

## ПРИМЕНЕНИЕ КАЛМАНОВСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКИХ ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ В ТРЕТИЧНОЙ ОБРАБОТКЕ ИНФОРМАЦИИ

А. И. Рогачёв, А. И. Сустин, Ю. Н. Панасюк,  
А. П. Пудовкин, С. Н. Данилов

*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; фильтр Калмана.

**Аннотация:** Разработан алгоритм функционирования угломерного канала информационно-измерительной системы с применением калмановской фильтрации для метода динамических весовых коэффициентов в третичной обработке информации. Обоснован выбор моделей состояния и наблюдения, проведено имитационное моделирование на ЭВМ и представлены результаты исследования алгоритма функционирования угломерного канала информационно-измерительной системы.

---

Проблема точности, устойчивости информационно-измерительных систем (ИИС) управления воздушным движением (УВД) со вторичной обработкой информации связана с тем, что движение воздушных судов (ВС) в районе аэродрома не соответствует существующим классическим моделям движения ВС [1]. Исследования показывают, что при маневрах (вираж, разворот и т.д.) возникают большие ошибки оценки координат ВС, которые не соответствуют современным требованиям к системам УВД по обеспечению пропускной способности при заданном уровне безопасности воздушного движения [1]. Для повышения точности оценки координат ВС при вторичной обработке информации в ИИС необходимо усложнять модели движения ВС, что увеличивает вычислительные затраты. Предпочтительным вариантом решения данной проблемы является синтез алгоритмов функционирования угломерного (дальномерного) канала ИИС УВД с использованием третичной обработки информации (ТОИ). Выгодное отличие ТОИ состоит в том, что использование нескольких радиолокационных станций (РЛС) позволяет с высоким качеством обработать радиолокационную информацию на основе существующих классических моделей движения ВС.

Цель работы – синтез алгоритма функционирования угломерного канала ИИС с применением калмановской фильтрации для метода динамических весовых коэффициентов в ТОИ.

Для синтеза алгоритма функционирования угломерного канала ИИС с применением калмановской фильтрации для метода динамических весовых коэффициентов в ТОИ используется зингеровская модель состояния и наблюдения [2 – 4]:

$$\varphi(k) = \varphi(k-1) + \omega(k-1)T + 0,5a(k-1)T; \quad (1)$$

$$\omega(k) = \omega(k-1) + a(k-1)T; \quad (2)$$

$$a(k) = (1 - \alpha_\phi T)a(k-1) + \xi_a(k-1); \quad (3)$$

$$\varphi_{\text{и}}(k) = \varphi(k) + \xi_{\varphi_{\text{и}}}(k), \quad (4)$$

где  $\varphi(k)$  – азимут ВС;  $\omega(k)$ ,  $a(k)$  – скорость и ускорение изменения азимута ВС соответственно;  $k$  – номера отсчетов, взятых с дискретностью  $T$ , равной шагу вычисления;  $\varphi_{\text{и}}(k)$  – измеренное значение азимута ВС;  $\xi_a(k-1)$  – дискретный центрированный гауссовский шум с известной дисперсией  $D_a$ ;  $\xi_{\varphi_{\text{и}}}(k)$  – дискретный центрированный гауссовский шум измерения с известной дисперсией  $D_{\varphi_{\text{и}}}$ ;  $\alpha_\phi$  – постоянная времени маневра ВС.

Учитывая модели состояния (1) – (3) и наблюдения (4), содержащие информацию об азимуте ВС, и выражения для линейной фильтрации [1, 5], получим алгоритм фильтрации для угломерного канала:

$$\varphi_o(k) = \varphi_3(k) + K_{\phi 11}(k) \Delta \varphi(k); \quad (5)$$

$$\omega_o(k) = \omega_3(k) + K_{\phi 21}(k) \Delta \varphi(k); \quad (6)$$

$$a_o(k) = a_3(k) + K_{\phi 31}(k) \Delta \varphi(k); \quad (7)$$

$$\varphi_3(k) = \varphi_o(k-1) + \omega_o(k-1)T + 0,5a_o(k-1)T^2 \quad (8)$$

$$\omega_3(k) = \omega_o(k-1) + a_o(k-1)T; \quad (9)$$

$$a_3(k) = (1 - \alpha_\phi T)a_3(k-1) + \xi_a(k-1); \quad (10)$$

$$\Delta \varphi(k) = \varphi_{\text{и}}(k) - \varphi_3(k), \quad (11)$$

где переменные с индексами «о», «э» – оцененные и экстраполированные значения соответствующих величин;  $K_{\phi 11}$ ,  $K_{\phi 21}$  и  $K_{\phi 31}$  – коэффициенты усиления калмановского фильтра;  $\Delta \varphi(k)$  – невязка фильтра Калмана.

Для исследования алгоритма функционирования угломерного канала ИИС УВД была создана модель полета ВС для маневра «большая коробочка» при помощи дифференциальных перегрузочных уравнений [6]. В результате получены изменения азимутальных углов  $\varphi_{\text{РЛС1}}$  и  $\varphi_{\text{РЛС2}}$  ВС для РЛС1 и РЛС2 (рис. 1).

На основании алгоритма (5) – (11) и рис. 1 проводилось имитационное моделирование угломерных каналов РЛС1 и РЛС2 на примере сопровождения одного ВС. Результаты моделирования представлены на рис. 2, где показано, что при одинаковом азимуте ВС, значения невязок оценки азимута РЛС1 и РЛС2 отличаются.

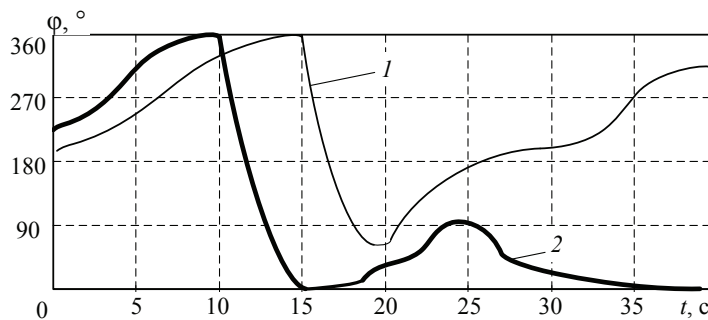


Рис. 1. Изменение азимута воздушного судна относительно РЛС1 (1) и РЛС2 (2)

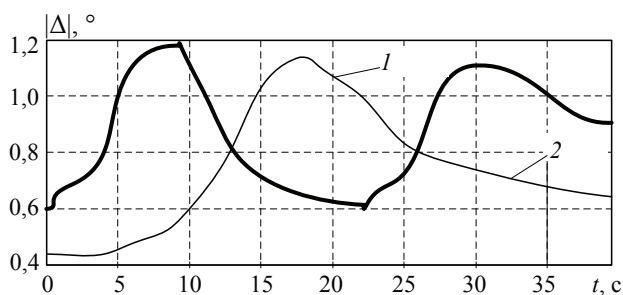


Рис. 2. Невязки азимута воздушного судна РЛС1 (1) и РЛС2 (2)

Информацию о значениях невязок можно использовать при ТОИ. При третичной обработке радиолокационной информации используются две РЛС, которые входят в состав ИИС УВД (рис. 3).

Для улучшения точностных характеристик угломерного канала ИИС, необходимо учитывать весовые коэффициенты [7]

$$\varphi_{\text{ТОИ}} = \frac{b_1\varphi_1 + b_2\varphi_2}{b_1 + b_2}, \quad (12)$$

где  $b_1$  и  $b_2$  – весовые коэффициенты измерителей РЛС1 и РЛС2 соответственно, которые вычисляются по формулам [1, 7]:

$$b_1 = \frac{1}{\Delta\varphi_1^2}; \quad b_2 = \frac{1}{\Delta\varphi_2^2}. \quad (13)$$

Результаты моделирования в виде временной зависимости среднеквадратичной ошибки оценки азимута  $\sigma_\varphi$  для РЛС1, РЛС2 и ТОИ представлены на рис. 4.

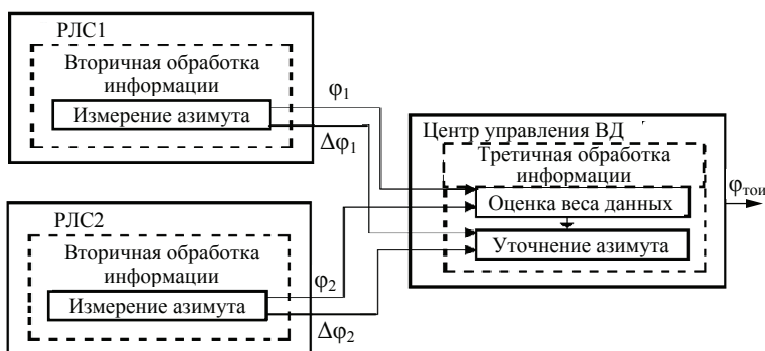


Рис. 3. Структурная схема угломерного канала

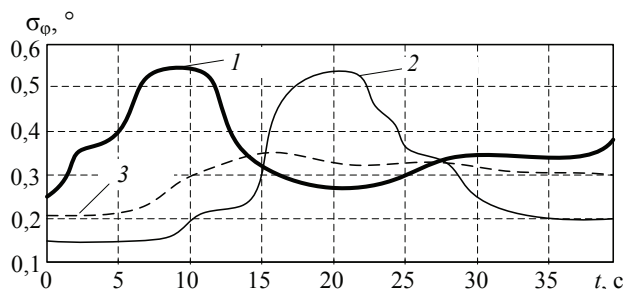


Рис. 4. Среднеквадратичные ошибки азимута РЛС1 (1), РЛС2 (2) и ТОИ (3)

Из результатов моделирования очевидно, что с применением калмановской фильтрации для метода динамических весовых коэффициентов в угломерном канале ИИС ТОИ повышает точность оценки азимута по сравнению с угломерным каналом РЛС. Это объясняется различными точностными характеристиками оценивания азимута ВС для угломерных каналов РЛС1 и РЛС2, размещенных на определенном расстоянии друг от друга, и возможностью обработки информации об азимутальных углах ВС в ИИС ТОИ.

Угломерный канал ИИС с применением калмановской фильтрации для метода динамических весовых коэффициентов в ТОИ, по сравнению с угломерным каналом РЛС со вторичной обработкой информации, позволяет повысить точность определения азимута систем УВД не менее чем на 30 %, а это в свою очередь позволит повысить пропускную способность ВС в районе аэродрома не менее чем на 15 % при заданном уровне безопасности полетов.

#### *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. 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

3. 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

4. Прогнозирование квазигармонического сигнала в пространстве состояний / С. Н. Данилов [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 374 – 380. doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.374-380

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. doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.381-386

6. Тарасенков А. М. Динамика полета и боевое маневрирование летательного аппарата / А. М. Тарасенков. – М. : Изд-во ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1984. – 312 с.

7. Панасюк, Ю. Н. Метод повышения точности третичной обработки информации с применением динамических весовых коэффициентов / Ю. Н. Панасюк, А. П. Пудовкин, А. И. Рогачёв // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 595 – 600. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.595-600

---

## **Application of Kalman Filtering for the Method of Dynamic Weights in Tertiary Information Processing**

**A. I. Rogachev, A. I. Sustin, Yu. N. Panasyuk,  
A. P. Pudovkin, S. N. Danilov**

*Department of Radio Engineering, TSTU,  
Tambov, Russia; resbn@jesby.tstu.ru*

**Keywords:** aircraft; information and measuring systems; model; tertiary information processing; goniometer channel; Kalman filter.

**Abstract:** An algorithm for the operation of the angular channel of an information-measuring system using Kalman filtering has been developed for the method of dynamic weights in the tertiary information processing. The choice of the models of state and observation is substantiated; computer simulation has been carried out; the results of the research into the operation of the goniometric channel of the information-measuring system are presented.

### References

1. Pudovkin A.P., Danilov S.N., Panasyuk Yu.N. *Perspektivnye metody obrabotki informatsii v radiotekhnicheskikh sistemakh* [Perspective methods of information processing in radio engineering systems], St. Petersburg: Ekspertnye resheniya, 2014, 256 p. (In Russ.)
2. Danilov S.N., Efremov R.A., Kol'tyukov N.A. [Model Reconfiguration Tracking Algorithm], *Transactions of 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.)
3. 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, vol. 21, no. 4, pp. 572-577, doi: 10.17277/vestnik.2015.04.pp.572-577 (In Russ., Abstract in Eng.)
4. Danilov S.N., Kol'tyukov N.A., Petrov S.V., Chernyshova T.I. [Prediction of a quasi-harmonic signal in the state space], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 374-380, doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.374-380 (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, vol. 22, no. 3, pp. 381-386, doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.381-386 (In Russ., abstract in Eng.)
6. Tarasenkov A.M. *Dinamika poleta i boyevoye manevrirovaniye letatel'nogo apparata* [Flight dynamics and combat maneuvering of an aircraft], Moscow: Izdatel'stvo VVIA im. prof. N. Ye. Zhukovskogo, 1984, 312 p. (In Russ.)
7. Panasyuk Yu.N., Pudovkin A.P., Rogachov A.I. [A method for improving the accuracy of tertiary information processing using dynamic weighting coefficients], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 595-600, doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.595-600 (In Russ., abstract in Eng.)

---

### Anwendung der Kalman-Filterung für die Methode der dynamischen Gewichtskoeffizienten in der tertiären Informationsverarbeitung

**Zusammenfassung:** Es ist ein Algorithmus für das Funktionieren des Winkelkanals des Informations- und Messsystems mit Anwendung der Kalman-Filterung für die Methode der dynamischen Gewichtskoeffizienten in der tertiären Informationsverarbeitung entwickelt. Die Auswahl der Zustands- und Beobachtungsmodelle ist begründet, es ist Simulationsmodellierung auf Datenverarbeitungsanlagen (EDV) durchgeführt und die Ergebnisse der Untersuchung des Algorithmus für das Funktionieren des Winkelkanals des Informations- und Messsystems sind präsentiert.

## **Application du filtrage Kalman pour la méthode des coefficients dynamiques et de poids dans le traitement tertiaire de l'information**

**Résumé:** Est élaboré un algorithme pour le fonctionnement du canal angulaire du système d'information et de mesure à l'aide de la filtration Kalman pour la méthode des coefficients dynamiques et de poids dans le traitement tertiaire de l'information. Est argumenté le choix des modèles d'état et d'observation; est réalisée la simulation sur l'ordinateur; sont présentés les résultats de la recherche de l'algorithme de fonctionnement du canal angulaire du système d'information et de mesure.

---

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

**Рецензент:** *Иванов Александр Васильевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.