

ДІАГНОСТИКА ДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ МЕТОДОМ РОЗДІЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ

Вінницький національний технічний університет.

Анотація

Головна увага у цій роботі зосереджена на проблемі своєчасного виявлення несправностей та їх розпізнавання шляхом застосування локально-оптимальних методів роздільного оцінювання. Метою представленої роботи є розробка методу, що дозволяє відновити нормальну працездатність фільтра Калмана за наявності збурень, структура яких невизначена. Поставлена мета досягається шляхом застосування спеціального взаємодозначного перетворення рівняння виходу досліджуваної системи, внаслідок чого складова збурень поглинається в рівнянні екстраполяції вектору стану динамічної системи.

Ключові слова: оцінювання станів, лінійні динамічні системи, фільтр Калмана, збурення з невизначеною структурою.

Загально світові тенденції розвитку напрямку відмовостійкого керування складними об'єктами констатують, що за наявності протиріч між вартістю, складністю та надійністю більш доцільним є використання методів модельно-орієнтованої концепції з аналітичною надлишковістю, основою на спільних вимірах різнотипних фізичних величин з метою їх перехресного контролю. Ідеєю згаданої концепції є заміна фізичного резервування математичною моделлю (ММ) яка у обов'язковому порядку працює паралельно з діючим об'єктом, а на їхні входи подаються ідентичні вхідні сигнали. Схематично процедура виявлення несправностей на основі використання кількісної ММ зображена на рис. 1.

В ідеальному випадку, при відсутності дестабілізуючих факторів, адекватність математичної моделі у реальному об'єкту гарантує нульовий сигнал похибки. На практиці фактичний різницевий сигнал є лише повільним фізичним коливальним процесом навколо нульового рівня. У ньому віддзеркалюються усі фактори, що осталися поза ММ (непередбачувані збурення та несправності, ефекти від помилок моделювання, флуктуації параметрів системи, невраховані або лінеаризовані залежності, організовані або природні завади, шуми, та тощо. Інтуїтивно зрозуміло, що різницевий сигнал повинен бути очищений від створюваного фону.

Один з варіантів рішення цієї задачі використовує концепцію розширення вектору стану номінальної системи за рахунок внесення у її математичну модель фіктивного невідомого векторного входу, асоційованого з впливом діючих несправностей та збурень. При цьому оптимальний розв'язок задачі оцінювання гарантується розширеним фільтром Калмана [1]. Однак, за великого числа врахованих несправностей та збурень розмірність розширеного фільтра Калмана буде набагато перевищувати розмірність власне самої системи [3].

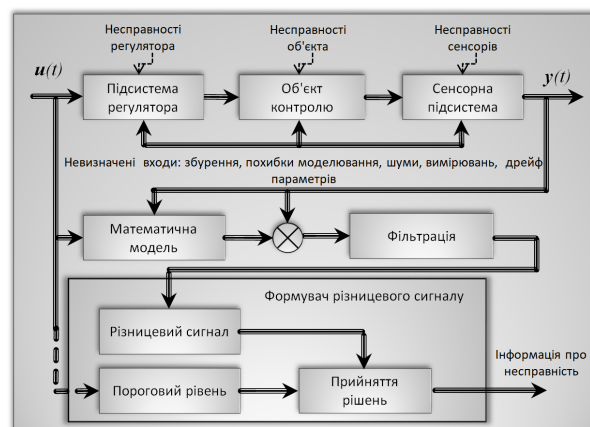


Рис. 1. Модельно-орієнтована система діагностики несправностей

З метою зниження обчислювальних витрат Бернард Фрідланд запропонував апроксимувати розширений фільтр Калмана (ФК) паралельною автономно діючою каскадною структурою меншої розмірності [2]. У представленій роботі виконана модернізація двокаскадної структури Фрідланда, що отримати оптимальні характеристики розщепленого фільтра за наявності стохастичних моделей несправностей. Вказана модернізація базується на відмові від автономності роботи компонентів паралельної структури та охоплені їх системою перехресних зв'язків.

Модель динаміки системи : $\mathbf{s}(k+1) = \Sigma(k+1, k)\mathbf{s}(k) + \Psi(k+1, k)\mathbf{f}(k) + \mathbf{w}_s(k)$

Модель каналу спостережень : $\mathbf{y}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{s}(k) + \mathbf{F}(k)\mathbf{f}(k) + \mathbf{v}(k)$

Модель динаміки несправностей: $\mathbf{f}(k+1) = \mathbf{L}(k+1, k)\mathbf{f}(k) + \mathbf{w}_f(k)$

Розширений вектор стану: $\mathbf{z}^T(k) = [\mathbf{s}(k) \ \mathbf{f}(k)]^T$

Розширений ФК:

$$\hat{\mathbf{z}}(k/k-1) = \Sigma_z(k, k-1)\hat{\mathbf{z}}(k-1/k-1)$$

$$\hat{\mathbf{z}}(k/k) = \hat{\mathbf{z}}(k/k-1) + \mathbf{K}_z(k)[\mathbf{y}(k) - \mathbf{H}_z(k)\hat{\mathbf{z}}(k/k-1)]$$

$$\mathbf{P}_z(k/k-1) = \Sigma_z(k, k-1)\mathbf{P}_z(k-1/k-1)\Sigma_z^T(k, k-1) + \mathbf{Q}_z(k-1)$$

$$\mathbf{K}_z(k) = \mathbf{P}_z(k/k-1)\mathbf{H}_z^T(k)[\mathbf{H}_z(k)\mathbf{P}_z(k/k-1)\mathbf{H}_z^T(k) + \mathbf{R}(k)]^{-1}$$

$$\mathbf{P}_z(k/k) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_z(k)\mathbf{H}_z(k)]\mathbf{P}_z(k/k-1)$$

$$\Sigma_z(k, k-1) = \begin{bmatrix} \Sigma(k, k-1) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{L}(k, k-1) \end{bmatrix} \mathbf{Q}_z(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_s(k) & \mathbf{Q}_{sf}(k) \\ \mathbf{Q}_{sf}^T(k) & \mathbf{Q}_f(k) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_z(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s(k) \\ \mathbf{K}_f(k) \end{bmatrix} \mathbf{H}_z(k) = [\mathbf{H}(k) \ \mathbf{F}(k)];$$

$$\mathbf{P}_z(k/k-1) = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_s(k/k-1) & \mathbf{P}_{sf}(k/k-1) \\ \mathbf{P}_{sf}^T(k/k-1) & \mathbf{P}_f(k/k-1) \end{bmatrix} \mathbf{P}_z(k/k) = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_s(k/k) & \mathbf{P}_{sf}(k/k) \\ \mathbf{P}_{sf}^T(k/k) & \mathbf{P}_f(k/k) \end{bmatrix}$$

Структура Фрідланда:

Фільтр 1:

Фільтр 2:

$$\mathbf{f}^*(k/k-1) = \mathbf{L}(k, k-1)\mathbf{f}^*(k-1/k-1);$$

$$\mathbf{f}^*(k/k) = \mathbf{f}^*(k/k-1) + \mathbf{K}_f(k)[\mathbf{y}(k) - \mathbf{H}(k)\mathbf{s}_1^*(k/k-1) - \Theta(k)\mathbf{f}^*(k/k-1)];$$

$$\mathbf{P}_f(k/k-1) = \mathbf{L}(k, k-1)\mathbf{P}_f(k-1/k-1)\mathbf{L}^T(k, k-1) + \mathbf{Q}_f(k-1);$$

$$\mathbf{K}_f(k) = \mathbf{P}_f(k/k-1)\Theta^T(k)[\mathbf{H}(k)\mathbf{P}_{s_1}(k/k-1)\mathbf{H}^T(k) + \Theta(k)\mathbf{P}_f(k/k-1)\Theta^T(k) + \mathbf{R}(k)]^{-1};$$

$$\mathbf{P}_f(k/k) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_f(k)\Theta(k)]\mathbf{P}_f(k/k-1)[\mathbf{I} - \mathbf{K}_f(k)\Theta(k)]^T + \mathbf{K}_f(k)\mathbf{R}(k)\mathbf{K}_f^T(k).$$

$$\mathbf{s}_0^*(k/k-1) = \Sigma(k, k-1)\mathbf{s}_0^*(k-1/k-1);$$

$$\mathbf{s}_0^*(k/k) = \mathbf{s}_0^*(k/k-1) + \mathbf{K}_{s_0}(k)[\mathbf{y}(k) - \mathbf{H}(k)\mathbf{s}_0^*(k/k-1)];$$

$$\mathbf{P}_{s_0}(k/k-1) = \Sigma(k, k-1)\mathbf{P}_{s_0}(k-1/k-1)\Sigma^T(k, k-1) + \mathbf{Q}_{s_0}(k-1);$$

$$\mathbf{K}_{s_0}(k) = \mathbf{P}_{s_0}(k/k-1)\mathbf{H}^T(k)[\mathbf{H}(k)\mathbf{P}_{s_0}(k/k-1)\mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}(k)]^{-1};$$

$$\mathbf{P}_{s_0}(k/k) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{s_0}(k)\mathbf{H}(k)]\mathbf{P}_{s_0}(k/k-1).$$

Для того, щоб врахувати вплив несправностей на фільтр, основний фільтр представимо їх у змінній формі за допомогою фіктивного додаткового входу $\mathbf{u}(k+1)$, на який діє оновлений шум збурень, обумовлений впливом несправностей [2].

Модифікація рівнянь фільтра Фрідланда:

$$\mathbf{s}_1^*(k/k-1) = \Sigma(k, k-1)\mathbf{s}_0^*(k-1/k-1) + \mathbf{u}(k-1);$$

$$\mathbf{P}_{s_1}(k/k-1) = \Sigma(k, k-1)\mathbf{P}_{s_0}(k-1/k-1)\Sigma^T(k, k-1) + \mathbf{Q}_{s_1}(k-1).$$

Моделювання роздільних властивостей синтезованого фільтра виконувалось з використанням моделі динаміки аеродинамічного об'єкту спостереження, збудженої шумами та збуреннями.

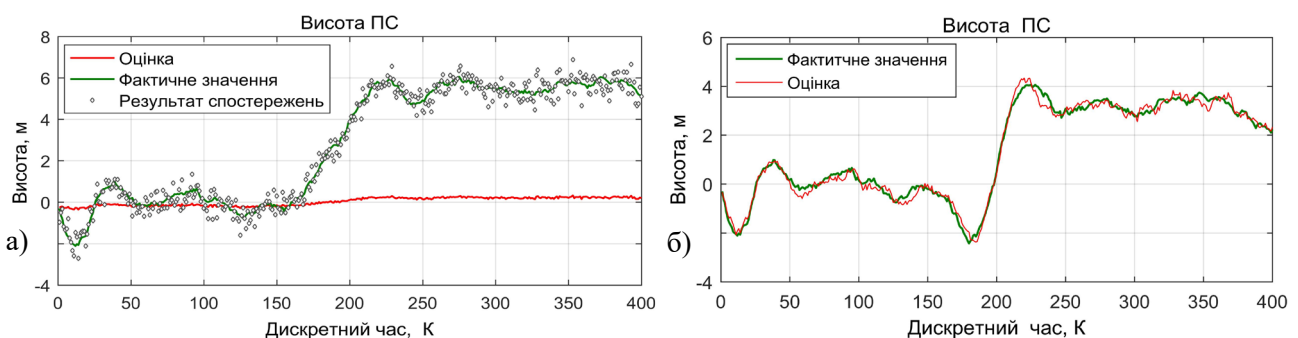


Рис. 2. Результати оцінювання у каналі висоти: а) стандартний розширений ФК; б) розроблений модифікований фільтр

Висновки

1. Результати дослідження показали, що класичний стандартний ФК не є еквівалентом діагностичного фільтра. Наслідком є розбіжність процесу фільтрації, починаючи з моменту дії збурення.

2. Результати моделювання розробленого модифікованого фільтра показують, що оцінка висоти прямує до її фактичного значення, проте це потребується високоякісної моделі системи та додаткової апіорної інформації щодо супутніх збурень і несправностей.

3. Оптимальність модифікованого фільтра підтримується у межах дії уведених обмежень. Суть яких полягає у тому, що корегувальна матриця повинна залишатись невід'ємно означеною та симетричною протягом усього часу роботи фільтра, що гарантує збіжність процесу оцінювання. З практичної точки зору дотримуватись зазначених умов значно простіше ніж тих, що пропонувались у інших роботах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Воловик А.Ю., Кичак В. М.. Теоретичні основи функціональних відновників діагностичного типу. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2018, №3, С. 109-118.

[2] Volovyk A., Kuchak V., Havrilov D. Discrete Kalman Filter Invariant to Perturbations. Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 18, No. 10, 2021, pp. 21-41, DOI: 10.12700/APH.18.10.2021.10.2.

[3] Воловик А. Оптимальні оцінки вектора стану для дискретних стохастичних систем з невизначеними збуреннями та шумом. Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія. Львів, 2023 Вип. 3, № 2, С. 116–125. DOI: <https://doi.org/10.23939/ictee2023.09.067>.

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.

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

DYNAMIC OBJECTS DIAGNOSTICS USING SEPARATE EVALUATION METHOD

Abstract

This work focuses on the problem of malfunctions timely detection and recognition using separate evaluation locally optimal method. The aim of this work is to develop a method that allows restoring the Kalman filter normal operation in the presence of disturbances whose structure is uncertain. This goal is achieved by applying a special one-to-one transformation of the system output equation under study, as a result of which the disturbance component is absorbed in the extrapolation equation of the dynamic system state vector.

Keywords: state estimation, linear dynamic systems, Kalman filter, undefined structure disturbances.

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.

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