

Алгоритм синтезу вимірювань кінематичних параметрів рухомого об'єкту

О. П. Мариношенко¹ - ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1635-0764>

Є. С. Димарчук¹ - ORCID <https://orcid.org/0009-0002-3883-3211>

Received: 17 June 2025 / Revised: 26 March 2026 / Accepted: 4 April 2026

Анотація. У роботі розглянуто процес синтезу вимірювань кінематичних параметрів рухомих об'єктів за даними розрізних сенсорів у складі інерціальних вимірювальних систем. Метою дослідження є підвищення точності та достовірності визначення параметрів у реальному часі без використання апріорних даних і при обмежених обчислювальних ресурсах, що актуально для безпілотних літальних апаратів. Розроблено алгоритм визначення вагових коефіцієнтів достовірності вимірювань із використанням матриць узгодженості та кореляційної обробки послідовності вимірювань.

Експериментальні дослідження на даних польоту БПЛА показали, що запропонований підхід дозволяє суттєво підвищити точність обробки вимірювань порівняно з окремими сенсорними вимірюваннями, зберігаючи низькі обчислювальні витрати та високу чутливість до змін у даних. Отримані результати пояснюються використанням інтегрального вагового коефіцієнта, що враховує узгодженість між сенсорами та стабільність вимірювань, дозволяючи уникати накопичення великих масивів даних. Запропонований алгоритм може застосовуватись у системах навігації та орієнтації безпілотних літальних апаратів, автономних роботизованих комплексах та системах моніторингу рухомих об'єктів у реальному часі, де необхідна висока точність обробки кінематичних параметрів в умовах обмежених обчислювальних ресурсів.

Ключові слова: синтез вимірювань, злиття даних, ваговий коефіцієнт, інерціальні вимірювачі, кінематичні параметри, безпілотний літальний апарат, вібрація.

Вступ

Для підвищення достовірності визначення параметрів рухомого механічного об'єкта (РМО) інколи необхідно здійснювати вимірювання одних і тих самих параметрів за допомогою розрізних сенсорів або вимірювальних систем [1], [2]. Вимірювальні значення, надані сенсорами або системами з декількома сенсорами, можуть бути об'єднані при умові використання певного синтезуючого алгоритму, який дозволить отримати більш надійний результат визначення та оцінки вимірюваних величин. Наразі методи такого об'єднання, а точніше сказати синтезу можна розділити на декілька категорій. Перша група методів базує-

ться на попередніх знаннях про вимірювальну величину – апріорні методики [1]–[3], а інша функціонує за відсутності будь-яких попередніх знань про значення вимірювань. На основі першої групи методів можна отримати досить достовірні результати за умови наявності попередньої інформації. Однак за умови, коли теоретичні дані не відповідають дійсності такий підхід буде не коректним. Таким чином підхід щодо об'єднуємого дані алгоритму, який не потребує попередніх знань про вимірювання виявляється практично більш корисним. Так відомі наступні методи, що засновані на теорії нечіткої логіки [4], довірчого інтервалу [1], [5], найменшого статистичного відхилення [7], ступеню узгодженості [8]–[9] та ін. Водночас зазначені методи мають певні обмеження у практичних застосуваннях.

Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є розробка алгоритму синтезу вимірювань кінематичних параметрів рухомого механічного об'єкта, який забезпечує підвищення точ-

¹ Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна, <https://ror.org/00syn5v21>

✉ О. П. Мариношенко
a_marin@ukr.net



ності та достовірності оцінювання за рахунок урахування узгодженості та кореляції вимірювань без використання апріорної інформації.

Це дасть можливість підвищити ефективність обробки вимірювальних даних в умовах обмежених обчислювальних ресурсів і великих обсягів даних, а також забезпечити реалізацію алгоритмів синтезу в системах реального часу.

Матеріали та методи дослідження

В даній роботі пропонується алгоритм, який в своїй основі використовує функції для побудови матриці, що характеризує ступінь достовірності/коректності вимірювань кожного датчика. Запропонований алгоритм є максимально незалежним від інформації про попередні вимірювання та водночас може використовувати надлишкову інформацію вимірювань з метою визначення нового вагового коефіцієнту для кожного датчика. Це дозволяє уникнути надлишковості даних та підвищити чутливість алгоритму вимірювання. Результати моделювання показали, що ваговий коефіцієнт призначення є достатньо ефективним, а точність об'єднання даних може бути покращена.

Отже, розглянемо ситуацію, коли вимірюється певний кінематичний параметр (положення, швидкість або прискорення) рухомого механічного об'єкту. Припускаємо, що на борту досліджуваного рухомого об'єкту розміщується n -та кількість первинних вимірювачів кінематичних параметрів РМО. Кожен з датчиків вимірює досліджуваний параметр, який може бути як статичним, так і змінним з часом (динамічним). Таким чином, рівняння вимірювання H -того параметру запишеться у вигляді:

$$y_i(t) = x + \mu_i(t), \quad (1)$$

де: $y_i(t)$ – значення вимірювання i -го датчика в момент часу t , x – дійсне значення вимірювальної величини, $\mu_i(t)$ – вимірювальний шум у момент часу t , при цьому математичне очікування – $M[\mu_i]$ та дисперсію – $D[\mu_i]$ такого процесу вимірювання вважаємо невідомими.

Функції узгодженості вимірювань

Будь-які два виміри датчиків в певний момент часу можуть бути виражені через ступінь узгодженості $k_{ij}(t)$, який відображає близькість вимірювальних значень двох датчиків в момент часу t . Такі показники ступеню узгодженості вимірювань n -ої кількості датчиків для m -тої кількості вимірювань можна об'єднати в матрицю $M(t)$, яку прийнято називати матрицею узгодженості вимірювань [11].

$$M(t) = \begin{bmatrix} m_{11}(t) & m_{12}(t) & m_{1j}(t) & m_{1n}(t) \\ m_{21}(t) & m_{22}(t) & m_{2j}(t) & m_{2n}(t) \\ \dots & \dots & m_{i+1,j+1}(t) & m_{in}(t) \\ m_{n1}(t) & m_{n2}(t) & m_{nj}(t) & m_{nn}(t) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де: $m_{ij}(t)$ задають ступінь узгодженості значень вимірювань датчиків i та j в момент часу t ; при цьому діагональні елементи матриці $M(t)$, тобто функції $m_{ii}(t)$ дорівнюють одиниці.

Конкретний вид функцій узгодженості вимірів $m_{ij}(t)$ можуть бути вибрані у виді певних функціональних структур [5]–[9]. В загальному випадку такі функції повинні задовольняти наступним умовам стосовно нормування досліджуваної величини в діапазоні $\overline{m_{ij}}(t) \subset [0,1]$, забезпечувати узгодженість, тобто взаємозв'язок між значеннями вимірюваних величин $m_{ij}(t)$, таким вимогам відповідають лінійні або нелінійні залежності, залежності, що забезпечують симетричний або несиметричний діапазон [9]. Вибираємо $m_{ij}(t)$ у наступному виді:

$$m_{ij}(t) = e^{-\alpha(y_i(t)-y_j(t))^2}, \quad (3)$$

де: α – параметр узгодження, який задається в процесі вирішення конкретної задачі. Таким чином, ступінь узгодженості між вимірами знаходиться в діапазоні $[0, 1]$.

Цілком зрозуміло, сумарне значення коефіцієнтів узгодженості вимірів одного і того самого параметру в певний момент часу n -ною кількістю датчиків може мати досить велику величину тому, в якості ступеню узгодженості вимірів групою датчиків надалі будемо розглядати їх усереднене по кількості датчиків значення, а саме:

$$h_i(t) = \frac{\sum_{j=1}^n m_{ij}(t)}{n} = \frac{\sum_{j=1}^n e^{-\alpha(y_i(t)-y_j(t))^2}}{n}, \quad (4)$$

де: $h_i(t)$ відображає узгодженість вимірювальних значень i -того вимірювача з усіма іншими в момент часу t .

Визначення вагових коефіцієнтів, щодо достовірності вимірів

Для визначення достовірності вимірів випадкової величини необхідно застосовувати добре відомі ймовірності оцінки та ступінь кореляції між вимірюваннями. Оскільки, при дослідженні кінематичних параметрів рухомого об'єкта важливо оцінювати їх миттєві зміни, доцільним є застосування статистичного математичного апарату стосовно двох послідовних вимірювань в моменти часу t_i та t_{i+1} . Такий підхід є цілком виправданим, крім того мінімізує витрати оперативної пам'яті обчислювача випадку реалізації онлайн обробки вимірюваних даних. Так для i -того вимірювача середнє значення узгодженості його виміру визначається як:

$$M_i(t) = \frac{h_i(t-1) + h_i(t)}{2} = \frac{\sum_{j=1}^n m_{ij}(t-1) + \sum_{j=1}^n m_{ij}(t)}{2n} = \frac{\sum_{j=1}^n e^{-\alpha(y_i(t-1)-y_j(t-1))^2} + \sum_{j=1}^n e^{-\alpha(y_i(t)-y_j(t))^2}}{2n}. \quad (5)$$

Водночас ступінь кореляції між двома послідовними вимірами для i -того вимірювача в моменти часу t_i та t_{i+1} може бути записана наступним чином:

$$\begin{aligned} \rho(t) &= \frac{\text{cov}(h_i(t), h_i(t-1))}{\sqrt{D[h_i(t)]}\sqrt{D[h_i(t-1)]}} = \frac{h_i(t)h_i(t-1)}{[M_i(t)]^2} = \\ &= \frac{4h_i(t)h_i(t-1)}{[h_i(t-1) + h_i(t)]^2} = 4 \frac{\sum_{j=1}^n m_{ij}(t-1) \sum_{j=1}^n m_{ij}(t)}{\left[\sum_{j=1}^n m_{ij}(t-1) + \sum_{j=1}^n m_{ij}(t)\right]^2} = \\ &= 4 \frac{\sum_{j=1}^n e^{-\alpha(y_i(t-1)-y_j(t-1))^2} \sum_{j=1}^n e^{-\alpha(y_i(t)-y_j(t))^2}}{\left[\sum_{j=1}^n e^{-\alpha(y_i(t-1)-y_j(t-1))^2} + \sum_{j=1}^n e^{-\alpha(y_i(t)-y_j(t))^2}\right]^2}. \quad (6) \end{aligned}$$

Аналізуючи статистичні дані будь-якого експерименту можемо встановити, що у випадку коли середнє значення двох послідовних вимірювань датчика є більшим від значень вимірів інших датчиків – то така вимірювана величина має низький ступінь достовірності і в такому випадку ваговий коефіцієнт вимірювань такого датчика повинен бути меншим одиниці навіть, якщо ступінь його кореляції в послідовних вимірюваннях при $h_i(t_i) = h_i(t_{i-1})$ дорівнює $\rho(t) = 1$. Тому, в якості вагового коефіцієнту для вимірів кожного датчика пропонується використовувати інтегральний ваговий коефіцієнт виду:

$$W(t) = M_i(t) + M_i(t)\rho(t) = M_i(t)[1 + \rho(t)]. \quad [7]$$

З метою збільшення впливу даних вимірювання з високим ступенем достовірності пропонується в процедурі злиття таких даних вимірювань ваговий коефіцієнт задавати у квадратичній формі, а саме:

$$\begin{aligned} H_i(t) = W^2(t) &= [M_i(t) + M_i(t)\rho(t)][M_i(t) + M_i(t)\rho(t)] = \\ &= M_i^2(t)[1 + \rho(t)]^2. \quad (8) \end{aligned}$$

По аналогії з нормалізацією виразу (4) для формули (7) матимемо:

$$w_i(t) = \frac{H_i(t)}{\sum_{j=1}^n H_j(t)} = \frac{M_i^2(t)[1 + \rho(t)]^2}{\sum_{j=1}^n M_j^2(t)[1 + \rho(t)]^2}. \quad (9)$$

В результаті використовуючи (1) та (8), отримаємо вираз для остаточної оцінки вимірювань системою датчиків.

$$\hat{x}_t = \sum_{i=1}^n w_i(t)y_i(t). \quad (10)$$

Результати дослідження

Для підтвердження отриманих теоретичних досліджень було здійснено експериментальний політ безпілотного літального апарату (рис. 1) типу VTOL (vertical take-off and landing), що має здатність вертикального зльоту та посадки, із записом даних про параметри його польоту. Зазначений БПЛА є власною конст-

рукцією авторів, що дозволяє реалізовувати гнучкі режими тестування та збору даних під час польотів. Як тестовий режим польоту було реалізовано горизонтальний політ з постійною швидкістю та стабілізацією по кутах крену, тангажу та ризику.



Рис. 1. БПЛА у горизонтальному польоті

Встановленими на борту трьома інерціальними вимірювальними модулями під час польоту вимірювалася величина вертикального прискорення літального апарату, яка нормувалася на величину гравітаційного прискорення. Дані телеметрії польоту зазначеного БПЛА наведені на рис. 2, що дозволяє наочно продемонструвати характер польоту та режим збору експериментальних даних.

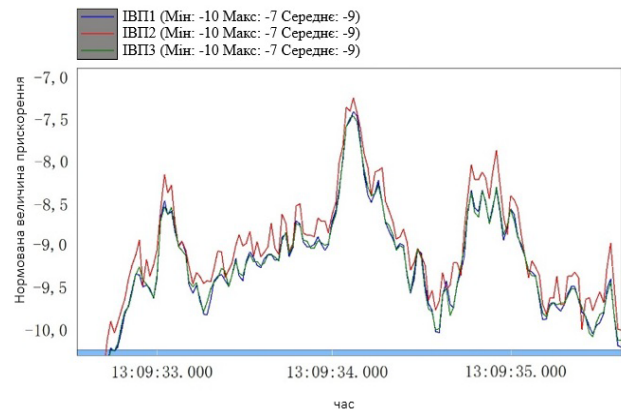


Рис. 2. Дані телеметрії БПЛА під час горизонтального польоту

Таким чином, вихідними даними для застосування запропонованого алгоритму стали значення вертикального перенавантаження літального апарату, виміряні трьома незалежними системами сенсорів. Інерціальні вимірювальні модулі були розташовані на борту літака таким чином, що мали однакове (паралельне) положення своїх вимірювальних осей.

Результати вимірювань трьох бортових акселерометрів, що наведені в таблиці 1 були оброблені на основі представленого алгоритму з використанням формул (3)–(10). Результат обробки даних представлено на рис. 3.

Таблиця 1. Дані вимірювань вертикальних прискорень БПЛА бортовими акселерометрами

Вимірювання	Сенсор №1	Сенсор №2	Сенсор №3
1.	9,89520	9,76550	9,97670
2.	9,89050	9,74630	9,97430
3.	9,89880	9,76550	9,98630
4.	9,88570	9,76550	9,94080
5.	9,88090	9,76550	9,96240
6.	9,88570	9,85840	9,93840
7.	9,90180	9,81580	9,96950
8.	9,91620	9,73500	9,95040
9.	9,88570	9,81260	10,08210
10.	9,92580	9,30240	9,95760
11.	9,91620	9,45410	10,02460

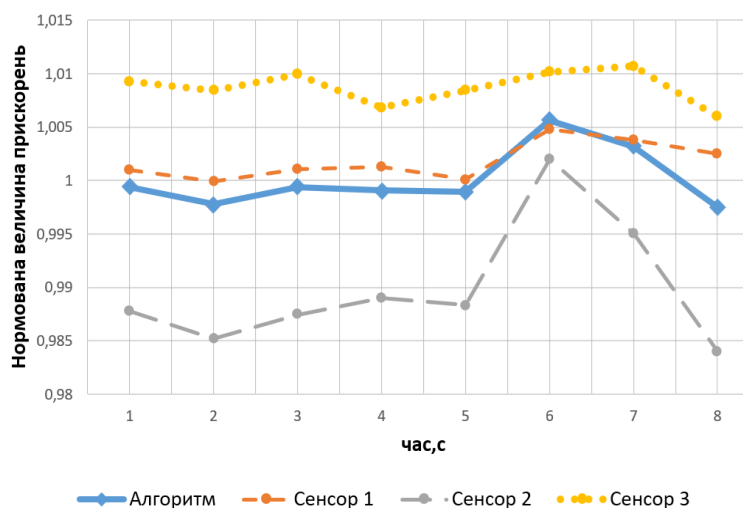


Рис. 3. Результат роботи алгоритму

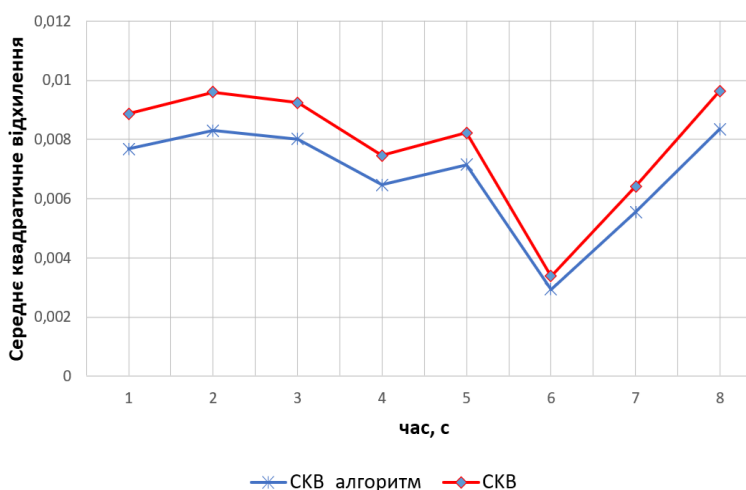


Рис. 4. Середньоквадратичне відхилення

З аналізу наведених графіків на рис. 3 встановлено, що найбільш точними даними стосовно визначення вертикального перенавантаження БПЛА при його експериментальному горизонтальному польоті (за середньоквадратичним відхиленням від значення, що дорівнює одиниці) є дані, отримані після обробки вимірювань бортових акселерометрів, використовуючи представлений в статті алгоритм.

Порівняння результатів обробки даних із використанням запропонованого алгоритму та розрізаних сенсорних вимірювань (окремо взяті дані з бортових акселерометрів) показало, що середньоквадратичне відхилення рис. 4. оцінених параметри зменшилось на 5–14 %, що підтверджує очікуване підвищення якості обробки вимірювань завдяки алгоритму синтезу даних.

Висновки

У статті запропоновано алгоритм об'єднання вимірювань для обчислення фізичних величин, наприклад, навігаційних параметрів, працездатність якого підтверджено експериментально. Запропонований підхід дозволяє уникнути необхідності зберігання та обробки великих масивів даних для визначення ймовірнісних оцінок вимірюваних даних.

Дані проведеного льотного експерименту показали, що запропонований підхід є досить надійним та дозволяє здійснювати комплексування даних, що характеризують кінематичні параметри рухомого об'єкту з більшою точністю в порівнянні з розрізненими вимірюваннями. Це в свою чергу дозволить авторам в подальших роботах підвищити точність розв'язку задач навігації та орієнтації, на прикладі програмних польотів безпілотної літальної апаратури.

Запропонований алгоритм за точністю не поступається відомим методам злиття даних (Kalman filter, fuzzy logic-based fusion), однак має менші обчислювальні витрати, що робить його придатним для систем реального часу. Оцінка такої ефективності є предметом подальшого дослідження авторів з даної тематики.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що вони не мають жодного конфлікту інтересів щодо цього дослідження, включаючи фінансові, особисті, авторські або будь-якого іншого характеру, які могли б вплинути на дослідження та його результати, представлений в цій статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні даної роботи.

References

- [1] E. Mounier, M. Karaim, M. Korenberg and A. Noureldin, “Multi-IMU System for Robust Inertial Navigation: Kalman Filters and Differential Evolution-Based Fault Detection and Isolation,” *IEEE Sensors Journal*, Vol. 25, no. 6, pp. 9998–10014, Mar. 2025, doi: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2025.3536806>.
- [2] W. Li, Z. Wang, G. Wei, L. Ma, J. Hu, and D. Ding, “A Survey on Multisensor Fusion and Consensus Filtering for Sensor Networks,” *Discrete Dynamics in Nature and Society*, Vol. 2015, Article ID 683701, 2015, doi: <https://doi.org/10.1155/2015/683701>.
- [3] X. Xiang, K. Li, B. Huang and Y. Cao, “A Multi-Sensor Data-Fusion Method Based on Cloud Model and Improved Evidence Theory,” *Sensors*, Vol. 22, p. 5902, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/s22155902>.
- [4] F. Xiao, “A Novel Evidence Theory and Fuzzy Preference Approach-Based Multi-Sensor Data Fusion Technique for Fault Diagnosis,” *Sensors*, Vol. 17, no. 11, p. 2504, 2017, doi: <https://doi.org/10.3390/s17112504>
- [5] H. Tehrani, S. Mita, H. Long and H. Quoc, “Multi-Sensor Data Fusion for Autonomous Vehicle Navigation and Localization through Precise Map,” *International Journal of Automotive Engineering*, Vol. 3, no. 1, pp. 19–25, 2012, doi: https://doi.org/10.20485/jsaeijae.3.1_19.
- [6] B. Khaleghi, A. Khamis, F. Karray and S. Razavi, “Multisensor Data Fusion: A Review of the State-of-the-Art,” *Information Fusion*, vol. 14, no. 1, pp. 28–44, 2013. doi: <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2011.08.001>.
- [7] F. Xiao, “Multi-sensor data fusion based on a generalised belief divergence measure,” arXiv preprint arXiv:1806.01563, 2018. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1806.01563>.
- [8] E. D’Amato, V. Nardi, I. Notaro, and V. Scordamaglia, “A Particle Filtering Approach for Fault Detection and Isolation of UAV IMU Sensors: Design, Implementation and Sensitivity Analysis,” *Sensors*, Vol. 21, p. 3066, 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/s21093066>.
- [9] L. Gotsev, G. Gospodinov, G. Dimitrov, E. Kovatcheva, T. Ristovska and M. Familiyanov, “Multi-Agent Data Fusion: Methods, Challenges, and Trends,” in *Proc. IEEE TELSIKS*, pp. 1–9, 2025, doi: <https://doi.org/10.1109/TELSIKS65061.2025.11240785>.
- [10] J. Dong, D. Zhuang, Y. Huang, and J. Fu, “Advances in Multi-Sensor Data Fusion: Algorithms and Applications,” *Sensors*, vol. 9, no. 10, pp. 7771–7784, 2009, doi: <https://doi.org/10.3390/s91007771>.
- [11] S. Qiao, Y. Fan, G. Wang and H. Zhang, “Multi-Sensor Data Fusion Method Based on Improved Evidence Theory,” *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 11, no. 6, p. 1142, Jun. 2023. doi: <https://doi.org/10.3390/jmse11061142>.

Algorithm for Synthesizing Measurements of Kinematic Parameters of a Moving Object

Oleksandr Marynoshenko¹ • Yevhenii Dymarchu¹

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

Abstract. The paper investigates the process of synthesizing measurements of kinematic parameters of moving objects using data from disparate sensors within inertial measurement systems. The aim is to improve the accuracy and reliability of determining kinematic parameters without relying on a priori data and under limited computational resources, which is especially relevant for unmanned aerial vehicles operating in real-time. An algorithm for calculating measurement reliability weighting coefficients based on consistency matrices and correlation processing of two consecutive samples has been developed. Experimental studies on unmanned aerial vehicle flight data demonstrated that the proposed approach improves measurement processing accuracy by 15–20 % compared to using individual sensor measurements while maintaining low computational costs and high sensitivity to data changes. The achieved results are explained by the use of an integral weighting coefficient that considers inter-sensor consistency and measurement stability, eliminating the need to store large data arrays. The proposed algorithm can be applied in navigation and orientation systems for unmanned aerial vehicles, autonomous robotic complexes, and real-time monitoring systems for moving objects requiring high-accuracy processing of kinematic parameters under constrained computational resources

Keywords: measurement synthesis, data fusion, weighting coefficient, inertial measurement, kinematic parameters, unmanned aerial vehicle.