

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СУШИН ІГОР ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 621.391

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОД ПІДТРИМКИ ЗВ'ЯЗНОСТІ МОБІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ СЕНСОРІВ
СПРЯМОВАНОЇ ДІЇ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ
АЕРОПЛАТФОРМ РІЗНОРІВНЕВОГО РОЗТАШУВАННЯ**

Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка
Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ І.О. Сушин

Науковий керівник (консультант) Лисенко Олександр Іванович, д.т.н., професор
Київ 2025

АНОТАЦІЯ

Сушин І.О. Метод підтримки зв'язності мобільної мережі сенсорів спрямованої дії із використанням телекомунікаційних аероплатформ різнорівневого розташування. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2025.

За матеріалами дисертації опубліковано: 46 робіт. З яких 19 – це статті у журналах, що входять до переліку фахових видань затверджених МОН України за спеціальністю дисертації або у періодичних виданнях іноземних держав, 14 - публікації у матеріалах конференцій, у тому числі, міжнародних, 4 колективні монографії, 3 статті в інших журналах, що входять до переліку фахових видань затверджених МОН України, 5 свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір та 1 посібник

Результати досліджень в дисертаційній роботі є важливим внеском у розвиток мобільних сенсорних мереж (МСМ) із використанням телекомунікаційних аероплатформ (ТА), зокрема завдяки використанню сенсорів спрямованої дії та двох послідовних рівнів телекомунікаційних аероплатформ різного просторового розташування та енергетичного забезпечення.

Зміст дисертації викладено у чотирьох розділах у кожному з яких наведено висновки проведених досліджень.

У *першому* розділі було проведено аналіз сучасних методів організації інфраструктури мобільної сенсорної мережі, а саме: особливості архітектури БСМ, МСМ (необхідність великої кількості вузлів для покриття територій значного розміру, їх обмежені ресурси, вибір оптимальної топології тощо), передачі інформації в умовах відсутності телекомунікаційної інфраструктури під час стихійних лих, катастроф, війн (із використанням мобільних базових станцій, транспортних засобів, телекомунікаційних аероплатформ), необхідні для цього апаратні засоби, протоколи

обміну даних та інше. Вдосконалення існуючих мобільних сенсорних мереж із використанням телекомунікаційних аероплатформ (тобто наземно-повітряних мереж) було визначено ключовим напрямком, який є найбільш універсальним способом передачі даних. Розглянувши існуючі алгоритми і методи обміну та збору інформації у даних мережах зроблено висновок, що актуальні задачі можуть бути вирішено лише частково або недостатньо ефективно. Як наслідок, визначено цілі досліджень і поставлена задача багатокритеріального вдосконалення.

У другому розділі розглянуто структуру та принципи функціонування існуючої на сьогодні системи прототип (мобільної сенсорної мережі з використанням одного рівня телекомунікаційних аероплатформ): особливості організації та моделі польоту, алгоритми розрахунку місць обміну інформації, кластеризації МСМ, визначено недоліки алгоритмів обміну і збору даних, що дало розуміння актуальності та необхідності подальшого розвитку систем даного типу. Як наслідок, представлено підхід у пошуку подальших напрямків вдосконалення методичного апарату стосовно пошуку найкращих дій щодо використання безпроводових сенсорних мереж загалом та мобільних сенсорних мереж зокрема. Висунуто ідею створення структури наземно-повітряної мережі, що використовує сенсори спрямованої дії та різномірні телекомунікаційні аероплатформи (гелікоптерного та літакового типів) різномірневого розташування для підвищення ефективності функціонування в умовах відсутності телекомунікаційної інфраструктури (тобто в умовах надзвичайної ситуації). Розроблено математичну модель і метод завдяки якому можливо забезпечити підтримку зв'язності вузлів мобільної мережі сенсорів спрямованої дії (ММССД) з використанням телекомунікаційних аероплатформ (ТА) різномірневого розташування із досягненням переваг над існуючими мобільними сенсорними мережами (МСМ) з ТА за наступними критеріями: швидкості та часі передачі інформації, кількості безпосередньо задіяних ТА. Обчислення скалярних складових векторного критерію виконувалося за допомогою алгоритмічно заданої моделі. Результати розрахунків показали, що оптимізація за векторним критерієм із використанням запропонованого методу дала покращення порівняно із прототипом від 2% до 43%.

Третій розділ присвячено апаратній реалізації запропонованого методу. Проведено аналіз антен спрямованої та всеспрямованої дії, які використовуються для мобільних пристроїв і зокрема в сенсорних вузлах. Визначено переваги та недоліки кожного типу, а також перспективи подальшого розвитку напрямку сенсорів спрямованої дії у наземно-повітряних мережах із застосуванням телекомунікаційних аероплатформ. Проведено розрахунок максимальної довжини лінії зв'язку ТА-вузол (або між ТА двох рівнів), що підтверджується порівняльним комп'ютерним моделюванням у середовищі Atoll. Запропоноване апаратне вдосконалення (завдяки застосуванню сенсорів спрямованої дії) дозволяє у 3.9-4.6 рази збільшити відстань передачі інформації зі збереженням кількості бітових помилок в одиницю часу або збільшити швидкість передачі інформації у 1.7-3.5 рази порівняно із існуючими МСМ із ТА.

Четвертий розділ присвячено імітаційному моделюванню та оцінці ефективності запропонованого методу підтримки зв'язності мобільної мережі сенсорів спрямованої дії із використанням телекомунікаційних аероплатформ різнорівневого розташування згідно визначеного переліку критеріїв (із переліку методичних рекомендацій МСЕ-Р та програмного комплексу Matlab). Побудовано дві математичні моделі: існуюча система прототип (МСМ з сенсорами всеспрямованої дії із використанням одного рівня ТА) і система запропонована в дисертації (ММССД із використанням ТА дворівневого розташування). Результати представлені у вигляді графіків та загальної таблиці, що показують покращення запропонованого методу за всіма визначеними критеріями.

Ключові слова: підтримка зв'язності мережі, безпроводова сенсорна мережа, мобільна сенсорна мережа, система радіозв'язку, сенсори спрямованої дії, безпроводові пристрої, телекомунікаційні аероплатформи, БПЛА, ТА різнорівневого розташування, літаюча самоорганізована мережа, кластеризація, безпроводовий канал зв'язку, Wi-Fi, енергоефективність.

ABSTRACT

I.O. Sushyn. A method of maintaining connectivity in a mobile network with directed action sensors using telecommunication aerial platforms at different location levels. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of PhD in the field of knowledge 17 "Electronics and telecommunications" in the specialty 172 "Telecommunications and radio engineering". – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute" MES of Ukraine, Kyiv, 2025.

Based on the materials of the dissertation, 46 papers have been published. 19 of which are articles in journals included in the list of professional publications approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine in the specialty of the dissertation or in periodicals of foreign countries, 14 - publications in conference proceedings, including international, 4 - collective monographs, 3 - articles in other journals included in the list of professional publications approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine, 5 - certificates of registration of copyright for the work and 1 tutorial

The research results in the dissertation are an important contribution to the development of mobile sensor networks (MSNs) using telecommunications aeroplatforms (TA), in particular through the use of directional sensors and two consecutive levels of telecommunication aeroplatforms of different spatial arrangement and energy supply.

The dissertation content is presented into four chapters, each presenting and elucidating the conclusions of the conducted researches.

In the *first* chapter analyzed modern methods of organizing a mobile sensor network infrastructure, namely: features of the WSN, MSN architecture (the need for a large number of nodes to cover big areas, their limited resources, the choice of optimal topology, etc.), information transmission in the absence of telecommunications infrastructure during natural disasters, catastrophes, wars (using mobile base stations, vehicles, telecommunication aeroplatforms), the necessary hardware, data exchange protocols and other. Improvement of existing mobile sensor networks with the use of telecommunications aeroplatforms (i.e. ground-to-air networks) has been identified as a key area that is the most versatile method

of data transmission. Having considered the existing exchanging and collecting information algorithms and methods in these networks, it was concluded that current tasks can be solved only partially or not effectively enough. As a result, research goals were defined and the task of multi-criteria improvement was set.

In the *second* chapter examines the structure and operation principles of the currently existing prototype system (mobile sensor network with using one telecommunication aeroplatforms level): features of the organization and flight model, algorithms for calculating information exchange locations, clustering of MSN, identified data exchange and collection algorithms shortcomings, which provided relevance and necessity understanding of further development systems of this type. As a result, an approach is presented to find further directions for improving the methodological apparatus regarding the search for the best actions for the use of wireless sensor networks in general and mobile sensor networks in particular. The idea of creating a ground-to-air network structure, which using directed-action sensors and various telecommunication aerial platforms (helicopter and aircraft types) at different location levels has been put forward to increase the efficiency of functioning in the absence of telecommunications infrastructure (i.e. in an emergency situation). A mathematical model and method have been developed that allow for the support of maintaining connectivity between nodes of a mobile directed-action sensor network (MDASN) with using different location levels telecommunication aerial platforms (TA) with achieving advantages over existing mobile sensor networks (MSNs) with TA according to the following criteria: speed and time of information transmission, number of directly involved TAs. The calculation of the scalar components of the vector criterion was performed using an algorithmically specified model. The calculation results showed that optimization by the vector criterion using the proposed method gave an improvement compared to the prototype from 2% to 43%.

The *third* chapter is devoted to the hardware implementation of the proposed method. An analysis of directional and omnidirectional antennas used for mobile devices and in particular in sensor nodes was conducted. The advantages and disadvantages of each type were identified, as well as the prospects for further development of directed-action sensors in ground-to-air networks using telecommunication aerial platforms. The maximum length

of the TA-node communication line (or between two levels TAs) was calculated, which is confirmed by comparative computer modeling in the Atoll environment. The proposed hardware improvement (due to the use of directed-action sensors) allows to increase information transmission distance by 3.9-4.6 times while maintaining the number of bit errors per time unit or increase the information transmission speed by 1.7-3.5 times compared to existing MSN with TA.

The *fourth* chapter is devoted to simulation modeling and effectiveness evaluation of the proposed method for maintaining connectivity in a mobile directed-action sensor network using telecommunication aeroplatforms at different location levels according to a specified list of criteria (from the list of ITU-R methodological recommendations and the Matlab software package). Two mathematical models were designed: the existing prototype system (MSN with omnidirectional action nodes using TA at one level) and the system proposed in the dissertation (MDASN using TA at two levels). The results are presented in the form of a graphs and a general table, which show the improvement of the proposed method across all defined criteria.

Keywords: maintaining connectivity of network, wireless sensor network, mobile sensor network, radio communication system, directed-action sensor, wireless devices, telecommunication aerial platforms, UAVs, TA at different location levels, flying ad-hoc network, clusterization, wireless communication channel, Wi-Fi, energy efficiency.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Romaniuk, V., Lysenko, O., Novikov, V., & Sushyn, I. (2021). Development of methods of positioning, localization and data collection from nodes of a free mobile sensor network using intelligent adaptive telecommunication aeroplatforms. *Information and Telecommunication Sciences*, (2), 40–49. <https://doi.org/10.20535/2411-2976.22021.40-49>
2. Лисенко, О., Тачиніна, О., Новіков, В., Гуйда, О., та Сушин, І. (2021). Теоретичні основи конструювання керування рухом розподіленого інформаційно-телекомунікаційного робота. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*, 32 (71)(3), 55–62. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/10>
3. Лисенко, О., Тачиніна, О., Кисельов, В., Новіков, В., Гуйда, О., та Сушин, І. (2021). Метод розміщення сенсорів літаючими інформаційно-телекомунікаційними роботами динамічними чергами. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*, 32 (71)(4), 53–69. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/08>
4. Лисенко, О., Чумаченко, С., Новіков, В., Гуйда, О., Турейчук, А., та Сушин, І. (2021). Методика обґрунтування вимог до безпроводових сенсорних мереж інформаційного забезпечення систем оцінки та прогнозування стану природного середовища територій розподілених техногенних об'єктів. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*, 32 (71)(6), 33–43. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.6/06>
5. Lysenko, O., Valuiskyi, S., Yavisya, V., Tachinina, O., Novikov, V., & Sushyn, I. (2022). Method of operational calculation of coordinates of intermediate route points of flying information robot. *Information and Telecommunication Sciences*, (1), 27–34. <https://doi.org/10.20535/2411-2976.12022.27-34>
6. Валуйський, С., Фуртат, О., Сушин, І., та Турчин, Я. (2022). Метод підвищення зв'язності мобільних епізодичних радіомереж із використанням БПЛА. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І.*

Вернадського, Серія: Технічні науки, 33 (72)(1), 37–44. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.1/07>

7. Лисенко, О., Турейчук, А., Гуйда, О., Новіков, В., Сушин, І., та Нідченко, І. (2022). Методологія обґрунтування вимог до складу сенсорів безпроводової сенсорної мережі інформаційного забезпечення процедур та алгоритмів системи екологічного моніторингу розподіленого техногенного об'єкту. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*, 33 (72)(4), 133–149. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.1/22>

8. Лисенко, О., Чумаченко, С., Явіся, В., Гуйда, О., Новіков, В., та Сушин, І. (2022). Моделі використання інформації від мобільних безпроводових сенсорних мереж в алгоритмах оцінювання та прогнозування стану екологічних систем ускладнених техногенним навантаженням. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*, 33 (72)(4), 103–112. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/17>

9. Лисенко, О., Тачиніна, О., Гуйда, О., Фуртат, О., Фуртат, С., та Сушин, І. (2022). Інженерна методика експрес-синтезу цифрової системи автоматичного керування для прецизійних мехатронних пристроїв мобільних сенсорних мереж. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*, 33 (72)(5), 11–19. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/02>

10. Lysenko, O., Valuiskyi, S., Novikov, V., Sushyn, I., Chumachenko, S., & Guida, O. (2022). Heuristic algorithms for finding the minimum Steiner tree in the problem of optimizing the deployment and motion control of several flying information and telecommunication Robots. *Information and Telecommunication Sciences*, (2), 53–61. <https://doi.org/10.20535/2411-2976.22022.53-61>

11. Lysenko, O., Valuiskyi, S., & Sushyn, I. (2023). The program for assessing the connectivity of nodes of wireless episodic networks under the condition of using UAVs. *Information and Telecommunication Sciences*, (1), 24–34. <https://doi.org/10.20535/2411-2976.12023.24-34>

12. Сушин, І., та Буткевич, Г. (2023). Методика оцінки зв'язності вузлів бездротової сенсорної мережі при умові використання багаторівневої мережі телекомунікаційних аероплатформ. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*, 34 (73)(6), 39–46. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/07>

13. Сушин, І., та Лисенко, О. (2024). Універсальна методика передачі даних із застосуванням сенсорів спрямованої дії. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*, 35 (74)(2), 6–14. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/02>

14. Сушин, І., та Лисенко, О. (2024). Оцінка ефективності методу підтримки зв'язності мобільної мережі сенсорів спрямованої дії із використанням телекомунікаційних аероплатформ різнорівневого розташування. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*, 35 (74)(5 (Частина 1)), 71–78. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/12>

15. Sushyn, I., Ivashchev, D., & Lysenko, O. (2024). Evaluating the functioning effectiveness of sensor ground-to-air network using multiple UAVs layers and directional antennas. *Information and Telecommunication Sciences*, (2), 32–38. <https://doi.org/10.20535/2411-2976.22024.32-38>

16. Lysenko, O., Romaniuk, V., Romaniuk, A., Novikov, V., Yavisya, V., Sushyn, I. (2023). The Method of Using a Telecommunication Air Platform as a Flying Information Communication Robots. In: Ilchenko, M., Uryvsky, L., Globa, L. (eds) *Progress in Advanced Information and Communication Technology and Systems. MCiT 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 548. Springer, Cham. (pp. 140-149). ISSN: 2367-3370. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16368-5_18

17. Tachinina, O., Lysenko, O., Alekseeva, I., Guida, O., Novikov, V., Sushyn, I. (2023). Methodology of Energy-Efficient Algorithmic Modernization of Dynamic Characteristics of Digital Electric Drives of Mechatronic Devices for Small Civil Aviation. In: Ostroumov, I., Zaliskyi, M. (eds) *Proceedings of the International Workshop on Advances in Civil Aviation Systems Development. ACASD 2023. Lecture Notes in*

Networks and Systems, vol 736. Springer, Cham. (pp. 152-165). ISSN: 2367-3370. https://doi.org/10.1007/978-3-031-38082-2_12

18. Tachinina, O., Lysenko, O., Romanchenko, I., Novikov, V., Sushyn, I. (2024). Using Krotov's Functions for the Prompt Synthesis Trajectory of Intelligent Information Communication Robot. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Krytskyi, D. (eds) Information Technologies in the Design of Aerospace Engineering. Studies in Systems, Decision and Control, vol 507. Springer, Cham. (pp. 255-283). ISSN: 2198-4182. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43579-9_6

19. Sushyn, I., Lysenko, O., Romaniuk, V., Yavisya, V., Kyselov, V., Novikov, V. (2024). UAV Connectivity Maintenance in Wireless Sensor Networks. In: Luntovskyy, A., Klymash, M., Melnyk, I., Beshley, M., Schill, A. (eds) Digital Ecosystems: Interconnecting Advanced Networks with AI Applications. TCSET 2024. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 1198. Springer, Cham. (pp. 843-857). ISSN: 1876-1100. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61221-3_41

Наукові праці, які засвідчують наукову апробацію матеріалів дисертації

20. Tachinina, O., Lysenko, O., Alekseeva, I., Novikov, V., & Sushyn, I. (2021). Methods for Parametric Adjustment of a Digital System and Precision Automatic Stabilization of an Unmanned Aerial Vehicle. In *2021 IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD)* (pp. 76–79). IEEE. <https://doi.org/10.1109/apuavd53804.2021.9615436>

21. Lysenko, O., Sushyn, I., Romaniuk, V., & Novikov, V. (2021). The Improvement Direct Method for Collecting Monitoring Data from the Wireless Sensor Network Nodes with their Clustering by Telecommunications Aerial Platforms. In *2021 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)* (pp. 123–126). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ukrmico52950.2021.9716697>

22. Lysenko, O., Yavisya, V., & Sushyn, I. (2021). Method for Ensuring the Quality of Service of Geostationary Satellite Communication Systems. In *2021 IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)* (pp. 353–356). IEEE. <https://doi.org/10.1109/picst54195.2021.9772228>

23. Lysenko, O., Tachinina, O., Novikov, V., Guida, O., Kirchu, F., & Sushyn, I. (2023). Methodology of Synthesizing Digital Regulators in Precision Electric Drives for Orientation and Stabilization Target Tracking System of Mobile Robot's Directional Sensors. In *Proceedings of the 11-th International Conference "Information Control Systems & Technologies" (ICST 2023)* (pp. 51–63). CEUR Workshop Proceedings. <https://ceur-ws.org/Vol-3513/paper05.pdf>

24. Yavisya, V., Lysenko, O., Sushyn, I., & Novikov, V. (2023). An Option for Building a Communication System for a Settlement on the Moon. In *2023 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)* (pp. 108–111). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ukrmico61577.2023.10380344>

25. Лисенко, О., Явіся, В., Новіков, В., та Сушин, І. (2021). Застосування бездротових сенсорних мереж на базі безпілотних літальних апаратів у військових цілях. У *І Міжнародна науково-технічна конференція «Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки: актуальні питання і тенденції розвитку»* (с. 190–191). ВІТІ ім. Героїв Крут.

26. Лисенко, О., Явіся, В., та Сушин, І. (2021). Підхід до побудови системи стабілізації мультикоптерних дронів. У *І Міжнародна науково-технічна конференція «Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки: актуальні питання і тенденції розвитку»* (с. 192). ВІТІ ім. Героїв Крут.

27. Лисенко, О., Явіся, В., & Сушин, І. (2021). Спосіб забезпечення стійкого управління дронами. У *І Міжнародна науково-технічна конференція «Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки: актуальні питання і тенденції розвитку»* (с. 193–194). ВІТІ ім. Героїв Крут.

28. Yavisya, V., Lysenko, O., Tachinina, O., Ponomarenko, S., & Sushyn, I. (2022). Prototype of communication system for mars exploration. In *Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference «Theory and Practice of Science: Key Aspects»* (pp. 448–458). Scientific Publishing Center «InterConf». <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.06.2022.046>

29. Tachinina, O., Lysenko, O., Alekseeva, I., Sushyn, I., & Novikov, V. (2022). Method of Algorithmic Correction of Dynamic Properties of Special-Purpose Electric Drive. In *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)* (pp. 263–266). IEEE. <https://doi.org/10.1109/khpiweek57572.2022.9916481>

30. Lysenko, O., Chumachenko, S., Tachinina, O., Tureichuk, A., Novikov, V., & Sushyn, I. (2022). Justification of the requirements for the sensor network of information support of the environmental safety system of a distributed man-made object. In *Conference Proceedings of the 15th Annual International Scientific Conference «SECURITY FORUM 2022»* (pp. 114–123). Interpolis. <https://fpvmv.umb.sk/data/page/umb.sk/16316/security-forum-2022.pdf>

31. Кравчук, С., Явіся, В., Лисенко, О., та Сушин, І. (2022). Огляд методів підвищення ефективності мобільних безпроводових сенсорних мереж. У *Начерк науково-практичної конференції присвячений пам'яті українського зв'язківця Тітко Валентина Михайловича «Сучасні системи зв'язку як напрям міжнародно-правової, зовнішньополітичної, теле-, радіо, мережевої комунікації»* (с. 19–21). ГО «УКРО». <https://doi.org/10.59105/2022-11>

32. Сушин, І., та Лисенко, О. (2023). Програма оцінки зв'язності вузлів безпроводових епізодичних мереж при умові застосування БПЛА. У *XVII міжнародна науково-технічна конференція «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ»* (с. 36–41). <http://conferenc.its.kpi.ua/2023/paper/view/27347/15708>

33. Сушин, І., Лисенко, О., та Авдеєнко, Г. (2024). Застосування сенсорів спрямованої дії в мобільних безпроводових сенсорних мережах. У *XVIII міжнародна науково-технічна конференція «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ»* (с. 199–202). <https://conferenc.its.kpi.ua/2024/paper/view/29716/17396>

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

34. Lysenko, O., Chumachenko, S., Valuiskyi, S., Yavisya, V., Novikov, V., & Sushyn, I. (2023). *Methodological aspects of ensuring state security in the mind hybrid threats. Expert-modeling system decision support for the deployment and management of a wireless sensor network with mobile sensors and telecommunication air platforms in the*

emergency zone. Vysoka škola bezpečnosneho manažerstva v Košiciach. (pp. 255-270). ISBN: 978-80-8185-058-5.

https://www.researchgate.net/publication/368923784_Methodological_aspect_of_ensuring_state_security_in_the_mind_hybrid_threats

35. Chumachenko, S., Lysenko, O., Tachinina, O., Furtat, O., Furtat, S., & Sushyn, I. (2023). *Method of collecting information on the condition of critical infrastructure objects from wireless sensor network nodes. Challenges and threats to critical infrastructure*. NGO Institute for Cyberspace Research. (pp. 171-178). ISBN: 10/979-8-218-22315-1. https://www.researchgate.net/publication/371540507_CHALLENGES_AND_THREATS_TO_CRITICAL_INFRASTRUCTURE_Detroit_Michigan_USA_-2023

36. Chumachenko, S., Lysenko, O., Novikov, V., Furtat, O., Furtat, S., & Sushyn, I. (2023). *Development of the method of support and increase of connectivity wireless networks using UAVs. Challenges and threats to critical infrastructure*. NGO Institute for Cyberspace Research. (pp. 277-283). ISBN: 10/979-8-218-22315-1. https://www.researchgate.net/publication/371540507_CHALLENGES_AND_THREATS_TO_CRITICAL_INFRASTRUCTURE_Detroit_Michigan_USA_-2023

37. Lysenko, O., Tachinina, O., Kirchu, P., Ponomarenko, S., Kutieпов, V., & Sushyn, I. (2023). *Approach for determining the influence of UAV spatial motion parameters on the characteristics. Information processing in control and decision-making systems. Problems and solutions*. NU «OMA». (pp. 34-58). ISBN: 978-617-7857-33-3 https://www.researchgate.net/publication/375665853_information_processing_in_control_and_decision-making_systems_problems_and_solutions

38. Лисенко, О., Тачиніна, О., Самсоненко, С., та Сушин, І. (2021). Методика налаштування цифрових регуляторів приводів роботів з урахуванням корегування їх динамічних характеристик. *Проблеми інформатизації та управління*, 3(67), 41–45. <https://doi.org/10.18372/2073-4751.67.16199>

39. Валуйський, С., Лисенко, О., Чумаченко, С., Гуйда, О., Фуртат, О., та Сушин, І. (2022). Метод оцінки зв'язності вузлів бездротових епізодичних мереж за умови застосування безпілотних літальних апаратів. *Проблеми програмування*, (3-4), 455–468. <https://doi.org/10.15407/pp2022.03-04.455>

40. Лисенко, О. І., Тачиніна, О. М., Семенов, В. Г., та Сушин, І. О. (2021). Методика синтезу регуляторів для цифрової системи автоматичного керування антропоморфним роботом. *Проблеми інформатизації та управління*, 4(68), 44–51. <https://doi.org/10.18372/2073-4751.68.16526>

ЗМІСТ

ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ОРГАНІЗАЦІЇ ІНФРАСТРУКТУРИ МОБІЛЬНОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ	25
1.1. Сучасні підходи, що використовуються при побудові та зборі даних з вузлів безпроводових сенсорних мереж.....	25
1.1.1. Визначення архітектури вузлів та сенсорних мереж	25
1.1.2. Способи збору даних з вузлів мобільної сенсорної мережі	30
1.1.3. Структура мобільної сенсорної мережі з використанням ТА	33
1.2. Аналіз принципів функціонування МСМ із використанням ТА	35
1.2.1. Особливості побудови ТА на базі БПЛА	35
1.2.2. Технології передачі даних.....	39
1.2.3. Використання ТА для керування МСМ.....	43
1.2.4. Способи обміну даних з вузлами МСМ і необхідні для цього траєкторії польоту ТА.....	48
1.3. Цілі і постановка задачі дослідження	52
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	53
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА МЕТОД ПІДТРИМКИ ЗВ'ЯЗНОСТІ МОБІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ СЕНСОРІВ СПРЯМОВАНОЇ ДІЇ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ АЕРОПЛАТФОРМ РІЗНОРІВНЕВОГО РОЗТАШУВАННЯ.....	56
2.1. Система прототип МСМ із ТА.....	56
2.1.1. Особливості організації польоту та місць обміну інформації.....	58
2.1.2. Метод обміну/збору даних між вузлами МСМ і ТА	66
2.2. Математична модель підтримки зв'язності ММССД з використанням ТА дворівневого розташування із різним енергетичним забезпеченням	68
2.2.1. Багатокритеріальна математична модель оцінки зв'язності	68
2.2.2. Алгоритмічно задана математична модель обчислення скалярних складових векторного критерію	70
2.2.3. Постановка задачі багатокритеріальної оптимізації	72
2.3. Метод підтримки зв'язності ММССД з використанням ТА дворівневого розташування із різним енергетичним забезпеченням	73
2.3.1. Конструктивна складова методу	73
2.3.2. Алгоритмічна складова методу: етапи методу	77

	17
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	79
РОЗДІЛ 3 АПАРАТНЕ ВДОСКОНАЛЕННЯ МСМ.....	81
3.1. Аналіз антен всеспрямованої дії вузлів МСМ	81
3.2. Аналіз антен спрямованої дії вузлів МСМ.....	87
3.3. Розрахунок та порівняння довжини лінії зв'язку при використанні сенсорів спрямованої та всеспрямованої дії	94
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	124
РОЗДІЛ 4 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДУ ПІДТРИМКИ ЗВ'ЯЗНОСТІ МОБІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ СЕНСОРІВ СПРЯМОВАНОЇ ДІЇ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ АЕРОПЛАТФОРМ РІЗНОРІВНЕВОГО РОЗТАШУВАННЯ.....	126
4.1. Визначення показників для оцінки ефективності роботи МСМ з ТА	126
4.2. Методика оцінки ефективності ММСД з використанням ТА різнорівневого розташування	128
4.3. Імітаційне моделювання та оцінка ефективності	129
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4	138
ВИСНОВКИ	140
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	142
ДОДАТОК А АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	157
ДОДАТОК Б СВІДОЦТВА ПРО РЕЄСТРАЦІЮ АВТОРСЬКОГО ПРАВА НА ТВІР	159

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БПЛА – безпілотний літальний апарат

БСМ – безпроводова сенсорна мережа

ГВК – головний вузол кластера

МБС – мобільні базові станції

МЕ – мережевий елемент

ММССД – мобільні мережі сенсорів спрямованої дії

МСМ – мобільна сенсорна мережа

НПМ – наземно-повітряна мережа

СК – система керування

ТА – телекомунікаційна аероплатформа

ЦК – центр керування

ЦКМ – центр керування мережею

FANET – flying ad-hoc networks

FOREL – formal element

LTE – long term evolution

MANET – mobile ad-hoc network

MIMO – multiple-input multiple-output

NB-IoT – Narrow Band Internet of Things

OSI – open systems interconnection

WiMAX – worldwide Interoperability for microwave access

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток популярних нині безпроводових сенсорних мереж викликав ріст кількості вузлів, які необхідно забезпечувати зв'язком, особливо в умовах катаклізмів, війн тощо. А високий рівень розвитку безпілотної авіації послужив мотивацією для створення так званих наземно-повітряних мереж. Застосування БПЛА вирішує ряд проблем, таких як створення умов прямої видимості, швидке розгортання системи тощо.

Сучасна система моніторингу надзвичайної ситуації складається з БСМ та БПЛА(ів). Ці БПЛА розташовані на різних рівнях над поверхнею землі і мають різний рівень енергетичного та телекомунікаційного забезпечення, а також різні можливості з точки зору дистанційного збору інформації з сенсорів безпроводних сенсорних мереж.

На першому рівні розташовані сенсори. Сенсорами (тобто датчиками первинної інформації) можуть бути оснащені механічні пристрої, які розташовуються чи пересуваються по поверхні за допомогою спеціальних пристроїв пересування або разом з людиною, яка є рятувальником чи виконавцем пошукових робіт в зоні надзвичайної ситуації. Мова йде про територію, земну поверхню чи акваторію морів або океанів, де телекомунікаційна інфраструктура відсутня через певні катаклізми, природні або техногенні аварії, катастрофи (наприклад, землетрус в Туреччині, Сирії та Іраці, торнадо у США).

Прибуття пошуковців та рятувальників або тільки технічних засобів для виконання відповідних завдань вимагає оперативного покриття великих територій для зв'язку не тільки з оперативним центром рятування, а й з глобальними центрами спостереження за катаклізмами, науковими та медичними центрами, в яких можуть бути надані вказівки або здійснено керування рятувальними діями, здійсненням медичних операцій для рятування життя людей. Тому відсутність телекомунікаційної інфраструктури або неможливість передачі інформації є ключовим моментом задачі пошуку та рятування.

На сьогоднішній день кожна бригада, що прибула до місця події, має БПЛА гелікоптерного типу (або в деяких випадках літакового). Вони створюють 1-й рівень

мережі (тактичний рівень), який забезпечує локальну зв'язність між технічними засобами рятування і пошуку та рятувальниками. Висота розташування від пів кілометра до декількох кілометрів.

Але щоб передати інформацію на далекі відстані до місць, де приймаються загальні (оперативно-стратегічні) рішення, необхідний ще один рівень – другий, який забезпечить загальну зв'язність між технічними засобами рятування і пошуку та рятувальниками. Він повинен взаємодіяти як із іншими БПЛА так і з телекомунікаційними системами загального користування для того, щоб з їх допомогою швидко передавати інформацію до головного центру прийняття рішень.

Також рівні визначаються не тільки просторовим розташуванням, а й оснащенням і можливістю перебування у робочому стані, тобто виконувати інформаційний обмін з іншими рівнями мережі. Зазвичай БПЛА гелікоптерного типу можуть триматися у повітрі від пів години до декількох годин, а літакового типу можуть триматися від 24 годин до декількох діб (тому що енергетична оснащеність більш висока).

Таким чином, ми бачимо, що представлена робота, яка пов'язана із можливістю забезпечення інформаційного обміну в умовах відсутності телекомунікаційної інфраструктури, тобто в умовах техногенної або природної катастрофи є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

- НДР № 2316 «Інтелектуалізація систем управління високопродуктивними сенсорними мережами на основі використання роботизованих об'єктів та обчислювальної FOG-інфраструктури» (бюджетна).
- НДР № 0119U102043 «Розробка алгоритмів динамічної фільтрації для оцінювання параметрів руху безпілотних літальних апаратів при їх використанні в безпроводових сенсорних мережах FANET» (ініціативна)
- НДР № 0122U200110 «Розвиток методів оптимізації низькоорбітальних кластерних супутникових систем зв'язку, навігації та моніторингу» (ініціативна)

Метою роботи є зменшення часу затримки, підвищення швидкості передачі інформації з кінця в кінець та зменшення кількості телекомунікаційних аероплатформ

(ТА) в мобільній сенсорній мережі із ТА при умові її функціонування в зоні надзвичайної ситуації, коли відсутня телекомунікаційна інфраструктура.

Основні завдання досліджень:

1. Аналіз задач керування та принципів функціонування ММССД з використанням ТА різнорівневого розташування, методів та алгоритмів обміну і збору даних із ММССД ТА, визначення переваг та недоліків.

2. Аналіз математичних моделей: кластеризації ММССД, оцінки енерговитрат вузлів, часу збору даних, передачі даних моніторингу, позиціонування ТА.

3. Розробка математичної моделі мобільної мережі сенсорів спрямованої дії із використанням ТА різнорівневого розташування та визначення показників оцінки її ефективності.

4. Розробка методу підтримки зв'язності ММССД і ТА різнорівневого розташування, що дозволить досягти виграшу у часі, швидкості передачі інформації та кількості ТА.

5. Оцінка ефективності запропонованого методу за допомогою імітаційного моделювання на основі розробленої математичної моделі ММССД із використанням ТА різнорівневого розташування та існуючої мобільної мережі сенсорів всеспрямованої дії із використанням ТА однорівневого розташування.

Об'єкт дослідження – мобільна мережа сенсорів спрямованої дії (ММССД) із телекомунікаційними аероплатформами різнорівневого розташування.

Мобільна мережа сенсорів спрямованої дії – це окремий випадок МСМ у якій сенсори використовують антени спрямованої дії.

Предмет дослідження – метод підтримки зв'язності мобільної мережі сенсорів спрямованої дії із використанням телекомунікаційних аероплатформ (ТА) різнорівневого розташування.

Методи дослідження. В якості інструментарію для моделювання використовувалися програмні комплекси Atoll та Matlab, для візуалізації отриманих результатів – Microsoft Excel.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше розроблено математичну модель підтримки зв'язності ММССД з ТА різнорівневого розташування, яка на відміну від існуючих математичних моделей МСМ з ТА включає до свого складу математичні моделі функціонування сенсорів спрямованої дії і ТА дворівневого розташування з різним енергетичним забезпеченням.

2. Вперше розроблено метод підтримки зв'язності вузлів ММССД з ТА різнорівневого розташування, який на відміну від існуючих методів підтримки зв'язності вузлів МСМ з ТА дозволяє ефективно використовувати антени спрямованої дії, що розташовані на сенсорах і ТА дворівневого просторового розташування із різним енергетичним забезпеченням, завдяки чому досягається зменшення часу затримки при передачі інформації, збільшення швидкості передачі інформації з кінця в кінець та зменшення кількості ТА в ММССД із ТА порівняно із МСМ з ТА.

Теоретичне та практичне значення результатів роботи, впровадження:

Теоретичне значення дисертації полягає в тому, що в ній розв'язано важливу науково-технічну задачу щодо розробки методу використання сенсорів спрямованої дії у складі мобільної мережі сенсорів та дворівневого просторового розташування телекомунікаційних аероплатформ із різним енергетичним забезпеченням для підтримки такого типу зв'язності, який дозволяє досягти в режимі реального функціонування мобільної сенсорної мережі зменшення середніх значень часу затримки при передачі інформації та кількості безпосередньо задіяних телекомунікаційних аероплатформ в кожному сеансі передачі інформації, а також збільшення середньої швидкості передачі інформації з кінця в кінець.

Практичне значення результатів роботи полягає в тому, що розроблений в дисертації метод та комп'ютерне математичне забезпечення, що було створено при проведенні імітаційного експерименту, повністю готове для використання в системі оперативного прийняття рішення про розгортання та підтримки функціонування системи інформаційно-телекомунікаційного забезпечення на територіях із відсутньою телекомунікаційною інфраструктурою або у зоні надзвичайної ситуації

природного та (або) техногенного характеру для проведення пошуково-рятувальних робіт.

Отримані в дисертації наукові і практичні результати впроваджені в навчальний процес ННІТС КПІ ім. Ігоря Сікорського, про що свідчить отриманий акт впровадження в навчальний процесі кафедри телекомунікацій. Сушин І.О. є співавтором навчального посібника «Цифрові системи автоматичного керування для телекомунікацій. Комп'ютерний практикум» для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Інженерія та програмування інфокомунікацій» спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка з дисципліни «Цифрові системи автоматичного керування для телекомунікацій».

Особистий внесок здобувача. У дисертаційній роботі автором було самостійно поєднано теоретичні та експериментальні результати досліджень. Основні результати, що особисто запропоновані: математична модель підтримки зв'язності МСМ з ТА, яка на відміну від існуючих включає до свого складу математичні моделі функціонування сенсорів спрямованої дії і ТА дворівневого розташування з різним енергетичним забезпеченням; метод підтримки зв'язності вузлів МСМ з ТА, який на відміну від існуючих методів дозволяє ефективно використовувати антени спрямованої дії, що розташовані на сенсорах і ТА дворівневого просторового розташування із різним енергетичним забезпеченням, завдяки чому досягається зменшення часу затримки при передачі інформації, збільшення швидкості передачі інформації, та зменшення кількості ТА в ММССД із ТА. Виконана оцінка ефективності запропонованого методу за допомогою імітаційного моделювання.

Апробація результатів дисертації. За результатами дослідження опубліковано 19 статей:

- 15 статей у наукових фахових виданнях України (на момент опублікування) за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка, в т.ч. 12 статей у яких число співавторів (разом із здобувачем) більше двох осіб;

- 4 статті у періодичних наукових фахових виданнях проіндексованих у базі Scopus.

А також:

- 14 тез виступів на наукових конференціях (із них в наукометричних базах – 5);
- 4 колективні монографії (1 видана у ЄС, 1 видана в Україні та 2 у США);
- 3 статті у наукових фахових виданнях України (на момент опублікування);
- свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір: 5;
- навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Інженерія та програмування інфокомунікацій» спец. 172 Електронні комунікації та радіотехніка.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 113 найменувань та додатків. Повний обсяг дисертації становить 164 сторінок, у тому числі 2 додатки на 8 сторінках. Основний текст дисертації містить 69 рисунків та 23 таблиці.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ОРГАНІЗАЦІЇ ІНФРАСТРУКТУРИ МОБІЛЬНОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

1.1. Сучасні підходи, що використовуються при побудові та зборі даних з вузлів безпроводових сенсорних мереж

Сьогодні виникають нові технології та методи, які пришвидшують настання ери «розумного світу», що свідчить про те, що сенсорні мережі та передача інформації між вузлами ґрунтовно проникають в нові сфери нашого життя. Але досить часто виникають сценарії при яких звичні для кожного способи обміну інформації стають недоступні. Наприклад, стихійні лиха, катастрофи, війни тощо. Тому постає необхідність в тимчасових рішеннях, які дадуть можливість підтримувати зв'язність між вузлами. В нашій країні останніми роками ця потреба тільки збільшилася [1,2]. Тому проаналізуємо архітектуру мобільних сенсорних мереж та сценарії збору даних.

1.1.1. Визначення архітектури вузлів та сенсорних мереж

Вузол – це кінцевий пристрій сенсорної мережі і невід'ємна її складова. Такі пристрої можуть мати можливість обслуговування (заміни певних елементів, які виходять з ладу під час експлуатації) або бути одноразового використання. Вони (в основному) здійснюють періодичні вимірювання (моніторинг) зовнішнього середовища (такі як вологість, температура, радіація та інші більш та менш складні показники), накопичення отриманих результатів та передачу їх до базової станції. Вузол мережі (сенсор) (рис. 1.1) містить датчик, що сприймає дані від зовнішнього середовища, процесор, пам'ять, трансивер, антену (зазвичай одну або дві), автономне джерело живлення та інколи перемикачі, роз'єми тощо [3,4].

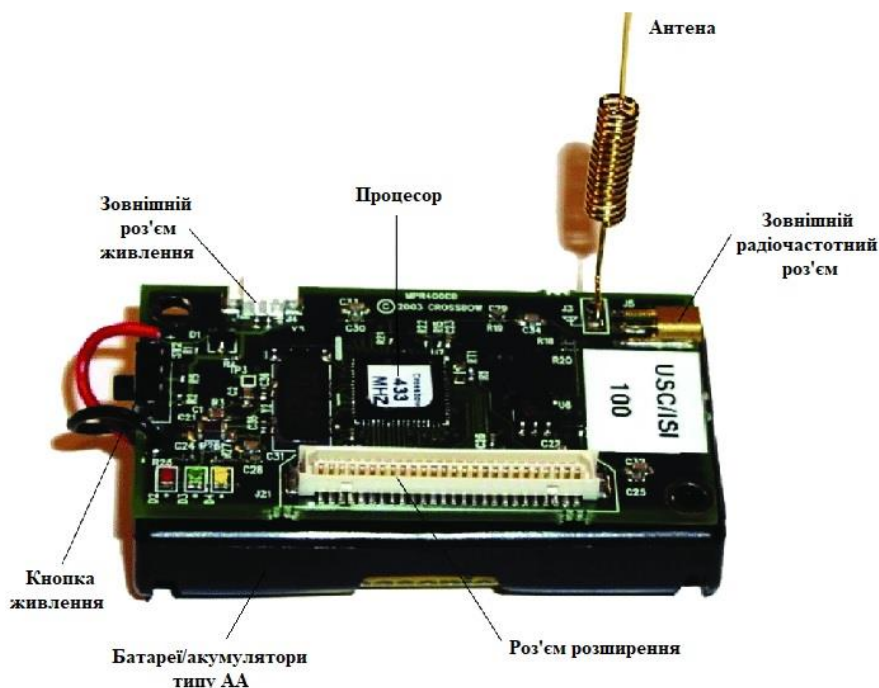


Рисунок 1.1. Елементна схема сенсорного вузла

Сукупність сенсорних вузлів утворює безпроводову сенсорну мережу (БСМ), яка характеризується великими розмірами (сотні або тисячі вузлів), обмеженими ресурсами вузлів (заряд батареї, продуктивність процесора, обсяг пам'яті, потужність передачі, пропускна здатність радіоканалу тощо) і щільністю трафіку поблизу шлюзів. [5,6]. Мережі можуть бути спроектовані так, щоб працювати у віддалених місцях місяцями або навіть роками. В останньому випадку заміна батарей у вузлах мережі є недоцільною або навіть неможливою. Тому керування енергоспоживанням сенсорних вузлів (зменшення, збереження та перерозподіл між вузлами) відіграє вагомую роль у збільшенні строку служби сенсорних вузлів та мережі в цілому. [6,7,8].

В цілому сенсорні БСМ мають різні топології, призначення, параметри (моніторингу, мобільності, керування) тощо. Розглянемо сценарії використання та типи безпроводових сенсорних мереж більш детально (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 Сценарії використання та типи БСМ

Топологія	Типи	Локація	Параметри моніторингу	По часу збору даних	Мобільність елементів мережі
Зірка	Наземні/підземні	Детермінована	Хімічні	Реального часу	Стаціонарні
Дерево	Надводні/підводні	Недетермінована	Фізичні	З затримкою в одержанні	Рухомі
Сітчаста (Mesh)	Повітряні				
Гібридні					

В залежності від сценаріїв використання БСМ бувають різні топології: зірка, дерево, сітка (рис. 1.2).

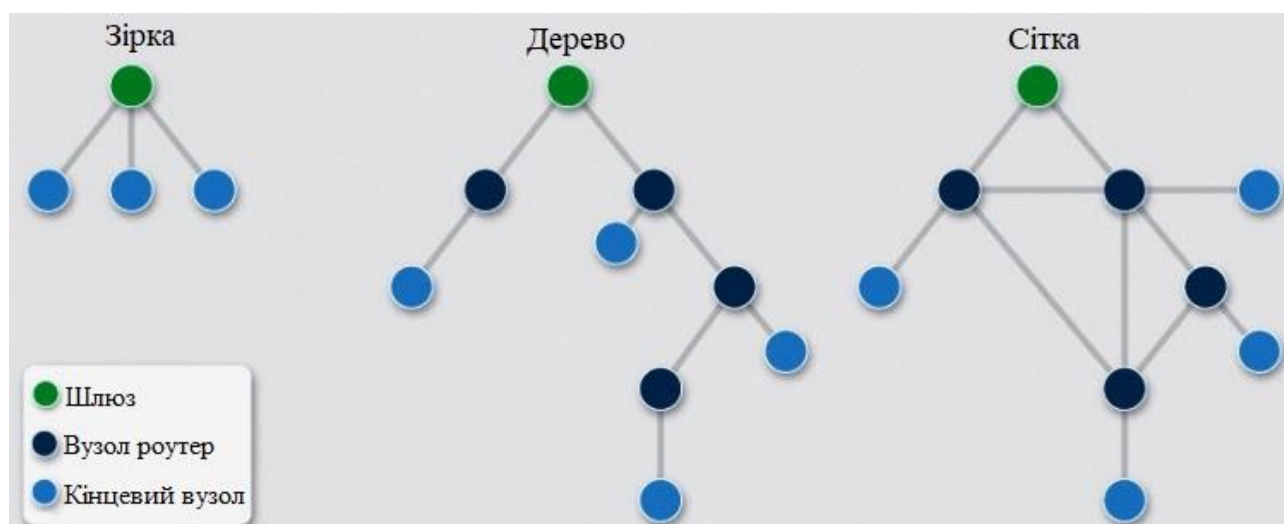


Рисунок 1.2. Топології БСМ

«Зірка» — це комунікаційна топологія, у якій кожен вузол підключається безпосередньо до шлюзу. Один шлюз може надсилати або отримувати повідомлення на кілька віддалених вузлів. У таких топологіях вузли не мають можливості передавати дані один одному. Як наслідок, це зменшує час затримки між кінцевим вузлом і шлюзом (базовою станцією). Через залежність від одного вузла для керування мережею, шлюз має бути в радіусі радіопередачі всіх кінцевих вузлів. Розмір мережі залежить від кількості підключень до концентратора. Недоліком є мала живучість через можливість виходу з ладу єдиного шлюзу [9].

Топологію дерево також називають каскадною зірковою топологією. У деревовидних топологіях кожен вузол з'єднується з вузлом, який знаходиться вище в

дереві, а потім зі шлюзом. Основна перевага деревної топології полягає в тому, що розширення мережі може бути легко можливим, а також стає легким виявлення помилок. Значним недоліком є залежність від магістрального каналу (ділянки мережі по якій передається інформація від багатьох вузлів). Якщо він вийде з ладу, вся мережа зруйнується [9].

Сітчасті топології (Mesh) дозволяють передавати дані між кінцевими вузлами, які розміщені в межах доступності один одного. Для передачі даних між вузлами, що не мають прямого каналу зв'язку необхідний проміжний вузол. Перевага цієї сітчастої топології включає легку ізоляцію та виявлення несправностей у мережі. Недоліком є те, що мережа велика і вимагає великих ресурсів [9].

Залежно від сценарію та цілі використання типи мереж обираються таким чином, щоб їх можна було розгорнути під/над водою, під/над землею для збору даних різного формату (числові, текстові, аудіо, відео, зображення).

БСМ можуть застосовуватися у наступних сферах (рис.1.3) [6,90]:

- при спостереженні за океанічними та морськими акваторіями;
- при спостереженні за ландшафтами прецизійного землеробства, тваринництва;
- при спостереженні за природними катастрофами, які, зазвичай, мають регіональний масштаб дії та ще й ускладнюються техногенними аваріями, якщо ці катастрофи відбуваються на ландшафтах агломерацій;
- використання на урбаністичних територіях, де сконцентрована велика кількість людей і техногенних об'єктів;
- також можливе спостереження за техногенними об'єктами для уникнення можливих техногенних катастроф.

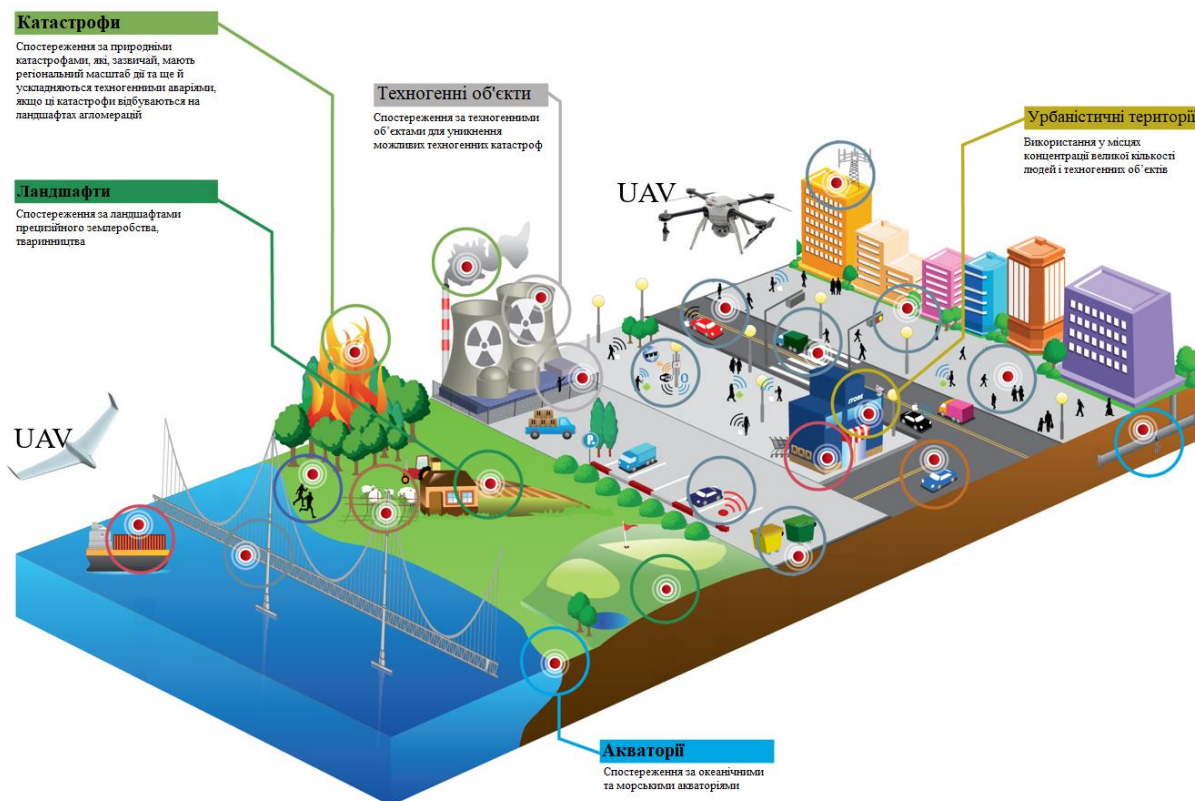


Рисунок 1.3. Сфери застосування багаторівневої мережі телекомунікаційних аероплатформ для забезпечення зв'язності вузлів БСМ [90]

Параметрами моніторингу можуть бути різноманітні фізичні та хімічні величини (температура, вологість, сила світла, радіація тощо), а також зображення, відео та аудіо [10,11].

Для класичних БСМ моніторингу різноманітних параметрів необхідно менше ресурсів. Тобто, недорогі вузли, оснащені датчиком (або датчиками) що можуть вимірювати один чи декілька параметрів, які в багатьох випадках не вимагають передачі даних в реальному часі [7,12].

Мультимедійні безпроводові сенсорні мережі були запропоновані для відстеження та моніторингу подій таких як зображення, відео та аудіо. Ці мережі складаються з більш дорожчих сенсорних вузлів, оснащених мікрофонами та камерами. Проблеми з мультимедійними БСМ містять високе енергоспоживання, високі вимоги до пропускної здатності, обробки даних і техніки стиснення [9]. Крім

цього, мультимедійний вміст зазвичай потребує передачі даних в реальному часі [12,13].

Розташування елементів мережі може бути детермінованим та недетермінованим.

У мережах детермінованого типу розташування вузлів фіксоване і заздалегідь розраховане. Попередньо запланована робота цього сенсорного вузла може бути можлива лише в деяких простих програмах. Розташування вузлів часто неможливо визначити через різні фактори, такі як несприятливі робочі умови та суворе середовище, тому ці мережі називаються недетермінованими, які потребують складної системи керування та визначення координат [6,9,14].

Елементи мережі також можуть бути рухомими або стаціонарними.

Мобільні сенсорні мережі (МСМ) складаються з набору сенсорних вузлів, які можна самостійно переміщувати та взаємодіяти з фізичним середовищем. МСМ є набагато більш універсальними, ніж статичні сенсорні мережі. Шлюз (базова станція) також може бути статичною або рухомою подібно до сенсорних вузлів. Як випливає з назви, базова станція статичного типу включає стабільне положення, як правило, поблизу зони зондування, тоді як мобільна базова станція рухається в області сенсорних вузлів для балансування навантаження [9].

А також у сценаріях стихійних лих, катастроф, війн з якими ми все частіше зустрічається постає необхідність в мобільних рішеннях, які дадуть можливість підтримувати зв'язність між вузлами в умовах зміни їх положення та відсутності звичної нам телекомунікаційної інфраструктури [15].

1.1.2. Способи збору даних з вузлів мобільної сенсорної мережі

Перед МСМ постає багато проблем, які умовно можна поділити на дві групи: обладнання та середовище. В умовах змінного середовища варто розглянути вимоги, які висуваються до обладнання. Серед них можна виділити енергоефективність та низьку вартість, а отже обробляти алгоритми низької складності (необхідні для мікроконтролерів) і використовувати безпроводові технології передачі даних, що не споживають багато ресурсів [8,16]. Також важливим елементом є мобільність вузлів,

що ставить задачу створення відповідних моделей руху (які враховують зміну таких величин як швидкість, прискорення, місцезонашування тощо) відповідно до яких можна змінювати топологію (і призначати ефективні протоколи маршрутизації), регулювати сигнали (для ефективного використання енергії) та інше [17]. Але одним із нових і не менш важливих викликів постає відсутність телекомунікаційної інфраструктури загального користування, а отже і шлюзу передачі даних [6,15].

Для вирішення таких викликів оператори зв'язку використовують пересувні базові станції (ПБС) або мобільні базові станції (МБС) (рис. 1.4). Це технічні пристрої, які можуть бути швидко встановлені та використані для забезпечення мобільного зв'язку у місцях, де відсутнє чи стало недоступним покриття мережі доступу. Це може включати ситуації невідкладної необхідності зв'язку під час надзвичайних подій, масових заходів (концерти, фестивалі, спортивні події тощо), тимчасових будівельних робіт або в інших ситуаціях, коли стаціонарні базові станції недоступні або неефективні.



Рисунок 1.4. Пересувна базова станція Vodafone із використанням системи Starlink [18]

Ці станції можуть мати різні характеристики та функції, що впливає на їхню вартість. Наприклад, більш розширені, потужні та технологічно продумані моделі

можуть бути дорожчими через свої вдосконалені функції, можливості та комплектацію. Тимчасове використання на кілька днів або тижнів зазвичай більш затратне, ніж довгострокове. Додатковою вартістю може бути технічне обслуговування, установка, а також витрати на транспортування та інсталяцію в потрібному місці. Одним з важливих факторів є обмеженість зони використання і значний час необхідний на розгортання та не дуже ефективне використання енергії вузлів, а отже це підкреслює те, що це не універсальне рішення [18].

Іншим варіантом може бути використання транспортних засобів в якості шлюзів (VANET), що дозволить знизити енерговитрати вузлів БСМ. Одним із найрозповсюдженіших сценаріїв є використання рухомих засобів транспорту в населених пунктах для збору/обміну даних з вузлів. Вузьким місцем даних мереж є шляхи руху, які залежать від завантаженості, погодних умов тощо. Також є сценарії в яких неможливо досягти прямої видимості радіозв'язку, а отже це зменшує зону обслуговування [19].

Тому варто розглянути телекомунікаційні аероплатформи на базі БПЛА [20,21,22]. Вони можуть стати частиною телекомунікаційної інфраструктури операторів зв'язку, виконуючи функцію ретрансляції телекомунікаційних сигналів [23] у важкодоступних місцях або в ситуаціях де необхідно в короткі терміни (протягом декількох хвилин) організувати покриття певних зон. На планеті часто трапляються природні катаклізми, стихійні лиха, які руйнують не тільки житлові будинки, а й телеком-інфраструктуру. Тому найбільші оператори зацікавлені в наявності ефективних рішень з відновлення зв'язку за невеликий час, нехай навіть на тимчасовій основі. Важливо дати можливість нужденним допомогти зв'язатися з рятувальними службами в той час, поки йдуть основні аварійно-відновлювальні роботи. Дане рішення допоможе оцінити масштаби руйнувань і дозволити отримати інформацію, необхідну для планування рятувальних робіт [24].

Крім цивільного використання БПЛА з кожним днем займають все більше місце у військовій сфері. Це обумовлено специфічними перевагами, реалізація яких дозволяє отримати суттєву прерогативу над пілотованою авіацією для широкого

спектра завдань. Перш за все це відсутність екіпажу, відносно невелика вартість при масовому виробництві, невимогливість до аеродромного забезпечення.

Для організації мобільної мережі зв'язку типу MANET зазвичай вибирається БПЛА літакового або гелікоптерного типу. Він може підняти корисний вантаж і пересуватися по заданому маршруту, а на борту встановлюється МБС [25]. Для збору даних моніторингу (які невеликі за об'ємом) можна використовувати БПЛА літакового типу, а для встановлення голосового або відео зв'язку необхідно використовувати БПЛА гелікоптерного типу, які можуть розташовуватися в необхідних місцях [7,20,21,22].

Проте навіть в такого способу організації зв'язку можуть виникнути додаткові задачі. Наприклад, пересуваючись по заданому маршруту, у БПЛА літакового типу можуть виникнути відхилення від заданого шляху [26]. Для вирішення цього завдання необхідний оператор, який постійно спостерігає за станом літального апарату, і в разі відхилення від маршруту, за допомогою спеціальних програм має змогу повернути його назад, або відправити на посадку в безпечне місце для виправлення неполадок на землі. Або алгоритм який забезпечує роботу БПЛА у позаштатних ситуаціях [27]. Також для вирішення завдання процесу організації мобільної мережі зв'язку обов'язковим є розрахунок параметрів сигналу в межах зони обслуговування, а також визначати оптимальне місце установки і число базових станцій [28]. Тому варто розглянути особливості функціонування мобільних сенсорних мереж (МСМ) з використанням ТА.

1.1.3. Структура мобільної сенсорної мережі з використанням ТА

На сьогоднішній день розвиток всепроникаючих сенсорних мереж в рамках концепції Інтернету, побудованих на новітніх технологіях безпроводового зв'язку, набуває величезної популярності і знаходить своє застосування в різних сферах людської діяльності. Розвиток в області обчислювальних безпроводових мереж, а також постійне безперервне вдосконалення обчислювальних програмно-апаратних засобів, дозволяє говорити про можливості появи «розумних міст», побудованих за принципом міжмашинних комунікацій (Machine to Machine), що обумовлено

потребою в автоматизації виробничих, технологічних, економічних, суспільних та інших процесів людської діяльності [29].

Необхідність у вирішенні вищезазначених завдань ставить питання про необхідність проектування і розвиток більш складної структури сенсорних мереж не тільки для доповнення існуючих наземних мереж зв'язку, а й для умов відсутності телекомунікаційної інфраструктури. Наземно-повітряні системи, будучи різновидом взаємопов'язаних мереж зв'язку, містять в собі відразу два сегменти сенсорної мережі - наземний сегмент сенсорної мережі на основі стаціонарних або автономних сенсорних вузлів і повітряний сегмент на основі телекомунікаційних аероплатформ, забезпечених автономними вузлами зв'язку [20,21,22,30]. Повітряний сегмент мереж можуть створювати різні типи БПЛА з різними технічними характеристиками, такими як висота, швидкість, час та дальність польоту, вага корисного навантаження та самого літального апарату, його тип та джерело живлення, способи запуску та посадки, керування, ціна [7,15,26,31] (табл. 1.2).

Таблиця 1.2. Повітряний сегмент мережі

Тип ТА	Групи ТА	Джерело живлення	Керування		Призначення
Гелікоптерний	Малі	Електричне	Централізоване	Децентралізоване	Дослідні
Літаковий	Середні	Паливний елемент	Автономне	За участі оператора	Комерційні
Аеро-статний	Тяжкі				Аварійно-відновлювальні
Гібридні					

Що стосується зв'язку, то кожна ТА оснащена певною системою керування, роутером, пристроями накопичення даних, навігаційною системою та двома комплектами трансиверів та антенних систем. Перший комплект для зв'язку між ТА і вузлами БСМ, другий - для радіозв'язку через інфраструктуру загального користування між телекомунікаційною аероплатформою та базовою станцією до наземного центра керування або сервера збереження даних [4,32].

Наземний сегмент - це сукупність безпроводових сенсорних вузлів, розгорнутих у необхідній зоні обслуговування, що здатні змінювати своє місцезнаходження. Сенсорні вузли в цих мережах підтримують протоколи

безпроводових технологій, що самоорганізуються і створюють підмережі або кластери, або протоколи без підтримки самоорганізації [4,33].

Зв'язок між сегментами ТА-вузли підтримується за допомогою протоколів, IEEE 802.11, ZigBee, LoRa, NB-IOT, BLE, RFID тощо. Крім того, необхідно враховувати необхідність збереження цілісності інформації, зібраної з вузлів. Для цього необхідно згрупувати ТА і зберігати інформацію розподіленим способом на випадок виходу з ладу певних ТА [12,33].

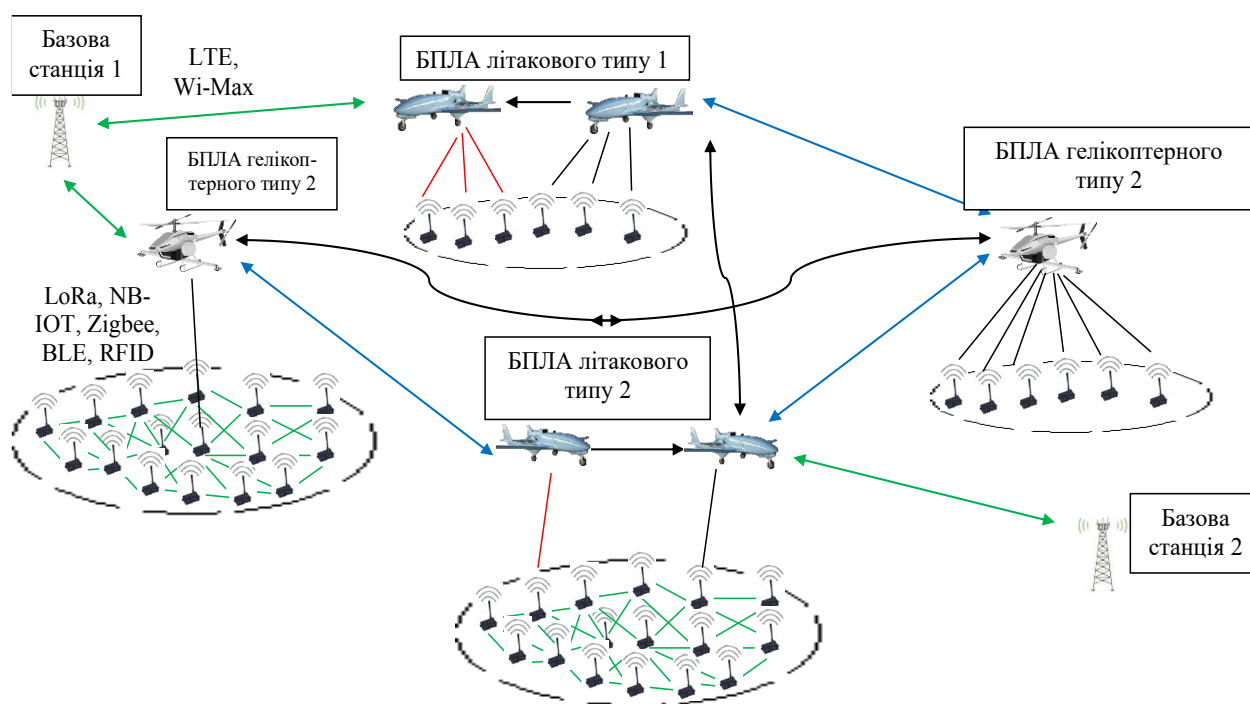


Рисунок 1.5. Структура МСМ з використанням ТА

1.2. Аналіз принципів функціонування МСМ із використанням ТА

1.2.1. Особливості побудови ТА на базі БПЛА

На даний момент в Україні розробляється і випускається велика кількість БПЛА – D-80 та E-300 від AeroDrone, Sparrow від Spaitech, Shark від Ukrspecsystems, Сайконія від DeViro та інші. Як бачимо, на ринку наявна велика кількість різноманітних безпілотних апаратів і цей список поповнюється з кожним днем. Зазвичай їх використовують для військових цілей. Провідні країни світу (в тому числі

й Україна) наразі виявляють великий інтерес до розробки ударних БПЛА, оснащених озброєнням (ракетами), які дозволяють їм вести бойові дії без безпосереднього втручання людини, а також для оперативного надання необхідної інформації про противника. Водночас такі апарати вже давно широко застосовуються у невійськових цілях. Технічні характеристики вантажопідйомності, висоти, швидкості польоту тощо вказують на те, що цілком можлива сумісність для застосувань у телекомунікаційній галузі. Крім того, кожному розробнику під силу змінювати такі апарати під потреби замовника.

Використання безпілотних літальних апаратів (ТА на базі БПЛА) є актуальним та дуже перспективним з кількох причин [7,26,34,35]:

- Ефективність та точність (БПЛА можуть забезпечувати високу ефективність у виконанні різних завдань, таких як розвідка, наведення вогню, контррозвідка, спостереження та збір інформації. Вони здатні працювати без ризику для життя людей і надають можливість отримувати деталізовану та точну інформацію з висоти);
- Мобільність та гнучкість (БПЛА можуть бути швидко розгорнуті та використані у важкодоступних районах або в областях, де рух людей обмежений. Це надає їм можливість бути ефективними у найрізноманітніших умовах);
- Зменшення ризику (використання БПЛА допомагає зменшити ризик для військових осіб, оскільки ці апарати можуть виконувати завдання без присутності людей в небезпечних або ворожих зонах);
- Висока технологічність (розвиток технологій у сфері аерокосмічних систем та супутникового зв'язку [36,37,38] дозволяє вдосконалювати функції та можливості БПЛА);
- Широкий спектр застосувань (БПЛА можуть бути використані в різних сферах, від військових цілей до цивільних, таких як землеробство, охорона довкілля, моніторинг та багато інших) [7,20,21,22,39].

Бортове обладнання БПЛА включає наступні складові (рис.1.6) [21,40]:

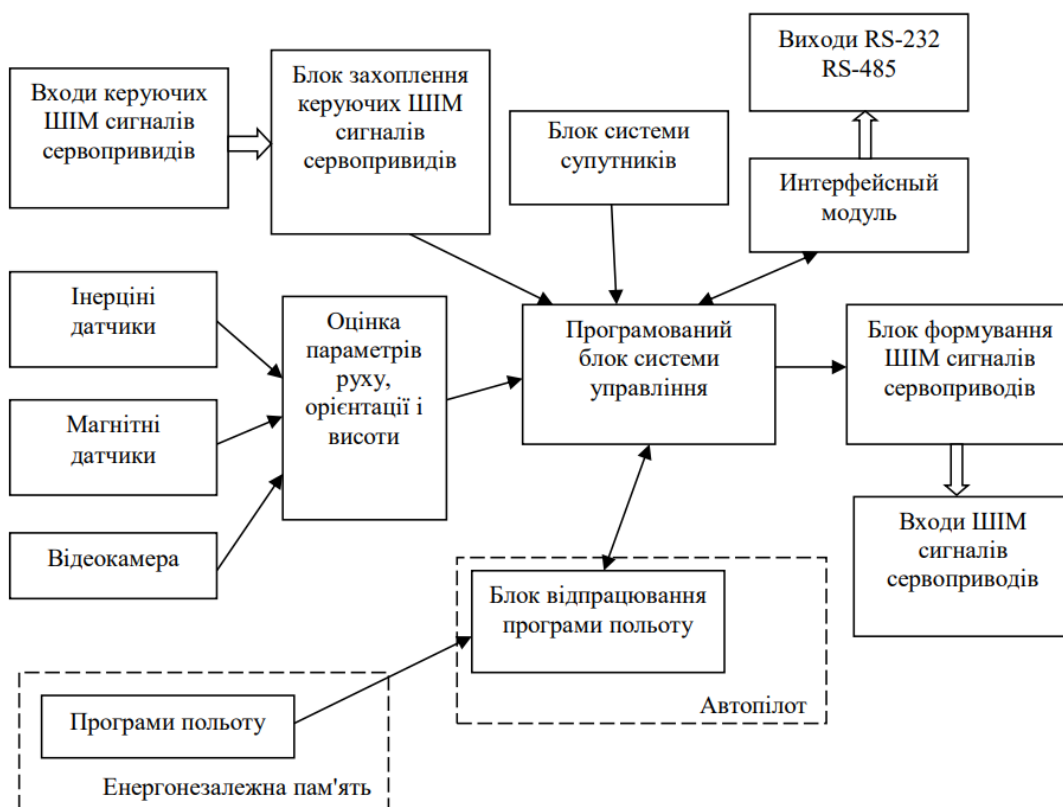


Рисунок 1.6. Структура системи керування БПЛА

- оглядовий курсовий пристрій закріплюється нерухомо під деяким кутом до стройової осі літального апарату, що забезпечує необхідну зону захоплення на місцевості. До складу оглядового курсового пристрою може входити телевізійна камера з ширококутним об'єктивом. Залежно від вирішуваних завдань може бути оперативно замінена або доповнена тепловізійною камерою чи цифровим фотоапаратом [21,40];
- пристрій радіолінії видової і телеметричної інформації (передавач і антенно-фідерний пристрій) повинні забезпечувати передачу видової і телеметричної інформації в реальному або близькому до реального масштабі часу на пункт керування в межах радіовидимості [21,40];
- пристрої командно-навігаційної радіолінії (приймач і антенно-фідерний пристрій) повинні забезпечувати прийом в межах радіовидимості команд пілотування БПЛА і керування його обладнанням [21,40];
- пристрій обміну командною інформацією забезпечує розподіл командної і навігаційної інформації по споживачам на борту БПЛА [21,40];

– пристрій інформаційного обміну забезпечує розподіл видової інформації між бортовими джерелами видової інформації, передавачем радіолінії видової інформації та бортовим пристроєм зберігання видової інформації. Цей пристрій також забезпечує інформаційний обмін між всіма функціональними пристроями, що входять до складу цільового навантаження БПЛА за обраним інтерфейсом (наприклад, RS-232). Через зовнішній порт цього пристрою перед зльотом БПЛА проводиться введення польотного завдання і здійснюється передстартовий автоматизований вбудований контроль на функціонування основних вузлів і систем БПЛА [21,40];

– супутникова навігаційна система забезпечує прив'язку координат (топоприв'язку) БПЛА і спостережуваних об'єктів за сигналами глобальної супутникової навігаційної системи (GPS). Супутникова навігаційна система складається з одного або двох приймачів з антенними системами. Застосування двох приймачів, антени яких рознесені по осі БПЛА, дозволяє визначати крім координат БПЛА значення його курсового кута [21,40];

– бортова цифрова обчислювальна машина забезпечує керування бортовим комплексом БПЛА [21,40];

– пристрій зберігання видової інформації забезпечує накопичення обраної оператором (або відповідно до польотного завдання) видової інформації до моменту посадки БПЛА. Цей пристрій може бути знімним або стаціонарним. В останньому випадку повинен бути передбачений канал знімання накопиченої інформації в зовнішні пристрої після посадки БПЛА. Інформація, зчитана з пристрою зберігання видової інформації, дозволяє проводити більш детальний аналіз при дешифруванні отриманої в польоті БПЛА видової інформації [21,40];

– вбудований блок живлення забезпечує узгодження по напрузі і струмів споживання бортового джерела живлення і пристроїв, що входять до складу корисного навантаження, а також оперативний захист від коротких замикань і перевантажень в електромережі [21,40].

Складові бортового обладнання БПЛА можуть змінюватися в залежності від його енергетичного забезпечення.

1.2.2. Технології передачі даних

Розглянемо основні характеристики безпроводових технологій для НПМ.

LoRa (Long Range Radio) – технологія для розумних міст (в основному призначена для IoT та міжмашинних комунікацій). Архітектура передбачає зіркову топологію, а протокол є малопотужним, що є дуже актуальним для пристроїв що працюють від акумуляторів (часто навіть від незамінних батарей). LoRaWAN має три різних класи кінцевих пристроїв для задоволення різних потреб. Клас А - двонаправлені кінцеві пристрої з найменшою потужністю. Клас В - двонаправлені кінцеві пристрої з певним часом очікування низхідного потоку. Клас С - двонаправлені кінцеві пристрої з найменшою затримкою. Швидкість передачі даних в режимі LoRaWAN коливається від 0.3 кбіт / с до 50 кбіт / с (в режимі FSK) [41].

ZigBee (протокол IEEE 802.15.4). Основні характеристики ZigBee: низьке енергоспоживання, низька швидкість передачі даних, низька вартість і довжина каналу зв'язку до 10 метрів [42].

Розрізняють наступні мережеві елементи (ME) ZigBee [42]:

- Координатор. Будує основу топології дерева мережі, зв'язується з іншими мережами. Кожна мережа включає мінімум один такий ME, так як він виконує первинний її запуск. На нього покладені функції збереження інформації про мережі, паролі.
- Маршрутизатор. Виконує роль проміжного ME, що ретранслює дані з інших пристроїв з можливістю запуску застосунків.
- Кінцевий пристрій. Призначений для збору та обміну даними з ME вищого рівня (координаторами та маршрутизаторами) без можливості обміну даними з іншими пристроями. Для економії енергоресурсу елементів живлення застосовується, так званий, режим очікування у періоди часу коли не відбувається обмін інформацією. Невеликі вимоги до накопичувача, акумуляторів (батарей) дозволяють економити на вартості їх виробництва.

Wi-Fi - це група стандартів безпроводових технологій, які являють собою локальні безпроводові технології, які використовують 2.4 ГГц або 4-6 ГГц діапазони радіохвиль. IEEE 802.11b — працює в частотному діапазоні 2.4 ГГц і забезпечує максимальну швидкість передачі даних 11 Мбіт/с. IEEE 802.11a — працює в частотному діапазоні 5 ГГц (також розділеним на три діапазони, що не перетинаються) і забезпечує швидкість передачі даних до 54 Мбіт/с. IEEE 802.11g є логічним розвитком стандарту 802.11b і повністю сумісний з ним. Він працює в тому самому частотному діапазоні 2.4 ГГц, але забезпечує максимальну швидкість передачі даних у 54 Мбіт/с. Але специфікації 802.11a/b/g на сьогоднішній день є застарілими. Для IEEE 802.11n швидкість передачі даних може сягати до 450 Мбіт/с і набагато більша зона покриття одного передавача за рахунок технології одночасної передачі даних декількома незалежними каналами MIMO (Multiple-Input Multiple-Output). Режимми функціонування MIMO позначаються як число каналів, що працюють на передачу та на прийом (наприклад, 2x3 MIMO: два канали на передачу і три — на прийом). До того ж в пристроях використовується декілька (зазвичай 2 або 3) окремих антени. Частотний діапазон 2.4 та 5 ГГц, смуга пропускання 40 МГц, наявна сумісність із 802.11a/b/g. Стандарт IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5) працює тільки у діапазоні частот 5 ГГц (обернено сумісний із IEEE 802.11a/n 5 ГГц). Граничне значення швидкості передачі даних може бути 7 Гбіт/с. Для цього необхідно використовувати смугу пропускання каналу 80 МГц (опціонально 160 МГц), збільшити кількість просторових потоків, а також застосувати модуляцію 256-QAM. На сьогодні стає все більш розповсюдженим стандарт IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) у якому використовуються смуги у діапазонах 2.4 і 5 ГГц, модуляція 1024-QAM, OFDMA (замість OFDM) та інше, що забезпечує максимальну швидкість до 9.6 Гбіт/с [43,44].

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) - всесвітнє об'єднання мереж для мікрохвильового доступу. Основна перевага полягає у радіусі дії. В залежності від конфігурації передавача, що використовується можна досягати відстані до 50 км. Це дозволяє казати, що WiMAX є можливою альтернативою стільникового зв'язку. Однією із головних задач є забезпечення високошвидкісного доступу до мережі малих та середніх населених пунктів, а також певних районів

(областей та міст). Даний стандарт може забезпечувати передачу поточкових даних, що дозволяє інтегрувати його в існуючу телекомунікаційну інфраструктуру і таким чином уніфікувати всі існуючі мережі на базі WiMAX. Топологія мережі нагадує стільники традиційних LTE-мереж (тільки з більш великим стільником), передбачає розміщення антено-фідерного обладнання на дахах будівель та щоглах при виконанні умови прямої видимості між сусідніми станціями [45].

Розрізняють основні 4 режими доступу WiMAX, а саме [45]:

1) При *фіксованому доступі* (802.16d) використовують діапазон високих частот 10-66 ГГц, що дозволяє об'єднувати МЕ в межах прямої видимості, що знаходяться на великій відстані;

2) *Сеансовий доступ* дозволяє передачу обслуговування (handover) від базової станції з недостатнім рівнем сигналу до базової станції з кращим показником. Це дозволяє досягти мобільності кінцевих МЕ;

3) При *доступі у режимі переміщення* можливе автоматичне переміщення від однієї БС до іншої (базуючись на граничних значеннях рівню сигналу налаштованих для мережі). При цьому використовуються частоти із діапазону 2-11 ГГц, а обмеження швидкості переміщення встановлене у 40 км/год;

4) У *мобільному доступі* (802.16e) діапазон частот звузився до 2-6 ГГц, що дозволило досягти граничної швидкості переміщення у 120 км/год (у стільникових мережах до 250 км/год). Але швидкість передачі даних може бути лише до 15 Мбіт/с

Наступна версія протоколу безпроводової передачі даних WiMAX2 (IEEE 802.16m) забезпечує збільшення швидкості передачі даних до 1 Гбіт/с, 100 Мбіт/с (Mobile WiMAX). Новий стандарт базується на технології MIMO/OFDM, що передбачає використання кількох антен для передачі та прийому даних [45].

Стандарт безпроводового зв'язку Bluetooth зазвичай використовують для обміну інформацією в персональних мережах на невеликі відстані з використанням діапазону частот 2.4 - 2.48 ГГц, а також для синхронізації різних пристроїв (смартфонів, навушників, датчиків тощо). Технологія постійно розвивається, тому із виходом четвертої версії була представлена технологія BLE (Bluetooth Low Energy).

Основними нововведеннями стали: збільшений радіус дії, низьке енергоспоживання та можливість реалізації топології сітка. Актуальна версія 5.3 [46].

Таблиця 1.3. Характеристики безпроводових технологій для БСМ

Параметри	LORA	Bluetooth	ZigBee	IEEE 802.11, IEEE 802.16	NB-IOT
Частоти	867-869 МГц	2.4 ГГц	0.868, 0.91, 2.4 ГГц	2.4, 4 – 6 ГГц, 2-66 ГГц	800, 900, 1800 МГц
Кількість каналів	10	79	1 / 10 / 16	14	12
Швидкість передачі даних	0.25 -5.5 кбіт/с	до 3 мбіт/с	20 - 250 кбіт/с	802.11b - до 11 мбіт/с 802.11g - до 54 мбіт/с 802.11n - до 300 мбіт/с 802.11ac – до 3.39 гбіт/с 802.16e - до 40 мбіт/с 802.16d - до 70 мбіт/с 802.16m - до 1 гбіт/с	100 кбіт/с
Рівень OSI	Фізичний, канальний	Фізичний, канальний	Фізичний, канальний, мережевий	Фізичний, канальний, мережевий	Фізичний, канальний, мережевий
Доступ до середовища	LoRa-модуляція	FHSS	DSSS	DSSS, CCK, OFDM, OFDMA	SC-FDMA, OFDMA
Використання MIMO	Ні	Так	Так	Так	Так
Кількість вузлів БСМ	1024	80	65000	74 2007	До 100000
Рівень потужності	+20 дБм	0-30 дБм	від 0 дБм (1 мВт)	15-30 дБм 23 дБм	0-23 дБм
Витрати енергії на біт		0.153 мкВт/біт	185.9 мкВт/біт	0.00525 мкВт/біт	
Радіус дії	10-15 км	до 200 м	до 10 - 100 м	до 150 - 250 м	До 40км

LTE (Long Term Evolution) – система стільникового зв'язку яка є еволюцією базової мережі GPRS/UMTS/CDMA. Введений задля підвищення продуктивності і спектральної ефективності, пікова швидкість передачі даних низхідної лінії зв'язку 300 Мбіт/с, висхідної - 75 Мбіт/с (при використанні смуги 20 МГц, але можливі і більші значення швидкості передачі даних під час агрегації частот). Також ця технологія підтримує пакетну передачу голосового трафіку (VoLTE), може використовувати як дуплекс з часовим поділом (FDD) так і з частотним (TDD). LTE підтримує гнучку смугу пропускання несучої від 1.4 МГц до 20 МГц. LTE (залежить від доступної оператору смуги пропускання). Усі пристрої LTE повинні підтримувати передачу MIMO [47].

NB-IoT базується на LTE. Якщо говорити максимально простими словами, то смуга 4G складається з роздільних каналів (що піднесуть) по 15 кГц. Несуча в LTE ділиться на ресурсні блоки, кожен із яких складається з 12 піднесучих по 15 кГц. Разом виходить 180 кГц. Кожен ресурсний блок включає 84 ресурсні елементи (сітка 12 на 7). Смуга 5 МГц, де може працювати LTE, включає 25 ресурсних блоків. Для запуску NB-IoT залучається лише один ресурсний блок 180 кГц. Для дальності сигналу підсилюють його на 6 дБ. Це пояснює, чому мережа Інтернету речей має ширше охоплення території, ніж LTE, хоча частота використовується однакова [48]. Як правило, мережа Інтернету речей базується на низьких спектрах частот (800 МГц, 900 МГц, 1800 МГц). Vodafone зробив запуск NB-IoT на 1800 МГц. Надалі з великою ймовірністю також буде використовуватися діапазон 900 МГц. Швидкість передачі даних в NB-IoT досягає 58.8 кбіт/с. Є рішення, завдяки яким це значення можна збільшити максимум до 100 кбіт/с [48]. Зменшення енергоспоживання є наслідком малих значень швидкості передачі даних та зниження кількості реєстраційних процедур, а кількість часу в режимі очікування збільшується (за рахунок перебування кінцевого вузла водному місці). Під час цього режиму базова станція також накопичує інформацію до наступного сеансу передачі. Важливо, що з такої роботи устаткування має бути лише у точці [49].

1.2.3. Використання ТА для керування МСМ

Вузлам мобільних сенсорних мереж необхідно оперативно адаптуватися до того, що топологія мережі, трафік, навантаження та інші мережеві ресурси зазнають частих змін і ефективно їх використовувати. Для інформаційного обміну із заданою якістю в умовах що склалися необхідна ефективна система керування (СК), що відповідає наступним вимогам [1,50,64]:

- забезпечення адаптивного та розподіленого функціонування мережі з можливістю її самоорганізації [1,50,64];
- оптимізація характеристик мережі [1,50,64];
- забезпечення прийняття рішень у реальному (або близького до реального) масштабу часу [1,50,64];

- максимальна автоматизація процесів керування [1,50,64];
- безпека передачі та мінімальне завантаження мережі службовою інформацією [1,50,64].

А особливості СК можна виділити наступні [1,50,64]:

- багатомірність, яка обумовлена значною кількістю підсистем, елементів та зв'язків між ними [1,50,64];
- багатопараметричність, яка визначається різноманіттям цілей окремих підсистем та їх характеристик, вимог та показників ефективності [1,50,64];
- багатofункціональність і ієрархічність, яка визначається необхідністю рішення різних задач на різних умовах функціонування системи [1,50,64];
- значну залежність характеру функціонування від параметрів МСМ і зовнішніх впливів [1,50,64].

Системи керування ТА для БСМ різного призначення можуть мати різні: цілі, етапи, функції, об'єкти керування та вимоги до оперативності (табл. 1.4).

Задачі керування МСМ за допомогою ТА за етапами розділяються на задачі планування, розгортання та оперативного керування [51,52,64].

Етап *планування* здійснюється центром керування НПМ. Беручи до уваги обстановку та наявні ресурси, що можуть змінюватися планування може бути наступним [53,54,55]:

- 1) планування топології НПМ (кількість вузлів, їх розміщення, кількість ТА, їх траєкторія, швидкість тощо), що реалізує певну мету керування мережею на основі вимог до параметрів МСМ та вимог щодо передачі інформації [55,56,57,64];
- 2) розподіл ресурсів мережі (частотних, енергетичних, просторових), параметрів (моніторингу, збору, передачі), визначення методів, алгоритмів керування і режимів роботи [8,53,64].

На етапі *розгортання* відбувається запуск і керування польотом потрібної кількості ТА у задані райони обміну або збору інформації, позиціонування (детерміновано або недетерміновано) вузлів та ініціалізується МСМ. При умовах значних змін топології мережі (знищенні або введенні нових вузлів, додавання нових зон моніторингу, обміну даних тощо) можлива їх реалізація на етапі оперативного

керування. Керування роботою бортових систем і польотом ТА здійснюється у центрі керування (ЦК) [7,54,58,64].

Таблиця 1.4. Задачі керування МСМ за допомогою ТА

Цільова функція	Об'єкт керування	Функція	Етап керування
Забезпечення зв'язності	МСМ	Переміщення	Планування
Забезпечення покриття	ТА або група ТА	Керування мережею	Розгортання
Мінімальний час обміну інформації ($\min T_{\text{обм}}$)	ТА і МСМ	Покриття	Оперативне керування
Максимальний час функціонування ($\max T_{\text{ф}}$)	Рухомий/нерухомий вузол або кластер	Моніторинг	
Мінімальна кількість ТА та/або вузлів ($\min N_{\text{ТА}}$ та $\min N_{\text{вуз}}$);	Маршрут передачі	Збір даних	
Мінімальна енерговитрата джерела живлення ($\min E$)	Напрямок передачі		
Максимальна швидкість передачі даних	Радіоканал		

Оперативне керування відбувається у поточному часі, під час якого здійснюється (децентралізована або централізована) оцінка стану НПМ за встановленими критеріями ефективності і за необхідності приймаються дії по підтримці або оптимізації показників ефективності функціонування МСМ і ТА в заданих межах (виходячи з планування та реальної обстановки).

Задачі керування також поділяються на п'ять наступних функцій [7,23,29,59,60,61]:

1. Переміщення ТА – визначення траєкторії (маршруту) польоту ТА або групи ТА та його координата [27,50,59,56,58].

2. Керування мережею – побудова та зміна топології мережі, маршрутизація, керування навантаженням, радіоресурсом, енерговитратами тощо [8,23,29].

3. Покриття – організація місцеположення вузлів для забезпечення необхідної якості покриття [60].

4. Моніторинг – вибір параметрів моніторингу (таких як зона обслуговування, час, інтенсивність обміну або збору даних), що дасть розуміння типу та об'єму інформації [62].

5. Збір даних залежить від архітектури мережі та відповідного алгоритму (методу збору) [61].

В якості об'єкта керування може виступати вся НПМ (ТА і МСМ), сам ТА (або група ТА), МСМ, вузол або певне угруповання вузлів (кластер), напрямок, маршрут, радіоканал передачі [20].

За цільовими функціями. В умовах гібридного керування (частка функцій виконується ЦК, а друга децентралізовано – вузлами) можна визначити дві взаємозалежні групи [7,52,63,64]:

вузлові – досягнення заданої якості передачі у визначеному радіоканалі, маршруті, напрямі між вузлами, вузлами і ТА [63];

мережеві – оптимізація мережевих або зонових показників ефективності [63];

До останніх можна віднести оптимум наступних параметрів [63]:

$$P_i = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}:$$

P_1 – зв'язність (структурна надійність) мережі, її сегментів, зон;

P_2 – якість (рівень) покриття території вузлами (рухомими та/або стаціонарними);

P_3 – мінімізація часу збору даних ($\min T_{зб}$);

P_4 – максимізація часу функціонування наземного та/або повітряного сегментів ($\max T_{\phi}$);

P_5 – мінімізація кількості ресурсів (стаціонарних та мобільних вузлів, ТА тощо), які необхідно залучити для досягнення заданої мети ($\min N_{ТА}$ та $\min N_{вуз}$) [63];

P_6 – мінімізація енерговитрат вузлами на моніторинг, прийом-передачу в радіоканалах, на моніторинг ($\min E$) при заданій якості обміну даними (інтенсивність, час затримки та інше) НПМ, сегментів, зон, напрямів, маршрутів, радіоканалів [63];

P_7 – максимізація швидкості передачі для мінімально необхідного обсягу службового трафіку, який генерується для організації алгоритмів керування, збору/обміну інформації тощо.

Функціональна модель СК представлена на рисунку 1.7, яка являє собою систему взаємодіючих СК: ЦКМ, СК ТА, СК вузлів [7,64,65,66,67,68,69].

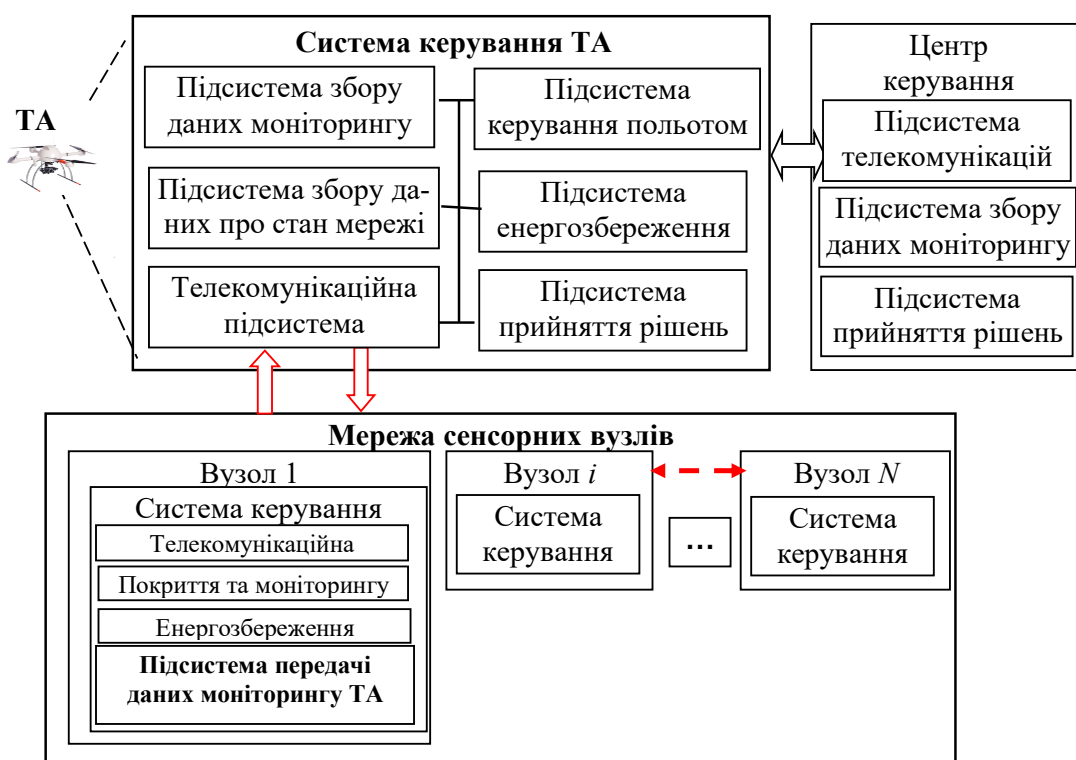


Рисунок 1.7. Функціональна модель системи керування [64]

Кожен сенсорний вузол має систему керування, яка може приймати рішення щодо забезпечення необхідної якості покриття, моніторингу, енергозбереження, збору та передачі даних в координації з іншими наземними та повітряними вузлами. При цьому керуючий вплив вузлової СК реалізується шляхом виконання циклів керування на основі цільових функцій керування. Враховуючи неоднорідність параметрів вузлів, слід зазначити, що при визначені цільовою функції сенсорного вузла СК повинна враховувати також цільову функцію сусідніх вузлів і всієї (або кластерів) МСМ [64].

Розглянемо основні функціональні підсистеми СК [50,52,64,68]:

- підсистема керування польотом відповідає за переміщенням ТА і режими

їх роботи [26,31];

- підсистема покриття та моніторингу визначає способи позиціонування вузлів, тип покриття (об'єкт, площа, бар'єр), його показники, виконує розрахунок сесій спостереження тощо;
- підсистема енергозбереження призвана мінімізувати енергоспоживання вузлів мережі та максимізувати час функціонування мережі при виконанні задачі постійного покриття заданої площі моніторингу та інформаційного обміну;
- підсистема телекомунікацій забезпечує процес обміну даними між вузлами мережі та між вузлами з ТА з заданою якістю [64];
- підсистема прийняття рішень оптимізує показники ефективності для кожного рівня моделі OSI за різних умов роботи мережі та вимог до якості моніторингу і конкретних типів трафіку [64].

1.2.4. Способи обміну даних з вузлами МСМ і необхідні для цього траєкторії польоту ТА

Розглянемо МСМ з використанням ТА, які можуть збирати дані моніторингу з певною затримкою або забезпечувати зв'язок в режимі реального часу [64]. До цього слід додати, що обмін або збір даних відбувається за умов відсутності телекомунікаційної інфраструктури загального користування (наприклад, відсутність базових станцій стільникового зв'язку). У ролі шлюзу виступає телекомунікаційна аероплатформа, оснащена необхідним обладнанням (склад якого було розглянуто вище). Беручи до уваги зазначені умови, візьмемо до уваги послідовний метод обміну та за допомогою головних вузлів в умовах розбиття мережі на кластери [4,7,33,58,64].

При *послідовному зборі/обміні інформацією* [8,55,70,71,72] ТА облітає всю задану зону спостереження за прорахованим маршрутом, збираючи інформацію або виконуючи сеанси обміну з кожним вузлом (рис. 1.8). До переваг можна віднести малу витрату ресурсів (енергії, затримки при передачі даних) наземної частини мережі, але платою за це стає значне навантаження на ТА – велика довжина маршруту, час польоту та загальний час збору та/або обміну даних. Його

використання доречне при сценаріях обміну голосових чи відеоданих або при первинному польоті для з'ясування стану і топології МСМ (вузлів, кластерів) та збору даних моніторингу. Останнє призначення дозволить зібрати мінімально необхідні дані для того, щоб ЦКМ зміг планувати подальші завдання керування [1,4,7,33,64].

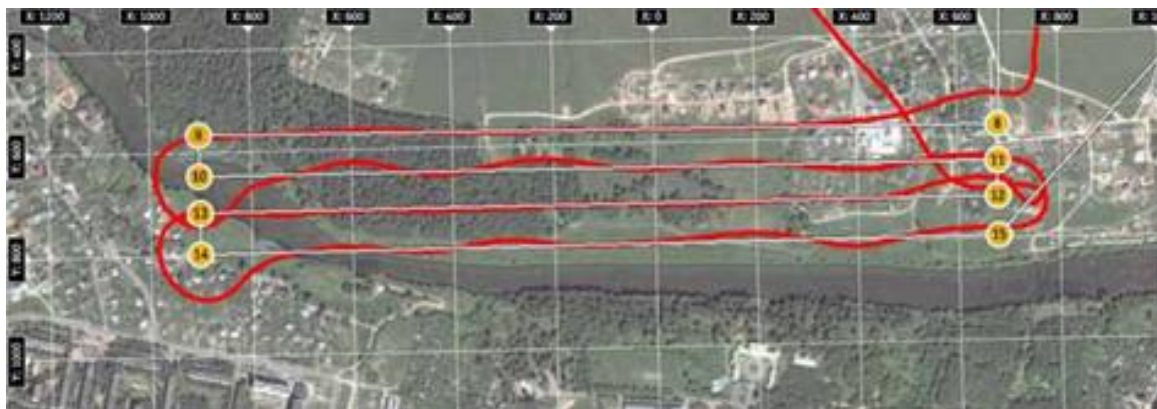


Рисунок 1.8. Маршрут польоту БПЛА при загальному обльоті місцевості

Для зменшення вимог до ТА (мінімізації часу польоту і часу для прийомо-передачі даних, кількості літальних апаратів) використовують спосіб *розбиття мережі на кластери* [8,55,62,64,70,71,72,73] при якому інформаційний обмін виконується між БПЛА та головними вузлами кластерів (ГВК) (рис. 1.9). У цьому методі ГВК виділяються за певним алгоритмом, а мережа самоорганізовується в кластери. У кожному кластері формується топологія і відповідні маршрути передачі даних від звичайних вузлів до головного вузла (які можуть не тільки передавати дані до ТА, а й зберігати їх до моменту встановлення зв'язку). ЦКМ (або СК ТА) потім створює траєкторії польоту і встановлює зв'язок тільки з ГВК. До недоліків можна віднести збільшення навантаження на МСМ у вигляді необхідності використання програмного забезпечення у СК вузлів (до якого входить певний ряд алгоритмів керування), що в свою чергу збільшує кількість службового трафіку [1,4,7,33,58,64,69].

Зменшення довжини траєкторії польоту призводить до скорочення часу збору даних, а БПЛА споживають менше енергії, але тягне за собою збільшення відстані радіоканалу між вузлом і БПЛА та енергоспоживання вузла. Ця проблема розглядається як задача комівояжера, що полягає в пошуку найкоротшого шляху для

БПЛА при відвідуванні певного набору сенсорних вузлів, які обмінюються інформацією з БПЛА. Відомо декілька алгоритмів та методів розв'язання цієї задачі, а саме лінійне цілочисельне програмування, повного перебору, метод гілок та меж, евристичні та генетичні [55,74,75], а також Штейнера, Дейкстри, Белмана-Форда, Флойда-Уоршелла, AStar [8,76]. При збільшенні розміру мережі кількість ітерацій алгоритму збільшується і отримання точного рішення ускладнюється, тому використовують методи отримання приблизного рішення. Найкращим серед проаналізованих методів є алгоритм найдешевшого включення, але він потребує багато ресурсів через велику кількість обчислень, а найменш ресурсоємним – найближчого сусіда. Його принцип полягає в тому, що в траєкторію польоту вузли включені послідовно, щоб кожен наступний вузол був найближче до попереднього [58,77].

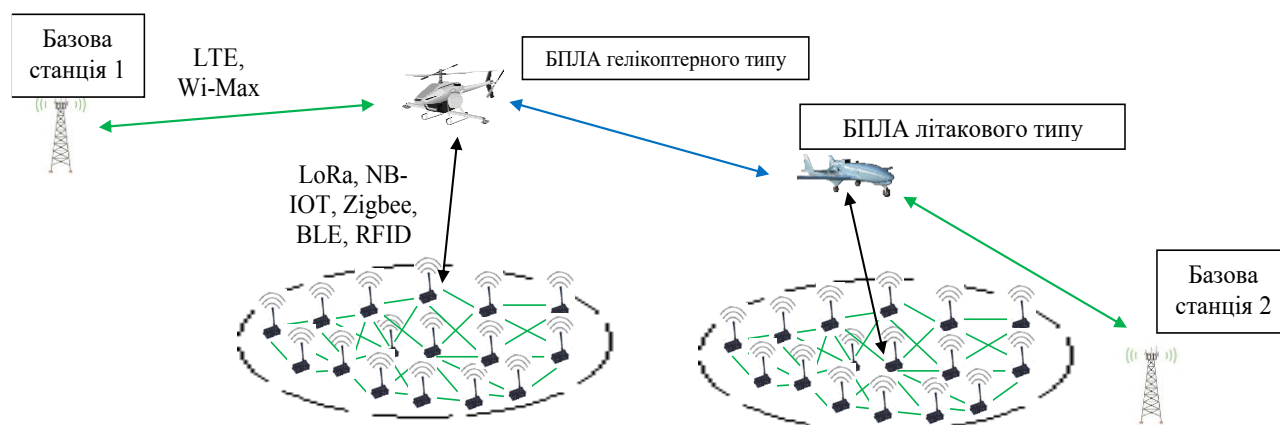


Рисунок 1.9. Схема роботи кластеризованої мережі

Також велике значення займає обчислення висоти польоту БПЛА, бо від неї залежить площа покриття, довжина радіоканалу, енерговитрати кожного елементу НПМ. Варто зазначити, що вузли перебувають в зоні охоплення БПЛА лише обмежений час за який необхідно виконати інформаційний обмін певного обсягу. На час також впливає швидкість передачі даних, обраний протокол канального рівня, кількість антен. Тому має бути виконана оптимізація даних параметрів у заданих завданнях, вимогах при обмежених ресурсах. Було проаналізовано дослідження критеріїв вибору вузлів для забезпечення обміну даних ТА-вузол та оптимізації

даного процесу. Наприклад знайти необхідну кількість антен, найближчі вузли для зменшення траєкторії руху БПЛА, вузли, що є «центром мас» кластера, мінімізувати відстань радіоканалу при умові мінімальної кількості енергії у вузлах тощо [8,30,70,71,72,73,76,78,79,80,81,82].

Серед алгоритмів керування МСМ можна виділити наступні [2,20,27,62]:

1) ефективна кластеризація – процес об'єднання вузлів у кластери, який визначає оптимальну їх кількість, розмір залежно від рельєфу, задач, кількості трафіку тощо [2,20,62];

2) оптимальне призначення ГВК [2,62];

3) визначення та створення найбільш доцільної топології в кожному з кластерів [2,62];

4) застосування протоколу маршрутизації, який забезпечить обмін інформації між звичайними вузлами та ГВК [2,62];

5) планування, застосування та оперативна оптимізація траєкторії польоту ТА [27,35,58,83];

6) прогнозування та аналіз часових рядів (використовується для прогнозування майбутніх значень сенсорів або аналізу часових змін у їхній активності)

Проаналізувавши способи обміну та збору інформації з МСМ за допомогою ТА (на базі БПЛА) можна зробити висновок, що в телекомунікаційній галузі використовують алгоритми або їх поєднання для ефективного виконання задач, проте вони можуть вирішувати поставлені задачі лише частково або недостатньо ефективно (виходячи із постійного зростання потреб), тому актуальним є необхідність їх багатокритеріального вдосконалення. Наприклад, в умовах відсутності класичної телекомунікаційної інфраструктури потрібне підвищення ефективності оцінки зв'язності мережі, що дозволить мінімізувати енерговитрати МСМ, кількість мережевих елементів (ТА, вузлів), часу обміну, збору інформації, максимізувати час функціонування мережі, швидкість передачі даних, а також оптимізувати мережу (кількість кластерів, їх топологію, маршрутизацію та інше) в оперативному режимі [1,15,21,50,62,84].

Тому, актуальною науковою задачею можна вважати розвиток методів використання телекомунікаційних аероплатформ для підвищення ефективності роботи мобільної сенсорної мережі.

1.3. Цілі і постановка задачі дослідження

Аналіз сучасних способів вирішення задачі обміну даних в умовах катастроф, війн тощо [12,13,18,20,24,36,37,38,72] та розглянуті дослідження, які присвячено критеріям вибору вузлів, організації мережі для забезпечення обміну з ТА, спрямованим на поліпшення ефективності процесу обміну показали те, що вони потребують методів, які виведуть їх функціонування на більш якісний та ефективний рівень [4,7,10,11,12,13,30,62,70,71,73,78].

Варто зазначити, що необхідною умовою отримання інформації від сенсорів безпроводових сенсорних мереж в умовах відсутності телекомунікаційної інфраструктури є наявність зв'язності. Зв'язність може бути як локальною (між вузлами підмереж) так і глобальною (встановлюючи зв'язок з усім світом) [90].

Обраний спосіб встановлення зв'язності за допомогою наземно-повітряної мережі також має ряд обмежень як і всі рішення. Тому розглянемо їх детальніше, щоб сформулювати задачі, які необхідно вирішити:

1. В якості ТА використовують велике розмаїття безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Вони мають необхідне обладнання: систему керування, роутер, пристрої накопичення даних, навігаційну систему та два комплекти трансиверів та антенних систем (один для встановлення зв'язності з іншими БПЛА або з традиційною телекомунікаційною інфраструктурою, другий – з вузлами). Якщо розглядати реальну задачу організації НПМ, то кожен БПЛА може бути або маршрутизатором, або звичайним вузлом збору/обміну повітряного сегмента мережі. Їх функціонування потребує значних ресурсів (кількості палива та самих ТА) у зв'язку з великою площею покриття та кількістю вузлів, що ставить задачу оптимізації мережі. Необхідно розробити структуру мережі яка врахує різні способи збору та обміну даними, типи БПЛА, зменшить їх кількість $N_{ТА}$, необхідну кількість

мінімальної енергії мережевих елементів E_{ME} , час збору/обміну інформації, швидкість передачі даних та інше.

2. Енергоефективність вузлів також має велике значення. Абсолютна більшість має обмежену кількість функцій, системи навігації, антени всеспрямованої дії, забезпечена часто одноразовими джерелами живлення. Такі антени нераціонально використовують і без того обмежений заряд батареї/акумулятора. Відстань каналу зв'язку залежить від передавачів вузлів, які мають малу потужність. До того ж швидкість передачі даних залежить від цієї довжини і обраної технології обміну інформації. Час передачі даних ТА-вузол не повинен перевищувати час на який встановлюється зв'язність між вузлом і ТА. Тому необхідно розглянути можливість використання антен інших типів, які допоможуть збільшити час функціонування кінцевих пристроїв, а отже, увесь час роботи мережі в цілому.

3. Змінена структура мережі та її технічні особливості ставлять нову задачу - ефективний алгоритм пошуку положення та переміщення БПЛА для досягнення необхідних цілей керування при зборі/обміні інформацією. До системи збору/обміну інформації задаються необхідні вимоги: граничний час передачі даних, мінімальний час функціонування мережі (задана кількість обльотів та їх маршрути), гранична кількість БПЛА, вартість обладнання та експлуатації та ін. Так як існуючі методи вирішуватимуть цю задачу лише частково і буде відсутнє комплексне рішення проблеми стає зрозумілою актуальність і необхідність вирішення даної проблеми.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Майже кожного дня виникають нові технології, ідеї, методи та їх вдосконалення, які пришвидшують настання ери «розумного світу», що свідчить про те, що сенсорні мережі та передача інформації між вузлами ґрунтовно проникають в нові сфери нашого життя. До особливостей БСМ можна віднести необхідність великої кількості вузлів для покриття величезних площ, що створює необхідність в обмежених ресурсах таких пристроїв для максимізації часу функціонування без втручання людини.

Розповсюдженням явищем стають сценарії при яких звичні для кожного способи обміну інформації стають недоступні. Наприклад, стихійні лиха, катастрофи, війни тощо. Тому постає необхідність в тимчасових рішеннях, які дадуть можливість підтримувати зв'язність між вузлами. В нашій країні останніми роками ця потреба тільки збільшилася. Також постає необхідність у використанні вузлів не тільки для збору інформації, а й для обміну (голосовий, відеотрафік), а в умовах, що змінюються – необхідність у мобільності.

2. Аналіз функціонування МСМ у складних умовах показав, що кращим способом збору/обміну інформації є використання ТА на базі БПЛА. Використання БПЛА має очевидні переваги над іншими методами, такі як коротший час збору даних, відсутність спеціальних маршрутів (якщо порівнювати з використанням транспортних засобів в якості шлюзів), широка зона покриття та пряма видимість через канали радіозв'язку (у порівнянні з МБС). Крім того, вони дозволяють організовувати зв'язок за відсутності телекомунікаційної інфраструктури загального користування з утворенням мереж, які не пов'язані одна з одною. Великою перевагою є можливість об'єднання безпілотних літальних апаратів у групи, що дозволить організовувати їх у мережі і створювати нові маршрути передачі даних.

3. Розглянуто принципи роботи БПЛА, БСМ та технології передачі даних, які необхідні для створення, керування, оптимізації НПМ. Як і будь-яка складна система, вона має ряд складних завдань і проблемних місць. Наприклад, формування маршруту обльоту БПЛА, місць збору/обміну даних, максимізація часу функціонування мереж, мінімізація витрат ресурсів тощо. Для підвищення ефективності зазначених параметрів необхідна система керування мережею, у склад якої входять підсистеми керування ТА і вузлів. До того ж вона дозволить оптимізувати мережу (змінювати топологію МСМ, кількість БПЛА, маршрути польоту та інше) для більш доцільного використання наявних ресурсів.

4. Проаналізувавши алгоритми і методи обміну та збору інформації з МСМ за допомогою ТА можна зробити висновок, що в телекомунікаційній галузі використовують алгоритми або їх поєднання для ефективного виконання задач, проте вони можуть вирішувати поставлені задачі лише частково або недостатньо ефективно

(виходячи із постійного зростання потреб), тому існує необхідність їх багатокритеріального вдосконалення.

5. Висунуто ідею створення структури наземно-повітряної мережі, яка забезпечить ефективну зв'язність вузлів МСМ із врахуванням можливості використання телекомунікаційних аероплатформ в умовах відсутності комунікаційної інфраструктури.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА МЕТОД ПІДТРИМКИ ЗВ'ЯЗНОСТІ МОБІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ СЕНСОРІВ СПРЯМОВАНОЇ ДІЇ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ АЕРОПЛАТФОРМ РІЗНОРІВНЕВОГО РОЗТАШУВАННЯ

2.1. Система прототип МСМ із ТА

Розвиток MANET мереж призвів до необхідності ефективного вирішення проблем збору та обміну інформації з вузлів за допомогою телекомунікаційних аероплатформ. Сучасна система НПМ, яка розгортається в умовах надзвичайних ситуацій складається з вузлів МСМ та БПЛА різного типу [4,7,12,15,20,21,22,33].

Сенсорами (тобто датчиками первинної інформації) можуть бути оснащені механічні пристрої, які розташовуються стаціонарно чи пересуваються по поверхні за допомогою спеціальних пристроїв пересування або разом з людиною, яка є рятувальником чи виконавцем пошукових робіт в зоні надзвичайної ситуації. Мова йде про територію, земну поверхню чи акваторію морів або океанів де телекомунікаційна інфраструктура відсутня через певні катаклізми, природні або техногенні аварії, катастрофи [90]. Крім того, сенсорні вузли і ТА використовують одне і те ж обладнання, підтримують один і той же протокол обміну інформацією, мають свої власні системи управління, позиціонування, взаємодіють один з одним, а отже, кожен вузол мережі може обирати певний метод передачі інформації (послідовний, кластерний тощо). У кожного вузла достатній обсяг пам'яті для накопичення даних при відсутності радіоканалу. При його встановленні відбувається передача та/або обмін інформацією за визначеним методом. Якщо розглядати метод кластеризації, то вузол може мати різну функцію: маршрутизації, ГВК, мультимедійну, моніторингу [4,6,7,15,20,33,62,90].

БПЛА може рухатися у трьох площинах із неоднаковою швидкістю, прискоренням, розташовуватися на різних рівнях над поверхнею землі і мати різний рівень енергетичного та телекомунікаційного забезпечення, а також різні можливості з точки зору дистанційного збору та обміну інформації з вузлів безпроводових

сенсорних мереж [26,27,50,90]. Кожна ТА має на борту роутер та здатна приймати, обробляти, передавати дані, забезпечувати їх обмін із базовою станцією або найближчою ТА для подальших дій. Також міститься система керування у кожному мережевому елементі НПМ, яка дозволяє не тільки координувати роботу мережі для глобальної зв'язності, а й працювати автономно в умовах відсутності зв'язку з центром керування [1,4,15,21,22,33].

Метод послідовного обміну інформацією (рис. 2.1) потребує встановлення прямого каналу зв'язку з кожним вузлом, а отже маршрут польоту буде досить довгим [4,55]. Цей спосіб не потребує складних алгоритмів керування обміном даних, що дає змогу зробити мережеві елементи більш дешевими та енергоефективними. Але значний час збору та необхідність використання значних ресурсів ТА змусив розробляти нові способи. Наприклад, пропонувалося об'єднувати вузли в кластери за допомогою ТА (що виконує роль ГВК), які самоорганізуються [58,62,79]. При цьому центр керування мережею збирає координати вузлів на основі яких розраховує місця обміну інформації для ТА за допомогою відносно простих алгоритмів k-середніх та FOREL та їх модифікацій [3,33,70,82]. Після цього ЦК розраховує польотний маршрут, який складається з попередньо розрахованих точок обміну даними [2,56]. Проте у кожного способу є свої переваги і зазвичай використовують декілька методів одночасно в залежності від сценарію, тому розглянемо процес функціонування класичних (однорівневих) НПМ більш детально.

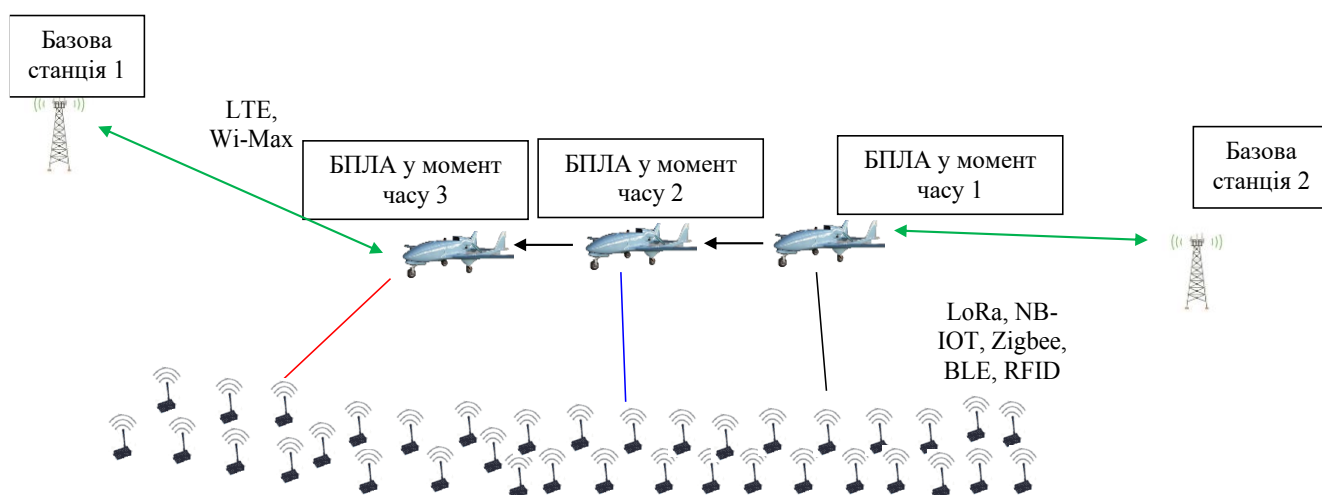


Рисунок 2.1. Метод послідовного обміну

2.1.1. Особливості організації польоту та місць обміну інформації

Перш за все кількість точок обміну інформацією та їх місцезнаходження, польотний маршрут потрібно розрахувати [1,2,27,50,56,58] для того, щоб цільові функції керування (зазначені в табл. 1.4) були виконані при заданих обмеженнях [85,86]:

1. Мінімізація часу обміну/збору даних або встановлення необхідного обмеження $T_{обм} \rightarrow \min$ або $T_{обм} \leq T_{обмнеобх}$. При цьому час обміну розраховується наступним чином $T_{обм} = \frac{L}{v}$, де L – довжина маршруту БПЛА (ТА), а v – його швидкість. У випадку кластеризованої мережі $L = f(n_{кл}, (x, y)_k, h, t_{обк}, St)$, $k = 1 \dots n_k$;

2. Максимізація часу функціонування мережі або встановлення мінімально необхідного часу $T_{ф} \rightarrow \max$ або $T_{ф} \geq T_{фнеобх}$;

3. Мінімізація кількості ТА або встановлення обмеження (наявної кількості) $N_{ТА} \rightarrow \min$ або $N_{ТА} \leq N_{ТАнаявне}$;

4. Допустимий діапазон швидкостей $v = [v_{min}, v_{max}]$;

5. Кількість кластерів $n_{кл} = [1; n_{клmax}]$;

6. Координати розташування ГВК $(x, y)_k$, які мають знаходитися в зоні покриття;

7. Максимально можлива енергія джерел живлення вузлів і ТА $e_i \leq e_{imax}$, $e_{ТА} \leq e_{ТАmax}$;

8. Час обльоту $t_{обк}$ кожного k -го кластера залежить від обраної стратегії польоту (із множини St) і має перевищувати час передачі даних між всіма вузлами і ТА $t_{обк} \geq t_{перк}$

Далі необхідно виконати певну кількість задач для синтезу методів обміну/збору даних з вузлів МСМ за допомогою ТА (табл. 2.1) [4,56,58,63,85,86]:

1. Обрання способу обміну/збору інформації: послідовно з кожного вузла мережі (обліт кожного вузла, обліт території розташування МСМ), з обльотом кластерів МСМ.

2. Обрання способу прийняття рішень керування: ізолювано (ЦКМ, СК ТА, СК вузла МСМ), кооперативно (при взаємодії СК усіх мережевих елементів та ЦКМ), якщо відомий або невідомий стан вузлів, централізовано/децентралізовано [69].

Таблиця 2.1. Синтез методів обміну інформації з вузлами БСМ із використанням ТА

Метод	Прийняття рішень	Характеристики кластера	Траєкторія обльоту ТА	Функції керування	Модель польоту
Послідовний	ЦКМ, ТА	Кількість кластерів, вузлів в кластері	Загальна (вся МСМ)	Мінімізація часу збору	Зі сталою швидкістю
За допомогою кластерів	Вузлами	Розрахунок зон покриття	Із врахуванням сформованих кластерів	Максимізація часу функціонування БСМ	Із адаптивною швидкістю
	Кооперативно	Вибір точок обміну/ збору ТА		Мінімізація кількості ТА	Негарантована якість обслуговування
	Наявність у ТА стану вузлів БСМ	Визначення моделі обміну даними		Мінімізація довжини маршруту польоту	Гарантована якість обслуговування
	Відсутність у ТА стану вузлів БСМ	Визначення стратегії обльоту кластера		Мінімізація службового трафіку	Із відомими координатами
	Централізовано				Без відомих координат
	Децентралізовано				

3. При кластеризації мережі необхідно [1,4,20,56,58,62]:

3.1. Розрахувати розмір кластерів та їх кількість (в залежності від цільової функції керування мережею і стану мережі потрібно виконати оптимізацію даних параметрів).

3.2. Обрати (за допомогою певного алгоритму) місця обміну/збору інформації.

3.3. Обрати модель (алгоритм) обміну інформацією між вузлами та БПЛА.

3.4. Обрати стратегію та параметри польоту БПЛА за визначеною цільовою функцією (розрахунок та оптимізація маршруту БПЛА).

4. Розрахувати маршрути послідовного (обліт всієї мережі) та кластерного польоту (з урахуванням місць обміну/збору інформації). Одним із варіантів може бути розрахунок послідовного польоту ЦКМ, а оптимізація кластерного польоту – БПЛА після отримання первинної інформації (стан мережевих елементів, їх ресурси тощо).

5. Виконання пріоритезації обраних вище цільових функцій для керування процесом обміну інформації.

6. Обрати модель польоту на основі наявних координат (або при необхідності їх встановлення) вузлів із наявним діапазоном можливих швидкостей (сталого або адаптивного) руху (з або без гарантії обслуговування)

Розглядаючи пункт 4 можна зрозуміти, що задача організації польоту складається з двох етапів. На першому найкоротший маршрут будується за допомогою одного з відомих алгоритмів рішення задачі комівояжера [74,75] і при цьому розраховується швидкість, висота польоту тощо. На другому етапі БПЛА корегує параметри польоту при досягненні кожного кластера в залежності від його характеристик (кількості вузлів, їх місцезнаходження, енергетичний залишок, обсяги необхідних даних для обміну тощо), від власних характеристик (палива, заряду та інше) і цільових функцій керування мережею. Якщо в мережі наявний вузол з більшим (відносно інших) запасом енергії, то обмін даними з ним може відбуватися на більшій відстані або з меншим пріоритетом, або з більшою швидкістю, що дасть можливість використати наявний ресурс ТА для інших вузлів з меншим запасом енергії. Також варто розглянути можливі моделі польоту [1,4,32,50,58]:

1. У базовій моделі політ виконується зі сталою швидкістю на всіх ділянках маршруту, що спрощує керування БПЛА і не створює додаткових вимог до нього. Сумісна для БПЛА як літакового, так і гелікоптерного типів, інформаційний обмін починається при створенні першого каналу зв'язку ТА-вузол, час який затрачається на

нього рівний часу польоту через кластер, а дані, які не встигли передатися, “чекають” наступного обльоту. При цьому для встановлення зв’язності з ЦКМ та усім світом необхідне встановлення каналу ТА-базова станція.

2. У *другій моделі* наявна додаткова можливість – підвищення швидкості польоту БПЛА, що висуває додаткову вимогу до них, але так само може реалізовуватися у літаковому та гелікоптерному типах.

3. *Модель з адаптивною швидкістю польоту* зазвичай використовується у сценаріях, які потребують різної швидкості передачі даних. Так у сценаріях війн, техногенних катастроф є необхідність у передачі аудіо та відео саме у певний проміжок часу (цей параметр також потребує адаптації для гарантованої передачі даних). Прийняття рішення про зміну швидкості польоту, часу затримки при передачі даних, швидкості передачі даних покладається на ЦКМ або СК ТА (у взаємодії з СК цільового вузла).

4. *Модель з гарантованою якістю обслуговування* передбачається для використання у сценаріях передачі інформації в реальному часі. При незмінній швидкості передачі даних БПЛА розраховує час необхідний на обмін даними, який при необхідності може бути збільшено.

5. *Модель з обмеженим часом обміну/збору інформації* застосовується у сценаріях обмежених ресурсів БПЛА, при наявності певного “некритичного” об’єму даних у вузлах, який можна передати у наступні сеанси зв’язку, а також при наявності великої кількості таких вузлів, які потребують передачі встановленої кількості інформації за кожний політ БПЛА. Також слід зазначити, що дана модель корисна у випадках бойових дій при необхідності оперативної зміни положення ТА [32].

Однією з головних задач функціонування МСМ є визначення місцеположення вузлів. Тому розглянемо способи за допомогою яких БПЛА може отримати ці дані [2,4,32,50,57]:

1. Створення таблиці координат при первинному розміщенні вузлів.

2. У випадку недетермінованого розміщення вузлів ТА здійснює первинний послідовний обліт усієї зони, результатом якого є дані про їх місцеположення та стан. Визначення координат може виконуватися за допомогою рівня сигналу від вузла (на

кшталт стільникових мереж), за допомогою системи позиціонування/навігації вузла або кооперативним способом. При цьому може бути виконано первинний обмін/збір даних та створення топології мережі.

3. У сценарії створеної зв'язності усіх мережевих елементів МСМ (в тому числі зі шлюзом традиційної телекомунікаційної мережі) ЦКМ може оперативно оновлювати дані координат та стану вузлів при кожному встановленні з'єднання ТА-вузол. На основі цих даних може оптимізуватися топологія мережі.

Прийнято вважати, що площа покриття ТА зв'язком є колом певного радіуса R , яке створює кластер, а обмін може виконуватися в будь-якій його точці (рис. 2.2). Це створює задачу, яка полягає у розрахунку та мінімізації кількості кластерів $C = \{C_1, C_2, \dots, C_j, \dots, C_J\}, j = \overline{1, J}$ (а отже і місць обміну інформації і БПЛА необхідних для цього) при наявності заданої кількості вузлів $T = \{T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_n\}, i = 1 \dots n$ у мережі з певними координатами $X = \{(x, y)_1, \dots, (x, y)_i, (x, y)_n\}$. Радіус кластера розраховується наступним чином $R = \sqrt{d_{max}^2 - h^2}$, де d_{max} – максимальна відстань каналу зв'язку ТА-вузол, а h - висота польоту. Ця задача належить до класу обчислювальної геометрії і подібна до задачі про розташування р-центрів - знаходження мінімальної кількості кіл фіксованого радіуса, що покривають задану кількість точок та їх розташування [87]. Оскільки задача є NP-повною і для мереж високої розмірності важко отримати точний розв'язок, то її необхідно розв'язувати за допомогою евристичних методів пошуку. Для отримання розв'язку було запропоновано використовувати ітераційні алгоритми кластерного аналізу FOREL (FORmal ELeмент) та k-середніх [3,32,33,88].

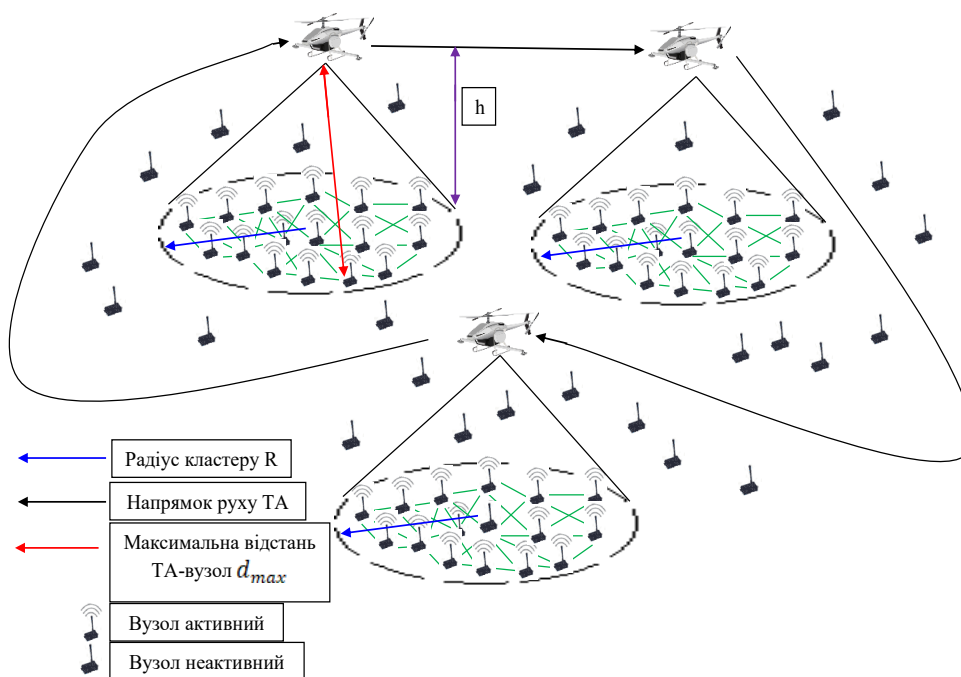


Рисунок 2.2. Ілюстрація покриття ТА вузлів MCM

Зазначені вище алгоритми кластеризації дозволяють отримати різні прийнятні рішення, в тому числі близькі до оптимальних. Тому доцільно використовувати їх поєднання і обрати найбільш близьке рішення для досягнення заданої цільової функції управління мережею з урахуванням наявних ресурсних обмежень. Для цього запропонований наступний алгоритм [2,3,32,33]:

1. Аналіз вихідної інформації та визначення даних для початку пошуку рішення кластеризації: застосування визначеної кількості БПЛА (k) для методу k -середніх і величина радіуса зони покриття R для методу FOREL.

2. Пошук рішення за допомогою кожного методу: поділ MCM на визначену кількість БПЛА (кластерів) для методу k -середніх та поділ мережі на мінімальну кількість кластерів за вказаною величиною R для методу FOREL.

3. Аналіз результатів кластеризації при обмеженнях на кількість БПЛА, вузлів, ступеня досягнення цільових функцій керування.

4. Якщо допустиме рішення не знайдено, то необхідно змінити кількість БПЛА k або значення радіус зони покриття R і повернутися на другий крок. Якщо рішення знайдено, то перейти до наступного (п'ятого) кроку.

5. Оцінка переваг отриманого рішення і затвердження його до використання, інакше – повернення до попереднього пункту. Результатом має бути оптимальне рішення (яке використовує переваги двох методів), що задовольняє визначену цільову функцію керування при заданих обмеженнях.

Наступним важливим етапом є оперативна зміна маршруту польоту. Так як ця задача є багатокритеріальною було запропоновано надати критеріям певний пріоритет. Виходячи з цього виконується пошук оптимального рішення для кожного критерію згідно з його важливості. Також є допустимим певні поступки (втрата результативності) на заданий відсоток для усіх (або певних) критеріїв. Тому варто розглянути цей процес більш детально [3]:

1. При умові першого пріоритету мінімізація часу обміну/збору $T_{обм}$ даних (або встановлення певного значення) потрібно розрахувати як можна меншу кількість місць обміну/збору інформації (за допомогою існуючих методів кластеризації), з'єднуючи ці місця прямими отримати траєкторію і виконувати обліт на як можна більшій швидкості (залежно від пріоритету інформації яку необхідно передати) та/або як можна меншій відстані до вузлів. Також $T_{обм}$ залежить від кількості ТА, їх технічних можливостей у різних умовах навколишнього середовища.

2. Для максимізації часу функціонування мережі $T_{ф}$ необхідно застосувати правила енергоефективності вузлів:

2.1. Зменшення відстані ТА-вузол, тобто підбір мінімальної висоти польоту і відповідно радіуса R зони покриття;

2.2. Для вузлів з малою кількістю енергії джерела живлення політ виконувати на граничній відстані;

2.3. Обрання місць обміну інформації найближчих до маршруту польоту (рис. 2.3);

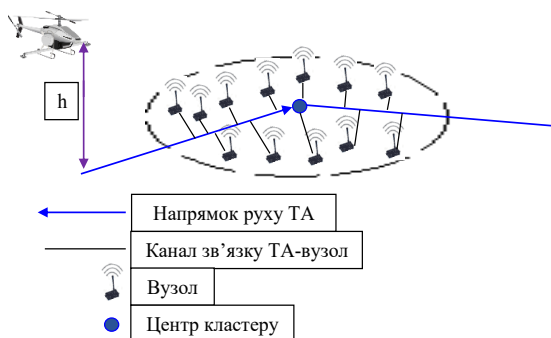


Рисунок 2.3. Маршрут польоту з обранням найближчих місць обміну інформації

2.4. Розбиття вузлів на підкластери (за умови узгодженої роботи між собою як в Mesh мережах) з визначенням найближчого вузла до маршруту польоту. Таким чином зменшуючи енергозатрати крайових вузлів у кластері;



Рисунок 2.4. Маршрут польоту з обранням найближчих місць обміну інформації при узгодженій роботі вузлів

2.5. Мінімізація рівня потужності зі збереженням необхідних параметрів каналу зв'язку (відношення сигнал/шум SNR, CQI, RSRQ, ймовірність бітової помилки BER тощо) між мережевими елементами.

3. Мінімізація кількості ТА досягається за рахунок мінімізації кількості кластерів при використанні алгоритму кластеризації [3] та можливістю використовувати БПЛА поступово [32].

6. Перевірка вимоги $T_{обмmin} \leq T_{обмнеобх}$. Якщо так, то зменшити висоту польоту h (пункт 6.11) та виконати перевірку $R < R_{min}$ (пункт 6.12). Якщо так, то перейти до пункту 7, інакше – до пункту 2. Якщо перевірка пункту 6 не пройдена, то перевірити наявність вільних ТА (пункт 6.01). Якщо ні, тоді завершити алгоритм, а якщо так – додати ще один ТА, розбити маршрут на нову кількість літальних апаратів (пункт 6.03) з виконанням алгоритму для кожної підмережі і перейти до пункту 2.

7. Реалізація правил 2.2 (з перевіркою $T_{обм} \leq T_{обмнеобх}$), 2.3, 2.4 з розділу 2.1.1.

8. Якщо всі правила використано, тоді завершити алгоритм. Якщо ні – перейти до пункту 7.

Як було зазначено у розділі 2.1.1. оперативна зміна маршруту траєкторії польоту є багатокритеріальною задачею і у вихідних даних може бути надано пріоритет критеріям і певні допустимі поступки (втрата результативності) на заданий відсоток для них. У випадку вищого пріоритету функції мінімального часу обміну у пункті 4 алгоритм розподіляє траєкторію між усіма ТА, а початкова реалізація алгоритму із значенням радіуса $R = R_{max}$ мінімізує кількість місць обміну/збору, а отже і час обміну інформації. При виконанні умови $T_{обм} \geq T_{обмнеобх}$ зменшуємо потужність передачі, зменшуючи радіус і виконуючи інші необхідні правила. Але мінімізація кількості ТА $N_{ТА}$ досягається додаванням лише одного ТА для задоволення певних вимог.

Проаналізувавши даний метод і структуру НПМ можна сказати що є наступні слабкі місця [32]:

1. Для досягнення необхідного часу обміну $T_{обмнеобх}$ при умові що $T_{обмmin} \geq T_{обмнеобх}$ потрібно або збільшувати швидкість руху ТА, або їх кількість;

2. Для збільшення швидкості передачі даних або мінімізації витрат енергії вузлів необхідно зменшувати відстань каналу зв'язку ТА-вузол, що призводить до витрати додаткових енергоресурсів ТА [32];

3. Необхідність у досягненні компромісу при встановленні пріоритезації цільових функцій.

Виходячи із існуючих проблем було запропоновано вдосконалити архітектуру НПМ шляхом додавання другого рівня ТА із збільшеним енергетичним забезпеченням. Розглянемо її особливості більш детально.

2.2. Математична модель підтримки зв'язності ММССД з використанням ТА дворівневого розташування із різним енергетичним забезпеченням

Розглянемо перший науковий результат – математичну модель задачі. Ця математична модель дозволяє моделювати як умови існування, так і відсутності зв'язності ММССД з ТА різнорівневого розташування та енергетичного забезпечення, а також обчислювати чисельні значення складових векторного критерію, за якими можна виконати кількісне оцінювання ефективності цієї зв'язності.

2.2.1. Багатокритеріальна математична модель оцінки зв'язності

Кількісні значення скалярних критеріїв $W_i(X)$ ($i = \overline{1,11}$), що є складовими векторного критерію

$$W(X) = \begin{bmatrix} W_1(X) \\ \vdots \\ W_{11}(X) \end{bmatrix}$$

де X – вектор керуючих параметрів, а його приналежність області допустимих значень G обчислюється за допомогою алгоритмічно заданої моделі функціонування ММССД з ТА різнорівневого розташування із різним енергетичним забезпеченням (рис. 2.6).

Складові вектору керуючих параметрів X :

- потужності передавачів вузлів, ТА першого та другого рівня;
- коефіцієнт підсилення антен вузлів та просторова орієнтація променю (азимут, кут місяця);
- робоча частота, смуга пропускання;
- кількість та розміри кластерів;

- час сну вузлів.

На основі фізичного змісту задачі слід сформувати область допустимих значень G для записаних вище керуючих параметрів.

Для багатокритеріальної математичної моделі було сформовано набір критеріїв $W_i(X)$ ($i = \overline{1,11}$) із переліку методичних рекомендацій МСЕ-Р та програмного комплексу Matlab:

$W_1(X)$ – час передачі інформації усереднений за кількістю сенсорів, с;

$W_2(X)$ – швидкість передачі інформації усереднена за кількістю сенсорів, біт/с;

$W_3(X)$ – кількість безпосередньо задіяних ТА усереднена за кількістю сенсорів, шт.;

$W_4(X)$ – максимальна кількість ТА, шт.;

$W_5(X)$ – медіана кількості ТА, шт.;

$W_6(X)$ – мода кількості ТА, шт.;

$W_7(X)$ – довжина маршруту усереднена за кількістю сенсорів, м;

$W_8(X)$ – максимальна довжина маршруту, м;

$W_9(X)$ – мінімальна довжина маршруту, м;

$W_{10}(X)$ – медіана довжини маршруту, м;

$W_{11}(X)$ – мода довжини маршруту, м.

Параметри математичної моделі, які вважаються незмінними:

1. Характеристики вузлів (кількість $N_{\text{вуз}}$, тип батареї, її ємність, формфактор);
2. Характеристики ТА (кількість ТА 1-го $N_{\text{ТА1}}$ та 2-го рівнів $N_{\text{ТА2}}$, тип джерела живлення, швидкість, висота польоту або діапазон висот);
3. Площа на якій вони розташовуються та маршрути переміщення;
4. Координати вузлів і ТА в момент передачі інформації (при розгляді сценарію квазімобільності);
5. Об'єм даних (зокрема і службового) V_i i -го вузла, що необхідно передати, $i = \overline{1 \dots N_{\text{вуз}}}$;
6. Топологія та маршрути передачі даних з вузлів МСМ до супутника через ТА;
7. Можливості взаємодії між собою мережевих елементів кожного рівня.

2.2.2. Алгоритмічно задана математична модель обчислення скалярних складових векторного критерію

Після визначення вектору керуючих параметрів, набору критеріїв та незмінних параметрів математичної моделі перейдемо до наступної важливої складової – алгоритмічно заданої моделі обчислення скалярних критеріїв (рис. 2.6).

Правила функціонування алгоритмічно заданої моделі обчислення скалярних складових векторного критерію [91]:

1. Задання параметрів лінії зв'язку, а саме: коефіцієнтів підсилення антен $Q_{\text{прм}}$ та $Q_{\text{прд}}$, потужності передавача $P_{\text{прд}}$, енергетичного запасу лінії $L_{\text{зап}}$, відстань $r = [r_{\text{min}}, r_{\text{max}}]$, гранична швидкість передачі даних $s_{\text{зад}}$.
2. Знаходження доступного діапазону частот та смуг пропускання.
3. Перевірка пріоритету цільової функції $s \rightarrow \max$. Якщо так, то перейти до пункту 3.1. В інакшому випадку перехід до пункту 4.

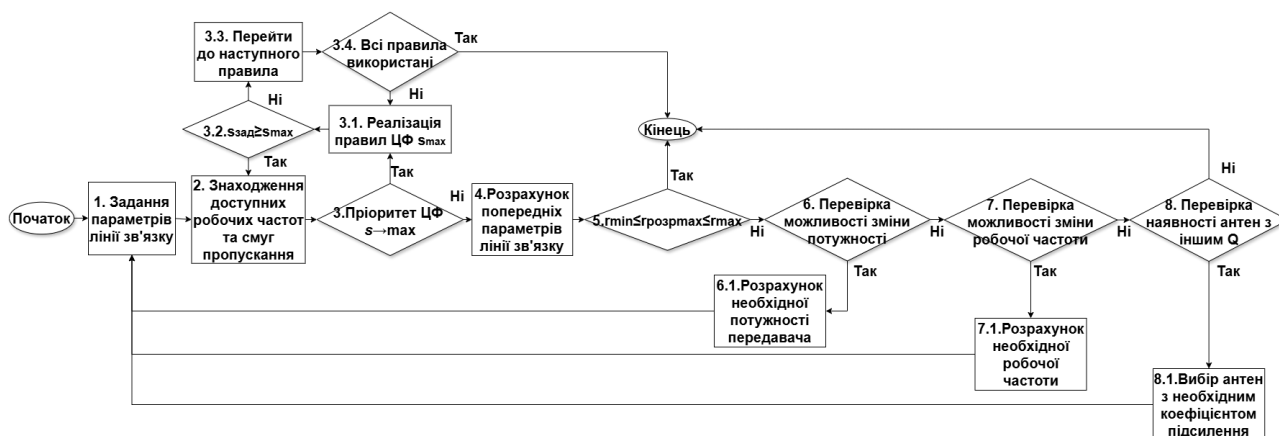


Рисунок 2.6. Алгоритмічно задана математична модель обчислення скалярних складових векторного критерію [91]

3.1. Реалізація правил максимізації швидкості передачі даних із перевіркою $s_{\text{зад}} \geq s_{\text{max}}$ (пункт 3.2):

- а) збільшення смуги пропускання
- б) зменшення робочої частоти до діапазону 2.4 ГГц
- в) збільшення потужності передавача

3.2 Якщо умова $s_{\text{зад}} \geq s_{\text{max}}$ досягнута, то повернутися до пункту 2. В інакшому випадку перейти до пункту 3.3.

3.3 Реалізувати наступне правило і виконати перевірку на доступність інших правил (пункт 3.4)

3.4. Якщо правил більше не лишилося, то завершити алгоритм із вказанням неможливості досягнення заданої швидкості передачі даних.

4. Розрахунок максимальної довжини лінії зв'язку $r_{\text{розрmax}}$ при заданій швидкості передачі даних $s_{\text{зад}}$ із вказанням робочої частоти, смуги пропускання.

5. Перевірка $r_{\text{min}} \leq r_{\text{розрmax}} \leq r_{\text{max}}$. Якщо умова досягнута, то завершити алгоритм із вказанням параметрів каналу зв'язку. В інакшому випадку перейти до пункту 6.

6. Перевірка можливості зміни потужності $P_{\text{прд}}$. Якщо так, то перейти до пункту 6.1, інакше – до пункту 7.

6.1. Розрахунок необхідної потужності для досягнення умови в пункті 5 (при заданих обмеженнях).

7. Перевірка можливості зміни робочої частоти. Якщо так, то перейти до пункту 7.1, інакше – до пункту 8.

7.1. Розрахунок необхідної частоти для досягнення умови в пункті 5 (при заданих обмеженнях).

8. Перевірка наявності антен з інакшим коефіцієнтом підсилення Q . Якщо так, то перейти до пункту 8.1, інакше завершити алгоритм із вказанням неможливості досягнення діапазону довжини лінії зв'язку.

8.1. Вибір антен з необхідним коефіцієнтом підсилення для досягнення умови в пункті 5.

Корегування параметрів лінії зв'язку є багатокритеріальною задачею і у вхідних даних може бути надано пріоритет визначеним параметрам і певні допустимі поступки (відхилення) для інших. У випадку вищого пріоритету функції максимальної швидкості передачі даних у пункті 3 алгоритм обирає із допустимих варіантів найкращий із допустимим відхиленням у потужності передавача $P_{\text{прд}}$,

відстані r , смуги пропускання та робочій частоті. При необхідності досягнення необхідної довжини лінії зв'язку (пункт 5) із заданою швидкістю передачі даних $s_{\text{зад}}$ допустимі поступки у потужності передавача, робочій частоті та коефіцієнтах підсилення антен [91].

2.2.3. Постановка задачі багатокритеріальної оптимізації

Враховуючи досвід попередніх дослідників та рівень важливості локальних (скалярних) критеріїв, що використані у математичній моделі задачі, сформулюємо постановку задачі багатокритеріальної оптимізації у вигляді

$$\left[\begin{array}{l} W_1(X) \rightarrow \max_{X \in G} \\ W_2(X) \rightarrow \min_{X \in G} \\ W_3(X) \rightarrow \min_{X \in G} \end{array} \right],$$

де X – вектор керуючих параметрів, G – область допустимих значень.

Математична постановка задачі багатокритеріальної оптимізації потребує вибору принципу оптимальності (як ще кажуть, способу (схеми) компромісу), який дозволяє обчислити оптимальне рішення для визначеного набору критеріїв $W_i(X)$ ($i = \overline{1,3}$), тому що лише в ідеальному випадку всі локальні (скалярні) критерії досягають свого екстремуму (максимуму або мінімуму) при однакових допустимих значеннях керуючих параметрів [32]. В дисертації використано метод ведучого критерія, який отримав в інженерній практиці найбільше розповсюдження [63,69, 113]. В якості чисельного методу пошуку екстремуму ведучого критерію запропоновано використовувати метод Хука-Дживса [69].

Оптимальне рішення має також забезпечувати раціональність, тобто критерії $W_i(X)$ ($i = \overline{4,11}$) мають бути не гіршими ніж встановлені для них обмеження [32].

В дисертації запропоновано **метод підтримки зв'язності ММССД з використанням ТА дворівневого розташування із різним енергетичним забезпеченням, який дозволяє розв'язати поставлену задачу багатокритеріальної оптимізації і досягти кращого результату ніж у системі-прототипі.**

Досягнення кращого результату підтверджує імітаційний експеримент (у розділі 4). Для забезпечення об'єктивності порівняння запропонованої ММССД з ТА різнорівневого розташування із відомою МСМ з ТА – прототипом оптимізувалися перші три найбільш важливі критерії. Інші вісім критеріїв залишалися вільними. Такий підхід оптимізації використовувався у роботах попередніх дослідників у системі прототипі. Багатокритеріальна оптимізація виконувалася методом ведучого критерію. Після оптимізації запропонованої системи (ММССД з ТА дворівневого розташування із різним енергетичним забезпеченням) та системи – прототипу (МСМ з ТА однорівневого розташування із однорідним енергетичним забезпеченням) за трьома найважливішими критеріями було виконано багаторкритеріальне порівняння по всіх 11-ти критеріях. Отримано тривіальний результат – запропонована система переважає по всіх 11-ти критеріях (за результатами імітаційного моделювання у розділі 4).

2.3. Метод підтримки зв'язності ММССД з використанням ТА дворівневого розташування із різним енергетичним забезпеченням

Другий науковий результат: вперше розроблено метод спрямований на підтримку зв'язності мобільної сенсорної мережі, при розробці якого використано **конструктивно-алгоритмічний підхід** до вдосконалення існуючих методів підтримки зв'язності, про які йшла мова у розділі 1 та параграфі 2.1.

2.3.1. Конструктивна складова методу

Перша конструктивна складова методу полягає в тому, що вперше запропоновано використовувати мобільні сенсори спрямованої дії.

Друга конструктивна складова методу полягає в тому, що вперше запропоновано використовувати дворівневу систему телекомунікаційних аероплатформ із врахуванням того факту, що платформи другого рівня повинні мати більшу енергетичну забезпеченість ніж платформи першого рівня. Платформи другого повинні мати таку енергетичну забезпеченість, яка дозволяє їм підтримувати

тривалий час зв'язок із супутником на низькій навколоземній орбіті або із висотною телекомунікаційною платформою (псевдосупутником).

Об'єктивна необхідність в застосуванні саме дворівневої системи аероплатформ випливає із фізичного змісту інформаційно-інфраструктурної проблеми, яку вирішує мобільна сенсорна мережа в зоні великомасштабної (декілька тисяч квадратних кілометрів) надзвичайної ситуації (де повністю зруйнована телекомунікаційна інфраструктура) або в регіонах (моря та океани або гірська місцевість), де ця інфраструктура відсутня взагалі. Ця проблема полягає у неможливості підтримки постійного зв'язку між центром керування і абонентами в зоні відсутності телекомунікаційної інфраструктури. Для оперативного створення цієї інфраструктури і запропоновано метод підтримки зв'язності ММССД із використанням ТА дворівневого розташування. Ідея цього методу полягає у використанні багаторівневої мережі телекомунікаційних аероплатформ для забезпечення зв'язності вузлів МСМ. На нульовому рівні розташовані сенсори спрямованої дії (вузли) (рис. 2.7). Сенсорами (тобто датчиками первинної інформації) можуть бути оснащені механічні пристрої, які розташовуються чи пересуваються по поверхні за допомогою спеціальних пристроїв пересування або разом з людиною, яка є рятувальником чи виконувачем пошукових робіт в зоні надзвичайної ситуації.

Прибуття пошуковців та рятувальників або тільки технічних засобів для виконання відповідних завдань вимагає оперативного покриття великих територій і встановлення зв'язності не тільки з оперативним центром рятування, а й з глобальними центрами спостереження за катаклізмами, науковими та медичними центрами, в яких можуть бути надані вказівки щодо медичних операцій для рятування життя людей або здійснено керування рятувальними діями. Тому відсутність телекомунікаційної інфраструктури або неможливість передачі інформації є ключовим моментом для виконання успішного пошуку та рятування.

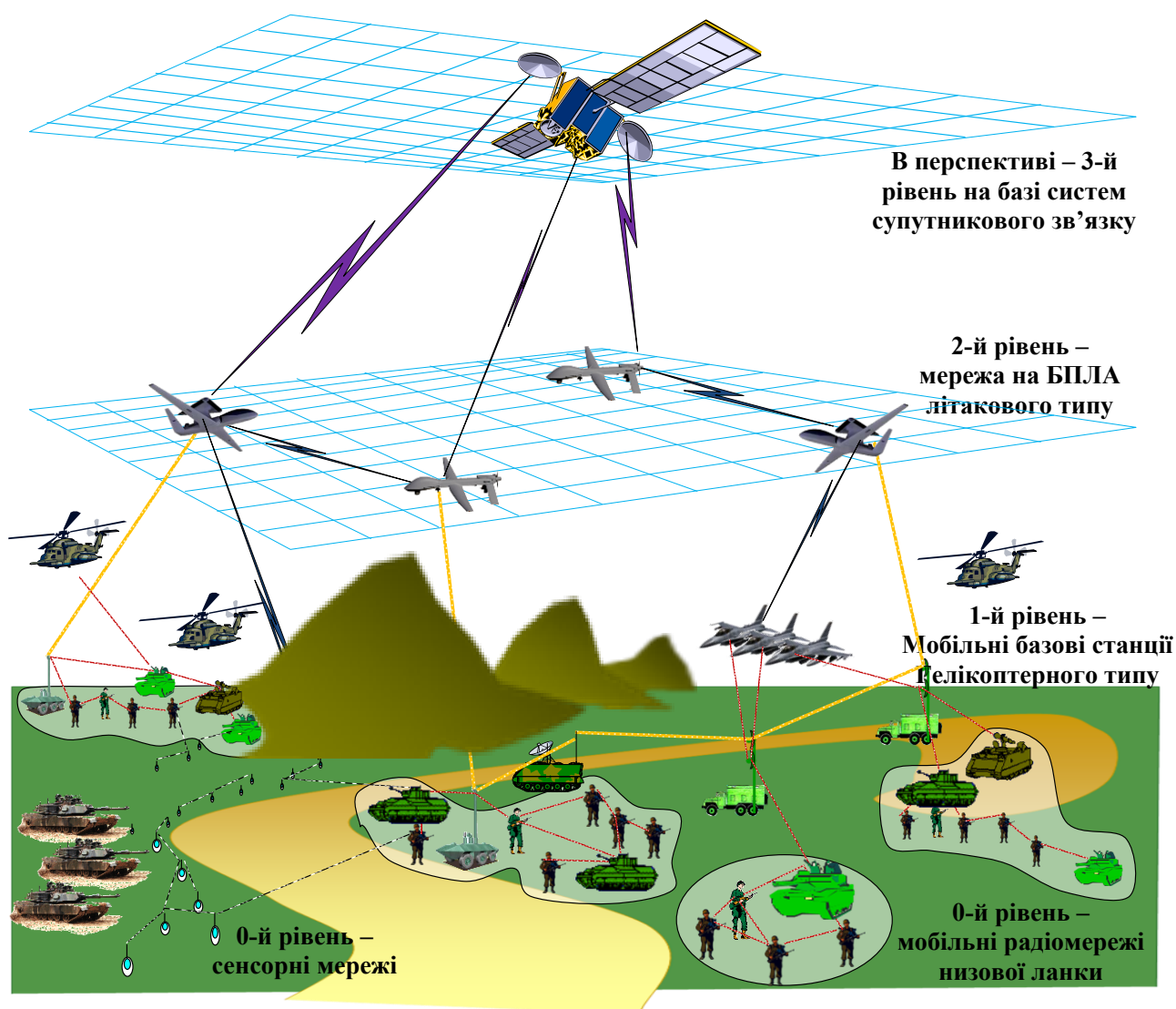


Рисунок 2.7. Багаторівнева мережа ТА для забезпечення зв'язності вузлів МСМ

На сьогоднішній день кожна бригада що прибула до місця події має ТА гелікоптерного типу (або в деяких випадках літакового). Вони, як бачимо на рисунку 2.7, створюють 1-й рівень мережі (тактичний рівень), який забезпечує локальну зв'язність для збору та обміну інформації між технічними засобами рятування і пошуку та рятувальниками. Висота розташування від пів кілометра до одиниць кілометрів. Але щоб передати інформацію на далекі відстані до місць де приймаються загальні (оперативно-стратегічні) рішення необхідний ще один рівень ТА – 2-й (висота якого над землею поверхнею від декількох кілометрів до декількох десятків кілометрів). Він повинен взаємодіяти як з мережею ТА гелікоптерного типу (тактичний рівень) так і з низькоорбітальними супутниковими системами або з

висотними телекомунікаційними платформами (псевдосупутниками) для того, щоб з їх допомогою швидко передавати інформацію до центру прийняття рішень.

Перший та другий рівні розташування телекомунікаційних аероплатформ розрізняються не тільки просторовим розташуванням, а й оснащенням і можливістю перебування у робочому стані, тобто виконувати інформаційний обмін з іншими рівнями мережі. Зазвичай ТА гелікоптерного типу (аероплатформи першого рівня) можуть виконувати свої телекомунікаційні функції від пів години до декількох годин, а літакового типу (аероплатформи другого рівня) - від 24 годин до декількох діб (тому що енергетична оснащеність більш висока).[89,90].

На рис. 1.9 можна розглядати на нульовому рівні самі сенсори, а на першому рівні це БПЛА гелікоптерного типу (або літакового). Ці апарати повинні розташуватися в точках обміну/збору інформації. Як було сказано, вони збирають інформацію або з усіх сенсорів зависаючи в центрі кластеру або з головного сенсора (яким може бути мобільний наземний вузол). Якщо розглядається задача взаємодії ТА 1-го та 2-го рівнів (рис 2.7), то місце вузлів займають ТА 1-го рівня (рис. 2.8). Особливості ТА 1-го рівня гелікоптерного типу в тому що вони можуть "зависнути" в точках обміну/збору даних, а літакового типу повинні спеціальним чином баражувати поруч з такими точками, щоб забезпечити збір потрібної інформації. Якщо допускається деяке запізнення в отриманні інформації, то не обов'язково в кожній точці обміну/збору розташовувати відповідну ТА. Можливо зменшити їх кількість і забезпечити переміщення або всіх або деяких ТА між поруч розташованими кластерами [36,37,38,90].

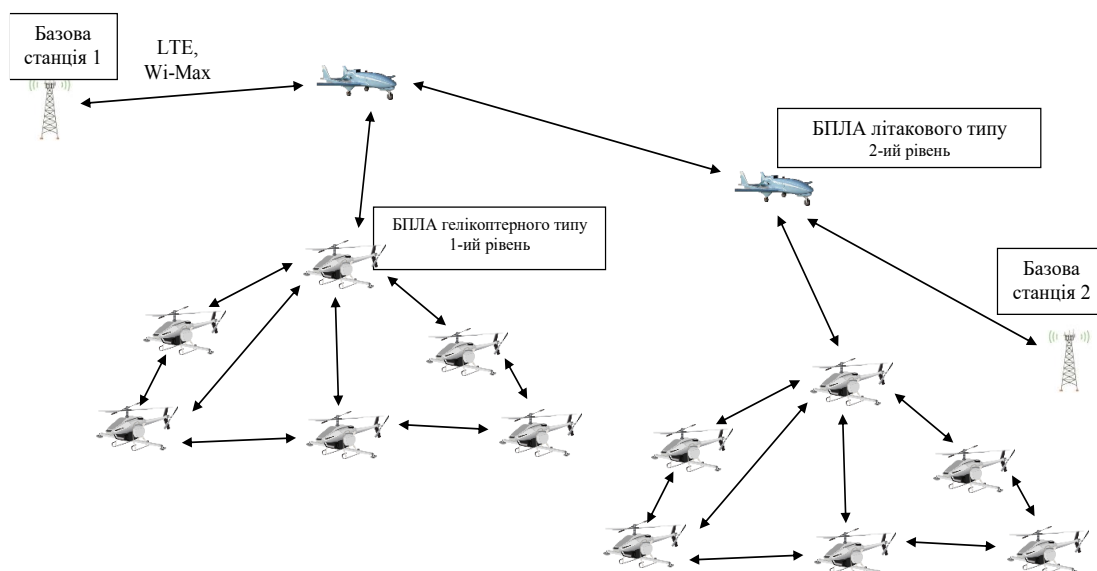


Рисунок 2.8. Схема взаємодії ТА 1-го та 2-го рівнів

Метод дозволяє забезпечити:

1. Можливість передачі даних від сенсорних вузлів спрямованої дії в умовах відсутності телекомунікаційної інфраструктури.
2. Багатокритеріальну оптимізацію критеріїв інформаційного обміну між послідовними рівнями: ММССД-ТА(1-го рівня) і ТА(1-го рівня)-ТА(2-го рівня), а саме: мінімізувати час передачі даних, максимізувати швидкість передачі інформації, мінімізувати кількість ТА.
3. Універсальність застосування: передача даних різного типу (аудіо, тексту тощо) при техногенних катастрофах, на полях бою; під час моніторингу стану трубопроводів, лісів, полів агрокультур, параметрів навколишнього середовища..

2.3.2. Алгоритмічна складова методу: етапи методу

Розглянемо етапи запропонованого методу [90]:

1. Алгоритм збору даних про стан мережі (початковий обліт ТА) виконується аналогічно системі-прототипу, але аероплатформами другого рівня (**запропоновано вперше**), які використовують активний локаційний спосіб визначення координат мобільних сенсорів спрямованої дії (спрямовані антени використовуються як

спеціальні відбивачі локаційного променя телекомунікаційної аероплатформи другого рівня). Обробка результатів обльоту виконується у в центрі управління.

2. Розрахунок точок позиціювання ТА першого та другого рівня виконується за результатом розв'язання багатокритеріальної задачі, що поставлена у п. 2.2.3 **(запропоновано вперше)** виконується в центрі управління.

3. Розрахунок маршруту руху до точок позиціювання ТА виконується за результатом розв'язання багатокритеріальної задачі, що поставлена у п. 2.2.3 **(запропоновано вперше)** виконується в центрі управління

4. Алгоритм встановлення зв'язності між визначеними мережевими елементами реалізується із використанням спеціальних властивостей антен спрямованої дії, що встановлені на мережевих елементах (мобільні сенсори, ТА) **(запропоновано вперше)**.

5. Алгоритм передачі інформації з вузлів (через ТА) в центр збору та обробки даних моніторингу реалізується із використанням спеціальних властивостей антен спрямованої дії, що встановлені на елементах мережі (мобільні сенсори, ТА) **(запропоновано вперше)**.

Фізичний зміст етапів методу [90]:

Результатом *першого* етапу має стати інформація про кількість вузлів, можливості їх інформаційного обміну (потужності пристроїв що передають інформацію, тип антен, робочі частоти та смуги пропускання), енергетичні характеристики. Тобто, сформувати масив даних про кожен з вузлів, а також про кожен телекомунікаційну аероплатформу з точки зору об'єкта керування.

Після цього проводиться аналіз отриманих результатів, визначається спосіб передачі даних з вузлів до ТА і з ТА першого рівня до ТА другого рівня (з кластеризацією чи без, із взаємодією між собою чи без ітд.), необхідні потужності передавальних пристроїв, смуги пропускання та робочі частоти. Це дозволяє виконати *другий і третій* етапи, результатом яких є координати розташування ТА обох рівнів і маршрути їх руху.

На *четвертому і п'ятому* етапах відбувається процес безпосередньої роботи мережі, а саме політ ТА згідно проведених розрахунків, встановлення зв'язності між

мережевими елементами (вузли, ТА першого і другого рівнів) і передача інформації до центру управління.

Ключовим (критичним) елементом як конструктивної, так і алгоритмічної складової запропонованого методу є аналіз та вибір апаратних засобів для реалізації спрямованості дії сенсорів та телекомунікаційних аероплатформ (апаратне вдосконалення).

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Розглянуто структуру та принципи функціонування системи прототип МСМ із ТА, а саме: особливості організації та моделі польоту, алгоритми розрахунку місць обміну інформації, кластеризації МСМ.

2. Було проведено аналіз та визначено недоліки алгоритмів та способів обміну/збору даних однорівневої НПМ (системи прототип), що дало розуміння актуальності та необхідності подальшого розвитку мобільних сенсорних мереж із використанням телекомунікаційних аероплатформ.

3. Розроблено математичну модель оцінки зв'язності вузлів мобільної сенсорної мережі з ТА, яка включає до свого складу математичні моделі функціонування сенсорів спрямованої дії і ТА дворівневого розташування з різним енергетичним забезпеченням, а також алгоритмічно задану модель обчислення критеріїв.

4. Розроблено метод підтримки зв'язності вузлів МСМ з ТА, який на відміну від існуючих методів дозволяє ефективно використовувати антени спрямованої дії, що розташовані на сенсорах і ТА дворівневого просторового розташування із різним енергетичним забезпеченням, завдяки чому досягається зменшення середніх значень часу затримки при передачі даних, безпосередньо задіяних ТА в кожному сеансі передачі інформації і збільшення середньої швидкості передачі інформації в ММСД із ТА дворівневого розташування.

5. Метод дозволяє забезпечити:

- Можливість передачі даних від сенсорних вузлів спрямованої дії в умовах відсутності телекомунікаційної інфраструктури.
- Багатокритеріальну оптимізацію критеріїв інформаційного обміну між

послідовними рівнями: ММССД-ТА(1-го рівня) і ТА(1-го рівня)-ТА(2-го рівня), а саме: мінімізувати час передачі даних, максимізувати швидкість передачі інформації, мінімізувати кількість ТА.

- Універсальність застосування: передача даних різного типу (аудіо, тексту тощо) при техногенних катастрофах, на полях бою; під час моніторингу стану трубопроводів, лісів, полів агрокультур, параметрів навколишнього середовища.

6. Результати розрахунків показали, що оптимізація за векторним критерієм із використанням запропонованого методу дала покращення порівняно із прототипом за першими трьома показниками (головними критеріями) від 28% до 41% та за іншими показниками від 2% до 43%. Головні критерії, що входили до складу векторного критерію: кількість ТА 1-го та 2-го рівнів (мінімізувалась), швидкість передачі даних (максимізувалась), час передачі даних з кінця в кінець (мінімізувався).

7. Наукова новизна полягає у розробці математичної моделі та вдосконаленні методу підтримки зв'язності вузлів МСМ із врахуванням можливості використання сенсорів спрямованої дії та дворівневої мережі телекомунікаційних аероплатформ в умовах відсутності телекомунікаційної інфраструктури.

8. Наступним кроком є апаратна реалізація запропонованого методу, що полягає у аналізі та виборі апаратних засобів за допомогою яких буде вирішена поставлена багатокритеріальна задача.

РОЗДІЛ 3

АПАРАТНЕ ВДОСКОНАЛЕННЯ МСМ

Як було вказано в розділі 1, сенсорні вузли є невід’ємними компонентами безпроводових сенсорних мереж, які оснащуються змінними або постійними антенами. Останні відіграють вирішальну роль у їх функціональності і бувають різних типів, розроблені відповідно до конкретних вимог, що базуються на таких факторах, як дальність зв’язку, енергоспоживання та умови навколишнього середовища. Тому можливість встановлювати антени різного типу попередньо або безпосередньо в польових умовах може змінювати кількість необхідних ресурсів та мережевих елементів (ТА та вузлів) НПМ, що дає вигоду у часі функціонування мережі, обміні/зборі інформації тощо. Перш за все їх поділяють на дві групи: спрямованої та всеспрямованої дії [91,92]. Розглянемо їх більш детально нижче.

3.1. Аналіз антен всеспрямованої дії вузлів МСМ

Сенсори (вузли) всеспрямованої дії у БСМ є класичним варіантом пристроїв, які можуть приймати або передавати сигнал в усіх напрямках навколо них. Вони охоплюють (покривають) повне коло навколо своєї точки кріплення (згідно з діаграмою спрямованості антени, що використовується), що робить їх придатними для застосувань, коли події або зміни в середовищі можуть відбуватися з будь-якого напрямку, тобто область покриття має дозволяти їм передавати дані на центральний вузол або інші датчики поблизу. Споживання електроенергії є критичним фактором для сенсорних вузлів, особливо у БСМ, що працюють від одноразових або багаторазових джерел живлення. Ефективні стратегії проектування, компоненти з низьким енергоспоживанням і методи циклічного навантаження часто застосовуються для продовження терміну служби джерела живлення сенсорних вузлів, а отже і збільшення часу функціонування. Всеспрямовані вузли можна використовувати для локалізації в безпроводовій сенсорній мережі. Такі методи, як трилатерація або тріангуляція, можна використовувати для оцінки положення вузлів датчиків на основі інформації, зібраної з кількох датчиків [91,92].

Для вузлів всеспрямованої дії зазвичай використовують наступні

розповсюджені типи антени [91,92]:

1. Монопольна антена (рис. 3.1) [93]. Їх зазвичай використовують у вузлах через їх простоту та компактний розмір. Крім всеспрямованої діаграми в горизонтальній площині вони мають вертикальну поляризацію, орієнтація якої визначається орієнтацією вертикального елемента. Такі антени (залежно від їх розмірів) можуть бути розроблені для широкого діапазону частот, що підкреслює їх універсальність. Досягнення належного узгодження імпедансу має вирішальне значення для ефективної передачі або прийому сигналу. Елементи узгодження, такі як конденсатори або котушки індуктивності, часто використовуються для налаштування антени на потрібну частоту та узгодження її з опором підключеної лінії передачі [92].

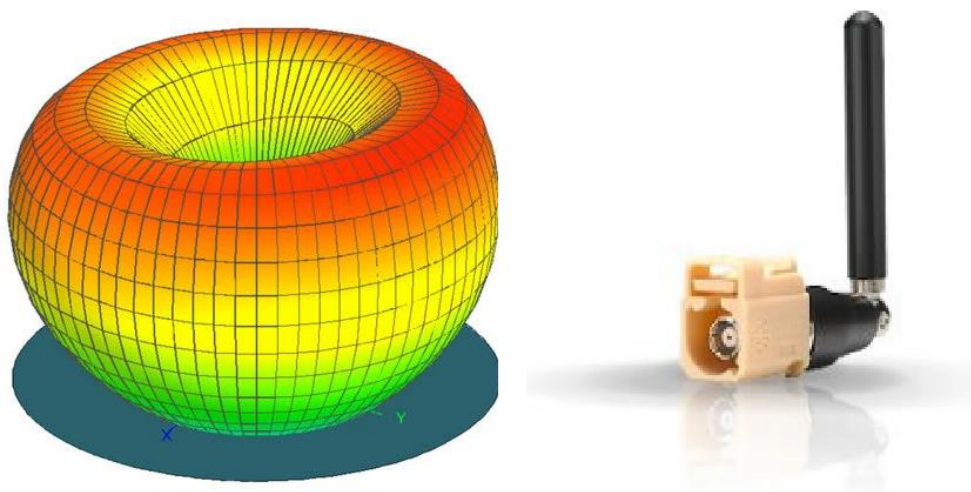


Рисунок 3.1. Монопольна антена та її діаграма спрямованості [92]

Розгортаючи монопольні антени для сенсорних вузлів, дуже важливо враховувати конкретні вимоги, такі як бажаний діапазон частот, обмеження розміру та характеристики навколишнього середовища. Правильна конструкція та оптимізація можуть гарантувати, що монопольна антена відповідає вимогам продуктивності безпроводової сенсорної мережі [92].

Надання конкретних абсолютних значень для монопольних антен, що використовуються в сенсорних вузлах, потребує інформації про конкретну модель або конструкцію антени, так як характеристики відрізняються в залежності від довжини антени та площі заземлюючої поверхні. Зазвичай виробники надають дану інформацію у технічних паспортах (datasheets), однак можна розглянути типову

антену та її характеристики [94]: коефіцієнт підсилення в залежності від положення антени, діапазону частот (для даної антени 2.4–2.5, 5.15–5.85 ГГц) та площі заземлення складає від 1.94 до 4.09 dB, опір 50 Ом, вхідна потужність 10 Вт, довжина 69.6 мм, діаметр 5 мм [92].

2. Дипольна антена (рис. 3.2). Це другий тип простих, але ефективних антен, які використовуються в різноманітних сценаріях, включаючи сенсорні вузли та безпроводові сенсорні мережі. Вони також мають всеспрямовану діаграму спрямованості в площині, перпендикулярній елементам антени, а орієнтація дипольних елементів визначає напрямок поляризації. Дипольні антени мають помірний коефіцієнт підсилення, зазвичай близько 2-3 дБі. На нього впливає довжина дипольних елементів. Для підвищення коефіцієнту використовують масив колінеарних дипольних антен, що дозволяє досягти значень 6-12 дБі [95], але при цьому значно збільшується довжина, що не дає змоги використовувати її для всіх типів вузлів. Характерний опір дипольної антени зазвичай становить близько 73-75 Ом. Цей імпеданс залежить від розмірів диполя і є важливим для узгодження імпедансу з лінією передачі [92,96].



Рисунок 3.2. Дипольна антена та її діаграма спрямованості

Фізичний розмір (довжина і товщина) дипольної антени залежить від робочої частоти. Для напівхвильових диполів довжина 52.5 мм відповідає частоті 2.4 ГГц згідно з формулою 3.1.

$$L = \frac{K \cdot \lambda}{2} \quad (3.1)$$

де λ – це довжина хвилі, а K – коефіцієнт укорочення, який розраховується за допомогою залежності на рис. 3.3.

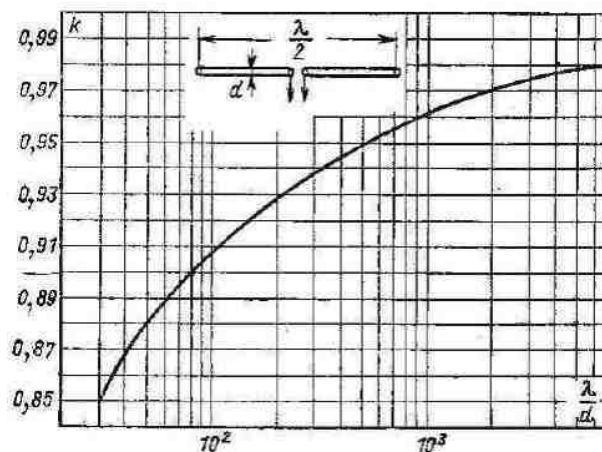


Рисунок 3.3. Залежність коефіцієнта укорочення K від співвідношення λ/d

3. Діско-конічна антена (рис. 3.4). Це універсальні широкосмугові антени, розраховані на вертикальну поляризацію. Диск у верхній частині та конус під ним створюють всеспрямовану діаграму. Вони відносно компактні порівняно з деякими іншими широкосмуговими антенами [97]. Нижня межа частоти в першу чергу визначається розміром диска (часто в діапазоні від 25 МГц до 100 МГц або навіть нижче), а верхня межа частоти залежить від розмірів конуса (може розширюватися до 1-2 ГГц або вище). Зазвичай мають помірне підсилення, часто в діапазоні 2-5 дБі. Основною перевагою є їх широке охоплення частот, а не високе підсилення. Імпеданс зазвичай становить близько 50 Ом, що відповідає стандартним лініям передачі [92].

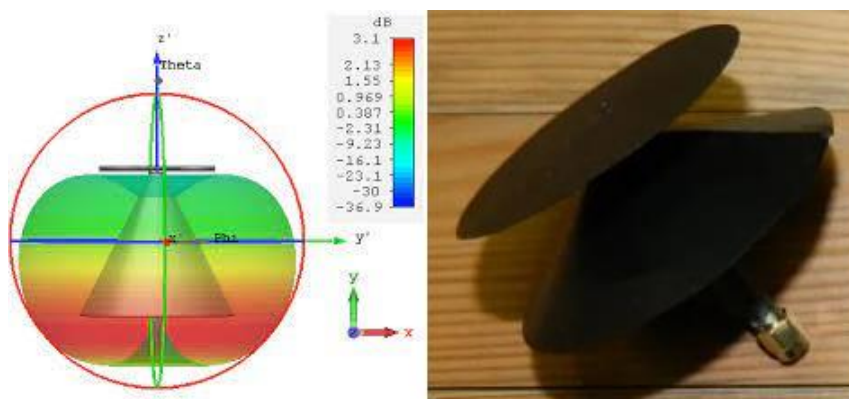


Рисунок 3.4. Діско-конічна антена та її діаграма спрямованості

4. Перевернута F антена (Inverted-F antennas) має плоску структуру, яку можна легко інтегрувати в дизайн невеликих пристроїв (рис. 3.5). Це розвиток широко поширеної чвертьхвильової монопольної антени, яка складається з провідного стрижня, встановленого перпендикулярно над провідною площиною заземлення, що живиться в основі. У цій антені живлення підключено до проміжної точки вздовж довжини антени замість основи, а основа антени підключена до заземленої площини. Перевага цього полягає в тому, що вхідний опір антени залежить від відстані точки живлення від заземленого кінця. Частина антени між точкою живлення та площиною заземлення по суті поводить себе як шлейф короткого замикання. Таким чином, розробник може узгодити антену з опором лінії живлення, встановивши положення точки живлення вздовж елемента антени [98]. Частотний діапазон, аналогічно до попередніх типів, може бути розроблений для конкретних застосувань і діапазонів частот. Наприклад, 2.4 ГГц, 5 ГГц або 915 МГц. Вони зазвичай розроблені для лінійної поляризації, і орієнтація елементів антени визначає напрямок поляризації, можуть досягати помірного коефіцієнта підсилення, як правило, в діапазоні від 0 до 5 дБі, залежно від конструкції та розміру (площини заземлення і довжина елементів). Імпеданс антен IFA зазвичай розраховується відповідно до опору системи і зазвичай становить близько 50 Ом [92].

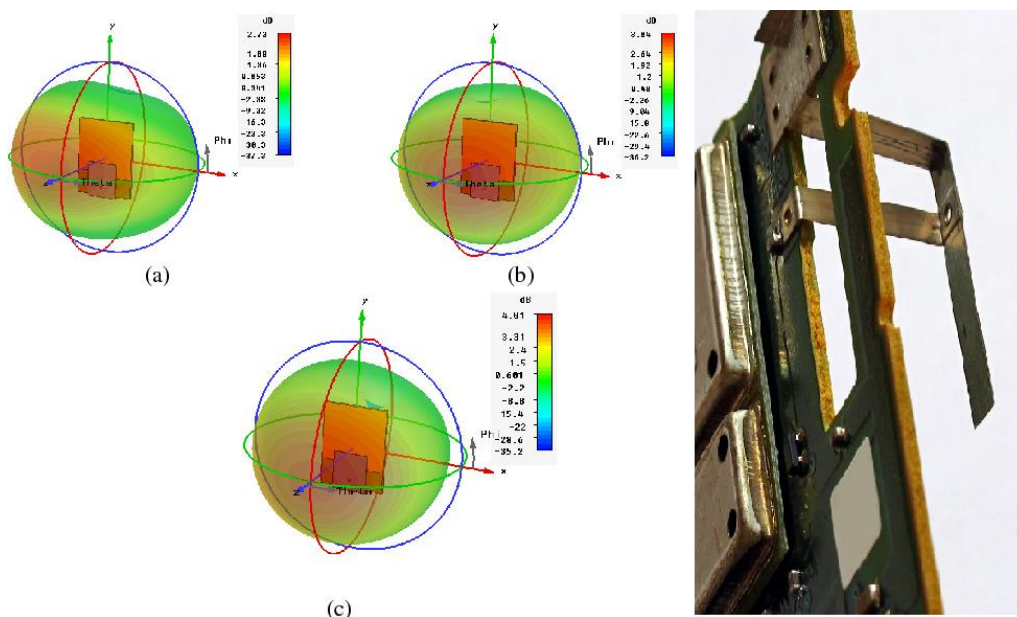


Рисунок 3.5. Антена IFA та її діаграма спрямованості

5. Також широко розповсюдженими є планарні антени, відомі своїм низьким профілем і придатністю для інтеграції в невеликі пристрої (рис. 3.6) [92]:

5.1. Планарна антена IFA (PIFA). Вона складається з плоского елемента з'єднаного із короткозамкнутою або заземленою площиною (рис. 3.6 а).

5.2. Друкована монопольна антена — це плоска конструкція, яка часто розроблена на друкованій платі. Складається з прямого або складеного провідника з одного боку друкованої плати та заземленої площини з іншого боку (рис. 3.6 б).

5.3. Подібно до друкованих монопольних антен, друковані дипольні антени є планарними структурами, але мають два плечі, що простягаються в протилежних напрямках (рис. 3.6 в).

5.4. Планарна дискова антена — це плоска структура круглої форми, яка складається з круглого дискового елемента з заземленою площиною під ним (рис. 3.6 г).

5.5. Планарні щілинні антени створюються шляхом витравлювання прорізів або отворів на плоскій поверхні (рис. 3.6 д) [99].

5.6. Мікросмугові патч-антени — це плоскі антени, які складаються з патча (зазвичай квадратного або прямокутного металевого аркуша), надрукованого на діелектричній підкладці з заземленою площиною з іншого боку (рис. 3.6 е).

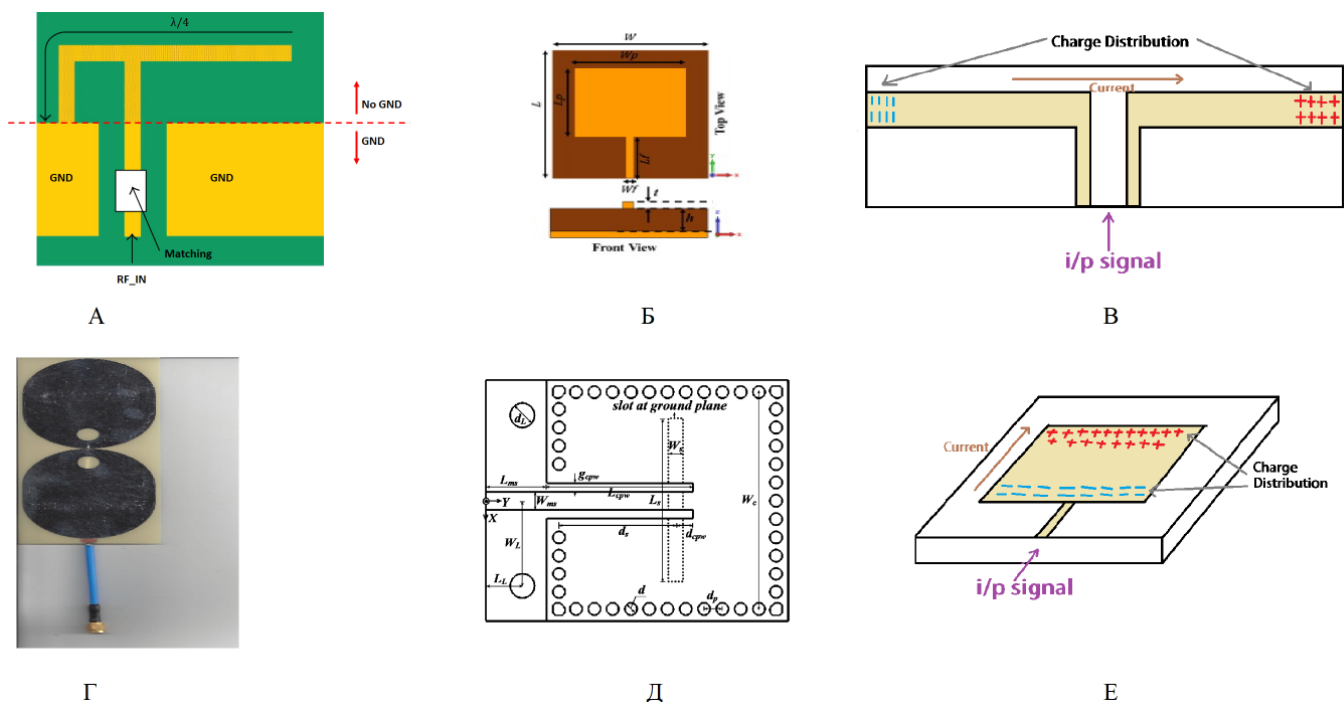


Рисунок 3.6. Планарні антени

Удосконалення технологій обробки сигналів і протоколів зв'язку сприяють покращенню продуктивності та можливостей всеспрямованих вузлів у безпроводових сенсорних мережах. Проте, маючи свої переваги, всеспрямовані датчики можуть зіткнутися з проблемами, такими як перешкоди від інших пристроїв, обмежену дію на великих відстанях і потреба в ефективних алгоритмах обробки даних для отримання інформації, які передає вузол [91,92].

3.2. Аналіз антен спрямованої дії вузлів MCM

Спрямовані антени відіграють вирішальну роль у БСМ, фокусуючи своє випромінювання в певному напрямку, що призводить до збільшення області покриття в цільовому напрямку. Це особливо корисно для зв'язку на великі відстані, так як забезпечується більший коефіцієнт підсилення порівняно з всеспрямованими антенами, що призводить до покращення рівня сигналу на приймаючій стороні. У безпроводових сенсорних мережах використовуються різні типи спрямованих антен, кожна з яких має певні переваги щодо діапазону, покриття та подолання перешкод [91,92].

Для вузлів спрямованої дії можна використати наступні розповсюджені типи антени [91,92]:

1. Антена Уда-Ягі. Складається з вібратора (диполя), рефлектора та одного або кількох директорів. Рефлектор зазвичай довший за вібратор не більше ніж на 5%, а директор – до 5% коротший. Найчастіше застосовується один рефлектор, число директорів змінюється від нуля до десятків. Активний вібратор має довжину близько напівхвилі (0.5λ). Відстані від активного вібратора до рефлектора і до першого директора складають близько 0.25λ . Кількість директорів сприяє загальному посиленню. Типове підсилення для антен Ягі, які використовуються в сенсорних вузлах, може коливатися від 6 дБі до 15 дБі. Зазвичай лінійно поляризовані, і орієнтація активного елемента визначає напрямок поляризації. Антени Ягі можуть бути розроблені для різних діапазонів частот на основі розмірів елементів. Частотний діапазон антен Ягі визначається довжиною елементів і відстанню між ними, що дозволяє розробити їх для різних діапазонів. Імпеданс зазвичай розраховується відповідно до опору системи, і часто складає близько 50 Ом. У вузлах БСМ де важлива компактність застосовують планарне виконання (рис. 3.7) [92,100,101].

2. Параболічні антени (рис. 3.8). Можуть підтримувати різні поляризації, включаючи лінійну та кругову поляризації, залежно від конструкції елемента живлення. Такі антени забезпечують високе підсилення, яке часто коливається від 20 дБі до 40 дБі або більше та необхідний діапазон частот, залежно від розміру антени та конструкції системи живлення. Ширина променя параболічної антени дуже вузька, зазвичай становить кілька градусів або менше. Ця вузька ширина променя забезпечує точне та цілеспрямоване спілкування в певному напрямку. Через свої досить невеликі розміри оснащувати кожен вузол часто не має можливості, тому пропонується об'єднувати вузли у кластери, а далі агрегований сигнал подавати на параболічну антену [92,102,103,104].

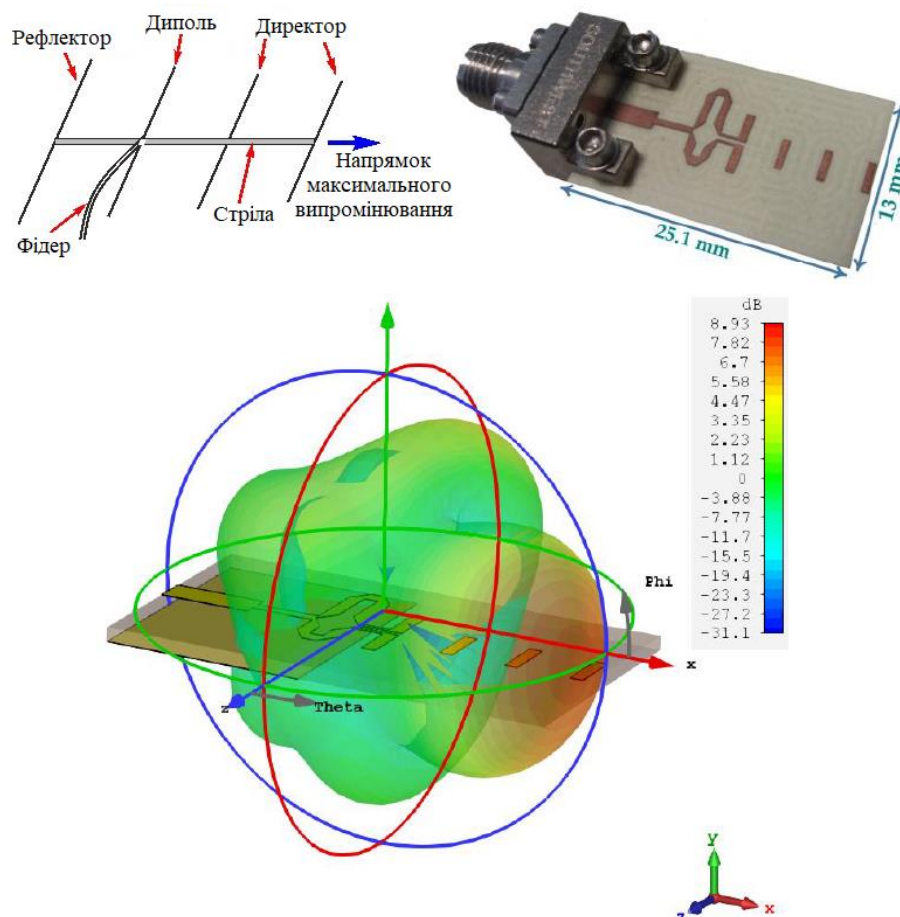


Рисунок 3.7. Антена Уда-Ягі та її діаграма спрямованості [92]

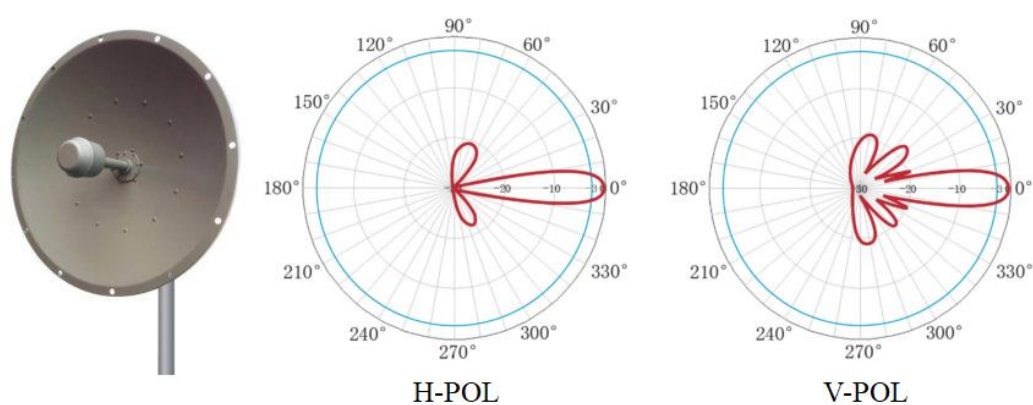


Рисунок 3.8. Параболічна антена та її діаграма спрямованості

3. Патч-антени (рис. 3.9). Можуть також бути побудовані для досягнення вузької діаграми спрямованості. На ширину променя патч-антени впливають її розміри. Менші патчі, як правило, мають більшу ширину променя, тоді як більші патчі призводять до меншої ширини променя. Патч-антени можуть бути розроблені

для певних діапазонів частот на основі розмірів патча та матеріалу підкладки. Частотний діапазон визначається розміром патча та іншими конструктивними параметрами. Можуть підтримувати різні поляризації, включаючи лінійну (вертикальну або горизонтальну) і кругову поляризації. Поляризація визначається орієнтацією механізму живлення. Деякі патч-антени розроблено для роботи в кількох діапазонах частот або для підтримки подвійної поляризації (наприклад, подвійної лінійної або кругової поляризації). Такі антени забезпечують помірне підсилення, як правило, від 2 дБі до 12 дБі або більше, залежно від конструкції та розміру патча. Більші патчі та діелектричні підкладки збільшують коефіцієнт підсилення. Малі розміри дозволяють їх легко інтегрувати в пристрої та сенсорні вузли [92].



Рисунок 3.9. Патч-антена

4. Логоперіодичні антени. Призначені для покриття широкого діапазону частот. Діапазон частот визначається геометрією елементів антени (наприклад на рис. 3.10 зображено планарну логоперіодичну антену для діапазону 4.835-7.44 ГГц). Антени мають діаграми спрямованості з кількома пелюстками. Підсилення змінюється залежно від частоти, і типові значення можуть коливатися від 5 дБі до 15 дБі або більше. Логоперіодичні антени розроблені для певних конфігурацій монтажу. Вони можуть бути встановлені на щоглі або опорній конструкції для забезпечення правильного вирівнювання та орієнтації (аналогічно параболічним антенам), але також ведуться розробки у напрямку планарного виконання [92,105].

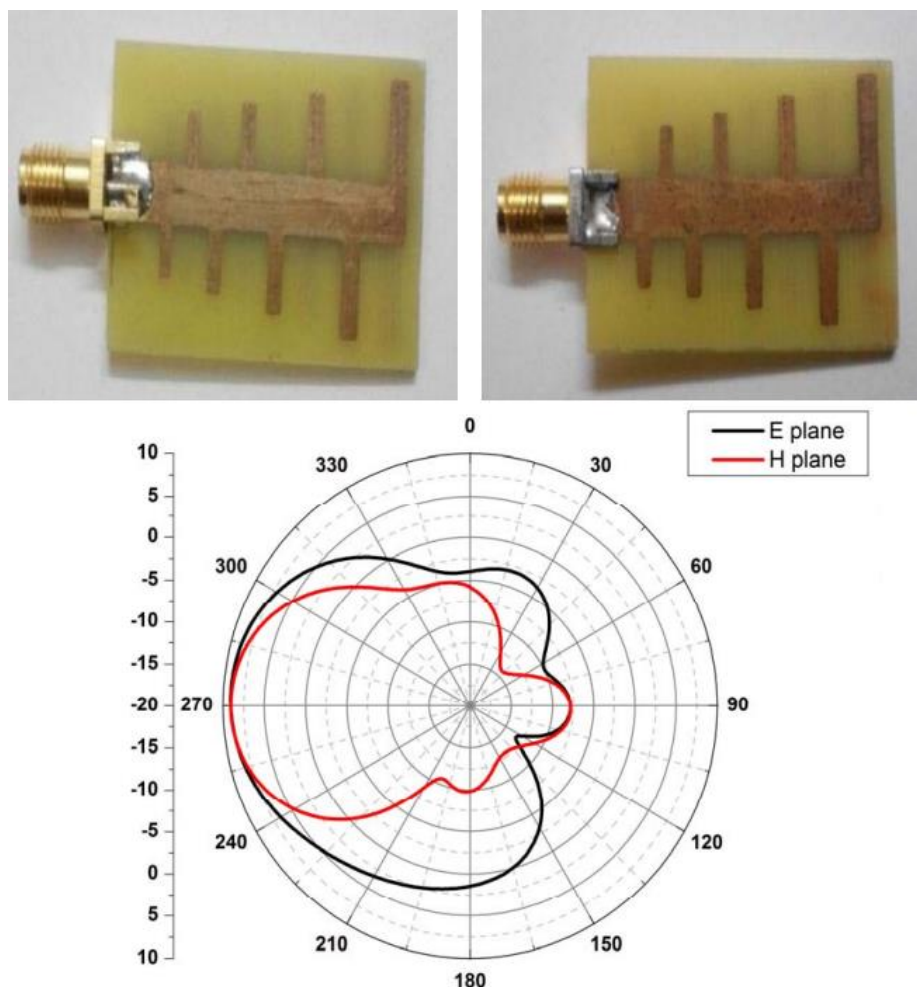


Рисунок 3.10. Планарна логоперіодична дипольна антена та її діаграма спрямованості

5. Антени з фазованою решіткою (рис. 3.11) — це тип антенної системи, яка використовує певну кількість антенних елементів і фазообертачів (які регулюють фазовим співвідношення між цими елементами) для створення певних діаграм спрямованості. Ці антени відомі своєю здатністю керувати напрямком та шириною променя без фізичного переміщення антени. Також можливе застосування методів спрямованих на зменшення бічних пелюсток діаграми спрямованості. Створення компактної та легкої решітки для сенсорних вузлів передбачає низку конструктивних рішень, щоб відповідати обмеженням розміру, зберігаючи при цьому бажані робочі характеристики. Вибір частотного діапазону буде впливати на конструкцію і розмір елементів антени (зазвичай використовуються мікросмугові патч-елементи), а кількість елементів — на коефіцієнт підсилення. Антени можуть підтримувати різні

типи поляризації (включаючи лінійну та кругову поляризації), яка визначається орієнтацією елементів. Наприклад, у роботі [106] запропонована фазована антенна решітка для безпроводового сенсорного вузла та проведені виміри діаграми спрямованості на частоті 16.75 ГГц (рис. 3.11) [92].

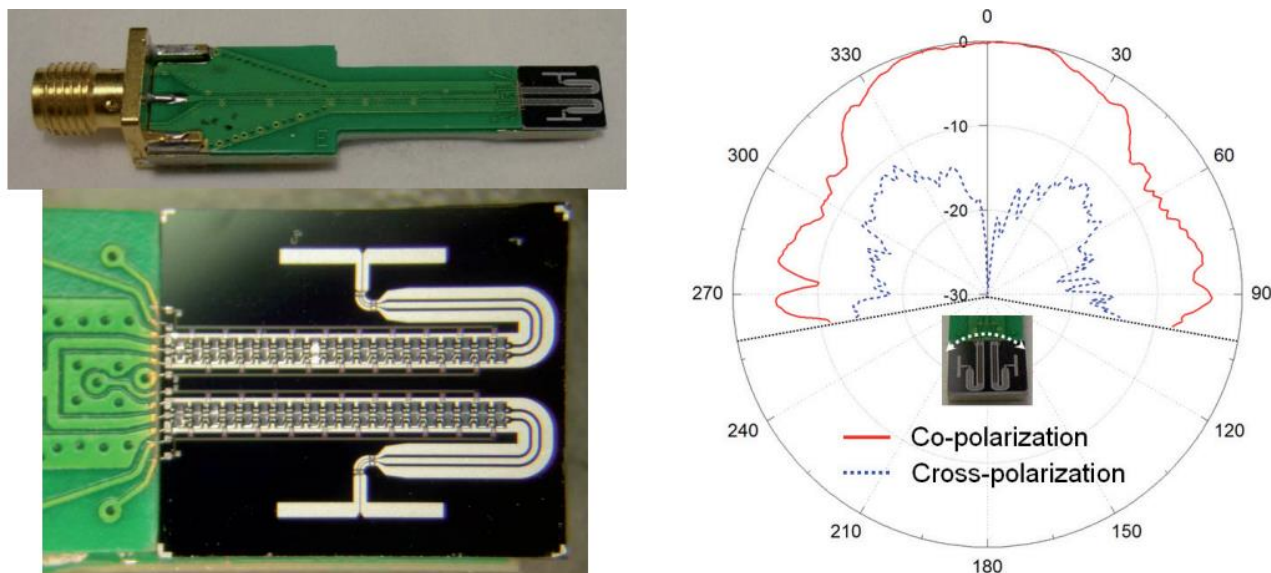


Рисунок 3.11. Планарна фазована антенна решітка та її діаграма спрямованості

6. Спіральні антени (рис. 3.12). Частотний діапазон спіральних антен може бути розроблений для конкретних застосувань. Розміри спіралі визначають резонансну частоту. Конструкцію можна оптимізувати для ультрависоких частот, ультракоротких хвиль або мікрохвильових частот. Спіральні антени за своєю природою мають кругову поляризацію, що забезпечує поляризаційне рознесення в системах зв'язку. Можуть забезпечувати від середнього до високого підсилення залежно від кількості витків у спіралі та інших конструктивних параметрів. Коефіцієнт підсилення зазвичай коливається від 4 дБі до 9 дБі для антен малих розмірів. Спіральні антени можуть бути розроблені для широкої смуги, що дозволяє їм охоплювати діапазон частот. На смугу пропускання впливають такі фактори, як діаметр спіралі та кут нахилу. Імпеданс спіральних антен зазвичай становить близько 50 Ом, що робить їх сумісними зі звичайними лініями передачі та радіочастотними системами. Спіральні антени можна інтегрувати безпосередньо в друковану плату, забезпечуючи компактне та інтегроване рішення для сенсорних вузлів. Спіральні

антени, встановлені на друкованій платі, мають низький профіль і підходять для застосування з обмеженим простором [92].

Ці антени працюють в одному з двох режимів: нормальному режимі та аксіальному режимі. У нормальному режимі діаметр і крок спіралі малі в порівнянні з довжиною хвилі. В результаті робота подібна до електричного короткого монополя або диполя. Випромінювання лінійно поляризоване паралельно осі антени з максимальним випромінюванням під прямим кутом до осі спіралі. Цей режим має вузьку смугу пропускання та низьку ефективність. В аксіальному режимі діаметр і крок спіралі можна порівняти з довжиною хвилі. У цьому випадку він виконує роль спрямованої антени. На відміну від нормального режиму, в осьовому режимі недоступні прості рішення для визначення властивостей випромінювання. У результаті для визначення цих факторів для осьового режиму використовуються експериментально визначені чисельні та аналітичні методи [107].

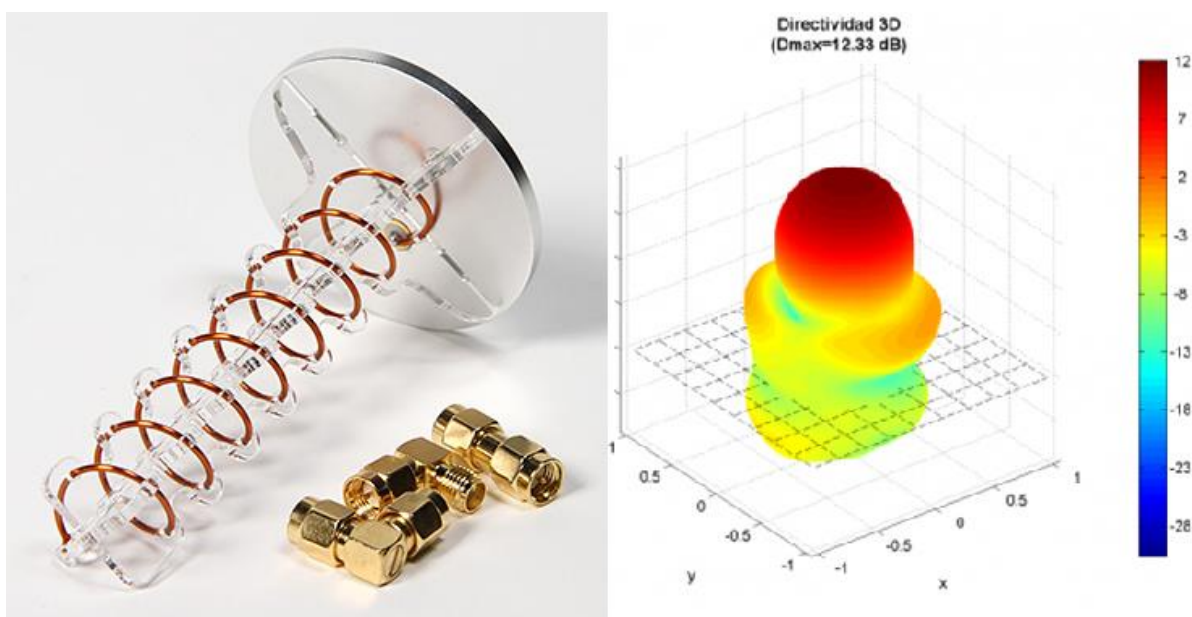


Рисунок 3.12. Спіральна антена та її діаграма спрямованості в аксіальному режимі

Основним недоліком більшості спрямованих антен є їх обмежена зона покриття, проте технологія фазованих антенних решіток, систем автоматичного керування [108] дозволяють змінювати напрямок променя в залежності від потреб та сценаріїв. Розгортання та вирівнювання спрямованих антен вимагає точності [92]. Правильне вирівнювання має вирішальне значення для досягнення бажаного покриття [108], і

будь-яке зміщення може призвести до погіршення продуктивності. Спрямовані антени більш сприйнятливі до блокування сигналу такими перешкодами, як будівлі, дерева або рельєф місцевості. Міркування прямої видимості стають критичними для надійного зв'язку. Таким чином, вибір між спрямованими та всеспрямованими антенами в безпроводовій сенсорній мережі залежить від конкретних вимог (зона покриття, умови перешкод і обмеження у розгортанні та фізичних розмірах). Спрямовані антени є потужними інструментом, якщо необхідне встановлення каналу зв'язку на великих відстанях. Тому розглянемо можливість їх використання в сценаріях, де їхні переваги переважають пов'язані з ними недоліки [92].

3.3. Розрахунок та порівняння довжини лінії зв'язку при використанні сенсорів спрямованої та всеспрямованої дії

З результатів порівняння технологій передачі даних (розділ 1.2.2) [42,43,44,45,46] можна зробити висновок, що IEEE 802.11ax має найбільшу максимальну смугу пропускання (з можливістю її зміни під необхідні задачі) при відносно невеликому споживанні енергії, що дозволяє досягти необхідної швидкості передачі даних для виконання поставлених задач. Також в даному стандарті передбачений механізм економії енергії, який дозволяє переводити вузли у режим очікування (без витрат енергії) коли вузол не виконує передачу даних або знаходиться не в зоні покриття ТА. В залежності від того який режим роботи буде обраний, встановлюються такі параметри як смуга пропускання, чутливість приймача; буде змінюватися швидкість та пікове споживання енергії (табл. 3.1, 3.2) [91,109,110].

Тому надалі для оцінки параметрів та їх порівняння будемо використовувати технологію IEEE 802.11ax.

Таблиця 3.1. Характеристики режимів роботи IEEE 802.11ах для ширини каналу 20
Дта 40 МГц

MCS	DCM	Модуляція, кодування	Ширина каналу 20 МГц				Ширина каналу 40 МГц			
			Швидкість, Мб/с			Мін. чутливість (dBm)	Швидкість, Мб/с			Мін. чутливість (dBm)
			0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI		0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	
MCS0	1	BPSK-1/2	4.3	4	3.6	-82	8.6	8.1	7.3	-79
	0		8.6	8.1	7.3		17.2	16.3	14.6	
MCS1	1	QPSK-1/2	8.6	8.1	7.3	-79	17.2	16.3	14.6	-76
	0		17.2	16.3	14.6		34.4	32.5	29.3	
MCS2	-	QPSK-3/4	25.8	24.2	21.9	-77	51.6	48.8	43.9	-74
MCS3	1	16QAM-1/2	17.2	16.3	14.6	-74	34.4	32.5	29.3	-71
	0		34.4	32.5	29.3		68.8	65	58.5	
MCS4	1	16QAM-3/4	25.8	24.2	21.9	-70	51.6	48.8	43.9	-67
	0		51.6	48.8	43.9		103.2	97.5	87.8	
MCS5	-	64QAM-2/3	68.8	65	58.5	-66	137.6	130	117	-63
MCS6	-	64QAM-3/4	77.4	73.1	65.8	-65	154.9	146.3	131.6	-62
MCS7	-	64QAM-5/6	86	81.3	73.1	-64	172.1	162.5	146.3	-61
MCS8	-	256-QAM-3/4	103.2	97.5	87.8	-59	206.5	195	175.5	-56
MCS9	-	256-QAM-5/6	114.7	108.3	97.5	-57	229.4	216.7	195	-54
MCS10	-	1024QAM-3/4	129	121.9	109.7	-54	258.1	243.8	219.4	-51
MCS11	-	1024QAM-5/6	143.4	135.4	121.9	-52	286.8	270.8	243.8	-49

Таблиця 3.2. Характеристики режимів роботи IEEE 802.11ах для ширини каналу 80
та 160 МГц

MCS	DCM	Модуляція, кодування	Ширина каналу 80 МГц				Ширина каналу 160 МГц			
			Швидкість, Мб/с			Мін. чутливість (dBm)	Швидкість, Мб/с			Мін. чутливість (dBm)
			0.8us GI	1.6us GI	3.2 GI		0.8us GI	1.6us GI	3.2 GI	
MCS0	1	BPSK-1/2	18	17	15.3	-76	36	34	30.6	-73
	0		36	34	30.6		72.1	68.1	61.3	
MCS1	1	QPSK-1/2	36	34	30.6	-73	72.1	68.1	61.3	-70
	0		72.1	68.1	61.3		144.1	136.1	122.5	
MCS2	-	QPSK-3/4	108.1	102.1	91.9	-71	216.2	204.2	183.8	-68
MCS3	1	16QAM-1/2	72.1	68.1	61.3	-68	144.1	136.1	122.5	-65
	0		144.1	136.1	122.5		288.2	272.2	245	
MCS4	1	16QAM-3/4	108.1	102.1	91.9	-64	216.2	204.2	183.8	-61
	0		216.2	204.2	183.8		432.4	408.3	367.5	
MCS5	-	64QAM-2/3	288.2	272.2	245	-60	576.5	544.4	490	-57
MCS6	-	64QAM-3/4	324.3	306.3	275.6	-59	648.5	612.5	551.3	-56
MCS7	-	64QAM-5/6	360.3	340.3	306.3	-58	720.6	680.6	612.5	-55
MCS8	-	256-QAM-3/4	432.4	408.3	367.5	-53	864.7	816.7	735	-50
MCS9	-	256-QAM-5/6	480.4	453.7	408.3	-51	960.7	907.4	816.6	-48
MCS10	-	1024QAM-3/4	540.4	510.4	459.4	-48	1080.9	1020.8	918.8	-45
MCS11	-	1024QAM-5/6	600.4	567.1	510.4	-46	1201	1134.2	1020.8	-43

Виходячи із даних у таблицях 3.1 та 3.2 отримуємо наступні залежності

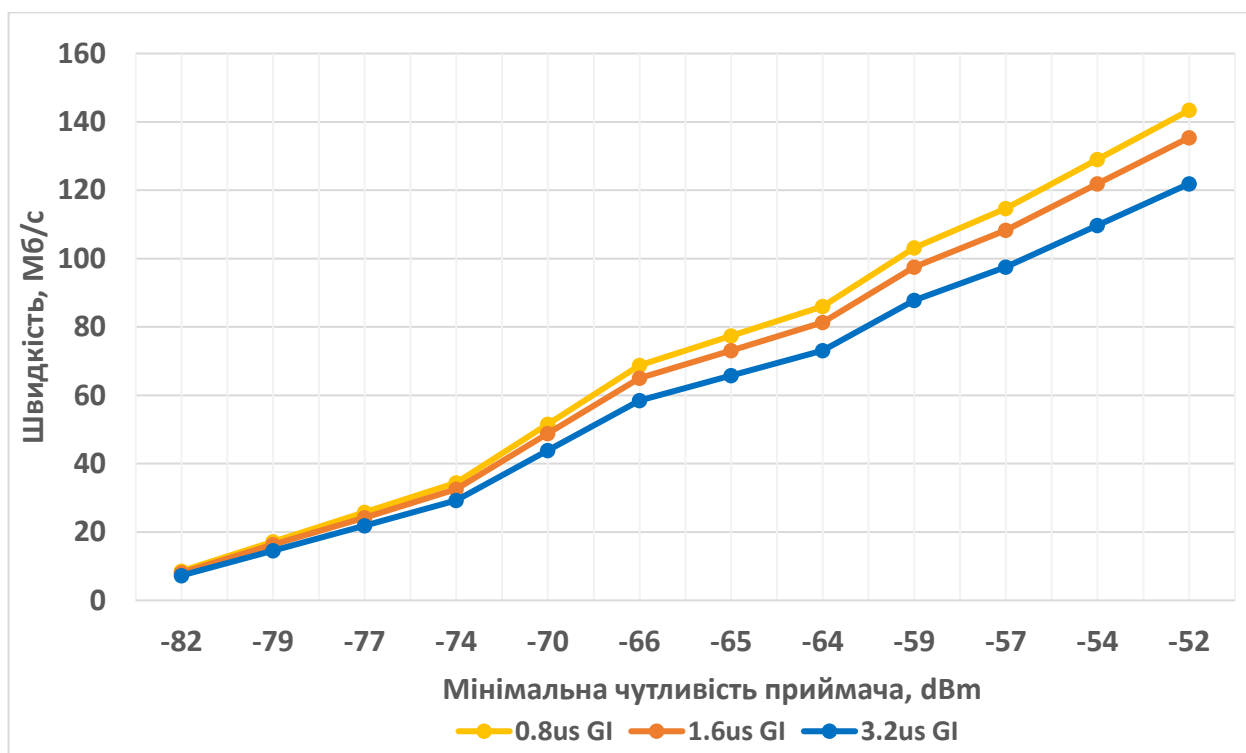


Рисунок 3.13. Залежність швидкості від мінімальної чутливості приймача,
 $\Delta f = 20$ МГц [91]

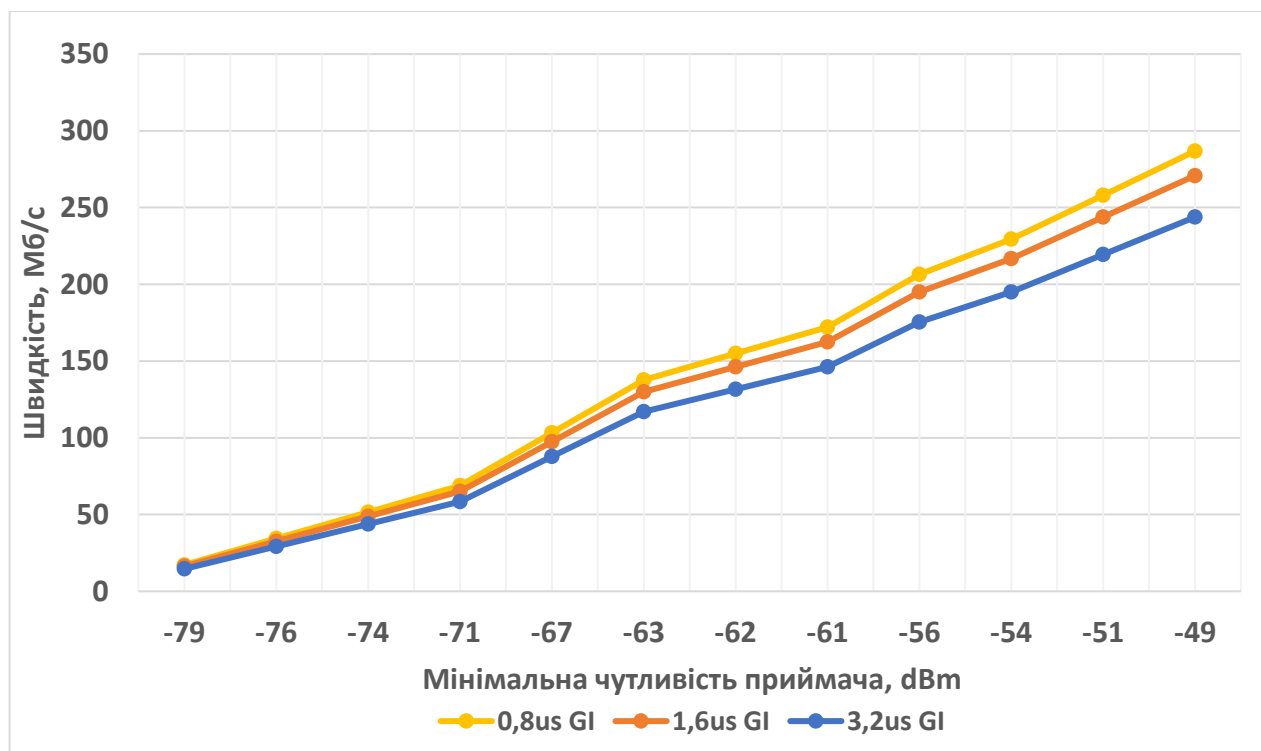


Рисунок 3.14. Залежність швидкості від мінімальної чутливості приймача,
 $\Delta f = 40$ МГц [91]

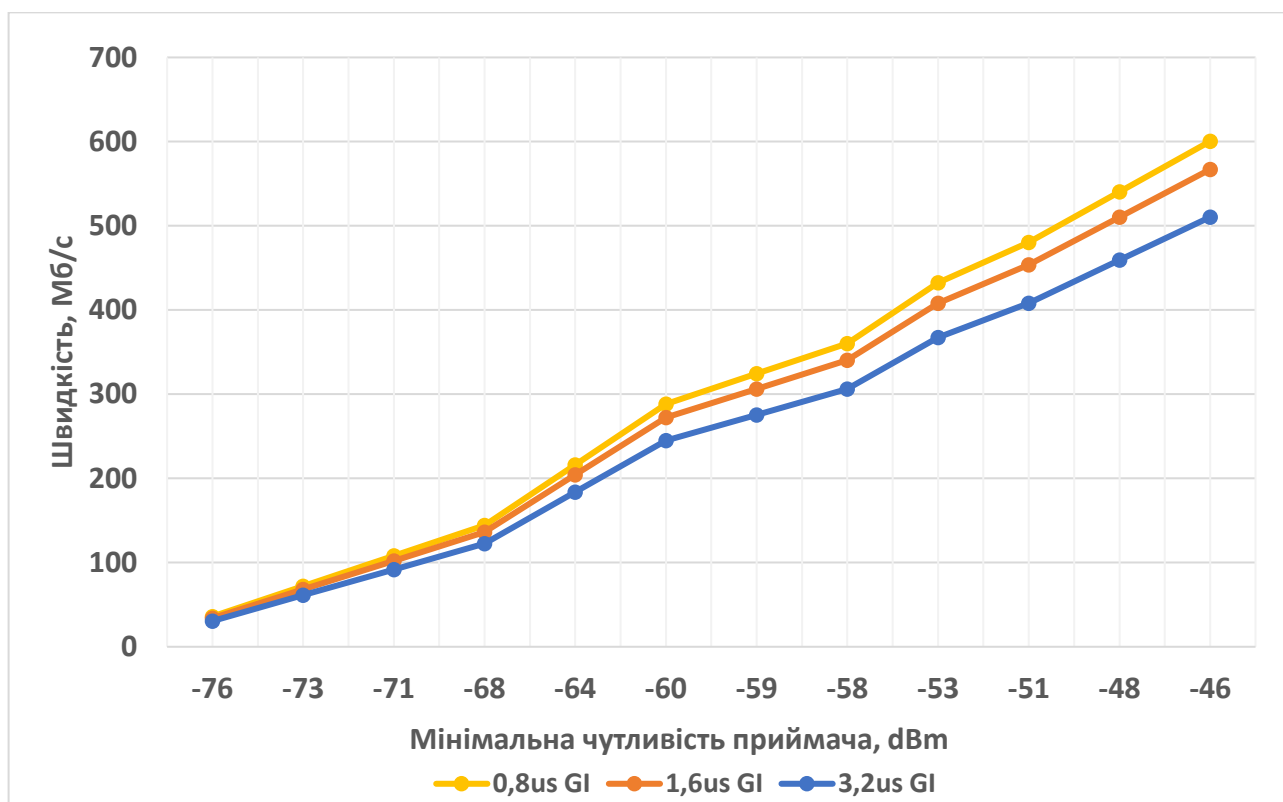


Рисунок 3.15. Залежність швидкості від мінімальної чутливості приймача,
 $\Delta f = 80$ МГц [91]

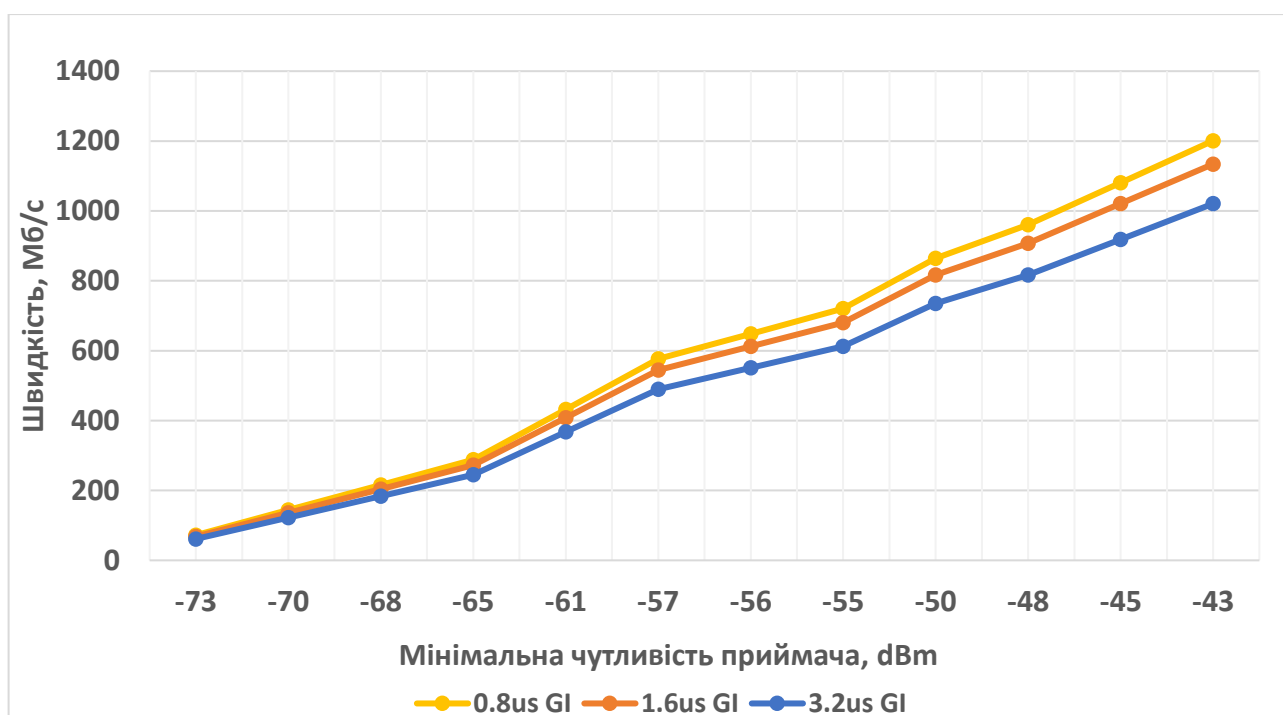


Рисунок 3.16. Залежність швидкості від мінімальної чутливості приймача,
 $\Delta f = 160$ МГц [91]

Як бачимо максимальна швидкість зростає пропорційно збільшенню мінімально необхідної чутливості приймача.

Виходячи із наявних вихідних даних можливо також встановити залежність довжини лінії зв'язку від чутливості приймача. Для цього необхідно скористатися формулою 3.1 розрахунку мінімальної чутливості приймача [91,111]:

$$P_{\text{прм}}[\text{dBm}] = P_{\text{прд}}[\text{dBm}] - L_{\text{АФТ}_1} + G_{\text{прм}} - L_{\text{мед}} - L_{\text{зап}} + G_{\text{прд}} - L_{\text{АФТ}_2} \quad (3.2)$$

де $G_{\text{прм}}$ та $G_{\text{прд}}$ – коефіцієнти підсилення приймальної та передавальної антен. $L_{\text{мед}}$ – медіанні втрати потужності ЕМХ викликані втратами у вільному просторі, в гідрометеорах та за рахунок дифракції [91,111]:

$$L_{\text{мед}}[\text{dB}] = L_{\text{віл}} + L_{\text{атм}} + L_{\text{дифр}} \quad (3.3)$$

В нашому випадку $L_{\text{дифр}}[\text{dB}] = 0$, а втрати у вільному просторі (ITU-R P.525):

$$L_{\text{віл}}[\text{dB}] = 20 \lg \left(\frac{4\pi r_{[\text{m}]}}{\lambda_{[\text{m}]}} \right) = 32.5 + 20 \lg(f_{[\text{MHz}]}) + 20 \lg(r_{[\text{km}]}) \quad (3.4)$$

Втрати в гідрометеорах (в парах води та повітрі) визначаються за рекомендацією ITU-R P.676 та рис. 3.17:

$$L_{\text{атм}}[\text{dB}] = (\gamma_{\text{сух.повітря}} + \gamma_{\text{H}_2\text{O}}) r_{[\text{km}]} \quad (3.5)$$

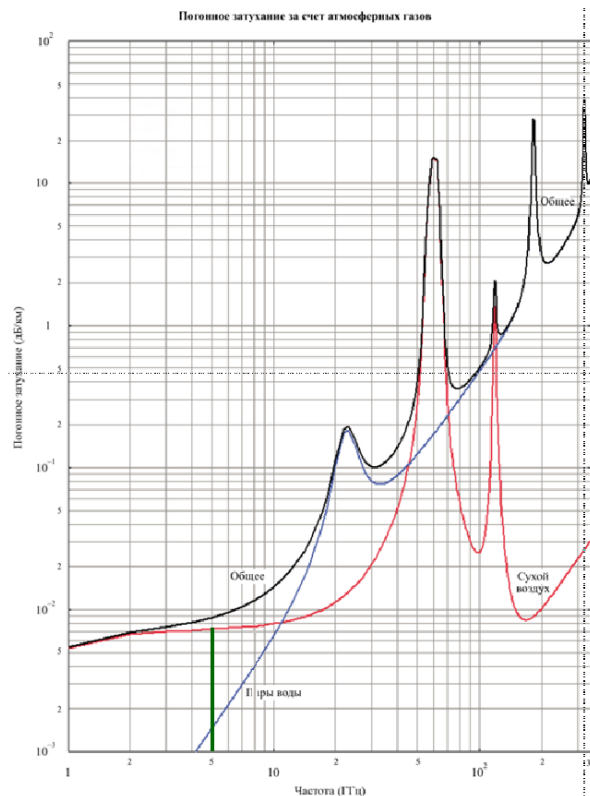


Рисунок 3.17. Втрати в гідрометеорах, рекомендація ITU-R P.676

Таким чином, медіанні втрати виходячи з формули 3.4 рівні:

$$L_{\text{мед}}[dB] = 32.5 + 20 \lg(f_{[MHz]}) + 20 \lg(r_{[km]}) + (\gamma_{\text{сух.повітря}} + \gamma_{H_2O}) r_{[km]} \quad (3.6)$$

А виходячи з рівняння 3.2 рівні:

$$L_{\text{мед}}[dB] = -P_{\text{прм}}[dBm] + P_{\text{прд}}[dBm] - L_{\text{АФТ}_1} - L_{\text{АФТ}_2} - L_{\text{зап}} + G_{\text{прм}} + G_{\text{прд}} \quad (3.7)$$

Далі можна отримати рівняння розрахунку довжини траси [91]:

$$20 \lg(r_{[km]}) + (\gamma_{\text{сух.повітря}} + \gamma_{H_2O}) r_{[km]} = -32.5 - 20 \lg(f_{[MHz]}) - P_{\text{прм}}[dBm] + P_{\text{прд}}[dBm] - L_{\text{АФТ}_1} - L_{\text{АФТ}_2} - L_{\text{зап}} + G_{\text{прм}} + G_{\text{прд}} \quad (3.8)$$

Будемо проводити розрахунки для двох робочих частот 5200 МГц та 2447 МГц, тому втрати в гідрометеорах будуть мати наступні значення [91]:

В сухому повітрі:

$$\gamma_{\text{сух.повітря}} = 7.1 * 10^{-3} \frac{dB}{km} \text{ для } 5200 \text{ МГц}$$

$$\gamma_{\text{сух.повітря}} = 7 * 10^{-3} \frac{dB}{km} \text{ для } 2447 \text{ МГц}$$

В парах води:

$$\gamma_{H_2O} = 1.7 * 10^{-3} \frac{dB}{km} \text{ для } 5200 \text{ МГц}$$

$$\gamma_{H_2O} = 0 \frac{dB}{km} \text{ для } 2447 \text{ МГц}$$

Втрати у антено-фідерному тракті приймемо $L_{\text{АФТ}_1} = L_{\text{АФТ}_2} = 0.1 \text{ dB}$, а енергетичний запас лінії $L_{\text{зап}} = 30 \text{ dB}$.

Наприклад, використовуючи спрямовану антену для ТА та для вузла з коефіцієнтом підсилення 17 дБ та передаючи сигнал з частотою 5200 МГц та потужністю передавача 25 дБм отримаємо наступне рівняння з однією невідомою:

$$20 \lg(r_{[km]}) + 0.0088r_{[km]} = -32.5 - 20 \lg(5200) + 82 + 25 - 0.1 * 2 - 30 + 17 * 2$$

$$20 \lg(r_{[km]}) + 0.0088r_{[km]} = 3.98$$

Звідки знайдемо $r_{[km]} = 1.579$

Потужність передавача у системах стандарту 802.11ах $P_{\text{прд}}[dBm] = 15 - 30 \text{ dBm}$ (для розрахунку візьмемо значення 15, 25, 30 dBm).

Чутливість приймача у системах стандарту 802.11ах $P_{\text{прм}}[dBm] = (-82) - (-43) \text{ dBm}$. Робоча частота знаходиться у двох діапазонах

= 17 dB) та всеспрямованою ($G = 5$ dB) антенами вузла відповідно (табл. 3.3-3.4 та рис. 3.19-3.30) [91].

2. Із використанням всеспрямованої антени ТА ($G = 6$ dB) та вузькоспрямованої антени ($G = 40$ dB) вузла (табл. 3.5-3.6 та рис. 3.31-3.36) [91].

Таблиця 3.3. Залежність довжини каналу зв'язку від мінімальної чутливості приймача при використанні спрямованої ($G = 17$ dB) та всеспрямованої ($G = 5$ dB) антен вузлів на частотах 2447 та 5200 МГц із енергетичним запасом 30 dB та потужністю передавача 15, 25 та 30 dBm з використанням спрямованої антени ($G = 17$ dB) (теоретичний розрахунок)

Мін. чутли- вість (dBm)	Рпрд=15 dBm				Рпрд=25 dBm				Рпрд=30 dBm			
	Частота 5200 МГц		Частота 2447 МГц		Частота 5200 МГц		Частота 2447 МГц		Частота 5200 МГц		Частота 2447 МГц	
	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
	5 dB	17 dB	5 dB	17 dB	5 dB	17 dB	5 dB	17 dB	5 dB	17 dB	5 dB	17 dB
Відстань (м)												
-82	126	500	267	1061	397	1579	843	3349	705	2803	1500	5947
-79	89	354	189	752	281	1118	597	2373	500	1986	1061	4216
-77	71	281	150	597	223	888	474	1886	397	1579	843	3351
-76	63	250	134	532	199	792	423	1681	353	1407	751	2988
-74	50	200	106	422	158	629	336	1336	281	1118	597	2374
-73	45	177	95	376	140	561	300	1190	251	997	532	2117
-71	35	141	75	299	112	445	238	946	199	792	422	1682
-70	32	126	67	267	100	397	212	843	177	706	377	1499
-68	25	100	53	212	80	315	168	670	141	561	299	1191
-67	22	89	47	189	71	281	150	597	126	500	267	1061
-66	20	79	42	168	63	250	133	532	112	445	238	946
-65	18	71	38	150	56	223	120	474	100	397	212	843
-64	16	63	34	134	50	199	106	422	89	353	189	752
-63	14	56	30	119	45	177	95	377	79	315	168	670
-62	13	50	27	106	40	158	84	336	71	281	150	597
-61	11	45	24	95	35	141	75	300	63	250	134	532
-60	10	40	21	84	32	126	67	267	56	223	119	474
-59	8.8	35	19	75	28	111	60	238	50	199	106	423
-58	7.9	32	17	67	25	100	53	211	45	177	95	377
-57	7	28	15	60	22	90	47	189	40	158	84	336
-56	6.3	25	13	53	20	80	42	168	35	141	75	299
-55	5.6	22	12	47	18	70	38	150	32	126	67	267
-54	5	20	11	42	16	63	34	134	28	112	60	238
-53	4.5	18	9.5	38	14	56	30	120	25	100	53	211
-52	3.9	16	8.4	34	13	50	27	106	22	89	47	188
-51	3.5	14	7.5	30	11	45	24	95	20	79	42	168
-50	3.1	13	6.7	27	10	40	21	84	18	71	38	150
-49	2.8	11	6	24	8.8	35	19	75	16	63	34	134
-48	2.5	10	5.3	21	7.9	32	17	67	14	56	30	119
-46	1.9	7.9	4.2	17	6.3	25	13	53	11	45	24	95
-45	1.7	7	3.7	15	5.6	22	12	47	9.9	40	21	84
-43	1.4	5.6	3	12	4.5	18	9.5	38	7.9	32	17	67

Таблиця 3.4. Залежність довжини каналу зв'язку від мінімальної чутливості приймача при використанні спрямованої ($G = 17$ dB) та всеспрямованої ($G = 5$ dB) антен вузлів на частотах 2447 та 5200 МГц із енергетичним запасом 30 dB та потужністю передавача 15, 25 та 30 dBm з використанням спрямованої антени ($G = 17$ dB) (розрахунок за допомогою Atoll)

Мін. чутливість (dBm)	Рпрд=15 dBm				Рпрд=25 dBm				Рпрд=30 dBm			
	Частота 5200 МГц		Частота 2447 МГц		Частота 5200 МГц		Частота 2447 МГц		Частота 5200 МГц		Частота 2447 МГц	
	G 5 dB	G 17 dB	G 5 dB	G 17 dB	G 5 dB	G 17 dB	G 5 dB	G 17 dB	G 5 dB	G 17 dB	G 5 dB	G 17 dB
	Відстань (м)											
-82	122	511	258	1086	384	1614	816	3423	681	2870	1448	6079
-79	86	362	182	769	271	1143	578	2429	483	2033	1026	4315
-77	68	287	145	611	216	908	459	1930	383	1615	814	3428
-76	61	256	129	544	192	810	408	1722	342	1440	726	3056
-74	48	204	102	433	153	643	324	1366	271	1144	577	2429
-73	43	182	91	385	136	573	290	1219	242	1020	514	2166
-71	34	144	73	306	108	456	230	970	192	810	409	1720
-70	30	129	65	273	96	407	205	864	171	722	364	1534
-68	24	100	51	217	77	323	163	685	136	574	289	1219
-67	21	91	46	193	68	288	145	611	121	511	258	1086
-66	19	81	41	173	61	256	129	544	108	455	230	968
-65	17	72	37	153	54	228	115	486	96	406	205	863
-64	15	64	32	137	49	204	102	433	86	362	182	769
-63	14	57	29	122	43	181	92	385	76	322	163	685
-62	12	51	26	109	38	162	82	344	68	287	145	610
-61	11	46	23	97	34	144	73	306	61	256	129	544
-60	10	41	21	86	30	129	65	273	54	229	115	485
-59	9	36	18	77	27	115	58	243	48	204	103	433
-58	8	32	16	68	24	102	52	217	43	182	91	385
-57	7	29	15	61	22	91	46	194	38	162	82	344
-56	6	26	13	54	19	81	41	172	34	144	73	306
-55	5	23	11	49	17	72	37	153	30	128	65	273
-54	4.5	20	10	43	15	64	32	137	27	115	58	243
-53	4	18	9	38	13	58	29	122	24	102	51	217
-52	3.8	16	8	35	12	51	26	109	22	91	46	193
-51	3.5	14	7	31	11	45	23	97	19	81	41	172
-50	3	13	6	27	10	40	20	86	17	72	36	153
-49	2.8	11	6	24	9	36	18	77	15	65	33	137
-48	2.5	10	5	21	8	32	16	68	14	57	29	122
-46	2	8	4	17	6	25	13	54	11	46	23	97
-45	1.5	7	3.5	15	5	23	12	48	10	41	21	86
-43	1	6	3	12	4	18	9	38	8	32	16	69

Таблиця 3.5. Залежність довжини каналу зв'язку від мінімальної чутливості приймача при використанні спрямованої ($G = 40$ dB) антени вузлів на частотах 2447 та 5200 МГц із енергетичним запасом 30 dB та потужністю передавача 15, 25 та 30 dBm з використанням всеспрямованої антени ($G = 6$ dB) (теоретичний розрахунок)

Мін. чутливість (dBm)	Рпрд=15 dBm		Рпрд=25 dBm		Рпрд=30 dBm	
	Частота 5200 МГц	Частота 2447 МГц	Частота 5200 МГц	Частота 2447 МГц	Частота 5200 МГц	Частота 2447 МГц
	Відстань (м)					
-82	1987	4216	6255	13235	11069	23345
-79	1407	2988	4437	9399	7862	16617
-77	1118	2374	3527	7477	6255	13235
-76	997	2117	3145	6668	5579	11810
-74	792	1682	2500	5303	4436	9399
-73	706	1499	2228	4728	3956	8384
-71	561	1191	1771	3759	3145	6669
-70	500	1062	1579	3351	2804	5947
-68	397	843	1254	2663	2229	4728
-67	354	752	1118	2374	1987	4216
-66	316	670	997	2117	1771	3729
-65	281	597	888	1887	1579	3351
-64	251	532	792	1682	1407	2988
-63	223	474	706	1499	1254	2663
-62	199	423	629	1336	1118	2374
-61	177	377	561	1191	997	2117
-60	158	336	500	1062	888	1887
-59	141	299	445	946	792	1682
-58	126	267	397	843	706	1499
-57	112	238	354	752	629	1336
-56	100	212	315	670	561	1191
-55	89	189	281	597	500	1061
-54	79	168	251	532	445	946
-53	71	150	223	474	397	843
-52	63	134	199	422	354	752
-51	56	119	177	377	315	670
-50	50	106	158	336	281	597
-49	45	95	141	299	251	532
-48	40	84	126	267	223	474
-46	32	67	100	212	177	377
-45	28	60	89	189	158	336
-43	22	47	71	150	126	267

Таблиця 3.6. Залежність довжини каналу зв'язку від мінімальної чутливості приймача при використанні спрямованої ($G = 40$ dB) антени вузлів на частотах 2447 та 5200 МГц із енергетичним запасом 30 dB та потужністю передавача 15, 25 та 30 dBm з використанням всеспрямованої антени ($G = 6$ dB) (розрахунок за допомогою Atoll)

Мін. чутливість (dBm)	Рпрд=15 dBm		Рпрд=25 dBm		Рпрд=30 dBm	
	Частота 5200 МГц	Частота 2447 МГц	Частота 5200 МГц	Частота 2447 МГц	Частота 5200 МГц	Частота 2447 МГц
	Відстань (м)					
-82	1920	4070	6047	12776	10701	22551
-79	1360	2886	4288	9082	7597	16049
-77	1081	2293	3409	7226	6047	12776
-76	962	2044	3039	6444	5389	11405
-74	765	1624	2414	5123	4288	9081
-73	682	1448	2153	4568	3821	8097
-71	541	1150	1712	3631	3040	6443
-70	483	1026	1524	3238	2710	5742
-68	383	815	1212	2574	2152	4567
-67	342	726	1080	2294	1920	4074
-66	305	648	963	2044	1711	3633
-65	272	577	859	1823	1525	3239
-64	242	514	765	1625	1360	2885
-63	216	458	682	1448	1212	2573
-62	192	408	608	1291	1080	2293
-61	171	364	542	1151	962	2045
-60	153	325	483	1025	858	1823
-59	136	289	430	914	765	1625
-58	121	258	383	815	682	1449
-57	108	230	342	726	608	1291
-56	96	205	305	647	542	1150
-55	86	183	271	577	483	1026
-54	77	162	242	514	430	915
-53	68	145	216	458	383	815
-52	61	129	192	409	342	726
-51	54	115	171	364	305	647
-50	48	103	153	324	272	577
-49	43	91	136	289	242	514
-48	38	81	121	258	216	458
-46	30	65	96	205	171	364
-45	27	58	86	183	153	324
-43	22	46	68	145	121	258

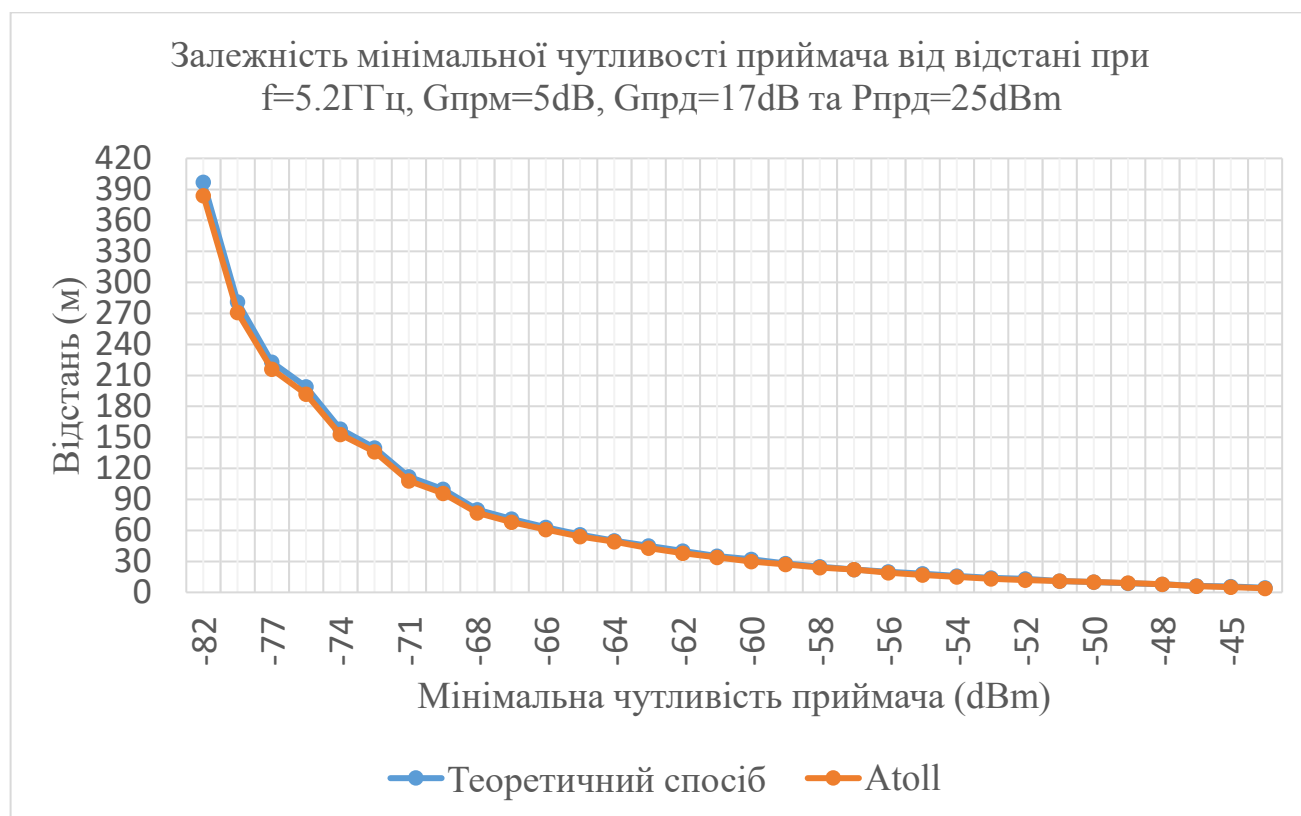


Рисунок 3.19. Залежність мінімальної чутливості приймача від відстані при
 $f = 5.2\text{ ГГц}$, $G_{\text{прм}} = 5\text{ dB}$, $G_{\text{прд}} = 17\text{ dB}$ та $P_{\text{прд}} = 25\text{ dBm}$ [91]

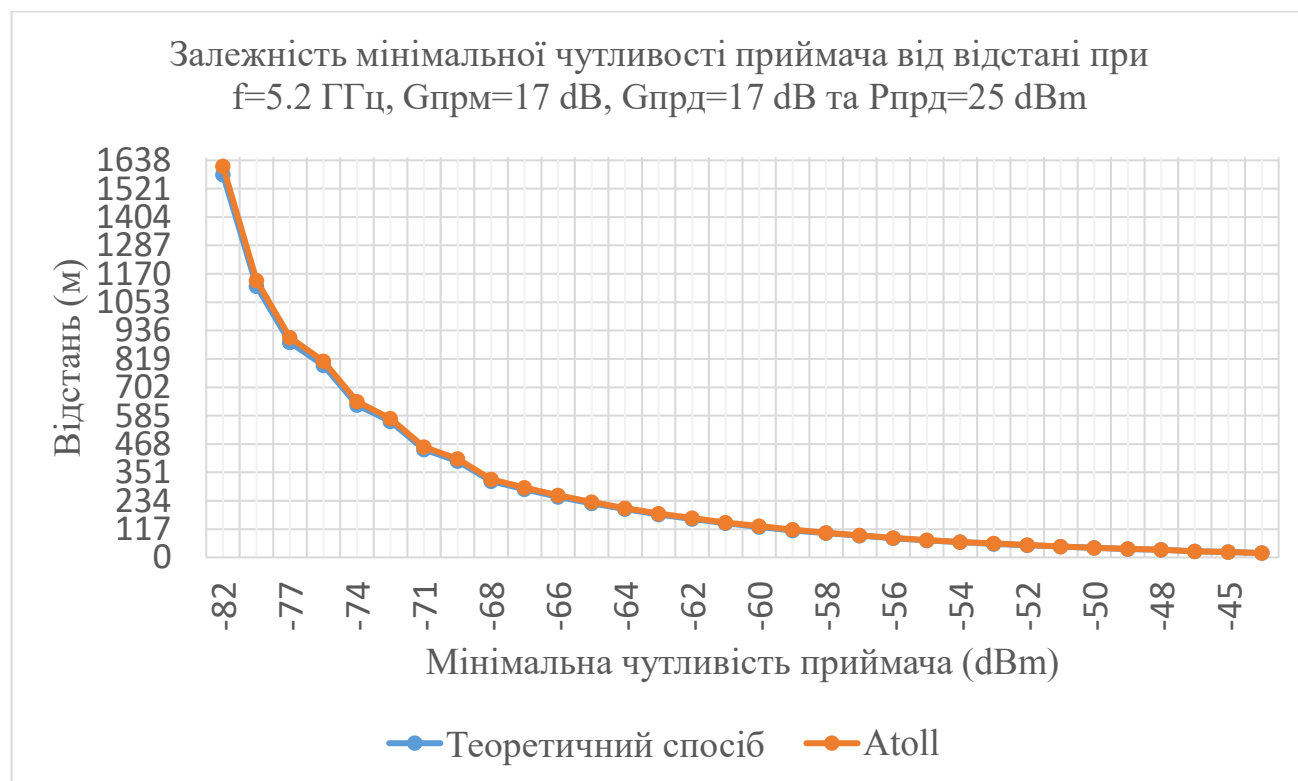


Рисунок 3.20. Залежність мінімальної чутливості приймача від відстані при
 $f = 5.2\text{ ГГц}$, $G_{\text{прм}} = 17\text{ dB}$, $G_{\text{прд}} = 17\text{ dB}$ та $P_{\text{прд}} = 25\text{ dBm}$ [91]

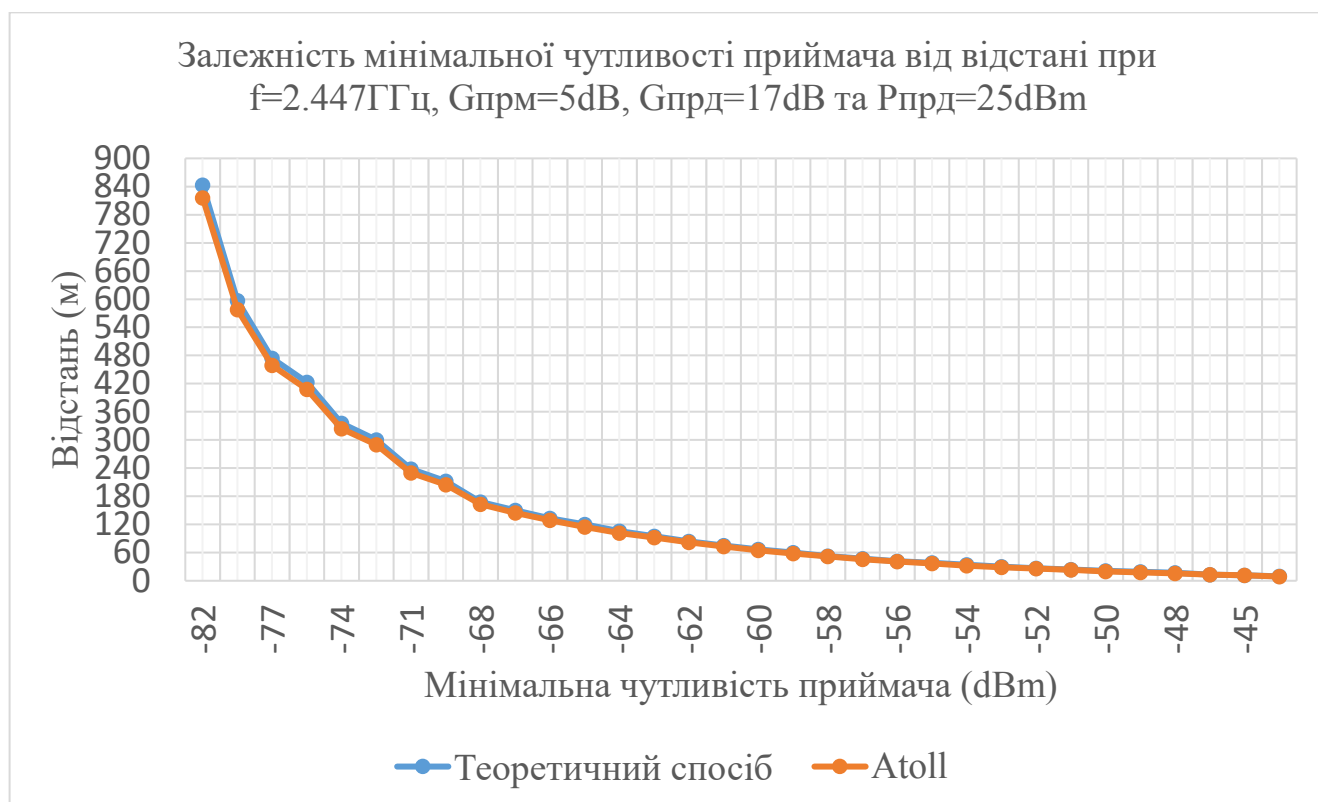


Рисунок 3.21. Залежність мінімальної чутливості приймача від відстані при
 $f = 2.447\text{ ГГц}$, $G_{\text{прм}} = 5\text{ dB}$, $G_{\text{прд}} = 17\text{ dB}$ та $P_{\text{прд}} = 25\text{ dBm}$ [91]

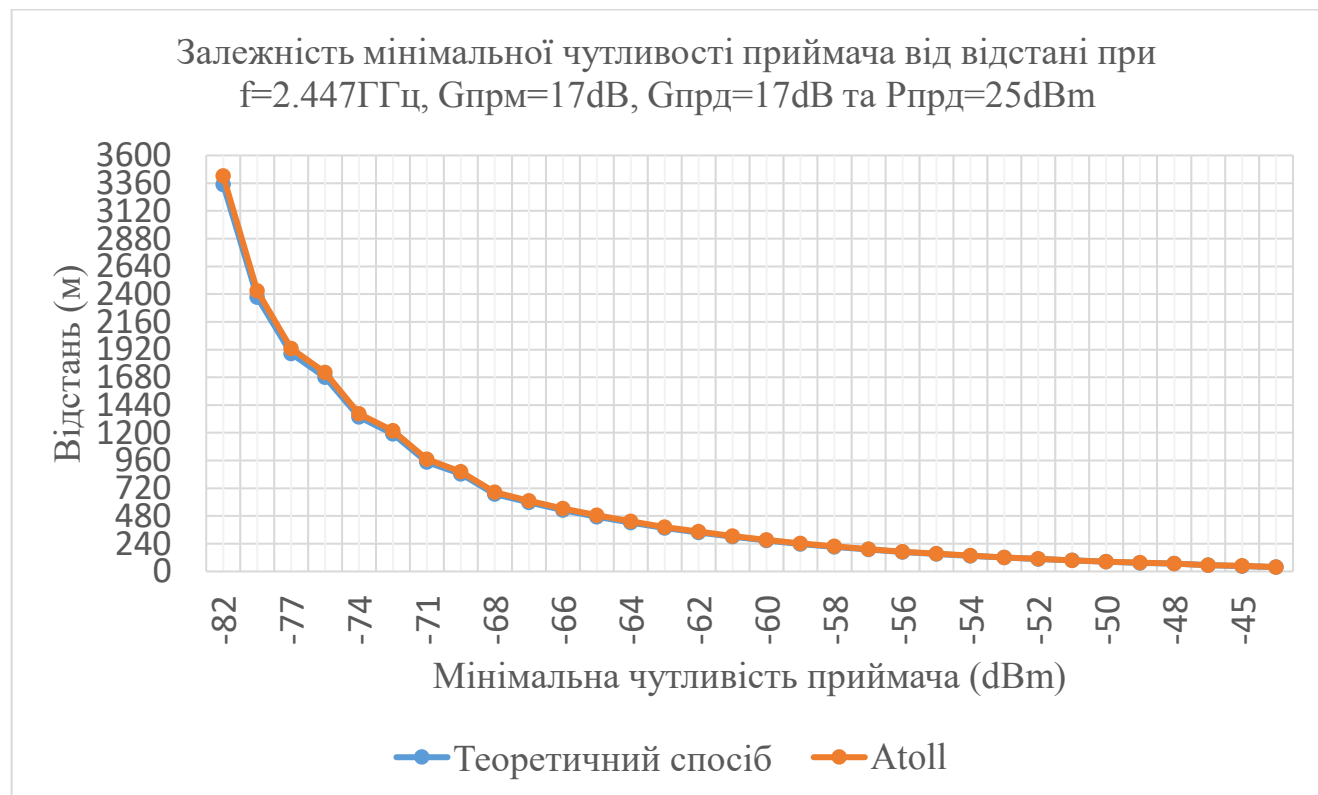


Рисунок 3.22. Залежність мінімальної чутливості приймача від відстані при
 $f = 2.447\text{ ГГц}$, $G_{\text{прм}} = 17\text{ dB}$, $G_{\text{прд}} = 17\text{ dB}$ та $P_{\text{прд}} = 25\text{ dBm}$ [91]

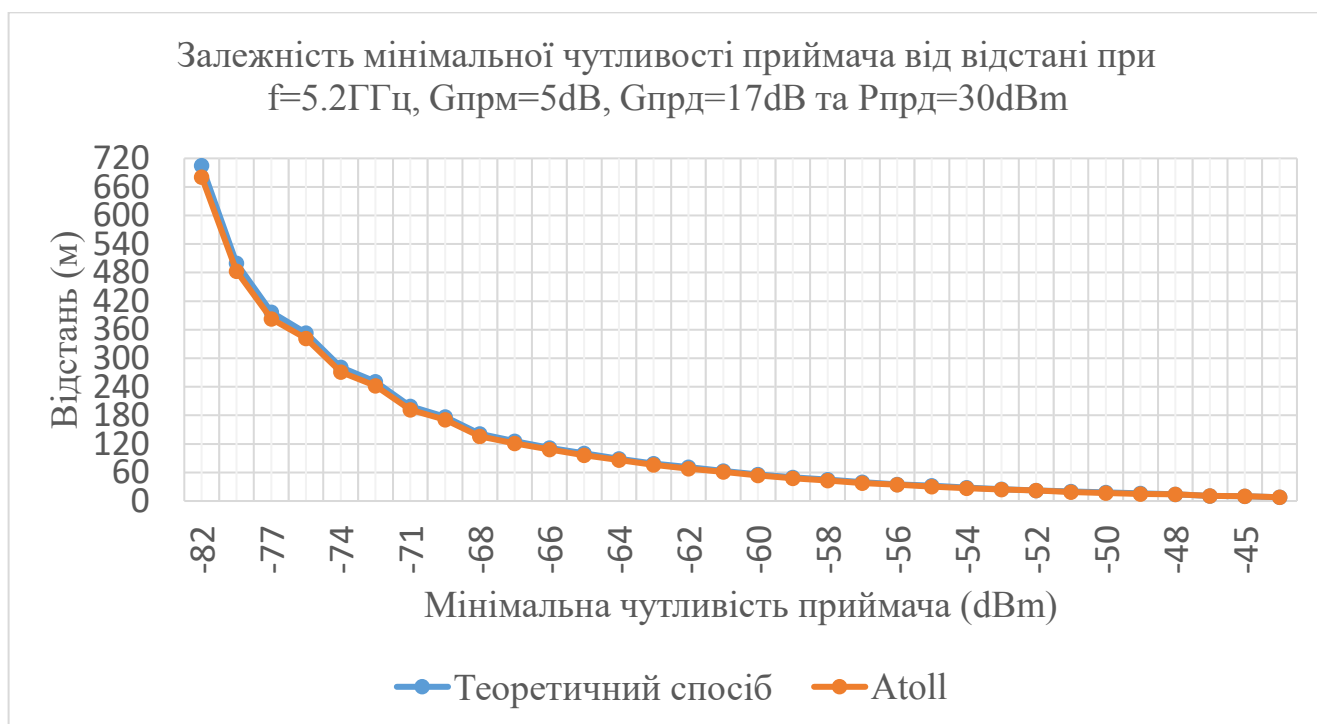


Рисунок 3.23. Залежність мінімальної чутливості приймача від відстані при $f = 5.2 \text{ ГГц}$, $G_{\text{прм}} = 5 \text{ dB}$, $G_{\text{прд}} = 17 \text{ dB}$ та $P_{\text{прд}} = 30 \text{ dBm}$ [91]

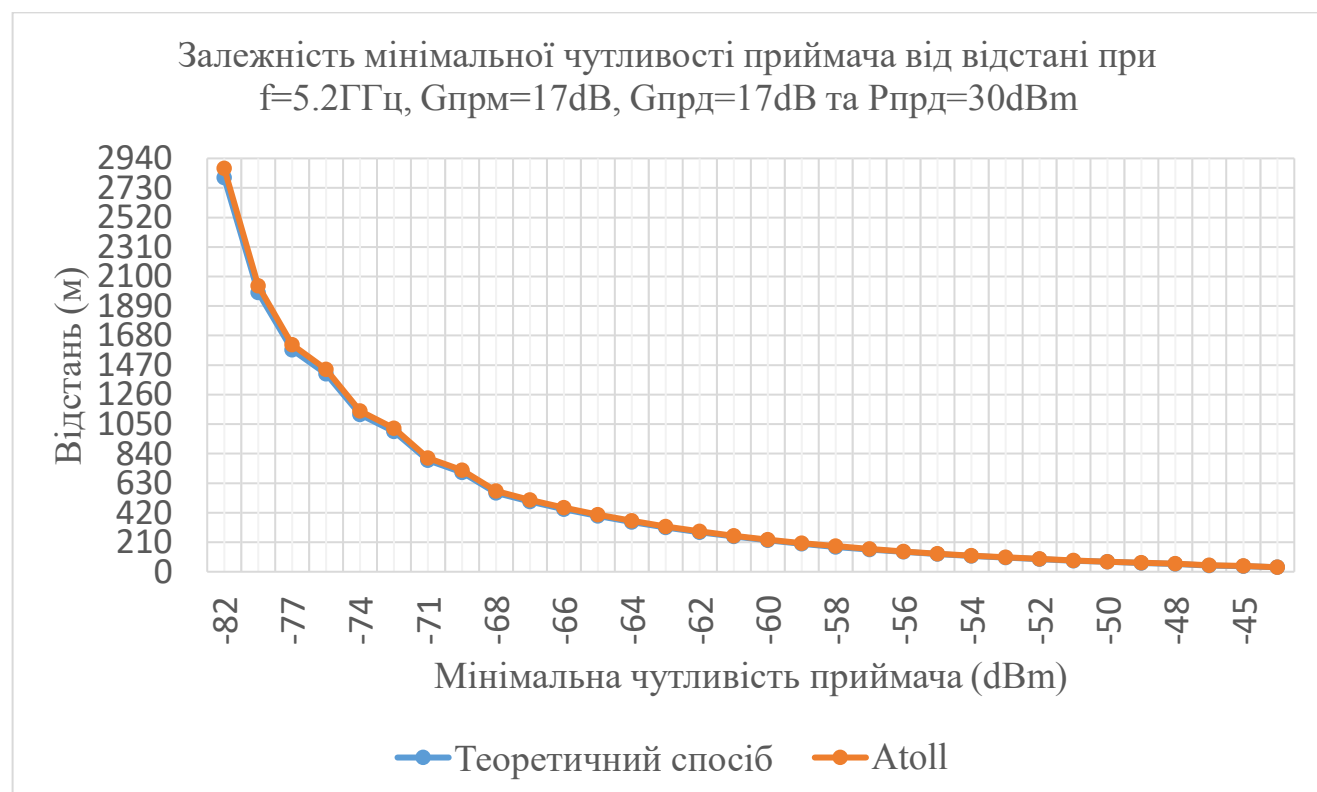


Рисунок 3.24. Залежність мінімальної чутливості приймача від відстані при $f = 5.2 \text{ ГГц}$, $G_{\text{прм}} = 17 \text{ dB}$, $G_{\text{прд}} = 17 \text{ dB}$ та $P_{\text{прд}} = 30 \text{ dBm}$ [91]

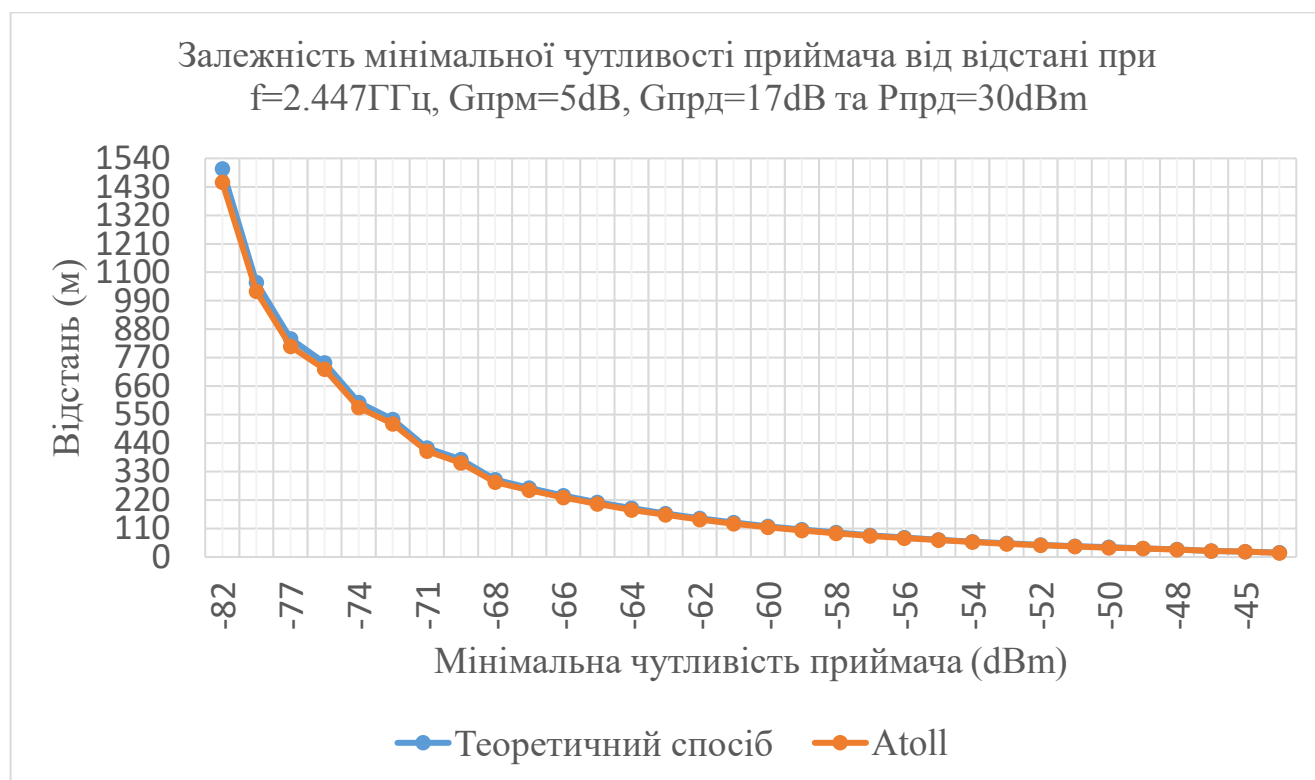


Рисунок 3.25. Залежність мінімальної чутливості приймача від відстані при
 $f = 2.447 \text{ ГГц}$, $G_{\text{прм}} = 5 \text{ dB}$, $G_{\text{прд}} = 17 \text{ dB}$ та $P_{\text{прд}} = 30 \text{ dBm}$ [91]

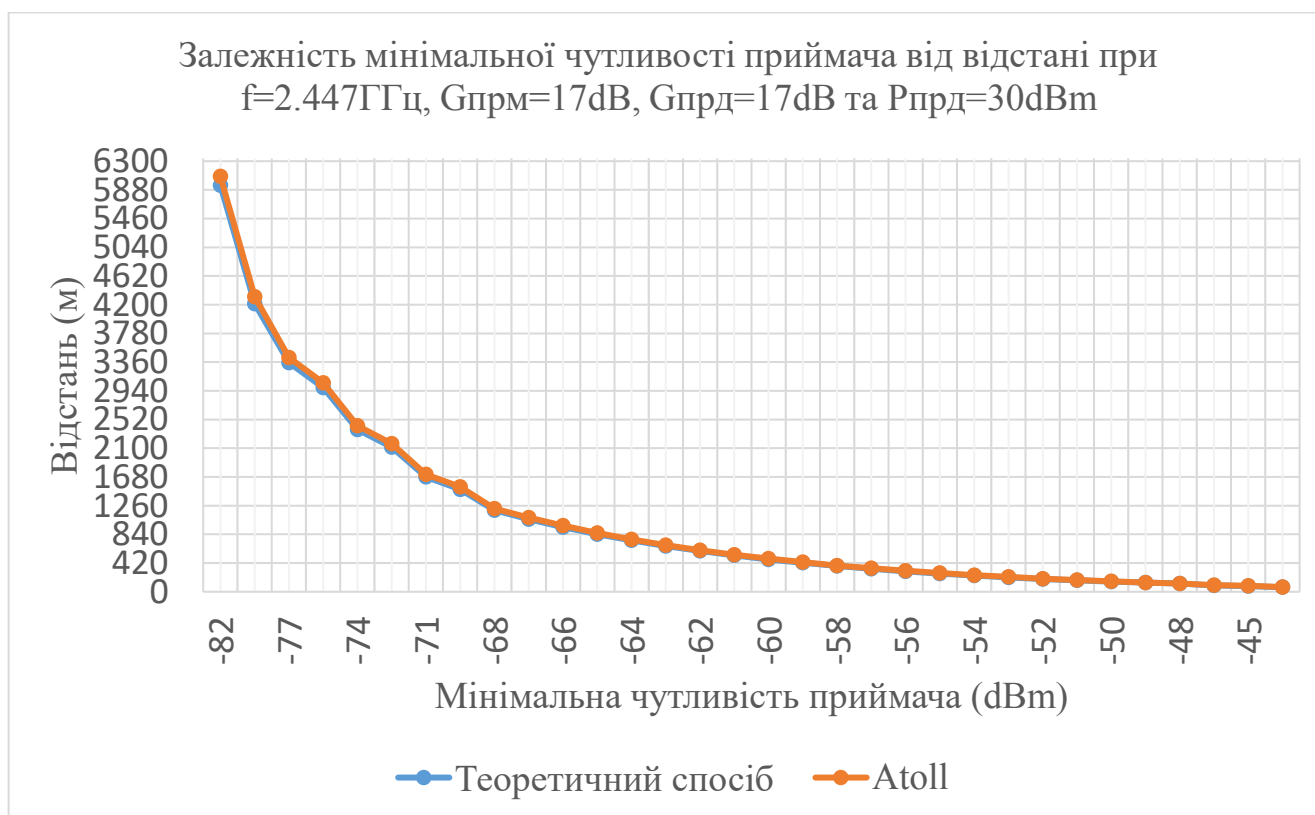


Рисунок 3.26. Залежність мінімальної чутливості приймача від відстані при
 $f = 2.447 \text{ ГГц}$, $G_{\text{прм}} = 17 \text{ dB}$, $G_{\text{прд}} = 17 \text{ dB}$ та $P_{\text{прд}} = 30 \text{ dBm}$ [91]

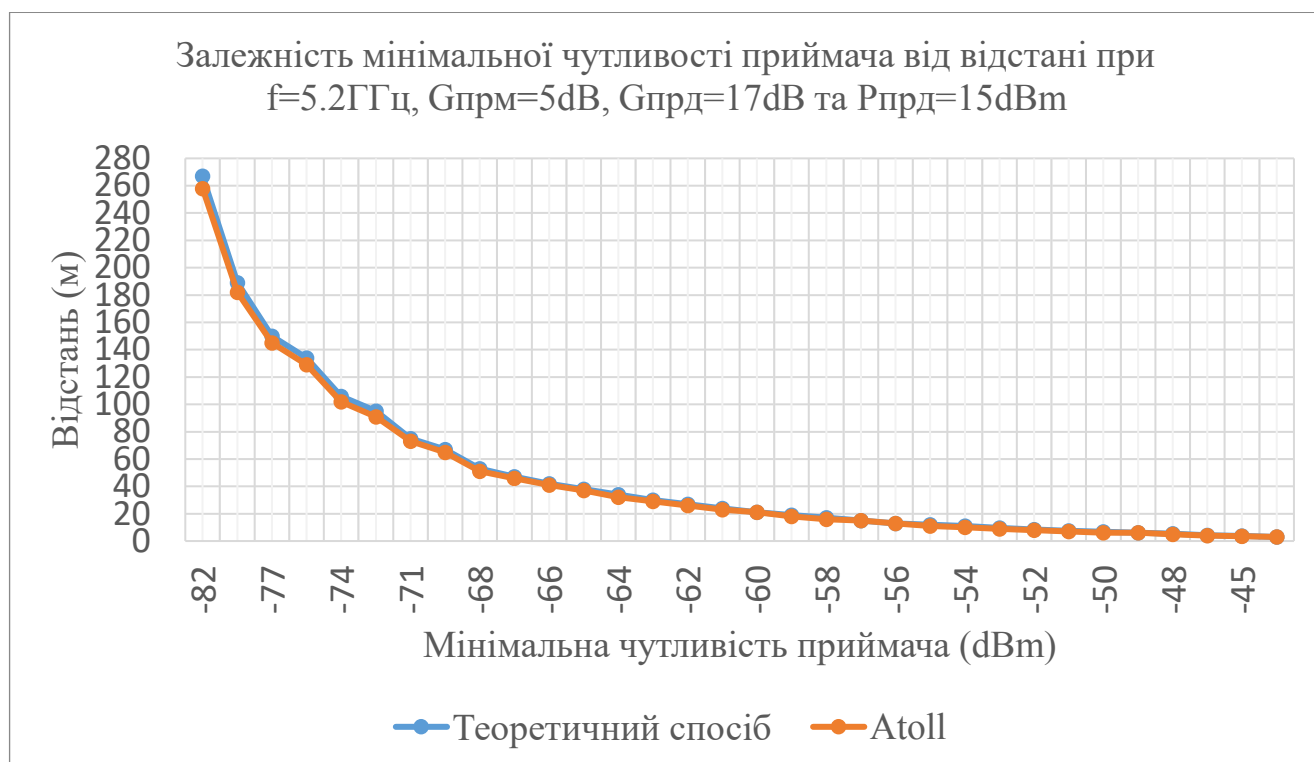


Рисунок 3.27. Залежність мінімальної чутливості приймача від відстані при
 $f = 5.2 \text{ ГГц}$, $G_{\text{прм}} = 5 \text{ dB}$, $G_{\text{прд}} = 17 \text{ dB}$ та $P_{\text{прд}} = 15 \text{ dBm}$ [91]

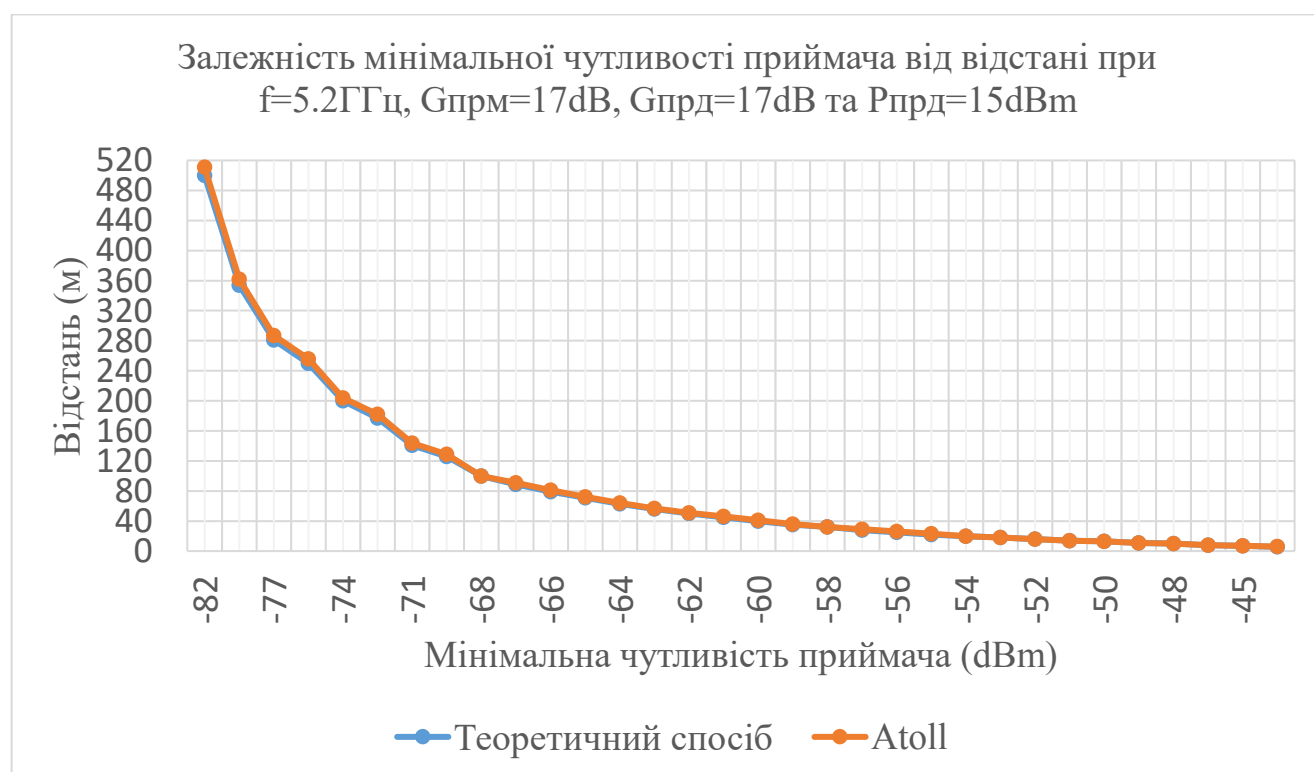


Рисунок 3.28. Залежність мінімальної чутливості приймача від відстані при
 $f = 5.2 \text{ ГГц}$, $G_{\text{прм}} = 17 \text{ dB}$, $G_{\text{прд}} = 17 \text{ dB}$ та $P_{\text{прд}} = 15 \text{ dBm}$ [91]

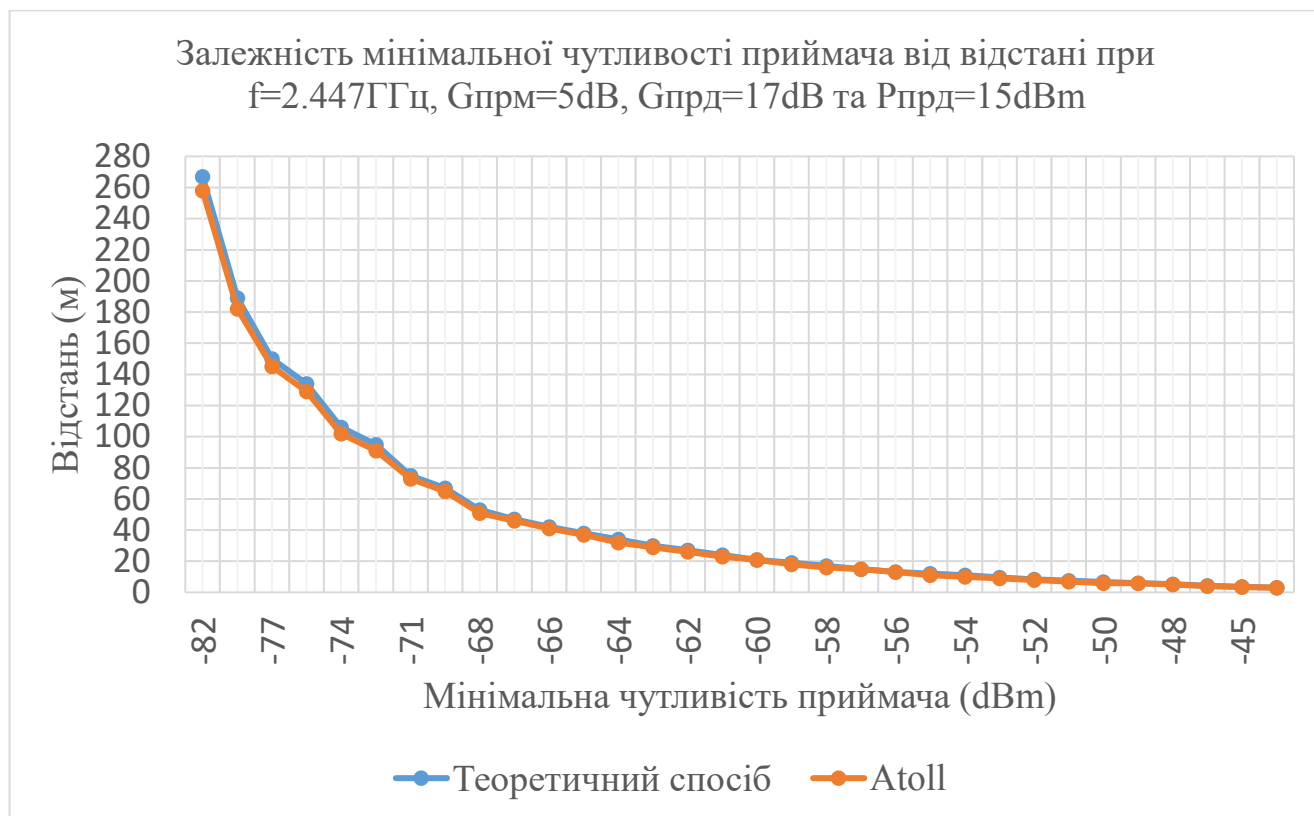


Рисунок 3.29. Залежність мінімальної чутливості приймача від відстані при
 $f = 2.447 \text{ ГГц}$, $G_{\text{прм}} = 5 \text{ dB}$, $G_{\text{прд}} = 17 \text{ dB}$ та $P_{\text{прд}} = 15 \text{ dBm}$ [91]

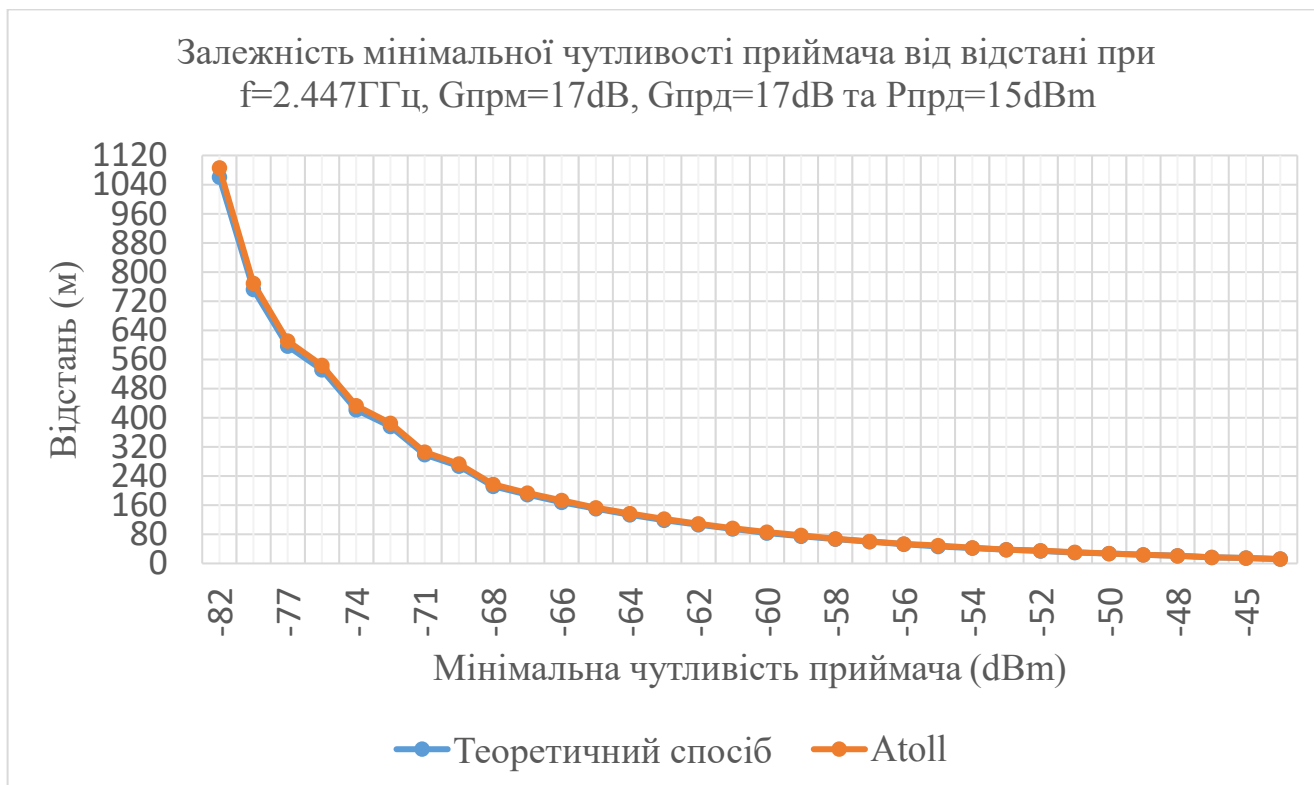


Рисунок 3.30. Залежність мінімальної чутливості приймача від відстані при
 $f = 2.447 \text{ ГГц}$, $G_{\text{прм}} = 17 \text{ dB}$, $G_{\text{прд}} = 17 \text{ dB}$ та $P_{\text{прд}} = 15 \text{ dBm}$ [91]

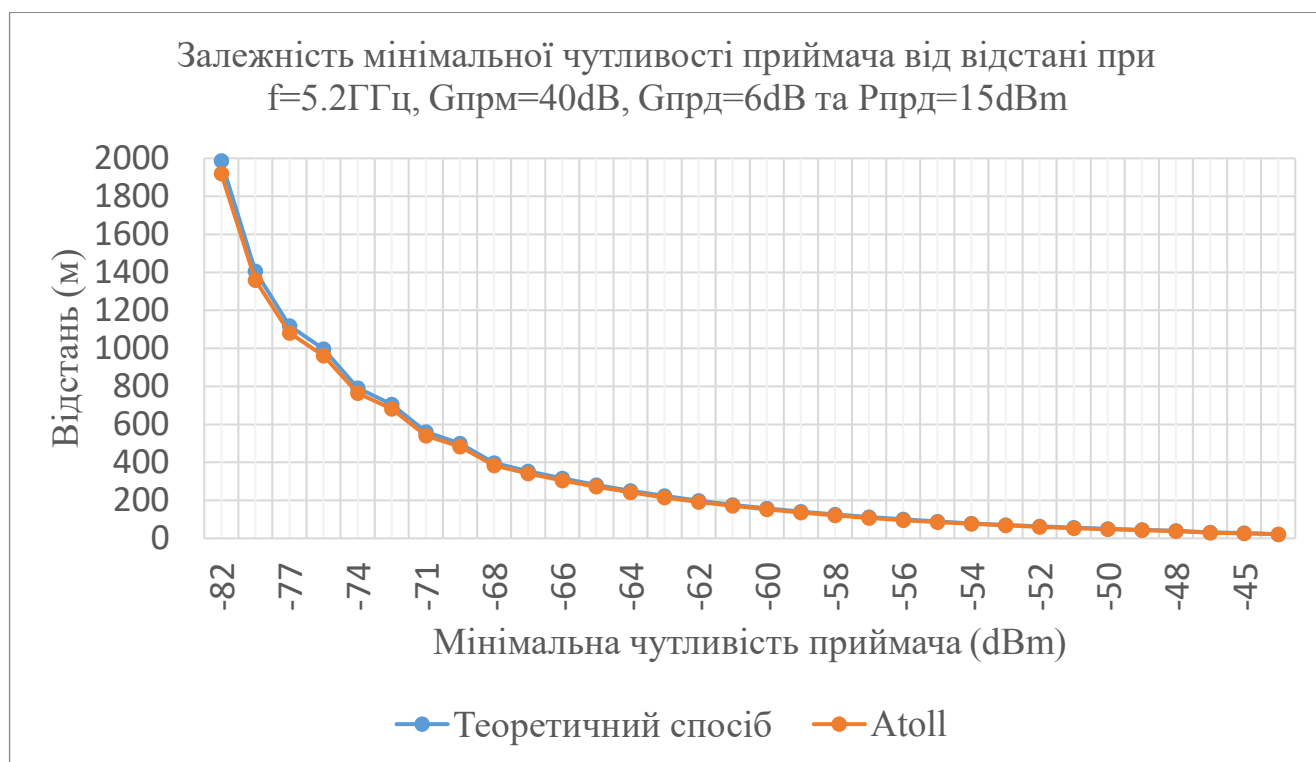


Рисунок 3.31. Залежність мінімальної чутливості приймача від відстані при
 $f = 5.2 \text{ ГГц}$, $G_{\text{прм}} = 40 \text{ dB}$, $G_{\text{прд}} = 6 \text{ dB}$ та $P_{\text{прд}} = 15 \text{ dBm}$ [91]

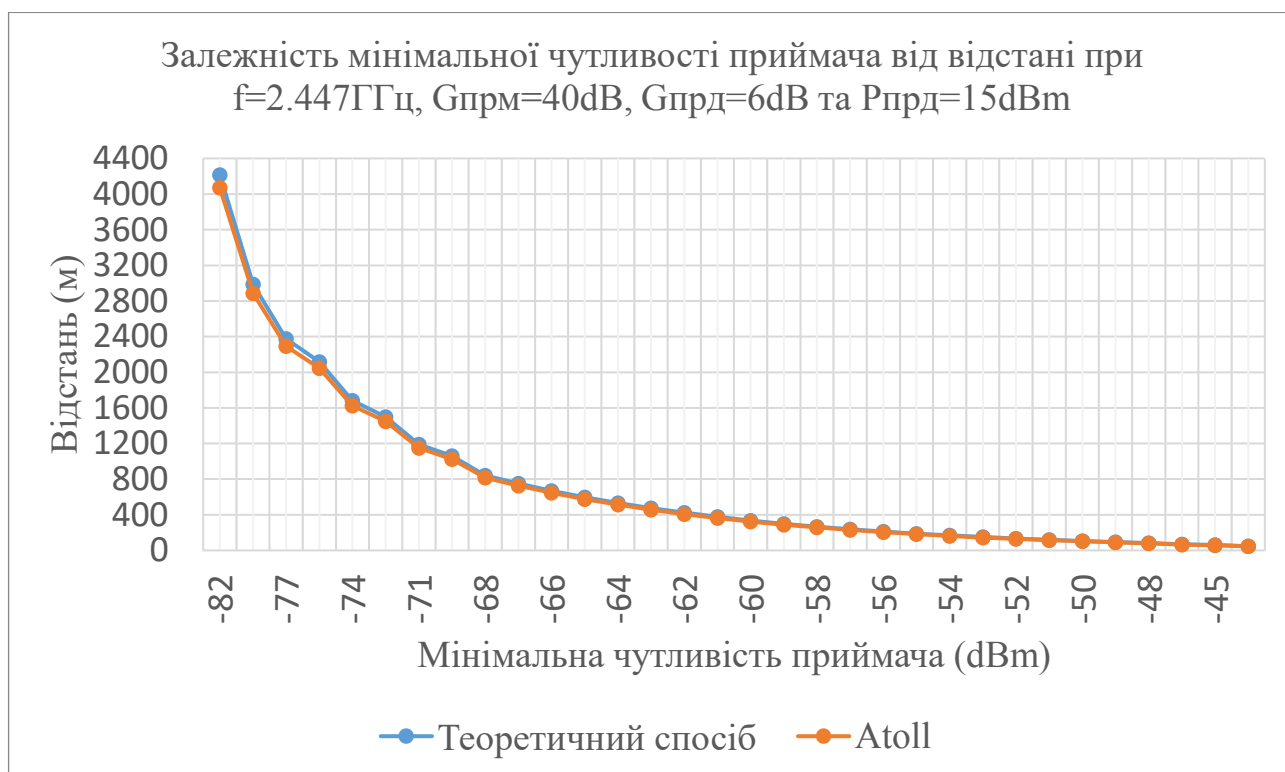


Рисунок 3.32. Залежність мінімальної чутливості приймача від відстані при
 $f = 2.447 \text{ ГГц}$, $G_{\text{прм}} = 40 \text{ dB}$, $G_{\text{прд}} = 6 \text{ dB}$ та $P_{\text{прд}} = 15 \text{ dBm}$ [91]

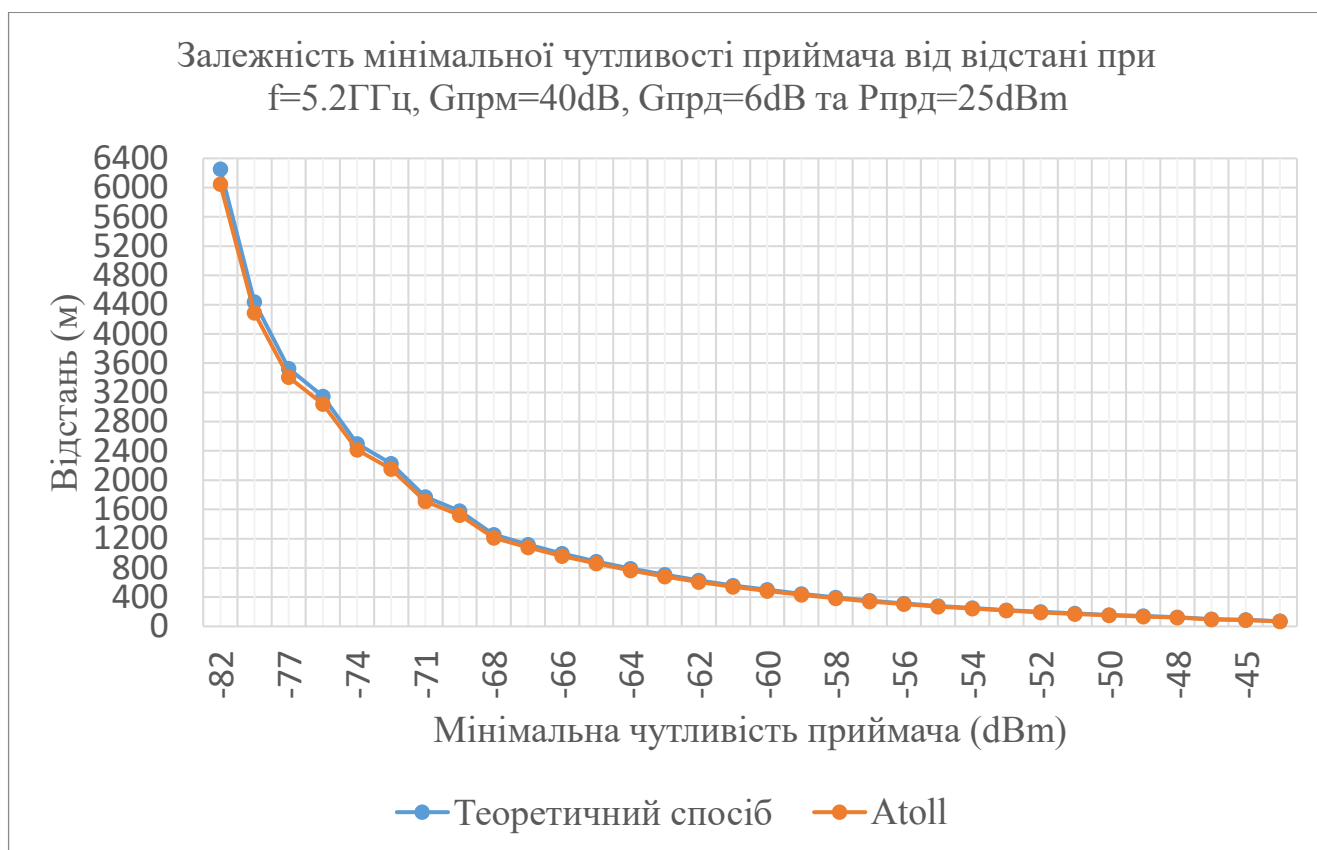


Рисунок 3.33. Залежність мінімальної чутливості приймача від відстані при
 $f = 5.2 \text{ ГГц}$, $G_{\text{прм}} = 40 \text{ dB}$, $G_{\text{прд}} = 6 \text{ dB}$ та $P_{\text{прд}} = 25 \text{ dBm}$ [91]

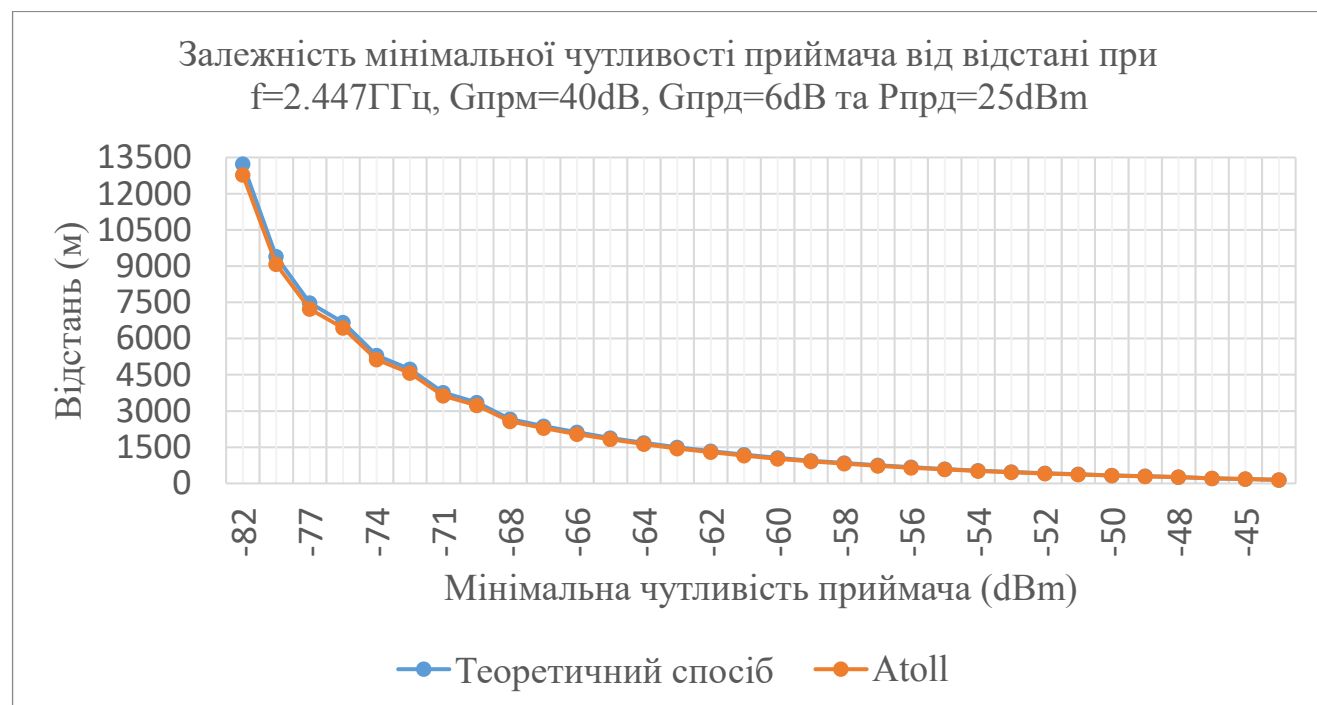


Рисунок 3.34. Залежність мінімальної чутливості приймача від відстані при
 $f = 2.447 \text{ ГГц}$, $G_{\text{прм}} = 40 \text{ dB}$, $G_{\text{прд}} = 6 \text{ dB}$ та $P_{\text{прд}} = 25 \text{ dBm}$ [91]

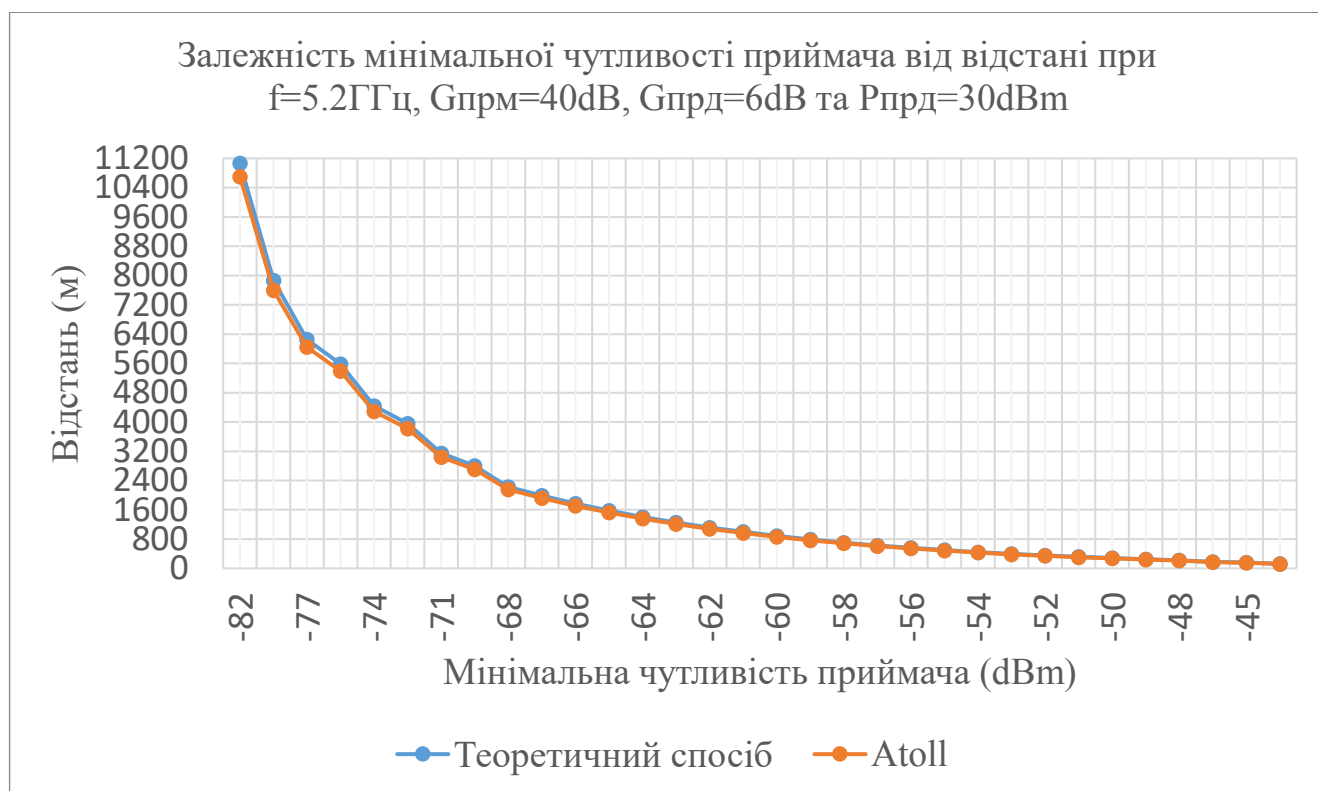


Рисунок 3.35. Залежність мінімальної чутливості приймача від відстані при $f = 5.2\text{ ГГц}$, $G_{\text{прм}} = 40\text{ dB}$, $G_{\text{прд}} = 6\text{ dB}$ та $P_{\text{прд}} = 30\text{ dBm}$ [91]

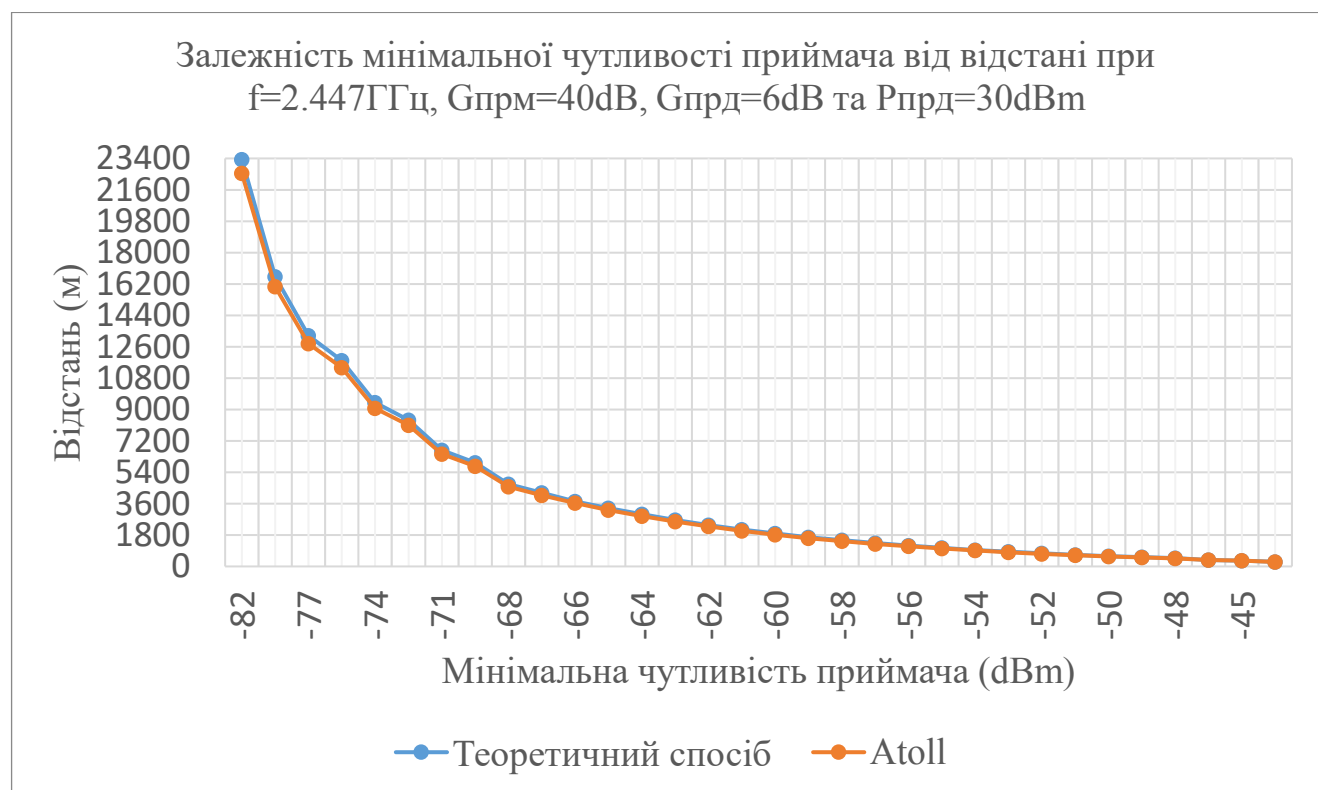


Рисунок 3.36. Залежність мінімальної чутливості приймача від відстані при $f = 2.447\text{ ГГц}$, $G_{\text{прм}} = 40\text{ dB}$, $G_{\text{прд}} = 6\text{ dB}$ та $P_{\text{прд}} = 30\text{ dBm}$ [91]

Як бачимо залежності при різних вхідних значеннях коефіцієнтів підсилення, потужностей передавача та робочих частотах мають однакову експоненційну залежність та спадний характер. Тобто при збільшенні мінімально необхідної чутливості приймача зменшується максимальна відстань каналу зв'язку. Також значення теоретичного розрахунку підтверджуються розрахунком за допомогою Atoll [91].

Порівнюючи сімейство графіків залежності швидкості від мінімальної чутливості передавача (рис. 3.13-3.16) та залежності відстані від мінімальної чутливості передавача (рис. 3.19 – 3.36) можна зробити висновок, що максимальна швидкість передачі даних зменшується зі збільшенням довжини каналу зв'язку. Отримані залежності наведені у таблицях 3.7 – 3.12 для першого блоку порівнянь та 3.13 – 3.15 для другого блоку порівнянь [91].

З отриманих результатів першого блоку порівнянь можна зробити висновок, що максимальна відстань лінії зв'язку між вузлом (при використанні всеспрямованої ($G = 5$ dB) та спрямованої антен ($G = 17$ dB) та ТА 1-го рівня (або між ТА 1-го та 2-го рівнів) відрізняється у 3.9 – 4.6 разів. Тобто з використанням сенсорів спрямованої дії при однакових інших умовах можна досягти збільшення висоти розташування (або відстані до вузла) телекомунікаційних аероплатформ [91].

Також варто звернути увагу на те, що максимальна довжина лінії зв'язку обмежується швидкістю передачі даних. Тому другий блок порівнянь показує, що при використанні вузькоспрямованої антени ($G = 40$ dB) можливо збільшити швидкість передачі даних у 1.7-3.5 рази при зміні частоти з 5200 на 2447 ГГц (або зменшити витрати енергії при зменшенні потужності передавача з 30 до 15 dBm та швидкості передачі інформації у 5-6 разів) при умові розташування ТА 1-го рівня на висоті від пів кілометра до одиниць кілометрів [91].

Таблиця 3.7. Залежність швидкості передачі даних від довжини каналу зв'язку при використанні спрямованої ($G = 17$ dB) та всеспрямованої ($G = 5$ dB) антен вузлів на частоті 5200 МГц із енергетичним запасом 30 dB з використанням спрямованої антени ($G = 17$ dB) та потужністю передача 25 dBm (теоретичний розрахунок/за допомогою Atoll) [91]

MCS	DCM	Ширина каналу 20 МГц					Ширина каналу 40 МГц				
		Швидкість, Мб/с			Відстань, м		Швидкість, Мб/с			Відстань, м	
		0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB	0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB
0	1	4.3	4	3.6	397/384	1579/1614	8.6	8.1	7.3	281/271	1118/1143
	0	8.6	8.1	7.3			17.2	16.3	14.6		
1	1	8.6	8.1	7.3	281/271	1118/1143	17.2	16.3	14.6	199/192	792/810
	0	17.2	16.3	14.6			34.4	32.5	29.3		
2	-	25.8	24.2	21.9	223/216	888/908	51.6	48.8	43.9	158/153	629/643
3	1	17.2	16.3	14.6	158/153	629/643	34.4	32.5	29.3	112/108	445/456
	0	34.4	32.5	29.3			68.8	65	58.5		
4	1	25.8	24.2	21.9	100/96	397/407	51.6	48.8	43.9	71/68	281/288
	0	51.6	48.8	43.9			103.2	97.5	87.8		
5	-	68.8	65	58.5	63/61	250/256	137.6	130	117	45/43	177/181
6	-	77.4	73.1	65.8	56/54	223/228	154.9	146.3	131.6	40/38	158/162
7	-	86	81.3	73.1	50/49	199/204	172.1	162.5	146.3	35/34	141/144
8	-	103.2	97.5	87.8	28/27	111/115	206.5	195	175.5	20/19	80/81
9	-	114.7	108.3	97.5	22	90/91	229.4	216.7	195	16/15	63/64
10	-	129	121.9	109.7	16/15	63/64	258.1	243.8	219.4	11	45
11	-	143.4	135.4	121.9	13/12	50/51	286.8	270.8	243.8	8.8/9	35/36
MCS	DCM	Ширина каналу 80 МГц					Ширина каналу 160 МГц				
		Швидкість, Мб/с			Відстань, м		Швидкість, Мб/с			Відстань, м	
		0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB	0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB
0	1	18	17	15.3	199/192	792/810	36	34	30.6	140/136	561/573
	0	36	34	30.6			72.1	68.1	61.3		
1	1	36	34	30.6	140/136	561/573	72.1	68.1	61.3	100/96	397/407
	0	72.1	68.1	61.3			144.1	136.1	122.5		
2	-	108.1	102.1	91.9	112/108	445/456	216.2	204.2	183.8	80/77	315/323
3	1	72.1	68.1	61.3	80/77	315/323	144.1	136.1	122.5	56/54	223/228
	0	144.1	136.1	122.5			288.2	272.2	245		
4	1	108.1	102.1	91.9	50/49	199/204	216.2	204.2	183.8	35/34	141/144
	0	216.2	204.2	183.8			432.4	408.3	367.5		
5	-	288.2	272.2	245	32/30	126/129	576.5	544.4	490	22	90/91
6	-	324.3	306.3	275.6	28/27	111/115	648.5	612.5	551.3	20/19	80/81
7	-	360.3	340.3	306.3	25/24	100/102	720.6	680.6	612.5	18/17	70/72
8	-	432.4	408.3	367.5	14/13	56/58	864.7	816.7	735	10	40
9	-	480.4	453.7	408.3	11	45	960.7	907.4	816.6	7.9/8	32
10	-	540.4	510.4	459.4	7.9/8	32	1080.9	1020.8	918.8	5.6/5	22/23
11	-	600.4	567.1	510.4	6.3/6	25	1201	1134.2	1020.8	4.5/4	18

Таблиця 3.8. Залежність швидкості передачі даних від довжини каналу зв'язку при використанні спрямованої ($G = 17$ dB) та всеспрямованої ($G = 5$ dB) антен вузлів на частоті 2447 МГц із енергетичним запасом 30 dB з використанням спрямованої антени ($G = 17$ dB) та потужністю передача 25 dBm (теоретичний розрахунок/за допомогою Atoll)

MCS	DCM	Ширина каналу 20 МГц					Ширина каналу 40 МГц				
		Швидкість, Мб/с			Відстань, м		Швидкість, Мб/с			Відстань, м	
		0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB	0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB
0	1	4.3	4	3.6	843/816	3349/3423	8.6	8.1	7.3	597/578	2373/2429
	0	8.6	8.1	7.3			17.2	16.3	14.6		
1	1	8.6	8.1	7.3	597/578	2373/2429	17.2	16.3	14.6	423/408	1681/1722
	0	17.2	16.3	14.6			34.4	32.5	29.3		
2	-	25.8	24.2	21.9	474/459	1886/1930	51.6	48.8	43.9	336/324	1336/1366
3	1	17.2	16.3	14.6	423/408	1681/1722	34.4	32.5	29.3	238/230	946/970
	0	34.4	32.5	29.3			68.8	65	58.5		
4	1	25.8	24.2	21.9	212/205	843/864	51.6	48.8	43.9	150/145	597/611
	0	51.6	48.8	43.9			103.2	97.5	87.8		
5	-	68.8	65	58.5	133/129	532/544	137.6	130	117	95/92	377/385
6	-	77.4	73.1	65.8	120/115	474/486	154.9	146.3	131.6	84/82	336/344
7	-	86	81.3	73.1	106/102	422/433	172.1	162.5	146.3	75/73	300/306
8	-	103.2	97.5	87.8	60/58	238/243	206.5	195	175.5	42/41	168/172
9	-	114.7	108.3	97.5	47/46	189/194	229.4	216.7	195	34/32	134/137
10	-	129	121.9	109.7	34/32	134/137	258.1	243.8	219.4	24/23	95/97
11	-	143.4	135.4	121.9	27/26	106/109	286.8	270.8	243.8	19/18	75/77
MCS	DCM	Ширина каналу 80 МГц					Ширина каналу 160 МГц				
		Швидкість, Мб/с			Відстань, м		Швидкість, Мб/с			Відстань, м	
		0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB	0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB
0	1	18	17	15.3	423/408	1681/1722	36	34	30.6	300/290	1190/1219
	0	36	34	30.6			72.1	68.1	61.3		
1	1	36	34	30.6	300/290	1190/1219	72.1	68.1	61.3	212/205	843/864
	0	72.1	68.1	61.3			144.1	136.1	122.5		
2	-	108.1	102.1	91.9	238/230	946/970	216.2	204.2	183.8	168/163	670/685
3	1	72.1	68.1	61.3	168/163	670/685	144.1	136.1	122.5	120/115	474/486
	0	144.1	136.1	122.5			288.2	272.2	245		
4	1	108.1	102.1	91.9	106/102	422/433	216.2	204.2	183.8	75/73	300/306
	0	216.2	204.2	183.8			432.4	408.3	367.5		
5	-	288.2	272.2	245	67/65	267/273	576.5	544.4	490	47/46	189/194
6	-	324.3	306.3	275.6	60/58	238/243	648.5	612.5	551.3	42/41	168/172
7	-	360.3	340.3	306.3	53/52	211/217	720.6	680.6	612.5	38/37	150/153
8	-	432.4	408.3	367.5	30/29	120/122	864.7	816.7	735	21/20	84/86
9	-	480.4	453.7	408.3	24/23	95/97	960.7	907.4	816.6	17/16	67/68
10	-	540.4	510.4	459.4	17/16	67/68	1080.9	1020.8	918.8	12	47/48
11	-	600.4	567.1	510.4	13	53/54	1201	1134.2	1020.8	9.5/9	38

Таблиця 3.9. Залежність швидкості передачі даних від довжини каналу зв'язку при використанні спрямованої ($G = 17$ dB) та всеспрямованої ($G = 5$ dB) антен вузлів на частоті 5200 МГц із енергетичним запасом 30 dB з використанням спрямованої антени ($G = 17$ dB) та потужністю передача 30 dBm (теоретичний розрахунок/за допомогою Atoll)

MCS	DCM	Ширина каналу 20 МГц					Ширина каналу 40 МГц				
		Швидкість, Мб/с			Відстань, м		Швидкість, Мб/с			Відстань, м	
		0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB	0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB
0	1	4.3	4	3.6	705/681	2803/2870	8.6	8.1	7.3	500/483	1986/2033
	0	8.6	8.1	7.3			17.2	16.3	14.6		
1	1	8.6	8.1	7.3	500/483	1986/2033	17.2	16.3	14.6	353/342	1407/1440
	0	17.2	16.3	14.6			34.4	32.5	29.3		
2	-	25.8	24.2	21.9	397/383	1579/1615	51.6	48.8	43.9	281/271	1118/1144
3	1	17.2	16.3	14.6	281/271	1118/1144	34.4	32.5	29.3	199/192	792/810
	0	34.4	32.5	29.3			68.8	65	58.5		
4	1	25.8	24.2	21.9	177/171	706/722	51.6	48.8	43.9	126/121	500/511
	0	51.6	48.8	43.9			103.2	97.5	87.8		
5	-	68.8	65	58.5	112/108	445/455	137.6	130	117	79/76	315/322
6	-	77.4	73.1	65.8	100/96	397/406	154.9	146.3	131.6	71/68	281/287
7	-	86	81.3	73.1	89/86	353/362	172.1	162.5	146.3	63/61	250/256
8	-	103.2	97.5	87.8	50/48	199/204	206.5	195	175.5	35/34	141/144
9	-	114.7	108.3	97.5	40/38	158/162	229.4	216.7	195	28/27	112/115
10	-	129	121.9	109.7	28/27	112/115	258.1	243.8	219.4	20/19	79/81
11	-	143.4	135.4	121.9	22/22	89/91	286.8	270.8	243.8	16/15	63/65
MCS	DCM	Ширина каналу 80 МГц					Ширина каналу 160 МГц				
		Швидкість, Мб/с			Відстань, м		Швидкість, Мб/с			Відстань, м	
		0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB	0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB
0	1	18	17	15.3	353/342	1407/1440	36	34	30.6	251/242	997/1020
	0	36	34	30.6			72.1	68.1	61.3		
1	1	36	34	30.6	251/242	997/1020	72.1	68.1	61.3	177/171	706/722
	0	72.1	68.1	61.3			144.1	136.1	122.5		
2	-	108.1	102.1	91.9	199/192	792/810	216.2	204.2	183.8	141/136	561/574
3	1	72.1	68.1	61.3	141/136	561/574	144.1	136.1	122.5	100/96	397/406
	0	144.1	136.1	122.5			288.2	272.2	245		
4	1	108.1	102.1	91.9	89/86	353/362	216.2	204.2	183.8	63/61	250/256
	0	216.2	204.2	183.8			432.4	408.3	367.5		
5	-	288.2	272.2	245	56/54	223/229	576.5	544.4	490	40/38	158/162
6	-	324.3	306.3	275.6	50/48	199/204	648.5	612.5	551.3	35/34	141/144
7	-	360.3	340.3	306.3	45/43	177/182	720.6	680.6	612.5	32/30	126/128
8	-	432.4	408.3	367.5	26/24	100/102	864.7	816.7	735	18/17	71/72
9	-	480.4	453.7	408.3	20/19	79/81	960.7	907.4	816.6	14	56/57
10	-	540.4	510.4	459.4	14	56/57	1080.9	1020.8	918.8	9.9/10	40/41
11	-	600.4	567.1	510.4	11	45/46	1201	1134.2	1020.8	7.9/8	32

Таблиця 3.10. Залежність швидкості передачі даних від довжини каналу зв'язку при використанні спрямованої ($G = 17$ dB) та всеспрямованої ($G = 5$ dB) антен вузлів на частоті 2447 МГц із енергетичним запасом 30 dB з використанням спрямованої антени ($G = 17$ dB) та потужністю передача 30 dBm (теоретичний розрахунок/за допомогою Atoll)

MCS	DCM	Ширина каналу 20 МГц					Ширина каналу 40 МГц				
		Швидкість, Мб/с			Відстань, м		Швидкість, Мб/с			Відстань, м	
		0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB	0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB
0	1	4.3	4	3.6	1500/1448	5947/6079	8.6	8.1	7.3	1061/1026	4216/4315
	0	8.6	8.1	7.3			17.2	16.3	14.6		
1	1	8.6	8.1	7.3	1061/1026	4216/4315	17.2	16.3	14.6	751/726	2988/3056
	0	17.2	16.3	14.6			34.4	32.5	29.3		
2	-	25.8	24.2	21.9	843/814	3351/3428	51.6	48.8	43.9	597/577	2374/2429
3	1	17.2	16.3	14.6	751/726	2988/3056	34.4	32.5	29.3	422/409	1682/1720
	0	34.4	32.5	29.3			68.8	65	58.5		
4	1	25.8	24.2	21.9	377/364	1499/1534	51.6	48.8	43.9	267/258	1061/1086
	0	51.6	48.8	43.9			103.2	97.5	87.8		
5	-	68.8	65	58.5	238/230	946/968	137.6	130	117	168/163	670/685
6	-	77.4	73.1	65.8	212/205	843/863	154.9	146.3	131.6	150/145	597/610
7	-	86	81.3	73.1	189/182	752/769	172.1	162.5	146.3	134/129	532/544
8	-	103.2	97.5	87.8	106/103	423/433	206.5	195	175.5	75/73	299/306
9	-	114.7	108.3	97.5	84/82	336/344	229.4	216.7	195	60/58	238/243
10	-	129	121.9	109.7	60/58	238/243	258.1	243.8	219.4	42/41	168/172
11	-	143.4	135.4	121.9	47/46	188/193	286.8	270.8	243.8	34/33	134/137
MCS	DCM	Ширина каналу 80 МГц					Ширина каналу 160 МГц				
		Швидкість, Мб/с			Відстань, м		Швидкість, Мб/с			Відстань, м	
		0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB	0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB
0	1	18	17	15.3	751/726	2988/3056	36	34	30.6	532/514	2117/2166
	0	36	34	30.6			72.1	68.1	61.3		
1	1	36	34	30.6	532/514	2117/2166	72.1	68.1	61.3	377/364	1499/1534
	0	72.1	68.1	61.3			144.1	136.1	122.5		
2	-	108.1	102.1	91.9	422/409	1682/1720	216.2	204.2	183.8	299/289	1191/1219
3	1	72.1	68.1	61.3	299/289	1191/1219	144.1	136.1	122.5	212/205	843/863
	0	144.1	136.1	122.5			288.2	272.2	245		
4	1	108.1	102.1	91.9	189/182	752/769	216.2	204.2	183.8	134/129	532/544
	0	216.2	204.2	183.8			432.4	408.3	367.5		
5	-	288.2	272.2	245	119/115	474/485	576.5	544.4	490	84/82	336/355
6	-	324.3	306.3	275.6	106/103	423/433	648.5	612.5	551.3	75/73	299/306
7	-	360.3	340.3	306.3	95/91	377/385	720.6	680.6	612.5	67/65	267/273
8	-	432.4	408.3	367.5	53/51	211/217	864.7	816.7	735	38/36	150/153
9	-	480.4	453.7	408.3	42/41	168/172	960.7	907.4	816.6	30/29	119/122
10	-	540.4	510.4	459.4	30/29	119/122	1080.9	1020.8	918.8	21	84/86
11	-	600.4	567.1	510.4	24/23	95/97	1201	1134.2	1020.8	17/16	67/69

Таблиця 3.11. Залежність швидкості передачі даних від довжини каналу зв'язку при використанні спрямованої ($G = 17 \text{ dB}$) та всеспрямованої ($G = 5 \text{ dB}$) антен вузлів на частоті 5200 МГц із енергетичним запасом 30dB з використанням спрямованої антени ($G = 17 \text{ dB}$) та потужністю передача 15 dBm (теоретичний розрахунок/за допомогою Atoll)

MCS	DCM	Ширина каналу 20 МГц					Ширина каналу 40 МГц				
		Швидкість, Мб/с			Відстань, м		Швидкість, Мб/с			Відстань, м	
		0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB	0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB
0	1	4.3	4	3.6	126/122	500/511	8.6	8.1	7.3	89/86	354/362
	0	8.6	8.1	7.3			17.2	16.3	14.6		
1	1	8.6	8.1	7.3	89/86	354/362	17.2	16.3	14.6	63/61	250/256
	0	17.2	16.3	14.6			34.4	32.5	29.3		
2	-	25.8	24.2	21.9	71/68	281/287	51.6	48.8	43.9	50/48	200/204
3	1	17.2	16.3	14.6	50/48	200/204	34.4	32.5	29.3	35/34	141/144
	0	34.4	32.5	29.3			68.8	65	58.5		
4	1	25.8	24.2	21.9	32/30	126/129	51.6	48.8	43.9	22/21	89/91
	0	51.6	48.8	43.9			103.2	97.5	87.8		
5	-	68.8	65	58.5	20/19	79/81	137.6	130	117	14	56/57
6	-	77.4	73.1	65.8	18/17	71/72	154.9	146.3	131.6	13/12	50/51
7	-	86	81.3	73.1	16/15	64	172.1	162.5	146.3	11	45/46
8	-	103.2	97.5	87.8	8.8/9	35/36	206.5	195	175.5	6.3/6	25/26
9	-	114.7	108.3	97.5	7	28/29	229.4	216.7	195	5/4.5	20
10	-	129	121.9	109.7	5/4.5	20	258.1	243.8	219.4	3.5	14
11	-	143.4	135.4	121.9	3.9/3.8	16/16	286.8	270.8	243.8	2.8	11
MCS	DCM	Ширина каналу 80 МГц					Ширина каналу 160 МГц				
		Швидкість, Мб/с			Відстань, м		Швидкість, Мб/с			Відстань, м	
		0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB	0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB
0	1	18	17	15.3	63/61	250/256	36	34	30.6	45/43	177/182
	0	36	34	30.6			72.1	68.1	61.3		
1	1	36	34	30.6	45/43	177/182	72.1	68.1	61.3	32/30	126/129
	0	72.1	68.1	61.3			144.1	136.1	122.5		
2	-	108.1	102.1	91.9	35/34	141	216.2	204.2	183.8	25/24	100
3	1	72.1	68.1	61.3	25/24	100	144.1	136.1	122.5	18/17	71/72
	0	144.1	136.1	122.5			288.2	272.2	245		
4	1	108.1	102.1	91.9	16/15	63/64	216.2	204.2	183.8	11	45/46
	0	216.2	204.2	183.8			432.4	408.3	367.5		
5	-	288.2	272.2	245	10	40/41	576.5	544.4	490	7	28/29
6	-	324.3	306.3	275.6	8.8/9	35/36	648.5	612.5	551.3	6.3/6	25/26
7	-	360.3	340.3	306.3	7.9/8	32	720.6	680.6	612.5	5.6/5	22/23
8	-	432.4	408.3	367.5	4.5/4	18	864.7	816.7	735	3.1/3	13
9	-	480.4	453.7	408.3	3.5	14	960.7	907.4	816.6	2.5	10
10	-	540.4	510.4	459.4	2.5	10	1080.9	1020.8	918.8	1.71.5	7
11	-	600.4	567.1	510.4	1.9/2	7.9/8	1201	1134.2	1020.8	1.4/1	5.6/6

Таблиця 3.12. Залежність швидкості передачі даних від довжини каналу зв'язку при використанні спрямованої ($G = 17$ dB) та всеспрямованої ($G = 5$ dB) антен вузлів на частоті 2447 МГц із енергетичним запасом 30 dB з використанням спрямованої антени ($G = 17$ dB) та потужністю передача 15 dBm (теоретичний розрахунок/за допомогою Atoll)

MCS	DCM	Ширина каналу 20 МГц					Ширина каналу 40 МГц				
		Швидкість, Мб/с			Відстань, м		Швидкість, Мб/с			Відстань, м	
		0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB	0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB
0	1	4.3	4	3.6	267/258	1061/1086	8.6	8.1	7.3	189/182	752/769
	0	8.6	8.1	7.3			17.2	16.3	14.6		
1	1	8.6	8.1	7.3	189/182	752/769	17.2	16.3	14.6	134/129	532/544
	0	17.2	16.3	14.6			34.4	32.5	29.3		
2	-	25.8	24.2	21.9	150/145	597/611	51.6	48.8	43.9	106/102	422/433
3	1	17.2	16.3	14.6	134/129	532/544	34.4	32.5	29.3	75/73	299/306
	0	34.4	32.5	29.3			68.8	65	58.5		
4	1	25.8	24.2	21.9	67/65	267/273	51.6	48.8	43.9	47/46	189/193
	0	51.6	48.8	43.9			103.2	97.5	87.8		
5	-	68.8	65	58.5	42/41	168/173	137.6	130	117	30/29	119/122
6	-	77.4	73.1	65.8	38/37	150/153	154.9	146.3	131.6	27/26	106/109
7	-	86	81.3	73.1	34/32	134/137	172.1	162.5	146.3	24/23	95/97
8	-	103.2	97.5	87.8	19/18	75/77	206.5	195	175.5	13	53/54
9	-	114.7	108.3	97.5	15/15	60/61	229.4	216.7	195	11/10	42/43
10	-	129	121.9	109.7	11/10	42/43	258.1	243.8	219.4	7.5/7	30/31
11	-	143.4	135.4	121.9	8.4/8	34/35	286.8	270.8	243.8	6	24
MCS	DCM	Ширина каналу 80 МГц					Ширина каналу 160 МГц				
		Швидкість, Мб/с			Відстань, м		Швидкість, Мб/с			Відстань, м	
		0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB	0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB
0	1	18	17	15.3	134/129	532/544	36	34	30.6	95/91	376/385
	0	36	34	30.6			72.1	68.1	61.3		
1	1	36	34	30.6	95/91	376/385	72.1	68.1	61.3	67/65	267/273
	0	72.1	68.1	61.3			144.1	136.1	122.5		
2	-	108.1	102.1	91.9	75/73	299/306	216.2	204.2	183.8	53/51	212/217
3	1	72.1	68.1	61.3	53/51	212/217	144.1	136.1	122.5	38/37	150/153
	0	144.1	136.1	122.5			288.2	272.2	245		
4	1	108.1	102.1	91.9	34/32	134/137	216.2	204.2	183.8	24/23	85/97
	0	216.2	204.2	183.8			432.4	408.3	367.5		
5	-	288.2	272.2	245	21	84/86	576.5	544.4	490	15	60/61
6	-	324.3	306.3	275.6	19/18	75/77	648.5	612.5	551.3	13	53/54
7	-	360.3	340.3	306.3	17/16	67/68	720.6	680.6	612.5	12/11	47/49
8	-	432.4	408.3	367.5	9.5/9	38	864.7	816.7	735	6.7/6	27
9	-	480.4	453.7	408.3	7.5/7	30/31	960.7	907.4	816.6	5.3/5	21
10	-	540.4	510.4	459.4	5.3/5	21	1080.9	1020.8	918.8	3.7/3.5	15S
11	-	600.4	567.1	510.4	4.2/4	17	1201	1134.2	1020.8	3	12

Таблиця 3.13. Залежність швидкості передачі даних від довжини каналу зв'язку при використанні спрямованих ($G = 40 \text{ dB}$) антен вузлів на частоті 2447 та 5200 МГц із енергетичним запасом 30 dB з використанням всеспрямованої антени ($G = 6 \text{ dB}$) та потужністю передача 15 dBm (теоретичний розрахунок/за допомогою Atoll)

MCS	DCM	Ширина каналу 20 МГц					Ширина каналу 40 МГц				
		Швидкість, Мб/с			Відстань, м		Швидкість, Мб/с			Відстань, м	
		0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	5200 МГц	2447 МГц	0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	5200 МГц	2447 МГц
0	1	4.3	4	3.6	1987/1920	4216/4070	8.6	8.1	7.3	1407/1360	2988/2886
	0	8.6	8.1	7.3			17.2	16.3	14.6		
1	1	8.6	8.1	7.3	1407/1360	2988/2886	17.2	16.3	14.6	997/962	2117/2044
	0	17.2	16.3	14.6			34.4	32.5	29.3		
2	-	25.8	24.2	21.9	1118/1081	2374/2293	51.6	48.8	43.9	792/765	1682/1624
3	1	17.2	16.3	14.6	792/765	1682/1624	34.4	32.5	29.3	561/541	1191/1150
	0	34.4	32.5	29.3			68.8	65	58.5		
4	1	25.8	24.2	21.9	500/483	1062/1026	51.6	48.8	43.9	354/342	752/726
	0	51.6	48.8	43.9			103.2	97.5	87.8		
5	-	68.8	65	58.5	316/305	670/648	137.6	130	117	223/216	474/458
6	-	77.4	73.1	65.8	281/272	597/577	154.9	146.3	131.6	199/192	423/408
7	-	86	81.3	73.1	251/242	532/514	172.1	162.5	146.3	177/171	377/364
8	-	103.2	97.5	87.8	141/136	299/289	206.5	195	175.5	100/96	212/205
9	-	114.7	108.3	97.5	112/108	238/230	229.4	216.7	195	79/77	168/162
10	-	129	121.9	109.7	79/77	168/162	258.1	243.8	219.4	56/54	119/115
11	-	143.4	135.4	121.9	63/61	134/129	286.8	270.8	243.8	45/43	95/91
MCS	DCM	Ширина каналу 80 МГц					Ширина каналу 160 МГц				
		Швидкість, Мб/с			Відстань, м		Швидкість, Мб/с			Відстань, м	
		0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	5200 МГц	2447 МГц	0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	5200 МГц	2447 МГц
0	1	18	17	15.3	997/962	2117/2044	36	34	30.6	706/682	1499/1448
	0	36	34	30.6			72.1	68.1	61.3		
1	1	36	34	30.6	706/682	1499/1448	72.1	68.1	61.3	500/483	1062/1026
	0	72.1	68.1	61.3			144.1	136.1	122.5		
2	-	108.1	102.1	91.9	561/541	1191/1150	216.2	204.2	183.8	397/383	843/815
3	1	72.1	68.1	61.3	397/383	843/815	144.1	136.1	122.5	281/272	597/577
	0	144.1	136.1	122.5			288.2	272.2	245		
4	1	108.1	102.1	91.9	251/242	532/514	216.2	204.2	183.8	177/171	377/364
	0	216.2	204.2	183.8			432.4	408.3	367.5		
5	-	288.2	272.2	245	158/153	336/325	576.5	544.4	490	112/108	238/230
6	-	324.3	306.3	275.6	141/136	299/289	648.5	612.5	551.3	100/96	212/205
7	-	360.3	340.3	306.3	126/121	267/258	720.6	680.6	612.5	89/86	189/183
8	-	432.4	408.3	367.5	71/68	150/145	864.7	816.7	735	50/48	106/103
9	-	480.4	453.7	408.3	56/54	119/115	960.7	907.4	816.6	40/38	84/81
10	-	540.4	510.4	459.4	40/38	84/81	1080.9	1020.8	918.8	28/27	60/58
11	-	600.4	567.1	510.4	32/30	67/65	1201	1134.2	1020.8	22	47/46

Таблиця 3.14. Залежність швидкості передачі даних від довжини каналу зв'язку при використанні спрямованих ($G = 40 \text{ dB}$) антен вузлів на частоті 2447 та 5200 МГц із енергетичним запасом 30 dB з використанням всеспрямованої антени ($G = 6 \text{ dB}$) та потужністю передача 25 dBm (теоретичний розрахунок/за допомогою Atoll)

MCS	DCM	Ширина каналу 20 МГц					Ширина каналу 40 МГц				
		Швидкість, Мб/с			Відстань, м		Швидкість, Мб/с			Відстань, м	
		0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	5200 МГц	2447 МГц	0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	5200 МГц	2447 МГц
0	1	4.3	4	3.6	6255/6047	13235/12776	8.6	8.1	7.3	4437/4288	9399/9082
	0	8.6	8.1	7.3			17.2	16.3	14.6		
1	1	8.6	8.1	7.3	4437/4288	9399/9082	17.2	16.3	14.6	3145/3039	6668/6444
	0	17.2	16.3	14.6			34.4	32.5	29.3		
2	-	25.8	24.2	21.9	3527/3409	7477/7226	51.6	48.8	43.9	2500/2414	5303/5123
3	1	17.2	16.3	14.6	2500/2414	5303/5123	34.4	32.5	29.3	1771/1712	3759/3631
	0	34.4	32.5	29.3			68.8	65	58.5		
4	1	25.8	24.2	21.9	1579/1524	3351/3238	51.6	48.8	43.9	1118/1080	2374/2294
	0	51.6	48.8	43.9			103.2	97.5	87.8		
5	-	68.8	65	58.5	997/963	2117/2044	137.6	130	117	706/682	1499/1448
6	-	77.4	73.1	65.8	888/859	1887/1823	154.9	146.3	131.6	629/608	1336/1291
7	-	86	81.3	73.1	792/765	1682/1625	172.1	162.5	146.3	561/542	1191/1151
8	-	103.2	97.5	87.8	445/430	946/914	206.5	195	175.5	315/305	670/647
9	-	114.7	108.3	97.5	354/342	752/726	229.4	216.7	195	251/242	532/514
10	-	129	121.9	109.7	251/242	532/514	258.1	243.8	219.4	177/171	377/364
11	-	143.4	135.4	121.9	199/192	422/409	286.8	270.8	243.8	141/136	299/289
MCS	DCM	Ширина каналу 80 МГц					Ширина каналу 160 МГц				
		Швидкість, Мб/с			Відстань, м		Швидкість, Мб/с			Відстань, м	
		0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	5200 МГц	2447 МГц	0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	5200 МГц	2447 МГц
0	1	18	17	15.3	3145/3039	6668/6444	36	34	30.6	2228/2153	4728/4568
	0	36	34	30.6			72.1	68.1	61.3		
1	1	36	34	30.6	2228/2153	4728/4568	72.1	68.1	61.3	1579/1524	3351/3238
	0	72.1	68.1	61.3			144.1	136.1	122.5		
2	-	108.1	102.1	91.9	1771/1712	3759/3631	216.2	204.2	183.8	1254/1212	2663/2574
3	1	72.1	68.1	61.3	1254/1212	2663/2574	144.1	136.1	122.5	888/859	1887/1823
	0	144.1	136.1	122.5			288.2	272.2	245		
4	1	108.1	102.1	91.9	792/765	1682/1625	216.2	204.2	183.8	561/542	1191/1151
	0	216.2	204.2	183.8			432.4	408.3	367.5		
5	-	288.2	272.2	245	500/483	1062/1025	576.5	544.4	490	354/342	752/726
6	-	324.3	306.3	275.6	445/430	946/914	648.5	612.5	551.3	315/305	670/647
7	-	360.3	340.3	306.3	397/383	843/815	720.6	680.6	612.5	281/271	597/577
8	-	432.4	408.3	367.5	223/216	474/458	864.7	816.7	735	158/153	336/324
9	-	480.4	453.7	408.3	177/171	377/364	960.7	907.4	816.6	126/121	267/258
10	-	540.4	510.4	459.4	126/121	267/258	1080.9	1020.8	918.8	89/86	189/183
11	-	600.4	567.1	510.4	100/96	212/205	1201	1134.2	1020.8	71/68	150/145

Таблиця 3.15. Залежність швидкості передачі даних від довжини каналу зв'язку при використанні спрямованих ($G = 40$ dB) антен вузлів на частоті 2447 та 5200 МГц із енергетичним запасом 30 dB з використанням всеспрямованої антени ($G = 6$ dB) та потужністю передача 30 dBm (теоретичний розрахунок/за допомогою Atoll)

MCS	DCM	Ширина каналу 20 МГц					Ширина каналу 40 МГц				
		Швидкість, Мб/с			Відстань, м		Швидкість, Мб/с			Відстань, м	
		0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	5200 МГц	2447 МГц	0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	5200 МГц	2447 МГц
0	1	4.3	4	3.6	11069/10701	23345/ 22551	8.6	8.1	7.3	7862/7597	16617/ 16049
	0	8.6	8.1	7.3			17.2	16.3	14.6		
1	1	8.6	8.1	7.3	7862/7597	16617/ 16049	17.2	16.3	14.6	5579/5389	11810/ 11405
	0	17.2	16.3	14.6			34.4	32.5	29.3		
2	-	25.8	24.2	21.9	6255/6047	13235/ 12776	51.6	48.8	43.9	4436/4288	9399/ 9081
3	1	17.2	16.3	14.6	4436/4288	9399/ 9081	34.4	32.5	29.3	3145/3040	6669/ 6443
	0	34.4	32.5	29.3			68.8	65	58.5		
4	1	25.8	24.2	21.9	2804/2710	5947/ 5742	51.6	48.8	43.9	1987/1920	4216/ 4074
	0	51.6	48.8	43.9			103.2	97.5	87.8		
5	-	68.8	65	58.5	1771/1711	3729/ 3633	137.6	130	117	1254/1212	2663/ 2573
6	-	77.4	73.1	65.8	1579/1525	3351/ 3239	154.9	146.3	131.6	1118/1080	2374/ 2293
7	-	86	81.3	73.1	1407/1360	2988/ 2885	172.1	162.5	146.3	997/962	2117/ 2045
8	-	103.2	97.5	87.8	792/765	1682/ 1625	206.5	195	175.5	561/542	1191/ 1150
9	-	114.7	108.3	97.5	629/608	1336/1291	229.4	216.7	195	445/430	946/915
10	-	129	121.9	109.7	445/430	946/915	258.1	243.8	219.4	315/305	670/647
11	-	143.4	135.4	121.9	354/342	752/726	286.8	270.8	243.8	251/242	532/514
MCS	DCM	Ширина каналу 80 МГц					Ширина каналу 160 МГц				
		Швидкість, Мб/с			Відстань, м		Швидкість, Мб/с			Відстань, м	
		0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	5200 МГц	2447 МГц	0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	5200 МГц	2447 МГц
0	1	18	17	15.3	5579/5389	11810/ 11405	36	34	30.6	3956/3821	8384/ 8097
	0	36	34	30.6			72.1	68.1	61.3		
1	1	36	34	30.6	3956/3821	8384/8097	72.1	68.1	61.3	2804/2710	5947/ 5742
	0	72.1	68.1	61.3			144.1	136.1	122.5		
2	-	108.1	102.1	91.9	3145/3040	6669/6443	216.2	204.2	183.8	2229/2152	4728/ 4567
3	1	72.1	68.1	61.3	2229/2152	4728/4567	144.1	136.1	122.5	1579/1525	3351/ 3239
	0	144.1	136.1	122.5			288.2	272.2	245		
4	1	108.1	102.1	91.9	1407/1360	2988/2885	216.2	204.2	183.8	997/962	2117/ 2045
	0	216.2	204.2	183.8			432.4	408.3	367.5		
5	-	288.2	272.2	245	888/858	1887/1823	576.5	544.4	490	629/608	1336/ 1291
6	-	324.3	306.3	275.6	792/765	1682/1625	648.5	612.5	551.3	561/542	1191/ 1150
7	-	360.3	340.3	306.3	706/682	1499/1449	720.6	680.6	612.5	500/483	1061/ 1026
8	-	432.4	408.3	367.5	397/383	843/815	864.7	816.7	735	281/272	597/577
9	-	480.4	453.7	408.3	315/305	670/647	960.7	907.4	816.6	223/216	474/458
10	-	540.4	510.4	459.4	223/216	474/458	1080.9	1020.8	918.8	158/153	336/324
11	-	600.4	567.1	510.4	177/171	377/364	1201	1134.2	1020.8	126/121	267/258

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Проведено аналіз антен спрямованої та всеспрямованої дії, які використовуються для мобільних пристроїв і зокрема в сенсорних вузлах. Визначено переваги та недоліки кожного типу, що дало розуміння актуальності та необхідності використання спрямованих та вузькоспрямованих антен для підвищення ефективності функціонування МСМ, а також подальшого розвитку напрямку сенсорів спрямованої дії у наземно-повітряних мережах із застосуванням телекомунікаційних аероплатформ.

2. Викладено два підходи до розрахунку параметрів лінії зв'язку (зокрема максимальної довжини лінії зв'язку) ТА-вузол: теоретичний спосіб та за допомогою моделювання у програмному комплексі Atoll.

3. Виконані розрахунки та моделювання для трьох можливих значень потужностей 15, 25 та 30 dBm при використанні частот із діапазонів 2.4 та 5 ГГц. Було проведено два блоки порівнянь: із використанням спрямованої антени ($G = 17$ dB) для ТА із спрямованою ($G = 17$ dB) та всеспрямованою ($G = 5$ dB) антенами вузла відповідно; із використанням всеспрямованої антени ТА ($G = 6$ dB) та вузькоспрямованої антени ($G = 40$ dB) вузла.

4. Отримані результати теоретичного розрахунку підтверджуються розрахунком за допомогою Atoll (з урахуванням допустимого відхилення). Виходячи з них побудовано сімейство графіків та таблиць. Порівнюючи сімейство графіків залежності швидкості від мінімальної чутливості передавача (зростаючий характер) та залежності відстані від мінімальної чутливості передавача (спадний характер) можна зробити висновок, що максимальна швидкість передачі даних зменшується зі збільшенням довжини каналу зв'язку.

5. З отриманих результатів першого блоку порівнянь можна зробити висновок, що максимальна відстань лінії зв'язку між вузлом (при використанні всеспрямованої ($G = 5$ dB) та спрямованої антен ($G = 17$ dB) та ТА 1-го рівня (або між ТА 1-го та 2-го рівнів) відрізняється у 3.9 – 4.6 разів. Тобто з використанням сенсорів спрямованої дії при однакових інших умовах можна досягти збільшення висоти розташування (або

відстані до вузла) телекомунікаційних аероплатформ. Також варто звернути увагу на те, що максимальна довжина лінії зв'язку обмежується швидкістю передачі даних каналу зв'язку. Тому другий блок порівнянь показує, що при використанні вузькоспрямованої антени ($G = 40$ dB) можливо збільшити швидкість передачі даних у 1.7-3.5 рази при зміні частоти з 5200 на 2447 МГц (або зменшити витрати енергії при зменшенні потужності передавача з 30 до 15 dBm та швидкості передачі даних у 5-6 разів) при умові розташування ТА 1-го рівня на висоті від пів кілометра до одиниць кілометрів.

РОЗДІЛ 4

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДУ ПІДТРИМКИ ЗВ'ЯЗНОСТІ МОБІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ СЕНСОРІВ СПРЯМОВАНОЇ ДІЇ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ АЕРОПЛАТФОРМ РІЗНОРІВНЕВОГО РОЗТАШУВАННЯ

В попередніх розділах дисертації були розроблені математична модель оцінки зв'язності і метод підтримки зв'язності МСМ із ТА, що полягає у використанні двох рівнів ТА [89,90], а також застосуванні сенсорів спрямованої дії [91,92]. Далі постає задача оцінки ефективності отриманих результатів. Для цього необхідно визначити спосіб порівняння запропонованої в дисертації системи із існуючим на сьогодні прототипом [3,12].

4.1. Визначення показників для оцінки ефективності роботи МСМ з ТА

Мобільну сенсорну мережу (МСМ) можна характеризувати як розподілену систему безпроводових вузлів (малого розміру) здатну самоорганізовуватися. Основними якостями МСМ з ТА є можливість моніторингу різноманітних параметрів, обміну інформації на великих територіях по маршрутах, що проходять через інші вузли і ТА до найближчого мережевого елемента (МЕ) (наприклад, супутник/псевдосупутник [36,37,38] чи базова станція) систем загального користування чи безпосередньо до центру обробки інформації. Тому важливо розуміти, що оцінка ефективності може здійснюватися пофазно: під час оперативного керування, зміни конфігурації (нарощування або зменшення), планування або розгортання. На виконання кожної фази відводиться необхідний час $T_{\text{необх}}$ (задається часове обмеження), а ефективність визначається згідно правила $T_{\text{необх}} \rightarrow \min$ або $T \leq T_{\text{необх}}$, якістю прийнятих рішень центром керування мережі (ЦКМ), затратними ресурсами (вузли, ТА) та енерговитратами [112,113].

Робота системи керування складається з наступних підсистем: планування та оптимізації покриття, телекомунікацій та енергоменеджменту. Відповідно для кожної з них є певні показники для оцінки ефективності (табл. 4.1) [112,113].

Таблиця 4.1. Показники для оцінки ефективності підсистем

Планування та оптимізація покриття	Телекомунікацій	Енергоменеджменту
Час розгортання	Зв'язність	Витрата енергії
Відсоток покриття	Швидкість передачі даних	Час функціонування
Кількість вузлів	Час передачі інформації	
Кількість ТА	Обсяг трафіку	
	Навантаження	

Перша підсистема забезпечує покриття певної площі, об'єкта, населеного пункту тощо для обміну/збору інформації такої як стан предмету моніторингу або передача інформації до нього. Основні показники за допомогою яких можна оцінити якість покриття це – час розгортання, відсоток покриття, кількість необхідних МЕ (вузлів і ТА кожного з рівнів) виходячи зі складності рельєфу місцевості, об'єму інформації, інтенсивності її обміну та точності моніторингу/якості трансляції [112,113].

Друга підсистема має забезпечити обмін даних з вузлами і ТА, включно до базової станції (або супутника) з необхідною якістю [36,37,38]. Перед цим процесом мають бути виконане розгортання мережі з формуванням кластерів та точок обміну інформації ТА, маршруту польоту. Оціночними показниками зв'язності виступають: швидкість передачі даних, час передачі інформації, загальний обсяг трафіку, навантаження [112,113].

Третя підсистема відповідає за розподіл енергорвитрат між мережевими елементами (кожен з яких має своє джерело живлення). Головна її ціль збільшення тривалості роботи мережі та її елементів за умови мінімально необхідної якості покриття, обміну/збору даних. Виходячи з цього можна виділити наступні показники за якими можна оцінити ефективність роботи: значення витрат енергії, час функціонування як всієї системи в цілому так і кожного мережевого елемента окремо [112,113].

4.2. Методика оцінки ефективності ММССД з використанням ТА різнорівневого розташування

Для раціонального порівняння ефективності представленої телекомунікаційної системи, крім визначення показників, виникає необхідність у створенні методики, яка вирішить дану задачу [112,113].

На першому етапі необхідно задати параметри ММССД з використанням ТА різнорівневого розташування [112,113]:

1. Характеристики МЕ (вузлів, ТА): потужність трансмітерів P_i , робоча частота f_p , смуга пропускання Δf , тип антен, коефіцієнти їх підсилення G_i виходячи із точності вимірювань, якості передачі мультимедійних даних, часу обміну/збору, повноти отриманої інформації тощо).

2. Характеристики мережі: площа покриття, кількість МЕ ($N_{\text{вуз}}$, $N_{\text{ТА}}$), їх координати, топологія (кількість кластерів та вузлів у них, ліній зв'язку, алгоритм вибору ГВК тощо), протокол доступу, вид обслуговування (з гарантією чи без), час роботи.

3. Характеристики методу обміну/збору інформації, а саме: їх тип (попередньо з кожного вузла, з головних вузлів кластеру); МЕ, що виконує організацію кластеру та керування мережею (ЦКМ або ТА або ГВК); алгоритми побудови маршруту польоту (загальний або локальний) та кластерів виходячи із цільової функції (мінімізація кількості ТА, максимізація часу роботи мережі та інші);

На другому етапі потрібно обрати показники оцінки ефективності (розділ 4.1) [112,113].

На третьому етапі відбувається побудова математичних моделей МСМ із ТА (однорівнева з сенсорами всеспрямованої дії [4,7,15,33] та дворівнева з сенсорами спрямованої дії [90,91,92]) та проведення експерименту (імітаційного моделювання) [112,113].

На четвертому етапі отримаємо результати та залежності показників ефективності від різних умов функціонування мережі. Виходячи з вищезазначеного, на останньому етапі необхідно виконати порівняння та зробити висновки [112,113].

4.3. Імітаційне моделювання та оцінка ефективності

Для порівняння було побудовано дві математичні моделі: МСМ із ТА [4,7,15,33] (система прототип) та ММССД із ТА дворівневого розташування [90,91,92] (запропоновано в дисертації). Вузли сенсорної мережі розташовуються на нульовому рівні на висоті до 1.5 м, а висота псевдосупутника з яким зв'язуються ТА становить 20 км. В МСМ із ТА висота ТА становить до 1 км. А в ММССД із ТА дворівневого розташування: висота ТА першого рівня 1.5-2 км, другого – 5-15 км. Усі мережеві елементи розташовані випадковим чином на площі 2500 км². Кількість вузлів нульового рівня $N_{\text{вуз}}$ становить 600. ТА в МСМ із ТА $N_{\text{ТА}} = 400$, в ММССД із ТА – $N_{\text{ТА}} = 360$ (60 з яких розташовуються на другому рівні). Дальність зв'язку визначалася згідно розрахунків у розділі 3 з технологією доступу IEEE 802.11ах. Максимальний радіус обльоту ТА першого рівня 4000 м, другого – 8000 м. Потужність передавача вузла 20 dBm, ТА першого рівня 25 dBm, другого – 30 dBm, робоча частота 2447 МГц, смуга пропускання 20 МГц. Коефіцієнт підсилення антен вузлів в однорівневій моделі 5 dBi, а в дворівневій – 17 dBi. Об'єм даних, що передавався з кожного вузла – 1024 біт. [112,113].

Таблиця 4.2. Вхідні дані математичних моделей

Вхідний параметр	МСМ із ТА (прототип)	ММССД із ТА дворівневого розташування (запропоновано в дисертації)
Кількість вузлів $N_{\text{вуз}}$, шт	600	600
Кількість ТА першого рівня $N_{\text{ТА1}}$, шт	400	300
Кількість ТА другого рівня $N_{\text{ТА2}}$, шт		60
Висота вузлів нульового рівня, м	0 – 1.5	0 – 1.5
Висота ТА першого рівня, м	<1000	1500-2000
Висота ТА другого рівня, м		5000-15000
Потужність передавача вузлів, dBm	20	20
Потужність передавача ТА першого рівня, dBm	25	25
Потужність передавача ТА другого рівня, dBm	30	30
Коефіцієнт підсилення антен вузлів, dBi	5	17

Головними вузлами кластеру виступають ТА першого рівня, які встановлюють зв'язок з доступними у радіусі дії вузлами нульового рівня. У системі прототип ТА першого рівня також встановлюють зв'язок з найближчими ТА для підтримки зв'язності, а в запропонованій системі – ТА другого рівня (вони являють собою ГВК для ТА першого рівня) [112,113].

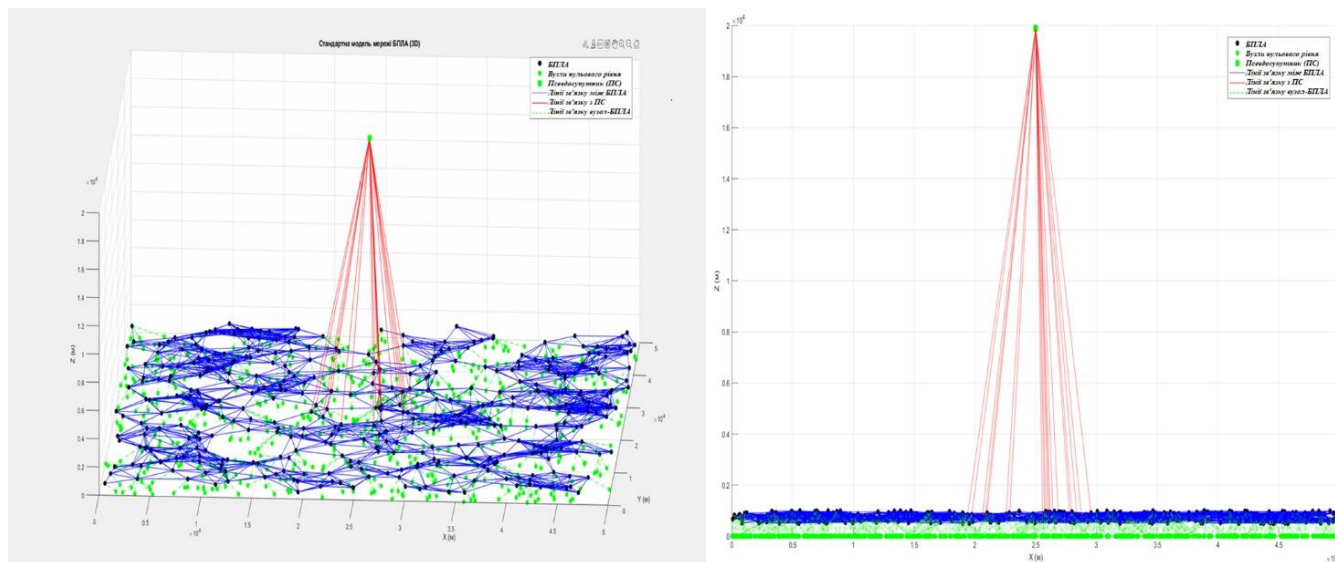


Рисунок 4.1. МСМ із ТА (прототип)
(тривимірний та двовимірний вигляд)

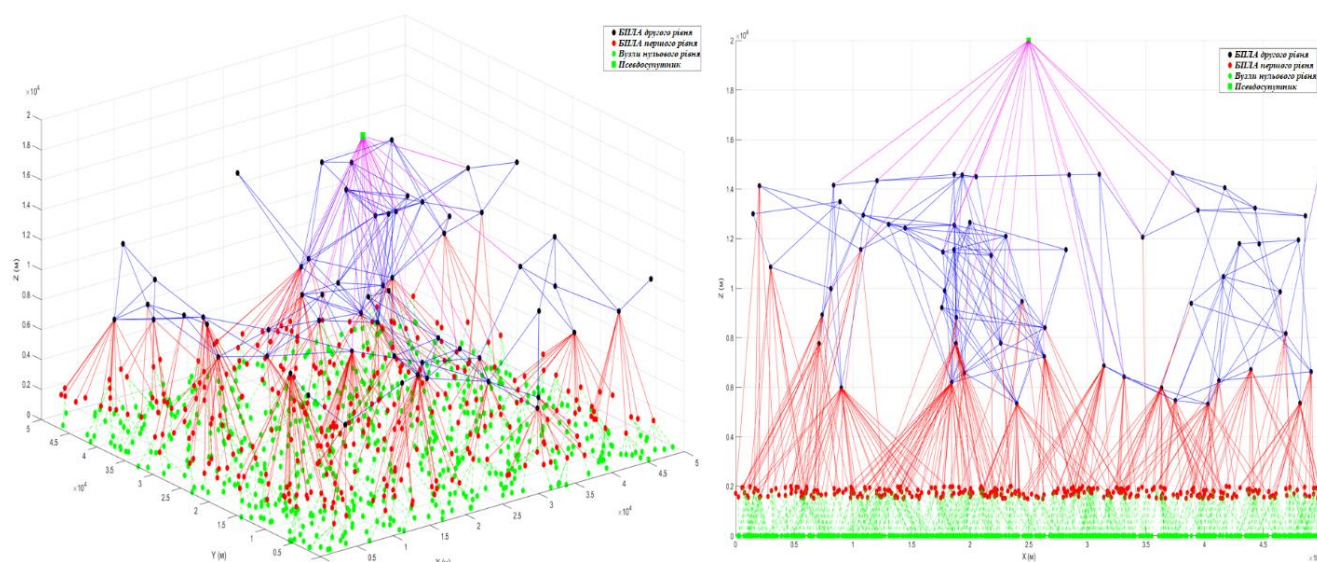


Рисунок 4.2. ММСД із ТА дворівневого розташування (запропонована)
(тривимірний та двовимірний вигляд)

Ефективність вдосконаленої моделі оцінювалася за наступними критеріями: довжина маршруту, кількість безпосередньо задіяних ТА, швидкість передачі даних та час передачі інформації від вузла нульового рівня до псевдосупутника. Для розрахунку цих критеріїв будемо користуватися методикою із розділу 3 та специфікаціями стандарту IEEE 802.11ax у програмному комплексі Matlab. Кількість проведених вимірювань 10000 [112,113].

На рисунках 4.3 – 4.7 відображено результати імітаційного моделювання для довжини маршруту усередненої за кількістю сенсорів, її максимальні та мінімальні значення, а також мода та медіана. Дивлячись на отримані результати можна зробити висновок, що довжина маршруту у запропонованій системі менша на 1.5 – 15.2% (за показниками моди, медіани, мінімальних та усереднених значень) [112,113].



Рисунок 4.3. Результати обчислення довжини маршруту усередненої за кількістю сенсорів при даному номері експерименту

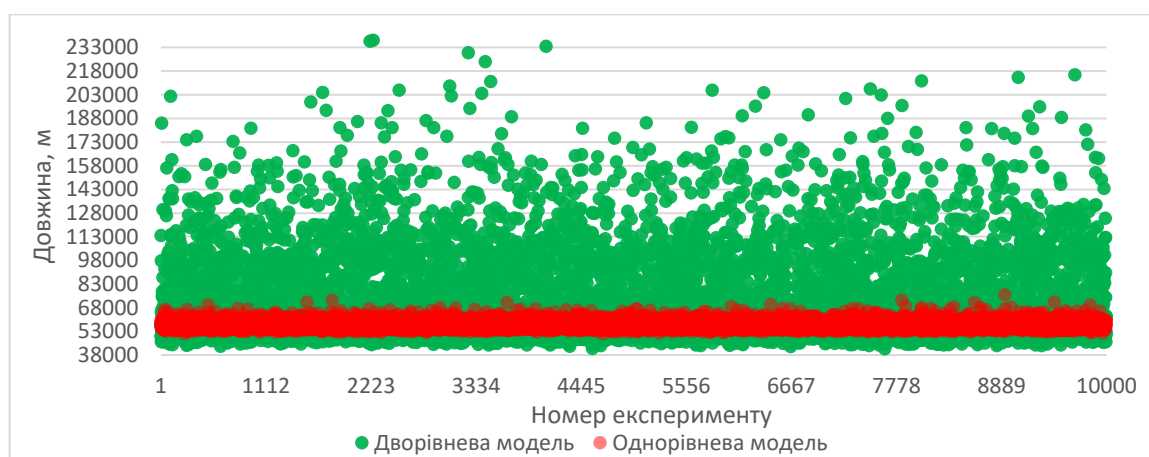


Рисунок 4.4. Результати обчислення максимальної довжини маршруту



Рисунок 4.5. Результати обчислення мінімальної довжини маршруту

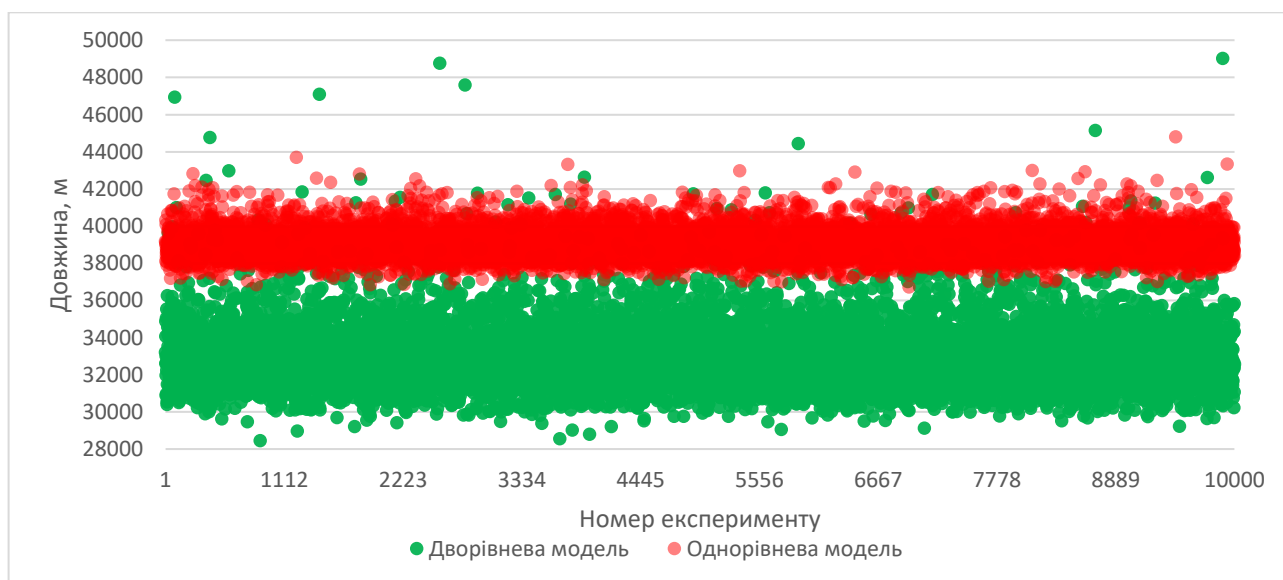


Рисунок 4.6. Результати обчислення медіани довжини маршруту

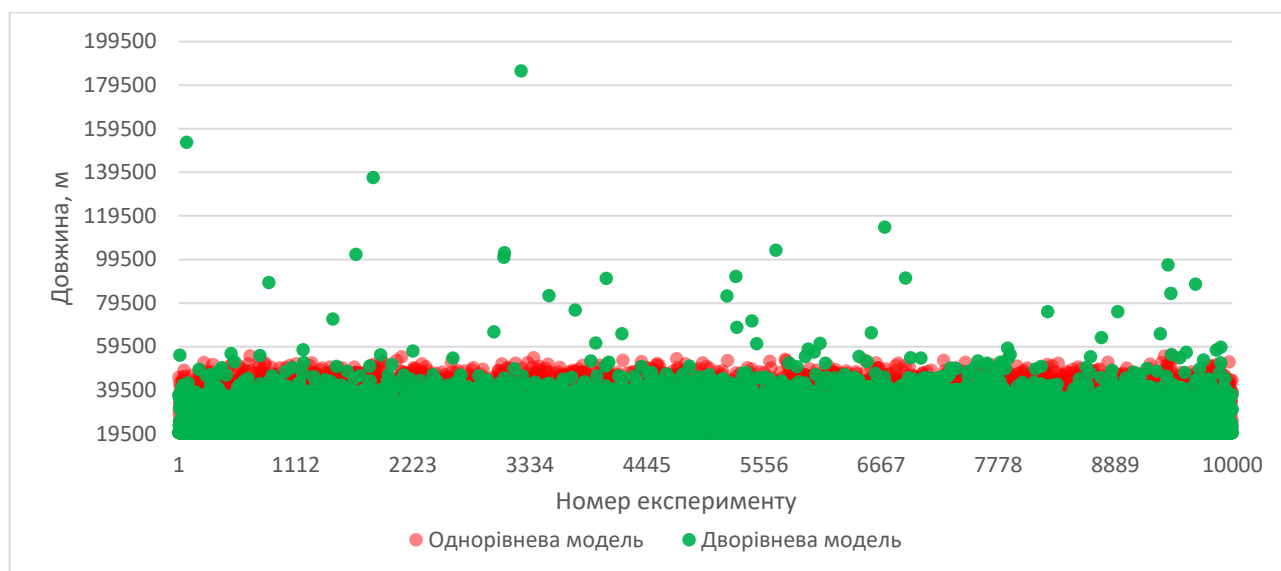


Рисунок 4.7. Результати обчислення моди довжини маршруту

На рисунках 4.8 – 4.11 відображено результати імітаційного моделювання для кількості безпосередньо задіяних ТА на маршруті від вузла нульового рівня до псевдосупутника усередненої за кількістю сенсорів, її максимальні значення, а також мода та медіана. Мінімальні значення для МСМ із ТА – 1, для ММССД із ТА – 2. Дивлячись на отримані результати можна зробити висновок, що кількість ТА у запропонованій системі менша на 20 – 43% за визначеними показниками [112,113].

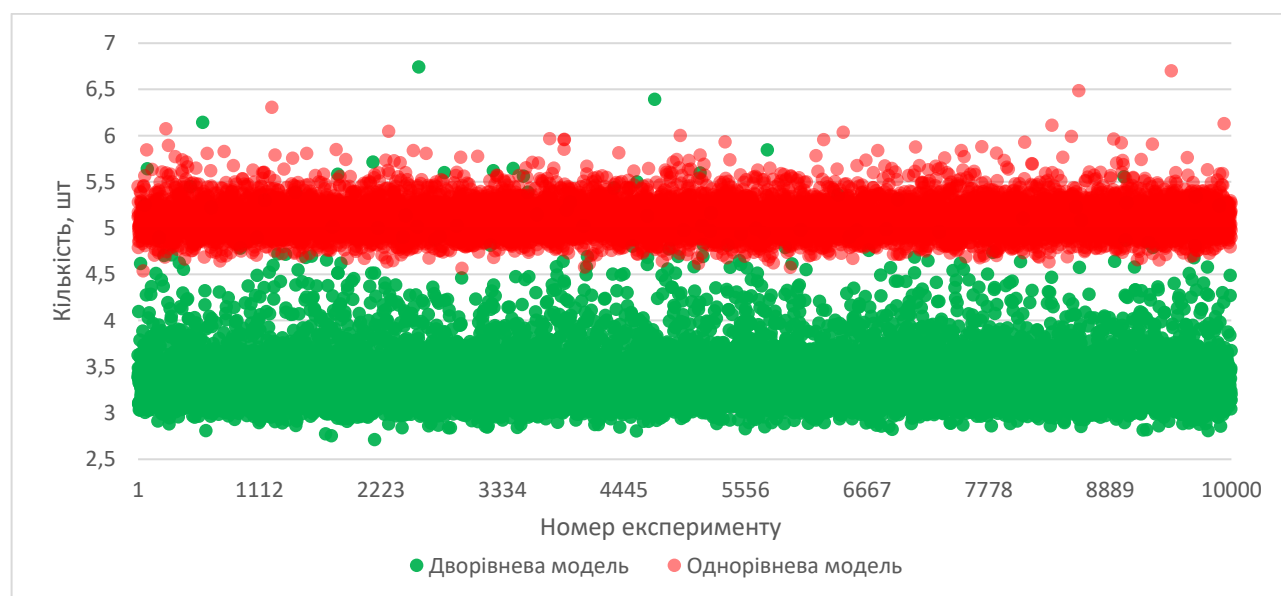


Рисунок 4.8. Результати обчислення кількості безпосередньо задіяних ТА усередненої за кількістю сенсорів при даному номері експерименту

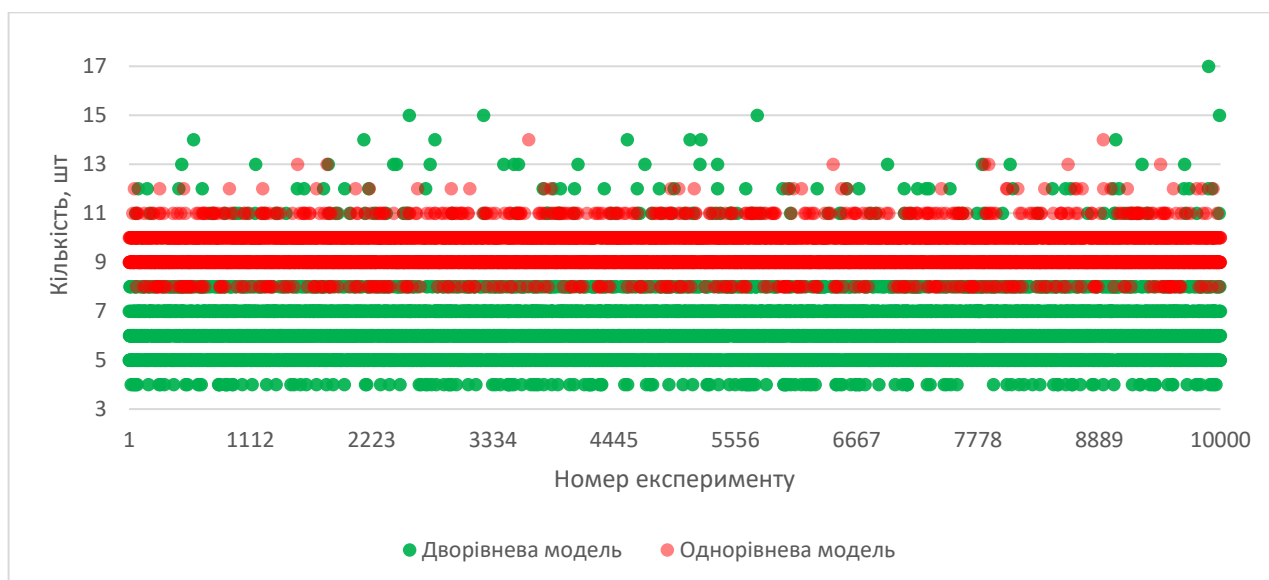


Рисунок 4.9. Результати обчислення максимальної кількості безпосередньо задіяних ТА

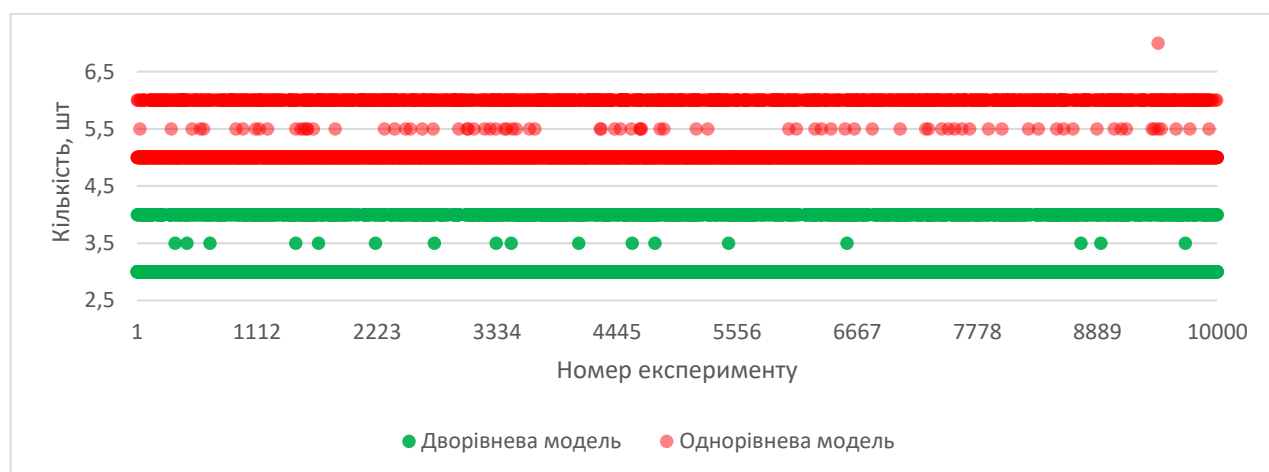


Рис. 4.10. Результати обчислення медіани кількості безпосередньо задіяних ТА

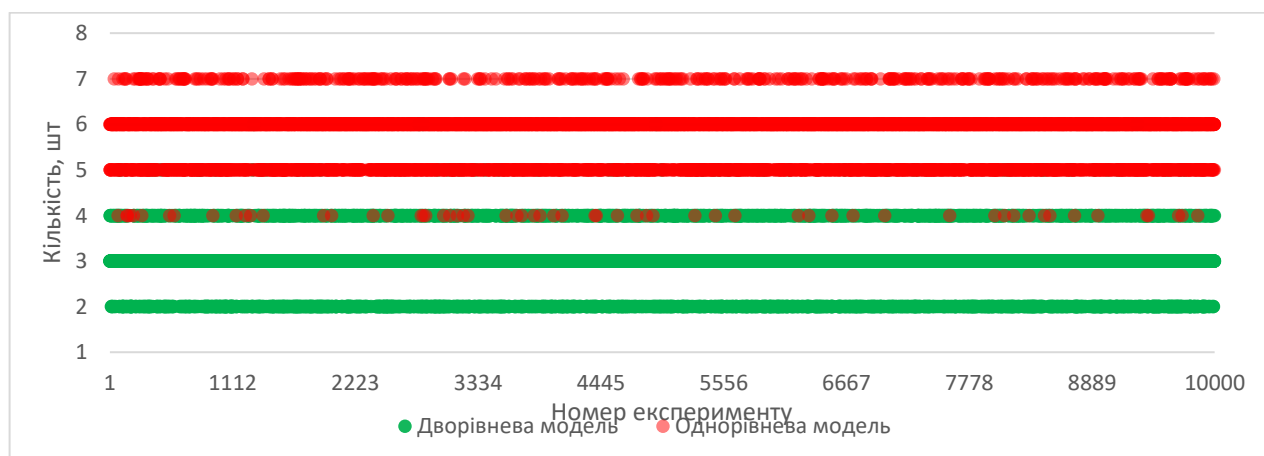


Рисунок 4.11. Результати обчислення моди кількості безпосередньо задіяних ТА

Також були отримані результати обчислення швидкості передачі даних (рис. 4.12) та часу затримки при передачі інформації (рис. 4.13) від вузлів до псевдосупутника усереднених за кількістю сенсорів. Отримана перевага у запропонованій системі становить 41 та 29 відсотків відповідно [112,113].

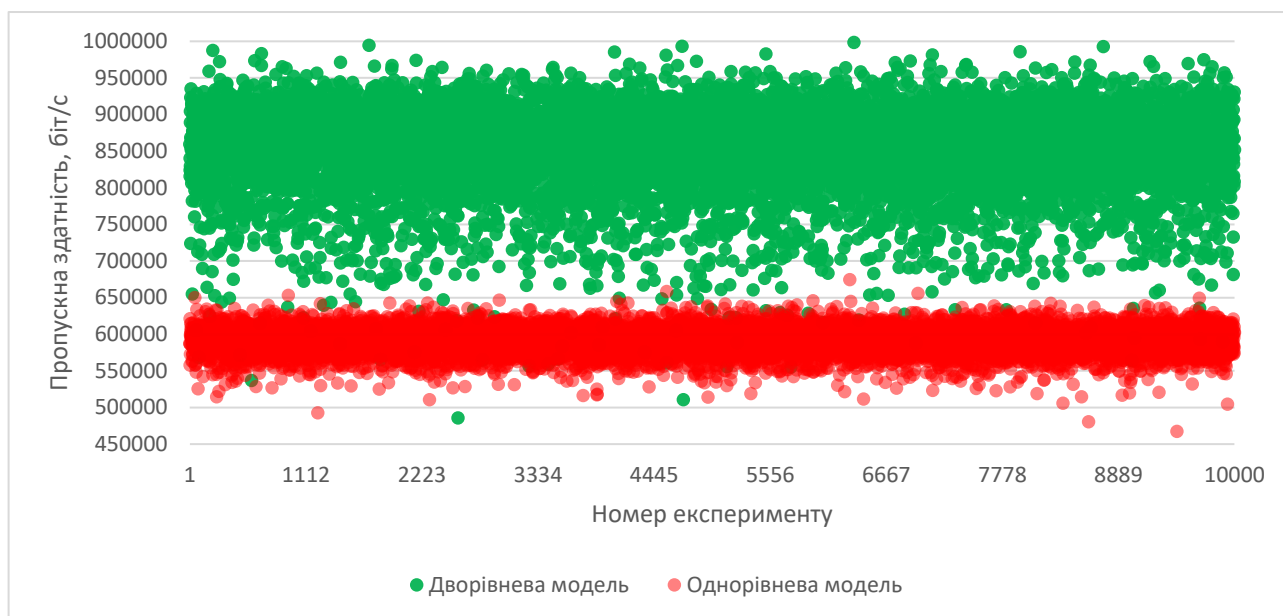


Рисунок 4.12. Результати обчислення швидкості передачі інформації усередненої за кількістю сенсорів при даному номері експерименту

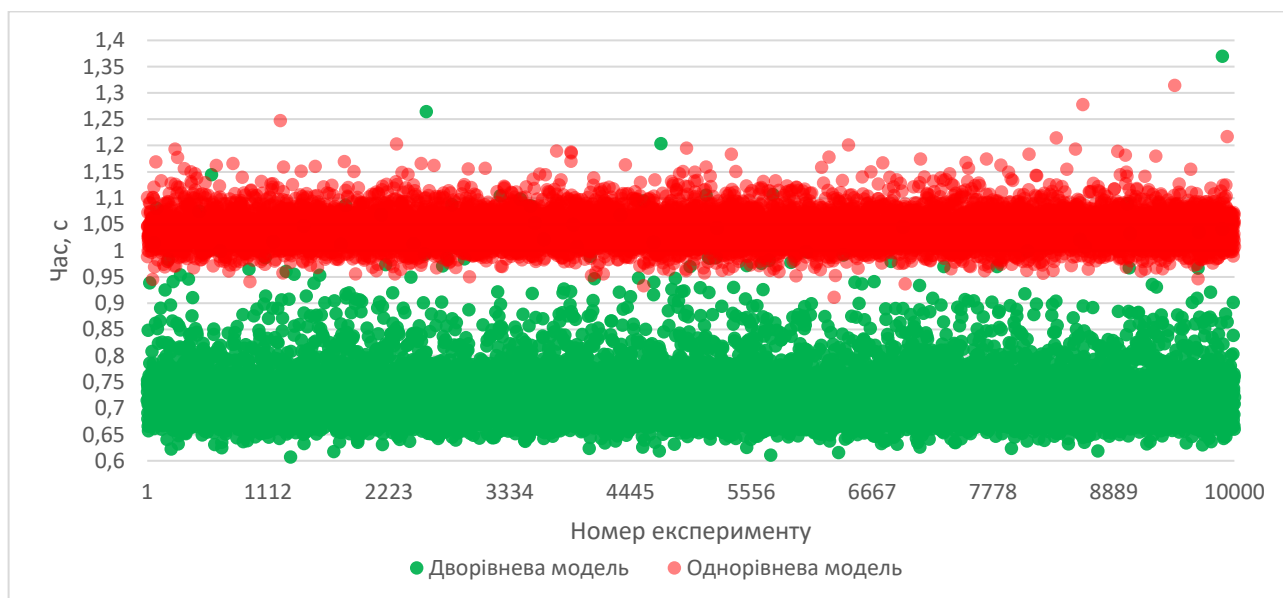


Рисунок 4.13. Результати обчислення часу затримки при передачі інформації усередненого за кількістю сенсорів при даному номері експерименту

Далі слід звернути увагу на залежності швидкості передачі даних, часу затримки при передачі інформації та кількості ТА від довжини маршруту усереднених за кількістю сенсорів (рис. 4.14 - 4.16 відповідно). Із залежності представленої на рисунку 4.14 можна зробити висновок, що швидкість передачі даних зменшується зі збільшенням відстані, що збігається із трендом у сімействі залежностей отриманих у розділі 3. А рисунки 4.15 та 4.16 демонструють збільшення часу затримки при передачі інформації та кількості ТА зі збільшенням відстані відповідно [112,113].

Усереднені за кількістю експериментів результати моделювання для обох систем та їх порівняння наведені у таблиці 4.3 [112,113].

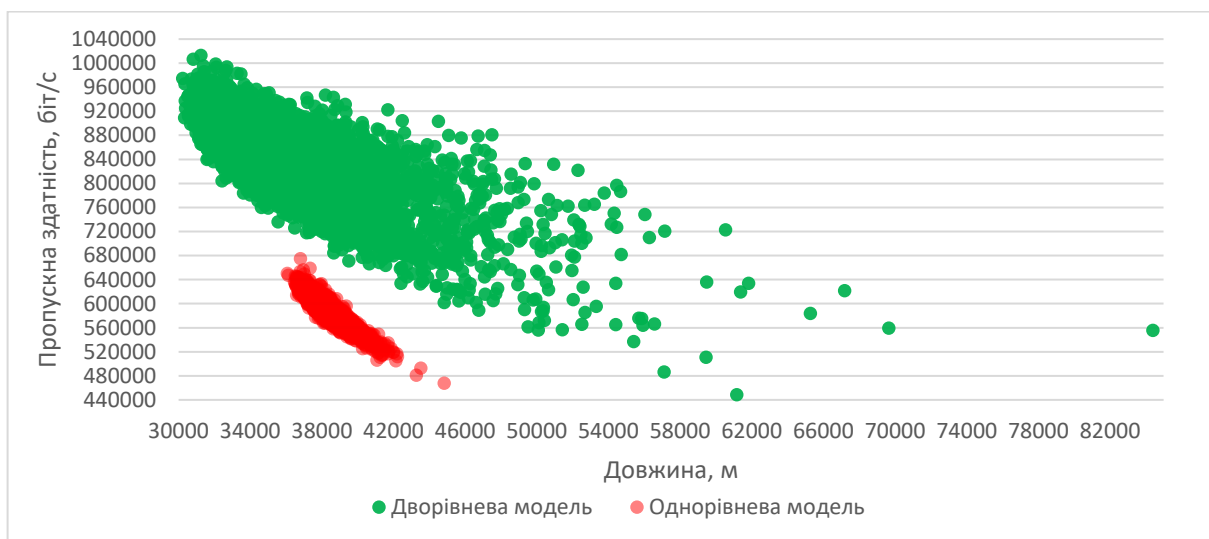


Рисунок 4.14. Залежність швидкості передачі даних від довжини маршруту усереднена за кількістю сенсорів

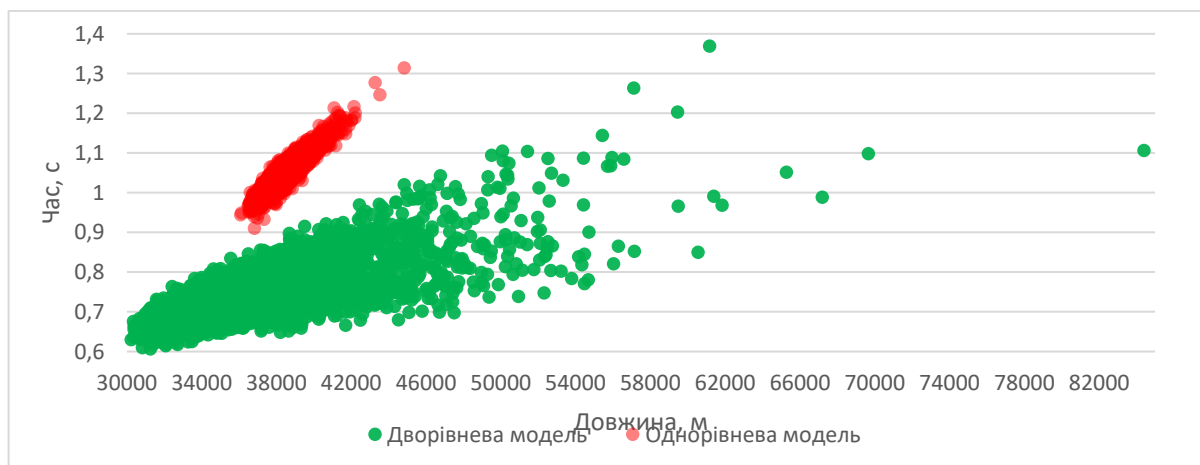


Рисунок 4.15. Залежність часу затримки при передачі інформації від довжини маршруту усереднена за кількістю сенсорів

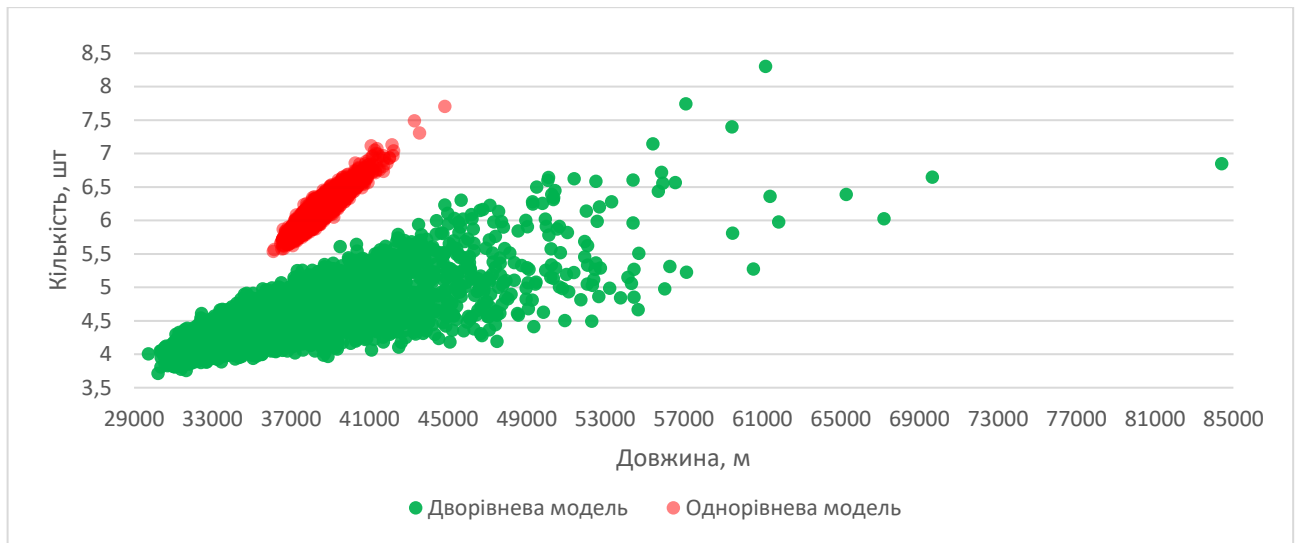


Рисунок 4.16. Залежність безпосередньо задіяних кількості ТА від довжини маршруту усереднена за кількістю сенсорів

Таблиця 4.3. Узагальнені результати імітаційного моделювання

Критерії W_i ($i = \overline{1, 11}$) оцінки ефективності (усереднено за загальною кількістю експериментів)	<u>МСМ із ТА</u> (прототип)	<u>ММСД із ТА</u> <u>дворівневого</u> <u>розташування</u> (запропоновано в дисертації)	Покращення, %
Час передачі інформації усереднений за кількістю сенсорів, мс	102	72	29.41
Швидкість передачі інформації усереднена за кількістю сенсорів, біт/с	602846.77	852071.01	41.34
Кількість безпосередньо задіяних ТА усереднена за кількістю сенсорів, шт.	6.04	4.351	27.96
Максимальна кількість ТА, шт.	10	8	20
Медіана кількості ТА, шт.	6	4	33.33
Мода кількості ТА, шт.	7	4	42.86
Довжина маршруту усереднена за кількістю сенсорів, м	37649.13	33673.45	10.56
Максимальна довжина маршруту, м	58340.52	62871.89	7.77
Мінімальна довжина маршруту, м	20397.6	20075.12	1.58
Медіана довжини маршруту, м	38413.1	32561.065	15.23
Мода довжини маршруту, м	28018.11	26239.12	6.35

Виходячи із усього вище наведеного, можна сказати що запропонована ММСД із ТА дворівневого розташування може бути ефективно використана для

підтримки зв'язності вузлів із досягненням покращень по всім зазначеним вище критеріям [112,113].

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Визначено перелік критеріїв для оцінки ефективності роботи МСМ з використанням ТА в кожній із підсистем керування мережею (планування та оптимізації покриття, телекомунікацій, енергоменеджменту) на основі методичних рекомендацій МСЕ-Р та програмного комплексу Matlab.

2. Запропоновано методику у якій описується підхід до оцінки ефективності МСМ із ТА та раціонального порівняння запропонованої моделі із існуючою. Він складається з чотирьох етапів, а саме: задання вхідних параметрів мережевих елементів та мережі в цілому, обрання показників ефективності, побудова математичних моделей на основі вказаної інформації та отримання результатів з підготовкою необхідних візуальних представлень.

3. Побудовано дві математичні моделі в програмному комплексі Matlab: МСМ із ТА (прототип) і ММССД із ТА дворівневого розташування (запропонована система).

4. Проведено імітаційне моделювання запропонованої системи та системи прототип, отримані результати на основі яких були побудовані візуальні представлення і порівняння у вигляді графіків та загальної таблиці. А також представлено залежності часу затримки при передачі інформації, швидкості передачі даних та кількості ТА від довжини маршруту усереднені за кількістю сенсорів. Залежність швидкості передачі даних від довжини маршруту має тренд який збігається із отриманим раніше на сімействі графіків у розділі 3

5. Отримані результати показують, що довжина маршруту у запропонованій системі менша на 1.5 – 15.2% (за показниками моди, медіани, мінімальних та усереднених значень) та на 7.8% більша за максимальним показником, що зумовлено розташуванням мережевих елементів (ТА і сенсорів) на значній відстані один від одного. Кількість безпосередньо задіяних ТА у вдосконаленій системі менша на 20 – 43% за визначеними показниками, а перевага у значеннях швидкості передачі даних

та часі передачі інформації усереднених за кількістю сенсорів становить 41 та 29 відсотків відповідно. Загалом бачимо, що у запропонованій системі досягнуто перевагу по всіх 11 критеріям.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано важливу науково-технічну задачу щодо розробки методу використання сенсорів спрямованої дії у складі мобільної мережі сенсорів та дворівневого просторового розташування телекомунікаційних аероплатформ із різним енергетичним забезпеченням для підтримки такого типу зв'язності, який дозволяє досягти зменшення середніх значень часу затримки при передачі інформації та кількості безпосередньо задіяних телекомунікаційних аероплатформ в кожному сеансі передачі інформації, а також збільшення середньої швидкості передачі інформації з кінця в кінець, тобто досягти мету роботи.

Основні наукові висновки і практичні результати дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Проведено аналіз задач керування та принципів функціонування ММССД з використанням ТА різнорівневого розташування, методів та алгоритмів обміну і збору даних із ММССД ТА, визначення переваг та недоліків, а також математичних моделей: кластеризації ММССД, оцінки енерговитрат вузлів, часу збору даних, передачі даних моніторингу, позиціонування ТА

2. Вперше розроблено математичну модель підтримки зв'язності ММССД з ТА різнорівневого розташування, яка на відміну від існуючих математичних моделей МСМ з ТА включає до свого складу математичні моделі функціонування сенсорів спрямованої дії і ТА дворівневого розташування з різним енергетичним забезпеченням.

3. Вперше розроблено метод підтримки зв'язності вузлів ММССД з ТА різнорівневого розташування, який на відміну від існуючих методів підтримки зв'язності вузлів МСМ з ТА дозволяє ефективно використовувати антени спрямованої дії, що розташовані на сенсорах і ТА дворівневого просторового розташування із різним енергетичним забезпеченням, завдяки чому досягається зменшення часу затримки, збільшення швидкості передачі інформації з кінця в кінець та зменшення кількості безпосередньо задіяних ТА в ММССД із ТА порівняно із МСМ з ТА.

4. Результати розрахунків показали, що оптимізація за векторним критерієм із використанням запропонованого методу дала покращення порівняно із прототипом за (головними) показниками кількості безпосередньо задіяних ТА першого і другого рівнів, швидкості та часу затримки при передачі даних з кінця в кінець від 28% до 41% та за іншими показниками від 2% до 43%.

5. Запропонований в дисертації прийом апаратного вдосконалення МСМ, завдяки застосуванню сенсорів спрямованої дії, дозволяє у 3.9-4.6 рази збільшити відстань передачі інформації зі збереженням кількості бітових помилок в одиницю часу або збільшити швидкість передачі інформації у 1.7-3.5 рази порівняно із існуючими МСМ із ТА, що підтверджується порівняльним комп'ютерним моделюванням у середовищі Atoll ММССД з ТА і МСМ з ТА.

6. Метод може бути використаний в експертно-моделюючій системі прийняття рішень для керування пошуково-рятувальними роботами.

Отже, всі наукові задачі, які сформовані в рамках дисертації, вирішені. Мета дисертації досягнута.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Chumachenko, S., Lysenko, O., Tachinina, O., Furtat, O., Furtat, S., & Sushyn, I. (2023). *Method of collecting information on the condition of critical infrastructure objects from wireless sensor network nodes. Challenges and threats to critical infrastructure*. NGO Institute for Cyberspace Research. (pp. 171-178). ISBN: 10/979-8-218-22315-1. https://www.researchgate.net/publication/371540507_CHALLENGES_AND_THREATS_TO_CRITICAL_INFRASTRUCTURE_Detroit_Michigan_USA_-2023
2. Chumachenko, S., Lysenko, O., Novikov, V., Furtat, O., Furtat, S., & Sushyn, I. (2023). *Development of the method of support and increase of connectivity wireless networks using UAVs. Challenges and threats to critical infrastructure*. NGO Institute for Cyberspace Research. (pp. 277-283). ISBN: 10/979-8-218-22315-1. https://www.researchgate.net/publication/371540507_CHALLENGES_AND_THREATS_TO_CRITICAL_INFRASTRUCTURE_Detroit_Michigan_USA_-2023
3. Romaniuk, V., Lysenko, O., Novikov, V., & Sushyn, I. (2021). Development of methods of positioning, localization and data collection from nodes of a free mobile sensor network using intelligent adaptive telecommunication aeroplatforms. *Information and Telecommunication Sciences*, (2), 40–49. <https://doi.org/10.20535/2411-2976.22021.40-49>
4. Lysenko, O., Romaniuk, V., Romaniuk, A., Novikov, V., Yavisya, V., Sushyn, I. (2023). The Method of Using a Telecommunication Air Platform as a Flying Information Communication Robots. In: Ilchenko, M., Uryvsky, L., Globa, L. (eds) *Progress in Advanced Information and Communication Technology and Systems. MCiT 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 548. Springer, Cham. (pp. 140-149). ISSN: 2367-3370. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16368-5_18
5. Kumar, S., Tiwari, P., & Zymbler, M. (2019). Internet of Things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review. *Journal of Big Data*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0268-2>
6. Lysenko, O., Chumachenko, S., Tachinina, O., Tureichuk, A., Novikov, V., & Sushyn, I. (2022). Justification of the requirements for the sensor network of information support of the environmental safety system of a distributed man-made object. In *Conference Proceedings of the 15th Annual International Scientific Conference «SECURITY FORUM*

2022» (pp. 114–123). Interpolis. <https://fpvmv.umb.sk/data/page/umb.sk/16316/security-forum-2022.pdf>

7. Кравчук, С., Явіся, В., Лисенко, О., та Сушин, І. (2022). Огляд методів підвищення ефективності мобільних безпроводових сенсорних мереж. У *Начерк науково-практичної конференції присвячений пам'яті українського зв'язківця Тітко Валентина Михайловича «Сучасні системи зв'язку як напрям міжнародно-правової, зовнішньополітичної, теле-, радіо, мережевої комунікації»* (с. 19–21). ГО «УКРО». <https://doi.org/10.59105/2022-11>

8. Zhan, C., Zeng, Y., & Zhang, R. (2018). Energy-Efficient data collection in UAV enabled wireless sensor network. *IEEE Wireless Communications Letters*, 7(3), 328–331. <https://doi.org/10.1109/lwc.2017.2776922>

9. *Wireless sensor networks: Types & their applications*. (n.d.). ElProCus - Electronic Projects for Engineering Students. <https://www.elprocus.com/introduction-to-wireless-sensor-networks-types-and-applications/>

10. Лисенко, О., Чумаченко, С., Новіков, В., Гуйда, О., Турейчук, А., та Сушин, І. (2021). Методика обґрунтування вимог до безпроводових сенсорних мереж інформаційного забезпечення систем оцінки та прогнозування стану природного середовища територій розподілених техногенних об'єктів. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*, 32 (71)(6), 33–43. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.6/06>

11. Лисенко, О., Турейчук, А., Гуйда, О., Новіков, В., Сушин, І., та Нідченко, І. (2022). Методологія обґрунтування вимог до складу сенсорів безпроводової сенсорної мережі інформаційного забезпечення процедур та алгоритмів системи екологічного моніторингу розподіленого техногенного об'єкту. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*, 33 (72)(4), 133–149. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.1/22>

12. Lysenko, O., Valuiskyi, S., & Sushyn, I. (2023). The program for assessing the connectivity of nodes of wireless episodic networks under the condition of using UAVs. *Information and Telecommunication Sciences*, (1), 24–34. <https://doi.org/10.20535/2411-2976.12023.24-34>

13. Лисенко, О., Чумаченко, С., Явіся, В., Гуйда, О., Новіков, В., та Сушин, І. (2022). Моделі використання інформації від мобільних безпроводових сенсорних мереж в алгоритмах оцінювання та прогнозування стану екологічних систем ускладнених техногенним навантаженням. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*, 33 (72)(4), 103–112. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/17>
14. Lysenko, O., Valuiskyi, S., Yavisya, V., Tachinina, O., Novikov, V., & Sushyn, I. (2022). Method of operational calculation of coordinates of intermediate route points of flying information robot. *Information and Telecommunication Sciences*, (1), 27–34. <https://doi.org/10.20535/2411-2976.12022.27-34>
15. Lysenko, O., Chumachenko, S., Valuiskyi, S., Yavisya, V., Novikov, V., & Sushyn, I. (2023). *Methodological aspects of ensuring state security in the mind hybrid threats. Expert-modeling system decision support for the deployment and management of a wireless sensor network with mobile sensors and telecommunication air platforms in the emergency zone*. *Vysoka škola bezpečnosneho manažerstva v Košiciach*. (pp. 255-270). ISBN: 978-80-8185-058-5. https://www.researchgate.net/publication/368923784_Methodological_aspect_of_ensuring_state_security_in_the_mind_hybrid_threats
16. Chelouah, L., Semchedine, F., & Bouallouche-Medjkoune, L. (2018). Localization protocols for mobile wireless sensor networks: A survey. *Computers & Electrical Engineering*, 71, 733–751. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2017.03.024>
17. Mamun, Q. (2012). A qualitative comparison of different logical topologies for wireless sensor networks. *Sensors*, 12(11), 14887–14913. <https://doi.org/10.3390/s121114887>
18. Маліцька, В. (2022, July 23). *Колаборація Vodafone і Starlink в Україні: що це та як супутниковий інтернет допомагає українським операторам*. Вікна. <https://vikna.tv/styl-zhyttya/starlink-shho-cze-take-yak-vstanovyty-i-yak-suputnykovyj-internet-dopomagaye-ukrayinskym-operatoram/>
19. Weber, J. S., Neves, M., & Ferreto, T. (2021). VANET simulators: An updated review. *Journal of the Brazilian Computer Society*, 27(1). <https://doi.org/10.1186/s13173->

021-00113-х

20. Лисенко, О., Явіся, В., Новіков, В., та Сушин, І. (2021). Застосування бездротових сенсорних мереж на базі безпілотних літальних апаратів у військових цілях. У *І Міжнародна науково-технічна конференція «Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки: актуальні питання і тенденції розвитку»* (с. 190–191). ВІТІ ім. Героїв Крут.
21. Лисенко, О., Явіся, В., та Сушин, І. (2021). Підхід до побудови системи стабілізації мультикоптерних дронів. У *І Міжнародна науково-технічна конференція «Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки: актуальні питання і тенденції розвитку»* (с. 192). ВІТІ ім. Героїв Крут.
22. Лисенко, О., Явіся, В., & Сушин, І. (2021). Спосіб забезпечення стійкого управління дронами. У *І Міжнародна науково-технічна конференція «Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки: актуальні питання і тенденції розвитку»* (с. 193–194). ВІТІ ім. Героїв Крут.
23. Жук, О., Романюк, А., та Ткаченко, Д. (2017). Аналіз методів управління топологією в безпроводових сенсорних мережах. *Збірник наукових праць ВІТІ*, (2), 41–47.
24. Романюк, А., та Давидюк, В. (2017). Забезпечення стабільності пропускну здатності масштабованих ad-hoc мереж. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*, 28 (67)(1), 35–40. https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2017/1_2017/11.pdf
25. Сова, О., Романюк, В., Міночкін, Д., та Романюк, А. (2014). Методи обробки знань про ситуацію в мобільних радіомережах класу MANET для побудови вузлових інтелектуальних систем управління. *Збірник наукових праць ВІТІ ДУТ*, (1), 76–84.
26. Lysenko, O., Tachinina, O., Kirchu, P., Ponomarenko, S., Kutieпов, V., & Sushyn, I. (2023). *Approach for determining the influence of UAV spatial motion parameters on the characteristics. Information processing in control and decision-making systems. Problems and solutions.* NU «ОМА». (pp. 34-58). ISBN: 978-617-7857-33-3 https://www.researchgate.net/publication/375665853_information_processing_in_control_and_decision-making_systems_problems_and_solutions

27. Tachinina, O., Lysenko, O., Alekseeva, I., Sushyn, I., & Novikov, V. (2022). Method of Algorithmic Correction of Dynamic Properties of Special-Purpose Electric Drive. In *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)* (pp. 263–266). IEEE. <https://doi.org/10.1109/khpiweek57572.2022.9916481>
28. Романюк, А. (2018). Метод доступу до радіоканалу вузлами безпроводної сенсорної мережі при зборі даних моніторингу телекомунікаційними аероплатформами. *Збірник наукових праць ВІТІ*, (4), 84–91.
29. Стрела, Т., Жук, О., та Романюк, А. (2017). Аналіз методів маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах. *Збірник наукових праць ВІТІ*, (3), 66–75.
30. Zeng, Y., Zhang, R., & Lim, T. J. (2016). Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 54(5), 36–42. <https://doi.org/10.1109/mcom.2016.7470933>
31. Лисенко, О. І., Тачиніна, О. М., Семенов, В. Г., та Сушин, І. О. (2021). Методика синтезу регуляторів для цифрової системи автоматичного керування антропоморфним роботом. *Проблеми інформатизації та управління*, 4(68), 44–51. <https://doi.org/10.18372/2073-4751.68.16526>
32. Романюк, В., Лисенко, О., Романюк, А., Новіков, В., & Гуйда, О. (2021). Метод збору інформації з вузлів безпроводової сенсорної мережі з використанням інтелектуальних адаптивних літаючих інформаційно-телекомунікаційних роботів. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*, 32 (71)(2 (Частина 2)), 25–35. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-2/05>
33. Sushyn, I., Lysenko, O., Romaniuk, V., Yavisya, V., Kyselov, V., Novikov, V. (2024). UAV Connectivity Maintenance in Wireless Sensor Networks. In: Luntovskyy, A., Klymash, M., Melnyk, I., Beshley, M., Schill, A. (eds) *Digital Ecosystems: Interconnecting Advanced Networks with AI Applications*. TCSET 2024. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 1198. Springer, Cham. (pp. 843-857). ISSN: 1876-1100. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61221-3_41
34. Лисенко, О., Тачиніна, О., Новіков, В., Гуйда, О., та Сушин, І. (2021). Теоретичні основи конструювання керування рухом розподіленого інформаційно-

телекомунікаційного робота. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*, 32 (71)(3), 55–62. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/10>

35. Tachinina, O., Lysenko, O., Alekseeva, I., Guida, O., Novikov, V., Sushyn, I. (2023). Methodology of Energy-Efficient Algorithmic Modernization of Dynamic Characteristics of Digital Electric Drives of Mechatronic Devices for Small Civil Aviation. In: Ostroumov, I., Zaliskyi, M. (eds) *Proceedings of the International Workshop on Advances in Civil Aviation Systems Development. ACASD 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 736. Springer, Cham. (pp. 152-165). ISSN: 2367-3370. https://doi.org/10.1007/978-3-031-38082-2_12

36. Lysenko, O., Yavisya, V., & Sushyn, I. (2021). Method for Ensuring the Quality of Service of Geostationary Satellite Communication Systems. In *2021 IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)* (pp. 353–356). IEEE. <https://doi.org/10.1109/picst54195.2021.9772228>

37. Yavisya, V., Lysenko, O., Sushyn, I., & Novikov, V. (2023). An Option for Building a Communication System for a Settlement on the Moon. In *2023 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)* (pp. 108–111). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ukrmico61577.2023.10380344>

38. V Yavisya, V., Lysenko, O., Tachinina, O., Ponomarenko, S., & Sushyn, I. (2022). Prototype of communication system for mars exploration. In *Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference «Theory and Practice of Science: Key Aspects»* (pp. 448–458). Scientific Publishing Center «InterConf». <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.06.2022.046>

39. Валуїський, С. (2014). Вдосконалений метод підвищення пропускної здатності епізодичних радіомереж з управлінням положенням телекомунікаційних аероплатформ. *Науковий вісник Академії муніципального управління. Збірник наукових праць. Серія «Техніка»*, (7), 25–34.

40. Шабельник, Т., Крівенко, С., & Конєва, О. (2020). Система автоматичного пілотування безпілотних летальних апаратів в умовах відсутності радіозв'язку. *Кібербезпека: Освіта, наука, техніка*, 1(9), 93–103.

<https://doi.org/10.28925/2663-4023.2020.9.93103>

41. Технологія LoRaWAN. (б. д.). Deps. <https://deps.ua/ua/knowledgeable-base/reference-information/66634.html>
42. *The Alliance Specifications Download Request Form*. (n.d.). CSA-IOT. <https://csa-iot.org/developer-resource/specifications-download-request>
43. Parekh, S. (n.d.). *IEEE 802.11 Wireless LANs*. EECS Instructional Support Group. <https://inst.eecs.berkeley.edu/~ee122/sp07/80211.pdf>
44. Poole, I. (n.d.). *WiFi Standards: IEEE 802.11*. Electronics Notes: reference site for electronics, radio & wireless. <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/wifi-ieee-802-11/standards.php>
45. Dalal, U., & Kosta, Y. (2009). *WIMAX New Developments*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/140>
46. *Bluetooth Technology Overview*. (n.d.). Bluetooth Technology Website. <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview>
47. *LTE – A Technical Overview*. (n.d.). Neocific. https://labs.ece.uw.edu/ieee-comm/event_may_19_2009_files/LTE_overview_titus.pdf
48. Касім, Н., Хлапонін, Ю., та Симоненко, О. (2021). Застосування технології LTE при впровадженні інтернету речей. У *I Міжнародна науково-технічна конференція «Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки: актуальні питання і тенденції розвитку»* (с. 148–149). BITI ім. Героїв Крут.
49. Kanj, M., Savaux, V., & Le Guen, M. (2020). A tutorial on nb-iot physical layer design. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(4), 2408–2446. <https://doi.org/10.1109/comst.2020.3022751>
50. Tachinina, O., Lysenko, O., Alekseeva, I., Novikov, V., & Sushyn, I. (2021). Methods for Parametric Adjustment of a Digital System and Precision Automatic Stabilization of an Unmanned Aerial Vehicle. In *2021 IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD)* (pp. 76–79). IEEE. <https://doi.org/10.1109/apuavd53804.2021.9615436>
51. Романюк, А., Валуйський, С та Лисенко, І. (2015). Класифікація задач системи управління епізодичної радіомережі на основі телекомунікаційних аероплатформ. У

- IX міжнародна науково-технічна конференція «ПРОБЛЕМИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ» (с. 381–383). <https://conferenc-journal.its.kpi.ua/article/view/104180/99242>
52. Lisenko, O., Danylyuk, S., Romanyuk, A., & Romanyuk, V. (2015). Objective control functions of mobile AD-HOC networks by means of UAVs. In *2015 IEEE International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)* (pp. 243–246). IEEE. <https://doi.org/10.1109/apuavd.2015.7346610>
53. Лисенко, О., Новіков, В., Петрова, В., та Гуйда, О. (2018). Процедура синтезу топології безпроводної сенсорної мережі моніторингу цілей із мінімізацією загальної потужності передачі вузлів. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*, 29 (68)(6 (Частина 1)), 69–72. http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/6_2018/part_1/6-1_2018.pdf
54. Новіков, В., Лисенко, О., Тачиніна, О., & Гуйда, О. (2020). Методика синтезу алгоритму цифрового автоматичного керування температурою повітря в салоні мобільного центру обробки інформації літаючої (повітряної) сенсорної мережі. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*, 31 (70)(4), 31–37. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/05>
55. Popescu, D., Stoican, F., Stamatescu, G., Chenaru, O., & Ichim, L. (2019). A survey of collaborative UAV–WSN systems for efficient monitoring. *Sensors*, 19(21), 4690. <https://doi.org/10.3390/s19214690>
56. Tachinina, O., Lysenko, O., Romanchenko, I., Novikov, V., Sushyn, I. (2024). Using Krotov's Functions for the Prompt Synthesis Trajectory of Intelligent Info-communication Robot. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Krytskyi, D. (eds) *Information Technologies in the Design of Aerospace Engineering. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 507. Springer, Cham. (pp. 255-283). ISSN: 2198-4182. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43579-9_6
57. Лисенко, О., Тачиніна, О., Кисельов, В., Новіков, В., Гуйда, О., та Сушин, І. (2021). Метод розміщення сенсорів літаючими інформаційно-телекомунікаційними роботами динамічними чергами. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*, 32 (71)(4), 53–69. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/08>

58. Lysenko, O., Tachinina, O., Novikov, V., Guida, O., Kirchu, F., & Sushyn, I. (2023). Methodology of Synthesizing Digital Regulators in Precision Electric Drives for Orientation and Stabilization Target Tracking System of Mobile Robot's Directional Sensors. In *Proceedings of the 11-th International Conference "Information Control Systems & Technologies" (ICST 2023)* (pp. 51–63). CEUR Workshop Proceedings. <https://ceur-ws.org/Vol-3513/paper05.pdf>
59. Basu, P., Redi, J., & Shurbanov, V. (2004). Coordinated flocking of UAVs for improved connectivity of mobile ground nodes. In *IEEE MILCOM 2004. Military communications conference, 2004.* (pp. 1628–1634). IEEE. <https://doi.org/10.1109/milcom.2004.1495182>
60. Жук, О., Романюк, А., Тарасов, В., та Ткаченко, Д. (2017). Моделі побудови покриття і виявлення цілей в безпроводових сенсорних мереж. *Збірник наукових праць ВІТІ*, (3), 41–48.
61. Романюк, А., Лисенко, І та Стрела, Т. (2019). Методи збору даних моніторингу від вузлів безпроводних сенсорних мереж з використанням БПЛА. У *XIII міжнародна науково-технічна конференція «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ»* (с. 333–335). <https://conferenc-journal.its.kpi.ua/article/view/168999/168783>
62. Lysenko, O., Sushyn, I., Romaniuk, V., & Novikov, V. (2021). The Improvement Direct Method for Collecting Monitoring Data from the Wireless Sensor Network Nodes with their Clustering by Telecommunications Aerial Platforms. In *2021 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)* (pp. 123–126). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ukrmico52950.2021.9716697>
63. Романюк, А. (2017). Цільові функції управління вузлами безпроводних сенсорних мереж для моніторингу об'єктів критичної інфраструктури. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*, 28 (67)(2), 49–54. https://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2017/2_2017/13.pdf
64. Лисенко, О. (2015). Функціональна модель системи управління безпроводовою сенсорною мережею із самоорганізацією для моніторингу параметрів навколишнього середовища. *Системи обробки інформації*, (10(135)), 222–226. <https://hups.mil.gov.ua/periodical/article/13437>

65. Sova, O., Romanyuk, V., Romanyuk, A., Lysenko, O., & Uryadnikova, I. (2016). Hierarchical model of decision acceptance in intelligent manet control system. *Science & Military, Armed Forces Academy of General Milan Rastislav Stefanik*, (1), 14–20.
66. Романюк, В., Лисенко, О., Алексеева, І., Романюк, А., та Новіков, В. (2017). Підходи до розробки нової архітектури системи управління неоднорідними безпроводовими сенсорними мережами. *Математичні машини і системи*, (2), 15–23. http://www.immsp.kiev.ua/publications/articles/2017/2017_2/02_2017_Romanyk.pdf
67. Lysenko, O., Romanyuk, A., Romanyuk, V., & Sova, Y. (2016). The hierarchical model of intelligent control system between intelligent agents in sensor networks and manet. In *2016 International Conference "Radio Electronics & Info Communications" (UkrMiCo)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ukrmico.2016.7739627>
68. Samberg, A., Romanyuk, V., Romanyuk, A., Lysenko, O., & Stepanenko, E. (2017). The control system of heterogeneous wireless sensor networks. In *TIEMS First Conference in Ukraine* (pp. 9–14). TIEMS.
69. Лисенко, О., Тачиніна, О., Явіся, В., Новіков, В., та Сушин, І. (2024). *Цифрові системи автоматичного керування для телекомунікацій*. КІП ім. Ігоря Сікорського. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/67807>
70. Ho, D.-T., Grotli, E. I., & Johansen, T. A. (2013). Heuristic algorithm and cooperative relay for energy efficient data collection with a UAV and WSN. In *2013 International Conference on Computing, Management and Telecommunications (ComManTel)* (pp. 346–351). IEEE. <https://doi.org/10.1109/commantel.2013.6482418>
71. Jawhar, I., Mohamed, N., & Al-Jaroodi, J. (2015). UAV-based data communication in wireless sensor networks: Models and strategies. In *2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* (pp. 687–694). IEEE. <https://doi.org/10.1109/icuas.2015.7152351>
72. Романченко, І., Лисенко, О., Чумаченко, С., Данилюк, С., Новіков, В., Тачиніна, О., Кірчу, П., та Валуйський, С. (2016). *Моделі застосування інформаційно-телекомунікаційних технологій на основі безпілотних авіаційних комплексів у надзвичайних ситуаціях*. НАУ.
73. Jan, B., Farman, H., Javed, H., Montrucchio, B., Khan, M., & Ali, S. (2017). Energy

- efficient hierarchical clustering approaches in wireless sensor networks: A survey. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2017, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2017/6457942>
74. Sathyaraj, B. M., Jain, L. C., Finn, A., & Drake, S. (2008). Multiple UAVs path planning algorithms: A comparative study. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 7(3), 257–267. <https://doi.org/10.1007/s10700-008-9035-0>
75. Романюк, А. В. (2021). *Методи збору даних з безпроводових сенсорних мереж телекомунікаційними аероплатформами* [Дис. канд. техн. наук, НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського"]. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/40572>
76. Валуйський, С., Фуртат, О., Сушин, І., та Турчин, Я. (2022). Метод підвищення зв'язності мобільних епізодичних радіомереж із використанням БПЛА. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*, 33 (72)(1), 37–44. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.1/07>
77. Радзіховська, А., та Хмелівський, Ю. (2023). Методи оптимізації і дослідження даних. *Вісник студентського наукового товариства ДонНУ імені Василя Стуса*, 1(15), 167–170. <https://jvestnik-sss.donnu.edu.ua/article/view/13748/13647>
78. Валуйський, С., Лисенко, О., Чумаченко, С., Гуйда, О., Фуртат, О., та Сушин, І. (2022). Метод оцінки зв'язності вузлів бездротових епізодичних мереж за умови застосування безпілотних літальних апаратів. *Проблеми програмування*, (3-4), 455–468. <https://doi.org/10.15407/pp2022.03-04.455>
79. Ho, D.-T., Grøtli, E. I., Sujit, P. B., Johansen, T. A., & Sousa, J. B. (2015). Optimization of wireless sensor network and UAV data acquisition. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 78(1), 159–179. <https://doi.org/10.1007/s10846-015-0175-5>
80. Okcu, H., & Soyturk, M. (2014). Distributed clustering approach for UAV integrated wireless sensor networks. *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, 15(1/2/3), 106. <https://doi.org/10.1504/ijahuc.2014.059912>
81. Розробка принципів побудови безпроводових сенсорних мереж із самоорганізацією для моніторингу параметрів навколишнього середовища: Звіт про НДР № 0111U04806 / кер. роботи О.І. Лисенко. К.: НТУУ „КПІ”, 2016
82. Методи та системи управління безпроводовими сенсорними мережами із

мобільними сенсорами, телекомунікаційними наземними вузлами та аероплатформами у зоні надзвичайної ситуації: Звіт про НДР № 0117U004282 / кер. роботи Л.О. Уривський. К.: НТУУ „КПІ ім. Сікорського”, 2019

83. О Лисенко, О., Тачиніна, О., Самсоненко, С., та Сушин, І. (2021). Методика налаштування цифрових регуляторів приводів роботів з урахуванням корегування їх динамічних характеристик. *Проблеми інформатизації та управління*, 3(67), 41–45. <https://doi.org/10.18372/2073-4751.67.16199>

84. Lysenko, O., Valuiskyi, S., Novikov, V., Sushyn, I., Chumachenko, S., & Guida, O. (2022). Heuristic algorithms for finding the minimum Steiner tree in the problem of optimizing the deployment and motion control of several flying information and telecommunication Robots. *Information and Telecommunication Sciences*, (2), 53–61. <https://doi.org/10.20535/2411-2976.22022.53-61>

85. Романюк, А. (2018). Задачі управління збором даних моніторингу БПЛА в безпроводових сенсорних мережах. *Збірник наукових праць ВІПІ*, (2), 103–112. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpviti_2018_2_15

86. Romaniuk, V., Romaniuk, A., Lysenko, O., Sparavalo, M., & Zhuk, O. (2020). Synthesis of data collection methods by telecommunication airplatforms in wireless sensors networks. *Information and Telecommunication Sciences*, (2), 63–73. <https://doi.org/10.20535/2411-2976.22020.63-73>

87. Кузьменко, І. (2024). *Теорія графів*. КПІ ім. Ігоря Сікорського. https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/35854/1/Teoriia_hrafov.pdf

88. Гримуд, А., та Романюк, В. (2022). Модель пошуку траєкторії польоту телекомунікаційною аероплатформою для збору даних з вузлів кластеризованої бездротової сенсорної мережі військового призначення. *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень НУОУ імені Івана Черняхівського*, 118–128. <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2022-1-74/118-128>

89. Сушин, І., та Лисенко, О. (2023). Програма оцінки зв'язності вузлів безпроводових епізодичних мереж при умові застосування БПЛА. У *XVII міжнародна науково-технічна конференція «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ»* (с. 36–41).

<http://conferenc.its.kpi.ua/2023/paper/view/27347/15708>


90. Сушин, І., та Буткевич, Г. (2023). Методика оцінки зв'язності вузлів бездротової сенсорної мережі при умові використання багаторівневої мережі телекомунікаційних аероплатформ. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*, 34 (73)(6), 39–46. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/07>
91. Сушин, І., та Лисенко, О. (2024). Універсальна методика передачі даних із застосуванням сенсорів спрямованої дії. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*, 35 (74)(2), 6–14. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/02>
92. Сушин, І., Лисенко, О., та Авдєєнко, Г. (2024). Застосування сенсорів спрямованої дії в мобільних безпроводових сенсорних мережах. У *XVIII міжнародна науково-технічна конференція «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ»* (с. 199–202). <https://conferenc.its.kpi.ua/2024/paper/view/29716/17396>
93. Maxworth, A. (2022). Far-Field radiation characteristics of folded monopole antennas over a conducting ground plane. *Eng*, 3(1), 142–160. <https://doi.org/10.3390/eng3010012>
94. *Specification of Dual-Band WiFi 2.4/5.8GHz Fakra Code I Mount Hinged Monopole Antenna*. (n.d.). Taoglas. <https://taoglas.com/datasheets/GW.05.0E23.pdf>
95. *Omni Antenna, 10 Section Collinear Dipole, datasheet*. (n.d.). Southwest Antennas. <https://southwestantennas.com/products/omni-antennas/omni-antenna-10-section-collinear-dipole-870-965-mhz-12-dbi-peak-gain>
96. *2.4 GHz – 2.5 GHz Dipole 2dBi Antenna for Reverse Polarity SMA datasheet*. (n.d.). Mouser. <https://www.mouser.com/datasheet/2/243/330-0016-594558.pdf>
97. Tampouratzis, M., Vouyioukas, D., & Stratakis, D. (2019). Discone rectenna implementation for broadband RF energy harvesting. In *2019 8th international conference on modern circuits and systems technologies (MOCASST)* (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/mocast.2019.8741639>
98. *Inverted-F antenna (IFA)*. (n.d.). Electricity - Magnetism. <https://www.electricity-magnetism.org/inverted-f-antenna-ifa>

99. Luo, G., Hu, Z., Dong, L., & Sun, L. (2008). Planar Slot Antenna Backed by Substrate Integrated Waveguide Cavity. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 7, 236–239. <https://doi.org/10.1109/lawp.2008.923023>
100. Ramos, A., Varum, T., & Matos, J. (2018). Compact Multilayer Yagi-Uda Based Antenna for IoT/5G Sensors. *Sensors*, 18(9), 2914. <https://doi.org/10.3390/s18092914>
101. Fu, Y., Shen, T., Dou, J., & Chen, Z. (2023). Stereoscopic UWB Yagi–Uda Antenna with Stable Gain by Metamaterial for Vehicular 5G Communication. *Sensors*, 23(9), 4534. <https://doi.org/10.3390/s23094534>
102. Verma, S., Pillai, P., & Yim-Fun Hu. (2013). Performance Evaluation of Alternative Network Architectures for Sensor-Satellite Integrated Networks. In *2013 Workshops of 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (WAINA)* (pp. 120–125). IEEE. <https://doi.org/10.1109/waina.2013.56>
103. 2.4GHz 21dBi Dual Polarity Parabolic Dish Antenna - MIMO WIFI Antenna. (n.d.). Airplux Technologies Limited. <https://airpluxtec.com/2-4ghz-21dbi-dual-polarity-parabolic-dish-antenna>
104. Lysenko, O., Novikov, V., Pryschepa, T., & Kashuba, S. (2016). SURVEY OF SATELLITE TECHNOLOGIES APPLYING IN WIRELESS SENSOR NETWORKS. *Information and Telecommunication Sciences*, (1), 13–19. <https://doi.org/10.20535/2411-2976.12016.13-19>
105. Jain, S., & Pawar, S. (2016). Characterization of log periodic planar dipole array antenna. In *2016 11th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)* (pp. 43–48). IEEE. <https://doi.org/10.1109/iciinfs.2016.8262905>
106. Vasylchenko, A., Fernández-Bolaños, M., Brebels S., de Raedt W., & Vandenbosch G. A. E. (2010). Conformal phased array for a miniature wireless sensor node. In *20th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications (ICECom)* (pp. 1–4). IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5729671>
107. Boothby, A., Hwang, R., Das, V., Lopez, J., & Lie, D. Y. C. (2012). Design of Axial-mode Helical Antennas for Doppler-based continuous non-contact vital signs monitoring sensors. In *2012 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)* (pp. 87–90). IEEE. <https://doi.org/10.1109/rws.2012.6175377>

108. Лисенко, О., Тачиніна, О., Гуйда, О., Фуртат, О., Фуртат, С., та Сушин, І. (2022). Інженерна методика експрес-синтезу цифрової системи автоматичного керування для прецизійних мехатронних пристроїв мобільних сенсорних мереж. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*, 33 (72)(5), 11–19. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/02>
109. WiFi 6 802.11ax receiver input sensitivity testing. (б. д.). RF Wireless world. <https://www.rfwireless-world.com/test-and-measurement/Receiver-input-sensitivity-testing-for-IEEE-802-11ax-device.html>
110. *Wi-Fi 6 Technology and Evolution White Paper*. (2020). ZTE - ZTE Official Website. https://www.zte.com.cn/content/dam/zte-site/res-www-zte-com-cn/mediares/zte/files/pdf/white_book/Wi-Fi_6_Technology_and_Evolution_White_Paper-202009232125.pdf
111. Ільїнов, М., Гурський Т., Борисов І., та Гриценюк К. (2018). *Лінії радіозв'язку та антенні пристрої*. ВІТІ ім. Героїв Крут. <https://sprotyvg7.com.ua/wp-content/uploads/2023/05/%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%96%D0%BB%D1%96%D0%BD%D1%96%D1%97.pdf>
112. Сушин, І., & Лисенко, О. (2024). Оцінка ефективності методу підтримки зв'язності мобільної мережі сенсорів спрямованої дії із використанням телекомунікаційних аероплатформ різнорівневого розташування. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*, 35 (74)(5 (Частина 1)), 71–78. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/12>
113. Sushyn, I., Ivashchev, D., & Lysenko, O. (2024). Evaluating the functioning effectiveness of sensor ground-to-air network using multiple UAVs layers and directional antennas. *Information and Telecommunication Sciences*, (2), 32–38. <https://doi.org/10.20535/2411-2976.22024.32-38>

ДОДАТОК А
АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри телекомунікацій
НН ІТС КПІ ім. Ігоря Сікорського
Сергій КРАВЧУК
„ 29 ” січня 2025 р.

Акт

впровадження результатів наукових досліджень,
викладених у дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії,
Сушина Ігоря Олексійовича, виконаної на тему**«Метод підтримки зв'язності мобільної мережі сенсорів спрямованої дії
із використанням телекомунікаційних аероплатформ
різнорівневого розташування»**Комісія у складі голови комісії проф. каф. телекомунікацій д.т.н., професора
Лисенка О.І. та членів комісії: заступника завідувача каф. телекомунікацій к.т.н., доцента
Явісі В.С.; старшого викладача каф. електронних комунікацій та інтернету речей к.т.н.
Новікова В.І.; старшого викладача каф. телекомунікацій Гетман О.В., встановила
наступне.

1. Аспірант кафедри телекомунікацій Сушин І.О. входив до складу наукової групи № 7
«Сенсорні телекомунікаційні мережі» НН ІТС і виконував дослідження спрямовані на
розвиток методів підтримки зв'язності мобільної мережі сенсорів спрямованої дії із
використанням телекомунікаційних аероплатформ різнорівневого розташування.
2. Основні наукові результати дисертації на здобуття наукового ступеня доктора
філософії полягають у наступному:

- Вперше розроблено математичну модель підтримки зв'язності МСМ з ТА, яка на відміну
від існуючих включає до свого складу математичні моделі функціонування сенсорів
спрямованої дії і ТА дворівневого розташування з різним енергетичним забезпеченням;
- Вперше розроблено метод підтримки зв'язності вузлів МСМ з ТА, який на відміну від
існуючих методів дозволяє ефективно використовувати антени спрямованої дії, що
розташовані на сенсорах і ТА дворівневого просторового розташування із різним
енергетичним забезпеченням, завдяки чому досягається зменшення часу передачі
інформації, збільшення швидкості передачі інформації, та зменшення кількості ТА в
ММССД із ТА.

3. Теоретичні та практичні напрацювання, що отримані Сушиним І.О. при розробці
основних наукових результатів дисертації, викладено у робочих матеріалах, проміжних та
остаточних звітах ініціативних НДР «Розробка алгоритмів динамічної фільтрації для
оцінювання параметрів руху безпілотних літальних апаратів при їх використанні в
безпроводових сенсорних мережах FANET», д/р - № 0119U102043 (початок 05.2019 –
закінчення 12.2024) і «Розвиток методів оптимізації низькоорбітальних кластерних
спутникових систем зв'язку, навігації та моніторингу», д/р - № № 0122U200110 (початок
05.2022 – закінчення 12.2027) та бюджетної НДР № 2316 „Інтелектуалізація систем
управління високопродуктивними сенсорними мережами на основі використання
роботизованих об'єктів та обчислювальної FOG-інфраструктури”, д/р - № 0120U102181
(початок 04.2020 – закінчення 12.2022), а також впроваджено у навчальний процес при
написанні навчального посібника «Цифрові системи автоматичного керування для
телекомунікацій [Електронний ресурс]: комп'ютерний практикум: навч. посіб. для
здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Інженерія та програмування
інфокомунікацій» спец. 172 Електронні комунікації та радіотехніка.

Голова комісії

Члени комісії

Олександр ЛИСЕНКО

Валерій ЯВІСЯ

Валерій НОВІКОВ

Олена ГЕТЬМАН

Підпис Кравчука С.О. завідувача
В.О. директора НН ІТС

ДОДАТОК Б
СВІДОЦТВА ПРО РЕЄСТРАЦІЮ АВТОРСЬКОГО ПРАВА НА ТВІР



УКРАЇНА



СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 114484

Науковий твір «Метод збору інформації з вузлів безпроводової сенсорної мережі із використанням інтелектуальних адаптивних літаючих інформаційно-телекомунікаційних роботів»

(вид, назва твору)

Автор(и) Лисенко Олександр Іванович, Явіся Валерій Сергійович, Тачиніна Олена Миколаївна, Новіков Валерій Іванович, Гайда Олександр Григорович, Фуртат Сергій Олександрович, Фуртат Олена Вікторівна, Валуйський Станіслав Вікторович, Сушин Ігор Олексійович, Гетьман Олена Володимирівна

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 25 серпня 2022 р.

**В.о. Генерального директора
Державного підприємства
«Український інститут
інтелектуальної власності»**

Олександр ОПАНАСЕНКО



УКРАЇНА



СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 114718

Науковий твір «Методика синтезу алгоритму цифрового автоматичного керування температурою повітря в салоні мобільного центру обробки інформації літаючої (повітряної) сенсорної мережі»

(вид, назва твору)

Автор(и) Лисенко Олександр Іванович, Явіся Валерій Сергійович, Тачиніна Олена Миколаївна, Новіков Валерій Іванович, Гуйда Олександр Григорович, Фуртат Сергій Олександрович, Фуртат Олена Вікторівна, Валуйський Станіслав Вікторович, Сушин Ігор Олексійович, Гетьман Олена Володимирівна

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 7 вересня 2022 р.

**В.о. Генерального директора
Державного підприємства
«Український інститут
інтелектуальної власності»**

Олександр ОПАНАСЕНКО



УКРАЇНА



СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 115002

Науковий твір «Концептуальний підхід до забезпечення функціональної живучості безпроводової сенсорної мережі на основі використання мобільних телекомунікаційних платформ»

(вид, назва твору)

Автор(и) Лисенко Олександр Іванович, Явіся Валерій Сергійович, Тачиніна Олена Миколаївна, Новіков Валерій Іванович, Гуйда Олександр Григорович, Фуртат Сергій Олександрович, Фуртат Олена Вікторівна, Валуйський Станіслав Вікторович, Сушин Ігор Олексійович, Гетьман Олена Володимирівна

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 28 вересня 2022 р.

**В.о. Генерального директора
Державного підприємства
«Український інститут
інтелектуальної власності»**

Олександр ОПАНАСЕНКО



