

КОНСТРУИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ВСТРЕЧИ В БАЗАХ ЗНАНИЙ БОРТОВЫХ ОПЕРАТИВНО-СОВЕТУЮЩИХ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМАХ ЭТАПА ПОЛЕТА

© 2022 г. С. К. Галиханов^{а,*}, Б. Е. Федунов^{а, б,**}, М. А. Шигина^{а,***}

^а МАИ (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

^б ГНЦ ФГУП ГосНИИАС, Москва, Россия

*e-mail: galikbwat@gmail.com

**e-mail: boris_fed@gosniias.ru

***e-mail: shiginamarina@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

После доработки 16.11.2021 г.

Принята к публикации 31.01.2022 г.

Предлагается новый алгоритм конструирования траектории встречи самолета с другим летательным аппаратом, летящим по прямолинейной траектории с меньшей скоростью. Траектория формируется для профиля полета “набор высоты—полет на заданной высоте (полка)—снижение на точку встречи”. Необходимые характеристики этапов “набор высоты”, “полка” и “снижение” для конструирования траектории до момента встречи определяются в результате обработки летного эксперимента.

DOI: 10.31857/S0002338822030076

Введение. В базе знаний некоторых бортовых оперативно-советующих экспертных систем (БОСЭС) — этапа полета требуется сконструировать траекторию встречи истребителя (ИС) с ударным самолетом (УС), летящим на постоянной высоте с постоянным вектором скорости [1].

Траекторию встречи следует определять в классе траекторий со следующими характеристиками: траектория имеет профиль — “набор заданной высоты (высота “полки”)—полет на “полке”—снижение на высоту полета УС”;

начальная и конечная высота ИС равна высоте УС;

проекция траектории ИС на горизонтальную плоскость является прямой линией.

Приводятся процедуры конструирования названных типов траекторий и результаты математического моделирования имитационного моделирования работы фрагмента базы знаний БОСЭС, который реализован в программно-математическом комплексе (ПМК).

1. Постановка задачи конструирования траекторий встречи. Введем прямоугольную систему координат на горизонтальной плоскости полета УС (рис. 1). Вертикальная ось OZ направлена параллельно траектории УС, горизонтальная ось OX — от ИС, находящегося слева от УС, в сторону УС. Начало координат выбрано слева от ИС и ниже его. Отметим начальное расположение ИС (находится в точке A) и УС (находится в точке B).

Спроектируем на горизонтальную плоскость траекторию ИС (отрезок AC) и отметим:

в начале этой проекции проекцию участка траектории набора ИС высоты “полки”, обозначив его S_1 , и зафиксируем для него время набора высоты Δt_1 ;

в конце этой проекции проекцию участка траектории снижения ИС с высоты “полки” на высоту УС, обозначив его S_2 , и зафиксируем для этого участка полета время снижения Δt_2 .

Найдем соответствующие длины траекторий УС: $S_{12} = V_{УС}\Delta t_1$ и $S_{22} = V_{УС}\Delta t_2$, отложив в начале траектории УС отрезок S_{12} (на рис. 1 отрезок BB_1) и в конце траектории УС в окрестности точки встречи — отрезок S_{22} (отрезок C_1C).

Определение длины проекции на горизонтальную плоскость участка траектории полета ИС на “полке” (искомое время полета ИС на “полке” обозначим через τ) и длины соответствующего

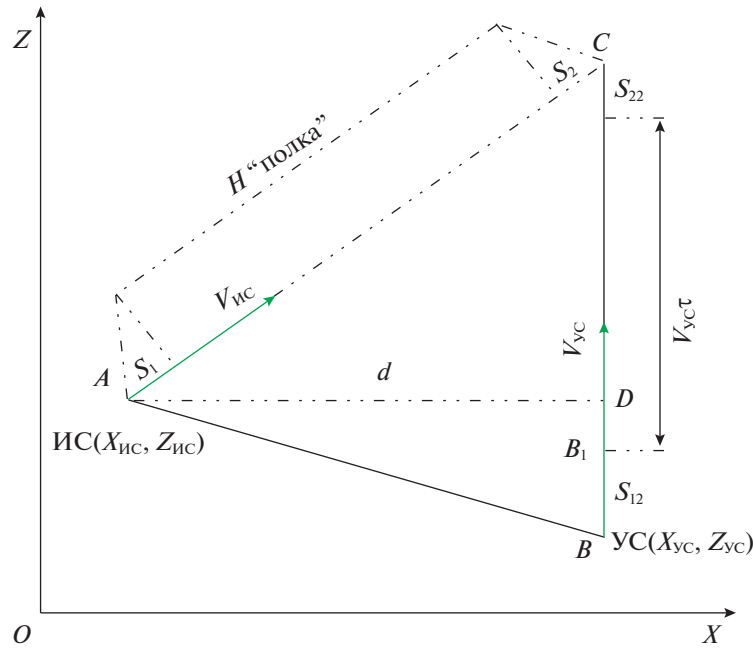


Рис. 1. Расположение ИС и УС и их траекторий встречи

ему участка B_1C_1 траектории УС проведем, используя прямоугольный треугольник ACD , полученный при проектировании точки A на траекторию УС.

Использование прямоугольного треугольника (“треугольника τ ”) для определения длин упомянутых отрезков зависит от взаимного начального расположения ИС и УС и расположения точек B_1 и D .

Из прямоугольного треугольника ACD , учитывая $AC^2 = AD^2 + DC^2$, находим:

$$\begin{aligned} AC &= (S_1 + S_2) + V_{ИС}\tau, \\ AD &= X_{УС} - X_{ИС} = d, \\ DC &= S_{22} + V_{УС}\tau + B_1D. \end{aligned} \tag{1.1}$$

В таком случае время полета ИС на “полке” τ определим из решения соответствующего квадратного уравнения $a\tau^2 + b\tau + c = 0$ полученного из $AC^2 = AD^2 + DC^2$ и с учетом системы (1.1). Далее вычисляются корни квадратного уравнения $\tau_{1,2}$ и выбирается наименьший положительный.

Причем координаты точки встречи ИС с УС соответственно равны:

$$\begin{aligned} X_{т.в} &= X_{УС}; \\ Z_{т.в} &= Z_{УС} + S_{12} + V_{УС}\tau + S_{22}. \end{aligned} \tag{1.2}$$

Время полета ИС до встречи с УС соответствует сумме времени выхода ИС на заданную “полку” Δt_1 , времени полета на “полке” τ , времени Δt_2 снижения ИС на высоту УС. Заметим, что в описанных вычислениях не используется математическая модель ИС на этапах “набор высоты” и “спуск”. Необходимые для расчетов проекции длины участков S_1, S_2 и минимального времени ИС для прохождения этих этапов Δt_1 могут быть получены на основании результатов летных испытаний.

2. Формирование исходных данных для конструирования траекторий ИС. Пусть заданы экспериментальные зависимости траектории ИС типа “набор заданной высоты – полет на заданной высоте – снижение”: изменение высоты полета по времени полета и изменение скорости полета по этой траектории по времени полета (зависимости взяты из [2]).

На рис. 2 представлены графики зависимости скорости и высоты полета от времени для траектории самолета, проекция которой на горизонтальную плоскость X, Z – прямая линия, а

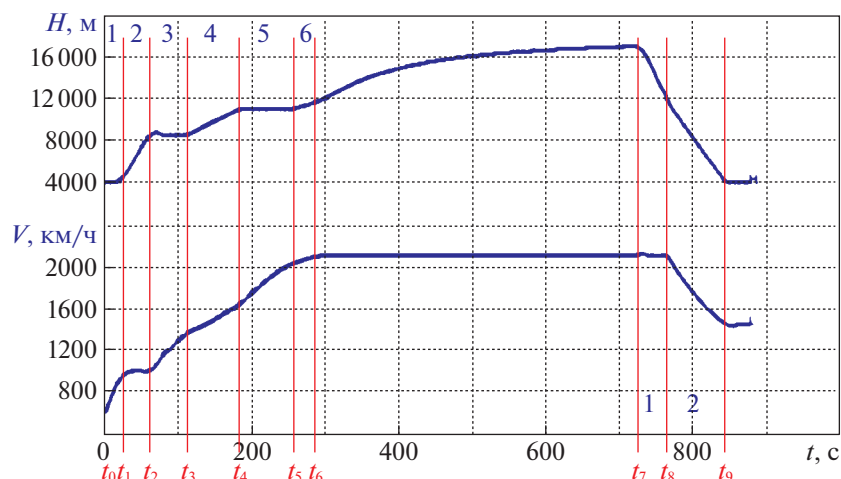


Рис. 2. Зависимости скорости и высоты от времени для траектории встречи ИС с УС (зависимости взяты из [2])

проекция траектории на вертикальную плоскость состоит из участков: полет на начальной высоте H_0 , набор заданной высоты (высота “полки”), полет на заданной высоте с постоянной скоростью (полет на “полке”), спуск на начальную высоту H_0 .

Для конструирования в базах знаний БОСЭС-этапов полета таких траекторий удобно аппроксимировать экспериментальные траектории следующим образом: участки набора и спуска представлять временем выполнения участков и проекцией их длины на горизонтальную плоскость, участок полета на “полке” считать выполняемым с постоянной вертикальной скоростью, время участка снижения совпадает с экспериментальным.

Разобьем временную ось экспериментальных зависимостей на отрезки, на которых вертикальная скорость самолета V_y не изменяется (нулевая или постоянная с любым знаком), а скорость по траектории V или не изменяется, или изменяется по линейному закону.

На каждом таком временном участке определим проекцию скорости самолета V_{xz} на горизонтальную плоскость и рассчитаем: (1) длину горизонтальной проекции траектории самолета, соответствующей этому временному участку, и (2) время прохождения самолетом этого участка.

Суммируя длины и продолжительности всех временных участков на наборе высоты, получим необходимые в базе знаний бортовой интеллектуальной системы (БИС) полетного задания длину проекции траектории набора высоты на горизонтальную плоскость и время набора. Аналогично определим эти величины и для траектории спуска.

Этап “Набор высоты” состоит из нескольких участков.

Участок 1, $t \in [t_1, t_2]$:

$$V_{y2} = \frac{H_2 - H_1}{t_2 - t_1} = \frac{8000 - 4000}{60 - 20} = 100 \text{ м/с,}$$

$$V_{xz2} = \sqrt{V_2^2 - V_{y2}^2} = \sqrt{(1000 \cdot 0.2778)^2 - 100^2} = 259 \text{ м/с,}$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_1 = 60 - 20 = 40 \text{ с,}$$

$$\Delta S_2 = V_{xz} \Delta t_2 = 259 \cdot 40 = 10360 \text{ м.}$$

Участок 2, $t \in [t_2, t_3]$:

$$V_{y3} = \frac{H_3 - H_2}{t_3 - t_2} = 0 \text{ м/с,}$$

$$V_{xz3} = \sqrt{V_3^2 - V_{y3}^2} = \sqrt{(1400 \cdot 0.2778)^2 - 0} = 388.92 \text{ м/с,}$$

$$\Delta t_3 = t_3 - t_2 = 110 - 60 = 50 \text{ с,}$$

$$\Delta S_3 = \frac{(V_{xz3} + V_{xz2})}{2} \Delta t_3 = \frac{388.92 + 259}{2} 50 = 16198 \text{ м.}$$

Участок 3, $t \in [t_{3.2}, t_4]$:

$$V_{y4} = \frac{H_4 - H_3}{t_4 - t_3} = \frac{11000 - 8000}{180 - 110} = 42.85 \text{ м/с,}$$

$$V_{xz4} = \sqrt{V_4^2 - V_{y4}^2} = \sqrt{(1600 \cdot 0.2778)^2 - 42.85^2} = 442.4 \text{ м/с,}$$

$$V_{xz3} = \sqrt{V_3^2 - V_{y4}^2} = \sqrt{(1400 \cdot 0.2778)^2 - (42.85)^2} = 386.55 \text{ м/с,}$$

$$\Delta t_4 = t_4 - t_3 = 180 - 110 = 70 \text{ с,}$$

$$\Delta S_4 = \frac{(V_{xz3} + V_{xz4})}{2} \Delta t_4 = \frac{442.2 + 386.55}{2} 70 = 29006.3 \text{ м.}$$

Участок 4, $t \in [t_4, t_5]$:

$$V_{y5} = \frac{H_5 - H_4}{t_5 - t_4} = 0 \text{ м/с,}$$

$$V_{xz5} = \sqrt{V_5^2 - V_{y5}^2} = \sqrt{(2000 \cdot 0.2778)^2 - 0} = 555.56 \text{ м/с,}$$

$$\Delta t_5 = t_5 - t_4 = 250 - 180 = 70 \text{ с,}$$

$$\Delta S_5 = \frac{(V_{xz5} + V_{xz4})}{2} \Delta t_5 = \frac{555.56 + 442.4}{2} 70 = 34928.6 \text{ м.}$$

Участок 5, $t \in [t_5, t_6]$:

$$V_{y6} = \frac{H_6 - H_5}{t_6 - t_5} = \frac{12000 - 11000}{290 - 250} = 25 \text{ м/с,}$$

$$V_{xz6} = \sqrt{V_6^2 - V_{y6}^2} = \sqrt{(2100 \cdot 0.2778)^2 - 25^2} = 582.84 \text{ м/с,}$$

$$V_{xz5} = \sqrt{V_5^2 - V_{y6}^2} = \sqrt{(2000 \cdot 0.2778)^2 - (25)^2} = 555.03 \text{ м/с,}$$

$$\Delta t_6 = t_6 - t_5 = 290 - 250 = 25 \text{ с,}$$

$$\Delta S_6 = \frac{V_{xz6} + V_{xz5}}{2} \Delta t_6 = \frac{582.84 + 555.03}{2} 25 = 14223.5 \text{ м.}$$

Итог по этапу “Набор высоты”:

$$\Delta t_{\text{наб}} = \sum_{i=1}^6 \Delta t_i = 255 \text{ с,}$$

$$S_{\text{наб}} = \sum_{j=1}^6 \Delta S_j = 104716.4 \text{ м.}$$

Этап “Полка”, $t \in [t_6, t_7]$:

$$V_{y6} = \frac{H_6 - H_5}{t_6 - t_5} = \frac{12000 - 11000}{290 - 250} = 25 \text{ м/с,}$$

$$V_{xz6} = \sqrt{V_6^2 - V_{y6}^2} = \sqrt{(2100 \cdot 0.2778)^2 - 25^2} = 582.84 \text{ м/с,}$$

$$V_{y7} = \frac{H_7 - H_8}{t_8 - t_7} = \frac{16100 - 12000}{780 - 720} = 68.3 \text{ м/с,}$$

$$V_{xz7} = \sqrt{V_8^2 - V_{y7}^2} = \sqrt{(2100 \cdot 0.2778)^2 - 68.3^2} = 579.37 \text{ м/с,}$$

$$\Delta t_7 = 720 - 290 = 430 \text{ с,}$$

$$\Delta S = \frac{V_{xz6} + V_{xz7}}{2} \Delta t_7 = \frac{582.84 + 579.37}{2} \cdot 430 = 249875.15 \text{ м.}$$

Этап “Снижение” состоит из двух участков.

Участок 1:

$$V_{y1} = \frac{H_7 - H_8}{t_8 - t_7} = \frac{16100 - 12000}{780 - 720} = 68.3 \text{ м/с,}$$

$$V_{xz1} = \sqrt{V_8^2 - V_{y1}^2} = \sqrt{(2100 \cdot 0.2778)^2 - 68.3^2} = 579.37 \text{ м/с,}$$

$$\Delta t_1 = t_5 - t_4 = 780 - 720 = 60 \text{ с,}$$

$$\Delta S_1 = V_{xz1} \Delta t_1 = 579.37 \cdot 60 = 34762.2 \text{ м.}$$

Участок 2:

$$V_{y2} = \frac{H_8 - H_9}{t_9 - t_8} = \frac{12000 - 4000}{850 - 780} = 114.3 \text{ м/с,}$$

$$V_{xz2} = \sqrt{V_9^2 - V_{y2}^2} = \sqrt{(1500 \cdot 0.2778)^2 - 114.3^2} = 400.72 \text{ м/с,}$$

$$\Delta t_2 = t_9 - t_8 = 850 - 780 = 70 \text{ с,}$$

$$\Delta S_2 = V_{xz2} \Delta t_2 = 400.72 \cdot 70 = 28050.4 \text{ м.}$$

Итог по этапу “Снижение”:

$$\Delta t_{\text{сн}} = \sum_{i=1}^2 \Delta t_i = 130 \text{ с,}$$

$$\Delta S_{\text{сн}} = \sum_{j=1}^2 \Delta S_j = 68606 \text{ м.}$$

Таким образом на этапе “Набор высоты” истребитель за 255 с преодолевает 107025.6 м, при этом его высота полета меняется с 4000 до 16000 м. В то время как на этапе “Снижение” за 130 с преодолевает 68606 м, при этом его высота полета меняется с 16100 до 4000 м.

3. Решение конструирования траекторий ИС типа “набор высоты–полет на заданной высоте (высота “полки”)–снижение”, обеспечивающих встречу ИС с УС.

3.1. Определение “треугольника τ ” при начальной $Z_{\text{ИС}}$ больше начальной $Z_{\text{УС}}$. Здесь возможны три случая использования прямоугольного треугольника для определения времени полета ИС на “полке”.

Случай I. Точка B_1 находится выше точки D (рис. 3).

Получим следующие начальные положения: $Z_{\text{ИС}} > Z_{\text{УС}}$ и $(Z_{\text{УС}} + S_{12}) > Z_{\text{ИС}}$.

Из прямоугольного треугольника ACD , учитывая $AC^2 = AD^2 + DC^2$, находим:

$$\begin{aligned} AC &= (S_1 + S_2) + V_{\text{ИС}}\tau, \\ AD &= X_{\text{УС}} - X_{\text{ИС}} = d, \\ DC &= S_{22} + V_{\text{УС}}\tau + B_1D = S_{22} + V_{\text{УС}}\tau + Z_{\text{УС}} + S_{12} - Z_{\text{ИС}} = \Sigma_2 + V_{\text{УС}}\tau, \end{aligned} \quad (3.1)$$

где $\Sigma_2 = S_{22} + Z_{\text{УС}} + S_{12} - Z_{\text{ИС}}$.

Случай II. Точка B_1 находится ниже точки D (рис. 4).

Получим следующие начальные положения: $Z_{\text{ИС}} > Z_{\text{УС}}$ и $(Z_{\text{УС}} + S_{12}) < Z_{\text{ИС}}$.

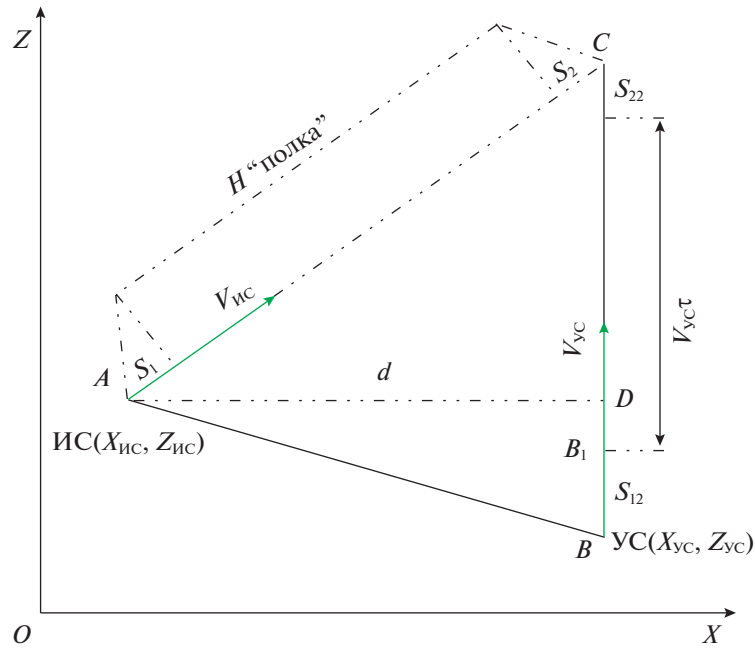


Рис. 3. Точка выхода ИС на траекторию УС (точка B_1 выше точки D)

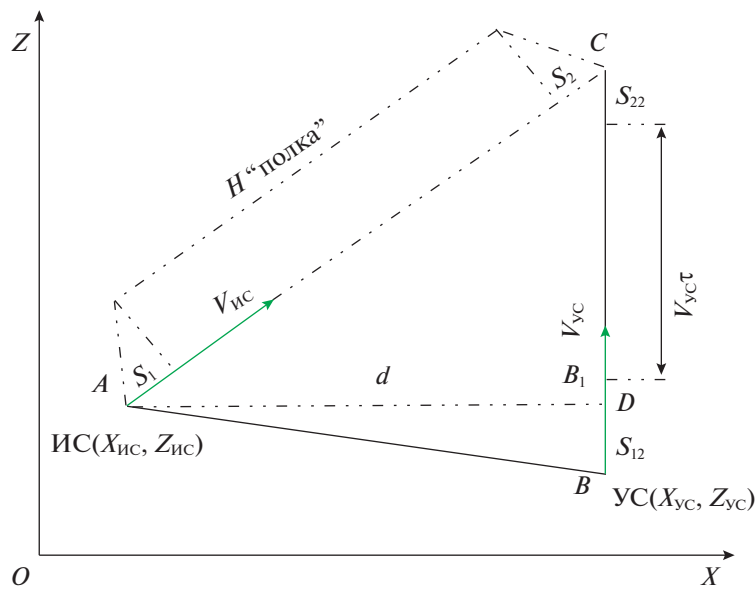


Рис. 4. Точка выхода ИС на траекторию УС (точка B_1 ниже точки D)

Из прямоугольного треугольника ACD , учитывая $AC^2 = AD^2 + DC^2$, находим:

$$\begin{aligned}
 AC &= (S_1 + S_2) + V_{ИС}\tau, \\
 AD &= X_{УС} - X_{ИС} = d, \\
 DC &= S_{22} + V_{УС}\tau - B_1D = S_{22} + V_{УС}\tau - [Z_{ИС} - S_{12} - Z_{УС}].
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

Случай III. Точка B_1 совпадает с точкой D .

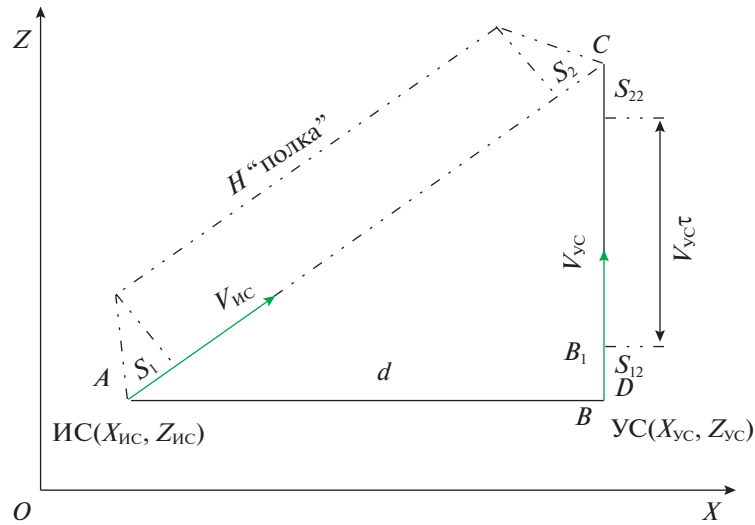


Рис. 5. Точка выхода ИС на траекторию УС (точка B совпадает с точкой D)

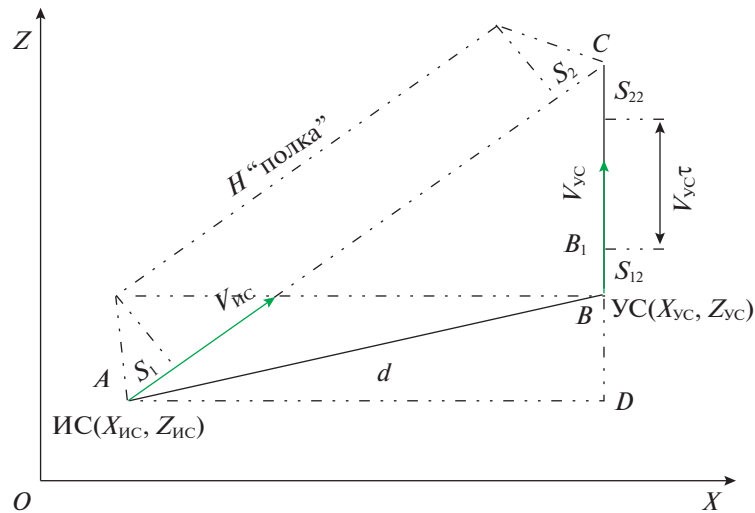


Рис. 6. Точка выхода ИС на траекторию УС при начальной $Z_{ИС}$ меньше начальной $Z_{УС}$

Из прямоугольного треугольника ACD , учитывая $AC^2 = AD^2 + DC^2$, находим:

$$\begin{aligned} AC &= (S_1 + S_2) + V_{ИС}\tau, \\ AD &= X_{УС} - X_{ИС} = d, \\ DC &= S_{22} + V_{УС}\tau. \end{aligned}$$

3.2. Определение “треугольника τ ” при начальной $Z_{ИС}$, равной начальной $Z_{УС}$. Геометрическое представление задачи показано на рис. 5.

Из прямоугольного треугольника ACD , учитывая $AC^2 = AD^2 + DC^2$, находим:

$$\begin{aligned} AC &= (S_1 + S_2) + V_{ИС}\tau, \\ AD &= X_{УС} - X_{ИС} = d, \\ DC &= S_{12} + V_{УС}\tau + S_{22}. \end{aligned} \tag{3.3}$$

3.3. Определение “треугольника τ ” при начальной $Z_{ИС}$, меньшей начальной $Z_{УС}$. Геометрическое представление задачи показано на рис. 6.

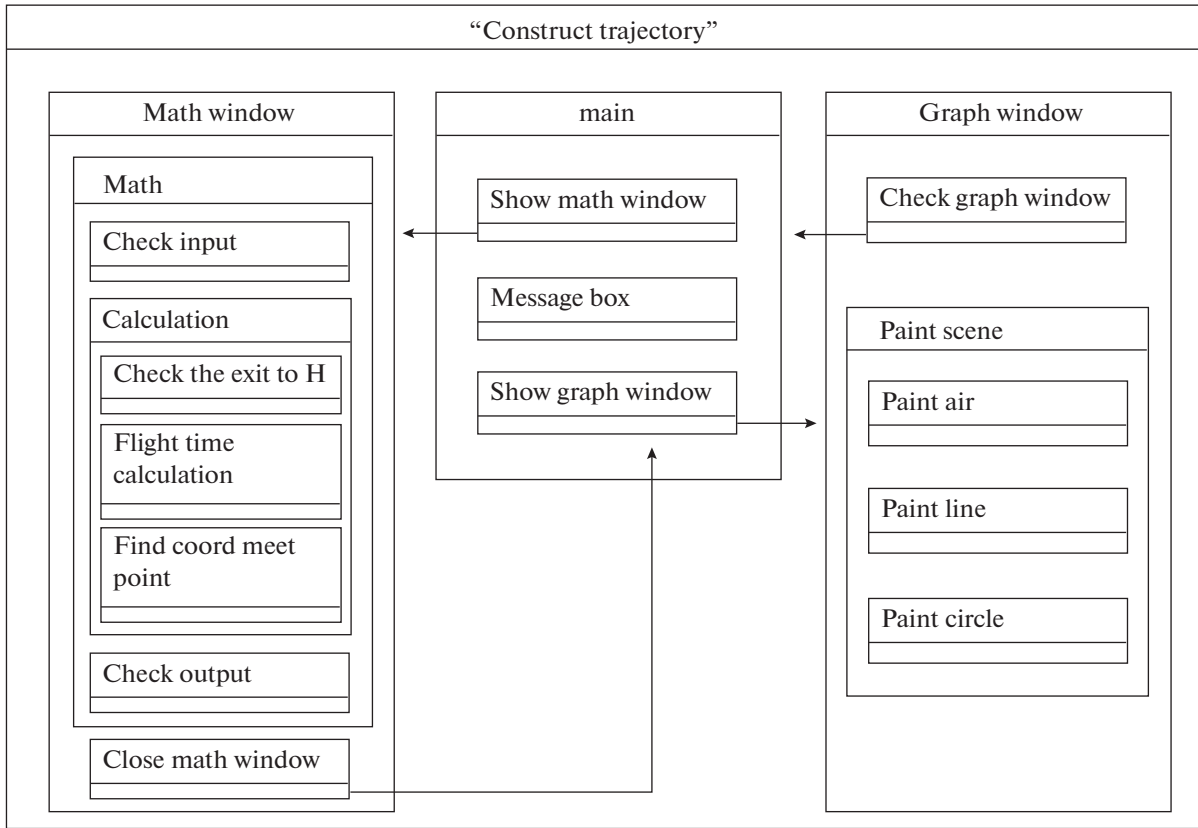


Рис. 7. Диаграмма взаимодействия объектов десктопного приложения

Из прямоугольного треугольника ACD , учитывая $AC^2 = AD^2 + DC^2$, находим:

$$\begin{aligned} AC &= (S_1 + S_2) + V_{\text{ИС}}\tau, \\ AD &= X_{\text{УС}} - X_{\text{ИС}} = d, \\ DC &= S_{12} + V_{\text{УС}}\tau + S_{22} + Z_{\text{УС}} - Z_{\text{ИС}}. \end{aligned} \tag{3.4}$$

3.4. Определение времени полета ИС на заданной “полке”. Для всех вариантов “треугольника τ ” справедливы единые формулы расчета коэффициентов соответствующего квадратного уравнения $a\tau^2 + b\tau + c = 0$:

коэффициент при τ^2 : $[V_{\text{ИС}}^2 - V_{\text{УС}}^2]$,

коэффициент при τ : $[2(S_1 + S_2)V_{\text{ИС}} - 2[S_{11} + S_{12} + Z_{\text{УС}} - Z_{\text{ИС}}]V_{\text{УС}}]$,

коэффициент при τ^0 : $[(S_1 + S_2)^2 - [S_{11} + S_{12} + Z_{\text{УС}} - Z_{\text{ИС}}]^2 - [X_{\text{УС}} - X_{\text{ИС}}]^2]$.

Напомним, что в зависимостях (3.1)–(3.4), $V_{\text{ИС}}$ – скорость полета ИС на заданной “полке”, а наименьший положительный корень квадратного уравнения τ_0 определяет время полета ИС на “полке”.

Тогда время полета ИС до встречи с УС

$$T_{\text{встречи}} = \Delta t_1 + \tau_0 + \Delta t_2, \tag{3.5}$$

координаты точки встречи ИС с УС

$$\begin{aligned} X_{\text{т.в}} &= X_{\text{УС}}, \\ Z_{\text{т.в}} &= Z_{\text{УС}} + V_{\text{УС}}T_{\text{встречи}}, \end{aligned} \tag{3.6}$$

длина проекции траектории ИС на горизонтальную плоскость

$$L_{\text{встречи ИС,УС}} = S_1 + V_{\text{“полки” ИС}}\tau_0 + S_2. \tag{3.7}$$

Таблица 1. Характеристики набора ИС высоты “полки” $H = 12$ км и снижения (данные п. 1)

Этап полета ИС	S , м	Δt , с
Набор высоты с $H = H_{yc}$	$S_1 = 104716$	$\Delta t_1 = 255$
Расстояние, преодолеваемое УС за время набора ИС высоты $H = H_{yc}$	$S_{21} = V_{yc}\Delta t_1$	Δt_1
Снижение на высоту $H = H_{yc}$	$S_2 = 68606$	$\Delta t_2 = 130$
Расстояние, преодолеваемое УС за время снижения ИС на высоту $H = H_{yc}$	$S_{21} = V_{yc}\Delta t_2$	Δt_2

Таблица 2. Варианты различного расположения начального положения УС относительно одного и того же начального положения ИС (различные “треугольники τ ”)

Вариант	Самолет	X	Z	V	V
		м		м/с	
I	ИС	1000	4000	583	–
I	УС	400000	2000	–	200
II	ИС	1000	4000	583	–
II	УС	400000	4000	–	200
III	ИС	1000	4000	583	–
III	УС	400000	7000	–	200

4. Результаты имитационного моделирования решения задачи конструирования траектории встречи для базы знаний БОСЭС – “Возврат в строй”. В качестве основного инструмента обработки предложенного алгоритма было выбрано имитационное моделирование [3]. В рамках этого подхода был разработан ПМК, где ключевое место в решении задачи конструирования траектории отводится фрагменту десктопного приложения “Конструирование траектории встречи” для базы знаний БОСЭС – “Возврат в строй τ ”.

Десктопное приложение¹ реализовано на языке программирования C++ (стандарт 2014 г.) с использованием кроссплатформенной библиотеки Qt. На рис. 6 приведена диаграмма взаимодействия основных объектов десктопного приложения. На рис. 7 “Math window” – компонент интерфейса, обеспечивающий работу с входными данными и расчет выходных параметров, “Graph window” – компонент интерфейса, обеспечивающий построение “Профиля полета” и “Маршрута полета”, согласно полученным в “Math window” параметрам, “main” – компонент, связывающий работу “Math window” и “Graph window” в параллели и независимо друг от друга, “Calculation” – класс, отвечающий за выполнение расчетов по приведенному в разд. 1–3 алгоритму; “Check the exit to H” – блок проверки возможности выхода ИС на “полку”; “Flight time calculation” – блок расчета времени полета ИС на “полке”; “Find coord meet point” – блок расчета координат точки встречи; “Check input” – блок проверки возможности выхода ИС на “полку”; “Check output” – блок проверки возможности выхода ИС на “полку”; “Paint scene” – класс-компоновщик объектов, входящих в графики “Профиля полета” и “Маршрута полета”; “Paint air” – блок, формирующий объект сцены “самолет” с заданными координатами и передающий сформированный объект на компоновку; “Paint line” – блок, формирующий объект сцены и передающий сформированный объект на компоновку; прямая, соединяющая две точки с заданными координатами; “Paint circle” – блок, формирующий объект сцены “точка” с заданными координатами и передающий сформированный объект на компоновку; “Message box” – класс, формирующий информационное послание пользователю о выполнении выбранного действия.

Исходя из построенной диаграммы взаимодействий выделено три основных блока математики фрагмента “Конструирование траектории встречи”:

- 1) “Проверка возможности выхода на заданную $H_{\text{полки}}$ ИС”;
- 2) “Расчет времени полета ИС на заданной “полке””;

¹ **Десктопные приложения** – это полнофункциональные программы, которые работают вне зависимости от других приложений и требуют наличие оператора. Для их работы необходимы достаточные аппаратные ресурсы компьютера, само приложение и набор функций для работы с приложением.

Таблица 3. Результаты расчета вариантов начального расположения ИС и УС, указанных в табл. 2

Вариант	Время полета ИС до встречи с УС $T_{встречи}, c$	Координаты точки встречи $x_{т.в}, m, z_{т.в}, m$	Длина проекции траектории ИС на горизонтальную плоскость $L_{встречи}$ ИС, УС, М	Время расчета, мс
I	860.067	$x = 400000,$ $z = 174013$	450869	~0.84
II	861.852	$x = 400000,$ $z = 176370$	451910	~0.68
III	864.547	$x = 400000,$ $z = 179909$	453481	~0.16

3) “Расчет координат точки встречи и длина проекции траектории ИС на горизонтальную плоскость”.

В блоке 1 конструируется траектория встречи ИС с УС без выхода ИС на “полку”: полет ИС на высоте УС со скоростью на заданной “полке” $V_{“полки” ИС}$. Определяется длина траектории истребителя сопровождения $L_{без “полки” ИС}$:

в формулах разд. 3.4 обнуляются $S_1 + S_2 = 0, S_{21} + S_{22} = 0,$
из квадратного уравнения определяется время τ_0 полета ИС,
находится длина $L_{без “полки” ИС} = V_{“полки” ИС} \tau.$

Строить траекторию ИС с заданной полкой возможно, если $L_{без “полки” ИС} > (S_1 + S_2)$. В этом случае переходим на следующий блок программы. В противном же случае выдается сообщение, сигнализирующее о невозможности выхода на “полку”.

В блоках 2 и 3 реализованы расчеты по приведенным в разд. 3.4 зависимостям.

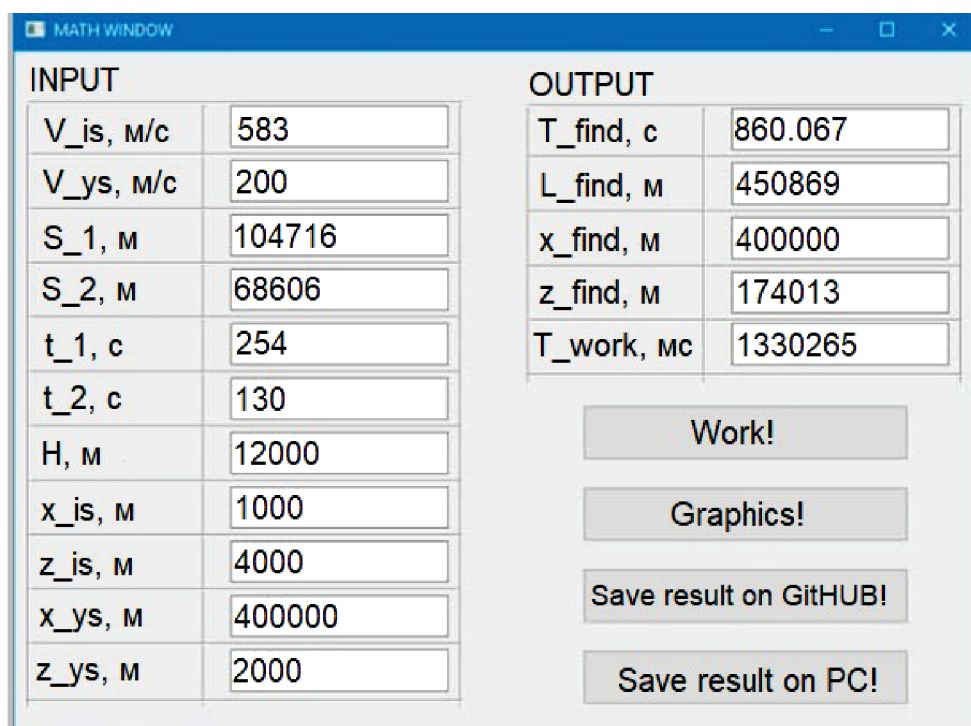


Рис. 8. Таблица исходных данных

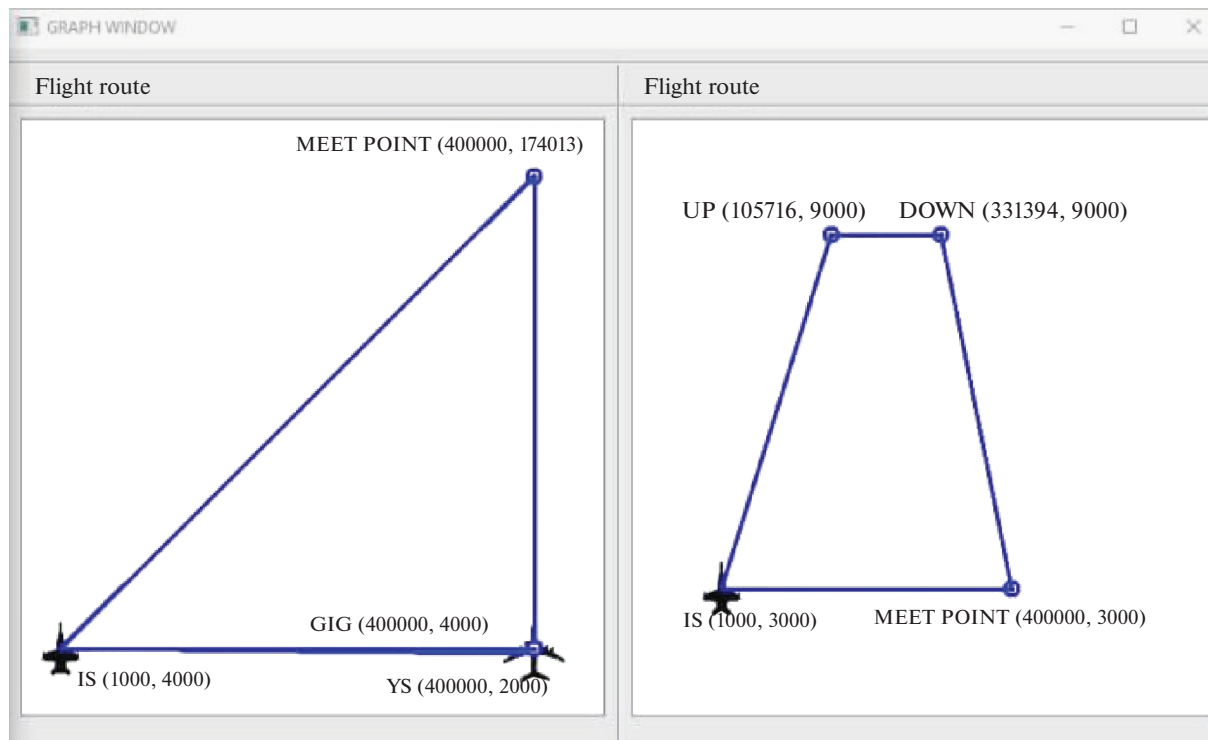


Рис. 9. Траектория встречи ИС с УС (слева) и профиль полета ИС (справа)

Для конструирования траектории требуются следующие исходные данные:
 расположение ИС и УС: координаты $X_{ИС}$, $Z_{ИС}$, $X_{УС}$, $Z_{УС}$ в описанной выше системе координат,
 высота ИС и высота УС и его скорость $V_{УС}$,
 заданная высота “полки” $H_{\text{“полки” ИС}}$ и скорость $V_{\text{“полки” ИС}}$,
 полученная с летного эксперимента характеристика этапа набора ИС высоты $H_{\text{“полки” ИС}}$:
 S_1 , Δt_1 ,
 найденная с летного эксперимента характеристика этапа снижения ИС с высоты $H_{\text{“полки” ИС}}$ до
 высоты полета УС: S_2 , Δt_2 .

Результатами работы десктопного приложения являются:

время полета ИС до встречи с УС $T_{\text{встречи}}$,

координаты точки встречи $X_{\text{Т.В}}$, $Z_{\text{Т.В}}$,

длина проекции траектории ИС на горизонтальную плоскость $L_{\text{встречи ИС, УС}}$.

Эксперимент проводился на персональном компьютере с техническими характеристиками:
 оперативное запоминающее устройство: 12 Гб; центральный процессор: *Intel® Core™ i5-7200U CPU @ 2.50GHz* × 4; графический процессор: *Mesa Intel® HD Graphics 620 (KBL GT2)*.

Пример конструирования траектории встречи ИС с УС с “полкой” на $H = 12$ км приведен в табл. 1 и 2.

Результаты расчета вариантов начального расположения ИС и УС с помощью сформированного десктоп приложения представлены в табл. 3.

На рис. 8 представлены исходные данные для расчета траектории встречи (рис. 9). Заметим, что изображенные на рис. 9 траектории встречи и профили полета сохраняют горизонтальный и вертикальный масштабы независимо друг от друга.

Заключение. Разработан новый алгоритм “Конструирования траектории встречи” в базе знаний бортовой оперативно-советующей экспертной системы этапа полета, обеспечивающий расчет траектории до момента встречи носителя БОСЭС с прямолинейно летящим самолетом, скорость которого меньше скорости полета носителя БОСЭС. Данный алгоритм отличается от су-

шествующих отсутствием итерационной процедуры определения момента “схода с “полки”” и не содержит аналитической модели носителя БОСЭС на этапах “подъем” и “спуск”, что значительно упрощает его реализацию. Вместо аналитической модели носителя в базу знаний БОСЭС включается специальная база данных $(S, \Delta t)$ конкретного носителя этой БОСЭС, определенные для характерных для него значений $H_{\text{“полки”}}$, $V_{\text{“полки”}}$ и различных наборов условий начала участка набора (V, H) и условий окончания участка спуска (V, H) .

Создан ПМК моделирования, на котором получены характеристики траекторий встречи (время полета до момента встречи, координаты точки встречи; длина проекции траектории на горизонтальную плоскость), подтверждающие работоспособность во всех возможных вариантах расположения УС и ИС и обосновывающие возможность применения предложенного алгоритма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Федунов Б.Е.* Бортовые интеллектуальные системы тактического уровня для антропоцентрических объектов (примеры для пилотируемых летательных аппаратов). М.: ДеЛибри, 2018. 246 с.
2. *Гревцов Н.М., Перчиц С.Н., Федунов Б.Е., Юневич Н.Д.* Интеллектуальная поддержка командира группы истребителей сопровождения при решении им задачи возврата части группы, отразившей атаку истребителей противника // Изв. РАН. ТиСУ. 2018. № 4. С. 139–152.
3. ГОСТ Р 58048-2017 “Трансфер технологий. Методические указания по оценке уровня зрелости технологий”. Введ. 2018-06-01. М.: Стандартиформ, 2018. 42 с.