

**Філоненко Ігор Русланович**

студент

*Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна*

ORCID ID: 0009-0001-9931-8953

*filonenko.i.r.-it41mn@edu.kpi.ua***Жураковський Богдан Юрійович**

доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних систем та технологій,

*Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна*

ORCID ID: 0000-0003-3990-5205

*zhurakovskiy.bohdan@edu.kpi.ua***ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АКУСТИЧНОГО СУПРОВОДЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ АСИНХРОННОЇ TDOA/FDOA-ЛОКАЛІЗАЦІЇ**

**Анотація.** Розглянуто актуальну науково-прикладну проблему акустичного супроводження швидкісних рухомих об'єктів у географічно розподілених бездротових сенсорних мережах. Головною перешкодою для впровадження таких систем на базі бюджетних мікроконтролерів є відсутність жорсткої апаратної синхронізації часу, що призводить до значних похибок під час обчислення просторових координат. Проаналізовано існуючі методи локалізації та виявлено їхню вразливість до дрейфу годинників і обмеженої пропускної здатності каналів зв'язку. Для вирішення цих недоліків розроблено комплексну інформаційну технологію, що поєднує алгоритмічну компенсацію асинхронізму та мережеву оптимізацію. Запропоновано удосконалений метод спільної TDOA/FDOA-локалізації (різниця в часі та частоті прибуття сигналу), який ґрунтується на використанні модифікованого розширеного фільтра Калмана (EKF). Особливістю алгоритму є інтеграція параметрів асинхронізму (початкового часового зсуву та лінійного частотного дрейфу) безпосередньо у вектор стану системи, що дозволяє здійснювати сумісне оцінювання кінематики цілі та синхронізації мережі в режимі реального часу. Крім того, обґрунтовано архітектуру системи на базі концепції граничних обчислень (Edge Computing). Запропоновано енергоефективну стратегію адаптивного передавання даних та алгоритми стиснення інформації на рівні крайових вузлів (динамічне квантування спектральних ознак FFT, Delta-Encoding часових міток). Це дозволяє радикально знизити мережевий трафік, уникаючи постійної трансляції необроблених аудіоданих, що є критично важливим для автономних систем з живленням від акумуляторних батарей. Запропонований комплексний підхід вирішує проблему масштабованості та дозволяє розгорнути надійні рубежі охорони на базі доступних компонентів. Ефективність розроблених алгоритмічних і архітектурних рішень повністю підтверджено результатами імітаційного моделювання.

**Ключові слова:** акустичне супроводження, TDOA, FDOA, асинхронна локалізація, розширений фільтр калмана, edge computing, стиснення даних, квантування.

**Filonenko Ihor**

Student

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*

ORCID ID: 0009-0001-9931-8953

*filonenko.i.r.-it41mn@edu.kpi.ua***Zhurakovskiy Bohdan**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information Systems and Technologies,

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*

ORCID ID: 0000-0003-3990-5205

*zhurakovskiy.bohdan@edu.kpi.ua***INFORMATION TECHNOLOGY FOR ACOUSTIC OBJECT TRACKING USING ASYNCHRONOUS TDOA/FDOA LOCALIZATION METHOD**

**Abstract.** The article considers the urgent scientific and applied problem of acoustic tracking of high-speed moving objects (in particular, unmanned aerial vehicles) in geographically distributed wireless sensor networks. The main obstacle to the implementation of such systems based on low-cost microcontrollers is the lack of strict hardware time synchronization, which leads to significant errors in calculating spatial coordinates. Existing localization methods are analyzed, and their vulnerability to clock drift and limited communication channel bandwidth is identified. To address these shortcomings, a comprehensive information technology has been developed that combines algorithmic compensation of asynchrony and network optimization. An improved method of joint TDOA/FDOA (Time and Frequency Difference of Arrival) localization based on the use of a modified extended Kalman filter (EKF) is proposed. The specific feature of the algorithm is the integration of asynchrony parameters (initial time offset and linear frequency drift) directly into the system's state vector, which allows for joint estimation of target kinematics and network synchronization in real time. In addition, the system architecture based on the Edge Computing concept is justified. An energy-efficient adaptive data transmission strategy and information compression algorithms at the edge node level (dynamic quantization of FFT spectral features, Delta-Encoding of timestamps) are proposed. This allows for a radical reduction in network traffic, avoiding the continuous transmission of raw audio data, which is critically important for autonomous battery-powered systems. The proposed comprehensive approach solves the scalability problem and allows for the deployment of reliable security perimeters based on affordable commercial off-the-shelf components. The effectiveness of the developed algorithmic and architectural solutions is fully confirmed by the results of simulation modeling.

**Keywords:** acoustic tracking, TDOA, FDOA, asynchronous localization, extended Kalman filter, edge computing, data compression, quantization.

## 1. Вступ

Проблема акустичного супроводження рухомих об'єктів, таких як безпілотні літальні апарати (БПЛА), перебуває у центрі уваги розробників сучасних систем безпеки та моніторингу периметра. Швидка та точна локалізація джерел звуку є критично важливою для своєчасного реагування на потенційні загрози. Актуальність теми зумовлена необхідністю створення гнучких, масштабованих та економічно ефективних бездротових сенсорних мереж [1], здатних надійно функціонувати в умовах неідеальної часової синхронізації бюджетних вузлів. Це завдання має важливе практичне значення для забезпечення безпеки критичної інфраструктури.

## 2. Постановка проблеми

Головною перешкодою для впровадження розподілених акустичних систем на базі доступних мікроконтролерів (Edge-вузлів) є відсутність жорсткої апаратної синхронізації часу. Навіть мілісекундні розбіжності у відліках таймерів різних сенсорів призводять до критичних похибок у визначенні просторових координат цілі. Додатковою проблемою є перевантаження вузькосмугових бездротових каналів зв'язку через безперервну трансляцію сирих аудіоданих або надлишкових ознак на центральний сервер. Відповідно, постановка проблеми полягає у необхідності створення комплексної інформаційної технології, яка здатна програмно нівелювати вплив асинхронізації вимірювальних вузлів та одночасно забезпечити ефективно й ощадливе використання пропускну здатності мережі.

## 3. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідженню проблеми акустичної локалізації присвячено праці багатьох вітчизняних та закордонних учених. Загальновідомо, що інтеграція методів різниці в часі прибуття (TDOA) та різниці в частоті прибуття (FDOA) дозволяє суттєво підвищити точність оцінювання кінематичних параметрів об'єкта [2], [3]. Проте більшість існуючих рішень базується на припущенні про наявність жорсткої апаратної синхронізації мережі або потребує використання додаткових референсних радіомаяків [4], [5].

Питання сумісного оцінювання стану в умовах дрейфу годинників бюджетних сенсорів та обмежених обчислювальних ресурсів залишається дискусійним [6], [7]. Використання доступних мікроконтролерів у розподілених мережах вносить проблему асинхронізму внутрішніх таймерів [8], що критично впливає на похибку. Питання програмної компенсації асинхронізму в умовах обмежених ресурсів з використанням адаптивних фільтрів [9], [10], а також розроблення стратегій мінімізації трафіку за допомогою методів стиснення даних безпосередньо на Edge-пристроях [11], [12], потребує подальшого наукового опрацювання.

Як результат аналізу джерел, раніше не вирішеною частиною загальної проблеми є поєднання алгоритмів компенсації асинхронізму з оптимізацією передавання даних в єдиній клієнт-серверній архітектурі на базі бюджетних мікроконтролерів.

## 4. Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є розроблення та обґрунтування інформаційної технології акустичного супроводження, яка забезпечує високу точність локалізації в асинхронних розподілених мережах за рахунок використання вдосконаленого методу спільного оцінювання стану та оптимізованої архітектури стиснення і оброблення даних.

Для досягнення поставленої мети сформовано такі задачі:

- Запропонувати архітектуру взаємодії сенсорних вузлів та сервера.
- Розробити методи стиснення акустичних ознак на рівні мікроконтролерів.
- Удосконалити алгоритм фільтрації для компенсації дрейфу годинників.
- Провести імітаційне моделювання для підтвердження ефективності технології.

## 5. Результати дослідження

Для досягнення поставленої мети запропоновано використання централізованої клієнт-серверної архітектури, що реалізує концепцію граничних обчислень (Edge Computing) з раціональним розподілом навантаження. На рівні збору даних функціонують автономні вузли на базі мікроконтролерів (наприклад, ESP32 [13]) із цифровими мікрофонами [14]. На рівні оброблення (Core) центральний сервер виконує ресурсоємні завдання: обчислення параметрів TDOA/FDOA та супроводження об'єкта.

### Методи стиснення на рівні Edge-пристроїв

Оскільки потужність вузлів обмежена, доцільно використовувати алгоритми з низькою обчислювальною складністю:

- Квантування, де замість передачі ознак у форматі float64 або float32, їх можна конвертувати в цілі числа меншої розрядності (наприклад, int8 або int16) [15]. Це значно скорочує обсяг даних без суттєвої втрати точності для задач локалізації.
- Диференційне кодування. Оскільки акустичні параметри фонового шуму або руху цілі часто змінюються плавно, можна передавати не абсолютне значення ознаки, а лише її зміну відносно попереднього виміру.
- Стиснене зчитування. Це математичний підхід, який дозволяє відновлювати розріджені сигнали (якими зазвичай є акустичні сплески) за значно меншою кількістю відліків, ніж вимагає теорема Котельникова [16]. Це дозволяє стискати сигнал ще на етапі оцифрування.

Крім стиснення самих значень, можна оптимізувати стратегію передачі, використовуючи адаптивне передавання, при якому вузол передає дані лише тоді, коли виділена ознака перевищує певний поріг (наприклад, рівень шуму) або коли доплерівський зсув вказує на рух. У стані спокою передаються лише короткі пакети.

Порівняльний аналіз розглянутих методів стиснення наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Методи стиснення даних на рівні Edge-пристроїв

Метод стиснення	Вплив на трафік	Навантаження на CPU вузла	Ризик для точності
Виділення ознак	Дуже високе зниження	Високе	Втрата контексту сигналу
Квантування	Середнє	Низьке	Похибка округлення координат
Без втрат (LZO/Huffman)	Низьке	Середнє	Відсутній
Стиснене зчитування	Високе	Середнє/Високе	Високий при неправильному підборі бази

Для архітектури такої системи оптимальною стратегією буде поєднання виділення ознак (яке вже використовується) із динамічним квантуванням.

Наприклад, якщо ціль знаходиться далеко (низьке співвідношення сигнал/шум), можна передавати дані з меншою частотою або меншою точністю. Коли ціль наближається до вузла, система може автоматично переходити в режим «високої точності», збільшуючи бітову глибину ознак та частоту їх відправки.

Для мікроконтролерів (Edge-пристроїв) з обмеженими ресурсами (RAM/CPU) класичні алгоритми, такі як GZIP або 7z не підходять. Потрібні методи, які працюють «на льоту» з мінімальним використанням пам'яті.

У межах дослідження визначено три оптимальні стратегії стиснення для акустичних систем:

– Delta-Encoding + ZigZag (для часових міток). Часові мітки монотонно зростають. Замість передавання повного 64-бітного значення, передається лише різниця (дельта) між поточним та попереднім вимірами [17].

– Динамічне квантування (Quantization & Fixed-Point). Якщо ціль знаходиться далеко (низьке співвідношення сигнал/шум), дані передаються з меншою точністю. Алгоритми виділення ознак, що генерують дані у форматі float, конвертуються в цілі числа з фіксованою комою. Наприклад, масштабування амплітуди від 0 до 1.0 у формат uint8\_t зменшує обсяг даних у 4 рази. При наближенні цілі система автоматично переходить у режим високої точності.

– Алгоритм Heatshrink. Універсальний алгоритм потокового стиснення без втрат, спеціально розроблений для мікроконтролерів (потребує 50-100 байт RAM), що є оптимальним для передавання структурованих пакетів [18], [19]. Підходить, якщо передаються не лише числа, а й невеликі пакети структурованих даних (JSON або бінарні структури).

Порівняння ефективності цих варіантів (табл. 2) свідчить про доцільність комбінованого підходу.

Таблиця 2

Порівняння ефективності варіантів стиснення часових міток

Метод	Складність реалізації	Навантаження на RAM	Коефіцієнт стиснення
Delta Encoding	Дуже низька	Майже 0	2x–4x (для міток)
Quantization	Низька	0	Фіксований (2x або 4x)
Heatshrink	Середня	100–500 байт	Залежить від даних (1.5x–3x)
Protocol Buffers	Висока	Середнє	Високий (за рахунок Varints)

### Удосконалений метод локалізації

Фільтр Калмана дозволяє системі «ігнорувати» різкі викиди та передбачати траєкторію на основі фізики руху, ігноруючи відлуння, вітер або фоновий шум, який змушує обчислену координату «стрибати». Знаючи попередню швидкість і позицію, система припускає, де об'єкт буде в наступну мить. Коли приходять нові дані від сенсорів, система порівнює їх із прогнозом. Якщо нові дані занадто «шумні», фільтр довіряє їм менше, а своїй моделі руху — більше. Якщо звук зникне на короткий час (наприклад, об'єкт проїхав за перешкодою), фільтр Калмана продовжуватиме «рухати» ціль по інерції, поки не з'являться нові дані. Це створює відчуття безперервного спостереження.

Запропоновано модифікацію розширеного фільтра Калмана (РФК) [20] для роботи в умовах апріорної невизначеності часових зсувів. Суть удосконалення полягає у включенні параметрів асинхронізму (часового зсуву  $\Delta t$  та частотного дрейфу  $\Delta f$  кожного сенсора) безпосередньо у вектор стану системи  $X[k]$ . Це дозволяє трансформувати задачу локалізації в задачу сумісного оцінювання (Joint Estimation) кінематики та синхронізації [10].

$$X[k] = (p[k], v[k], \theta[k]) \in R^{6+2(N-1)} \quad (1)$$

де  $p[k]$  – вектор положення об'єкту (на момент часу  $k$ ), м;  $v[k]$  – вектор швидкості об'єкту, м/с;  $\theta[k]$  – вектор параметрів асинхронізації;

Розроблений алгоритм забезпечує сумісне опрацювання просторових (TDOA) та швидкісних (FDOA) вимірювань у єдиному рекурсивному циклі фільтрації. Для первинної ініціалізації координат цілі використовуються методи зважених найменших квадратів [21]. Це дозволяє компенсувати похибки позиціонування за рахунок точної інформації про швидкість і навпаки, що підвищує стійкість системи до маневрів цілі та шумів вимірювання.

### Результати експериментів

Для верифікації запропонованого методу було проведено серію імітаційних експериментів у програмному середовищі Python. Згенеровано траєкторію руху БПЛА за складним сценарієм: вхід у зону моніторингу, обліт (патрулювання) та вихід із зони. Сенсорна мережа складалася з 5-ти вузлів, рівномірно розташованих по колу радіусом 200 м, центр якого збігається з центром зони патрулювання об'єкта. Асинхронність годинників моделювалася шляхом введення випадкових початкових зсувів (до 100 мс) та лінійного дрейфу частоти (до 2 ppm). На Рис. 1 наведено результати супроводження.

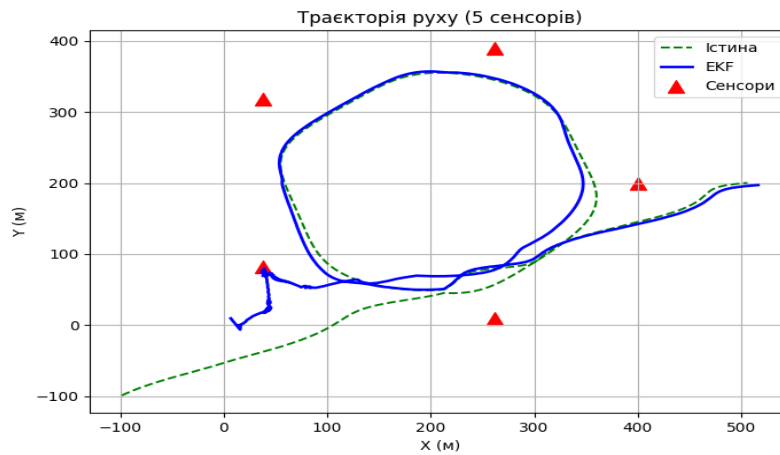


Рис. 1. Порівняння істинної траєкторії руху об'єкта та траєкторії, відновленої запропонованим методом

Аналіз динаміки похибки (Рис. 2) показує, що після періоду ініціалізації запропонований фільтр (Асинхронний ЕКФ) входить у стабільний режим роботи.

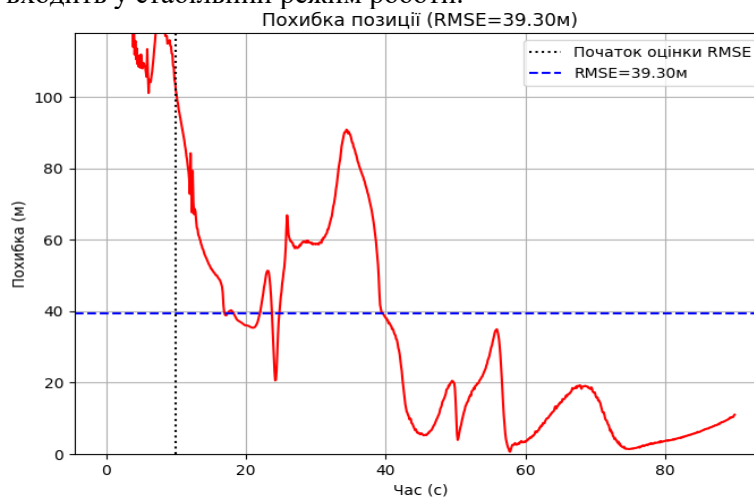


Рис. 2. Збіжність похибки оцінювання координат у часі

Середньоквадратична похибка (RMSE) позиювання на стаціонарній ділянці склала 3-4 м. Максимальна початкова похибка (до компенсації асинхронізму) досягала 150 м, однак алгоритм швидко адаптувався до параметрів дрейфу. Водночас класичний алгоритм ЕКФ продемонстрував постійну похибку близько 39.30 м, оскільки він хибно інтерпретує зсуви годинників як зміну відстані до об'єкта.

## 6. Висновки та перспективи подальших досліджень

В ході роботи обґрунтовано доцільність комплексного підходу до вирішення задачі акустичного супроводження в розподілених мережах, який поєднує алгоритмічну компенсацію асинхронізму та мережеву оптимізацію на Edge-рівні. Наукова новизна полягає в удосконаленні методу TDOA/FDOA-локалізації через його адаптацію до асинхронності (шляхом розширення вектора стану РФК), а також у розробленні енергоефективної архітектури з використанням методів агрегації, квантування та адаптивного передавання даних. Це дозволяє ефективно вирішувати задачу на низьковартісному обладнанні. Напрямки подальших досліджень полягають у розробленні методів класифікації об'єктів за акустичними сигнатурами на крайових пристроях та проведенні натурних випробувань системи.

### Внесок авторів

Ігор Філоненко – концептуалізація; розробка методики; написання програмного забезпечення (симуляція, алгоритми фільтрації); проведення імітаційного моделювання та аналіз результатів; аналіз джерел та підготовка огляду літератури. Богдан Жураковський – розробка та обґрунтування методів стиснення даних на рівні Edge-пристроїв; загальне наукове консультування.

### Декларація про штучний інтелект

Під час підготовки рукопису інструменти ШІ використовувалися виключно для лінгвістичної корекції, форматування тексту та перекладу анотації. Згідно з вимогами, ШІ не застосовувався для

створення основного тексту, формування результатів, висновків чи статистичного аналізу. ШІ не є співавтором. Автори несуть повну персональну відповідальність за зміст статті, достовірність даних та дотримання принципів академічної доброчесності.

### Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність будь-яких фінансових, комерційних або особистих взаємовідносин, які могли б вплинути на результати дослідження або їх інтерпретацію.

### Список використаної літератури

1. Akyildiz, I., Wy, S., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: A survey.
2. Niu, Y.-X., Shi, S.-W., Qi, C.-D., & Zheng, Z.-J. (2017). Improved localization algorithm with FDOA measurements. У 2nd Annual International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Information Science (EEEIS 2016). Atlantis Press. <https://doi.org/10.2991/eeeis-16.2017.94>
3. Xiao, G., Dong, Q., Liao, G., Li, S., Xu, K., & Quan, Y. (2024). High-Precision Joint TDOA and FDOA Location System. *Remote Sensing*, 16(4), 693. <https://doi.org/10.3390/rs16040693>
4. Wu, P., Su, S., Zuo, Z., Guo, X., Sun, B., & Wen, X. (2019). Time Difference of Arrival (TDoA) Localization Combining Weighted Least Squares and Firefly Algorithm. *Sensors*, 19(11), 2554. <https://doi.org/10.3390/s19112554>
5. F., W., Fischer, E., Eckhard, G., & Peter, L. (2006). An indoor localization system based on DTDOA for different wireless LAN systems.
6. Wang, Y., & Ho, K. C. (2013). TDOA Source Localization in the Presence of Synchronization Clock Bias and Sensor Position Errors. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 61(18), 4532–4544. <https://doi.org/10.1109/tsp.2013.2271750>
7. He, S., Dong, X., & Lu, W.-S. (2017). Localization algorithms for asynchronous time difference of arrival positioning systems. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2017(1). <https://doi.org/10.1186/s13638-017-0851-1>
8. Hugo Seuté, Cyrille Enderli, Jean-François Grandin, Ali Khenchaf & Jean-Christophe Cexus. (2017). Influence of Synchronization Impairments on an Experimental TDOA/FDOA Localization System. *J. of Electrical Engineering*, 5(1). <https://doi.org/10.17265/2328-2223/2017.01.001>
9. Fathabadi, V., Mehdi, S., K., S., & Jargani, L. (2009). Comparison of Adaptive Kalman Filter Methods in State Estimation of a Nonlinear System Using Asynchronous Measurements.
10. Brouk, J. D., & DeMars, K. J. (2024). Kalman Filtering with Uncertain and Asynchronous Measurement Epochs. *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*, 71(3), navi.652. <https://doi.org/10.33012/navi.652>
11. Review of Edge Computing for the Internet of Things (EC-IoT): Techniques, Challenges and Future Directions. (2024). *Journal of Sensor Networks and Data Communications*, 4(1), 01–11. <https://doi.org/10.33140/jsndc.04.01.09>
12. Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge Computing: Vision and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(5), 637–646. <https://doi.org/10.1109/jiot.2016.2579198>
13. Espressif. (2025). ESP32 Series Datasheet. [https://documentation.espressif.com/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://documentation.espressif.com/esp32_datasheet_en.pdf)
14. Inc., I. (2015). Omnidirectional Microphone with Bottom Port and I 2 S Digital Output. <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/INMP441.pdf>
15. Suwannaphong, T., Jovan, F., Craddock, I., & McConville, R. (2025). Optimising TinyML with quantization and distillation of transformer and mamba models for indoor localisation on edge devices. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94205-9>
16. Thakshila, W., & Pramod, V. K. (2017). Application of Compressive Sensing Techniques in Distributed Sensor Networks: A Survey.
17. Hwang, S.-H., Kim, K.-M., Kim, S., & Kwak, J. W. (2023). Lossless Data Compression for Time-Series Sensor Data Based on Dynamic Bit Packing. *Sensors*, 23(20), 8575. <https://doi.org/10.3390/s23208575>
18. Vinaykumar, H. (2025). Bandwidth and Storage Optimization for CubeSats Through Adaptive Delta Encoding and Heatshrink Compression.
19. Scott, V. (2013). *heatshrink: An Embedded Data Compression Library*. <https://spin.atomicobject.com/heatshrink-embedded-data-compression/>
20. Fujii, K. (2013). Extended kalman filter. *Refernce Manual*, 14(41), 2.

21. Cohen, A., & Migliorati, G. (2017). Optimal weighted least-squares methods. *The SMAI journal of computational mathematics*, 3, 181–203. <https://doi.org/10.5802/smai-jcm.24>

### References

1. Akyildiz, I., Wy, S., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: A survey.
2. Niu, Y.-X., Shi, S.-W., Qi, C.-D., & Zheng, Z.-J. (2017). Improved localization algorithm with FDOA measurements. *Y 2nd Annual International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Information Science (EEEIS 2016)*. Atlantis Press. <https://doi.org/10.2991/eeeis-16.2017.94>
3. Xiao, G., Dong, Q., Liao, G., Li, S., Xu, K., & Quan, Y. (2024). High-Precision Joint TDOA and FDOA Location System. *Remote Sensing*, 16(4), 693. <https://doi.org/10.3390/rs16040693>
4. Wu, P., Su, S., Zuo, Z., Guo, X., Sun, B., & Wen, X. (2019). Time Difference of Arrival (TDoA) Localization Combining Weighted Least Squares and Firefly Algorithm. *Sensors*, 19(11), 2554. <https://doi.org/10.3390/s19112554>
5. F., W., Fischer, E., Eckhard, G., & Peter, L. (2006). An indoor localization system based on DTDOA for different wireless LAN systems.
6. Wang, Y., & Ho, K. C. (2013). TDOA Source Localization in the Presence of Synchronization Clock Bias and Sensor Position Errors. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 61(18), 4532–4544. <https://doi.org/10.1109/tsp.2013.2271750>
7. He, S., Dong, X., & Lu, W.-S. (2017). Localization algorithms for asynchronous time difference of arrival positioning systems. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2017(1). <https://doi.org/10.1186/s13638-017-0851-1>
8. Hugo Seuté, Cyrille Enderli, Jean-François Grandin, Ali Khenchaf & Jean-Christophe Cexus. (2017). Influence of Synchronization Impairments on an Experimental TDOA/FDOA Localization System. *J. of Electrical Engineering*, 5(1). <https://doi.org/10.17265/2328-2223/2017.01.001>
9. Fathabadi, V., Mehdi, S., K., S., & Jargani, L. (2009). Comparison of Adaptive Kalman Filter Methods in State Estimation of a Nonlinear System Using Asynchronous Measurements.
10. Brouk, J. D., & DeMars, K. J. (2024). Kalman Filtering with Uncertain and Asynchronous Measurement Epochs. *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*, 71(3), navi.652. <https://doi.org/10.33012/navi.652>
11. Review of Edge Computing for the Internet of Things (EC-IoT): Techniques, Challenges and Future Directions. (2024). *Journal of Sensor Networks and Data Communications*, 4(1), 01–11. <https://doi.org/10.33140/jsndc.04.01.09>
12. Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge Computing: Vision and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(5), 637–646. <https://doi.org/10.1109/jiot.2016.2579198>
13. Espressif. (2025). *ESP32 Series Datasheet*. [https://documentation.espressif.com/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://documentation.espressif.com/esp32_datasheet_en.pdf)
14. Inc., I. (2015). Omnidirectional Microphone with Bottom Port and I 2 S Digital Output. <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/INMP441.pdf>
15. Suwannaphong, T., Jovan, F., Craddock, I., & McConville, R. (2025). Optimising TinyML with quantization and distillation of transformer and mamba models for indoor localisation on edge devices. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94205-9>
16. Thakshila, W., & Pramod, V. K. (2017). Application of Compressive Sensing Techniques in Distributed Sensor Networks: A Survey.
17. Hwang, S.-H., Kim, K.-M., Kim, S., & Kwak, J. W. (2023). Lossless Data Compression for Time-Series Sensor Data Based on Dynamic Bit Packing. *Sensors*, 23(20), 8575. <https://doi.org/10.3390/s23208575>
18. Vinaykumar, H. (2025). Bandwidth and Storage Optimization for CubeSats Through Adaptive Delta Encoding and Heatshrink Compression.
19. Scott, V. (2013). *heatshrink: An Embedded Data Compression Library*. <https://spin.atomicobject.com/heatshrink-embedded-data-compression/>
20. Fujii, K. (2013). Extended kalman filter. *Refernce Manual*, 14(41), 2.
21. Cohen, A., & Migliorati, G. (2017). Optimal weighted least-squares methods. *The SMAI journal of computational mathematics*, 3, 181–203. <https://doi.org/10.5802/smai-jcm.24>

Надійшла до редакції: 20.11.25

Прийнята до друку: 17.03.26

Опубліковано: 30.03.26