

## МЕТОД ПРІОРИТЕТНОЇ GOSSIP-СИНХРОНІЗАЦІЇ РОЗПОДІЛЕНИХ ДАНИХ У ГРУПІ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

*Анотація. Стаття присвячена розробці та дослідженню методу пріоритетної gossip-синхронізації розподілених даних у групі безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Актуальність теми зумовлена стрімким розширенням сфер застосування роїв БПЛА у задачах моніторингу, розвідки, пошуково-рятувальних операцій та логістики, де ефективна синхронізація даних між агентами в режимі реального часу є необхідною умовою успішного виконання місії. Кожен апарат безперервно генерує сенсорні дані: телеметрію, координати, результати спостереження, які необхідно поширювати між агентами для прийняття узгоджених рішень. Існуючі методи синхронізації мають суттєві обмеження: стандартний gossip-протокол не враховує поточний стан вузлів при виборі партнера для обміну, а консенсусний алгоритм Raft вимагає значних витрат на призначення координатора і не забезпечує відмовостійкості при його відключенні. Проблема полягає у необхідності розробки методу синхронізації, який забезпечував би швидку збіжність та мінімальну давність даних у вузлах рою без централізованого координатора. Метою роботи є розробка методу пріоритетної gossip-синхронізації, що базується на функції пріоритету вузла. Кожен агент обирає партнера для обміну з імовірністю, пропорційною значенню його пріоритетної функції, а не рівномірно випадково. Для перевірки запропонованого методу проведено комп'ютерне моделювання для роїв від 50 до 200 БПЛА з усередненням по 30 незалежних запусках. Результати демонструють покращення збіжності на 2.1-5.6% та нижчу середню давність даних порівняно зі стандартним gossip-протоколом. Алгоритм Raft показав найповільнішу збіжність через накладні витрати на призначення координатора. Запропонований метод не потребує централізованого координатора, є відмовостійким при виході окремих агентів з ладу та природно адаптується до змін стану бортових підсистем.*

*Ключові слова: БПЛА, рій, розподілені дані, gossip-протокол, синхронізація даних, пріоритетна функція, мультиагентні системи, Raft, децентралізоване керування, збіжність алгоритму.*

**Постановка проблеми.** Застосування груп БПЛА у задачах розподіленого моніторингу, розвідки та логістики вимагає забезпечення актуальності даних у кожному вузлі рою в режимі реального часу [1]. Кожен апарат безперервно генерує сенсорні дані: телеметрію, координати, результати спостереження, які необхідно поширювати між агентами для прийняття узгоджених рішень. При цьому канали зв'язку між БПЛА є

нестабільними: якість сигналу залежить від відстані між апаратами, рельєфу місцевості та рівня радіозавад.

В умовах таких обмежень централізована синхронізація даних через наземну станцію керування є неприйнятною: вона вимагає стабільного зв'язку з кожним агентом і створює єдину точку відмови [2]. Натомість decentralized gossip-протоколи дозволяють агентам обмінюватись даними безпосередньо між собою без глобального координатора. Проте стандартний gossip-протокол обирає партнера рівномірно випадково, не враховуючи поточний стан вузлів рою, що сповільнює збіжність і збільшує середній час з моменту оновлення у мережі.

Таким чином, існує потреба у методі синхронізації розподілених даних у рої БПЛА, який враховував би динамічний стан вузлів при виборі партнера для обміну, забезпечуючи вищу актуальність даних за умов обмежених ресурсів [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Задача синхронізації даних у розподілених системах є предметом активних досліджень. Gossip-протоколи забезпечують відмовостійке поширення інформації без центрального планувальника [4]. Алгоритм Demers заклав теоретичні основи gossip-поширення, довівши що для рівномірно випадкового вибору сусіда час збіжності є логарифмічним відносно розміру мережі. Проте рівномірний вибір не враховує якість вузлів, що суттєво в умовах гетерогенного рою БПЛА.

Запропоновано механізм вибору сусідів за секторами для покращення збіжності, однак цей підхід не враховує енергетичний стан агентів. Консенсусний алгоритм Raft [5] забезпечує надійну синхронізацію, але вимагає значні накладні витрати на організацію щодо визначення провідного вузла при збільшенні кількості агентів. Модифікації Raft для мультиагентних систем роботів [6] та покращення на основі асинхронної пакетної обробки [7] підвищують його продуктивність, але не вирішують проблему масштабованості для великих роїв. Роботи з розподілу задач у групах БПЛА [8, 9] демонструють важливість врахування стану агентів при прийнятті рішень.

Аналіз існуючих робіт свідчить про відсутність методу gossip-синхронізації, який би враховував комплекс бортових параметрів БПЛА: заряд акумулятора, якість каналу зв'язку та актуальність даних. Це і визначає напрямок даного дослідження.

**Мета дослідження.** Метою дослідження є розробка та перевірки методу пріоритетної gossip-синхронізації розподілених даних у групі БПЛА, що забезпечує вищу актуальність даних у вузлах рою порівняно зі стандартним gossip-протоколом та алгоритмом Raft за рахунок використання пріоритетної функції вибору партнера, яка враховує поточний стан бортових підсистем агента.

**Виклад основного матеріалу.** Запропонований метод базується на модифікації стандартного gossip-протоколу шляхом заміни рівномірно випадкового вибору партнера на зважений вибір за функцією пріоритету. Розглянемо рій з  $N$  агентів, де кожен агент  $i$  у момент часу  $t$  характеризується вектором стану [10]:

$$s_i(t) = \{b_i(t), q_i(t), f_i(t)\} \quad (1)$$

де  $b_i(t)$  є нормованим рівнем заряду акумулятора у діапазоні  $[0, 1]$ ,  $q_i(t)$  є якістю каналу зв'язку у діапазоні  $[0, 1]$ ,  $f_i(t)$  є свіжістю даних вузла у діапазоні  $[0, 1]$ .

Актуальність даних  $f_i(t)$  визначається як функція, що убуває з часом з моменту останнього оновлення:

$$f_i(t) = \max\left(0, 1 - \frac{a_i(t)}{T_{max}}\right) \quad (2)$$

де  $a_i(t)$  є віком даних агента  $i$  у раундах,  $T_{max}$  є максимальним допустимим віком даних. Після кожного успішного обміну рівень актуальності вузла оновлюється до

$$f_j(t + 1) = 1.0 \quad (3)$$

Функція пріоритету агента  $i$  визначається як зважена лінійна комбінація трьох параметрів стану:

$$P(i) = w_1 \cdot b(i) + w_2 \cdot q(i) + w_3 \cdot f(i) \quad (4)$$

де  $w_1 = 0.4$ ,  $w_2 = 0.3$ ,  $w_3 = 0.3$  є ваговими коефіцієнтами, що задовольняють умову  $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ . Коефіцієнт  $w_1$  є найбільшим, оскільки агент з низьким зарядом є менш надійним партнером для обміну [13].

На кожному раунді синхронізації агент  $i$  обирає партнера  $j$  із множини доступних сусідів  $C_i$  відповідно до розподілу ймовірностей:

$$P(j|i) = \frac{P(j)}{\sum_{k \in C_i} P(k)}, j \neq i \quad (5)$$

де сума нормує ймовірності по всіх кандидатах у множині  $C_i$ . Неінформовані вузли отримують коефіцієнт 2.0, вузли зі свіжими даними отримують коефіцієнт 0.3 [14].

Для аналізу збіжності розглянемо очікувану кількість раундів  $R$  до поінформованості частки  $p$  вузлів у стандартному gossip-протоколі:

$$E[R_{std}] = \frac{\log N}{\log\left(\frac{N}{N-p \cdot N}\right)} \quad (6)$$

що дає логарифмічну залежність від розміру рою. У пріоритетному gossip-протоколі збіжність прискорюється за рахунок спрямованого вибору неінформованих вузлів [15].

**Порівняльний аналіз методів синхронізації.** Для верифікації запропонованого методу проведено комп'ютерне моделювання з використанням мови Python. Параметри симуляції: розмір рою  $N = \{50, 100, 200\}$  БПЛА, максимальна кількість раундів  $T_{max} = 150$ , кількість незалежних запусків  $RUNS = 30$ . Початкові значення: заряд  $b_i(0) \sim U(0.3, 1.0)$ , якість каналу  $q_i(0) \sim U(0.4, 1.0)$ . Порівнювались три методи: стандартний gossip, запропонований пріоритетний gossip та консенсусний алгоритм Raft [16].

На рис. 1 представлено динаміку збіжності трьох методів для різних розмірів рою. Заштрихована область навколо кривих відповідає стандартному відхиленню по 30 запусках.

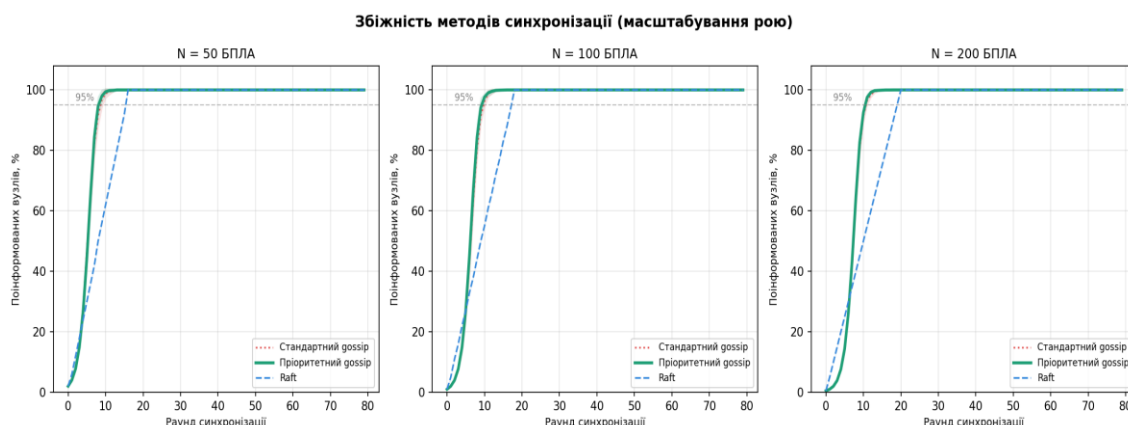


Рисунок 1 - Збіжність методів синхронізації для роїв різного розміру

Аналіз рис. 1 показує, що пріоритетний gossip досягає 95% поінформованості за меншу кількість раундів порівняно зі стандартним gossip при  $N = 100$  та  $N = 200$ . Алгоритм Raft демонструє найповільнішу збіжність через фазу виділення керуючого агента.

На рис. 2 представлено динаміку середнього віку даних у поінформованих вузлах. Цей показник є ключовим для систем реального часу [17].

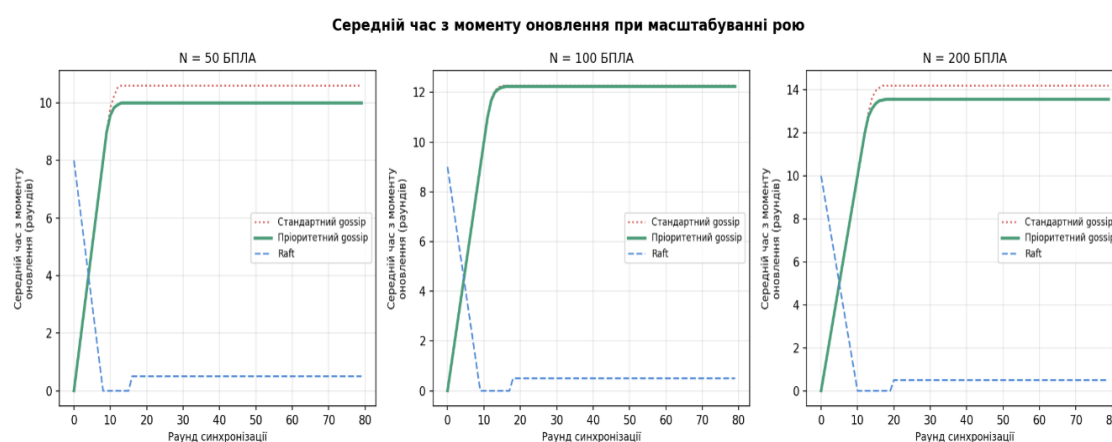


Рисунок 2 - Середній час з моменту оновлення у поінформованих вузлах рою

З рис. 2 видно, що пріоритетний gossip підтримує менший середній термін зберігання даних порівняно зі стандартним gossip впродовж усього процесу синхронізації завдяки пріоритизації вузлів з вищою свіжістю даних  $f(i)$ .

На рис. 3 наведено порівняльну гістограму середньої кількості раундів до досягнення 95% збіжності.

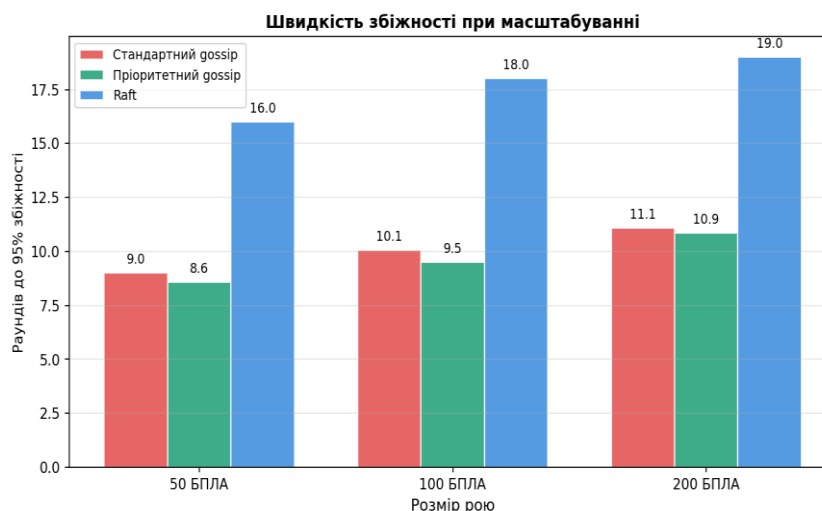


Рисунок 3 - Швидкість збіжності методів при масштабуванні рою

Числові результати симуляції зведено в табл. 1. Покращення пріоритетного gossip відносно стандартного становить від 2.1% до 5.6%.

Таблиця 1

Результати симуляції: середня кількість раундів до 95% збіжності

N (БПЛА)	Стандартний gossip	Пріоритетний gossip	Raft
50	9.0	8.6	16.0
100	10.1	9.5	18.0
200	11.1	10.9	19.0

Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого методу пріоритетної gossip-синхронізації, особливо при збільшенні розміру групи до 100 і більше агентів [11, 12].

**Висновки.** У даній роботі розроблено метод пріоритетної gossip-синхронізації розподілених даних у групі БПЛА, що відрізняється від стандартного gossip-протоколу використанням зваженої функції пріоритету вузла

$$P(i) = w_1 \cdot b(i) + w_2 \cdot q(i) + w_3 \cdot f(i) \quad (7)$$

яка враховує рівень заряду акумулятора, якість каналу зв'язку та актуальність даних агента. Вибір партнера для обміну здійснюється пропорційно до значення пріоритетної функції. Проведена комп'ютерна симуляція для роїв розміром 50, 100 та 200 БПЛА з усередненням по 30 незалежних запусках підтвердила ефективність запропонованого підходу. Пріоритетний gossip забезпечує скорочення кількості раундів до досягнення 95% збіжності на 2.1-5.6% порівняно зі стандартним gossip при  $N = 100$  та  $N = 200$ , а також підтримує нижчий середній термін зберігання даних. Алгоритм Raft продемонстрував найповільнішу збіжність через накладні витрати на організацію процедури призначення координатора.

Практична перевага запропонованого методу полягає у тому, що він не потребує централізованого координатора, є відмовостійким при виході окремих агентів з ладу, і адаптується до змін стану бортових підсистем у реальному часі.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на адаптивне налаштування вагових коефіцієнтів  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$  залежно від сценарію застосування рою, а також на дослідження поведінки методу в умовах навмисних перешкод зв'язку та часткової втрати вузлів.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Skaltsis G.M., Shin H.S., Tsourdos A. A Review of Task Allocation Methods for UAVs. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. 2023. Vol. 109, No. 4. P. 76. <https://doi.org/10.1007/s10846-023-02011-0>
2. Chandran I., Vipin K. Network analysis of decentralized fault-tolerant UAV swarm coordination in critical missions. *Drone Systems and Applications*. 2024. <https://doi.org/10.1139/dsa-2023-0101>
3. Проценко М., Маслій Р.,. Аналіз ройових методів керування безпілотними літальними апаратами. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2025. Vol. 359, No. 6(1). P. 357–362. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-49>
4. Zhou Y., Gao W., Rao B., Ding B., Wang W. Neighborhood Selection Synchronization Mechanism-Based Moving Source Localization Using UAV Swarm. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, No. 9. P. 2313. <https://doi.org/10.3390/rs15092313>
5. Ongaro D., Ousterhout J. In Search of an Understandable Consensus Algorithm. *USENIX Annual Technical Conference*. 2014. P. 305-319. <https://www.usenix.org/conference/atc14/technical-sessions/presentation/ongaro>
6. Zhang Y., Cui G., Sui W. A Raft Consensus Algorithm Modification for Adapting Frequent Leader Switch in Multi-agent Swarm Robotics Applications. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2025. Vol. 1338. [https://doi.org/10.1007/978-981-96-2204-7\\_59](https://doi.org/10.1007/978-981-96-2204-7_59)
7. Li H., Liu Z., Li Y. An Improved Raft Consensus Algorithm Based on Asynchronous Batch Processing. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2022. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-2456-9\\_44](https://doi.org/10.1007/978-981-19-2456-9_44)
8. Wang G., Lv X., Yan X. A Two-Stage Distributed Task Assignment Algorithm Based on Contract Net Protocol for Multi-UAV Cooperative Reconnaissance. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 18. P. 7980. <https://doi.org/10.3390/s23187980>
9. Li J., Chen R. A Distributed Task Scheduling Method Based on Conflict Prediction for Ad Hoc UAV Swarms. *Drones*. 2022. Vol. 6. P. 356. <https://doi.org/10.3390/drones6110356>
10. Demers A., Greene D., Hauser C. et al. Epidemic Algorithms for Replicated Database Maintenance. *Proceedings of the 6th Annual ACM Symposium on Principles of Distributed Computing*. 1987. P. 1-12. <https://doi.org/10.1145/41840.41841>
11. Zhang H., Cui B., Li Y. et al. An efficient cluster data synchronization scheme based on the Gossip protocol. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*. 2025. Vol. 51, No. 5. P. 1629-1636. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0750>
12. Tariverdi A., Jha D.K. Rafting Towards Consensus: Formation Control of Distributed Dynamical Systems. *arXiv*. 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.10097>

13. Smith R.G. The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver. *IEEE Transactions on Computers*. 1980. Vol. 29, No. 12. P. 1104-1113. <https://doi.org/10.1109/TC.1980.1675516>
14. Poghosyan S., Poghosyan V., Abrahamyan S. et al. Cloud-based mathematical models for self-organizing swarms of UAVs. *Drone Systems and Applications*. 2024. <https://doi.org/10.1139/dsa-2023-0039>
15. Zhou Y., Rao B., Wang W. UAV swarm intelligence: recent advances and future trends. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 183856-183878. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028865>
16. Cao Y., Yu W., Ren W., Chen G. An overview of recent progress in the study of distributed multi-agent coordination. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2013. Vol. 9, No. 1. P. 427-438. <https://doi.org/10.1109/TII.2012.2219061>
17. Wang G., Luo H., Hu X. et al. Fault-tolerant communication topology management for leader-follower UAV formation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2022. <https://doi.org/10.1177/1729881417693965>
18. Xu J., Yao H., Zhang R. et al. Semantic-aware UAV swarm coordination in the metaverse. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2024. Vol. 23, No. 12. P. 13821-13833. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10623271>

#### REFERENCES

1. Skaltsis G.M., Shin H.S., Tsourdos A. A Review of Task Allocation Methods for UAVs. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. 2023. Vol. 109, No. 4. P. 76. <https://doi.org/10.1007/s10846-023-02011-0>
2. Chandran I., Vipin K. Network analysis of decentralized fault-tolerant UAV swarm coordination in critical missions. *Drone Systems and Applications*. 2024. <https://doi.org/10.1139/dsa-2023-0101>
3. Protsenko M., Maslii R. Analysis of swarm control methods for unmanned aerial vehicles. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2025. Vol. 359, No. 6(1). P. 357–362. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-49>
4. Zhou Y., Gao W., Rao B., Ding B., Wang W. Neighborhood Selection Synchronization Mechanism-Based Moving Source Localization Using UAV Swarm. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, No. 9. P. 2313. <https://doi.org/10.3390/rs15092313>
5. Ongaro D., Ousterhout J. In Search of an Understandable Consensus Algorithm. *USENIX Annual Technical Conference*. 2014. P. 305-319. <https://www.usenix.org/conference/atc14/technical-sessions/presentation/ongaro>
6. Zhang Y., Cui G., Sui W. A Raft Consensus Algorithm Modification for Adapting Frequent Leader Switch in Multi-agent Swarm Robotics Applications. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2025. Vol. 1338. [https://doi.org/10.1007/978-981-96-2204-7\\_59](https://doi.org/10.1007/978-981-96-2204-7_59)
7. Li H., Liu Z., Li Y. An Improved Raft Consensus Algorithm Based on Asynchronous Batch Processing. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2022. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-2456-9\\_44](https://doi.org/10.1007/978-981-19-2456-9_44)

8. Wang G., Lv X., Yan X. A Two-Stage Distributed Task Assignment Algorithm Based on Contract Net Protocol for Multi-UAV Cooperative Reconnaissance. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 18. P. 7980. <https://doi.org/10.3390/s23187980>
9. Li J., Chen R. A Distributed Task Scheduling Method Based on Conflict Prediction for Ad Hoc UAV Swarms. *Drones*. 2022. Vol. 6. P. 356. <https://doi.org/10.3390/drones6110356>
10. Demers A., Greene D., Hauser C. et al. Epidemic Algorithms for Replicated Database Maintenance. *Proceedings of the 6th Annual ACM Symposium on Principles of Distributed Computing*. 1987. P. 1-12. <https://doi.org/10.1145/41840.41841>
11. Zhang H., Cui B., Li Y. et al. An efficient cluster data synchronization scheme based on the Gossip protocol. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*. 2025. Vol. 51, No. 5. P. 1629-1636. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0750>
12. Tariverdi A., Jha D.K. Rafting Towards Consensus: Formation Control of Distributed Dynamical Systems. *arXiv*. 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.10097>
13. Smith R.G. The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver. *IEEE Transactions on Computers*. 1980. Vol. 29, No. 12. P. 1104-1113. <https://doi.org/10.1109/TC.1980.1675516>
14. Poghosyan S., Poghosyan V., Abrahamyan S. et al. Cloud-based mathematical models for self-organizing swarms of UAVs. *Drone Systems and Applications*. 2024. <https://doi.org/10.1139/dsa-2023-0039>
15. Zhou Y., Rao B., Wang W. UAV swarm intelligence: recent advances and future trends. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 183856-183878. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028865>
16. Cao Y., Yu W., Ren W., Chen G. An overview of recent progress in the study of distributed multi-agent coordination. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2013. Vol. 9, No. 1. P. 427-438. <https://doi.org/10.1109/TII.2012.2219061>
17. Wang G., Luo H., Hu X. et al. Fault-tolerant communication topology management for leader-follower UAV formation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2022. <https://doi.org/10.1177/1729881417693965>
18. Xu J., Yao H., Zhang R. et al. Semantic-aware UAV swarm coordination in the metaverse. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2024. Vol. 23, No. 12. P. 13821-13833. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10623271>

Received 23.04.2026.

Accepted 27.04.2026.

Published 30.04.2026

***Priority gossip-based synchronization method for distributed data  
in a group of unmanned aerial vehicles***

*This paper presents the development and investigation of a priority gossip synchronization method for distributed data in a group of unmanned aerial vehicles (UAVs). The relevance of the topic is driven by the rapid expansion of UAV swarm applications in monitoring, reconnaissance, search and rescue, and logistics tasks, where effective real-time data synchronization between agents is a necessary condition for successful mission execution. Each UAV continuously generates sensor data including telemetry, coordinates, and observation results that must be distributed across the swarm for coordinated decision-making. Existing*

*synchronization methods have significant limitations: the standard gossip protocol does not account for the current state of nodes when selecting an exchange partner, while the Raft consensus algorithm incurs substantial overhead for coordinator assignment and does not ensure fault tolerance upon coordinator failure. The problem lies in the need to develop a synchronization method that ensures fast convergence and minimal data staleness in swarm nodes without a centralized coordinator. The aim of the study is to develop a priority gossip synchronization method based on a node priority function. Each agent selects an exchange partner with probability proportional to its priority value rather than uniformly at random. For verification, computer simulation was conducted for swarms ranging from 50 to 200 UAVs, averaged over 30 independent runs. The results demonstrate a convergence improvement of 2.1–5.6% and lower average data staleness compared to the standard gossip protocol. The Raft algorithm showed the slowest convergence due to coordinator assignment overhead. The proposed method requires no centralized coordinator, is fault-tolerant upon individual agent failure, and adapts naturally to changes in onboard subsystem states.*

*Keywords: UAV, swarm, distributed data, gossip protocol, data synchronization, priority function, multi-agent systems, Raft, decentralized control, algorithm convergence.*

**Проценко Михайло Ігорович** - аспірант кафедри АІТ, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Україна, Вінниця.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7359-4874>

**Маслій Роман Васильович** - доцент кафедри АІТ, Вінницький національний технічний університет, Україна, Вінниця.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3021-4328>

**Protsenko Mykhailo** - Department of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Ukraine, Vinnytsia.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7359-4874>

**Maslii Roman** - associate professor at the Department of AIIT, Vinnytsia National Technical University, Ukraine, Vinnytsia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3021-4328>