

ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ КІБЕРФІЗИЧНИХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ ПРИ НАЯВНОСТІ НЕСПРАВНОСТЕЙ В РОЗПОДІЛЕНІЙ СЕНСОРНІЙ МЕРЕЖІ

Вінницький національний технічний університет.

Анотація

Метою представленої роботи є розробка методу, що дозволяє застосувати фільтр Калмана для оцінки інформаційних параметрів кіберфізичних інтелектуальних систем в умовах появи раптових несправностей або структурно невизначених збурень у розподіленій сенсорній мережі. Поставлена мета досягається шляхом застосування спеціального взаємооднозначного перетворення рівняння виходу досліджуваної системи, внаслідок чого складова збурень поглинається в рівнянні екстраполяції вектора стану динамічної системи. При цьому збурення мають абсолютно довільний характер, не підлягають ймовірнісному опису та не мають верхньої межі обмеженості. Функціональна працездатність запропонованого методу була підтверджена шляхом статистичного моделювання на тестовому прикладі лінійної динамічної системи третього порядку.

Ключові слова: визначення параметрів в умовах появи несправностей, лінійні динамічні системи, фільтр Калмана, збурення з невизначеною структурою.

Abstract

The objective of this work is to develop a method that enables the use of a Kalman filter to estimate the informational parameters of cyber-physical intelligent systems in the event of sudden failures or structurally indeterminate disturbances in a distributed sensor network. This objective 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 into the dynamic system state vector extrapolation equation. In this case, the disturbances are completely arbitrary in nature, cannot be described probabilistically, and have no upper bound on their range. The functional effectiveness of the proposed method was confirmed through statistical modeling on a test example of a third-order linear dynamic system.

Keywords: optimal parameter estimation in the presence of disturbances, linear dynamic systems, Kalman filter, disturbances with an unknown structure.

Оцінювання параметрів кіберфізичних інтелектуальних систем знайшло широке застосування в різних галузях практичної діяльності, наприклад, в аерокосмічних додатках, діагностиці несправностей технічних систем, в системах автоматичного управління, в хіміко-технологічних системах з метою контролю якості продукції, що випускається, тощо. Актуальність проблеми отримання оцінок станів таких систем, вільних від впливу структурно невизначених збурень, підтверджується її значенням для багатьох прикладних досліджень, зокрема у галузі функціональної діагностики, де точність оцінювання визначає ефективність діагностичних процедур.

Найбільш відомими і традиційно використовуваними класичними методами оцінювання станів в подібних випадках є методи фільтра Калмана і спостерігачів Люенбергера. В цих алгоритмах інформаційним джерелом для корекції оцінок є результати спостережень сенсорної підсистеми, а індикатором коректної роботи схеми оцінювання є інноваційний процес. Для номінального режиму роботи, останній, є гаусовим некорельованим випадковим процесом, що має нульове середнє значення і апріорно обчислювальну коваріаційну матрицю. У разі появи раптових несправностей або структурно невизначених збурень у сенсорній підсистемі зазначені умови порушуються, а адекватність оцінок загально прийнятих алгоритмів стає сумнівною, малоефективною і, при певних умовах, призводить до втрати алгоритмічної стійкості. Мета представленої роботи полягає в розробці методу отримання оцінок параметрів кіберфізичної інтелектуальної системи на фоні несправностей або структурно невизначених збурень у розподіленій мережі спостереження. В основу методу покладено ідею поглинання вище вказаних небажаних явищ шляхом введення взаємо-однозначного перетворення рівнянь виходу системи і подальшого застосування модифікованого методу фільтра Калмана.

На сьогоднішній день, відомі досягнення в теорії оцінювання припускають, що в будь-яку

несправність або збурення доцільно інтерпретувати у вигляді додаткових невідомих входів в подальшому які, або підлягають оцінюванню або, за для подолання впливу, відокремлюється від алгоритму безпосереднього оцінювання. Загалом, дослідження, присвячені оцінюванню станів у присутності несправностей та збурень із невизначеною структурою, мають тривалу історію розвитку, яка простягається до сучасного етапу [1–3]. Мета подібних досліджень полягала в розробці методів отримання оцінок станів, вільних від впливів збурюючих входів. Стійкість отриманих оцінок гарантувалася за рахунок введення додаткових обмежень у вигляді матричних нерівностей, що стосуються, в основному, системних матриць. Як правило, вільні ресурси, що залишаються після задоволення зазначених нерівностей, прийнято використовувати для цілей оптимізації [4, 5].

Розглянемо лінійну дискретну стохастичну систему математична модель, яка допускає опис в термінах змінних стану

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_{k+1} &= \mathbf{W}_k \mathbf{s}_k + \mathbf{G}_k \mathbf{u}_k + \mathbf{D}_k \mathbf{d}_k + \mathbf{n}_k; \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \xi_k \end{aligned} \quad (1)$$

де $\mathbf{s}_k \in \mathbb{R}^n$ – поточний стан системи, $\mathbf{y}_k \in \mathbb{R}^m$ – вектор виходу, $\mathbf{u}_k \in \mathbb{R}^p$ – точно відомий керуючий вплив, $\mathbf{d}_k \in \mathbb{R}^q$ – несправності або збурення з невизначеною структурою, $\mathbf{n}_k \in \mathbb{R}^n$ – шум стану, $\xi_k \in \mathbb{R}^m$ – шум виходу системи, $\mathbf{W}_k, \mathbf{G}_k, \mathbf{D}_k, \mathbf{H}_k$ – відомі системні матриці, відповідних розмірностей. Випадкові послідовності \mathbf{n}_k, ξ_k є незалежними білими гаусовими шумами, мають нульові середні значення і обмежені відповідні коваріаційні матриці. Незважаючи на те, що шуми \mathbf{n}_k, ξ_k є випадковими процесами, передбачається, що збурення \mathbf{d}_k абсолютно довільні, не мають ні ймовірнісного опису, ні навіть обмеженості зверху. Однак для розв'язності поставленої задачі вводяться припущення: послідовність матриць $\mathbf{H}_{k+1} \mathbf{D}_k$ повинна бути обмеженою; $q \leq m$ тобто число збурень не більше числа вихідних сенсорів. По суті це означає, що матричний добуток $\mathbf{H}_{k+1} \mathbf{D}_k$ має повний ранг по стовпцях. Завдання полягає в розробці методу оцінювання вектора стану \mathbf{s}_k , вільного від впливу збурень \mathbf{d}_k , виходячи з доступності результатів спостережень \mathbf{y}_k .

Припустимо, що існує якась обмежена матрична послідовність $\mathbf{M}_k [\mathbf{y}_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{s}_{k+1} - \mathbf{n}_{k+1}] = 0$. Тоді з співвідношення (1) безпосередньо випливає

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_{k+1} &= \mathbf{W}1_k \mathbf{s}_k + \mathbf{G}1_k \mathbf{u}_k + \mathbf{M}_{k+1} \mathbf{y}_{k+1} + \mathbf{w}_k, \\ \mathbf{Q}1_k &\triangleq \mathbf{Z}_{k+1} \mathbf{Q}_k \mathbf{Z}_{k+1}^T + \mathbf{M}_{k+1} \mathbf{R}_k \mathbf{M}_{k+1}^T. \end{aligned} \quad (2)$$

де, $\mathbf{W}1_k \triangleq \mathbf{Z}_{k+1} \mathbf{W}_k$; $\mathbf{G}1_k \triangleq \mathbf{Z}_{k+1} \mathbf{G}_k$; $\mathbf{w}_k \triangleq \mathbf{Z}_{k+1} \mathbf{n}_k - \mathbf{M}_{k+1} \mathbf{n}_{k+1}$.

Тоді застосування класичного фільтра Калмана до перетвореної моделі (2) виглядатиме

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{k+1|k} &= \mathbf{W}1_k \mathbf{P}_k \mathbf{W}1_k^T + \mathbf{Q}1_k; \quad \mathbf{K}_{k+1} = \mathbf{P}_{k+1|k} \mathbf{H}_{k+1}^T \mathbf{P}_{r_{k+1}}^{-1}; \\ \mathbf{P}_{r_{k+1}} &\triangleq E \{ \mathbf{r}_{k+1} \mathbf{r}_{k+1}^T \} = \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_k \mathbf{H}_{k+1}^T + \mathbf{R}_{k+1}; \\ \mathbf{P}_{k+1|k+1} &= [\mathbf{I}_n - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1}] \mathbf{P}_{k+1|k}; \quad \mathbf{r}_{k+1} = \mathbf{y}_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1} \hat{\mathbf{s}}_{k+1|k}; \\ \hat{\mathbf{s}}_{k+1|k} &= \mathbf{W}1_k \hat{\mathbf{s}}_k + \mathbf{G}1_k \mathbf{u}_k + \mathbf{M}_{k+1} \mathbf{y}_{k+1}; \quad \hat{\mathbf{s}}_{k+1|k+1} = \hat{\mathbf{s}}_{k+1|k} + \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{r}_{k+1} \end{aligned}$$

Як тестовий приклад розглянемо дискретну динамічну систему, яка допускає опис співвідношеннями (1, 2) при наступних значеннях системних матриць:

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_k &= \begin{bmatrix} 0.2995 & 0.0517 & 0.0314 \\ -0.0786 & -0.0286 & -0.0057 \\ 0.0141 & -0.0195 & -0.0186 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{G}_k = \begin{bmatrix} 0.7005 \\ 0.0786; \\ -0.01441 \end{bmatrix} \\ \mathbf{H}_k &= [1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0]; \quad \mathbf{D}_k = [2.9798; -0.7005; -0.0786]; \end{aligned} \quad \mathbf{d}_k = \begin{cases} k \leq 100, & \mathbf{d}_k = 0; \\ 100 \leq k \leq 300, & \mathbf{d}_k = -0.2; \\ 300 \leq k \leq 500, & \mathbf{d}_k = 0.001 \cdot (k - 300); \\ k \geq 500, & \mathbf{d}_k = 0. \end{cases}$$

Процес відтворення запропонованої моделі зображено на рис. 1а. Результати оцінювання складової вектору стану розробленим фільтром представлені на рис. 1б. Як вже було зауважено, при коректній роботі фільтра Калмана різницевий процес, який називається оновлювальним, являє собою не

корельований гаусівський випадковий процес з нульовим середнім значенням і відповідною коваріаційною матрицею. Сигнальна нев'язка утворена різницею між виходом фільтра та динамікою збуреної моделі на рис. 1в.

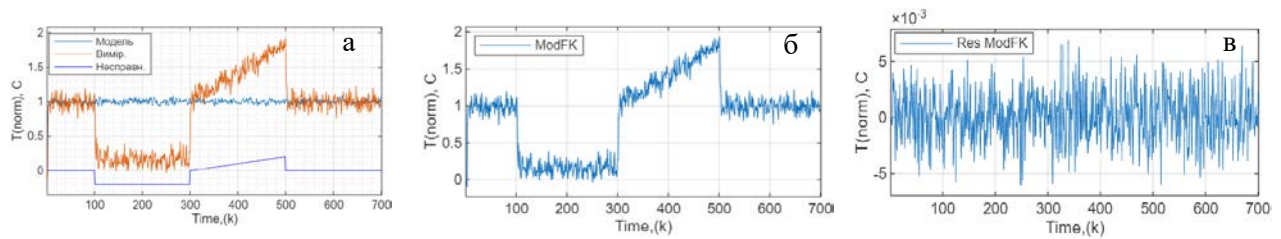


Рис.1. Модель системи зі збуреннями та несправностями (а), вихід модифікованого фільтра (б) та його різницевий сигнал (в)

Зіставлення графіків на рис. 1 підтверджує коректну роботу модифікованого фільтра Калмана, оцінки якого адекватно реагують на вплив відтворених несправностей. Отже, задача декомпозиції процесу оцінювання від впливів з невизначеною структурою вирішена задовільно.

Висновки

Проблема оцінка інформаційних параметрів кіберфізичних інтелектуальних систем, вільних від впливу структурно невизначених збурень в розподіленій сенсорній мережі є актуальною для багатьох прикладних досліджень. У представленій роботі ця задача вирішена шляхом введення відповідного взаємо-однозначного перетворення рівняння виходу розглянутої системи, що дозволяє здійснити процес поглинання збурень ще на етапі екстраполяції з подальшим застосуванням модифікованого фільтра Калмана. На відміну від інших відомих методів проектування, запропонований метод характеризується відносно простим алгоритмом та реалізацією, а перевірка умов існування рішення не потребує занадто складних процедур, що робить його практично зручним для застосування.

Оскільки розглянуті питання ще не отримали достатнього висвітлення у науковій та періодичній літературі, є підстави стверджувати, що представлені результати містять елемент наукової новизни та розширюють тематику досліджень, пов'язаних з оцінюванням параметрів кіберфізичних інтелектуальних систем, індиферентних до збурень довільної структури.

Із застосуванням принципів теорії прийняття рішень запропонований модифікований фільтр може бути використаний як діагностичний засіб, здатний не лише оцінювати параметри об'єкта спостереження, але й виконувати функцію виявлення несправностей у сенсорній підсистемі, що підвищує надійність та інформативність процесу оцінювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Saif M., Guan Y. Robust fault detection in systems with uncertainties," Proceedings. 5th IEEE International Symposium on Intelligent Control. 1990. Vol.1. Pp. 570–576. DOI: 10.1109/ISIC.1990.128514.
2. Zhao Z., Liu P. X., Gao J. A New Fault Detection Method for Systems With Uncertainty Under Denial-of-Service Attack. IET Control Theory & Applications 2025. No. 1: e70093. Pp 1-13. <https://doi.org/10.1049/cth2.70093>.
3. Volovyk A., Pyrih Y., Urikova O., Masiuk A., Shubyn B., Maksymyuk T. Dynamic System State Estimation with a Resilience to Observation Data Anomalies. Contemp. Math. 2024. Vol 5 Iss. 1 Pp 1-18. DOI: <https://doi.org/10.37256/cm.512024>.
4. Воловик А. Оптимальні оцінки вектора стану для дискретних стохастичних систем з невизначеними збуреннями та шумом. Інфокомунікаційні тех-нології та електронна інженерія. Львів, 2023. Вип. 3, № 2, С. 116–125. DOI: <https://doi.org/10.23939/ict2023.09.067>.
5. Wang L, Guan R. State Feedback Controller and Observer Design. State Feedback Control and Kalman Filtering with MATLAB/Simulink Tutorials. 2023. Pp.1-66. DOI: 10.1002/9781119694625.ch1.

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.

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

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.

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