

ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ОПТИМАЛЬНОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ В ІНФОРМАЦІЙНО – ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ЗА УМОВ АПРІОРНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Вінницький національний технічний університет.

Анотація

В умовах стрімкого росту трафіку авіаційного руху виникають потреби у зміні класичних підходів до організації польотів у зоні аеродрому. На зміну сталим маршрутам руху повітряних суден під час здійснення посадкового маневру приходять змінні траєкторії посадки, які визначаються його типом і географічними умовами аеродрому. В таких умовах існуючі системи радіотехнічного забезпечення потребують подальшого вдосконалення за рахунок технічної переобладнання та застосування сучасних методів обробки сигналів з метою покращення точності визначення просторового положення літака. Метою даної роботи є підвищення точності та достовірності вимірювань кутових координат повітряного судна в азимутальному каналі посадкового радіолокатора за умов заходу на посадку по вільних траєкторіях, шляхом застосування методів оптимальної дискретної фільтрації. Перевагою такого підходу є застосування для вторинної обробки сигналів добре описаних, відносно простих, математичних методів, результатом чого є покращення характеристик точності посадкового радіолокатора без додаткового технічного переобладнання. Результати проведеного моделювання підтверджують функціональність запропонованого методу та доцільність обраного напрямку досліджень.

Ключові слова: динамічна система, вектор стану, автономний багатомодельний оптимальний фільтр.

Abstract

In the conditions of rapid growth of the aviation movement traffic there is need for change of classical approaches to the organization of flights for zone of airfield. Constant routes of the movement of air vehicles during implementation of landing maneuver are succeeded by replaceable landing paths which are defined by aircraft type and geographical conditions of airfield. In such conditions the existing systems of radio engineering providing need further improvement, as due to technical re-equipment, and application of modern methods of processing of signals. The purpose - improvements there has to be increase in accuracy of definition of the attitude of the airplane. Increases in accuracy and reliability of measurements of angular coordinates of the air vehicle in the azimuthal channel of the landing radar on condition of landing approach on free trajectories, by application of methods of optimum discrete filtering are task of this work. Advantage of such approach are applications for secondary processing of signals of well described, rather simple, mathematical algorithms what improvements of characteristics of accuracy of the landing radar without additional technical re-equipment are result of. Results of the carried-out modeling confirm functionality of the offered method and expediency of the chosen direction of research.

Keywords: dynamic system, state vector, autonomous multimodel optimum filter.

Вступ

Обсяг і характер завдань, висунутих зараз перед авіаційною індустрією вимагає масштабних комплексних заходів, які б визначили подальший якісний стрибок у її розвитку. Різке зростання інтенсивності повітряного руху у світі робить актуальною задачу створення комплексної системи, яка зможе управляти посадкою літаків по вільних траєкторіях в умовах можливих конфліктних ситуацій, ґрунтуючись на ергодичних й мережецентрических принципах керування [1] при цьому, визначені просторові параметри ПС мають надавати екіпажу інформацію про його положення відносно точки приземлення, а також про стан ПС щодо заданої траєкторії, що дозволить екіпажу виконувати політ в ручному, директорному або автоматичному режимі. Система має забезпечувати вихід на точку і захід на посадку з будь-якого напрямку і по будь-якій траєкторії, тобто не мати обмежень по азимуту, куту і мінімальній дальності дії. Відповідно ставиться завдання створення в галузі авіаційної індустрії сис-

теми, яка дозволить кількісно і якісно підвищити рівень екологічності та економічності польотів в авіації в цілому; підвищити рівень безпеки польотів; розвантажити повітряну зону очікування в районі аеропорту; вирішити проблему перевантаження аеропортів інтенсивністю повітряного руху; підвищити ефективність використання авіаційної техніки [2].

Посадка ПС є найбільш складним і відповідальним етапом польоту [3]. У структурі Єдиної системи керування повітряним рухом в аеродромній зоні в основному використовують два типи радіолокаційних станцій: оглядовий радіолокатор аеродромний і посадковий радіолокатор (ПРЛ). За даними ІКАО, заходи на посадку без наземного контролю з використанням ПРЛ у п'ять раз небезпечніше, чим заходи з її використанням. Аналіз розвитку техніки побудови посадкових радіолокаторів дозволяє затверджувати, що розробка радіолокаторів іде в напрямку підвищення: надійності апаратури; точності визначення координат; перешкодозахищеності; автоматизації й мобільності [4].

В умовах вільних посадкових траєкторій динаміка змін кутових координат ПС стає априорі не визначеною, оскільки радіальна складова швидкості вирівнювання ПС на лінії курсу залежатиме від особливостей посадочних траєкторій кожного конкретного аеродрому та типу ПС. Для подолання априорної невизначеності азимутальної траєкторії руху ПС в даній роботі пропонується використання багатомодельних методів оптимальної фільтрації.

Синтез автономного багатомодельного оптимального фільтру

Математична модель динамічного процесу зміни кутових даних, які надходять з каналу первинних радіовимірювань у систему вторинної обробки, може бути описана системою різницевих векторних рівнянь

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_k &= \mathbf{A}_{k|k-1} \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B}_{k|k-1} \mathbf{w}_k; \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{C}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{n}_k, \end{aligned} \quad (1)$$

де $\mathbf{x}_k = [\mathbf{x}(t), \dot{\mathbf{x}}(t), \mathbf{y}(t), \dot{\mathbf{y}}(t)]^T$ – вектор стану двовимірної горизонтальної моделі руху ПС у поточний момент часу k ; \mathbf{y}_k – вектор спостережень; $\mathbf{C}_k = [1 \ 0 \ 1 \ 0]^T$ – матриця спостережень, структура якої визначається типом вимірювальних засобів; $\mathbf{w}_k, \mathbf{n}_k$ – гаусові білі послідовності з нульовим середнім значенням та априорно заданими кореляційними матрицями $\mathbf{Q}_k, \mathbf{R}_k$; $\mathbf{A}_{k|k-1}, \mathbf{B}_{k|k-1}$ – системні матриці. З огляду на роботу [5], неважко показати, що при заданому інтервалі дискретизації Δt та кутовій швидкості ПС ω :

$$\mathbf{A}_{k|k-1} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sin \omega \Delta t}{\omega} & 0 & \frac{1 - \cos \omega \Delta t}{\omega^2} \\ 0 & \cos \omega \Delta t & 0 & -\frac{\sin \omega \Delta t}{\omega} \\ 0 & \frac{1 - \cos \omega \Delta t}{\omega} & 1 & \frac{\sin \omega \Delta t}{\omega} \\ 0 & \sin \omega \Delta t & 0 & \cos \omega \Delta t \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_{k|k-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T. \quad (2)$$

Алгоритм роботи автономного багатомодельного методу з кількістю моделей $N=i$ описується наступною послідовністю [6]:

прогнозування координатного вектору $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(i)} = \mathbf{A}_{k|k-1}^{(i)} \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}^{(i)}$;

прогнозування системної коваріації $\mathbf{P}_{k|k-1}^{(i)} = \mathbf{A}_{k|k-1}^{(i)} \mathbf{P}_{k-1|k-1}^{(i)} \left(\mathbf{A}_{k|k-1}^{(i)} \right)^T + \mathbf{Q}_{k-1}^{(i)}$;

визначення нев'язки вимірювання $\tilde{\mathbf{y}}_k^{(i)} = \mathbf{y}_k - \mathbf{C}_k^{(i)} \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(i)}$;

визначення коваріаційної нев'язки $\mathbf{S}_k^{(i)} = \mathbf{C}_k^{(i)} \mathbf{P}_{k|k-1}^{(i)} \left(\mathbf{C}_k^{(i)} \right)^T + \mathbf{R}_k^{(i)}$;

матричний коефіцієнт підсилення $\mathbf{K}_k^{(i)} = \mathbf{P}_{k|k-1}^{(i)} \left(\mathbf{C}_k^{(i)} \right)^T \left(\mathbf{S}_k^{(i)} \right)^{-1}$;

оновлення координатного вектору $\hat{\mathbf{x}}_k^{(i)} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(i)} + \mathbf{K}_k^{(i)} \tilde{\mathbf{y}}_k^{(i)}$;

оновлення коваріаційної матриці $\mathbf{P}_k^{(i)} = \mathbf{P}_{k|k-1}^{(i)} - \mathbf{K}_k^{(i)} \mathbf{S}_k^{(i)} \left(\mathbf{K}_k^{(i)} \right)^T$;

визначення функції правдоподібності моделі \mathbf{L} та її імовірності μ

$$\mathbf{L}_k^{(i)} \equiv N(\tilde{\mathbf{y}}_k^{(i)}; \mathbf{0}, \mathbf{S}_k^{(i)}); \quad \boldsymbol{\mu}_k^{(i)} = \frac{\boldsymbol{\mu}_{k-1}^{(i)} \mathbf{L}_k^{(i)}}{\sum_j \boldsymbol{\mu}_{k-1}^{(j)} \mathbf{L}_k^{(j)}};$$

оцінка вектору стану та даних системної коваріаційної матриці

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \sum_i \hat{\mathbf{x}}_{k|k}^{(i)} \boldsymbol{\mu}_k^{(i)}; \quad \mathbf{P}_{k|k} = \sum_i [\mathbf{P}_{k|k}^{(i)} + (\hat{\mathbf{x}}_{k|k} - \hat{\mathbf{x}}_{k|k}^{(i)}) (\hat{\mathbf{x}}_{k|k} - \hat{\mathbf{x}}_{k|k}^{(i)})^T] \boldsymbol{\mu}_k^{(i)}.$$

Моделювання роботи багатомодельного оптимального фільтра виконувалось за наступних умов: інтервал спостереження 100с; вибірка – 0,6с; точність первинних вимірювань та збурення моделі визначались відповідними кореляційними матрицями $\mathbf{R}_k = \text{diag}[2; 1]$, $\mathbf{Q}_k = \text{diag}[0,01; 0,01]$; початкове значення $\mathbf{x}_{0|0} = [200; 0; 200; 0]^T$; кількість моделей з відповідною кутовою швидкістю в діапазоні 0,045–10-5 рад/с. $N=7$; кутова швидкість моделі – 0,03 рад/с.; початкова імовірність моделей розподілена за рівномірним законом з імовірністю $\mu = 0,1429$. Результати проведеного моделювання представлені на рисунку 1.

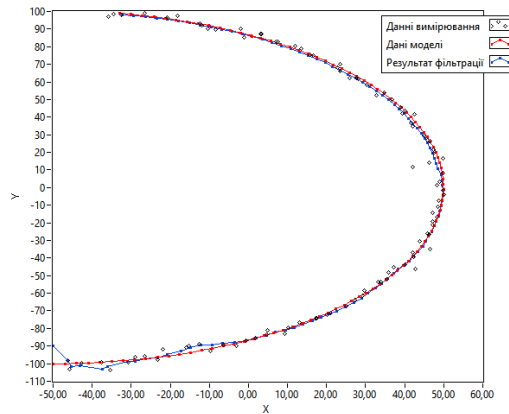


Рис. 1 – Результат проведених траекторних вимірювань по координатах $\mathbf{x}_k = [x_{0|0}; 0; y_{0|0}; 0]^T$

Аналіз даних моделювання показує, що вже після 25-го такту алгоритм чітко розпізнає модель $N=4$ ($\mu_3 = 0,62$). Дієздатність алгоритму підтверджує можливість його застосування для обробки вторинних даних азимутального каналу ПРЛ при заході на посадку ПС по вільним траекторіям з відповідною апіорною невизначеністю по кутовим швидкостям.

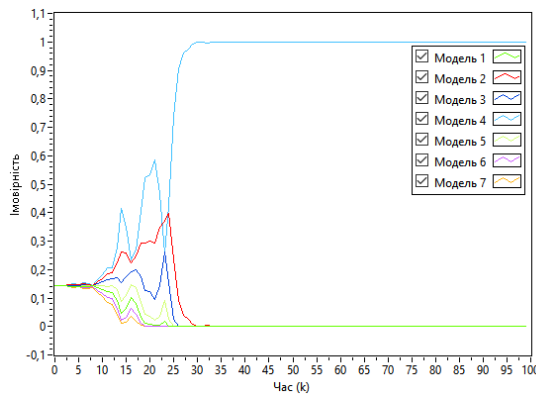


Рис. 2 – Адаптація імовірнісних характеристик моделей ($\mathbf{k} = [x_{0|0}; 0; 0; 0]^T$)

Висновки

1. Методами матричної алгебри синтезовано автономний багатомодельний оптимальний фільтр для азимутального каналу посадкового радіолокатора за умов апіорної траекторної невизначеності. Можливість застосування алгоритму підтверджена моделюванням.

2. Модель об'єкту досліджень та умовно-імовірнісний алгоритм обробки даних азимутального

каналу вимірювання посадкового радіолокатора відтворені у програмній середі LabVIEW.

3. Відмінною рисою запропонованого алгоритму є його рекурсивність і робота з інформаційними даними у режимі реального часу, що є об'єктивним для достатньо швидкоплинних процесів до яких і належить процедура заходу на посадку повітряного судна.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Pavlov V.V., Voloshenyuk D.O., Volkov O.Ye. The concept of network centric control of landing aircraft on free paths with technology for solving conflict situations. *Kibernetika i vychislitelnaâ tehnika*, 2014, 178, P. 36–51. (in Ukrainian).
2. Руководство по построению схем на основе санкционированных требуемых на-вигационных характеристик (RNP AR) / Международная организация гражданской авиации (ICAO). Montréal, Quebec, Canada: 2009. — 100 с. — ISBN 978-92-9231-461-3.
3. Воловик А.Ю. Розробка моделі траєкторних спостережень для авіаційної посадкової системи / А.Ю. Воловик, Д.В. Гаврілов, В.С. Мозговий. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки – Хмельницький, 2018, Том 1 № 6 (267), – С. 173-182.
4. Воловик А.Ю. Оптимальний фільтр кутомірного каналу авіаційної системи посадки / А.Ю. Воловик, В.С. Мозговий, О.П. Червак, М.А. Шутило. Матеріали 1 Міжнародної науково-технічної конференції: «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки, та наносистем» (СПРН-2019) м. Вінниця, 14-16 листопада 2019.– с. 99–100.
5. Li X. R. Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory Algorithms and Software / X. R. Li, V.P. Jilkov, T. Kirubarajan ; John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 2004.— p. 584 —ISBN:97804712212722.
6. Li X. R. Survey of maneuvering target tracking. Part I. Dynamic models / X. R. Li, V.P. Jilkov ; IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 39, No. 4. Oct. 2003 p. 1333–1364 DOI: 10.1109/TAES.2003.1261132.

Воловик Андрій Юрійович – канд. техн. наук, доцент кафедри радіотехніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: voland@vntu.edu.ua.

Червак Оксана Петрівна – провідний інженер кафедри радіотехніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: oksana_chervak@ukr.net.

Шутило Микола Артемович – провідний інженер кафедри радіотехніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Volovyk Andrii U. – Ph.D. (Eng), Associate Professor of Radio engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: voland@vntu.edu.ua.

Chervak Oksana. P. – Senior Engineer of Radio engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: oksana_chervak@ukr.net.

Shutilo Mikola. A. – Senior Engineer of Radio engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.