



УДК 629.7.054.07:623.746.4-519
ГРНТИ 78.21.41.13

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ БОРТОВЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ И НАВЕДЕНИЯ КРЫЛАТОЙ РАКЕТЫ

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 на борту крылатой ракеты класса «воздух-поверхность». Выяснено, что в системе навигации и наведения крылатой ракеты наблюдается избыточность информации. Это обуславливает использование комплексной вторичной обработки информации датчиков в интересах повышения точности определения навигационных параметров ракеты и разработки комбинированной системы навигации и наведения, способной функционировать в автономном режиме.

Ключевые слова: трехосевой датчик угловой скорости, трехкоординатный акселерометр, барометрический высотомер, доплеровский измеритель скорости и угла сноса, радиолокационная станция с синтезированием апертуры, головка самонаведения.

THE STUDY OF ON-BOARD SENSORS INFORMATION CAPABILITIES TO IMPLEMENT AUTONOMOUS NAVIGATION AND GUIDANCE OF CRUISE MISSILE

D.Y. BULOCHNIKOV

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

R.R. SHATOVKIN, Doctor of Technical Science

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

The information capabilities of typical sensors on Board an air-to-surface cruise missile are investigated. It was found that in the navigation and guidance system of a cruise missile there is an excess of information. This leads to the use of integrated secondary processing of sensor information in order to improve the accuracy of the missile's navigation parameters and to the development of a combined navigation and guidance system capable of operating in an autonomous mode.

Keywords: three-axis angular velocity sensor, three-axis accelerometer, barometric altimeter, Doppler speed and drift angle meter, radar station with aperture synthesis, homing head.

Введение. Приоритетным направлением в разработке систем навигации и наведения (СНН) современных крылатых ракет (КР) класса «воздух-поверхность» является использование комплексной обработки информации разнородных датчиков, входящих в состав этих систем, то есть создание комбинированных СНН, способных функционировать в автономном режиме. Такая возможность обусловлена наличием избыточности информации используемых датчиков. Однако создание алгоритмов комплексной обработки, способных обеспечить бесперебойную выдачу точных навигационных данных КР, требует исследования информационных возможностей используемых в составе ее СНН бортовых датчиков.

Цель работы – исследовать информационные возможности датчиков на борту КР в интересах разработки комбинированной СНН, способной функционировать в автономном режиме.



Актуальность и теоретическая значимость. Типовая СНН КР представляет собой измерительный модуль, жестко закрепленный на КР и включающий в свой состав датчики угловой скорости (ДУС), трехкоординатный акселерометр и барометрический высотомер, позволяющие в режиме автономной навигации и наведения определять координаты и параметры движения КР [1]. Помимо информации ДУС, трехкоординатного акселерометра и барометрического высотомера для определения координат и параметров движения КР на конечном этапе полета возможно использовать информацию доплеровского измерителя скорости и угла сноса (ДИСС), радиолокационной станции с синтезированием апертуры (РСА) и головок самонаведения (ГСН) КР.

Исследование информационных возможностей ДУС. Абсолютная угловая скорость КР в k -й момент времени ω_k состоит из переносной угловой скорости КР u_k , вызванной перемещением ее центра масс O вокруг сферической поверхности Земли, и относительной угловой скорости вращения КР ω_k^r вокруг своего центра масс [1, 2]:

$$\omega_k = u_k + \omega_k^r. \quad (1)$$

С помощью трех одноосевых ДУС в каждый k -й момент времени определяются проекции вектора абсолютной угловой скорости КР ω_k на оси связанной системы координат $OXYZ$ ω_{xk} , ω_{yk} и ω_{zk} .

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

$$\omega_{xk} = u_{xk} + \omega_{xk}^r; \quad (2)$$

$$\omega_{yk} = u_{yk} + \omega_{yk}^r; \quad (3)$$

$$\omega_{zk} = u_{zk} + \omega_{zk}^r. \quad (4)$$

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

$$\omega_{xk}^r = \omega_{xk} - u_{xk}; \quad (5)$$

$$\omega_{yk}^r = \omega_{yk} - u_{yk}; \quad (6)$$

$$\omega_{zk}^r = \omega_{zk} - u_{zk}. \quad (7)$$

Проекции вектора переносной угловой скорости КР 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:

$$u_{xk} = u_{xgk} \cos \vartheta_k \cos \psi_k + u_{ygzk} \sin \vartheta_k - u_{zgzk} \cos \vartheta_k \sin \psi_k; \quad (8)$$



$$\begin{aligned} u_{yk} &= u_{xgk} (-\cos \gamma_k \cos \vartheta_k \sin \vartheta_k + \sin \gamma_k \sin \vartheta_k) + \\ &+ u_{ygzk} \cos \gamma_k \cos \vartheta_k + u_{zgzk} (\cos \gamma_k \sin \vartheta_k \sin \vartheta_k + \sin \gamma_k \cos \vartheta_k); \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} u_{zk} &= u_{xgk} (\sin \gamma_k \cos \vartheta_k \sin \vartheta_k + \cos \gamma_k \sin \vartheta_k) - \\ &- u_{ygzk} \sin \gamma_k \cos \vartheta_k + u_{zgzk} (-\sin \gamma_k \sin \vartheta_k \sin \vartheta_k + \cos \gamma_k \cos \vartheta_k), \end{aligned} \quad (10)$$

где ϑ_k , ϑ_k , γ_k – углы рыскания, тангажа и крена КР, соответственно, в k -й момент времени; а проекции вектора переносной угловой скорости КР на оси нормальной географической системы координат $OX_g Y_g Z_g$ u_{xgk} , u_{ygzk} и u_{zgzk} в k -й момент времени определяются как:

$$u_{xgk} = (U_3 + \dot{\lambda}_k) \cos \varphi_k = U_3 \cos \varphi_k + \frac{V_{zgzk}}{R_3}; \quad (11)$$

$$u_{ygzk} = (U_3 + \dot{\lambda}_k) \sin \varphi_k = U_3 \sin \varphi_k + \frac{V_{zgzk}}{R_3} \operatorname{tg} \varphi_k; \quad (12)$$

$$u_{zgzk} = -\dot{\varphi}_k, \quad (13)$$

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

Проекции вектора относительной угловой скорости КР на оси связанной системы координат $OXYZ$ ω_{xk}^r , ω_{yk}^r , ω_{zk}^r в k -й момент времени:

$$\omega_{xk}^r = \omega_{\vartheta k} \sin \vartheta_k + \omega_{\gamma k}; \quad (14)$$

$$\omega_{yk}^r = \omega_{\vartheta k} \cos \vartheta_k \cos \gamma_k + \omega_{\vartheta k} \sin \gamma_k; \quad (15)$$

$$\omega_{zk}^r = -\omega_{\vartheta k} \cos \vartheta_k \sin \gamma_k + \omega_{\vartheta k} \cos \gamma_k, \quad (16)$$

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

По информации о проекциях вектора относительной угловой скорости КР на оси связанной системы координат $OXYZ$ ω_{xk}^r , ω_{yk}^r , ω_{zk}^r с учетом выражений (14)–(16) можно определить угловые скорости изменения углов рыскания, тангажа и крена КР в нормальной географической системе координат $OX_g Y_g Z_g$ $\omega_{\vartheta k}$, $\omega_{\vartheta k}$ и $\omega_{\gamma k}$, соответственно, в k -й момент времени:

$$\omega_{\vartheta k} = \frac{1}{\cos \vartheta_k} (\omega_{yk}^r \cos \gamma_k - \omega_{zk}^r \sin \gamma_k); \quad (17)$$



$$\omega_{\vartheta k} = \omega_{y k}^r \sin \gamma_k + \omega_{z k}^r \cos \gamma_k ; \quad (18)$$

$$\omega_{\gamma k} = \omega_{x k}^r - \operatorname{tg} \vartheta_k (\omega_{y k}^r \cos \gamma_k - \omega_{z k}^r \sin \gamma_k) . \quad (19)$$

Тогда для дискретных систем углы рыскания, тангажа и крена КР ψ_{k+1} , ϑ_{k+1} , γ_{k+1} в $(k+1)$ -й момент времени определяются как:

$$\psi_{k+1} = \psi_k + \omega_{\psi k} T ; \quad (20)$$

$$\vartheta_{k+1} = \vartheta_k + \omega_{\vartheta k} T ; \quad (21)$$

$$\gamma_{k+1} = \gamma_k + \omega_{\gamma k} T , \quad (22)$$

где T – период дискретизации.

При этом начальные значения углов рыскания ψ_0 , тангажа ϑ_0 и крена γ_0 считаются известными.

Таким образом, трехосевой ДУС, кроме непосредственного измерения проекций вектора абсолютной угловой скорости КР ω_k на оси связанной системы координат $OXYZ$ $\omega_{x k}$, $\omega_{y k}$ и $\omega_{z k}$, позволяет в k -й момент времени получить информацию об угловых скоростях изменения углов рыскания, тангажа и крена КР в нормальной географической системе координат $OX_g Y_g Z_g$ $\omega_{\psi k}$, $\omega_{\vartheta k}$ и $\omega_{\gamma k}$, соответственно, а также вычислить углы рыскания, тангажа и крена КР ψ_{k+1} , ϑ_{k+1} , γ_{k+1} , соответственно, в $(k+1)$ -й момент времени.

Исследование информационных возможностей трехкоординатного акселерометра. С помощью трехкоординатного акселерометра в каждый k -й момент времени определяются проекции вектора кажущегося ускорения КР \mathbf{n}_k на оси связанной системы координат $OXYZ$ $n_{x k}$, $n_{y k}$ и $n_{z k}$.

Проекции вектора кажущегося ускорения КР в нормальной географической системе координат $OX_g Y_g Z_g$ $n_{x g k}$, $n_{y g k}$ и $n_{z g k}$ в k -й момент времени определяются выражениями [1, 2]:

$$\begin{aligned} n_{x g k} = & n_{x k} \cos \vartheta_k \cos \psi_k + n_{y k} (-\cos \gamma_k \cos \psi_k \sin \vartheta_k + \sin \gamma_k \sin \psi_k) + \\ & + n_{z k} (\sin \gamma_k \cos \psi_k \sin \vartheta_k + \cos \gamma_k \sin \psi_k) ; \end{aligned} \quad (23)$$

$$n_{y g k} = n_{x k} \sin \vartheta_k + n_{y k} \cos \gamma_k \cos \vartheta_k - n_{z k} \sin \gamma_k \cos \psi_k ; \quad (24)$$

$$\begin{aligned} n_{z g k} = & -n_{x k} \cos \vartheta_k \sin \psi_k + n_{y k} (\cos \gamma_k \sin \psi_k \sin \vartheta_k + \sin \gamma_k \cos \psi_k) + \\ & + n_{z k} (-\sin \gamma_k \sin \psi_k \sin \vartheta_k + \cos \gamma_k \cos \psi_k) . \end{aligned} \quad (25)$$

Вектор кажущегося ускорения КР можно представить как:

$$\mathbf{n}_k = \mathbf{a}_k + \mathbf{g} , \quad (26)$$

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



Вектор абсолютного ускорения КР в каждый k -й момент времени складывается из следующих составляющих:

$$\mathbf{a}_k = \mathbf{a}_k^e + \mathbf{a}_k^r + \mathbf{a}_k^c, \quad (27)$$

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 как:

$$\mathbf{a}_k^e = \mathbf{U}_3 \times (\mathbf{U}_3 \times \mathbf{R}_k), \quad (28)$$

где \mathbf{R}_k – радиус-вектор, соединяющий центр Земли и КР.

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

$$\mathbf{a}_{xgk}^e = U_3^2 R_k \sin \varphi_k \cos \varphi_k; \quad (29)$$

$$\mathbf{a}_{ygzk}^e = -U_3^2 R_k \cos^2 \varphi_k; \quad (30)$$

$$\mathbf{a}_{zgzk}^e = 0. \quad (31)$$

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

$$\mathbf{a}_k^r = \dot{\mathbf{V}}_k^r + \boldsymbol{\omega}'_k \times \mathbf{V}_k^r. \quad (32)$$

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

$$\mathbf{a}_{xgk}^r = \mathbf{a}_{xgk} + \frac{V_{zgzk}^2}{R_k} \operatorname{tg} \varphi_k + \frac{V_{xgzk} V_{ygzk}}{R_k}; \quad (33)$$

$$\mathbf{a}_{ygzk}^r = \mathbf{a}_{ygzk} - \frac{V_{zgzk}^2}{R_k} - \frac{V_{xgzk}^2}{R_k}; \quad (34)$$

$$\mathbf{a}_{zgzk}^r = \mathbf{a}_{zgzk} + \frac{V_{zgzk} V_{ygzk}}{R_k} - \frac{V_{xgzk} V_{zgzk}}{R_k} \operatorname{tg} \varphi_k. \quad (35)$$

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



$$\mathbf{a}_k^c = 2\mathbf{U}_3 \times \mathbf{V}_k^r. \quad (36)$$

Проекция вектора кориолисова ускорения КР в нормальной географической системе координат $OX_g Y_g Z_g$ \mathbf{a}_{xgk}^c , \mathbf{a}_{ygzk}^c и \mathbf{a}_{zgzk}^c в k -й момент времени определяются как:

$$\mathbf{a}_{xgzk}^c = 2U_3 V_{zgzk} \sin \varphi_k; \quad (37)$$

$$\mathbf{a}_{ygzk}^c = -2U_3 V_{zgzk} \cos \varphi_k; \quad (38)$$

$$\mathbf{a}_{zgzk}^c = 2(U_3 V_{ygzk} \cos \varphi_k - U_3 V_{xgzk} \sin \varphi_k). \quad (39)$$

С учетом выражений (23)–(39) проекции вектора кажущегося ускорения КР в нормальной географической системе координат $OX_g Y_g Z_g$ \mathbf{n}_{xgzk} , \mathbf{n}_{ygzk} и \mathbf{n}_{zgzk} в k -й момент времени можно представить как:

$$\mathbf{n}_{xgzk} = \mathbf{a}_{xgzk} + \frac{V_{zgzk}^2}{R_k} \operatorname{tg} \varphi_k + \frac{V_{xgzk} V_{ygzk}}{R_k} + 2U_3 V_{zgzk} \sin \varphi_k; \quad (40)$$

$$\mathbf{n}_{ygzk} = \mathbf{a}_{ygzk} - \frac{V_{zgzk}^2}{R_k} - \frac{V_{xgzk}^2}{R_k} - 2U_3 V_{zgzk} \cos \varphi_k + g; \quad (41)$$

$$\mathbf{n}_{zgzk} = \mathbf{a}_{zgzk} + \frac{V_{zgzk} V_{ygzk}}{R_k} - \frac{V_{xgzk} V_{zgzk}}{R_k} \operatorname{tg} \varphi_k + 2(U_3 V_{ygzk} \cos \varphi_k - U_3 V_{xgzk} \sin \varphi_k). \quad (42)$$

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

$$\mathbf{a}_{xgzk} = \mathbf{n}_{xgzk} - \frac{V_{zgzk}^2}{R_k} \operatorname{tg} \varphi_k - \frac{V_{xgzk} V_{ygzk}}{R_k} - 2U_3 V_{zgzk} \sin \varphi_k; \quad (43)$$

$$\mathbf{a}_{ygzk} = \mathbf{n}_{ygzk} + \frac{V_{zgzk}^2}{R_k} - \frac{V_{xgzk}^2}{R_k} + 2U_3 V_{zgzk} \cos \varphi_k - g; \quad (44)$$

$$\mathbf{a}_{zgzk} = \mathbf{n}_{zgzk} - \frac{V_{zgzk} V_{ygzk}}{R_k} + \frac{V_{xgzk} V_{zgzk}}{R_k} \operatorname{tg} \varphi_k - 2(U_3 V_{ygzk} \cos \varphi_k - U_3 V_{xgzk} \sin \varphi_k). \quad (45)$$

Составляющие относительной скорости движения КР в нормальной географической системе координат $OX_g Y_g Z_g$ V_{xgzk+1} , V_{ygzk+1} и V_{zgzk+1} в $(k+1)$ -й момент времени можно определить через соответствующие составляющие ускорения относительного движения КР \mathbf{a}_{xgzk} , \mathbf{a}_{ygzk} и \mathbf{a}_{zgzk} :



$$V_{xgk+1} = V_{xgk} + a_{xgk} T; \quad (46)$$

$$V_{y gk+1} = V_{y gk} + a_{y gk} T; \quad (47)$$

$$V_{z gk+1} = V_{z gk} + a_{z gk} T. \quad (48)$$

Начальные значения составляющих относительной скорости движения КР в нормальной географической системе координат $OX_g Y_g Z_g$ V_{xg0} , V_{yg0} и V_{zg0} считаются известными.

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

$$\varphi_{k+1} = \varphi_k + \frac{V_{xgk}}{R_k} T; \quad (49)$$

$$h_{k+1} = h_k + V_{y gk} T; \quad (50)$$

$$\lambda_{k+1} = \lambda_k + \frac{V_{z gk}}{R_k \cos \varphi_k} T. \quad (51)$$

Начальные значения координат КР φ_0 , λ_0 и h_0 считаются известными.

Скорости изменения координат КР определяются в соответствии с выражениями:

$$\dot{\varphi}_{k+1} = \frac{\varphi_{k+1} - \varphi_k}{T}; \quad (52)$$

$$\dot{\lambda}_{k+1} = \frac{\lambda_{k+1} - \lambda_k}{T}; \quad (53)$$

$$\dot{h}_{k+1} = \frac{h_{k+1} - h_k}{T}. \quad (54)$$

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

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

$$V_k = \sqrt{V_{xgk}^2 + V_{z gk}^2}. \quad (55)$$

Тогда курсовой угол КР ϕ_k в k -й момент времени можно определить как:

$$\phi_k = \frac{1}{3} \left(\arctg \left(\frac{V_{z gk}}{V_{xgk}} \right) + \arccos \left(\frac{V_{xgk}}{V_k} \right) + \arcsin \left(\frac{V_{z gk}}{V_k} \right) \right). \quad (56)$$



При помощи акселерометра также осуществляется определение начальных значений углов пространственной ориентации КР – рыскания ψ_0 , тангажа ϑ_0 и крена γ_0 [2].

Допустим, что в начальный момент времени КР занимает неподвижное произвольное положение относительно нормальной географической системы координат $OX_g Y_g Z_g$, определяемое углами ψ_0 , ϑ_0 и γ_0 .

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

$$g_x = n_{x0} = g \sin \vartheta_0; \tag{57}$$

$$g_y = n_{y0} = g \cos \gamma_0 \cos \vartheta_0; \tag{58}$$

$$g_z = n_{z0} = -g \sin \gamma_0 \cos \vartheta_0, \tag{59}$$

то начальные значения углов тангажа ϑ_0 и крена γ_0 определяются как:

$$\vartheta_0 = \arcsin \left(\frac{n_{x0}}{g} \right); \tag{60}$$

$$\gamma_0 = \arcsin \left(-\frac{n_{z0}}{n_{y0}} \right). \tag{61}$$

Начальное значение угла рыскания ψ_0 можно определить как:

$$\psi_0 = \arccos \left(\frac{\omega_{x0} - U_3 \sin \varphi_0 \sin \vartheta_0}{U_3 \cos \varphi_0 \cos \vartheta_0} \right), \tag{62}$$

где ω_{x0} – проекция вектора абсолютной угловой скорости полезной нагрузки КР ω_k на ось OX его связанной системы координат $OXYZ$ в начальный момент времени, измеряемая ДУС; φ_0 – значение нормальной сферической широты в начальный момент времени.

Таким образом, трехкоординатный акселерометр, кроме непосредственного измерения проекций вектора кажущегося ускорения КР \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 КР на оси нормальной географической системы координат $OX_g Y_g Z_g$ a_{xgk} , a_{ygz} и a_{zgz} , путевой скорости КР 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 КР φ_{k+1} , λ_{k+1} и h_{k+1} ; скорости изменения координат КР $\dot{\varphi}_{k+1}$, $\dot{\lambda}_{k+1}$ и \dot{h}_{k+1} . Кроме того по информации акселерометра определяются начальные значения значение угла рыскания ψ_0 , тангажа ϑ_0 и крена γ_0 .

Исследование информационных возможностей барометрического высотомера. Барометрический высотомер представляет собой высокоточный датчик давления, осуществляющий



измерение и регистрацию высоты. Вычисление высоты $H_k^{\bar{0}}$ основано на измерении давления p_k [3]:

$$p_k = p_0 \left(1 - \frac{t_{гр} H_k^{\bar{0}}}{T_0} \right) \frac{1}{R_{г} t_{гр}}, \quad (63)$$

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

Решая уравнение (63) относительно высоты, получим:

$$H_k^{\bar{0}} = \left[1 - \left(\frac{p_k}{p_0} R_{г} t_{гр} \right) \right] \frac{T_0}{t_{гр}}. \quad (64)$$

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.

Исследование информационных возможностей ДИСС. Работа ДИСС основана на использовании эффекта Доплера.

Доплеровская частота f_{dk} зависит от радиальной скорости КР V_{rk} относительно Земли [4]:

$$f_{dk} = \frac{2V_{rk}}{\lambda}, \quad (65)$$

где λ – длина радиоволны передатчика.

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

$$f_{dk} = \frac{2V_k}{\lambda} \cos \theta \cos(\beta \pm \varphi_{yc k}), \quad (66)$$

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

Из выражения (66) 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 ($\varphi_{yc k} = 0$) вектор путевой скорости совпадает с продольной осью КР, доплеровские частоты по обоим лучам одинаковы и разность их равна нулю.

Тогда путевая скорость определяется ДИСС как:

$$V_k^{ДИСС} = \frac{f_{dk} \lambda}{2 \cos \theta \cos \beta}. \quad (67)$$



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

$$f_{д1k} = \frac{2V_k}{\lambda} \cos \theta \cos(\beta + \varphi_{уск}); \quad (68)$$

$$f_{д2k} = \frac{2V_k}{\lambda} \cos \theta \cos(\beta - \varphi_{уск}). \quad (69)$$

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

$$f_{д1k} + f_{д2k} = \frac{4V_k}{\lambda} \cos \theta \cos \beta \cos \varphi_{уск}; \quad (70)$$

$$f_{д1k} - f_{д2k} = -\frac{4V_k}{\lambda} \cos \theta \sin \beta \sin \varphi_{уск}; \quad (71)$$

Тогда путевая скорость и угол сноса определяются ДИСС как:

$$V_k^{ДИСС} = \frac{(f_{д1k} + f_{д2k})\lambda}{4 \cos \theta \cos \beta \cos \varphi_{уск}}; \quad (72)$$

$$\varphi_{уск}^{ДИСС} = \arctg \left(\frac{f_{д1k} - f_{д2k}}{f_{д1k} + f_{д2k}} \operatorname{ctg} \beta \right). \quad (73)$$

Для повышения точности измерения путевой скорости и угла сноса, а также автоматической компенсации погрешностей измерений, возникающих при продольном и поперечном кренах КР, 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 КР. 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 КР.

Так, наклонная дальность от КР до Земли в k -й момент времени будет определять временем задержки прихода сигнала $t_{зk}$ по любому из лучей ДН:

$$D_k = \frac{t_{зk}c}{2}, \quad (74)$$

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

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



$$H_k^{\text{ДИСС}} = D_k \sin \theta. \quad (75)$$

Таким образом, ДИСС способен измерять путевую скорость $V_k^{\text{ДИСС}}$, угол сноса $\varphi_{\text{ус } k}^{\text{ДИСС}}$ и высоту полета КР $H_k^{\text{ДИСС}}$.

Исследование информационных возможностей РСА. Использование РСА на борту позволяет определить не только параметры ее полета, но и значения текущих координат. Такую возможность дает обработка полученного, например, в режиме телескопического обзора (обзора в пределах ширины ДН антенны) кадра радиолокационного изображения (РЛИ) на основе корреляционно-экстремального принципа [5].

Рассмотрим алгоритм вычисления координат КР $x_k^{\text{КР}}$, $y_k^{\text{КР}}$ на основе обработки кадра РЛИ, полученного РСА.

Пусть A_k – полученный в k -й момент времени РСА в режиме телескопического обзора кадр РЛИ, B_k – выбранное из базы данных соответствующее эталонное изображение (рисунок 1) [6, 7].

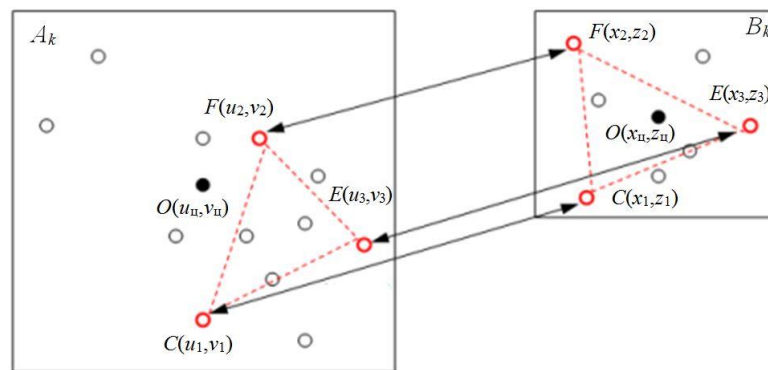


Рисунок 1 – Полученный РСА кадр РЛИ (А) и эталонное изображение (В)

На полученном в k -й момент времени РСА кадре РЛИ выделяются максимально удаленные друг от друга особые точки по следующему принципу:

- сначала выбирается особая точка (точка $C(u_{1k}, v_{1k})$), максимально приближенная к началу декартовой системы координат полученного РСА кадра;
- вторая точка (точка $F(u_{2k}, v_{2k})$) выбирается на максимальном удалении от точки $C(u_{1k}, v_{1k})$;
- третья точка (точка $E(u_{3k}, v_{3k})$) выбирается на максимальном удалении от линии, проходящей через точку $C(u_{1k}, v_{1k})$ и точку $F(u_{2k}, v_{2k})$.

Координаты особых точек – ориентиров на полученном РСА кадре РЛИ определяются наборами номеров пикселей, соответствующих положению точек в кадре: $C(u_{1k}, v_{1k})$, $F(u_{2k}, v_{2k})$, $E(u_{3k}, v_{3k})$.

Каждой найденной особой точке полученного кадра $C(u_{1k}, v_{1k})$, $F(u_{2k}, v_{2k})$ и $E(u_{3k}, v_{3k})$ можно поставить в соответствие точки эталонного изображения $C(x_{1k}, z_{1k})$, $F(x_{2k}, z_{2k})$ и $E(x_{3k}, z_{3k})$ с известными плоскими прямоугольными координатами:

$$C(u_{1k}, v_{1k}) \rightarrow C(x_{1k}, z_{1k}); \quad (76)$$



$$F(u_{2k}, v_{2k}) \rightarrow F(x_{2k}, z_{2k}); \tag{77}$$

$$E(u_{3k}, v_{3k}) \rightarrow E(x_{3k}, z_{3k}). \tag{78}$$

Таким образом, в результате сопоставления полученного в k -й момент времени кадра и эталонного изображения определяется набор из 3 точек совпадения (особых точек).

Исходя из того, что входное изображение может быть наклонено, масштабировано или повернуто, для поиска плоских прямоугольных координат центра полученного РСА кадра необходимо определить систему, с помощью которой осуществляется преобразование координат.

Линейное преобразование координат декартовой системы полученного в k -й момент времени РСА кадра РЛИ (u_k, v_k) в плоские прямоугольные координаты (x_k, z_k) определяется как:

$$\begin{cases} x_k = a_1 u_k + a_2 v_k + a_3 \\ z_k = a_4 u_k + a_5 v_k + a_6, \end{cases} \tag{79}$$

где $a_1 - a_6$ – коэффициенты преобразования.

По известному набору из 3 точек совпадения можно определить коэффициенты преобразования. Для этого требуется система из 6 уравнений:

$$\begin{cases} x_{1k} = a_1 u_{1k} + a_2 v_{1k} + a_3 \\ z_{1k} = a_4 u_{1k} + a_5 v_{1k} + a_6 \\ x_{2k} = a_1 u_{2k} + a_2 v_{2k} + a_3 \\ z_{2k} = a_4 u_{2k} + a_5 v_{2k} + a_6 \\ x_{3k} = a_1 u_{3k} + a_2 v_{3k} + a_3 \\ z_{3k} = a_4 u_{3k} + a_5 v_{3k} + a_6. \end{cases} \tag{80}$$

Решив систему уравнений, найдем коэффициенты преобразования координат $a_1 - a_6$.

Координаты центра полученного РСА кадра РЛИ в декартовой системе координат известны и определяются набором номеров пикселей $O(u_{цк}, v_{цк})$. Тогда плоские прямоугольные координаты центра кадра $O(x_{цк}, z_{цк})$ определяются как:

$$\begin{cases} x_{цк} = a_1 u_{цк} + a_2 v_{цк} + a_3 \\ z_{цк} = a_4 u_{цк} + a_5 v_{цк} + a_6. \end{cases} \tag{81}$$

РСА способна измерять в k -й момент времени наклонную дальность от КР до любой точки n обозреваемой земной поверхности D_{nk}^{KP} , а также высоту полета КР – носителя РСА H_k^{KP} [8].

Положим, что РСА измерена наклонная дальность до точки земной поверхности $O(x_{цк}, z_{цк})$, соответствующей центру полученного кадра, и наклонная дальность до точки $C(x_{1k}, z_{1k})$.

Зная значение угла отклонения ДН при синтезировании апертуры θ , получим горизон-



тальную дальность от КР до точки земной поверхности $O(x_{цк}, z_{цк})$, соответствующей центру кадра:

$$D_{цк} = D_{цк}^{KP} \cos\theta \quad (82)$$

и горизонтальную дальность до точки земной поверхности $C(x_{1k}, z_{1k})$:

$$D_{1k} = D_{1k}^{KP} \cos\theta. \quad (83)$$

Определим местоположение КР в k -й момент времени координатами x_k^{KP} и z_k^{KP} .

Тогда прямая, проходящая через точку земной поверхности $O(x_{цк}, z_{цк})$, соответствующую центру полученного в k -й момент времени кадра, и точку с координатами (x_k^{KP}, z_k^{KP}) , соответствующую местоположению КР, определяется следующим уравнением:

$$(x_k^{KP} - x_{цк})(z_k - z_{цк}) - (x_k - x_{цк})(z_k^{KP} - z_{цк}) = 0, \quad (84)$$

а расстояние между этими точками – выражением:

$$(x_k^{KP} - x_{цк})^2 + (z_k^{KP} - z_{цк})^2 = D_{ц}^2. \quad (85)$$

Аналогично выводится уравнение прямой, проходящей через точку $C(x_{1k}, z_{1k})$ и точку, соответствующую местоположению КР в рассматриваемый момент времени:

$$(x_k^{KP} - x_{1k})(z_k - z_{1k}) - (x_k - x_{1k})(z_k^{KP} - z_{1k}) = 0, \quad (86)$$

и расстояние между этими точками:

$$(x_k^{KP} - x_{1k})^2 + (z_k^{KP} - z_{1k})^2 = D_1^2. \quad (87)$$

Для нахождения точки (x_k^{KP}, z_k^{KP}) пересечения прямых, представленных выражениями (84) и (86), определяющей местоположение КР в рассматриваемый момент времени, необходимо решить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} (x_k^{KP} - x_{цк})(z_k - z_{цк}) - (x_k - x_{цк})(z_k^{KP} - z_{цк}) = 0 \\ (x_k^{KP} - x_{1k})(z_k - z_{1k}) - (x_k - x_{1k})(z_k^{KP} - z_{1k}) = 0 \\ (x_k^{KP} - x_{цк})^2 + (z_k^{KP} - z_{цк})^2 = D_{ц}^2 \\ (x_k^{KP} - x_{1k})^2 + (z_k^{KP} - z_{1k})^2 = D_1^2. \end{cases} \quad (88)$$

Решение данной системы уравнений позволяет определить координаты КР (x_k^{KP}, z_k^{KP}) в k -й момент времени.

В свою очередь, координата y_k^{KP} КР в k -й момент времени для нормальной географической системы координат определяется измеренным РСА значением высоты полета КР H_k^{KP} :



$$y_k^{KP} = H_k^{KP} . \quad (89)$$

В итоге определяются координаты $(x_k^{KP}, y_k^{KP}, z_k^{KP})$ КР в k -й момент времени в нормальной географической системе координат.

Таким образом, обработка на основе корреляционно-экстремального принципа кадра РЛИ, полученного РСА в режиме телескопического обзора, позволяет определить значения текущих координат КР x_k^{KP} и z_k^{KP} в нормальной географической системе координат, в дополнение к возможности определения РСА координаты КР y_k^{KP} .

Исследование информационных возможностей ГСН КР. Основным информационным параметром при использовании полуактивной или пассивной радиолокационной (или лазерной) ГСН является направление на объект поражения, определяемое углами пеленга данного объекта в горизонтальной и вертикальной плоскости – $\varphi_{Г k}^{РЛ ГСН}$ и $\varphi_{В k}^{РЛ ГСН}$, соответственно [9].

При использовании активной радиолокационной ГСН также возможно определение наклонной дальности до объекта поражения $D_k^{РЛ ГСН}$.

В свою очередь, телевизионная (или тепловизионная) ГСН используется как электронно-оптическая корреляционная система коррекции данных инерциальной навигационной системы с алгоритмом обработки информации, аналогичному алгоритму обработки информации РСА, и выдачей координат КР $x_k^{ТВ ГСН}$, $y_k^{ТВ ГСН}$.

Конечной целью использования информации рассмотренных датчиков является вывод КР в точку местоположения объекта поражения с координатами $x_{ОП}$, $y_{ОП}$.

Выводы. В результате проведенных исследований определены информационные возможности датчиков на борту КР. Выяснено, что в СНН КР наблюдается избыточность информации (например, путевую скорость возможно измерить с помощью трехкоординатного акселерометра или ДИСС, а координаты КР – с помощью РСА или трехкоординатного акселерометра и ДУС). Это обуславливает использование комплексной вторичной обработки информации датчиков в интересах повышения точности определения навигационных параметров и разработки комбинированной СНН, способной функционировать в автономном режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ташков С.А., Булочников Д.Ю., Шатовкин Р.Р. Исследование информационных возможностей датчиков навигационной системы беспилотного летательного аппарата // Электронное периодическое издание «Воздушно-космические силы. Теория и практика». 2018. № 8 (8). С. 193–208. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://академия-ввс.рф/images/docs/vks/8-2018/193-208.pdf> (дата обращения: 22.03.2019).
2. Матвеев В.В. Инерциальные навигационные системы: Учебное пособие. Тула: Издательство ТулГУ, 2012. 199 с.
3. Самолетовождение. Высота полета. Устройство и применение высотомеров [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://vzletim.aero/upload/iblock/115/navigation04.pdf> (дата обращения 08.05.2017).
4. Применение доплеровских измерителей скорости и сноса // Использование РТС для навигации. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://iliric.narod.ru/10/page_10.5.html (дата обращения 08.05.2017).
5. Сырямкин В.И., Шидловский В.С. Корреляционно-экстремальные радионавигационные системы. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2010. 316 с.
6. Корнеев М.А., Максимов А.Н., Максимов Н.А. Методы выделения точек привязки для



визуальной навигации беспилотных летательных аппаратов // Электронный журнал «Труды МАИ». 2012. Выпуск № 58. 21 с.

7. Булочников Д.Ю., Шатовкин Р.Р. Определение координат крылатой ракеты на основе информации радиолокационной станции с синтезированием апертуры // Сборник статей IV Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники». 13–14 декабря 2018 г. Спб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2018. С. 412–416.

8. Авиационные системы радиовидения / В.Н. Антипов, А.Ю. Викентьев, Е.Е. Колтышев, А.Ю. Фролов [и др.]; под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2015. 648 с.

9. Харвей А.Ф. Техника сверхвысоких частот / Под ред. Сушкевича. Том 2. М.: Советское радио, 1965. 774 с.

REFERENCES

1. Tashkov S.A., Bulochnikov D.Yu., Shatovkin R.R. Issledovanie informacionnyh vozmozhnostej datchikov navigacionnoj sistemy bespilotnogo letatel'nogo apparata // `Elektronnoe periodicheskoe izdanie «Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika». 2018. № 8 (8). pp. 193–208. [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://akademiya-vvs.rf/images/docs/vks/8-2018/193-208.pdf> (data obrascheniya: 22.03.2019).

2. Matveev V.V. Inercial'nye navigacionnye sistemy: Uchebnoe posobie. Tula: Izdatel'stvo TulGU, 2012. 199 p.

3. Samoletovozhdenie. Vysota poleta. Ustrojstvo i primeneniye vysotomerov [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa <http://vzletim.aero/upload/iblock/115/navigation04.pdf> (data obrascheniya 08.05.2017).

4. Primeneniye doplerovskih izmeritelej skorosti i snosa // Ispol'zovanie RTS dlya navigacii. [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: http://lliric.narod.ru/10/page_10.5.html (data obrascheniya 08.05.2017).

5. Syryamkin V.I., Shidlovskij V.S. Korrelyacionno-`ekstremal'nye radionavigacionnye sistemy. Tomsk: Izd-vo Tom. un-ta, 2010. 316 p.

6. Korneev M.A., Maksimov A.N., Maksimov N.A. Metody vydeleniya toчек privyazki dlya vizual'noj navigacii bespilotnyh letatel'nyh apparatov // `Elektronnyj zhurnal «Trudy MAI». 2012. Выпуск № 58. 21 p.

7. Bulochnikov D.Yu., Shatovkin R.R. Opredeleniye koordinat krylatoj rakety na osnove informacii radiolokacionnoj stancii s sintezirovaniem apertury // Sbornik statej IV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Sovremennye problemy sozdaniya i `ekspluatatsii vooruzheniya, voennoj i special'noj tehniky». 13–14 dekabrya 2018 g. Spb.: VKA imeni A.F.Mozhajsogo, 2018. pp. 412–416.

8. Aviacionnye sistemy radiovideniya / V.N. Antipov, A.Yu. Vikent'ev, E.E. Koltyshev, A.Yu. Frolov [i dr.]; pod red. G.S. Kondratenkova. M.: Radiotekhnika, 2015. 648 p.

9. Harvej A.F. Tehnika sverhvysokih chastot / Pod red. Sushkevicha. Tom 2. M.: Sovetskoe radio, 1965. 774 p.

© Булочников Д.Ю., Шатовкин Р.Р., 2019

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.