

Соколов О.В.

<https://orcid.org/0009-0004-9622-6561>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Павловський О.М.

<https://orcid.org/0000-0002-2754-8856>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ГРУПОЮ НАЗЕМНИХ МОБІЛЬНИХ БЕЗПЛОТНИХ ОБ'ЄКТІВ

В статті приведено обґрунтування вибору технології бездротового зв'язку для керування групою наземних мобільних безпілотних об'єктів за змінної топології зв'язку та можливих відмов центрального вузла, що є критично важливим для логістичних, моніторингових і пошуково-рятувальних застосувань. На основі аналізу публікацій, присвячених організації зв'язку й координації в розподілених робототехнічних системах, окреслено обмеження централізованих підходів, що спираються на топологію типу «зірка», та наголошено на важливості відмовостійких архітектур. Метою статті є аналіз проблеми відмовостійкості в робототехнічних системах та детальне представлення практичного прикладу комунікаційної архітектури на базі mesh-мережі, що вирішує проблему відмови основного вузла. Було проведено огляд і порівняння бездротових технологій для обґрунтування вибору транспортного рівня, а також детальний опис архітектури та конфігурації відмовостійкої системи на базі ZigBee/XBee в API-режимі. Ключові механізми, такі як багатохопова передача та автоматичний перехід між режимами, ілюструються на прикладі прототипів на основі малогабаритних колісних платформ та платформи Arduino в якості основного керуючого модуля та плати XBee S2C Shield. В рамках проведеного експерименту продемонстровано надійну багатохопову доставку команд/даних за відсутності прямої видимості одного з маршрутизаторів та коректний автоматичний перехід до автономної взаємодії «вузол–вузол» після імітації відмови координатора. Зроблено висновок, що використання mesh-архітектур є дієвим підходом для побудови відмовостійких систем керування для груп мобільних наземних безпілотних об'єктів, що підтверджується результатами практичного прикладу. Окреслено перспективи подальших досліджень.

Ключові слова: мобільні наземні роботи, група рухомих об'єктів, групова координація, безпілотні об'єкти, ZigBee, XBee, mesh-мережа, відмовостійке керування.

Постановка проблеми. Ефективність груп наземних малогабаритних безпілотних об'єктів у таких критичних сферах, як логістика, патрулювання та пошуково-рятувальні операції, безпосередньо залежить від їхньої здатності підтримувати узгоджену просторову поведінку. Однак ця здатність зазнає постійних викликів через змінну радіообстановку [1], екранування сигналів та періодичну втрату прямої видимості, що може призвести до провалу місії. Класичні архітектури керування, що покладаються на топологію типу зірка зі стабільним центральним вузлом, виявляються

вкрай вразливими в таких динамічних умовах, де стабільність радіоканалу є непостійною, що призводить до втрати інформації [2]. Залежність від єдиного координатора створює єдину точку відмови (single point of failure), а альтернативні технології з великим радіусом дії часто не можуть забезпечити необхідну швидкість передачі, необхідну для керування групою безпілотних об'єктів в реальному часі [3-5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Базовими принципами побудови розподілених бездротових мереж для керування групою



мобільних безпілотних об'єктів є обмеженість службового трафіку, передбачуваність затримок для керувальних повідомлень, підтримка багатохопової маршрутизації та механізми самовідновлення зв'язності [2, 6]. Для вбудованих платформ уже існують перевірені інженерні інструменти, що полегшують формування/розбір кадрів та інтеграцію прикладної логіки на мікроконтролерах [7], а огляди виробників компонентів дають типові шаблони вузлів керування і телеметрії [3]. Водночас значна частина робіт що присвячена робототехніці демонструє обмін інформації через ідеалізовані графи зв'язків зі сталою або квазісталою структурою, оминаючи деталі підтвердження доставки, втрат кадрів і реальних протокольних маршрутів – це ускладнює прямий перенос результатів у мережі рухомих об'єктів при змінній радіообстановці [8, 9]. Цей розрив між симуляційними моделями та фізичною реалізацією є однією з центральних невирішених проблем у мобільній робототехніці.

Розглянемо основні технології бездротового зв'язку, що набули широкого розповсюдження.

Wi-Fi (IEEE 802.11) у типовому інфраструктурному режимі працює за топологією типу «зірка». Високий бітрейт є перевагою для потокових даних, але для коротких керувальних пакетів критичними стають вимоги до зменшення затримок, які в умовах зашумленого ефіру можуть сягати сотень мілісекунд, що є неприйнятним для задач тісної координації до цього додається підвищене енергоспоживання й залежність від стабільної роботи точки доступу [10 – 12].

BLE (Bluetooth Low Energy) [11, 13] може працювати в мережах із неявно вираженими ведучими пристроями, проте основних режим роботи – «зірка». Може бути використана при обміні інформації між статичними об'єктами та при вимозі невеликої дальності та швидкості передачі даних. Може бути використана при обміні інформації у невеликій групі рухомих об'єктів при умові їх повної автономності, проте для реалізації зв'язку із оператором необхідне застосування іншої технології.

ZigBee (IEEE 802.15.4/ZigBee PRO) нативно підтримує ролі координатора, маршрутизатора й кінцевого вузла та побудову mesh-мереж із автоматичним відновленням маршрутів. Фізичний рівень 2,4 ГГц забезпечує до 250 кбіт/с – достатньо для коротких команд, статусів і телеметрії; стек містить адресну доставку, підтвердження на рівні кадру, показники якості каналу (RSSI/LQI) та сервіс маршрутизації з перебудовою шляхів за

втрат прямої видимості чи появи перешкод, що характерно для приміщень і щільної забудови [10]. Практичні кейси з промислових об'єктів підтверджують, що саме роль маршрутизаторів і механізми відновлення маршрутів забезпечують живучість ZigBee-мереж у зашумлених середовищах [5]. До обмежень слід віднести невелику швидкість передачі даних і співіснування з іншими системами в 2,4 ГГц. Однак для службово-керувального профілю обміну це зазвичай не критично, особливо з урахуванням підтверджень доставки та мультихопу [6, 10]. Крім того, наявність показників якості каналу відкриває можливості для реалізації адаптивних алгоритмів маршрутизації на вищих рівнях, які можуть динамічно обирати найнадійніші шляхи передачі даних, що є важливим для мобільних систем.

LPWAN-рішення на кшталт LoRa/LoRaWAN оптимізовані під великі дистанції за рахунок низьких бітрейтів і архітектури «зірка-через-шлюзи». Вони добре підходять для періодичного моніторингу з рідкими повідомленнями, але природні обмеження, такі як клас доступу до середовища, регуляторні ліміти ефірного часу – ускладнюють двосторонній обмін із малими та стабільними затримками, необхідними для синхронізації маневрів і швидких команд у групі рухомих об'єктів [14, 15]. Наприклад, жорсткі обмеження на робочий цикл (duty cycle), що становлять 1% або навіть 0.1% у деяких регіонах, фізично унеможливають частий обмін службовими повідомленнями, необхідний для підтримки актуальної топології мережі та швидкого реагування на зміни.

У підсумку для сценаріїв із динамічною топологією, періодичною втратою прямої видимості та вимогою гарантованої адресної доставки коротких службово-керувальних повідомлень перевагу мають стеки з нативною багатохоповістю й підтвердженням на рівні кадру. Проте, технологія показала свою ефективність при керуванні мобільними роботами на значних відстанях при умові зовнішніх завад та збурень [15].

По результатам проведеного огляду наведемо порівняльну характеристику основних технічних значень різних технологій, що наведена в табл. 1.

Таким чином, для груп наземних платформ із динамічною зв'язністю, періодичними втратами прямої видимості та потребою в гарантованій адресній доставці коротких керувальних/службових повідомлень системні переваги мають технології з нативною багатохоповістю та підтвердженням на рівні кадру – насамперед ZigBee.

Порівняння характеристик бездротових технологій

Параметр	ZigBee (XBee)	Wi-Fi	Bluetooth	LoRa
Стандарт IEEE	802.15.4	802.11a/b/g/n/ac	802.15.1	-
Дальність зв'язку	10–100 м	50–100 м	10 м	>10 км
Швидкість передачі	250 кбіт/с	54 Мбіт/с	1–3 Мбіт/с	0.3–50 кбіт/с
Енергоспоживання	Низьке	Високе	Низьке	Дуже низьке
Топологія мережі	Mesh, Зірка, Дерево	Зірка	Зірка	Зірка
Нативна підтримка Multi-hop	Так	Ні (потрібні надбудови)	Обмежена (mesh-профілі)	Ні
Типові затримки (latency)	Низькі, стабільні (~15-50 мс)	Середні, варіабельні (>50-200 мс)	Низькі, варіабельні	Дуже високі (>1-5 с)
Макс. кількість вузлів	~65 000	Десятки на точку доступу	Десятки	Тисячі на шлюз
Ключова перевага	Відмовостійкість, самовідновлення мережі, низькі накладні витрати	Висока швидкість (для відео та великих даних)	Дуже низьке енергоспоживання, поширеність	Надвеликий радіус дії (кілометри)
Ключовий недолік	Низька пропускна здатність	Єдина точка відмови, високі затримки	Складність реалізації mesh, обмеження топології	Дуже високі затримки
Маршрутизація	Підтримується	Не підтримується	Не підтримується	Обмежена

Додатковими аргументами на користь практичної реалізації є доступність інструментів XBee з API-режимом і бібліотек інтеграції для мікроконтролерів [6-7]. Саме це підводить до вибору ZigBee/XBee як транспортної основи для подальшої експериментальної верифікації схеми групової взаємодії безпілотних об'єктів.

Постановка завдання. Таким чином, метою статті є обґрунтування вибору технології бездротового зв'язку для керування групою наземних мобільних безпілотних об'єктів.

Виклад основного матеріалу. В основі архітектури, що розглядається як практичний приклад для реалізації керування групою наземних мобільних безпілотних об'єктів, лежить свідомий вибір на користь mesh-топології як фундаментального рішення для забезпечення відмовостійкості та надійності комунікації. На відміну від топології «зірка», де вихід з ладу центрального вузла паралізує всю мережу, mesh-архітектура дозволяє вузлам спілкуватися один з одним напряму або через проміжні вузли, створюючи гнучку та самовідновлювану структуру зв'язку [2, 10].

Для реалізації цієї архітектури було обрано технологію ZigBee, яка нативно підтримує mesh-мережі через визначені стандартом наступних ролей [10]:

Координатор (Coordinator): Один пристрій, що ініціює мережу та встановлює її базові параметри (PAN ID, канал). У штатному режимі він є центральним керуючим вузлом.

Маршрутизатор (Router): Пристрої, які одночасно виконують роль як маршрутизаторів, так і кінцевих споживачів. Саме функція маршрутизації є ключовою для побудови відмовостійкої мережі. Вона забезпечує багатоповову передачу (multi-hop, багатоточкова), дозволяючи вузлам обмінюватися даними, навіть якщо між ними немає прямого радіозв'язку, використовуючи інші вузли як ретранслятори. Це також створює механізм самовідновлення: якщо один із маршрутів зникає (наприклад, через перешкоду або вихід вузла з ладу), протокол ZigBee автоматично знаходить альтернативний шлях через доступні вузли [10].

Загальна схема такої гнучкої топології показана на рис. 1а.

Для того, щоб програмно керувати перевагами mesh-мережі, комунікаційний рівень реалізовано на основі модулів XBee S2C у режимі API [6, 10]. Цей режим, на відміну від простого «прозорого» каналу, надає мікроконтролеру повний контроль над мережевими функціями, що є критично важливим для реалізації як надійної координації, так і керування об'єктом. Це дозволяє:

- Керувати маршрутизацією: Хоча ZigBee автоматично будує маршрути, API-режим дозволяє відправляти пакети конкретному адресату, покладаючись на те, що мережа сама знайде оптимальний шлях, навіть якщо він пролягає через кілька ретрансляторів.

- Контролювати доставку на рівні мережі: API-режим надає механізм підтвердження

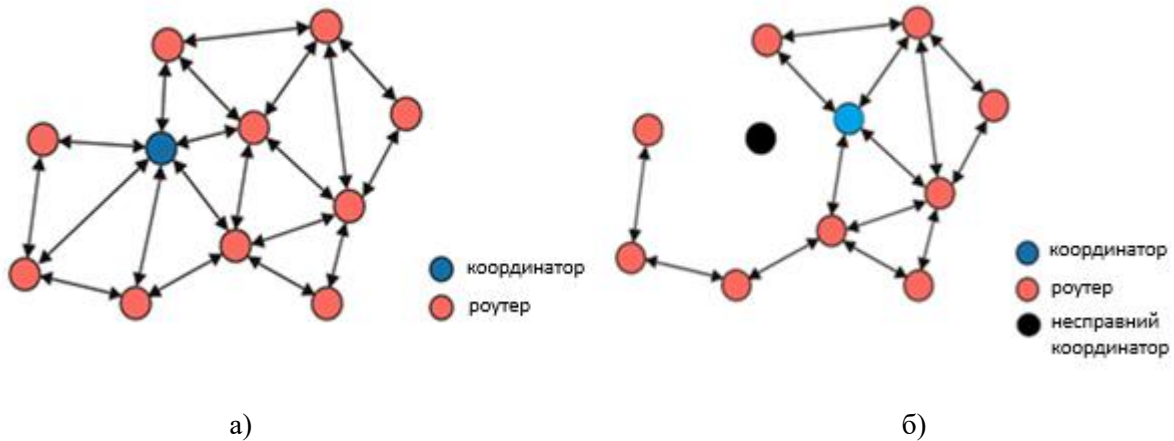


Рис. 1. Топологія Mesh-мережі: а) загальна схема; б) схема з перевизначенням нового координатора

(Transmit Status), який сповіщає відправника про те, що пакет був успішно доставлений кінцевому адресату по всьому ланцюжку маршрутизації.

Для фізичної реалізації mesh-мережі було реалізовано просту логіку керування, що базується на механізмі heartbeat (сигнал «серцебиття») [2]. Це періодичний сигнал від координатора, який підтверджує його присутність. Мережа може працювати у двох режимах. Перший – штатний централізований режим, поки вузли отримують heartbeat, вони виконують команди від координатора. У випадку, якщо прямиий зв'язок з якимось координатором втрачено, команди будуть доставлені через інший вузол-маршрутизатор.

Другий – автономний режим. Якщо сигнал heartbeat зникає, вузли роблять висновок про відмову координатора. Такий перехід можливий саме завдяки mesh-архітектурі, яка дозволяє вузлам встановлювати прямиий зв'язок «вузол-вузол» без участі координатора. Один із пристроїв тимчасово стає новим координатором і видає команди іншим, як показано на рис. 1б.

Таким чином, ключовим архітектурним рішенням є саме побудова mesh-мережі, яка забезпечує фізичну відмовостійкість, тоді як адресна доставка та контроль є інструментами API, що дозволяють ефективно використовувати на програмному рівні.

Для практичного підтвердження реалізації запропонованої технології для обміну інформацією між декількома наземними безпілотними об'єктами було створено експериментальний стенд. Умовна група роботів представляє собою малогабаритні колісні платформи (див. рис. 2), які виконують ролі координатора та двох маршрутизаторів. Як показано на рис. 3, основою кожної колісної платформи є платформа Arduino Uno та плата XBee S2C Shield.

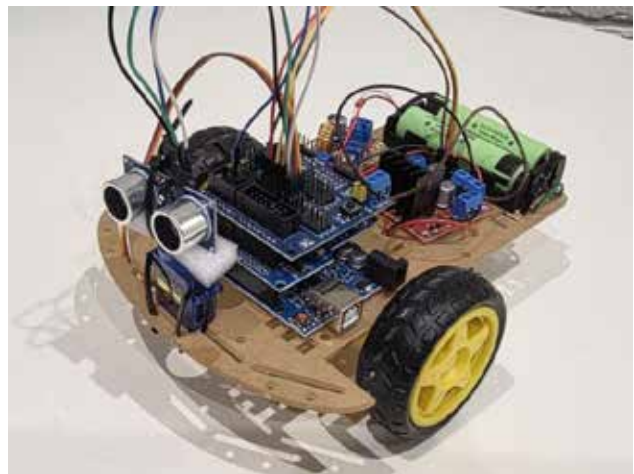


Рис. 2. Вузол-маршрутизатор на основі колісної платформи

Експеримент був проведений за двома сценаріями. Перший, штатний – підтвердити надійність багатохопової передачі команд/статусів.

Для проведення експерименту було розміщено вузли мережі таким чином, щоб координатор був у прямій радіовидимості першого маршрутизатора (вузол № 1), а другий маршрутизатор (вузол № 2) мав пряму радіовидимість вузла № 1 проте недосяжний для координатора.

Послідовність експерименту:

1. Вузол № 2 відправив пакет, адресований координатору.
2. Вузол № 1 зафіксував прийняття пакета від вузла № 2 і передав далі згідно з маршрутом ZigBee.
3. Координатор прийняв пакет, виконав дію й відправив відповідь. На стороні відправника зафіксовано успішний статус доставки.

Зазначимо, що надходження пакету до координатора контролювалось виведенням отриманої



Рис. 3. Платформа Arduino Uno та плата XBee S2C Shield

інформації в послідовний порт підключеного до координатора ПК, а підтвердження отримання пакету, що надходило до вузла № 2 – світловою індикацією. Кількість контрольованих пакетів – 100, з інтервалом 2 секунди.

Експеримент був проведений спочатку в статичному положенні колісних платформ, а потім при умовно синхронному прямолінійному русі.

За сценарієм № 2 (аварійний) моделювалась відмова координатора. Після початку передачі даних за сценарієм 1 вимикалось живлення координатора. Якщо протягом понад 5 секунд вузли не отримували сигнал heartbeat, вони переходили до автономного режиму роботи. Далі:

1. Тимчасовий лідер (вузол № 1) починав періодичну трансляцію ширококомовних команд (FOLLOW_ME).

2. Вузол № 2 приймав команди та коректно реагував (журнали послідовного порту, індикація на борту).

3. Після повторного ввімкнення координатора та відновлення heartbeat вузли автоматично поверталися до штатного режиму без ручного втручання.

Це підтверджує, що регламент переходів у поєднанні з мережевими можливостями ZigBee забезпечує збереження взаємодії без постійної комунікації з центральним вузлом у динамічних умовах.

Експерименти підтвердили, що обрана комунікаційна схема на ZigBee/XBee забезпечує керований обмін командами/статусами, роботу за відсутності прямої радіовидимості та коректні режимні переходи – саме ті властивості, які вимагають системи групової координації наземних мобільних безпілотних об'єктів.

Висновки. Проведений в рамках даної роботи аналіз ключових проблем координації груп наземних мобільних безпілотних об'єктів показав, що надійність комунікаційної інфраструктури є не просто технічною деталлю, а фундаментальним фактором, що визначає життєздатність усієї системи. Було встановлено, що класичні централізовані архітектури, які покладаються на топологію зірка, є вкрай вразливими в динамічних середовищах. Залежність від єдиного центрального вузла створює єдину точку відмови, що є неприпустимим ризиком для критичних застосувань, таких як логістичні, моніторингові та пошуково-рятувальні операції, де втрата зв'язку може призвести до повного провалу місії.

Як один із шляхів вирішення цієї проблеми, в статті було детально розглянуто та проаналізовано практичний приклад відмовостійкої архітектури, побудованої на основі mesh-мережі. Було обґрунтовано, що саме mesh-топологія, реалізована на базі технології ZigBee, забезпечує необхідну гнучкість та здатність до самовідновлення. Ключовим архітектурним рішенням є поєднання нативної підтримки багатохопової маршрутизації з простою, але ефективною логікою перемикавання режимів на основі heartbeat-сигналу. Цей підхід дозволяє системі функціонувати у двох режимах: штатному централізованому та автономному децентралізованому, забезпечуючи автоматичний та безшовний перехід між ними у випадку відмови або недосяжності координатора.

Працездатність основних механізмів цієї архітектури була проілюстрована на прикладі експериментального стенду. Результати демонстрації підтвердили два ключові аспекти. По-перше, надійність багатохопової доставки, яка дозволяє підтримувати зв'язок між вузлами та координатором навіть за відсутності прямої радіовидимості. По-друге, коректність режимних переходів: у разі зникнення координатора система стабільно переходила до автономної взаємодії «вузол-вузол», зберігаючи керованість, і автоматично поверталася до штатного режиму після відновлення центрального вузла. Це доводить, що запропонований підхід є життєздатним та практично реалізовним на доступній компонентній базі.

Подальша робота може бути спрямована на масштабування системи шляхом збільшення кількості вузлів та проведення систематичних вимірювань ключових показників продуктивності, таких як частка успішних доставок, розподіли затримок та час перемикавання режимів у різних радіоумовах. Оптимізація службового трафіку, зокрема підбір оптимального періоду heartbeat та лімітів повторних спроб, є ще одним важливим напрямком для

підвищення ефективності мережі. Також перспективною є розробка більш складних адаптивних алгоритмів, що використовують показники якості каналу (RSSI/LQI) для динамічного вибору маршрутів. Крім того, логіку взаємодії в автономному режимі можна суттєво розширити, додавши правила для динамічного переобрання тимчасового лідера та узгодження дій між кількома парами вузлів.

Список літератури:

1. Rappaport T. S. *Wireless communications: Principles and practice*. 2nd ed. Upper Saddle River, N.J : Prentice Hall PTR. 2002. Pp. 105–176.
2. Zheng J., Jamalipour A. *Wireless Sensor Networks: A Networking Perspective*. Hoboken : John Wiley & Sons. 2009. Pp. 1–32.
3. Open-Source Hardware Electronics and Kits. DFRobot. URL: <https://www.dfrobot.com/blog-1646.html> (дата звернення: 26.11.2025).
4. LoRa vs Zigbee: комплексне порівняння технологій Інтернету речей. Jooby. 2021. URL: <https://jooby.eu/uk/blog/lora-vs-zigbee-kompleksne-porivnyannya-tehnologij-internetu-rectej/> (дата звернення: 17.11.2025).
5. Мітронов В. О. Особливості застосування технології ZigBee у побудові Mesh-мереж приладів для моніторингу промислових об'єктів. *XXII Міжнар. наук.-техн. конф. "Приладобудування: стан і перспективи"*: КПІ ім. Ігоря Сікорського (16–17 травня 2023 р.). Київ. 2023. С. 314–315.
6. XBee/XBee-PRO S2C Zigbee RF Module User Guide. Digi International Inc. URL: <https://www.digi.com/resources/documentation>.
7. Widhalm D., Goeschka K. M., Kastner W. An Open-Source Wireless Sensor Node Platform with Active Node-Level Reliability for Monitoring Applications. *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 22. P. 7613. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21227613>
8. Zhang P., Xue H., Gao S., Zhang J. Distributed Adaptive Consensus Tracking Control for Multi-Agent System With Communication Constraints *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*. 2020. Vol. 32. Pp. 1293–1306.
9. Olfati-Saber R., Fax J. A., Murray R. M. Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems. *Proceedings of the IEEE*. 2007. Vol. 95, no. 1. Pp. 215–233.
10. Farahani S. ZigBee Wireless Networks and Transceivers. *Burlington : Newnes/Elsevier*, 2008. P. 1–32.
11. Lee J. S., Su Y. W., Shen C. C. A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi. *Proceedings of the 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*. Taipei : IEEE, 2007. P. 46–51. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2007.4460126>
12. Bluetooth Low Energy Tree Structure Network : Application Report SWRA648. Texas Instruments. 2019. URL: <https://www.ti.com/lit/an/swra648/swra648.pdf> (дата звернення: 21.12.2025).
13. Gomez C., Oller J., Paradells J. Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy: An Emerging Low-Power Wireless Technology. *Sensors*. 2012. Vol. 12, no. 9. P. 11734–11753. DOI: <https://doi.org/10.3390/s120911734>
14. LoRaWAN 1.0.3 Specification. LoRa Alliance. 2018. URL: https://lora-alliance.org/resource_hub/lorawan-specification/
15. Haxhibeqiri J., De Poorter E., Moerman I., Hoebeke J. A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application. *Sensors*. 2018. Vol. 18, no. 11. P. 3995. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18113995>

Sokolov O.V., Pavlovskiy O.M. JUSTIFICATION OF THE CHOICE OF WIRELESS COMMUNICATION TECHNOLOGY FOR CONTROLLING A GROUP OF GROUND-BASED MOBILE UNMANNED OBJECTS

The paper presents justification for the choice of wireless communication technology for controlling a group of ground-based mobile unmanned objects with variable communication topology and possible failures of the central node, which is critically important for logistics, monitoring, and search and rescue applications. Based on an analysis of publications devoted to communication organization and coordination in distributed robotic systems, the limitations of centralized approaches relying on a star topology are outlined, and the importance of fault-tolerant architectures is emphasized. The aim of the paper is to analyze the problem of fault tolerance in robotic systems and to provide a detailed presentation of a practical example of a

communication architecture based on a mesh network that addresses the issue of primary node failure. A review and comparison of wireless technologies were conducted to justify the choice of the transport layer. In addition, the architecture and configuration of a fault-tolerant system based on ZigBee/XBee operating in API mode are described in detail. Key mechanisms, such as multi-hop data transmission and automatic mode switching, are illustrated using prototypes based on small-sized wheeled platforms. An Arduino platform is used as the main control module together with an XBee S2C Shield. Within the conducted experiment, reliable multi-hop delivery of commands and data was demonstrated in the absence of direct line-of-sight to one of the routers. The experiment demonstrated reliable multi-hop delivery of commands/data in the absence of line-of-sight to one of the routers and correct automatic transition to autonomous node-to-node interaction after simulating a coordinator failure. It was concluded that the use of mesh architectures is an effective approach for building fault-tolerant control systems for groups of mobile ground-based unmanned objects, which is confirmed by the results of a practical example. Prospects for further research are outlined.

Keywords: *ground mobile robots, group of moving objects, group coordination, unmanned objects, ZigBee, XBee, mesh network, fault-tolerant control.*

Дата першого надходження статті до видання: 26.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026