

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ ВНЕШНЕТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЗОНЫ ОЦЕНКИ ТРАЕКТОРИИ МЕДЛЕННО ПАДАЮЩЕГО ТЕЛА

к.т.н. П.И. Иванов, к.т.н. В.И. Масягин, С.А. Бебешко
(представил д.т.н. О.Б. Анипко)

В работе исследуются вопросы минимизации погрешностей оценки координат движения медленно падающего тела оптическими средствами внешнетраекторных измерений.

Определение координат медленно падающего тела (системы объект-парашют) с минимальной погрешностью является сложной проблемой, решение которой позволит исследовать и решить ряд задач связанных с недостатком информации по кинематике и механике его отдельных элементов.

Для оценки местоположения медленно падающего тела (МПТ) целесообразно использовать угломерный метод определения координат, который обеспечивает высокую точность при использовании оптических средств измерений [1]. Используем этот метод для определения зоны минимизации погрешностей внешнетраекторных измерений (ВТИ) на полигоне с двумя постами ВТИ и базой L между ними (рис. 1).

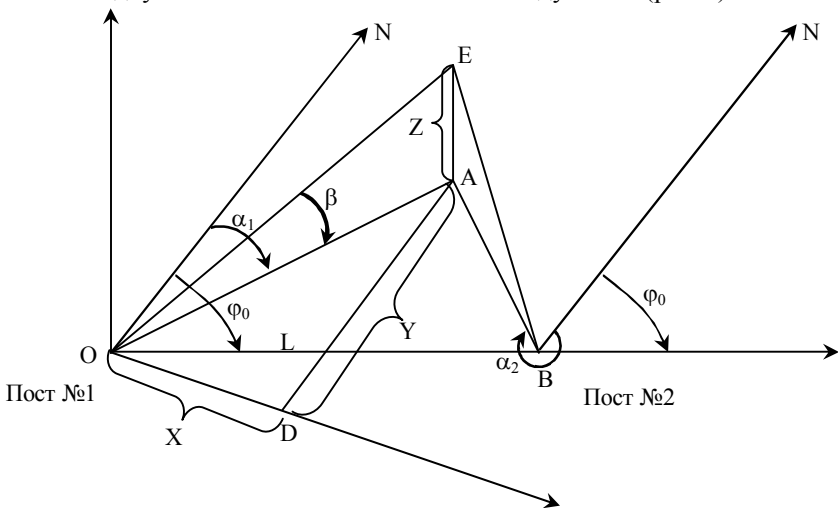


Рис. 1. Схема расположения постов ВТИ

На рис. 1 α_1, α_2 - углы азимута; β_1, β_2 - углы места постов; φ_0 -

угол между направлением на север и линией базы; $\gamma = (\alpha_2 - \varphi_0 - \pi)$;
 $\psi = (2\pi - \alpha_2 + \alpha_1)$; $\delta = (\varphi_0 - \alpha_1)$.

В прямоугольной системе координат положение точки E в трехмерном пространстве определяется координатами [2]:

$$x = \frac{L \sin(\varphi_0 - \alpha_2) \sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)}; \quad y = \frac{L \sin(\varphi_0 - \alpha_2) \cos \alpha_1}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)}; \quad z = \frac{L \sin(\varphi_0 - \alpha_2) \operatorname{tg} \beta_1}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)}.$$

Выражения для относительных погрешностей по каждой из координат при условии $(\alpha_1 \neq \alpha_2 \neq 0)$:

$$\left| \frac{\Delta x}{x} \right| = \left| \frac{\sin \alpha_2 \Delta \alpha_1}{\sin \alpha_1 \sin(\alpha_1 - \alpha_2)} \right| + \left| \frac{\Delta \alpha_2}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)} \right| + \left| \frac{\cos(\varphi_0 - \alpha_2) \Delta \varphi_0}{\sin(\varphi_0 - \alpha_2)} \right| + \left| \frac{\Delta L}{L} \right|; \quad (1)$$

$$\left| \frac{\Delta y}{y} \right| = \left| \frac{\cos \alpha_2 \Delta \alpha_1}{\cos \alpha_1} \right| + \left| \frac{\sin(\varphi_0 - \alpha_2) \Delta \alpha_1}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2) \sin(\varphi_0 - \alpha_2)} \right| + \left| \frac{\cos(\varphi_0 - \alpha_2) \Delta \varphi_0}{\sin(\varphi_0 - \alpha_2)} \right| + \left| \frac{\Delta L}{L} \right|; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \left| \frac{\Delta z}{z} \right| = & \left| \frac{\cos(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta \alpha_1}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)} \right| + \left| \frac{\sin(\varphi_0 - \alpha_1) \cdot \Delta \alpha_2}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2) \sin(\varphi_0 - \alpha_2)} \right| + \\ & + \left| \frac{\cos(\varphi_0 - \alpha_2) \cdot \Delta \varphi_0}{\sin(\varphi_0 - \alpha_2)} \right| + \left| \frac{\Delta \beta_1}{\cos^2 \beta_1 \cdot \operatorname{tg} \beta_1} \right| + \left| \frac{\Delta L}{L} \right|. \end{aligned} \quad (3)$$

Рассматриваемая зона работы постов находится в диапазоне углов от 0° до 65° и от 245° до 360° , где за 0° принято направление на север (N). Положительным принимается отсчет углов по часовой стрелке. Построены графики зависимостей относительных погрешностей оценки координат МПТ от углов α_1 , α_2 и β_1 при $\varphi_0 = 65^\circ$ и $L = 3000$ м. Зависимости по координатам X и Y имеют ярко выраженные максимумы, уходящие в бесконечность в точках $\alpha_1 = \alpha_2$. Физически это объясняется тем, что угломерный метод имеет минимальную точность при условии параллельности линий визирования постов ВТИ. Относительные погрешности по координатам X и Y приблизительно равны, т.е. $\Delta X/X = \Delta Y/Y = 0,0017$. Отсюда в частности следует, что точность метода уменьшается с увеличением дальности от линии базы. Анализ зависимости по координате Z показывает, что резкое ухудшение точности измерений наступает при $\Delta Z/Z \geq 0,002$. Например, для допустимой относительной погрешности $\Delta Z/Z = 0,002$ величина интервала нереконструируемых углов составляет 0,5 рад (находится в пределах ± 150 от вертикальной базовой плоскости). Нетрудно видеть, что

$$\Delta l = H \cdot \operatorname{tg} 15^\circ = H \cdot 0,2679, \quad (4)$$

где Δl - ширина зоны, нереконструируемой для сбрасывания.

Таким образом, получена рекомендуемая с точки зрения принятой допустимой погрешности $\Delta x/x = \Delta y/y = 0,0017$, $\Delta z/z = 0,002$ зона работы постов ВТИ.

Для вычисления точки сброса МПТ с учетом его попадания в рекомендуемую зону рассмотрим случай, когда при вертолётном сбросе система груз-парашют сразу же вводится в действие (потерей высоты на наполнение основного парашюта и временем наполнения можно пренебречь). При этом объект движется с установившейся скоростью практически с высоты сбрасывания. Для дальнейших расчётов используем зависимость плотности воздуха ρ от высоты H :

$$\rho = \rho_0 e^{-kh}, \quad (5)$$

где $\rho_0 = 1,2497$ [кг/м³]. Коэффициент $k = 1,033 \cdot 10^{-4}$ [1/м] получен путём аппроксимации табличной зависимости для высот от 0 до 10000м [3].

Из зависимости $G = C_x S \rho V^2 / 2$ [3], получим $V_y = \sqrt{2G / (C_x S \rho(H))}$, где G - вес груза, S - площадь парашюта, C_x - коэффициент лобового сопротивления парашюта, V_y - вертикальная скорость парашюта. Используя выражение (5), имеем

$$V_y = \sqrt{\frac{2G}{C_x S \rho_0 e^{-kH}}} = \sqrt{\frac{2B}{\rho_0 e^{-kH}}}, \quad (6)$$

где $B = G / C_x S$ - баллистическая характеристика парашюта. Выражение (6) позволяет получить зависимости $V_y(H)$ для различных значений B . На рис. 2 представлены зависимости для значений $B_1=60$ и $B_2=80$.

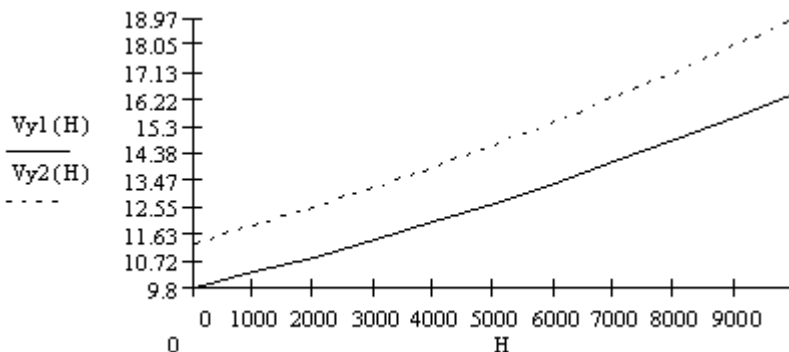


Рис. 2. Зависимость изменения V_y от высоты H при различных значениях B

С учётом полученной зависимости $V_y(H)$ получим время снижения

t с высоты H до высоты H_0 :

$$t = \int_{H_0}^H \frac{dh}{\sqrt{\frac{2B}{\rho_0 e^{-kh}}}} = \sqrt{\frac{2\rho_0}{k^2 B}} \left(e^{-\frac{kH_0}{2}} - e^{-\frac{kH}{2}} \right). \quad (7)$$

Формула (7) позволяет рассчитывать время снижения объекта без учёта скорости и направления ветра \bar{W} . Влияние ветра, может быть учтено для наиболее неблагоприятного случая, когда ветер дует в сторону базы. При постоянном направлении и скорости ветра ($\bar{W} = \text{const}$) до высоты $H_0 = 0$ формула (7) принимает вид

$$t = \sqrt{\frac{2\rho_0}{k^2 B}} \left(1 - e^{-\frac{kH}{2}} \right). \quad (8)$$

График зависимости времени снижения t от высоты H до земли ($H_0 = 0$) для различных значений $B_1 = 60$ и $B_2 = 80$ представлен на рис. 3.

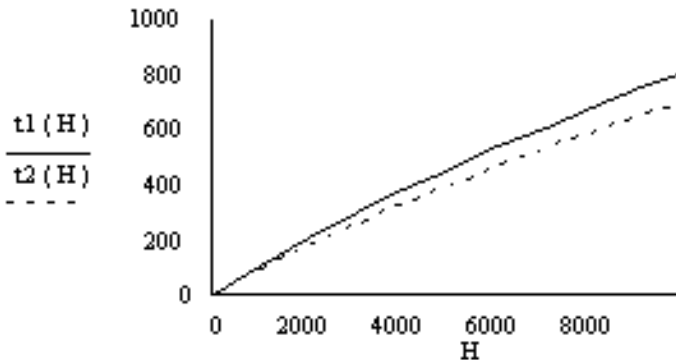


Рис. 3. Зависимость времени снижения объекта от высоты

Определим минимальное удаление вертолёта ℓ от вертикальной базовой плоскости при сбрасывании МПТ. Для малых высот, где скорость снижения практически постоянная ($V_y = \text{const}$) вследствие большой

плотности воздуха, из выражения $\frac{H}{V_y} = \frac{\Delta \ell}{W}$ имеем $\Delta \ell = \frac{HW}{V_y}$, где

$\Delta \ell$ - минимально допустимое удаление по линии горизонта от вертикальной базовой плоскости. Для средних и больших высот, где вследствие малой плотности воздуха ρ изменение V_y велико ($W > \Delta \ell V_y / H$) выражение для определения минимального удаления принимает вид

$$\ell = Wt = W \sqrt{\frac{2\rho_0}{k^2 B} \left(1 - e^{-\frac{kH}{2}} \right)}. \quad (9)$$

Исходя из (9), построим зависимость $\ell(H)$, которая может быть использована в расчёте места точки сброса МПТ с учётом его попадания в рекомендуемую зону (рис. 4).

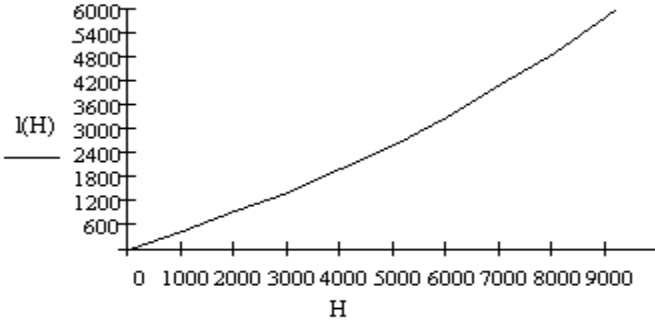


Рис. 4. Зависимость минимального удаления от высоты сбрасывания

Таким образом, изложенная выше методика позволяет произвести сбрасывание и расчет времени снижения МПТ с учетом его попадания в заданную рекомендуемую зону и определить его координаты и данные по кинематике и механике отдельных элементов объекта с минимальной погрешностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кантор А.В. *Аппаратура и методы измерений при испытаниях ракет.* – М.: Мир, Оборонгиз, 1963. – 234 с.
2. Огородничук Н.Д. *Обработка траекторной информации. Ч.1.* – К.: КВВАИУ, 1981. – 336 с.
3. Лобанов Н.А. *Основы расчёта и конструирования парашютов.* – М.: Машиностроение, 1995. – 298 с.

Поступила 17.01.2002

ИВАНОВ Петр Иванович, канд. техн. наук, ведущий специалист по испытаниям парашютных систем НИИ аэроупругих систем, г. Феодосия. В 1974 году закончил Казанский авиационный институт. Область научных интересов – исследования аэроупругих систем

МАСЯГИН Валерий Иванович, канд. техн. наук, зам. нач. Харьковского института ВВС по научной работе. В 1984 году закончил КВВАИУ. Область научных интересов – научно - исследовательская работа по вопросам проектирования и эксплуатации авиационных комплексов.

БЕБЕШКО Сергей Анатольевич, помощник ведущего инженера Государственного авиационного научно-испытательного центра ВС Украины, г. Феодосия. В 1996 году закончил Харьковское ВВАИУ. Область научных интересов – испытания авиационных комплексов.