

## ОПТИМАЛЬНИЙ ОЦІНЮВАЧ ЗІ СТРУКТУРНОЮ АДАПТАЦІЄЮ

Вінницький національний технічний університет

### Анотація

Метою даної роботи є розробка адаптивного алгоритму фільтрації просторових даних рухомого динамічного об'єкту за умов апіорної траєкторної невизначеності. В основі рішення поставленої задачі лежить апроксимація траєкторії вільного руху динамічного об'єкту відомими моделями руху і поєднання відповідних їм оптимальних фільтрів у структурну єдність з подальшим імовірнісним механізмом формування підсумкової оцінки і структурної адаптації відповідно до динаміки руху об'єкту контролю.

**Ключові слова:** оптимальний фільтр, структурна адаптивна фільтрація, імовірнісний механізм адаптації.

Не зважаючи на те, що процес руху будь якого динамічного об'єкту є безперервним, для використання усіх переваг сучасних методів цифрової обробки інформації є доцільним перехід до дискретного еквівалента нелінійної моделі рівнянь в просторі станів :

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}_{k|k-1}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{G}_{k|k-1}\mathbf{u}_k + \mathbf{B}_{k|k-1}\mathbf{w}_k \quad (1)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k$$

де  $\mathbf{x}_k \in \mathcal{R}^n$  – вектор стану, компонентами якого є координати рухомого об'єкту та швидкості їх зміни;  $\mathbf{A}_k \in \mathcal{R}^{n \times n}$  – системна перехідна матриця, структура якої залежить від характеру руху об'єкта стеження у просторі;  $\mathbf{G}_k \in \mathcal{R}^{n \times p}$  – системна матриця входу;  $\mathbf{u}_k \in \mathcal{R}^p$  – вектор вхідних керуючих впливів;  $\mathbf{B}_k \in \mathcal{R}^{n \times q}$  – системна матриця збурень;  $\mathbf{w}_k \in \mathcal{R}^q$  – гаусова біла послідовності з нульовим середнім значенням та апіорно заданою кореляційною матрицею  $\mathbf{Q}_k \in \mathcal{R}^{q \times q}$ ;  $\mathbf{z}_k \in \mathcal{R}^m$  – вектор спостережень,  $\mathbf{C}_k \in \mathcal{R}^{m \times n}$  – матриця спостережень, структура якої визначається типом вимірювальних засобів та їх числом;  $\mathbf{v}_k \in \mathcal{R}^m$  – похибка первинних вимірювань.

За умови наявності адекватної математичної моделі динаміки руху об'єкта стеження, в подібних випадках, стандартом для фільтрації траєкторних даних є фільтр Калмана [1]. Однак за умов апіорної траєкторної невизначеності, вище згаданий алгоритм втрачає оптимальні властивості з можливістю подальшого розбіжності процесу фільтрації. В представленому дослідженні для подолання апіорної траєкторної невизначеності запропоновано використати оптимальний оцінювач зі структурною адаптацією (рис1.).

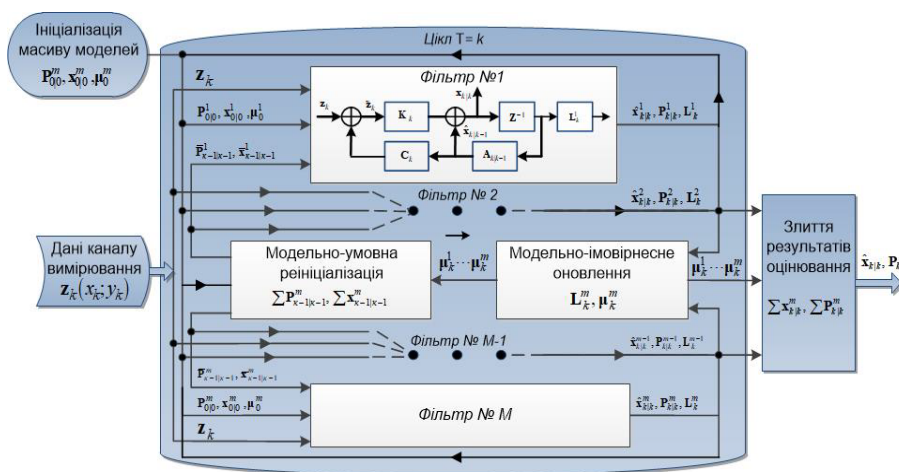


Рис. 1. Алгоритм оптимального оцінювача зі структурною адаптацією

Сутність запропонованого методу фільтрації просторових даних полягає у тому, що будь який вільний рух об'єкта спостереження, на певному інтервалі часу, можна апроксимувати одною з добре відомих моделей, а пристрій спостереження буде являти собою набір відповідних фільтрів Калмана з механізмом ймовірнісного керування який і буде визначати структуру пристрою у поточний момент часу відповідно до динаміки руху. У якості механізму керування обрано критерій максимуму функцій правдоподібності, при цьому субоптимальна оцінка вектору стану  $\mathbf{x}_{k|k}$  на основі задіяних  $N$  структур являє собою виважену суму умовних математичних очікувань [2]:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \sum_{i=1}^N E \left[ \mathbf{x}_k | m_k^{(i)}, \mathbf{z}_k \right] \mathbf{P} \left\{ m_k^{(i)} | \mathbf{z}_k \right\} = \sum_{i=1}^N \mathbf{x}_{k|k}^{(i)} \mu_k^{(i)}; \quad (2)$$

де  $\mu_k^{(i)} = \mathbf{P} \left\{ m_k^{(i)} | \mathbf{z}_k \right\}$  - апостеріорна імовірність моделі.

Процедура фільтрації починає працювати з введення апріорних даних для кожної моделі та модельно-умовної реініціалізації входів фільтрів. На основі результатів роботи кожного окремого фільтру на такті  $k$  відбувається оновлення ймовірностей моделей. Фінальною стадією поточного такту є злиття оцінок та оновлення структури пристрою перед наступним кроком. Точність оцінювання визначається відповідною кореляційною матрицею:

$$\mathbf{P}_{k|k} = E \left[ \left( \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k|k} \right) \left( \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k|k} \right)^T | \mathbf{z}_k \right] = \sum_{i=1}^N E \left[ \left( \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k|k}^{(i)} \right) \left( \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k|k}^{(i)} \right)^T | \mathbf{z}_k \right] + \left( \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k|k} \right) \left( \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k|k} \right)^T, \quad (3)$$

$$\mathbf{P} \left( m_k^i | \mathbf{z}_k \right) = \sum_{i=1}^N \left[ \mathbf{P}_{k|k}^{(i)} + \left( \mathbf{x}_{k|k} - \hat{\mathbf{x}}_{k|k}^{(i)} \right) \left( \mathbf{x}_{k|k} - \hat{\mathbf{x}}_{k|k}^{(i)} \right)^T \right] \mu_k^{(i)}.$$

## Висновки

1. Кількість сучасних рухомих засобів та перевантаження ними навколишнього середовища змушує провідних виробників робити їх більш динамічними, здатними виконувати складні маневри в стиснутих часових рамках. Це вимагає непинного удосконалення засобів спостереження. Використання сучасних методів цифрової обробки інформації є перспективним напрямком підвищення точності траєкторного контролю та безпеки оточуючого нас світу в цілому.

2. Результати проведеного моделювання показують, що застосування оптимальних оцінювачів зі структурною адаптацією для вторинної обробки даних є достатньо ефективним методом, при цьому, відносний виграш у точності досягає 30-40 % у порівнянні зі стандартними алгоритмами.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Volovyk A., Pyrih Y., Urikova O., Masiuk A., Shubyn B., Maksymuk T. Dynamic System State Estimation with a Resilience to Observation Data Anomalies. Contemp. Math. 2023 Nov. 27. Volume 5 Issue 1 (2024) PP 1-18. DOI: <https://doi.org/10.37256/cm.512024>.

[2] Воловик А.Ю. Адаптивне оцінювання параметрів руху повітряного судна у режимі дотримання заданої посадкової траєкторії. Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія. Львів, 2022 Вип. 2, № 2, С. 67–78. DOI: <https://doi.org/10.23939/ictee2022.02.067>.

**Воловик Андрій Юрійович** – д.т.н, доцент, професор кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [voland@vntu.edu.ua](mailto:voland@vntu.edu.ua).

**Ніколенко Максим Сергійович** – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [maximnikolenkokoic19b@gmail.com](mailto:maximnikolenkokoic19b@gmail.com)

## STRUCTURALLY ADAPTABLE OPTIMAL OBSERVER

### Abstract

*The goal of this work is to develop an adaptive algorithm for filtering spatial data of a moving dynamic object under priori trajectory uncertainty. The solution to this problem is based on approximating the free dynamic object trajectory using known motion models and combining the corresponding optimal filters into a structural unity with a subsequent probabilistic mechanism for forming the final estimate and structural adaptation to the control object motion dynamics.*

**Keywords:** optimal filter, structural adaptive filtering, probabilistic adaptation.

**Volovyk Andrii U.** – Dr. Sc. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Information Radioelectronic Technologies and Systems Department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [voland@vntu.edu.ua](mailto:voland@vntu.edu.ua).

**Nikolenko Maksym Serhiyovych** – postgraduate student of the Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [maximnikolenkokoic19b@gmail.com](mailto:maximnikolenkokoic19b@gmail.com).