

РЕШЕНИЕ ТРАЕКТОРНЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ ГРУППЫ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ, ОСНОВАННОЕ НА ПРАВИЛАХ

ИСА ФИЦ ИУ РАН
лаборатория «Методы
интеллектуального управления»

Хачумов М.В.

Системы управления, основанные на правилах.

Система правил типа «если....., то....., иначе.....» обеспечивает:

- Модульность;
- Модифицируемость;
- Естественность правил (база понятная для человека).

Примеры управления роботизированными системами:

- D. Stroud. Adaptive Simulated Pilot Phillip, 1998;
- Прокопьев И.В. Автоматизация системы автономного управления беспилотным летательным аппаратом, 2010;
- Смирнов С.В. Модель интеллектуального управления космическими аппаратами средствами наземных станций командно-измерительных систем, 2008;
- ООО «ДинСофт». Проект "Интеллектуальный мобильный робот" (с 2000 г) ;
- Макаров Д.А. Метод настройки ПИД-регулятора на основе экспертных знаний, 2010

Постановка задачи следования группы ЛА по заданному маршруту в условиях возмущений

Особенности решаемых задач:

- Управление осуществляется в условиях случайных воздушных возмущений;
- Управления вырабатываются на основе простых стратегий, имитирующих действия пилотов.

Задача 1 (Следование по заданному маршруту). Траектория каждого ЛА 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 $t_{ij}^{(c)}$ и всего маршрута в целом $T_i^{(c)}$. В результате ветровой нагрузки возможно отклонение ЛА от своего маршрута. Ограничимся наличием у ЛА двух скоростей $v_i^{(p1)} = v_i^{(c)}$ и $v_i^{(p2)} > v_i^{(c)}$. Пусть $X_i(t)$ и $Y_i(t)$ – координаты p_i и c_i , а $d(X_i(t), Y_i(t))$ – расстояние между ними в момент времени t .

Задача заключается в построении такого управления $U_i(t) = (v_i^{(p)}(t), \theta_i^{(p)}(t), \psi_i^{(p)}(t))$ для каждого ЛА на временном отрезке $[0, T_i^{(p)}]$, что $\int_{t=0}^{T_i^{(p)}} d(X_i(t), Y_i(t)) dt \rightarrow \min$.

Постановки задач группового преследования в условиях возмущений

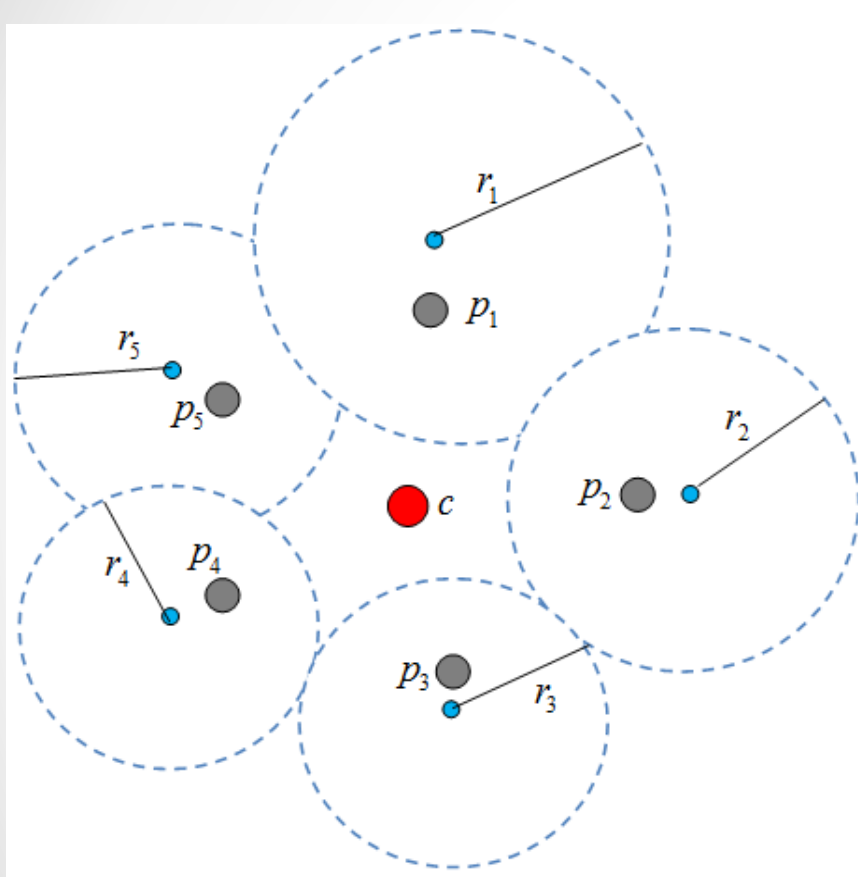
Задача 2 («Захват» цели). Пусть $P = \{p_1, \dots, p_N\}$ – группа ЛА, $N \geq 2$, а c – цель. Объекты p_i и c осуществляют движение с постоянными скоростями $v_i^{(p)}$, $v^{(c)}$ и углами $\theta_i^{(p)}(t)$, $\theta^{(c)}(t)$, задающими ориентацию. Каждому p_i в момент времени t_i известны переменные: $x^{(c)}(t)$, $y^{(c)}(t)$, $z^{(c)}(t)$, $v^{(c)}(t)$, $\theta^{(c)}(t)$, $\psi^{(c)}(t)$. Пусть $\forall i, v_i^{(p)} = v^{(p)} < v^{(c)}$, $X_i(t)$ и $Y(t)$ – координаты ЛА p_i и цели c , а $d(X_i(t), Y(t))$ – расстояние между ними в момент времени t .

Задача заключается в построении для p_i такого управления $(\theta_i^{(p)}(t), \psi_i^{(c)}(t))$ на временном отрезке $[0, T]$ при наличии возмущений, что $\exists i, d(X_i(T), Y(T)) < \varepsilon$ и $T \rightarrow \min$.

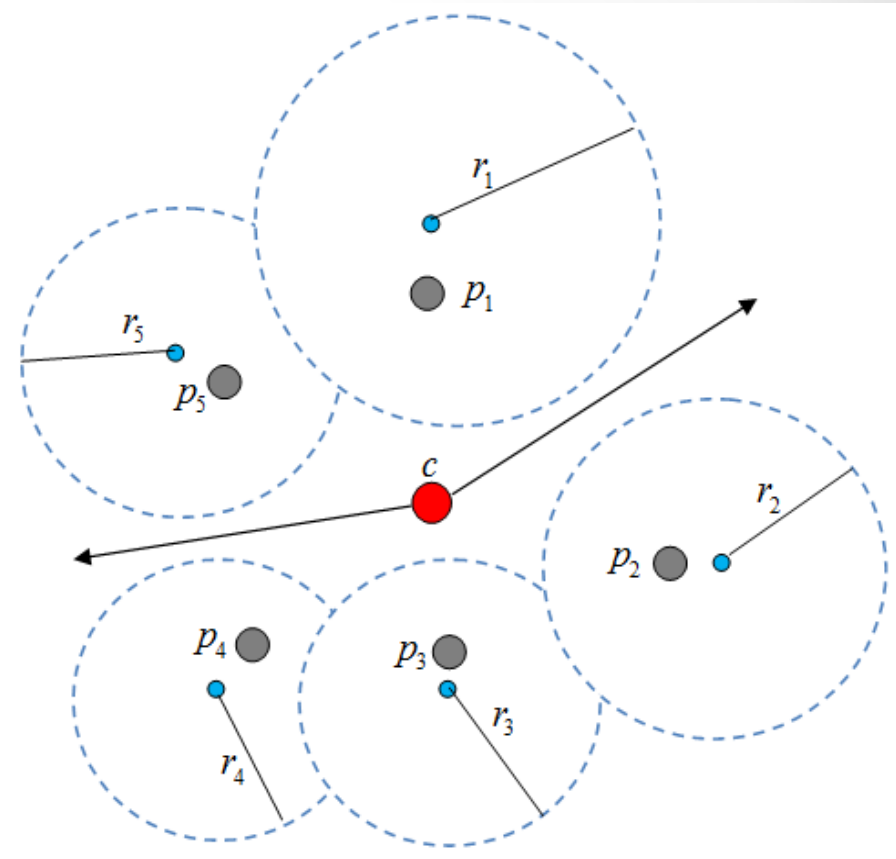
Задача 3 (Следование за целью). Пусть $\forall i, v_i^{(p)} \geq v^{(c)}$, тогда задача преследователей – сначала сблизиться с целью, а затем, пройти путь движения цели с заданным допустимым значением сближения в течение заданного времени T .

Задача заключается в построении $U_i(t) = (v_i^{(p)}(t), \theta_i^{(p)}(t), \psi_i^{(c)}(t))$ 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.

Простые случаи сближения с однозначным решением (в условиях отсутствия возмущений)

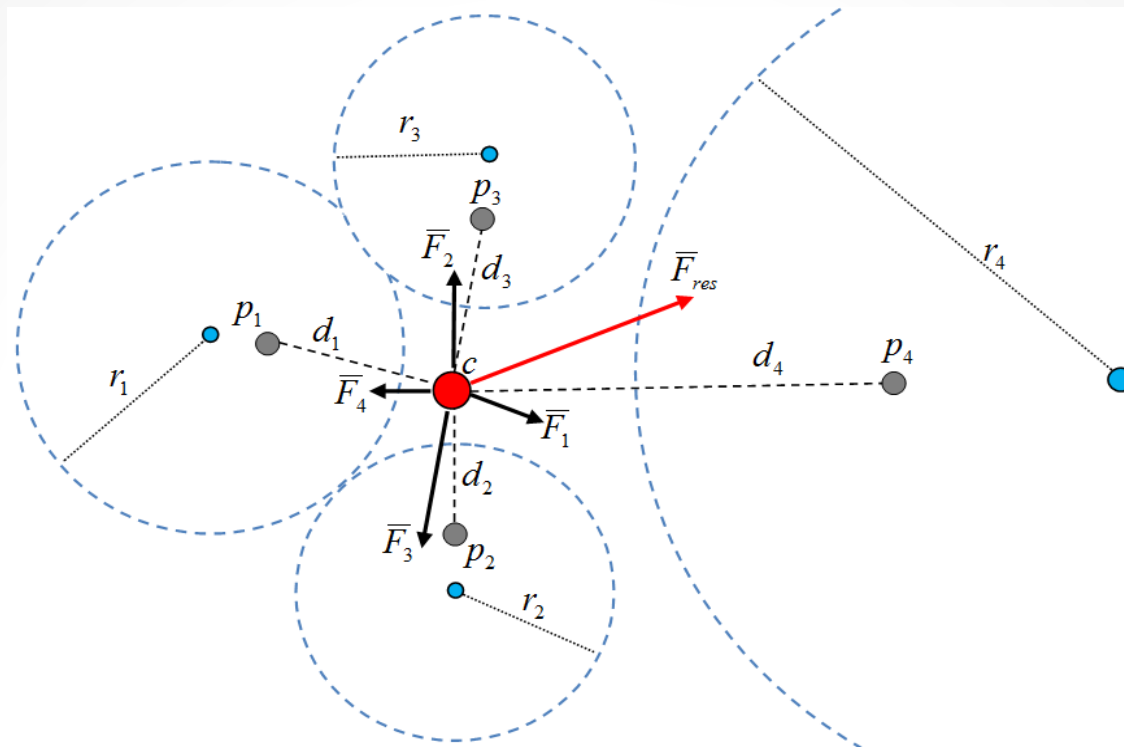


А) ЛА удастся окружить и поймать цель



Б) Цель убегает от преследователей

Стратегии поведения игроков (преследователи и убегающий)

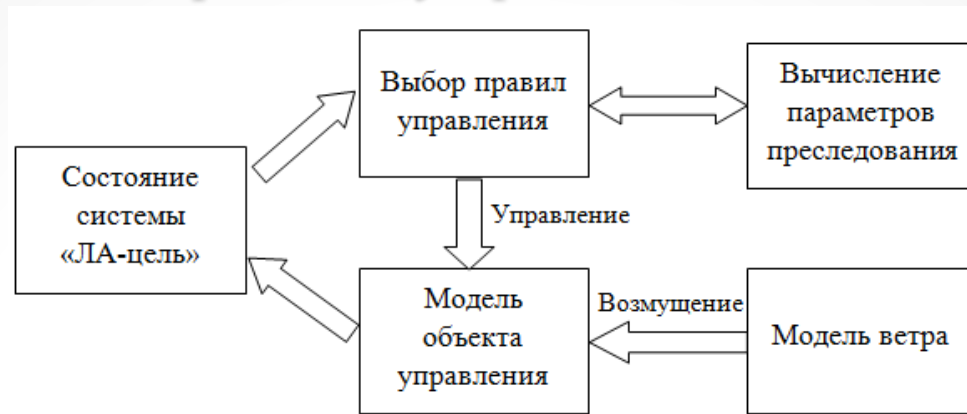


Стратегия цели: двигаться по направлению, определяемому вектором \bar{F}_{res} .

Стратегия преследователей (действует для всех p_i):

1. Если прогнозируемая траектория движения цели пересекается с окружностью Аполлония для p_i , то он должен двигаться в точку встречи.
2. Если пересечение с окружностью Аполлония отсутствует, то p_i двигается с опережением (k шагов) в прогнозируемую точку $(x^{(c)}(t_{i+k}), y^{(c)}(t_{i+k}))$.

Правила управления ЛА



Правила замыкания

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

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

ТО $\theta_i^{(p)}(t) := F_1(d_i(t), x_i^{(p)}(t), y_i^{(p)}(t), x^{(c)}(t), y^{(c)}(t), \theta^{(c)}(t), v_i^{(p)}(t), v^{(c)}(t))$;

ЕСЛИ $(x_i^{(p)}(t), y_i^{(p)}(t), x^{(c)}(t), y^{(c)}(t), \theta^{(c)}(t), v^{(c)}(t))$

ТО $\theta_i^{*(p)}(t) := F_2(x_i^{(p)}(t), y_i^{(p)}(t), x^{(c)}(t), y^{(c)}(t), \theta^{(c)}(t), v^{(c)}(t))$;

ЕСЛИ $(\theta^{(c)}(t), \theta_i^{(w)}(t), v_i^{(p)}(t), v_i^{(w)}(t))$ ТО $\theta_i^{m(p)}(t) := F_3(\theta^{(c)}(t), \theta_i^{(w)}(t), v_i^{(p)}(t), v_i^{(w)}(t))$.

Правила переходов

ЕСЛИ $(x_i^{(p)}(t), v_i^{(w)}(t), \theta_i^{(p)}(t), \theta_i^{(w)}(t))$ ТО $x_i^{(p)}(t + \Delta t) := x_i^{(p)}(t) + v_i^{(p)}(t) \cos(\theta_i^{(p)}(t)) + v_i^{(w)}(t) \cos(\theta_i^{(w)}(t))$;

ЕСЛИ $(y_i^{(p)}(t), v_i^{(w)}(t), \theta_i^{(p)}(t), \theta_i^{(w)}(t))$ ТО $y_i^{(p)}(t + \Delta t) := y_i^{(p)}(t) + v_i^{(p)}(t) \sin(\theta_i^{(p)}(t)) + v_i^{(w)}(t) \sin(\theta_i^{(w)}(t))$;

Правила выбора цели

ЕСЛИ $(d_i(t) > \varepsilon)$ ТО задача «сближение» := «активна», «следование» := «неактивна» ;

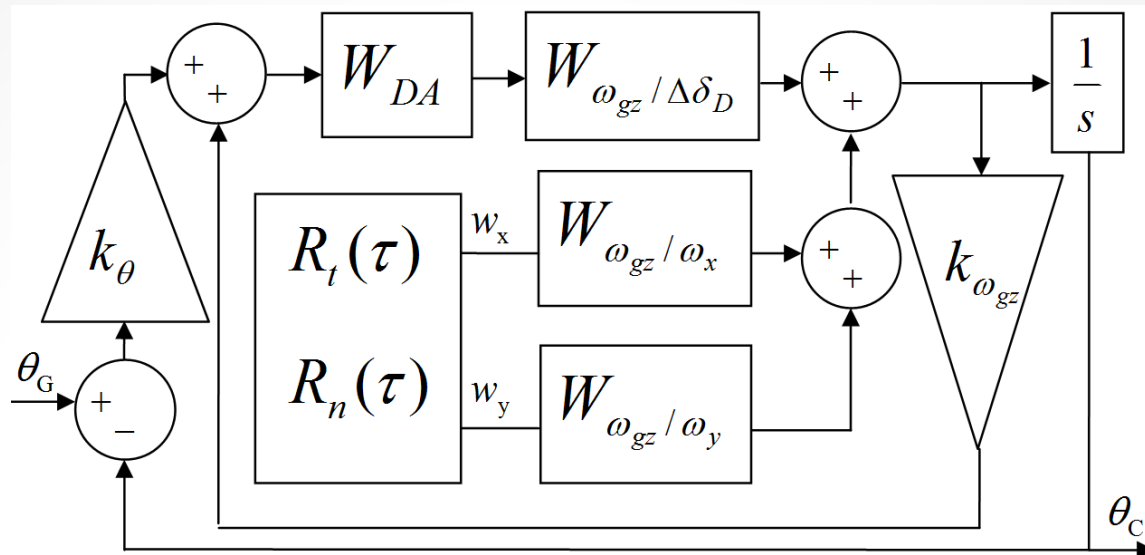
ЕСЛИ $(d_i(t) \leq \varepsilon)$ ТО задача «сближение» := «неактивна», «следование» := «активна».

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

Модель ЛА



θ_3, θ_T – заданное и текущее значение угла тангажа ЛА,

$W_{PB}(s)$ – передаточная функция рулевого привода канала направления,

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

w_x, w_y – составляющие ветра, которые генерируются с помощью корреляционной функции;

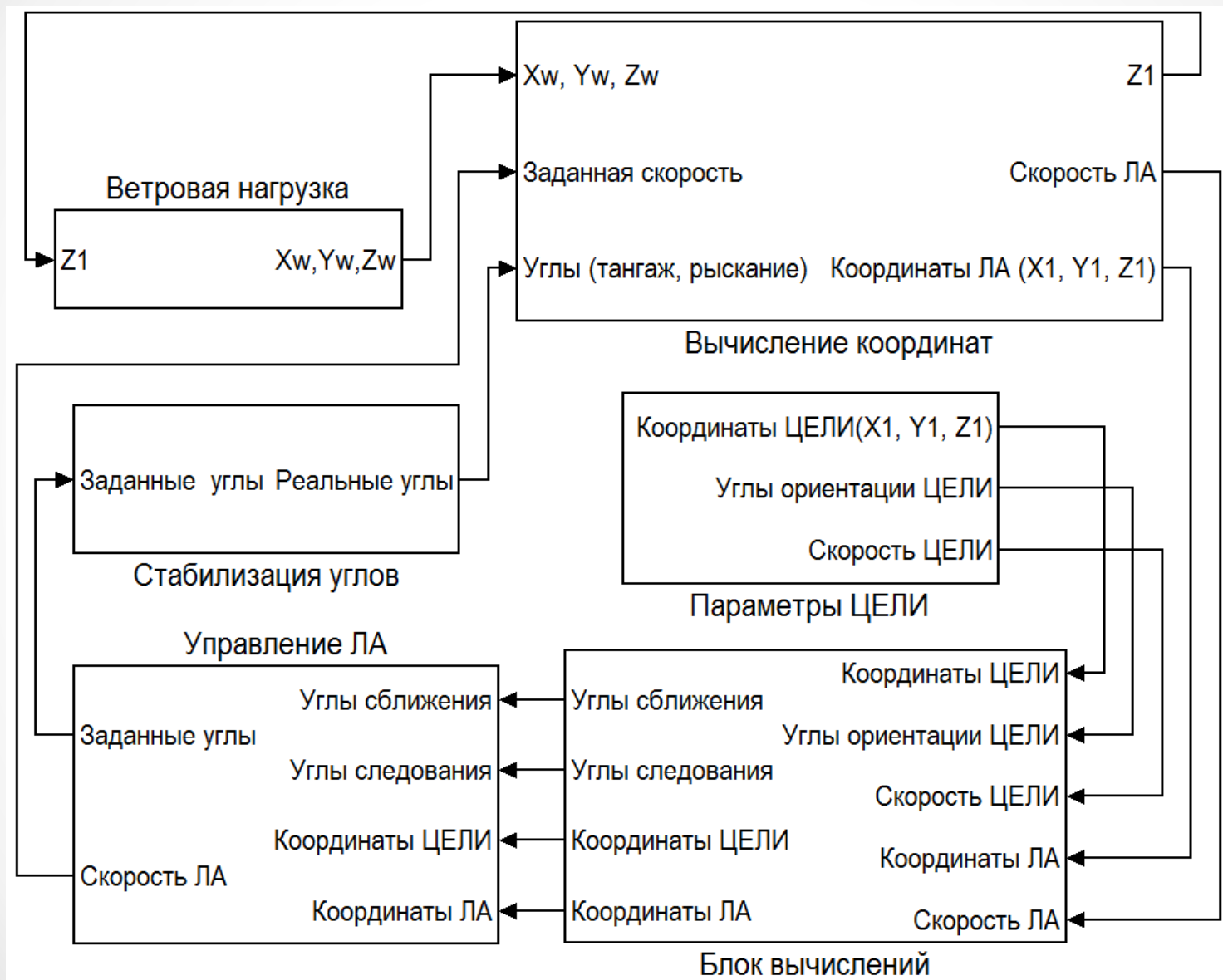
$W_{\omega_{gz} / w_x}, W_{\omega_{gz} / w_y}$ – передаточные функции от ветра к угловым скоростям;

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

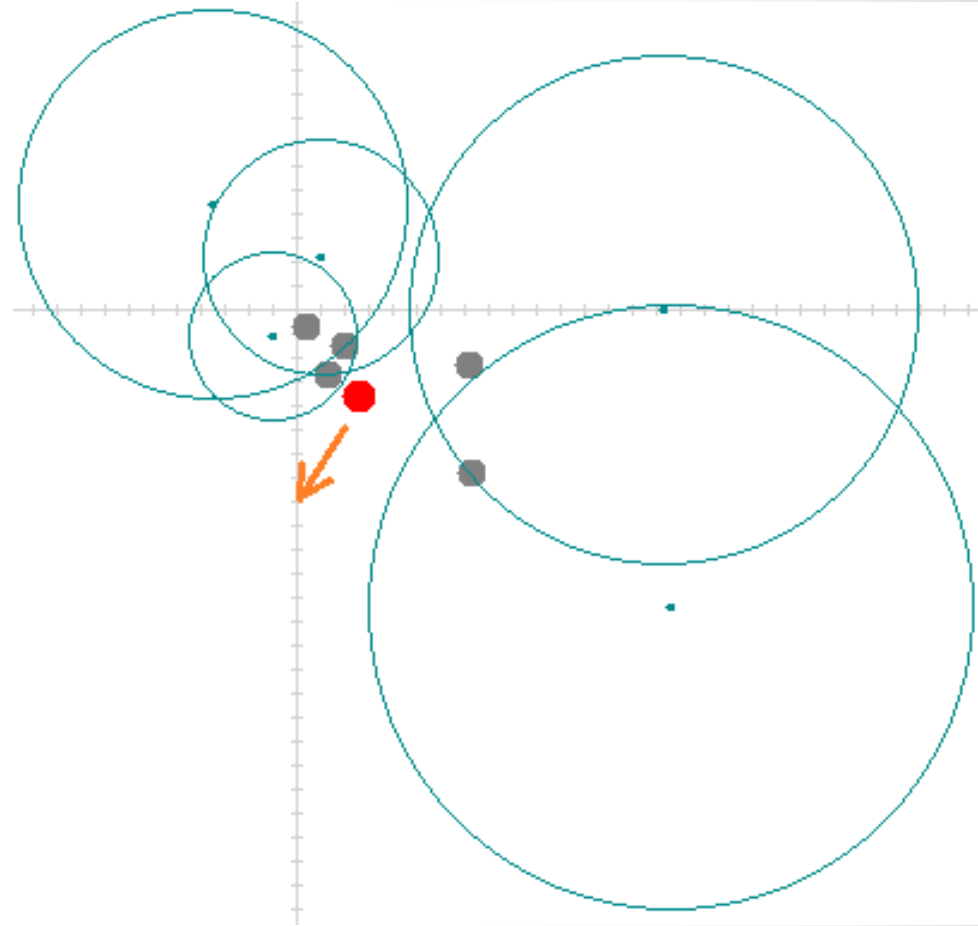
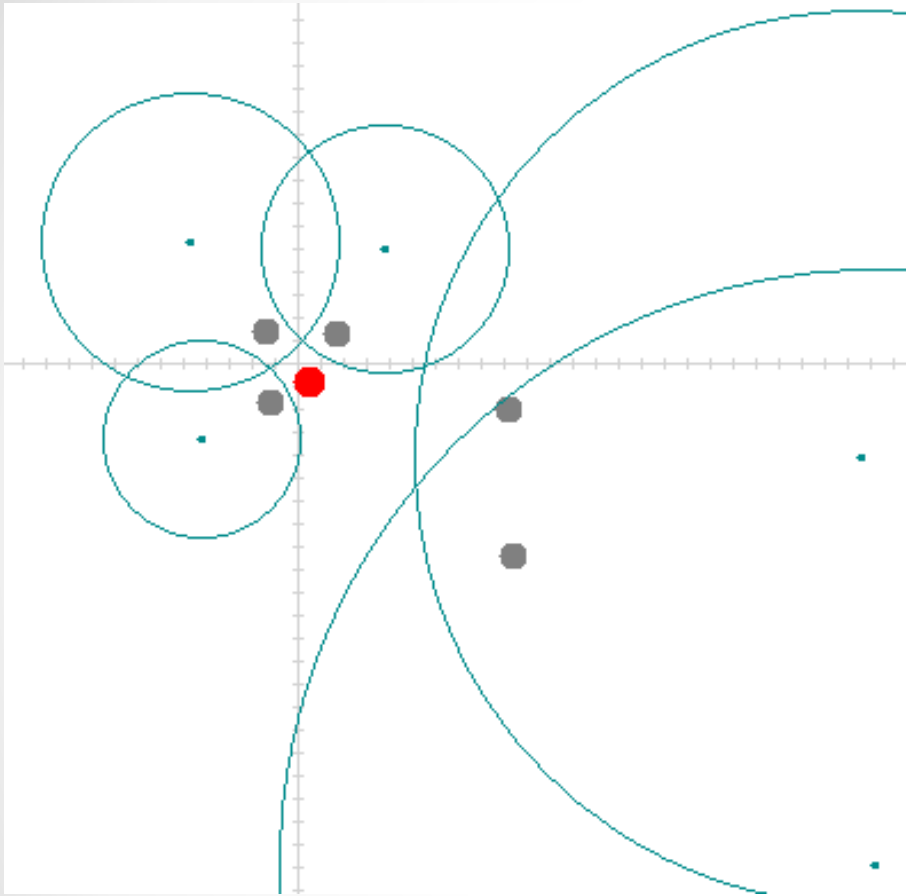
$k_{\omega_{gz}}$ – передаточное число автопилота по угловой скорости тангажа.

$R_t(\tau), R_n(\tau)$ – корреляционной функции, которые моделируют продольные и нормальные ветровые воздействия.

Система моделирования процесса преследования цели



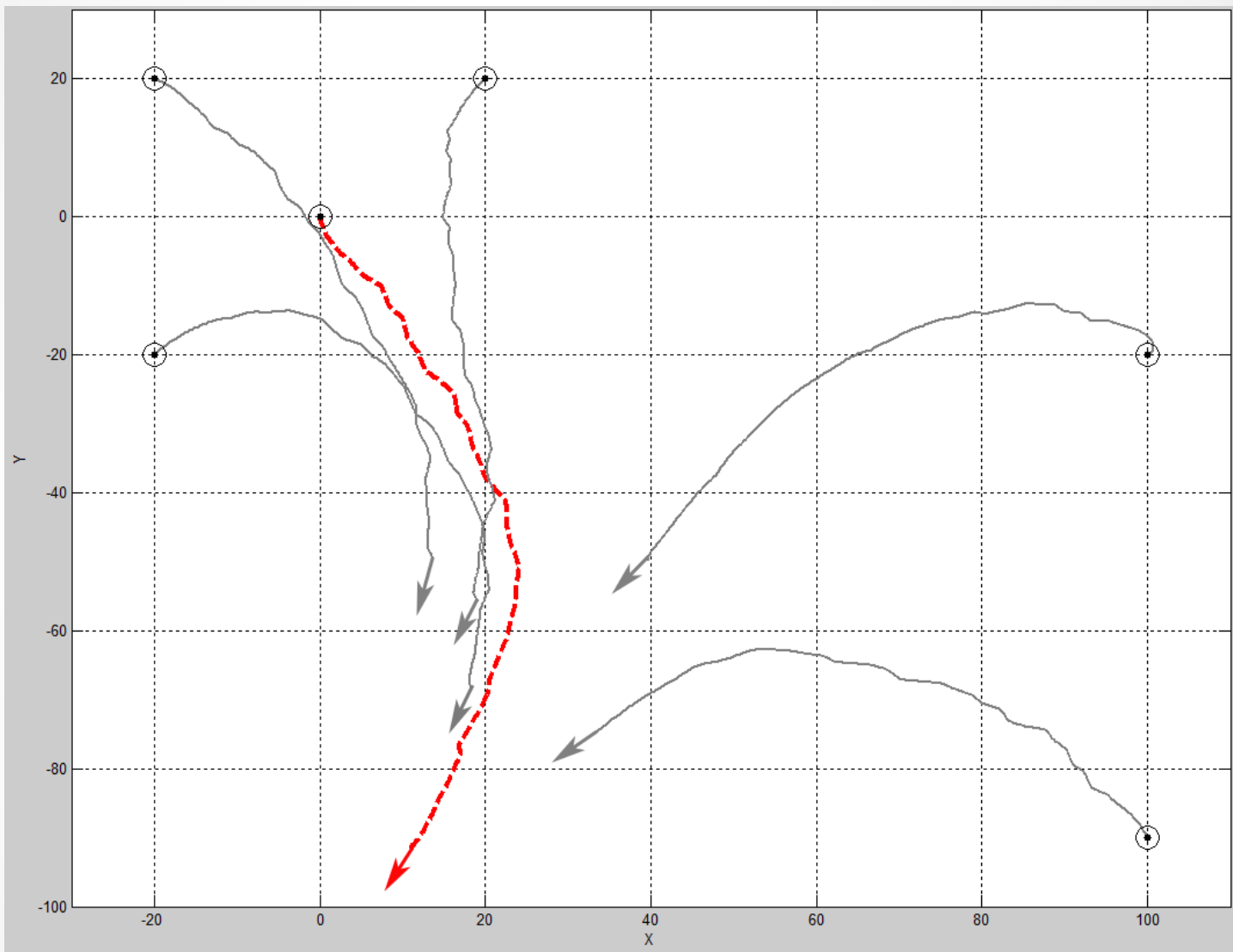
Результаты моделирования задачи захвата цели



а) начало преследования

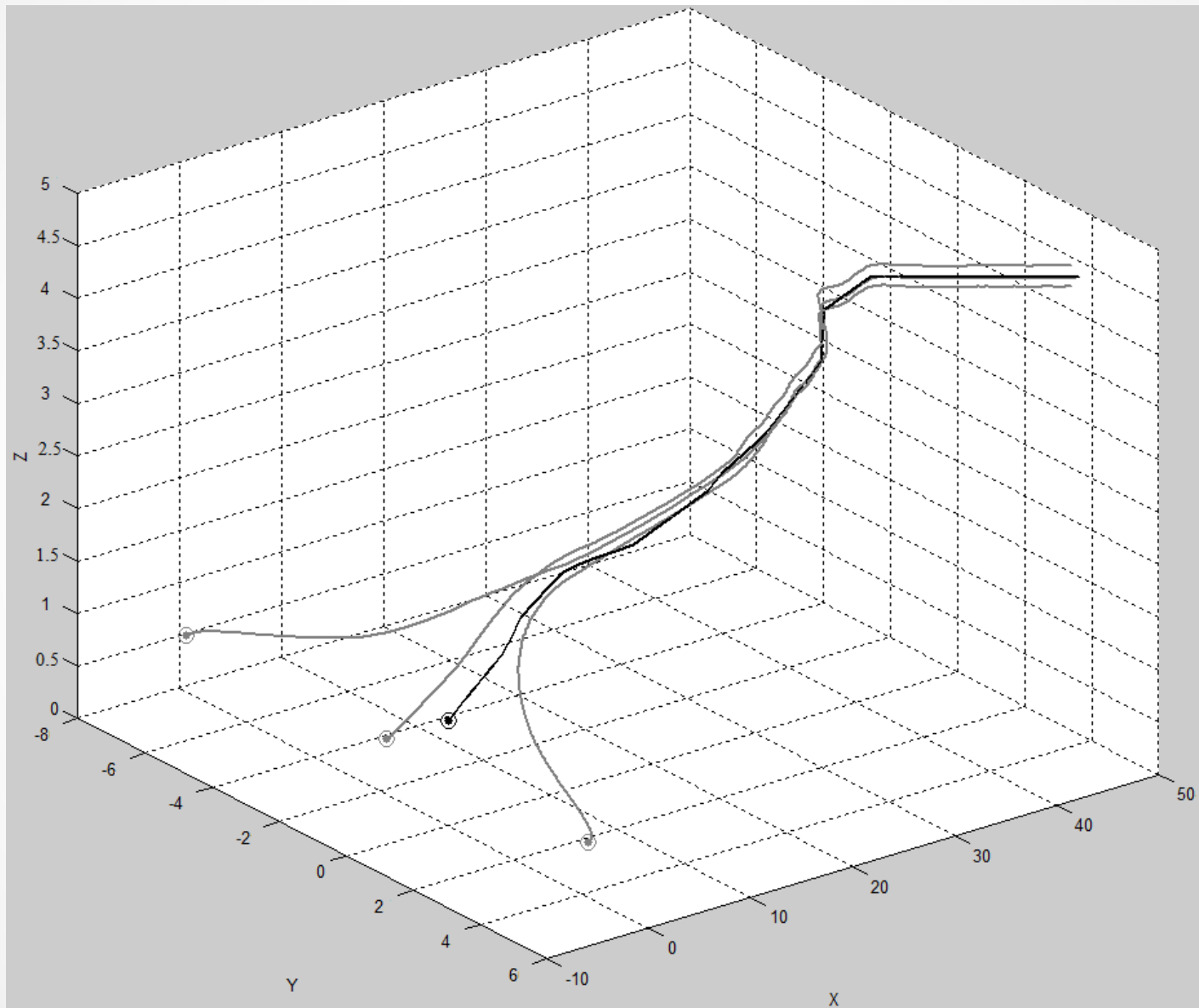
б) завершающая стадия (цель убегает)

Результаты моделирования задачи захвата цели

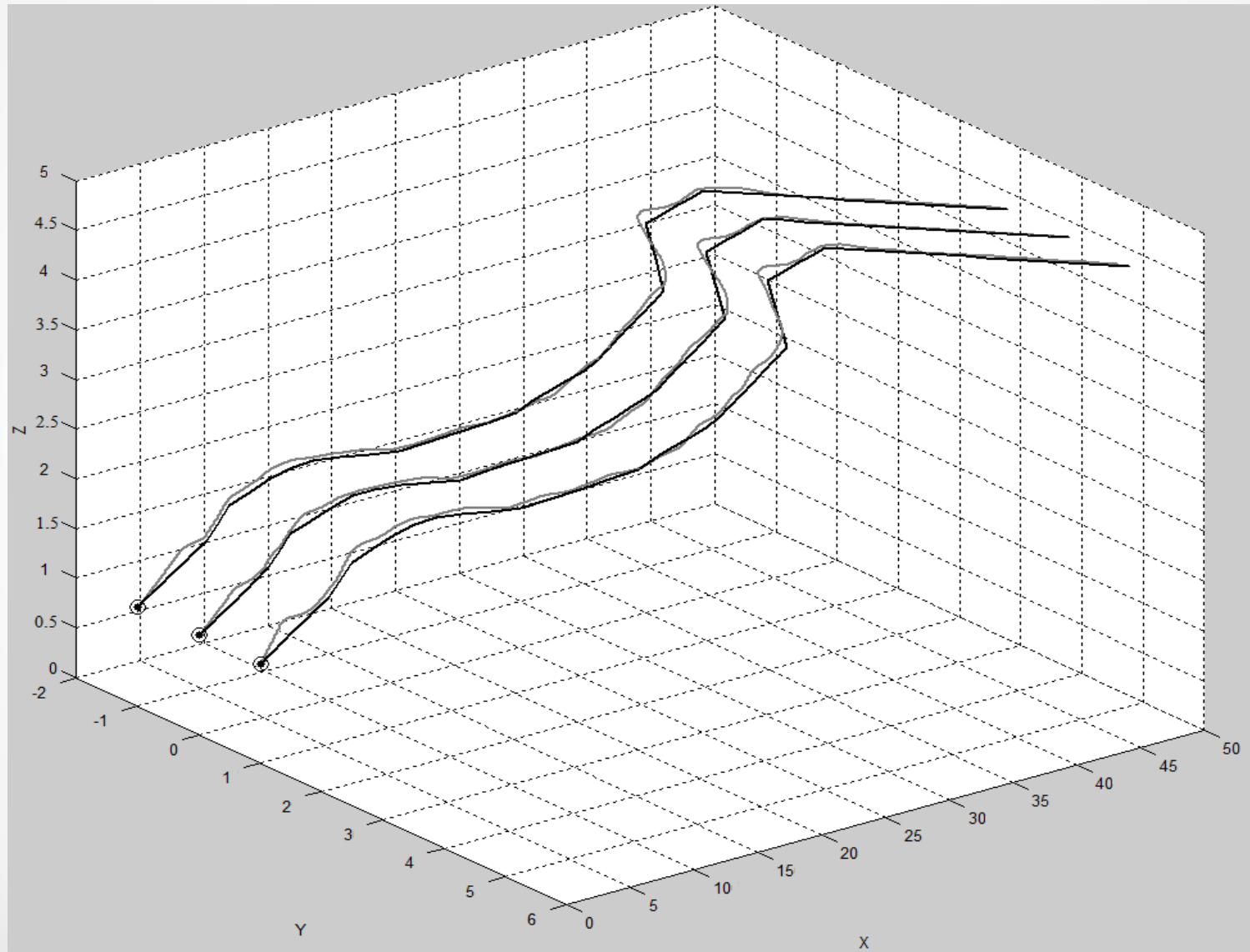


Траектории движения цели и преследователей

Результаты моделирования задачи следования за целью



Результаты моделирования задачи следования по маршруту



Выводы

- Система управления ЛА справляется с поставленной задачей преследования цели (следования по маршруту)
- Показана адекватность разработанного подхода, который может быть использован для получения приемлемого по точности решения поставленных задач в условиях необходимости оперативных действий, вызванных отклонениями при ветровых воздействиях.
- Алгоритмы целесообразно использовать на малых ЛА, имеющих ограниченные возможности бортовой вычислительной аппаратуры.

Список основных публикаций

1. Абрамов Н.С., Хачумов М.В. Моделирование проводки по маршруту беспилотного летательного аппарата как задачи преследования цели. — Авиакосмическое приборостроение, № 9, 2013, с.9-22.
2. Хачумов М.В. Управление группой беспилотных летательных аппаратов, основанное на продукционных правилах. – Материалы 4-й научно-практической конференции «Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики». , 2014, с. 249-254.
3. Хачумов М.В. Задача автоматического управления летательным аппаратом в процессе преследования цели. – Программные системы: теория и приложения, 2014, №5, с.67-77
4. 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
5. Хачумов М.В. Решение задачи следования за целью автономным летательным аппаратом. – Искусственный интеллект и принятие решений, 2015, № 2, с.45-52
6. Хачумов М.В. Задачи группового преследования цели в условиях возмущений. – Искусственный интеллект и принятие решений, 2016, № 2, с.46-54

Дополнительные материалы

Модель ЛА

Передаточные функции от управляющего воздействия руля высоты δ_B и составляющих ветра w_x и w_y к угловой скорости тангажа ω_{gz} :

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

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

$$T = \frac{1}{\sqrt{c_{\dot{y}} \frac{V_b}{57,3} + b_{\dot{y}} c_{\dot{\delta}}}}, \quad \zeta = \frac{c_{\dot{\delta}} + b_{\dot{y}} + c_{\dot{y}} \frac{V_b}{57,3}}{2\sqrt{c_{\dot{y}} \frac{V_b}{57,3} + b_{\dot{y}} c_{\dot{\delta}}}}, \quad T_1 = \frac{1}{b_{\dot{y}}}, \quad k_c = \frac{-c_{\dot{\delta}} b_{\dot{y}}}{c_{\dot{y}} \frac{V_b}{57,3} + b_{\dot{y}} c_{\dot{\delta}}}.$$

$R_t(\tau) = \sigma_t^2 \exp^{-|V|\tau/L}$, $R_n(\tau) = \sigma_n^2 (1 - 0,5|V|\tau/L) \exp^{-V\tau/L}$, где $|V|$ – модуль средней воздушной скорости ЛА, σ_t – среднеквадратичное значение продольной и поперечной составляющих ветра (проекций на оси x_G , z_G), σ_n – среднеквадратичное значение нормальной составляющей ветра (проекций на ось y_G), τ – период генерации порывов ветра, L – масштаб турбулентности.

$W_{PB}(s) = \frac{1}{T_{PB}s + 1}$ – передаточная функция рулевого привода (апериодического звена 1-го

порядка);

График изменения угла тангажа ЛА для задачи следования за целью

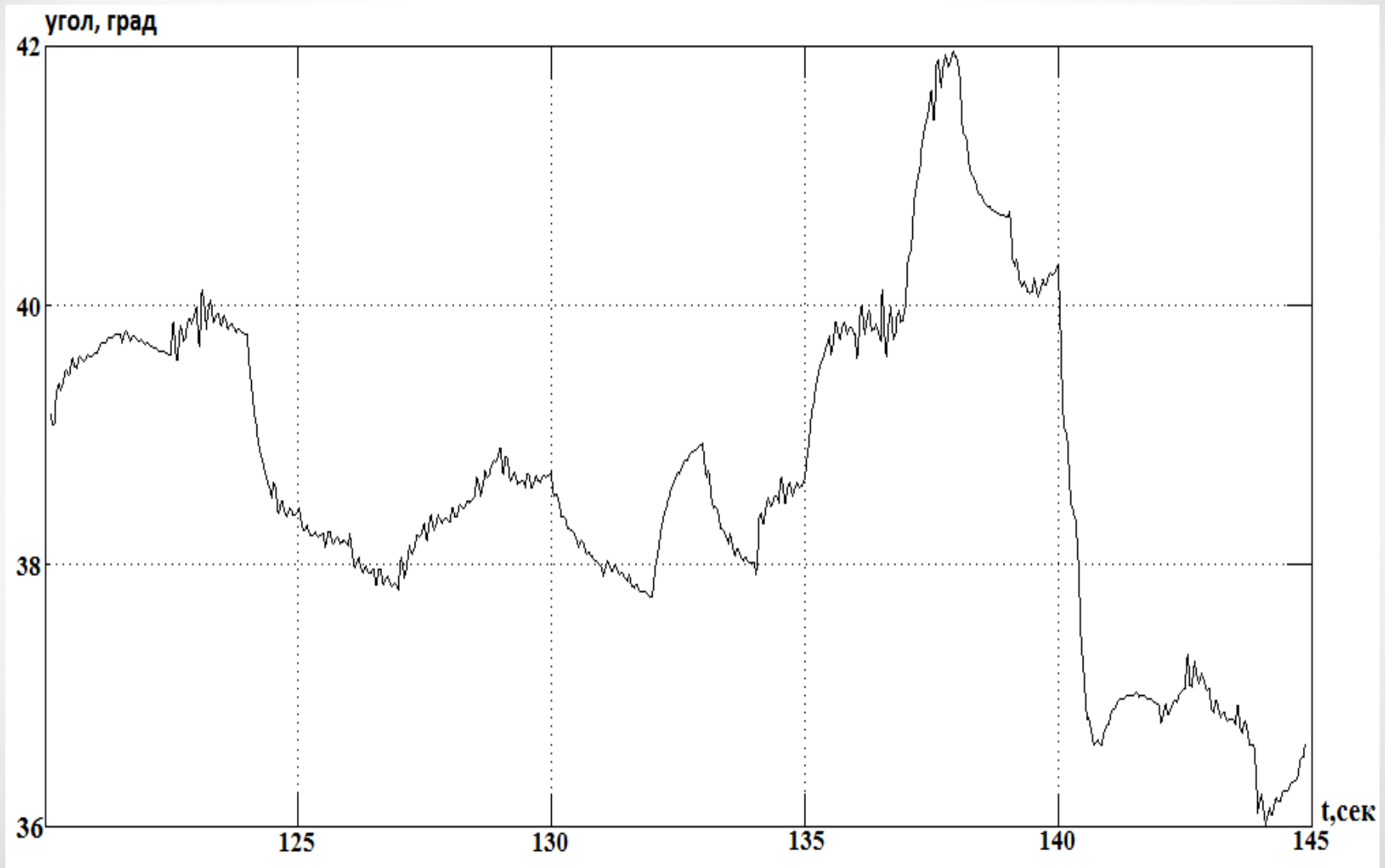


График изменения скорости ЛА для задачи следования за целью

