

## МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ТРЕТИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Ю. Н. Панасюк, А. П. Пудовкин, А. И. Рогачёв

*Кафедра «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия;  
resbn@jesby.tstu.ru*

**Ключевые слова:** воздушные суда; информационно-измерительные системы; модель; третичная обработка информации; угломерный канал.

**Аннотация:** Разработан метод функционирования угломерного канала информационно-измерительной системы с учетом использования весовых коэффициентов в третичной обработке информации. Обоснован выбор моделей состояния и наблюдения, разработан алгоритм третичной обработки информации.

---

### Введение

В современных автоматизированных системах управления воздушным движением (АС УВД) происходят процессы, необходимые для обеспечения безопасности воздушного движения. Начало процессов заключается в получении исчерпывающей и непрерывно обновляемой информации о координатах и характеристиках воздушной цели (ВЦ). Данную информацию в АС УВД получают с помощью средств, входящих в подсистему сбора и обработки радиолокационной информации (РЛИ), а именно: постов и центров обработки РЛИ, авиационных комплексов радиолокационного обзора и наведения [1, 2]. В зависимости от конструкции АС УВД в ней могут проводиться: первичная, вторичная и третичная обработки информации.

В настоящее время разработаны различные методы третичной обработки информации (ТОИ):

- с равным весом поступающей информации;
- статическими весовыми коэффициентами, характеризующими эффективность и точность постов и центров получения РЛИ;
- динамическими весовыми коэффициентами, характеризующими эффективность обнаружения ВЦ.

**Цель работы.** Синтез алгоритма функционирования угломерного канала информационно-измерительных системы использующую третичную обработку информации с учетом динамических весовых коэффициентов движения воздушных судов.

Третичная обработка информации представляет собой несколько последовательных операций над РЛИ. Началом ТОИ служит сбор информации о ВЦ. Далее синхронизация полученных данных для успешного решения вопроса о количестве целей, затем происходит усреднение информации об отметке от ВЦ.

Математически данный этап представлен формулой [1, 3]

$$\varphi_{\text{ТОИ}} = \frac{b_1 \varphi_1 + b_2 \varphi_2}{b_1 + b_2}, \quad (1)$$

где  $b_1$  и  $b_2$  – весовые коэффициенты среднеквадратичного отклонения (СКО) измерителей РЛС1 и РЛС2 соответственно;  $\varphi_1, \varphi_2$  – азимуты угломерных каналов РЛС1 и РЛС2 соответственно.

Весовые коэффициенты можно вычислить по формулам:

$$b_1 = \frac{1}{\Delta\varphi_1^2}; \quad b_2 = \frac{1}{\Delta\varphi_2^2}, \quad (2)$$

где  $\Delta\varphi_1$  и  $\Delta\varphi_2$  – невязки азимутов угломерных каналов РЛС1 и РЛС2.

Алгоритм ТОИ начинает свою работу после того, как все фазовые координаты (азимут, угловая скорость и ускорение) будут приведены к единой системе координат [4, 5]. От двух РЛС в центре АС УВД поступает два вектора состояния ВЦ и два вектора оценки невязки после вторичной обработки информации калмановским фильтром на РЛС:

$$X_{\text{РЛС1}}(k) = [\varphi_1(k) \quad \omega_1(k) \quad a_1(k)]^T; \quad (3)$$

$$X_{\text{РЛС2}}(k) = [\varphi_2(k) \quad \omega_2(k) \quad a_2(k)]^T; \quad (4)$$

$$Y_{\text{РЛС1}}(k) = [\Delta\varphi_1(k) \quad \Delta\omega_1(k) \quad \Delta a_1(k)]^T; \quad (5)$$

$$Y_{\text{РЛС2}}(k) = [\Delta\varphi_2(k) \quad \Delta\omega_2(k) \quad \Delta a_2(k)]^T, \quad (6)$$

где  $X_{\text{РЛС1}}$  и  $X_{\text{РЛС2}}$  – вектора состояния ВО;  $Y_{\text{РЛС1}}$  и  $Y_{\text{РЛС2}}$  – вектора невязки.

Для обработки информации от двух РЛС при ТОИ в угломерном канале будет использоваться алгоритм калмановской фильтрации. Подставляя формулы (3) – (6) в выражения (1) и (2), получим математическую модель ТОИ:

$$X_{\text{ТОИ}}(k) = \frac{b_1(k) X_{\text{РЛС1}}(k) + b_2(k) X_{\text{РЛС2}}(k)}{b_1(k) + b_2(k)}; \quad (7)$$

$$b_1(k) = \frac{1}{Y_{\text{РЛС1}}(k)^2}; \quad (8)$$

$$b_2(k) = \frac{1}{Y_{\text{РЛС2}}(k)^2}. \quad (8)$$

Можно представить в матричном виде формулу (7), подставив в нее матричные представления формул (8) и (9). Полученное в итоге выражение матрицы примет вид

$$X_{\text{ТОИ}}(k) = \begin{bmatrix} \varphi_{\text{ТОИ}}(k) \\ \omega_{\text{ТОИ}}(k) \\ a_{\text{ТОИ}}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{\text{ТОИ}}(k) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{\text{ТОИ}}(k) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a_{\text{ТОИ}}(k) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где  $\omega_{\text{ТОИ}}$  – угловая скорость азимута;  $a_{\text{ТОИ}}$  – ускорение угла азимута.

$$\begin{aligned}
\begin{vmatrix} \varphi_{\text{ГОИ}}(k) \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} &= \frac{|1\ 0\ 0| \times \begin{vmatrix} 1 \\ \frac{\Delta\varphi_1(k)^2}{1} \\ \frac{1}{\Delta\omega_1(k)^2} \\ \frac{1}{\Delta a_1(k)^2} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \varphi_1(k) \\ \omega_1(k) \\ a_1(k) \end{vmatrix} + |1\ 0\ 0| \times \begin{vmatrix} 1 \\ \frac{\Delta\varphi_2(k)^2}{1} \\ \frac{1}{\Delta\omega_2(k)^2} \\ \frac{1}{\Delta a_2(k)^2} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \varphi_2(k) \\ \omega_2(k) \\ a_2(k) \end{vmatrix}}{|1\ 0\ 0| \times \left( \begin{vmatrix} 1 \\ \frac{\Delta\varphi_1(k)^2}{1} \\ \frac{1}{\Delta\omega_1(k)^2} \\ \frac{1}{\Delta a_1(k)^2} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 \\ \frac{\Delta\varphi_2(k)^2}{1} \\ \frac{1}{\Delta\omega_2(k)^2} \\ \frac{1}{\Delta a_2(k)^2} \end{vmatrix} \right)}, \\
\end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
\begin{vmatrix} 0 \\ \omega_{\text{ГОИ}}(k) \\ 0 \end{vmatrix} &= \frac{|0\ 1\ 0| \times \begin{vmatrix} 1 \\ \frac{\Delta\varphi_1(k)^2}{1} \\ \frac{1}{\Delta\omega_1(k)^2} \\ \frac{1}{\Delta a_1(k)^2} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \varphi_1(k) \\ \omega_1(k) \\ a_1(k) \end{vmatrix} + |0\ 1\ 0| \times \begin{vmatrix} 1 \\ \frac{\Delta\varphi_2(k)^2}{1} \\ \frac{1}{\Delta\omega_2(k)^2} \\ \frac{1}{\Delta a_2(k)^2} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \varphi_2(k) \\ \omega_2(k) \\ a_2(k) \end{vmatrix}}{|0\ 1\ 0| \times \left( \begin{vmatrix} 1 \\ \frac{\Delta\varphi_1(k)^2}{1} \\ \frac{1}{\Delta\omega_1(k)^2} \\ \frac{1}{\Delta a_1(k)^2} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 \\ \frac{\Delta\varphi_2(k)^2}{1} \\ \frac{1}{\Delta\omega_2(k)^2} \\ \frac{1}{\Delta a_2(k)^2} \end{vmatrix} \right)}, \\
\end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
\begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ a_{\text{ГОИ}}(k) \end{vmatrix} &= \frac{|0\ 0\ 1| \times \begin{vmatrix} 1 \\ \frac{\Delta\varphi_1(k)^2}{1} \\ \frac{1}{\Delta\omega_1(k)^2} \\ \frac{1}{\Delta a_1(k)^2} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \varphi_1(k) \\ \omega_1(k) \\ a_1(k) \end{vmatrix} + |0\ 0\ 1| \times \begin{vmatrix} 1 \\ \frac{\Delta\varphi_2(k)^2}{1} \\ \frac{1}{\Delta\omega_2(k)^2} \\ \frac{1}{\Delta a_2(k)^2} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \varphi_2(k) \\ \omega_2(k) \\ a_2(k) \end{vmatrix}}{|0\ 0\ 1| \times \left( \begin{vmatrix} 1 \\ \frac{\Delta\varphi_1(k)^2}{1} \\ \frac{1}{\Delta\omega_1(k)^2} \\ \frac{1}{\Delta a_1(k)^2} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 \\ \frac{\Delta\varphi_2(k)^2}{1} \\ \frac{1}{\Delta\omega_2(k)^2} \\ \frac{1}{\Delta a_2(k)^2} \end{vmatrix} \right)}. \\
\end{aligned} \tag{13}$$

Выражение (10) для калмановского фильтра ТОИ будет являться уравнением наблюдения, и можно представить, как

$$\varphi_{\text{ТОИ}}(k) = \varphi_{\text{ист}}(k) + \xi_a(k), \quad (14)$$

где  $\varphi_{\text{ист}}$  – истинное значение азимута;  $\xi_a$  – центрированный гауссовский шум с известной дисперсией  $D_a$ .

Алгоритм калмановской фильтрации ТОИ с учетом (10) и (14) имеет вид:

$$X_{\text{ТОИ о}}(k) = \begin{vmatrix} \varphi_{\text{ТОИ о}}(k) \\ \omega_{\text{ТОИ о}}(k) \\ a_{\text{ТОИ о}}(k) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \varphi_3(k) \\ \omega_3(k) \\ a_3(k) \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \Delta\varphi_{\text{ТОИ}}(k) & 0 & 0 \\ 0 & \Delta\varphi_{\text{ТОИ}}(k) & 0 \\ 0 & 0 & \Delta\varphi_{\text{ТОИ}}(k) \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} K_{\Phi_1}(k) \\ K_{\Phi_2}(k) \\ K_{\Phi_3}(k) \end{vmatrix}; \quad (15)$$

$$X_3(k) = \begin{vmatrix} \varphi_3(k) \\ \omega_3(k) \\ a_3(k) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & T & 0,5T^2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & (1-\alpha_\Phi T) \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \varphi_{\text{ТОИ о}}(k-1) \\ \omega_{\text{ТОИ о}}(k-1) \\ a_{\text{ТОИ о}}(k-1) \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} \varphi_{\text{ТОИ о}}(k) \\ \omega_{\text{ТОИ о}}(k) \\ a_{\text{ТОИ о}}(k) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \varphi_{\text{ТОИ}}(k) \\ \omega_{\text{ТОИ}}(k) \\ a_{\text{ТОИ}}(k) \end{vmatrix}, \quad (16)$$

$$|\Delta\varphi_{\text{ТОИ}}(k)| = |\varphi_{\text{ТОИ}}(k)| - |\varphi_3(k)|. \quad (17)$$

$$P_3(k) = \begin{vmatrix} P_{311}(k) & P_{312}(k) & P_{313}(k) \\ P_{321}(k) & P_{322}(k) & P_{323}(k) \\ P_{331}(k) & P_{332}(k) & P_{333}(k) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & T & 0,5T^2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & (1-\alpha_\Phi T) \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} P_{011}(k-1) & P_{022}(k-1) & P_{013}(k-1) \\ P_{021}(k-1) & P_{022}(k-1) & P_{023}(k-1) \\ P_{031}(k-1) & P_{032}(k-1) & P_{033}(k-1) \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} (1-\alpha_\Phi T) & 0 & 0 \\ T & 1 & 0 \\ 0,5T^2 & T & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{\varphi_x} \end{vmatrix}, \quad (18)$$

где  $D_{\varphi_x}$  – среднеквадратическая ошибка шумов возмущения.

$$K_\Phi(k) = \begin{vmatrix} K_{\Phi_1}(k) \\ K_{\Phi_2}(k) \\ K_{\Phi_3}(k) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} P_{311}(k) & P_{312}(k) & P_{313}(k) \\ P_{321}(k) & P_{322}(k) & P_{323}(k) \\ P_{331}(k) & P_{332}(k) & P_{333}(k) \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \times \left\{ \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ P_{311}(k) & P_{312}(k) & P_{313}(k) \\ P_{321}(k) & P_{322}(k) & P_{323}(k) \\ P_{331}(k) & P_{332}(k) & P_{333}(k) \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} + R_{\varphi_x} \right\}^{-1}, \quad (19)$$

$$P_0(k) = \begin{vmatrix} P_{011}(k) & P_{022}(k) & P_{013}(k) \\ P_{021}(k) & P_{022}(k) & P_{023}(k) \\ P_{031}(k) & P_{032}(k) & P_{033}(k) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} P_{\text{э}11}(k) & P_{\text{э}12}(k) & P_{\text{э}13}(k) \\ P_{\text{э}21}(k) & P_{\text{э}22}(k) & P_{\text{э}23}(k) \\ P_{\text{э}31}(k) & P_{\text{э}32}(k) & P_{\text{э}33}(k) \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} K_{\Phi_1}(k) \\ K_{\Phi_2}(k) \\ K_{\Phi_3}(k) \end{vmatrix} \times \\ \times |1 \quad 0 \quad 0| \times \begin{vmatrix} P_{\text{э}11}(k) & P_{\text{э}12}(k) & P_{\text{э}13}(k) \\ P_{\text{э}21}(k) & P_{\text{э}22}(k) & P_{\text{э}23}(k) \\ P_{\text{э}31}(k) & P_{\text{э}32}(k) & P_{\text{э}33}(k) \end{vmatrix}. \quad (20)$$

### Заключение

Синтезированный алгоритм ТОИ, построенный с учетом динамических весовых коэффициентов, позволяет улучшить точностные характеристики радиоэлектронных следящих систем, в результате увеличивается пропускная способность АС УВД при заданном уровне безопасности.

#### Список литературы

1. Пудовкин, А. П. Перспективные методы обработки информации в радиотехнических системах : монография / А. П. Пудовкин, С. Н. Данилов, Ю. Н. Панасюк. – СПб. : Экспертные решения, 2014. – 256 с.
2. Чернышова, Т. И. Математическое моделирование при анализе метрологической надежности аналоговых блоков информационно-измерительных систем / Т. И. Чернышова, В. В. Третьяков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 1. – С. 42 – 49.
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.
4. Иванов, А. В. Точностные характеристики навигационных комплексов, использующих контроль целостности спутниковых радионавигационных систем для реконfigurации / А. В. Иванов, Д. В. Комраков, С. П. Москвитин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 4. – с. 572-577.
5. Использование динамических характеристик воздушного судна в информационно-измерительных системах / Ю. Н. Панасюк [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 381 – 386.

---

### A Method of Increasing the Accuracy of Tertiary Information Processing Using Dynamic Weighting Coefficients

Yu. N. Panasyuk, A. P. Pudovkin, A. I. Rogachev

*Department of Radio Engineering, Tambov State Technical University,  
Tambov, Russia; resbn@jesby.tstu.ru*

**Keywords:** aircraft; gauging channel; information-measuring systems; model; tertiary information processing.

**Abstract:** The paper proposes a method for the functioning of a goniometer channel of an information and measuring system, taking into account the use of weight coefficients in tertiary information processing. The choice of models of state and observation is justified, simulations on a computer are carried out and the results of the algorithm investigation are presented.

## References

1. Pudovkin A.P., Danilov S.N., Panasiuk Y.N. *Perspektivnye metody obrabotki informatsii v radiotekhnicheskikh sistemakh* [Advanced methods of information processing in radio systems], St. Petersburg: Ekspertnye resheniya, 2014, 256 p. (In Russ.)
2. Chernyshova T.I., Tretyakov V.V. [Mathematical Modeling in the Analysis of Metrological Reliability of Analog Parts of Information-Measuring Systems], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 3, pp. 381-388. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Danilov S.N., Efremov R.A., Koltyukov N. A. [Model Reconfiguration Tracking Algorithm], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 3, 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 Continuity Testing of Satellite Navigation Systems for Solving Problems of Reconfiguration], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2015, no. 4, pp. 572-577. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Panasyuk Yu.N., Pudovkin A.P., Knyazev I.V., Glistin V.N. [Use of the dynamic characteristics of an aircraft in information-measuring systems], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2016, no. 3, pp. 381-386. (In Russ., abstract in Eng.)

---

### **Methode zur Erhöhung der Genauigkeit der tertiären Informationsverarbeitung mit der Anwendung der dynamischen Gewichtsverhältnisse**

**Zusammenfassung:** Es ist die Methode des Funktionierens des Winkelmeßkanals des Informations- und Messsystems unter Berücksichtigung der Verwendung von Gewichtungskoeffizienten in der tertiären Informationsverarbeitung entwickelt. Es ist die Wahl der Modelle des Zustandes und der Beobachtung gerechtfertigt, ein Algorithmus der tertiären Informationsverarbeitung ist entwickelt.

---

### **Méthode de l'augmentation de la précision du traitement tertiaire de l'information avec l'application des coefficients dynamiques pondéraux**

**Résumé:** Est conçue la méthode du fonctionnement du canal de mesure angulaire du système informatique de mesure, compte tenu de l'utilisation des coefficients pondéraux dans le traitement tertiaire de l'information. Est justifié le choix des modèles de l'état et de l'observation, de l'algorithme du traitement tertiaire de l'information.

---

**Авторы:** *Панасюк Юрий Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехника»; *Пудовкин Анатолий Петрович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиотехника»; *Розачёв Алексей Игоревич* – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

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