

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Лобатый А.А., Абуфанас А.С., Бенкафо А.С.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь*  
*lobaty@tut.by*

При управлении движением беспилотного летательного аппарата (БЛА) может возникнуть задача сближения его с движущимся объектом (ДО). При отсутствии управляющих сигналов с наземного пункта управления для вычисления текущих координат и ориентации БЛА используется бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС).

Для БИНС характерно то, что вычисление текущих координат и угловой ориентации осуществляется в бортовом компьютере БЛА на основании измерений угловых скоростей поворота связанной системы координат и ее ускорений, по информации от датчиков угловых скоростей (ДУС) и акселерометров, установленных на корпусе БЛА.

Алгоритмы БИНС можно условно разделить на алгоритмы навигации, определяющие линейное положение и скорость БЛА относительно инерциальной системы координат (или относительно ДО), и алгоритмы ориентации, определяющие угловое положение БЛА в инерциальной системе координат.

Алгоритм БИНС, реализующий уравнения относительного движения ДО и БЛА в пространстве в векторной форме имеет вид [1]:

$$\begin{aligned} \vec{Y}_{\text{АЭА}} &= U_D^g (\mathbf{V}_{\text{АГ}} - \mathbf{V}_{\text{АЭА}}), & \vec{Y}_{\text{АЭА}}(0) &= \vec{Y}_{\text{АЭА}0}; \\ \vec{V}_{\text{ДО}} &= \vec{A}_{\text{ДО}}, & \vec{V}_{\text{ДО}}(0) &= \vec{V}_{\text{ДО}0}; \\ \vec{V}_{\text{АЭА}} &= U_g^n \vec{A}_{\text{АЭА}} + \mathbf{G}, & \vec{V}_{\text{АЭА}}(0) &= \vec{V}_{\text{АЭА}0}; \end{aligned} \quad (1)$$

где  $Y_{\text{АЭА}}$  - вектор проекций координат БЛА на оси системы координат, связанной с вектором дальности до ДО;

$\vec{V}_{\text{ДО}}, \vec{V}_{\text{АЭА}}, \vec{A}_{\text{ДО}}, \vec{A}_{\text{АЭА}}$  - соответственно, векторы проекций скоростей и ускорений ДО и БЛА на оси инерциальной системы координат;

$\mathbf{G}$  – вектор ускорений сил гравитации;

$U_D^g$  - матрица перехода от инерциальной системы координат к системе координат, связанной с вектором дальности до ДО;

$U_g^c$  - матрица перехода от системы координат, связанной с БЛА, к инерциальной системе координат.

Матрицы преобразования координат при решении таких задач представляются в кватернионной форме с помощью параметров Родрига-Гамильтона, которые дают удобный аппарат для исследования кинематики движения твердого тела.

Исследование точности БИНС удобно проводить с помощью так называемых уравнений в вариациях, представляющих собой линеаризованные уравнения первого приближения относительно входных ошибок системы. Отсутствие существенных нелинейностей позволяет провести линеаризацию системы кинематических уравнений разложением в ряд Тейлора относительно опорной траектории.

Линеаризованная модель БИНС позволяет представить математическую модель ошибок БИНС в канонической форме:

$$\dot{\mathbf{O}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}(t)\xi(t), \quad \mathbf{X}(0) = \mathbf{X}_0, \quad (2)$$

где  $X(t)$  - вектор ошибок БИНС;  $\xi(t)$  - вектор входных шумов с матрицей интенсивностей  $H(t)$ ;  $A(t)$ ,  $B(t)$  - известные матрицы коэффициентов.

Правые части уравнений системы (2) состоят из линейных комбинаций возмущений (ошибок) действующих на входе БИНС. Коэффициенты линеаризованных уравнений являются функциями истинных значений кинематических параметров (параметров опорной траектории), входящих в систему, а поэтому являются переменными по времени. Следовательно, систему уравнений ошибок необходимо решать совместно с уравнениями опорной траектории.

Основными входными ошибками БИНС являются: ошибки в определении параметров, характеризующих движение ДО; ошибки начальной выставки БИНС; ошибки датчиков (акселерометров и ДУС).

В качестве критерия для оценки точности БИНС целесообразно принять вариацию, определяющую ошибку  $\psi$  углового целеуказания сенсорному устройству БЛА, определяющему угловую ориентацию БЛА относительно ДО. При этом должно соблюдаться условие  $\psi < \Delta$ , где  $\Delta$  - ширина поля зрения сенсорного устройства.

Уравнения для математических ожиданий  $m_x$  и корреляционных моментов  $\theta_x$  компонент вектора  $X(t)$  в векторно-матричной форме имеют вид [2]

$$\begin{aligned} \dot{m}_x(t) &= A(t) \cdot m_x(t) + m_\xi(t), \\ \dot{\theta}_x(t) &= A(t) \cdot \theta_x(t) + \theta_x(t) \cdot A^T(t) + B^T(t) \cdot H(t) \cdot B(t). \end{aligned} \quad (3)$$

На рис. 1, 2 представлены результаты математического моделирования процесса сближения БЛА и ДО. На рис.1 изображены графические зависимости математического ожидания и среднего квадратичного отклонения ошибки определения боковой скорости  $V_z$  от дальности до ДО. На рис. 2 изображены зависимости математического ожидания и среднего квадратичного отклонения ошибки целеуказания  $\psi$  от дальности до ДО.

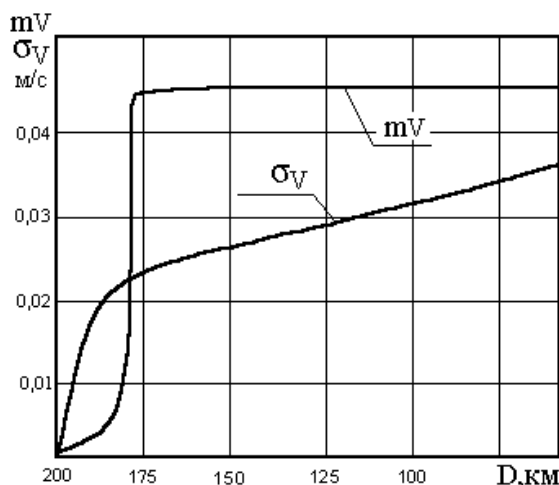


Рис. 1. Изменение ошибки определения боковой скорости

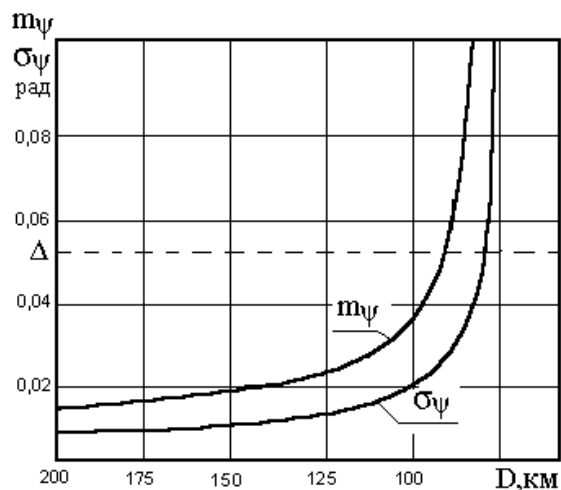


Рис. 2. Изменение ошибки целеуказания

Сравнение результатов аналитического моделирования с результатами, полученными методом статистических испытаний показало, что расхождение между ними не превышает 3%. При этом аналитическое исследование точности позволяет определить взаимную корреляцию ошибок определения параметров, характеризующих пространственное перемещение БЛА относительно ДО.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Васи́лин, Н.Я. Беспилотные летательные аппараты / Н.Я. Васи́лин. – Минск: ООО «Попурри», 2003. – 272 с.
2. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / под ред. Б.С. Алёшина, К.К. Веремеенко, А.И. Черноморского. – М.: Физматлит, 2006. – 424 с.
3. Пугачев, В.С. Теория стохастических систем / В.С. Пугачев, И.Н. Сеницын. – М.: Логос, 2004. – 1000 с.
4. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / под ред. М.Н. Красильщикова, Г.Г. Серебрякова. – М.: Физматлит, 2005. – 280 с.