bar{v}_i^{(w)})$ – функция, вычисляющая угол следования за целью $\theta_i^{(p)}(t)$, $\psi_i^{(p)}(t)$ с учетом ветровой нагрузки [Хачумов и др., 2015]. Здесь d_i – расстояние между p_i и целью, $\bar{v}_i^{(w)}$ – вектор скорости ветра. Положим Δt – продолжительность одного такта (шага) моделирования; ε – минимальное расстояние, означающее, что произошло сближение с целью.

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

ЕСЛИ $(x_i^{(p)}(t), y_i^{(p)}(t), z_i^{(p)}(t), x^{(c)}(t), y^{(c)}(t), z^{(c)}(t))$

ТО $d_i(t) := \sqrt{(x_i^{(p)}(t) - x^{(c)}(t))^2 + (y_i^{(p)}(t) - y^{(c)}(t))^2 + (z_i^{(p)}(t) - z^{(c)}(t))^2}$;

ЕСЛИ $(d_i(t), x_i^{(p)}(t), y_i^{(p)}(t), z_i^{(p)}(t), x^{(c)}(t), y^{(c)}(t), z^{(c)}(t), \theta^{(c)}(t), \psi^{(c)}(t), v_i^{(p)}(t), v^{(c)}(t))$

ТО $\theta_i^{(p)}(t) := F_1[\theta]$, $\psi_i^{(p)}(t) := F_1[\psi]$;

ЕСЛИ $(\theta^{(c)}(t), \psi^{(c)}(t), v_i^{(p)}(t), \bar{v}_i^{(w)}(t))$

ТО $\theta_i^{(p)}(t) := F_2[\theta]$, $\psi_i^{(p)}(t) := F_2[\psi]$.

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

ЕСЛИ $(x_i^{(p)}(t), y_i^{(p)}(t), z_i^{(p)}(t), \bar{v}_i^{(w)}(t), \theta_i^{(p)}(t), \psi_i^{(p)}(t))$

ТО $x_i^{(p)}(t + \Delta t) := x_i^{(p)}(t) + v_i^{(p)}(t) \cos(\theta_i^{(p)}(t)) \cos(\psi_i^{(p)}(t)) + \bar{v}_i^{(w)}(t)[x]$

$y_i^{(p)}(t + \Delta t) := y_i^{(p)}(t) + v_i^{(p)}(t) \cos(\theta_i^{(p)}(t)) \sin(\psi_i^{(p)}(t)) + \bar{v}_i^{(w)}(t)[y]$;

$z_i^{(p)}(t + \Delta t) := z_i^{(p)}(t) + v_i^{(p)}(t) \sin(\theta_i^{(p)}(t)) + \bar{v}_i^{(w)}(t)[z]$;

Правила выбора цели

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

ЕСЛИ (задача «сближение» = «активна»)

ТО $v_i^{(p)}(t) := v^{(p2)}(t)$, $\theta_i^{(p)}(t) := \theta_i^{(p)}(t)$;

ЕСЛИ (задача «следование» = «активна»)

ТО $v_i^{(p)}(t) := v^{(p1)}(t)$, $\theta_i^{(p)}(t) := \theta_i^{(p)}(t)$.

3 Система моделирования полета ЛА с учетом ветровой нагрузки

Общая схема моделирования процесса преследования цели ЛА в системе Simulink с учетом ветровых нагрузок приведена на Рис.1.

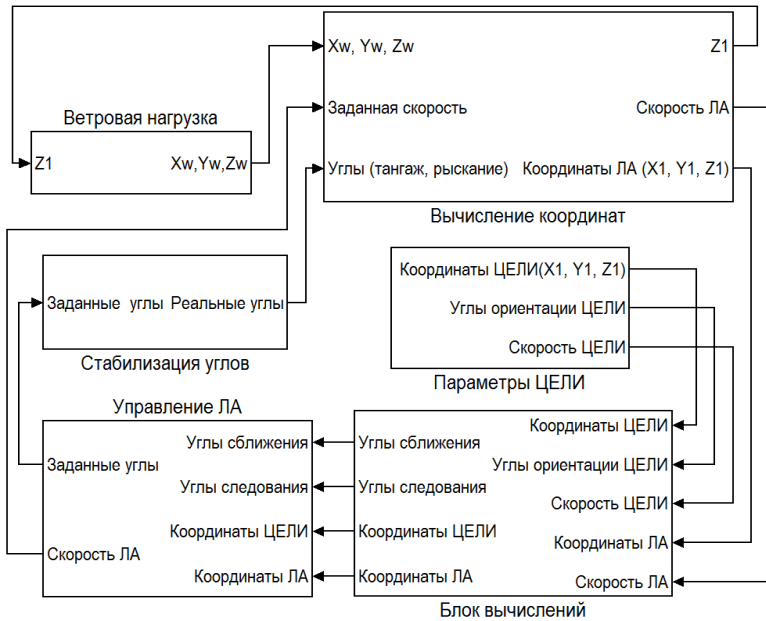


Рис. 1. Структурная схема моделирования преследования цели ЛА

Рассмотрим основные блоки структурной схемы.

Блок «стабилизация углов». На вход блока подаются углы ориентации, которые должен отработать ЛА с учетом возмущений. На выходе блок выдает текущий угол тангажа $\theta_i^{(p)}(t)$ и рыскания $\psi_i^{(p)}(t)$ ЛА p_i . Структурная схема стабилизации углов рассмотрена в работе [Khachumov, 2015].

Блок «вычисления координат». В принятой модели положение ЛА в текущий момент времени t вычисляются на основе координат в предыдущий момент времени $t-1$ и известных параметров: заданной скорости $v_i^{(p)}(t)$, углов $\theta_i^{(p)}(t)$, $\psi_i^{(p)}(t)$, а также скорости ветра $\bar{v}_i^{(w)}(t)$. На выходе блок выдает реальную скорость и текущие значения координат $(x_i^{(p)}(t_i), y_i^{(p)}(t_i), z_i^{(p)}(t_i))$ ЛА.

Блок «ветровая нагрузка». Продольные и нормальные ветровые воздействия моделируются с помощью встроенных функций Simulink [Khachumov, 2015].

Блок «параметры ЦЕЛИ» выдает координаты $(x^{(c)}(t_i), y^{(c)}(t_i), z^{(c)}(t_i))$, углы ориентации $\theta^{(c)}(t)$, $\psi^{(c)}(t)$ и скорость $v^{(c)}(t)$ цели.

Блок «вычислений» выдает углы сближения $\theta_i^{(p)}(t)$, $\psi_i^{(p)}(t)$ и углы следования $\theta_i^{n(p)}(t)$, $\psi_i^{n(p)}(t)$.

Блок «управления ЛА» вырабатывает конкретные управления $v_i^{(p)}(t)$, $\theta_i^{(p)}(t)$, $\psi_i^{(p)}(t)$ в соответствии с текущим состоянием системы.

4 Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования описанных задач с использованием модели ЛА [Khachumov, 2015] в условиях возмущенной воздушной среды выполнены в системе MATLAB Simulink.

На Рис. 2 отмечены начальные (случайные) расположения ЛА и представлены траектории их движения для задачи преследования цели (*Задача 1*). Пройденное расстояние показано в километрах. Видно, что ЛА (светлые кривые) сначала сближаются с целью (темная кривая), а затем следуют за ней.

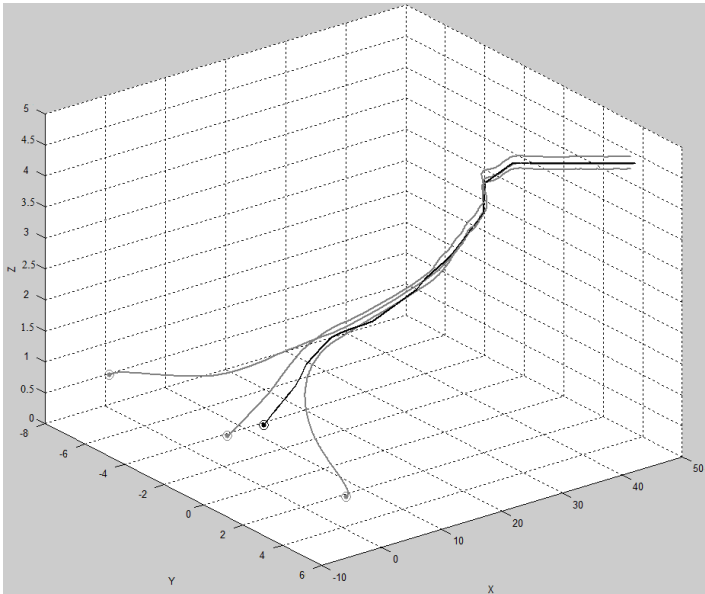


Рис. 2. Траектории движения цели и ЛА для примера *Задачи 1*.

На Рис. 3 представлены траектории движения ЛА для случая следования по заданному маршруту (*Задача 2*), при этом каждый ЛА (светлые кривые) преследует свою эталонную цель (темные кривые).

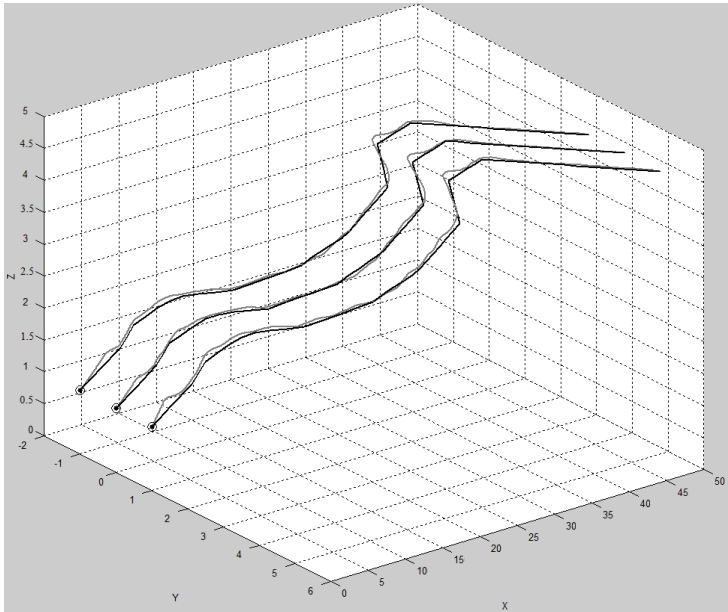


Рис. 3. Траектории движения цели и ЛА для примера *Задачи 2*.

Рис. 2-3 демонстрируют влияние ветровой нагрузки на реальную траекторию движения ЛА, однако заложенные в систему управления правила успешно справляются с поставленными задачами. Основным критерием качества управления служат интегральная оценка отклонения ЛА от заданного маршрута (от заданной цели) в процессе движения и визуальная оценка траектории полета участников сцены.

5 Заключение

В статье рассмотрены две траекторные задачи для группы ЛА, которые решались в условиях возмущенной воздушной среды. Выполненные эксперименты по моделированию процессов сближения ЛА с целью в системе Simulink, показали адекватность разработанных стратегий и реализующих их правил, которые задают естественное поведение объектов. Разработанный подход может быть использован для получения приемлемого по точности решения рассмотренных задач в условиях необходимости оперативных действий, вызванных отклонениями при ветровых воздействиях. Алгоритмы управления, основанные на правилах, целесообразно использовать на малых ЛА, имеющих ограниченные возможности бортовой вычислительной аппаратуры.

Список литературы

- [Stroud, 1998] D. Stroud. Adaptive Simulated Pilot Phillip // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 1998. Vol.21. No.2. pp.352-354.
- [Прокопьев, 2010] Прокопьев И.В. Автоматизация системы автономного управления беспилотным летательным аппаратом // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество», 2010, Т.1., с.420-422.
- [Смирнов, 2008] Смирнов С.В. Модель интеллектуального управления космическими аппаратами средствами наземных станций командно-измерительных систем // Авиакосмическое приборостроение, 2008, № 6, с.42-49.
- [Ротштейн, 1999] Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации. – Винница: УНИВЕРСУМ-Винница, 1999, 295 с.
- [Евстигнеев, 2014] Евстигнеев Д.В. Системы управления интеллектуальных мобильных роботов в среде Dyn-Soft RobSim 5. Учебное пособие, 2014, 190 с. – <http://robsim.dynsoft.ru/design3.pdf>.
- [Дьяченко, 2012] Дьяченко А.А. Задача формирования строя в группе БПЛА // Известия ЮФУ. Технические науки. – Таганрог: Южный федеральный университет, 2012, №3, с.22-30.
- [Li, 2012] Li X. Swarm-inspired solution strategy for the search problem of unmanned aerial vehicles // PhD thesis, University of Warwick. 2010
- [Friesz, 2010] Friesz T.L. Dynamic optimization and differential games // International Series in Operations Research & Management Science, Springer Science + Business Media, LLC, 2010, 502 p.
- [Lin, 2013] Wei Lin. Differential games for multi-agent systems under distributed Information // A dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy, University of Central Florida, 2013, 117 p.
- [Li, 2006] Dongxu Li. Multi-player pursuit-evasion differential games // A dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy, The Ohio State University, 2006, 151 p.
- [Khachumov, 2015] Khachumov M.V., Abramov N.S., Makarov D.A.. Controlling Flight Vehicle Spatial Motion Along a Given Route // Automation and Remote Control. 2015. Vol.76. No.6. pp.1070-1080.
- [Хачумов, 2015] Хачумов М.В. Решение задачи следования за целью автономным летательным аппаратом // Искусственный интеллект и принятие решений, 2015, №2, с.45-52.
- [Хачумов и др., 2015] Абрамов Н.С., Хачумов М.В. Моделирование проводки по маршруту беспилотного летательного аппарата как задачи преследования цели // Авиакосмическое приборостроение, 2013, №9, 2013, с.9-22.