

*Разработка программного комплекса
моделирования и визуализации
движения беспилотных летательных
аппаратов*

Дербенев Леонид Олегович, МЕН-400101

Научный руководитель: Кумков Сергей Сергеевич

*Департамент математики, механики и компьютерных наук
ИЕиМ УрФУ*

14 июня 2024 г.

В настоящее время активно развивается движение гражданских БПЛА.

Конфликтов БПЛА и больших самолётов почти не возникает.

Движение БПЛА не диспетчеризируется централизованно.

Во время полета БПЛА сообщает в эфир в виде широковещательных пакетов информацию о собственном движении: текущие положение и скорость, краткосрочный прогноз движения.

Важной является разработка алгоритмов для автоматической выработки манёвров, разрешающих возникающие конфликтные ситуации с другими летательными аппаратами.

Цель работы — создание моделирующего программного комплекса, включающего реализации основных моделей движения БПЛА, модели радиообменов и процедур обнаружения конфликтов.

Входная информация:

- набор данных о каждом БПЛА: тип динамики, параметры динамики, полетный план;
- параметры интегрирования движения БПЛА: шаг интегрирования, шаг записи информации о положении БПЛА в выходной файл.

Предполагаем, что на каждом отрезке полетного плана движение БПЛА равномерное прямолинейное.

Материальная точка

Материальная точка имеет следующую модель движения:

$$\ddot{r} = m \cdot u,$$

где $r = (x, y, z)^T$ — радиус-вектор положения объекта, $u = (u_x, u_y, u_z)^T$ — управление, являющееся ускорением, m — масса точки.

Покоординатная запись:

$$\ddot{x} = u_x, \quad \ddot{y} = u_y, \quad \ddot{z} = u_z.$$

Запись, включающая скорости:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= V_x, & \dot{y} &= V_y, & \dot{z} &= V_z, \\ \dot{V}_x &= u_x, & \dot{V}_y &= u_y, & \dot{V}_z &= u_z. \end{aligned}$$

Ограничение на управление: $\|u\| \leq u_{\max}$

Коптер имеет следующую модель:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= V_x, & \dot{y} &= V_y, & \dot{z} &= V_z, \\ \dot{V}_x &= \frac{u_x - V_x}{l_{xz}}, & \dot{V}_y &= \frac{u_y - V_y}{l_y}, & \dot{V}_z &= \frac{u_z - V_z}{l_{xz}}.\end{aligned}$$

Здесь $u = (u_x, u_y, u_z)^\top$ — управление, командный сигнал скорости, имеющий смысл желаемой скорости по каждой из координат; l_{xz} , l_y — коэффициенты, описывающие инерционность выхода на выбранный уровень скорости: выход осуществляется за время порядка $3l$.

Ограничение на управление: $\|(u_x, u_z)\| \leq u_{\text{гор}}^{\max}$, $|u_y| \leq u_{\text{верт}}^{\max}$

В силу вида динамики имеется ограничение на максимальную скорость.

$$\dot{x} = V_{\text{гор}} \cos \psi,$$

$$\dot{z} = V_{\text{гор}} \sin \psi,$$

$$\dot{y} = V_{\text{верт}},$$

$$\dot{\psi} = \frac{\beta_{\text{бок}}}{V_{\text{гор}}} u_{\text{бок}}, \quad |u_{\text{бок}}| \leq 1,$$

$$\dot{V}_{\text{гор}} = a, \quad a_{\min} \leq a \leq a_{\max}, \quad V_{\text{гор}}^{\min} \leq V_{\text{гор}} \leq V_{\text{гор}}^{\max},$$

$$\dot{V}_{\text{верт}} = u_{\text{верт}}, \quad u_{\text{верт}}^{\min} \leq u_{\text{верт}} \leq u_{\text{верт}}^{\max}, \quad V_{\text{верт}}^{\min} \leq V_{\text{верт}} \leq V_{\text{верт}}^{\max}.$$

Здесь ψ — угол курса; $u_{\text{бок}}$ — ускорение, управляющее разворотом курса; $u_{\text{верт}}$ — ускорение (создаваемое изменением скорости вращения винтов), управляющее вертикальной скоростью; a — ускорение, управляющее величиной горизонтальной скорости (продольное); $\beta_{\text{бок}}$ — коэффициент горизонтальной маневренности судна.

Можно заменить управление скоростями через ускорения управлением через командный сигнал.

$$\dot{x} = V \cos \theta \cos \psi,$$

$$\dot{z} = V \cos \theta \sin \psi,$$

$$\dot{y} = V \sin \theta,$$

$$\dot{\theta} = \frac{\beta_{\text{верт}}}{V} u_{\text{верт}},$$

$$\dot{\psi} = \frac{\beta_{\text{бок}}}{V} u_{\text{бок}},$$

$$|u_{\text{верт}}| \leq 1, \quad |u_{\text{бок}}| \leq 1,$$

$$\dot{V} = a, \quad a_{\min} \leq a \leq a_{\max}, \quad V_{\min} \leq V \leq V_{\max}.$$

Здесь θ — угол тангажа, ψ — угол курса; $u_{\text{верт}}$, $u_{\text{бок}}$ — ускорения, управляющие углами тангажа и курса; a — ускорение, управляющее скоростью; $\beta_{\text{верт}}$, $\beta_{\text{бок}}$ — коэффициенты маневренности судна.

Можно заменить управление скоростью через ускорение управлением через командный сигнал.

$$u(t) = P + I + D = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^T e(t) d\tau + K_d \frac{de}{dt},$$

где K_p , K_i , K_d — коэффициенты усиления пропорциональной, интегрирующей и дифференцирующей составляющих.

В данной работе был использован линейный пропорциональный регулятор, то есть $u = Kx$, где $K \in R^{m \times n}$. Теперь задача имеет вид:

$$\dot{x} = Ax + BKx = (A + BK)x$$

Данная система является устойчивой $\iff \forall \lambda$ — собственное значение, выполняется: $\text{Re } \lambda < 0$.

В данной работе будем использовать только пропорциональный регулятор:

$$u = -k_x \cdot (x - x_w) - k_V \cdot (V_x - V_{x,w}),$$

где x_w — желаемое значение координаты в текущий момент,
 $V_{x,w}$ — желаемое значение скорости.

Наивная прокладка

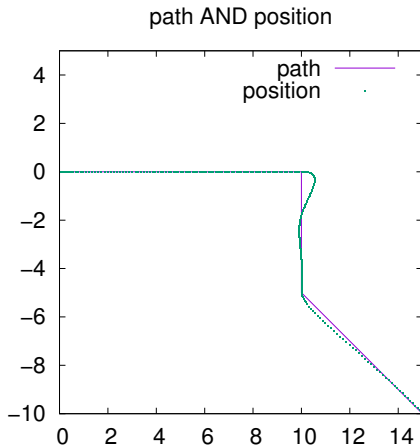
Вычисление движения по пути происходит методом эйлера на левый край.

Точка прицеливания идет по номинальному полетному плану.

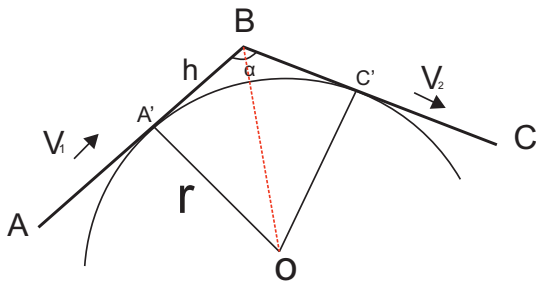
Наивная прокладка

Вычисление движения по пути происходит методом эйлера на левый край.

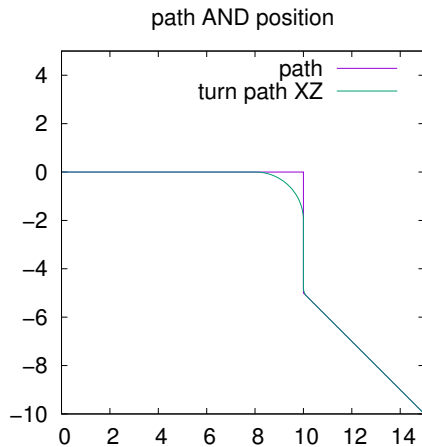
Точка прицеливания идет по номинальному полетному плану.



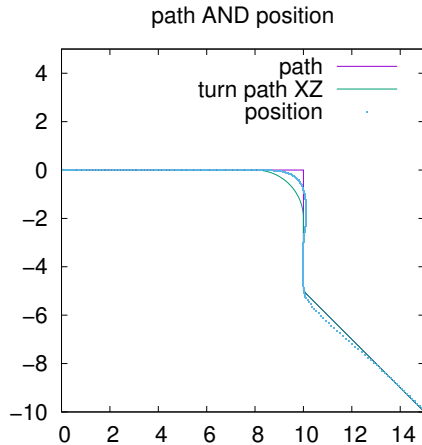
Прокладка по дуге окружности

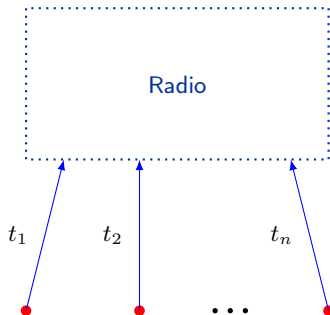


Прокладка по дуге окружности



Прокладка по дуге окружности



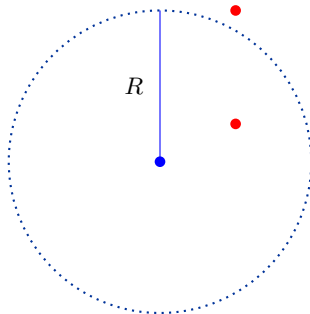


t_i — такт вещания текущей позиции.

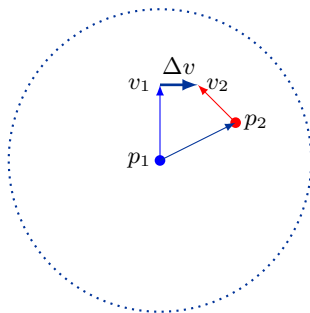
Краткосрочный прогноз движения вещается по достижению очередной контрольной точки.

Этапы обнаружения конфликта

- Проверка расстояния
- Проверка скорости сближения
- Вычисление промежутка конфликта

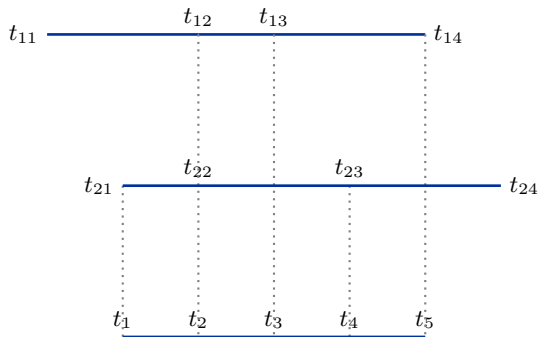


R — радиус фильтрации.



$$(p_2 - p_1, v_2 - v_1) > 0,$$

где p_1, p_2 — точки позиций в пространстве первого и второго судна соответственно, v_1, v_2 — векторы скорости первого и второго судна соответственно.



Вычисление промежутка конфликта

Защитный объем — область пространства вокруг ЛА, в которой не должно быть других ЛА. Чаще всего выбирается в виде кругового цилиндра с центром, совпадающим с положением ЛА, радиусом R_{30} и полувысотой H_{30} .

$$\begin{aligned}\|(x_1(t), z_1(t))^T - (x_2(t), z_2(t))^T\| &\leq R_{30}, \\ |y_1(t) - y_2(t)| &\leq H_{30}, \\ t &\in [t_i, t_{i+1}]\end{aligned}$$

Разработаны процедуры моделирования движения летательного аппарата вдоль заданного маршрута.

Разработанные процедуры реализованы в виде программного комплекса на языке C++.

В дальнейшем в этот комплекс можно встраивать и тестировать те или иные алгоритмы выработки манёвров уклонения с целью оценки их качества.

Спасибо за внимание!