



УДК 629.7.054.07:623.746.4-519  
ГРНТИ 78.21.41.13

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ДАТЧИКОВ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

*С.А. ТАШКОВ*

*ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

*Д.Ю. БУЛОЧНИКОВ*

*ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

*Р.Р. ШАТОВКИН, доктор технических наук*

*ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

Исследованы информационные возможности типовых датчиков, входящих в состав навигационной системы современного беспилотного летательного аппарата. Выяснено, что в навигационной системе беспилотного летательного аппарата наблюдается избыточность информации. Это обуславливает использование комплексной вторичной обработки информации датчиков в интересах повышения точности определения навигационных параметров и разработки комбинированной навигационной системы, способной функционировать как в режиме использования информации спутниковой навигационной системы, так и в автономном режиме.

*Ключевые слова:* беспилотный летательный аппарат, спутниковая навигационная система, датчик угловой скорости, акселерометр, магнитометр, барометрический высотомер, доплеровский измеритель скорости и угла сноса.

## UNMANNED AIRCRAFT NAVIGATION SYSTEM SENSORS INFORMATION POSSIBILITIES RESEARCH

*S.A. TASHKOV*

*MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

*D.Y. BULOCHNIKOV*

*MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

*R.R. SHATOVKIN, Doctor of Technical Sciences*

*MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

The information capabilities of typical sensors included in the navigation system of a modern unmanned aerial vehicle are investigated. It was found that in the navigation system of an unmanned aerial vehicle there is a redundancy of information. This leads to the use of integrated secondary processing of sensor information in order to improve the accuracy of the determination of navigation parameters and the development of a combined navigation system capable of operating both in the mode of use of information of the satellite navigation system and offline.

*Keywords:* unmanned aerial vehicle, satellite navigation system, angular velocity sensor, accelerometer, magnetometer, barometric altimeter, doppler speed and drift angle meter.

**Введение.** Приоритетным направлением в разработке навигационных систем современных беспилотных летательных аппаратов (БЛА) является использование комплексной обработки информации разнородных датчиков, входящих в состав этих систем, то есть создание комбинированных навигационных систем, способных функционировать как в режиме использования информации спутниковой навигационной системы (СНС), так и в автономном режиме. Такая возможность обусловлена наличием избыточности информации используемых датчиков. Однако создание алгоритмов комплексной обработки, способных обеспечить бесперебойную выдачу



точных навигационных данных БЛА, требует исследования информационных возможностей, используемых в составе его навигационной системы датчиков.

**Цель работы** – исследовать информационные возможности типовых датчиков, входящих в состав навигационной системы современного БЛА, в интересах разработки комбинированной навигационной системы, способной функционировать как в режиме использования информации СНС, так и в автономном режиме.

**Теоретическая значимость.** Исследуем информационные возможности типовых датчиков, входящих в состав навигационной системы современного БЛА, а именно, приемника СНС, датчиков угловой скорости (ДУС), трехкоординатного акселерометра, магнитного компаса (магнитометра), барометрического высотомера (цифрового датчика давления) и доплеровского измерителя скорости и угла сноса (ДИСС).

*Информационные возможности приемника СНС.* Современный приемник СНС способен осуществлять прием информации как в глобальной СНС GPS, так и в системе ГЛОНАСС. И та, и другая СНС работают с геодезическими системами координат на эллипсоидах: WGS84 – для системы GPS, и ПЗ-90 – для системы ГЛОНАСС. Различия заключаются в используемой модели Земли: эллипсоида GRS80 – для системы GPS, и SGS85 – для системы ГЛОНАСС [1].

Приемник СНС в каждый  $k$ -й момент времени получает информацию о геодезической широте  $B_k$  и долготе  $L_k$  БЛА, его высоте над поверхностью эллипсоида  $H_k$  и путевой скорости  $V_k$ .

Для вычисления координат БЛА  $x_k, y_k$  и  $z_k$  в нормальной географической системе координат  $Ox_g Y_g Z_g$  (рисунок 1) через высоту над поверхностью эллипсоида  $H_k$ , широту  $B_k$  и долготу  $L_k$  необходимо произвести соответствующие преобразования [2]:

$$x_k = (\rho_k + H_k) \cos B_k \cos L_k; \tag{1}$$

$$y_k = (\rho_k + H_k) \cos B_k \sin L_k; \tag{2}$$

$$z_k = ((1 - e^2)\rho_k + H_k) \sin B_k, \tag{3}$$

где  $\rho_k$  – радиус кривизны первого вертикала на данной широте:

$$\rho_k = \frac{c}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B_k}}; \tag{4}$$

$e$  – эксцентриситет эллипсоида:

$$e^2 = \frac{c^2 - b^2}{c^2} = 2f - f^2; \tag{5}$$

$c$  – большая полуось эллипсоида;  $b$  – малая полуось эллипсоида;  $f$  – полярное сжатие.

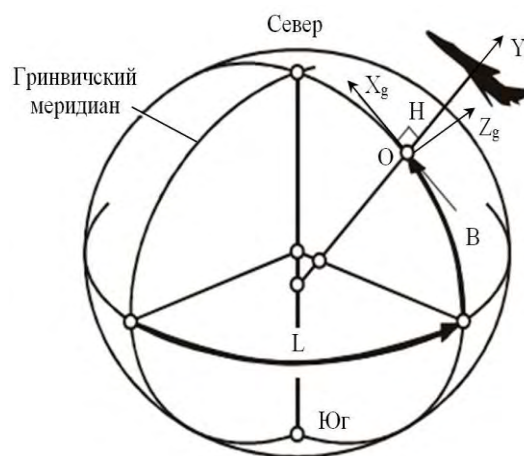


Рисунок 1 – Геодезическая и нормальная географическая системы координат



В таблице 1 представлены значения полуосей эллипсоидов и полярного сжатия в используемых в настоящее время геоцентрических системах координат [1].

Таблица 1 – Значения полуосей эллипсоидов и полярного сжатия в используемых геоцентрических системах координат

| Эллипсоид          | Использование              | Большая полуось с, м | Малая полуось b, м | Полярное сжатие $f = (c-b)/c$ |
|--------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|-------------------------------|
| Красовского (1940) | Россия и др.; Пулково-1942 | 6378245              | 6356863            | 1/298,3                       |
| GRS80              | Международный (GPS); WGS84 | 6378137              | 6356752,31425      | 1/298,25722356                |
| SGS85              | Россия (ГЛОНАСС); ПЗ-90    | 6378136              | 6356751,3618       | 1/298,25784                   |

Для повышения точности расчетов параметров движения БЛА, определяемых на основе ее местоположения, следует использовать модель Земли в виде сферы Каврайского (рисунок 2) [3].

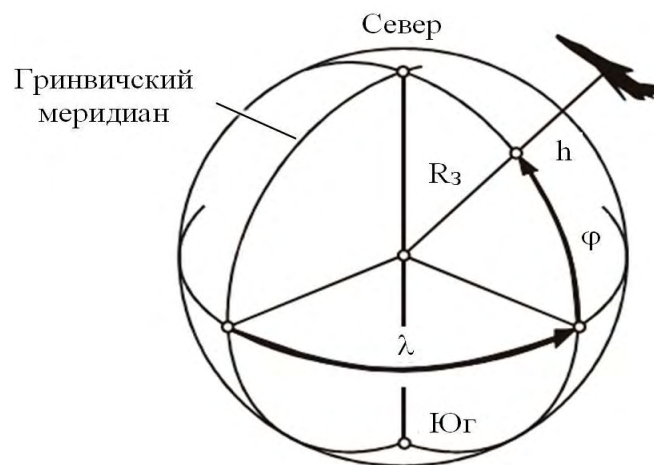


Рисунок 2 – Нормальная сферическая система координат (модель Земли в виде сферы Каврайского)

При использовании сферы Каврайского нормальная сферическая широта  $\varphi_k$  и долгота  $\lambda_k$  связаны с геодезической широтой  $B_k$  и долготой  $L_k$  выражениями:

$$\varphi_k = B_k - 8'39'' \sin 2B_k = B_k - 0,1441^0 \sin 2B_k = B_k - 0,0025 \sin 2B_k, \quad (6)$$

$$\lambda_k = L_k, \quad k = \overline{0, K}. \quad (7)$$

Высота БЛА над поверхностью сферы  $h_k$  определяется как:

$$h_k = (1 - e^2) \rho_k + H_k - R_3, \quad (8)$$

где  $R_3 = 6372900$  м – средний радиус Земли (для сферы Каврайского).

Скорость изменения нормальной сферической широты  $\dot{\varphi}_k$ , долготы  $\dot{\lambda}_k$  и высоты над поверхностью сферы  $\dot{h}_k$  БЛА, соответственно, в  $(k+1)$ -й момент времени в дискретных системах измерения (какой и является приемник СНС) определяется как:

$$\dot{\varphi}_{k+1} = \frac{\varphi_{k+1} - \varphi_k}{T}; \quad (9)$$



$$\dot{\lambda}_{k+1} = \frac{\lambda_{k+1} - \lambda_k}{T}; \tag{10}$$

$$\dot{h}_{k+1} = \frac{h_{k+1} - h_k}{T}, \tag{11}$$

где  $T$  – период дискретизации.

Тогда возможно определить составляющие вектора относительной скорости движения БЛА в нормальной географической системе координат  $OX_g Y_g Z_g$   $V_{xgk}$ ,  $V_{ygz}$  и  $V_{zgz}$  в  $k$ -й момент времени:

$$V_{xgk} = \dot{\phi}_k R_k; \tag{12}$$

$$V_{ygz} = \dot{h}_k; \tag{13}$$

$$V_{zgz} = \dot{\lambda}_k R_k \cos \varphi_k, \tag{14}$$

где

$$R_k = R_3 + h_k. \tag{15}$$

Полученные выражения (12) и (14) позволяют вычислить курсовой угол БЛА  $\phi_k$ :

$$\phi_k = \frac{1}{3} \left( \arctg \left( \frac{V_{zgz}}{V_{xgk}} \right) + \arccos \left( \frac{V_{xgk}}{V_k} \right) + \arcsin \left( \frac{V_{zgz}}{V_k} \right) \right). \tag{16}$$

Связь нормальной географической и нормальной сферической систем координат описывается выражениями [1]:

$$x_k = R_k \cos \varphi_k \cos(U_3 T + \lambda_k); \tag{17}$$

$$y_k = R_k \cos \varphi_k \sin(U_3 T + \lambda_k); \tag{18}$$

$$z_k = R_k \sin \varphi_k, \tag{19}$$

где  $U_3 = 7,2921158553 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$  – угловая скорость суточного вращения Земли.

Таким образом, приемник СНС, входящий в состав измерительного модуля, кроме непосредственного определения геодезической широты  $B_k$  и долготы  $L_k$  БЛА, его высоты над поверхностью эллипсоида  $H_k$  и путевой скорости  $V_k$ , позволяет в  $k$ -й момент времени получить информацию о нормальной сферической широте  $\varphi_k$ , долготе  $\lambda_k$  и высоте БЛА над поверхностью сферы  $h_k$ ; скорости изменения нормальной сферической широты  $\dot{\phi}_k$ , долготы  $\dot{\lambda}_k$  и высоты  $\dot{h}_k$  БЛА; координатах местоположения БЛА в нормальной географической системе координат  $OX_g Y_g Z_g$   $x_k$ ,  $y_k$  и  $z_k$ ; составляющих вектора относительной скорости движения БЛА в нормальной географической системе координат  $OX_g Y_g Z_g$   $V_{xgk}$ ,  $V_{ygz}$  и  $V_{zgz}$ ; курсовом угле БЛА  $\phi_k$ .

*Информационные возможности ДУС.* Абсолютная угловая скорость БЛА в  $k$ -й момент времени  $\omega_k$  состоит из переносной угловой скорости БЛА  $u_k$ , вызванной перемещением ее



центра масс  $O$  вокруг сферической поверхности Земли, и относительной угловой скорости вращения БЛА  $\omega_k^r$  вокруг своего центра масс [3]:

$$\omega_k = \mathbf{u}_k + \omega_k^r. \tag{20}$$

С помощью трехосевого ДУС (или трех одноосевых ДУС) в каждый  $k$ -й момент времени определяются проекции вектора абсолютной угловой скорости БЛА  $\omega_k$  на оси связанной системы координат  $OXYZ$  (рисунок 3)  $\omega_{xk}$ ,  $\omega_{yk}$  и  $\omega_{zk}$ .

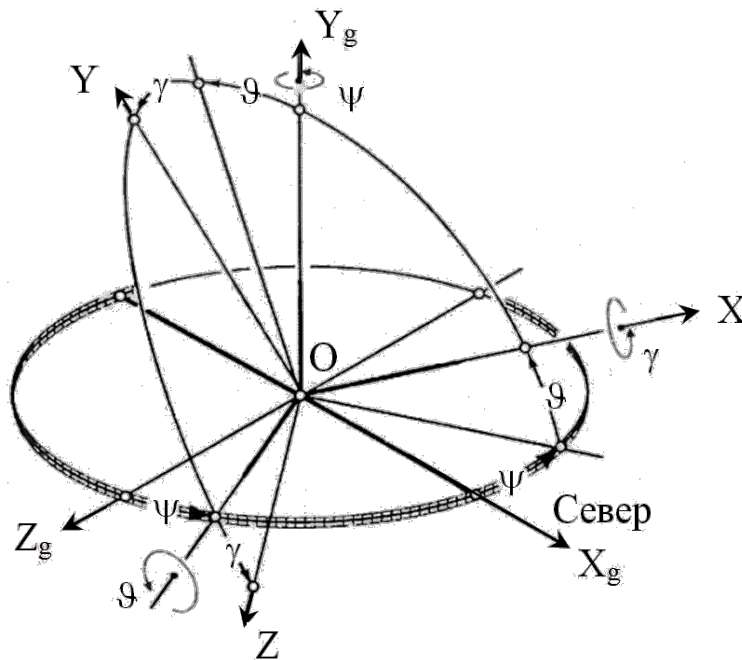


Рисунок 3 – Связанная система координат БЛА

Проекции вектора абсолютной угловой скорости БЛА на оси связанной системы координат  $OXYZ$   $\omega_{xk}$ ,  $\omega_{yk}$  и  $\omega_{zk}$  в  $k$ -й момент времени представляются как:

$$\omega_{xk} = u_{xk} + \omega_{xk}^r; \tag{21}$$

$$\omega_{yk} = u_{yk} + \omega_{yk}^r; \tag{22}$$

$$\omega_{zk} = u_{zk} + \omega_{zk}^r. \tag{23}$$

Тогда, проекции вектора относительной угловой скорости БЛА на оси связанной системы координат  $OXYZ$   $\omega_{xk}^r$ ,  $\omega_{yk}^r$  и  $\omega_{zk}^r$  в  $k$ -й момент времени можно определить как:

$$\omega_{xk}^r = \omega_{xk} - u_{xk}; \tag{24}$$

$$\omega_{yk}^r = \omega_{yk} - u_{yk}; \tag{25}$$

$$\omega_{zk}^r = \omega_{zk} - u_{zk}. \tag{26}$$



Проекция вектора переносной угловой скорости БЛА на оси связанной системы координат  $OXYZ$   $u_{xk}$ ,  $u_{yk}$  и  $u_{zk}$  в  $k$ -й момент времени могут быть вычислены через матрицы направляющих косинусов:

$$u_{xk} = u_{xgk} \cos \vartheta_k \cos \psi_k + u_{ygzk} \sin \vartheta_k - u_{zgzk} \cos \vartheta_k \sin \psi_k ; \quad (27)$$

$$u_{yk} = u_{xgk} (-\cos \gamma_k \cos \psi_k \sin \vartheta_k + \sin \gamma_k \sin \psi_k) + u_{ygzk} \cos \gamma_k \cos \vartheta_k + u_{zgzk} (\cos \gamma_k \sin \psi_k \sin \vartheta_k + \sin \gamma_k \cos \psi_k) ; \quad (28)$$

$$u_{zk} = u_{xgk} (\sin \gamma_k \cos \psi_k \sin \vartheta_k + \cos \gamma_k \sin \psi_k) - u_{ygzk} \sin \gamma_k \cos \vartheta_k + u_{zgzk} (-\sin \gamma_k \sin \psi_k \sin \vartheta_k + \cos \gamma_k \cos \psi_k) , \quad (29)$$

где  $\psi_k$ ,  $\vartheta_k$ ,  $\gamma_k$  – углы рыскания, тангажа и крена БЛА, соответственно, в  $k$ -й момент времени; а проекции вектора переносной угловой скорости БЛА на оси нормальной географической системы координат  $OX_gY_gZ_g$   $u_{xgk}$ ,  $u_{ygzk}$  и  $u_{zgzk}$  в  $k$ -й момент времени определяются в соответствии с выражениями [3]:

$$u_{xgk} = (U_3 + \dot{\lambda}_k) \cos \varphi_k = U_3 \cos \varphi_k + \frac{V_{zgzk}}{R_3} ; \quad (30)$$

$$u_{ygzk} = (U_3 + \dot{\lambda}_k) \sin \varphi_k = U_3 \sin \varphi_k + \frac{V_{zgzk}}{R_3} \operatorname{tg} \varphi_k ; \quad (31)$$

$$u_{zgzk} = -\dot{\varphi}_k , \quad (32)$$

где  $V_{zgzk}$  – боковая составляющая относительной скорости движения БЛА в нормальной географической системе координат.

Проекция вектора относительной угловой скорости БЛА на оси связанной системы координат  $OXYZ$   $\omega_{xk}^r$ ,  $\omega_{yk}^r$ ,  $\omega_{zk}^r$  в  $k$ -й момент времени:

$$\omega_{xk}^r = \omega_{\psi k} \sin \vartheta_k + \omega_{\gamma k} ; \quad (33)$$

$$\omega_{yk}^r = \omega_{\psi k} \cos \vartheta_k \cos \gamma_k + \omega_{\vartheta k} \sin \gamma_k ; \quad (34)$$

$$\omega_{zk}^r = -\omega_{\psi k} \cos \vartheta_k \sin \gamma_k + \omega_{\vartheta k} \cos \gamma_k , \quad (35)$$

где  $\omega_{\psi k}$ ,  $\omega_{\vartheta k}$ ,  $\omega_{\gamma k}$  – угловые скорости изменения углов рыскания, тангажа и крена БЛА, соответственно, в  $k$ -й момент времени.

По информации о проекциях вектора относительной угловой скорости БЛА на оси связанной системы координат  $OXYZ$   $\omega_{xk}^r$ ,  $\omega_{yk}^r$ ,  $\omega_{zk}^r$  с учетом выражений (33)–(35) можно определить угловые скорости изменения углов рыскания, тангажа и крена БЛА в нормальной географической системе координат  $OX_gY_gZ_g$   $\omega_{\psi k}$ ,  $\omega_{\vartheta k}$  и  $\omega_{\gamma k}$ , соответственно, в  $k$ -й момент времени [3]:



$$\omega_{\psi k} = \frac{1}{\cos \vartheta_k} (\omega_{yk}^r \cos \gamma_k - \omega_{zk}^r \sin \gamma_k); \quad (36)$$

$$\omega_{\vartheta k} = \omega_{yk}^r \sin \gamma_k + \omega_{zk}^r \cos \gamma_k; \quad (37)$$

$$\omega_{\gamma k} = \omega_{xk}^r - \operatorname{tg} \vartheta_k (\omega_{yk}^r \cos \gamma_k - \omega_{zk}^r \sin \gamma_k). \quad (38)$$

Тогда для дискретных систем углы рыскания, тангажа и крена БЛА  $\psi_{k+1}$ ,  $\vartheta_{k+1}$ ,  $\gamma_{k+1}$  на  $(k+1)$ -й момент времени определяются как:

$$\psi_{k+1} = \psi_k + \omega_{\psi k} T; \quad (39)$$

$$\vartheta_{k+1} = \vartheta_k + \omega_{\vartheta k} T; \quad (40)$$

$$\gamma_{k+1} = \gamma_k + \omega_{\gamma k} T. \quad (41)$$

Начальные значения углов рыскания  $\psi_0$ , тангажа  $\vartheta_0$  и крена  $\gamma_0$  считаются известными.

Таким образом, ДУС, кроме непосредственного измерения проекций вектора абсолютной угловой скорости БЛА  $\omega_k$  на оси связанной системы координат OXYZ  $\omega_{xk}$ ,  $\omega_{yk}$  и  $\omega_{zk}$ , позволяет в  $k$ -й момент времени получить информацию об угловых скоростях изменения углов рыскания, тангажа и крена БЛА в нормальной географической системе координат OX<sub>g</sub>Y<sub>g</sub>Z<sub>g</sub>  $\omega_{\psi k}$ ,  $\omega_{\vartheta k}$  и  $\omega_{\gamma k}$ , соответственно, а также вычислить углы рыскания, тангажа и крена БЛА  $\psi_{k+1}$ ,  $\vartheta_{k+1}$ ,  $\gamma_{k+1}$ , соответственно, в  $(k+1)$ -й момент времени.

*Информационные возможности акселерометра.* С помощью трехкоординатного акселерометра в каждый  $k$ -й момент времени определяются проекции вектора кажущегося ускорения БЛА  $\mathbf{n}_k$  на оси связанной системы координат OXYZ  $n_{xk}$ ,  $n_{yk}$  и  $n_{zk}$ .

Проекции вектора кажущегося ускорения БЛА в нормальной географической системе координат OX<sub>g</sub>Y<sub>g</sub>Z<sub>g</sub>  $n_{xgk}$ ,  $n_{y gk}$  и  $n_{z gk}$  в  $k$ -й момент времени определяются выражениями:

$$\begin{aligned} n_{xgk} = & n_{xk} \cos \vartheta_k \cos \psi_k + n_{yk} (-\cos \gamma_k \cos \psi_k \sin \vartheta_k + \sin \gamma_k \sin \psi_k) + \\ & + n_{zk} (\sin \gamma_k \cos \psi_k \sin \vartheta_k + \cos \gamma_k \sin \psi_k); \end{aligned} \quad (42)$$

$$n_{y gk} = n_{xk} \sin \vartheta_k + n_{yk} \cos \gamma_k \cos \vartheta_k - n_{zk} \sin \gamma_k \cos \psi_k; \quad (43)$$

$$\begin{aligned} n_{z gk} = & -n_{xk} \cos \vartheta_k \sin \psi_k + n_{yk} (\cos \gamma_k \sin \psi_k \sin \vartheta_k + \sin \gamma_k \cos \psi_k) + \\ & + n_{zk} (-\sin \gamma_k \sin \psi_k \sin \vartheta_k + \cos \gamma_k \cos \psi_k). \end{aligned} \quad (44)$$

Вектор кажущегося ускорения БЛА можно представить как:

$$\mathbf{n}_k = \mathbf{a}_k + \mathbf{g}, \quad (45)$$

где  $\mathbf{a}_k$  – вектор абсолютного ускорения БЛА;  $\mathbf{g}$  – вектор ускорения свободного падения, имеющий значение  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ .



Вектор абсолютного ускорения БЛА в каждый  $k$ -й момент времени складывается из следующих составляющих [3]:

$$\mathbf{a}_k = \mathbf{a}_k^e + \mathbf{a}_k^r + \mathbf{a}_k^c, \quad (46)$$

где  $\mathbf{a}_k^e$  – вектор переносного ускорения;  $\mathbf{a}_k^r$  – вектор относительного ускорения;  $\mathbf{a}_k^c$  – вектор кориолисова ускорения.

Переносное ускорение  $\mathbf{a}_k^e$  вызвано угловой скоростью вращения Земли  $\mathbf{U}_3$  и определяется выражением:

$$\mathbf{a}_k^e = \mathbf{U}_3 \times (\mathbf{U}_3 \times \mathbf{R}_k), \quad (47)$$

где  $\mathbf{R}_k$  – радиус-вектор, соединяющий центр Земли и полезную нагрузку БЛА.

Проекции вектора переносного ускорения БЛА в нормальной географической системе координат  $OX_g Y_g Z_g$   $a_{xgk}^e$ ,  $a_{ygzk}^e$  и  $a_{zgzk}^e$  в  $k$ -й момент времени определяются выражениями:

$$a_{xgk}^e = U_3^2 R_k \sin \varphi_k \cos \varphi_k; \quad (48)$$

$$a_{ygzk}^e = -U_3^2 R_k \cos^2 \varphi_k; \quad (49)$$

$$a_{zgzk}^e = 0. \quad (50)$$

Относительное ускорение  $\mathbf{a}_k^r$  вызвано изменением относительной линейной скорости  $\mathbf{V}_k^r$  и движением БЛА вдоль сферической поверхности Земли с относительной угловой скоростью  $\boldsymbol{\omega}'_k$ :

$$\mathbf{a}_k^r = \dot{\mathbf{V}}_k^r + \boldsymbol{\omega}'_k \times \mathbf{V}_k^r. \quad (51)$$

Проекции вектора относительного ускорения БЛА в нормальной географической системе координат  $OX_g Y_g Z_g$   $a_{xgk}^r$ ,  $a_{ygzk}^r$  и  $a_{zgzk}^r$  в  $k$ -й момент времени определяются выражениями:

$$a_{xgk}^r = a_{xgk} + \frac{V_{zgzk}^2}{R_k} \operatorname{tg} \varphi_k + \frac{V_{xgzk} V_{ygzk}}{R_k}; \quad (52)$$

$$a_{ygzk}^r = a_{ygzk} - \frac{V_{zgzk}^2}{R_k} - \frac{V_{xgzk}^2}{R_k}; \quad (53)$$

$$a_{zgzk}^r = a_{zgzk} + \frac{V_{zgzk} V_{ygzk}}{R_k} - \frac{V_{xgzk} V_{zgzk}}{R_k} \operatorname{tg} \varphi_k. \quad (54)$$





Кориолисово ускорение  $\mathbf{a}_k^c$  вызвано угловой скоростью вращения Земли  $\mathbf{U}_3$  и относительной линейной скоростью  $\mathbf{V}_k^r$  БЛА, и определяется как:

$$\mathbf{a}_k^c = 2\mathbf{U}_3 \times \mathbf{V}_k^r. \quad (55)$$

Проекции вектора кориолисова ускорения БЛА в нормальной географической системе координат  $OX_g Y_g Z_g$   $a_{xgk}^c$ ,  $a_{ygzk}^c$  и  $a_{zgzk}^c$  в  $k$ -й момент времени определяются выражениями:

$$a_{xgk}^c = 2U_3 V_{zgzk} \sin \varphi_k; \quad (56)$$

$$a_{ygzk}^c = -2U_3 V_{zgzk} \cos \varphi_k; \quad (57)$$

$$a_{zgzk}^c = 2(U_3 V_{ygzk} \cos \varphi_k - U_3 V_{xgzk} \sin \varphi_k). \quad (58)$$

С учетом выражений (42)–(58) проекции вектора кажущегося ускорения БЛА в нормальной географической системе координат  $OX_g Y_g Z_g$   $n_{xgk}$ ,  $n_{ygzk}$  и  $n_{zgzk}$  в  $k$ -й момент времени можно представить как:

$$n_{xgk} = a_{xgk} + \frac{V_{zgzk}^2}{R_k} \operatorname{tg} \varphi_k + \frac{V_{xgzk} V_{ygzk}}{R_k} + 2U_3 V_{zgzk} \sin \varphi_k; \quad (59)$$

$$n_{ygzk} = a_{ygzk} - \frac{V_{zgzk}^2}{R_k} - \frac{V_{xgzk}^2}{R_k} - 2U_3 V_{zgzk} \cos \varphi_k + g; \quad (60)$$

$$n_{zgzk} = a_{zgzk} + \frac{V_{zgzk} V_{ygzk}}{R_k} - \frac{V_{xgzk} V_{zgzk}}{R_k} \operatorname{tg} \varphi_k + 2(U_3 V_{ygzk} \cos \varphi_k - U_3 V_{xgzk} \sin \varphi_k). \quad (61)$$

При навигации вдоль поверхности Земли необходимо использование только проекций ускорения относительного движения БЛА на оси нормальной географической системы координат  $OX_g Y_g Z_g$   $a_{xgk}$ ,  $a_{ygzk}$  и  $a_{zgzk}$  в  $k$ -й момент времени. Тогда:

$$a_{xgk} = n_{xgk} - \frac{V_{zgzk}^2}{R_k} \operatorname{tg} \varphi_k - \frac{V_{xgzk} V_{ygzk}}{R_k} - 2U_3 V_{zgzk} \sin \varphi_k; \quad (62)$$

$$a_{ygzk} = n_{ygzk} + \frac{V_{zgzk}^2}{R_k} - \frac{V_{xgzk}^2}{R_k} + 2U_3 V_{zgzk} \cos \varphi_k - g; \quad (63)$$

$$a_{zgzk} = n_{zgzk} - \frac{V_{zgzk} V_{ygzk}}{R_k} + \frac{V_{xgzk} V_{zgzk}}{R_k} \operatorname{tg} \varphi_k - 2(U_3 V_{ygzk} \cos \varphi_k - U_3 V_{xgzk} \sin \varphi_k). \quad (64)$$



Составляющие относительной скорости движения БЛА в нормальной географической системе координат  $OX_g Y_g Z_g$   $V_{xgk+1}$ ,  $V_{y gk+1}$  и  $V_{z gk+1}$  в  $(k+1)$ -й момент времени можно определить через соответствующие составляющие ускорения относительного движения БЛА  $a_{xgk}$ ,  $a_{y gk}$  и  $a_{z gk}$ :

$$V_{xgk+1} = V_{xgk} + a_{xgk} T; \tag{65}$$

$$V_{y gk+1} = V_{y gk} + a_{y gk} T; \tag{66}$$

$$V_{z gk+1} = V_{z gk} + a_{z gk} T. \tag{67}$$

Начальные значения составляющих относительной скорости движения БЛА в нормальной географической системе координат  $OX_g Y_g Z_g$   $V_{xg0}$ ,  $V_{y g0}$  и  $V_{z g0}$  считаются известными.

Координаты местоположения БЛА в нормальной сферической системе координат в  $(k+1)$ -й момент времени определяются как:

$$\varphi_{k+1} = \varphi_k + \frac{V_{xgk}}{R_k} T; \tag{68}$$

$$h_{k+1} = h_k + V_{y gk} T; \tag{69}$$

$$\lambda_{k+1} = \lambda_k + \frac{V_{z gk}}{R_k \cos \varphi_k} T. \tag{70}$$

Начальные значения координат местоположения БЛА  $\varphi_0$ ,  $\lambda_0$  и  $h_0$  считаются известными.

Скорости изменения координат БЛА определяются в соответствии с выражениями (9) – (11).

Начальные значения скоростей изменения координат местоположения БЛА  $\dot{\varphi}_0$ ,  $\dot{\lambda}_0$  и  $\dot{h}_0$  считаются известными.

Наличие информации о продольной  $V_{xgk}$  и боковой  $V_{z gk}$  составляющих относительной скорости движения БЛА в нормальной географической системе координат  $OX_g Y_g Z_g$  позволяет определить путевую скорость БЛА в  $k$ -й момент времени:

$$V_k = \sqrt{V_{xgk}^2 + V_{z gk}^2}. \tag{71}$$

Тогда курсовой угол БЛА  $\phi_k$  в  $k$ -й момент времени можно определить на основе выражения (16).

При помощи акселерометров также осуществляется определение начальных значений углов пространственной ориентации БЛА – рыскания  $\psi_0$ , тангажа  $\vartheta_0$  и крена  $\gamma_0$  [3].



Допустим, что в начальный момент времени БЛА занимает неподвижное произвольное положение относительно нормальной географической системы координат  $OX_g Y_g Z_g$ , определяемое углами  $\psi_0$ ,  $\vartheta_0$  и  $\gamma_0$ .

Так как проекции вектора ускорения свободного падения неподвижного свободно ориентированного БЛА на оси связанной системы координат  $OXYZ$  определяются выражениями:

$$g_x = n_{x0} = g \sin \vartheta_0 ; \tag{72}$$

$$g_y = n_{y0} = g \cos \gamma_0 \cos \vartheta_0 ; \tag{73}$$

$$g_z = n_{z0} = -g \sin \gamma_0 \cos \vartheta_0 , \tag{74}$$

то начальные значения углов тангажа  $\vartheta_0$  и крена  $\gamma_0$  определяются как:

$$\vartheta_0 = \arcsin \left( \frac{n_{x0}}{g} \right) ; \tag{75}$$

$$\gamma_0 = \arcsin \left( -\frac{n_{z0}}{n_{y0}} \right) . \tag{76}$$

Начальное значение угла рыскания  $\psi_0$  можно определить как:

$$\psi_0 = \arccos \left( \frac{\omega_{x0} - U_3 \sin \varphi_0 \sin \vartheta_0}{U_3 \cos \varphi_0 \cos \vartheta_0} \right) , \tag{77}$$

где  $\omega_{x0}$  – проекция вектора абсолютной угловой скорости полезной нагрузки БЛА  $\omega_k$  на ось  $OX$  его связанной системы координат  $OXYZ$  в начальный момент времени, измеряемая ДУС;  $\varphi_0$  – значение нормальной сферической широты в начальный момент времени.

Таким образом, трехкоординатный акселерометр, кроме непосредственного измерения проекций вектора кажущегося ускорения БЛА  $\mathbf{n}_k$  на оси связанной системы координат  $OXYZ$   $n_{xk}$ ,  $n_{yk}$  и  $n_{zk}$ , позволяет в  $k$ -й момент времени получить информацию о проекциях ускорения относительного движения БЛА на оси нормальной географической системы координат  $OX_g Y_g Z_g$   $a_{xgk}$ ,  $a_{ygz}$  и  $a_{zgz}$ , путевой скорости БЛА  $V_k$ , а также вычислить в  $(k+1)$ -й момент времени составляющие относительной скорости движения БЛА в нормальной географической системе координат  $OX_g Y_g Z_g$   $V_{xgk+1}$ ,  $V_{ygzk+1}$  и  $V_{zgzk+1}$ ; координаты местоположения БЛА  $\varphi_{k+1}$ ,  $\lambda_{k+1}$  и  $h_{k+1}$ ; скорости изменения координат БЛА  $\dot{\varphi}_{k+1}$ ,  $\dot{\lambda}_{k+1}$  и  $\dot{h}_{k+1}$ . Кроме того по информации акселерометра определяются начальные значения значение угла рыскания  $\psi_0$ , тангажа  $\vartheta_0$  и крена  $\gamma_0$ .

*Информационные возможности магнитного компаса (магнитометра).* Для определения магнитного курса БЛА необходимо считать данные магнитного компаса по осям  $OX$  и  $OY$  –



магнитные отклонения  $m_{xk}^M$  и  $m_{yk}^M$ , а затем вычислить это направление  $\varphi_k^M$  для каждого  $k$ -го момента времени полета БЛА в соответствии с выражением [4]:

$$\varphi_k^M = \arctg \frac{m_{yk}^M}{m_{xk}^M}. \quad (78)$$

Однако в случае применения магнитного компаса в составе сложного устройства (каким является навигационная система БЛА, где присутствуют дополнительные магнитные поля) на датчик действуют помехи, искажающие его показания. В результате магнитным компасом выдается не магнитный, а компасный курс.

Существуют два типа искажений. Первое называется искажением твердого железа НИД (Hard Iron Distortion). Оно по своей природе является аддитивным, то есть к изначально измеряемому полю добавляется дополнительное, создаваемое постоянным магнитом. При неизменной ориентации такого магнита относительно датчика, смещение, вносимое им, будет также неизменно. Ко второму типу относится искажение мягкого железа СИД (Soft Iron Distortion). Оно создается посторонними предметами, искажающими уже имеющееся магнитное поле. Компенсация мягкого железа актуальна и представляет собой более сложную задачу. Процесс компенсации искажений обоих типов достаточно подробно рассмотрен в работе [5].

В результате компенсации искажений мягкого и твердого железа устраняется девиация компаса  $\Delta_k$ , и магнитный компас выдает точный магнитный курс БЛА:

$$\varphi_k^{МК} = \arctg \frac{m_{yk}^{МК}}{m_{xk}^{МК}}, \quad (79)$$

где  $m_{xk}^{МК}$ ,  $m_{yk}^{МК}$  – скорректированные магнитные отклонения.

В свою очередь, истинный курс БЛА определяется как [6]:

$$\varphi_k^{ИК} = \varphi_k^{МК} + (\pm \Delta_M), \quad (80)$$

где  $\Delta_M$  – магнитное склонение, имеющее определенное значение для каждого географического района.

Таким образом, магнитный компас (магнитометр) позволяет при условии компенсации существующих искажений получить информацию о точном магнитном курсе БЛА  $\varphi_k^{МК}$ , а также информацию об истинном курсе БЛА  $\varphi_k^{ИК}$  для заданного географического района в  $k$ -й момент времени.

*Информационные возможности барометрического высотомера (цифрового датчика давления).* Барометрический высотомер представляет собой высокоточный датчик давления, осуществляющий измерение и регистрацию высоты. Вычисление высоты  $H_k^{\delta}$  основано на измерении давления  $p_k$  [7]:

$$p_k = p_0 \left( 1 - \frac{t_{гр} H_k^{\delta}}{T_0} \right) \frac{1}{R t_{гр}}, \quad (81)$$

где  $R$  – газовая постоянная;  $p_0$  и  $T_0$  – давление и температура на уровне начала отсчета высоты, соответственно;  $t_{гр}$  – температурный градиент.



Решая уравнение (81) относительно высоты, получим:

$$H_k^{\delta} = \left[ 1 - \left( \frac{p_k}{p_0} R t_{гр} \right) \right] \frac{T_0}{t_{гр}}. \quad (82)$$

При эксплуатации большинства существующих цифровых датчиков давления дополнительная калибровка не требуется. Установленные значения давления и температуры на уровне начала отсчета высоты, а также температурный градиент заносятся в регистр.

*Информационные возможности ДИСС.* Работа ДИСС основана на использовании эффекта Доплера. Доплеровская частота  $f_{dk}$  зависит от радиальной скорости БЛА  $V_{rk}$  относительно Земли [8]:

$$f_{dk} = \frac{2V_{rk}}{\lambda}, \quad (83)$$

где  $\lambda$  – длина радиоволны передатчика.

Радиальная скорость  $V_{rk}$  представляет собой проекцию путевой скорости БЛА  $V_k$  на направление излучения. Следовательно, доплеровская частота по направлению вектора путевой скорости в  $k$ -й момент времени определяется выражением:

$$f_{dk} = \frac{2V_k}{\lambda} \cos \theta \cos(\beta \pm \varphi_{yck}), \quad (84)$$

где  $\theta$  – фиксированное значение углов отклонения двух лучей диаграммы направленности (ДН) (для двухлучевого ДИСС) от горизонтали (в вертикальной плоскости);  $\beta$  – фиксированное значение углов отклонения двух лучей ДН (для двухлучевого ДИСС) от продольной оси БЛА (в горизонтальной плоскости);  $\varphi_{yck}$  – значение угла сноса БЛА в  $k$ -й момент времени.

Из выражения (84) следует, что при постоянных углах доплеровская частота является функцией двух переменных: путевой скорости и угла сноса.

Измерение путевой скорости и угла сноса осуществляется сравнением доплеровских частот по лучам ДН.

При отсутствии сноса ( $\varphi_{yck} = 0$ ) вектор путевой скорости совпадает с продольной осью БЛА, доплеровские частоты по обоим лучам одинаковы и разность их равна нулю.

Тогда путевая скорость определяется ДИСС как:

$$V_k = \frac{f_{dk} \lambda}{2 \cos \theta \cos \beta}. \quad (85)$$

При наличии сноса (наиболее распространенный случай) доплеровские частоты неодинаковы, так как вектор путевой скорости отклоняется от продольной оси БЛА на величину угла сноса  $\varphi_{yck}$ . Доплеровские частоты для каждого луча ДН по направлению вектора путевой скорости в  $k$ -й момент времени определяются выражениями:

$$f_{dk} = \frac{2V_k}{\lambda} \cos \theta \cos(\beta + \varphi_{yck}); \quad (86)$$



$$f_{д2k} = \frac{2V_k}{\lambda} \cos \theta \cos(\beta - \varphi_{уск}). \quad (87)$$

Для определения путевой скорости и угла сноса используем сумму и разность доплеровских частот:

$$f_{д1k} + f_{д2k} = \frac{4V_k}{\lambda} \cos \theta \cos \beta \cos \varphi_{уск}; \quad (88)$$

$$f_{д1k} - f_{д2k} = -\frac{4V_k}{\lambda} \cos \theta \sin \beta \sin \varphi_{уск}; \quad (89)$$

Тогда путевая скорость и угол сноса определяются ДИСС как:

$$V_k = \frac{(f_{д1k} + f_{д2k})\lambda}{4 \cos \theta \cos \beta \cos \varphi_{уск}}; \quad (90)$$

$$\varphi_{уск} = \operatorname{arctg} \left( \frac{f_{д1k} - f_{д2k}}{f_{д1k} + f_{д2k}} \operatorname{ctg} \beta \right). \quad (91)$$

Для повышения точности измерения путевой скорости и угла сноса возможно формирование четырех лучей ДН, направленных симметрично относительно его продольной оси. Применяются также доплеровские измерители, у которых три луча расположены симметрично, а четвертый расположен по продольной оси БЛА. Этот луч используется для компенсации погрешностей, возникающих из-за различной отражающей способности подстилающей местности.

Помимо измерения путевой скорости и угла сноса при помощи ДИСС также возможно измерение высоты полета БЛА.

Так наклонная дальность от БЛА до Земли в  $k$ -й момент времени будет определяться временем задержки прихода сигнала по любому из лучей ДН:

$$D_k = \frac{t_{зк}c}{2}, \quad (92)$$

где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость распространения радиоволны.

Тогда высота полета БЛА, измеренная с помощью ДИСС, определяется как:

$$H_k = D_k \sin \theta. \quad (93)$$

Таким образом, ДИСС способен измерять путевую скорость  $V_k$ ; угол сноса  $\varphi_{уск}$  и высоту полета БЛА  $H_k$  в  $k$ -й момент времени.

**Выводы.** В результате проведенных исследований определены информационные возможности типовых датчиков, входящих в состав навигационной системы современного БЛА. Выявлено, что в навигационной системе БЛА наблюдается избыточность информации (например, путевую скорость возможно измерить с помощью приемника СНС, трехкоординатного акселе-



рометра и ДИСС). Это обуславливает использование комплексной вторичной обработки информации датчиков в интересах повышения точности определения навигационных параметров и разработки комбинированной навигационной системы, способной функционировать как в режиме использования информации СНС, так и в автономном режиме.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Телеганов Н.А., Тетерин Г.Н. Метод и системы координат в геодезии: учеб. пособие. Новосибирск: СГГА. 2008. 143 с.
2. ГОСТ Р 51794-2008. Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек М.: Стандартинформ, 2009. 29 с.
3. Матвеев В.В. Инерциальные навигационные системы: Учебное пособие. / В.В. Матвеев. – Тула: Издательство ТулГУ, 2012. 199 с.
4. Ташков С.А., Шатовкин Р.Р. Исследование информационных возможностей измерительных устройств на борту беспилотного летательного аппарата // Перспективы развития авиационного радиоэлектронного оборудования: сборник статей по материалам II Межвузовской научно-практической конференции курсантов и слушателей «Молодежные чтения, посвященные памяти Ю.А. Гагарина», 20 мая 2015 г. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015. С. 99–106.
5. Руских М. Магнитометры: принцип действия, компенсация ошибок // Радиолоцман. 2012. № 9. С. 31–38.
6. Черный М.А., Кораблин В.И. Самолетовождение. М.: Изд-во «Транспорт», 1973. 368 с.
7. Самолетовождение. Высота полета. Устройство и применение высотомеров. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://vzletim.aero/upload/iblock/115/navigation04.pdf> (дата обращения 08.05.2017).
8. Применение доплеровских измерителей скорости и сноса. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://lliric.narod.ru/10/page\\_10.5.htm](http://lliric.narod.ru/10/page_10.5.htm) (дата обращения 08.05.2017).

#### REFERENCES

1. Teleganov N.A., Teterin G.N. Metod i sistemy koordinat v geodezii: ucheb. posobie. Novosibirsk: SGGGA. 2008. 143 p.
2. GOST R 51794-2008. Global'nye navigacionnye sputnikovye sistemy. Sistemy koordinat. Metody preobrazovaniy koordinat opredelyaemyh toчек M.: Standartinform, 2009. 29 p.
3. Matveev V.V. Inercial'nye navigacionnye sistemy: Uchebnoe posobie. / V.V. Matveev. – Tula: Izdatel'stvo TulGU, 2012. 199 p.
4. Tashkov S.A., Shatovkin R.R. Issledovanie informacionnyh vozmozhnostej izmeritel'nyh ustrojstv na bortu bespilotnogo letatel'nogo apparata // Perspektivy razvitiya aviacionnogo radio`elektronnoгo oborudovaniya: sbornik statej po materialam II Mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoj konferencii kursantov i slushatelej «Molodezhnye chteniya, posvyaschennye pamyati YU.A. Gagarina», 20 maya 2015 g. Voronezh: VUNC VVS «VVA», 2015. pp. 99-106.
5. Ruskih M. Magnitometry: princip dejstviya, kompensaciya oshibok // Radiolocman. 2012. № 9. pp. 31–38.
6. Chernyj M.A., Korablin V.I. Samoletovozhdenie. M.: Izd-vo «Transport», 1973. 368 p.
7. Samoletovozhdenie. Vysota poleta. Ustrojstvo i primenenie vysotomerov. [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://vzletim.aero/upload/iblock/115/navigation04.pdf> (data obrascheniya 08.05.2017).
8. Primenenie doplerovskih izmeritelej skorosti i snosa. [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: [http://lliric.narod.ru/10/page\\_10.5.htm](http://lliric.narod.ru/10/page_10.5.htm) (data obrascheniya 08.05.2017).



© Ташков С.А., Булочников Д.Ю., Шатовкин Р.Р., 2018

Ташков Сергей Александрович, начальник кафедры боевой подготовки командного факультета, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54А, pilotlipetsk@mail.ru.

Булочников Денис Юрьевич, адъюнкт 203 кафедры радиоэлектроники, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54А, Denarmy4@gmail.com.

Шатовкин Роман Родионович, доктор технических наук, старший преподаватель 203 кафедры радиоэлектроники, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54А, Shatovkin@yandex.ru.