

ПРИМЕНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ВОЗДУШНОГО СУДНА В УГЛОМЕРНОМ КАНАЛЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

В. Н. Глистин, Ю. Н. Панасюк

*Кафедра «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ»,
г. Тамбов, Россия; glistinwadim@mail.ru*

Ключевые слова: воздушные суда; информационно-измерительные системы; модель; оптимальная фильтрация; угломерный канал.

Аннотация: Представлены и обоснованы векторы состояния и наблюдения перемещения воздушного судна, а также разработанный алгоритм функционирования угломерного канала информационно-измерительной системы (ИИС), с учетом динамических характеристик воздушных судов. Проведено имитационное моделирование на ЭВМ разработанного алгоритма, и представлены результаты исследования алгоритма функционирования угломерного канала ИИС.

В настоящий момент одним из методов повышения точности определения угловых координат воздушного судна (ВС) в информационно-измерительной системе (ИИС) является применение различных алгоритмов обработки радиолокационной информации. Многие алгоритмы [1] используют дополнительную информацию от бортовых датчиков воздушного судна, описывающих его различные параметры и характеристики, поступающих в ИИС не только от радиолокационных измерителей.

Проблемой алгоритмов вторичной обработки информации в ИИС, в частности посадочных радиолокационных станций, является применение моделей состояния и наблюдения использующих, как правило, только кинематические характеристики движения ВС. Погрешности определения координат ВС ИИС [2], алгоритм функционирования фильтров вторичной обработки радиолокационной информации которых основан на кинематических моделях, особенно заметны при выполнении ВС маневра [3], когда силы воздействующие на него значительно изменяются.

Учесть изменение скорости ВС по величине и направлению и уменьшить величину ошибок определения угловых координат ВС позволят модели состояния, в основу которых положены векторы перегрузок.

Цель работы – синтез алгоритма функционирования угломерного канала ИИС с учетом динамики движения ВС.

Алгоритмы фильтрации, основанные на моделях, учитывающих динамические и кинематические характеристики перемещения ВС, позволят ИИС повысить точность определения угловых координат ВС, в частности при выполнении им маневра «посадка».

В целях определения динамических характеристик движения ВС выведено выражение с составляющими векторов перегрузок, определяющее приращение скорости изменения азимута ВС

$$\varpi_{\Gamma} = \arctg \left(\left(\left(\left(g \left((\sin(\varphi) \sin(\theta) - \cos(\varphi) \sin(\theta)) (n_{ya} \cos(\gamma_a) - n_{za} \sin(\gamma_a)) + \right. \right. \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \left. \left. + n_{xa} \cos(\theta) (\cos(\varphi) - \sin(\varphi)) + (\sin(\varphi) + \cos(\varphi)) (n_{ya} \sin(\gamma_a) + n_{za} \cos(\gamma_a)) \right) \right) \right)^2 - \right. \\ \left. - (a_{\text{ЛВ}} \cos(\varepsilon_B))^2 \right)^{0,5} \bigg) / (D \cos \varepsilon_B), \quad (1)$$

где D – дальность до воздушного судна по линии визирования, определяемое РЛС; θ, φ – углы наклона и поворота траектории ВС соответственно; ε_B – угол места; $a_{\text{ЛВ}}$ – ускорение воздушного судна по линии визирования, определяемое в дальномерном канале РЛС; g – ускорение свободного падения; n_{xa}, n_{ya}, n_{za} – продольная, нормальная и боковая перегрузки ВС соответственно; γ_a – скоростной угол крена.

Учитывая выражение (1), предложены следующие декомпозированные вектора моделей состояния \mathbf{x} и наблюдения \mathbf{z} :

– дальности, скорости и ускорения:

$$\mathbf{x}_D = [D \ V \ a]^T, \quad (2)$$

$$\mathbf{z}_D = D_{\text{и}}; \quad (3)$$

– тангенциальной перегрузки и скорости изменения вектора тангенциальной перегрузки:

$$\mathbf{x}_{nx} = [n_{xa} \ \omega_{nx}]^T, \quad (4)$$

$$\mathbf{z}_{nx} = n_{xai}; \quad (5)$$

– нормальной перегрузки и скорость изменения вектора нормальной перегрузки:

$$\mathbf{x}_{ny} = [n_{ya} \ \omega_{ny}]^T, \quad (6)$$

$$\mathbf{z}_{ny} = n_{yai}; \quad (7)$$

– боковой перегрузки и скорость изменения вектора боковой перегрузки:

$$\mathbf{x}_{nz} = [n_{za} \ \omega_{nz}]^T, \quad (8)$$

$$\mathbf{z}_{nz} = n_{zai}; \quad (9)$$

– скоростного угла крена и скорость изменения скоростного угла крена цели:

$$\mathbf{x}_{\gamma} = [\gamma_a \ \omega_{\gamma a}]^T, \quad (10)$$

$$\mathbf{z}_{\gamma} = \gamma_{ai}; \quad (11)$$

– угла наклона и скорости изменения угла наклона цели:

$$\mathbf{x}_{\theta} = [\theta \ \omega_{\theta}]^T, \quad (12)$$

$$\mathbf{z}_{\theta} = \theta_{\text{и}}; \quad (13)$$

– путевого угла и угловой скорости путевого угла цели:

$$\mathbf{x}_{\varphi} = [\varphi \ \omega_{\varphi}]^T, \quad (14)$$

$$\mathbf{z}_{\varphi} = \varphi_{\text{и}}; \quad (15)$$

– угла наклона линии визирования и его скорости изменения в вертикальной плоскости:

$$\mathbf{x}_B = [\varepsilon_B \ \omega_B]^\top, \quad (16)$$

$$\mathbf{z}_B = \varepsilon_{\text{ВИ}}, \quad (17)$$

– угла наклона линии визирования, его скорости изменения и приращения скорости изменения в горизонтальной плоскости:

$$\mathbf{x}_\Gamma = [\varepsilon_\Gamma \ \omega_\Gamma \ \varpi_\Gamma]^\top, \quad (18)$$

$$\mathbf{z}_\Gamma = \varepsilon_{\text{ГИ}}, \quad (19)$$

где $\omega_\theta, \omega_\varphi$ – скорости изменения углов наклона и поворота траектории ВС соответственно; ω_B, ω_Γ – скорости изменения угла места и азимута ВС соответственно; V, a – скорость и ускорение воздушного судна в траекторной системе координат соответственно; $D_{\text{И}}$ – измеренное значение дальности до воздушного судна по линии визирования, определяемое РЛС; $\omega_{nx}, \omega_{ny}, \omega_{nz}$ – скорости изменения тангенциальной, нормальной и боковой перегрузок ВС соответственно; $n_{x\text{аи}}, n_{y\text{аи}}, n_{z\text{аи}}$ – измеренные значения продольной, нормальной и боковой перегрузок ВС соответственно; $\omega_{y\alpha}$ – скорость изменения скоростного угла крена ВС; $\gamma_{\text{аи}}$ – измеренный скоростной угол крена ВС; $\theta_{\text{И}}, \varphi_{\text{И}}$ – измеренные значения углов наклона и поворота траектории ВС соответственно; $\varepsilon_{\text{ВИ}}$ – измеренное значение угла места; ε_Γ – азимут ВС; $\varepsilon_{\text{ГИ}}$ – измеренное значение азимута ВС.

Учитывая алгоритм не линейной фильтрации Калмана [1] и модели состояния и наблюдения, основанные на векторах состояния и наблюдения (2) – (19), получены независимые группы рекуррентных алгоритмов фильтрации для каждой из определяемых величин:

– алгоритм фильтрации для оценки азимута ВС, его скорости изменения и приращения скорости изменения имеет вид:

$$\varepsilon_{\Gamma 0}(k+1) = \varepsilon_{\Gamma 0}(k) + K_{\varepsilon_{\Gamma 1}}(k+1)\Delta\varepsilon_\Gamma(k+1);$$

$$\omega_{\Gamma 0}(k+1) = \omega_{\Gamma 0}(k) + K_{\varepsilon_{\Gamma 2}}(k+1)\Delta\varepsilon_\Gamma(k+1);$$

$$\varpi_{\Gamma 0}(k+1) = \varpi_{\Gamma 0}(k) + K_{\varepsilon_{\Gamma 3}}(k+1)\Delta\varepsilon_\Gamma(k+1);$$

$$\varepsilon_{\Gamma 0}(k+1) = \varepsilon_{\Gamma 0}(k) + \omega_{\Gamma 0}(k)\tau + 0,5\varpi_{\Gamma 0}(k)\tau^2;$$

$$\omega_{\Gamma 0}(k+1) = \omega_{\Gamma 0}(k) + \varpi_{\Gamma 0}(k)\tau;$$

$$\begin{aligned} \varpi_{\Gamma 0}(k+1) = \arctg & \left(\left(\left(\left(\left(\left(g \left(\sin \varphi_0(k) \sin \theta_0(k) - \cos \varphi_0(k) \sin \theta_0(k) \right) \times \right. \right. \right. \right. \right. \right. \right. \right. \right. \\ & \times \left(n_{y\alpha_0}(k) \cos \gamma_{\alpha_0}(k) - n_{z\alpha_0}(k) \sin \gamma_{\alpha_0}(k) \right) + n_{x\alpha_0}(k) \cos \theta_0(k) \times \\ & \times \left(\cos \varphi_0(k) - \sin \varphi_0(k) \right) + \left(\sin \varphi_0(k) + \cos \varphi_0(k) \right) \times \\ & \times \left(n_{y\alpha_0}(k) \sin \gamma_{\alpha_0}(k) + n_{z\alpha_0}(k) \cos \gamma_{\alpha_0}(k) \right) \right)^2 - \\ & \left. \left. \left. \left. \left. \left. \left. \left. \left(a_{\text{ЛВ}_0}(k) \cos \varepsilon_{\text{В}_0}(k) \right)^2 \right)^{0,5} \right) / \left(D_0(k) \cos \varepsilon_{\text{В}_0}(k) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \end{aligned}$$

$$\Delta \varepsilon_{\Gamma}(k+1) = \varepsilon_{\Gamma H}(k+1) - \varepsilon_{\Gamma \Delta}(k+1);$$

– алгоритм фильтрации для оценки угла наклона линии визирования и скорости его изменения в вертикальной плоскости:

$$\varepsilon_{B0}(k+1) = \varepsilon_{B\Delta}(k+1) + K_{\varepsilon B 11}(k+1)\Delta \varepsilon_B(k+1);$$

$$\omega_{B0}(k+1) = \omega_{B\Delta}(k+1) + K_{\varepsilon B 21}(k+1)\Delta \varepsilon_B(k+1);$$

$$\varepsilon_{B\Delta}(k+1) = \varepsilon_{B0}(k) + \omega_{B0}(k)\tau;$$

$$\omega_{B\Delta}(k+1) = (1 - \alpha_{\varphi B}\tau)\omega_{B0}(k);$$

$$\Delta \varepsilon_B(k+1) = \varepsilon_{BH}(k+1) - \varepsilon_{B\Delta}(k+1);$$

– алгоритм фильтрации для оценки угла наклона и скорости изменения угла наклона цели:

$$\theta_0(k+1) = \theta_{\Delta}(k+1) + K_{\theta 11}(k+1)\Delta \theta(k+1);$$

$$\omega_{\theta 0}(k+1) = \omega_{\theta \Delta}(k+1) + K_{\theta 21}(k+1)\Delta \theta(k+1);$$

$$\theta_{\Delta}(k+1) = \theta_0(k) + \omega_{\theta 0}(k)\tau;$$

$$\omega_{\theta \Delta}(k+1) = (1 - \alpha_{\varphi \theta}\tau)\omega_{\theta 0}(k);$$

$$\Delta \theta(k+1) = \theta_H(k+1) - \theta_{\Delta}(k+1);$$

– алгоритм фильтрации для оценки путевого угла и скорости изменения путевого угла цели:

$$\varphi_0(k+1) = \varphi_{\Delta}(k+1) + K_{\varphi 11}(k+1)\Delta \varphi(k+1);$$

$$\omega_{\varphi 0}(k+1) = \omega_{\varphi \Delta}(k+1) + K_{\varphi 21}(k+1)\Delta \varphi(k+1);$$

$$\varphi_{\Delta}(k+1) = \varphi_0(k) + \omega_{\varphi 0}(k)\tau;$$

$$\omega_{\varphi \Delta}(k+1) = (1 - \alpha_{\varphi \varphi}\tau)\omega_{\varphi 0}(k);$$

$$\Delta \varphi(k+1) = \varphi_H(k+1) - \varphi_{\Delta}(k+1);$$

– алгоритм фильтрации для оценки скоростного угла крена и скорости изменения скоростного угла крена цели:

$$\gamma_{a_0}(k+1) = \gamma_{a\Delta}(k+1) + K_{\gamma 11}(k+1)\Delta \gamma_a(k+1);$$

$$\omega_{\gamma_{a0}}(k+1) = \omega_{\gamma_{a\Delta}}(k+1) + K_{\gamma 21}(k+1)\Delta \gamma_a(k+1);$$

$$\gamma_{a\Delta}(k+1) = \gamma_{a_0}(k) + \omega_{\gamma_{a_0}}(k)\tau;$$

$$\omega_{\gamma_{a\Delta}}(k+1) = (1 - \alpha_{\gamma}\tau)\omega_{\gamma_{a_0}}(k);$$

– алгоритм фильтрации для оценки вектора тангенциальной перегрузки и скорости изменения вектора тангенциальной перегрузки:

$$n_{xa_0}(k+1) = n_{xa\Delta}(k+1) + K_{n_{xa} 11}(k+1)\Delta n_{xa}(k+1);$$

$$\omega_{n_{x_0}}(k+1) = \omega_{n_{x\Delta}}(k+1) + K_{n_{xa} 21}(k+1)\Delta n_{xa}(k+1);$$

$$n_{xa\Delta}(k+1) = n_{xa_0}(k) + \omega_{n_{x_0}}(k)\tau;$$

$$\omega_{n_{x\Delta}}(k+1) = (1 - \alpha_{\varphi n_x}\tau)\omega_{n_{x_0}}(k);$$

$$\Delta n_{xa}(k+1) = n_{xa_H}(k+1) - n_{xa\Delta}(k+1);$$

– алгоритм фильтрации для оценки вектора нормальной перегрузки и скорости изменения вектора нормальной перегрузки:

$$n_{ya_0}(k+1) = n_{ya\Delta}(k+1) + K_{n_{ya} 11}(k+1)\Delta n_{ya}(k+1);$$

$$\omega_{n_{y_0}}(k+1) = \omega_{n_{y\Delta}}(k+1) + K_{n_{ya} 21}(k+1)\Delta n_{ya}(k+1);$$

$$n_{ya_3}(k+1) = n_{ya_0}(k) + \omega_{ny_0}(k)\tau;$$

$$\omega_{ny_3}(k+1) = (1 - \alpha_{\phi ny}\tau)\omega_{ny_0}(k);$$

$$\Delta n_{ya}(k+1) = n_{ya_{и}}(k+1) - n_{ya_3}(k+1);$$

– алгоритм фильтрации для оценки вектора боковой перегрузки и скорости изменения вектора боковой перегрузки:

$$n_{za_0}(k+1) = n_{za_3}(k+1) + K_{n_{za}11}(k+1)\Delta n_{za}(k+1);$$

$$\omega_{nz_0}(k+1) = \omega_{nz_3}(k+1) + K_{n_{za}21}(k+1)\Delta n_{za}(k+1);$$

$$n_{za_3}(k+1) = n_{za_0}(k) + \omega_{nz_0}(k)\tau;$$

$$\omega_{nz_3}(k+1) = (1 - \alpha_{\phi nz}\tau)\omega_{nz_0}(k);$$

$$\Delta n_{za}(k+1) = n_{za_{и}}(k+1) - n_{za_3}(k+1);$$

– алгоритм фильтрации для оценки дальности, скорости и ускорения цели:

$$D_0(k+1) = D_3(k+1) + K_{D11}(k+1)\Delta D(k+1);$$

$$V_0(k+1) = V_3(k+1) + K_{D21}(k+1)\Delta D(k+1);$$

$$a_0(k+1) = a_3(k+1) + K_{D31}(k+1)\Delta D(k+1);$$

$$D_3(k+1) = D_0(k) + V_0(k)\tau + 0,5a_0(k)\tau^2;$$

$$V_3(k+1) = V_0(k) + a_0(k)\tau;$$

$$a_3(k+1) = (1 - \alpha_{\phi D}\tau)a_0(k);$$

$$\Delta D(k+1) = D_{и}(k+1) - D_3(k+1),$$

где k – номер дискреты времени; τ – период дискретизации; α_{ϕ} – постоянная маневра соответствующей величины; Δ – символ, обозначающий невязку измерений соответствующей величины; символы с индексами «э», «о» – экстраполированные и оцененные значения соответствующих величин.

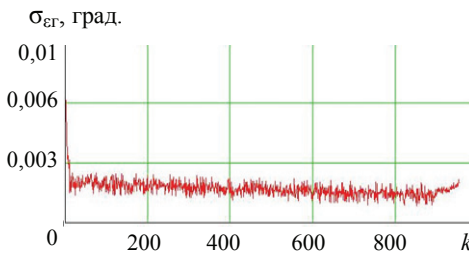


Рис. 1. Зависимость СКО измерения азимута ВС от дискрета времени

В целях оценки точностных характеристик синтезированного алгоритма выполнено имитационное моделирование на ЭВМ угломерного информационно-измерительного устройства, следящего за выполнением ВС маневра «посадка». Результаты моделирования в виде зависимости среднеквадратического отклонения (СКО) азимута ВС от номера дискрета времени приведены на рис. 1.

Результаты имитационного моделирования позволяют заметить, что алгоритмы, использующие данные о динамических характеристиках перемещения ВС, позволяют уменьшить значение СКО, в сравнении с алгоритмами, не использующими дополнительную динамическую информацию о ВС [4]. Данный факт особенно заметен при выполнении ВС динамичного маневра, что объясняется более точной экстраполяцией скорости изменении азимута ВС. Повышение точности угломерных каналов ИИС позволяет повысить пропускную способность ВС при заданном уровне безопасности.

Список литературы

1. Пудовкин, А. П. Перспективные методы обработки информации в радиотехнических системах / А. П. Пудовкин, С. Н. Данилов, Ю. Н. Панасюк. – СПб. : Экспертные решения, 2014. – 256 с.
2. Чернышова, Т. И. Применение математического моделирования при реализации методов оценки и повышения метрологического ресурса аналоговых блоков информационно-измерительных систем / Т. И. Чернышова, В. В. Третьяков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 3. – С. 381 – 387. doi: 10.17277/vestnik.2015.03.pp.381-387
3. Данилов, С. Н. Алгоритм сопровождения с реконfigurацией модели / С. Н. Данилов, Р. А. Ефремов, Н. А. Кольтюков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 3. – С. 418 – 423. doi: 10.17277/vestnik.2015.03.pp.418-423
4. Точностные характеристики навигационных комплексов, использующих контроль целостности спутниковых радионавигационных систем для реконfigurации / А. В. Иванов [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 4. – С. 572 – 577. doi: 10.17277/vestnik.2015.04.pp.572-577

Application of Dynamic Aircraft Data in the Goniometric Channel of Information-Measuring Systems

V. N. Glistin, Yu. N. Panasyuk

*Department of Radio Engineering, TSTU,
Tambov, Russia; glistinwadim@mail.ru*

Keywords: aircraft; information and measuring systems; model; optimal filtering; goniometer channel.

Abstract: Vectors of state and observation of the aircraft movement are presented and substantiated; the algorithm for the operation of the goniometric channel of the information-measuring system (IMS), taking into account the dynamic characteristics of aircraft is developed. Computer simulation of the developed algorithm was carried out, and the results of the research into the algorithm of the IMS angular reference channel are presented.

References

1. Pudovkin A.P., Danilov S.N., Panasyuk Yu.N. *Perspektivnyye metody obrabotki informatsii v radio-tekhnicheskikh sistemakh* [Perspective methods of information processing in radio-technical systems], St. Petersburg: Ekspertnyye resheniya, 2014, 256 p. (In Russ.)

2. Chernyshova T.I., Tret'yakov V.V. [Application of mathematical modeling in the implementation of methods for assessing and improving the metrological resource of analog blocks of information-measuring systems], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 3, pp. 381-387, doi: 10.17277/vestnik.2015.03.pp.381-387 (In Russ., abstract in Eng.)

3. Danilov S.N., Yefremov R.A., Kol'tyukov N.A. [The tracking algorithm with model reconfiguration], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 3, pp. 418-423, doi: 10.17277/vestnik.2015.03.pp.418-423 (In Russ., abstract in Eng.)

4. Ivanov A.V., Komrakov D.V., Moskvitin S.P., Chernyshov V.N. [Accuracy characteristics of navigation systems using the integrity control of satellite radio navigation systems for reconfiguration], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 4, pp. 572-577, doi: 10.17277/vestnik.2015.04.pp.572-577 (In Russ., abstract in Eng.)

Die Verwendung der dynamischen Daten des Luftfahrzeugs im Winkelmesskanal von Informations-und Messsystemen

Zusammenfassung: Es sind die Vektoren des Zustandes und der Beobachtung der Bewegung des Luftfahrzeugs, sowie auch der entwickelte Algorithmus für das Funktionieren des Winkelmesskanals des Informations-und Messsystems (IMS) unter Berücksichtigung der dynamischen Eigenschaften der Luftfahrzeuge präsentiert und begründet. Es ist das Simulationsmodellieren des entwickelten Algorithmus auf dem Computer durchgeführt und die Ergebnisse der Untersuchung des Funktionierens des Algorithmus des Winkelkanals IIS sind vorgestellt worden.

Application des données dynamiques de l'aéronef dans le canal angulaire des systèmes d'information et de mesure

Résumé: Sont présentés et justifiés des vecteurs d'état et d'observation de la marche de l'aéronef ainsi que l'algorithme du fonctionnement du canal angulaire du système d'information et de mesure (SIM) en tenant compte des caractéristiques dynamiques des aéronefs. Est effectuée la simulation sur l'ordinateur de l'algorithme élaboré et sont présentés les résultats de l'étude de l'algorithme du fonctionnement du contrôleur angulaire IIS.

Авторы: *Глистин Вадим Николаевич* – аспирант кафедры «Радиотехника»; *Панасюк Юрий Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Данилов Станислав Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.