

Л. В. АНДРЕЕВ, С. В. БОГОСЛОВСКИЙ, Б. В. ВИДИН, И. О. ЖАРИНОВ,
О. О. ЖАРИНОВ, П. П. ПАРАМОНОВ, Р. А. ШЕК-ИОВСЕПЯНЦ

МЕЖСАМОЛЕТНАЯ НАВИГАЦИЯ ГРУППЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Рассмотрены принципы полета группы летательных аппаратов, получены формулы, характеризующие их относительное движение.

Ключевые слова: группа летательных аппаратов, навигация, относительное ускорение.

Введение. Для решения задачи управления беспилотными летательными аппаратами (ЛА), в том числе сведения их в группу и управления полетом группы ЛА, актуально исследование алгоритмов обработки измерительной информации с целью получения оценок параметров движения и определения по этим оценкам управляющих воздействий, прежде всего следует решить задачу их идентификации и оценки.

Наиболее простой вариант организации строя ЛА — деление на звенья, где один аппарат является ведущим, а другой — ведомым. В этом случае достаточно определить местоположение ведущего ЛА в выбранной системе координат и положение ведомого относительно ведущего.

Постановка задачи. Математическое представление движения двух ЛА относительно друг друга представляет собой разность двух абсолютных движений и характеризуется тремя степенями свободы. Воздействие на полет среды, в которой происходит движение, считается неконтролируемым и предполагается, что оно проявляется в реализующемся в предшествующий текущему моменту времени t моменте векторе состояния (рис. 1). Здесь $O_g Y_g X_g Z_g$ — геоцентрическая система координат (СК), в которой происходит движение ЛА, $O Y X Z$ — декартова СК, находящаяся в центре масс ведомого ЛА относительно ведущего, связанных вектором состояний, φ — угол визирования, χ — угол азимута.

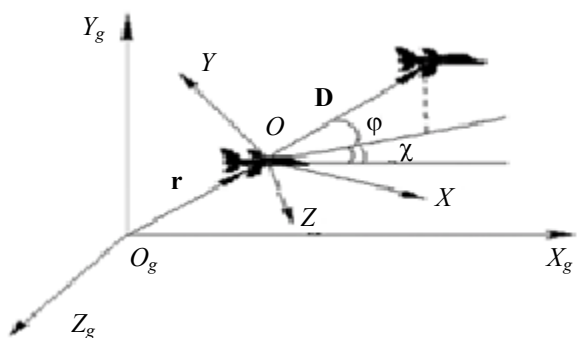


Рис. 1

Уравнения относительного движения двух ЛА в группе определяются известными положениями теоретической механики [см. лит.], в которых приняты следующие обозначения:

1) \mathbf{r} — вектор положения, проведенный из начала выбранной системы координат в точку мгновенного местоположения летательного аппарата. Вектор \mathbf{r} и скорость его изменения $\dot{\mathbf{r}}$ записываются в проекциях на оси выбранной (декартовой или геоцентрической) системы координат. В первом случае вектор положения \mathbf{r} определяется тремя его проекциями на ось декартовой СК, во втором — двумя углами и расстоянием r от начала геоцентрической СК до центра масс ЛА;

2) D — линия визирования — прямая, соединяющая центры масс ведомого и ведущего ЛА;

3) \mathbf{D} — вектор относительной дальности, который направлен от ведомого ЛА к ведущему вдоль линии визирования и по величине равен расстоянию между центрами масс этих ЛА (относительная дальность);

4) V — скорость ведомого ЛА относительно ведущего, определяется относительной скоростью: $V = \dot{D}$;

5) Плоскость относительного движения двух ЛА — горизонтальная, в которой лежат векторы относительной дальности и относительной скорости в данный момент времени.

6) Углами пеленга в работе считаются два угла (для конкретности назовем их углами места (визирования) и азимута, см. рис. 1), которые определяют ориентацию линии визирования в связанных с ведомым ЛА декартовых СК, вращающихся с угловой скоростью ω относительно инерциального базиса.

С использованием принятых обозначений положение летательных аппаратов можно определить в каждый момент времени векторами $\mathbf{r}_1(t)$ и $\mathbf{r}_2(t)$ (индекс „1“ относится к ведущему ЛА, а „2“ — к ведомому) в геоцентрической СК (рис. 2).

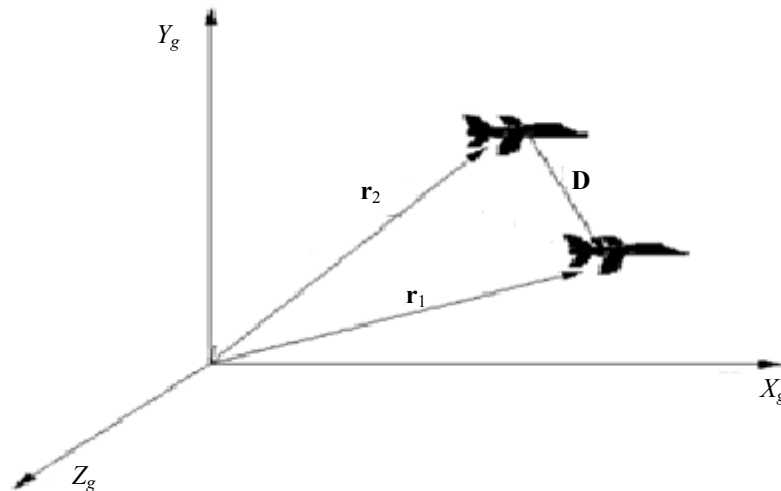


Рис. 2

Следовательно, векторы дальности и относительной скорости можно представить следующим образом:

$$\mathbf{D}(t) = \mathbf{r}_1(t) - \mathbf{r}_2(t), \quad (1)$$

$$\mathbf{V} = \dot{\mathbf{D}}(t) = \dot{\mathbf{r}}_1(t) - \dot{\mathbf{r}}_2(t). \quad (2)$$

Векторное уравнение динамики относительного движения представляется в виде

$$\dot{\mathbf{V}} = \ddot{\mathbf{D}}(t) = \mathbf{a}_1(t) - \mathbf{a}_2(t), \quad (3)$$

где \mathbf{a}_1 , \mathbf{a}_2 — векторы ускорений ведущего и ведомого БЛА соответственно.

Таким образом, относительное движение БЛА в пространстве представляется как движение двух материальных точек, совпадающих с центрами масс двух БЛА — ведущего и ведомого.

Определение ориентации относительного движения ЛА в соответствующих системах координат. Относительное движение ЛА в связанной СК $OXYZ$ ведомого ЛА, перемещающейся относительно инерциальной СК, приводится ниже. В этом случае переход от абсолютных производных векторов к локальным осуществляется следующим образом:

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \dot{\mathbf{r}} + [\omega \mathbf{r}], \quad (4)$$

$$\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = \ddot{\mathbf{r}} + 2[\omega \dot{\mathbf{r}}] + [\omega [\omega \mathbf{r}]] + [\dot{\omega} \mathbf{r}]. \quad (5)$$

Точками обозначены производные векторов по времени t в связанной СК, вращающейся относительно инерциальной с угловой скоростью ω . Абсолютная скорость движения ведущего ЛА в связанной СК ведомого ЛА определяется выражениями:

$$\mathbf{V}_1 = \mathbf{V}_2 + \dot{\mathbf{D}} + [\omega \mathbf{D}], \quad (6)$$

$$\mathbf{a}_1 = \mathbf{a}_2 + \ddot{\mathbf{D}} + [\boldsymbol{\omega} [\boldsymbol{\omega} \mathbf{D}]] + [\mathbf{d} \mathbf{D}] + [2\boldsymbol{\omega} \dot{\mathbf{D}}],$$

где $\boldsymbol{\varepsilon} = \dot{\boldsymbol{\omega}}$ — вектор углового ускорения ведомого ЛА.

Предполагается, что характер действующих на объект сил известен, т.е. известны законы изменения векторов скорости и ускорения каждого ЛА. Необходимо найти динамические и кинематические соотношения, определяющие изменение во времени параметров относительного движения.

Кинематические и динамические векторные уравнения относительного движения двух ЛА в связанной СК получены из выражений (6):

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{D}} &= \mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2 - [\boldsymbol{\omega} \mathbf{D}], \\ \ddot{\mathbf{D}} &= \mathbf{a}_1 - \mathbf{a}_2 - [\boldsymbol{\omega} [\boldsymbol{\omega} \mathbf{D}]] + [\boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{D}] + [2\boldsymbol{\omega} \dot{\mathbf{D}}]. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

В горизонтированной СК рассматриваются выражения (2) и (3) через проекции векторов. Введем следующие обозначения:

$$\left. \begin{aligned} \Delta a_X &= a_{X_1} - a_{X_2}, \\ \Delta a_Y &= a_{Y_1} - a_{Y_2}, \\ \Delta a_Z &= a_{Z_1} - a_{Z_2}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

С учетом выражения (7) динамические уравнения относительного движения двух ЛА в геоцентрической СК, соответствующей горизонтированной, представим следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{D} &= \Delta a_X \cos \varphi \cos \chi + \Delta a_Y \sin \varphi - \Delta a_Z \cos \varphi \sin \chi + D \cos^2 \varphi (\dot{\chi} + \dot{\psi})^2 + D (\dot{\varphi})^2, \\ \ddot{\varphi} &= \left[-\Delta a_X \sin \varphi \cos \chi + \Delta a_Y \cos \varphi + \Delta a_Z \sin \varphi \sin \chi - D \cos \varphi \sin \varphi (\dot{\chi} + \dot{\psi})^2 - 2\dot{D} \dot{\varphi} \right] \frac{1}{D}, \\ \ddot{\chi} &= \left[-\Delta a_X \sin \chi - \Delta a_Z \cos \chi - 2(\dot{\psi} + \dot{\chi}) \right] \left(\dot{D} \cos \varphi - D \sin \varphi \right) \frac{1}{D \cos \varphi} - \ddot{\psi}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Здесь составляющие относительного ускорения Δa_X , Δa_Y , Δa_Z рассчитываются в горизонтированной СК. Введем обозначения:

$$\left. \begin{aligned} \Delta V_X &= V_{X_1} - V_{X_2}, \\ \Delta V_Y &= V_{Y_1} - V_{Y_2}, \\ \Delta V_Z &= V_{Z_1} - V_{Z_2}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Из первого выражения системы (7) получим кинематические уравнения относительного движения двух ЛА

$$\left. \begin{aligned} \dot{D} &= \Delta V_X \cos \varphi \cos \chi + \Delta V_Y \sin \varphi - \Delta V_Z \cos \varphi \sin \chi, \\ \dot{\varphi} &= \left(-\Delta V_X \sin \varphi \cos \chi + \Delta V_Y \cos \varphi + \Delta V_Z \sin \varphi \sin \chi \right) \frac{1}{D}, \\ \dot{\chi} &= \left(-\Delta V_X \sin \chi - \Delta V_Z \cos \chi \right) \frac{1}{D \cos \varphi} - \dot{\psi}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Чтобы замкнуть систему уравнений относительного движения ЛА, к динамическим и кинематическим соотношениям необходимо добавить уравнения, определяющие значения относительного ускорения и относительной скорости в соответствующих СК.

Заключение. При рассмотрении относительного движения ведущего и ведомого ЛА в горизонтированной СК ведомого ЛА соотношения для ΔV_X , ΔV_Y , ΔV_Z , Δa_X , Δa_Y , Δa_Z примут вид:

$$\Delta V_X = (V_{X_1} \cos \nu_1 - V_{Y_1} \sin \nu_1 \cos \gamma_1 + V_{Z_1} \sin \gamma_1 \sin \nu_1) \cos(\psi_1 - \psi_2) + \\ + (V_{Y_1} \sin \gamma_1 + V_{Z_1} \cos \gamma_1) \sin(\psi_1 - \psi_2) - V_{X_2} \cos \nu_2 - V_{Y_2} \sin \nu_2 \times \\ \times \cos \gamma_2 - V_{Z_2} \sin \gamma_2 \sin \nu_2,$$

$$\Delta V_Y = V_{X_1} \sin \nu_1 + V_{Y_1} \cos \nu_1 \cos \gamma_1 - V_{Z_1} \sin \gamma_1 \cos \nu_1 - V_{X_2} \sin \nu_2 - \\ - V_{Y_2} \cos \nu_2 \cos \gamma_2 + V_{Z_2} \sin \gamma_2 \cos \nu_2,$$

$$\Delta V_Z = -(V_{X_1} \cos \nu_1 - V_{Y_1} \sin \nu_1 \cos \gamma_1 + V_{Z_1} \sin \gamma_1 \sin \nu_1) \sin(\psi_1 - \psi_2) + \\ + (V_{Y_1} \sin \gamma_1 + V_{Z_1} \cos \gamma_1) \cos(\psi_1 - \psi_2) - V_{Y_2} \sin \gamma_2 - V_{Z_2} \cos \gamma_2,$$

$$\Delta a_X = (a_{X_1} \cos \nu_1 - a_{Y_1} \sin \nu_1 \cos \gamma_1 + a_{Z_1} \sin \gamma_1 \sin \nu_1) \cos(\psi_1 - \psi_2) + \\ + (a_{Y_1} \sin \gamma_1 + a_{Z_1} \cos \gamma_1) \sin(\psi_1 - \psi_2) - a_{X_2} \cos \nu_2 - a_{Y_2} \sin \nu_2 \times \\ \times \cos \gamma_2 - a_{Z_2} \sin \gamma_2 \sin \nu_2,$$

$$\Delta a_Y = a_{X_1} \sin \nu_1 + a_{Y_1} \cos \nu_1 \cos \gamma_1 - a_{Z_1} \sin \gamma_1 \cos \nu_1 - a_{X_2} \sin \nu_2 - \\ - a_{Y_2} \cos \nu_2 \cos \gamma_2 + a_{Z_2} \sin \gamma_2 \cos \nu_2,$$

$$\Delta a_Z = -(a_{X_1} \cos \nu_1 - a_{Y_1} \sin \nu_1 \cos \gamma_1 + a_{Z_1} \sin \gamma_1 \sin \nu_1) \sin(\psi_1 - \psi_2) + \\ + (a_{Y_1} \sin \gamma_1 + a_{Z_1} \cos \gamma_1) \cos(\psi_1 - \psi_2) - a_{Y_2} \sin \gamma_2 - a_{Z_2} \cos \gamma_2,$$

Таким образом, в результате анализа были получены соотношения, связывающие составляющие относительного ускорения и относительной скорости ведомого ЛА и ведущего в выбранной системе координат.

ЛИТЕРАТУРА

Боднер В. А. Система управления летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1973. 532 с.

- | | |
|---|--|
| Леонид Владимирович Андреев | — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; кафедра стабилизации, навигации и управления; E-mail: Lio8300@mail.ru |
| Сергей Владимирович Богословский | — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра стабилизации, навигации и управления; E-mail: postmaster@elavt.spb.ru |
| Борис Викторович Видин | — канд. техн. наук, профессор; ОКБ „Электроавтоматика“ им. П. А. Ефимова, Санкт-Петербург; E-mail: postmaster@elavt.spb.ru |
| Игорь Олегович Жаринов | — канд. техн. наук, доцент; ОКБ „Электроавтоматика“ им. П. А. Ефимова, Санкт-Петербург; E-mail: igor_rabota@pisem.net |
| Олег Олегович Жаринов | — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра моделирования вычислительных и электронных систем; E-mail: zharinov@hotmail.ru |
| Павел Павлович Парамонов | — д-р техн. наук, профессор; ОКБ „Электроавтоматика“ им. П. А. Ефимова, Санкт-Петербург; E-mail: postmaster@elavt.spb.ru |
| Рубен Ашотович Шек-Иовсепяц | — д-р техн. наук, профессор; ОКБ „Электроавтоматика“ им. П. А. Ефимова, Санкт-Петербург; E-mail: postmaster@elavt.spb.ru |

Рекомендована кафедрой систем управления и информатики

Поступила в редакцию 01.07.09 г.