

Розширення можливостей передачі даних у моделях оперативного керування та віддаленого контролю мобільних платформ з використанням Meshtastic

Ю. М. Молодожон¹, аспірант

ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-1881-9498>; e-mail: 4852185@stud.op.edu.ua

О. В. Стрельцов¹, кандидат технічних наук, доцент

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4691-5703>; e-mail: streltsov.o.v@op.edu.ua

Scopus Author ID: 57210373473

¹Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. У статті розглянуто актуальну проблему забезпечення стійкості систем оперативного керування та віддаленого контролю мобільних платформ у складних умовах міського середовища. Основним дестабілізуючим фактором визначено високу залежність сучасних телеметричних сервісів від централізованої інфраструктури (GSM/LTE) та супутникових навігаційних систем (GPS), які є вразливими до інфраструктурних перевантажень, засобів радіоелектронної боротьби, а також навмисного глушіння (jamming) та підміни координат (spoofing).

Наукова новизна роботи полягає у розвитку моделей багатоканальної передачі даних шляхом інтеграції децентралізованих mesh-мереж на базі технології LoRa (платформа Meshtastic) як резервного контуру зв'язку. На відміну від традиційних рішень, запропонований підхід дозволяє зберігати керованість об'єктами навіть за умов повної відсутності доступу до базових станцій мобільного зв'язку та недостовірності навігаційних даних. У межах дослідження формалізовано структурно-функціональну модель системи, де Meshtastic виступає проміжною ланкою для збору та ретрансляції критичної телеметрії між рухомими вузлами до моменту встановлення зв'язку з шлюзом або супутниковим сегментом (Starlink).

У роботі застосовано методи структурного аналізу та дискретно-подієвого імітаційного моделювання у середовищі Scilab. За результатами моделювання встановлено, що використання комбінованої архітектури забезпечує рівень доставлення телеметричних даних до 0,99 в умовах деградації основних каналів зв'язку.

Практична значущість результатів обумовлена можливістю впровадження запропонованих рішень у муніципальні системи керування транспортом (наприклад, логістика сміттєвозів або спецтехніки) для підвищення їхньої відмовостійкості в особливий період. Стаття доводить, що використання Meshtastic забезпечує необхідний рівень автономності та інформаційної безпеки, мінімізуючи ризики втрати контролю над мобільними активами у критичних ситуаціях.

Ключові слова: оперативне керування, мобільні платформи, Meshtastic, LoRamesh, GPS-снупінг, телеметрія, відмовостійкість, SmartCity.

Цитування статті: Молодожон Ю. М., Стрельцов О. В. (2026). Розширення можливостей передачі даних у моделях оперативного керування та віддаленого контролю мобільних платформ з використанням Meshtastic. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 46(122), с.82-92. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.46.122.2026.8>

Вступ

Сучасні системи оперативного керування та віддаленого контролю мобільних платформ у міському середовищі значною мірою залежать від централізованих телекомунікаційних і навігаційних сервісів, зокрема стільникових мереж та су-

путникових навігаційних систем (GPS) [1-3]. Такі рішення забезпечують належний рівень функціональності за штатних умов експлуатації, однак характеризуються обмеженою стійкістю в умовах інфраструктурного перевантаження, часткової деградації мережевих сегментів, впливу зовнішніх завад або примусового відключення.

© Молодожон Ю. М., Стрельцов О. В., 2026

Ця стаття відкритої доступу за ліцензією CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>)

Додатковим ризиком є навмисне глушіння (jamming) або спуфінг (spoofing) навігаційних сигналів, що призводить до формування некоректних координатних даних та втрати достовірності позиційної інформації. Аналогічні загрози характерні і для LPWAN-сегментів, що потребує врахування аспектів інформаційної безпеки при проектуванні резервних каналів [4].

Суттєвим фактором, що обумовлює необхідність використання резервних або альтернативних каналів зв'язку та позиціонування, є вразливість супутникових навігаційних систем до навмисних і ненавмисних перешкод, за умов низької доступності основних каналів зв'язку (GSM/LTE, NB-IoT) [5] та підвищеної потреби у довготривалому покритті та масштабованості телеметричних мереж, технологія InternetofThings розглядається як сукупність організаційних і протокольних рішень, що підтримують комунікацію M2M та автоматичну передачу даних між пристроями [6]. У сучасних концепціях SmartCityIoT розглядається як багаторівнева архітектура з підтримкою резервних каналів комунікації та адаптивного керування [7]. Теоретичні основи IoT передбачають інтеграцію розподілених пристроїв у єдину інформаційну екосистему, що формує методологічну базу запропонованої моделі багатоканальної передачі даних [8]. Втрата, спотворення або затримка навігаційних даних знижує точність визначення місцеположення мобільних платформ, ускладнює контроль маршрутів та негативно впливає на ефективність процесів оперативного керування, що безпосередньо пов'язано з предметною областю дисертаційного дослідження.

У зв'язку з цим актуальним є дослідження децентралізованих і автономних мереж обміну телеметричною інформацією, здатних функціонувати незалежно від GPS та базових станцій мобільного зв'язку. Такий підхід узгоджується з моделями оперативного керування та віддаленого контролю мобільних платформ, що розглядаються в дисертації, та передбачає формування ієрархічної системи резервування каналів зв'язку та продовжує тему, що була обговорена у попередній статті [1].

На нижньому рівні ієрархії доцільним є використання децентралізованих mesh-мереж на базі технології LoRa, зокрема платформи Meshtastic, які забезпечують автономний локальний обмін телеметричними повідомленнями між мобільними об'єктами без залучення централізованої інфраструктури [9]. Аналіз відмовостійких методів і технік у бездротових мережах вказує на критичну роль механізмів множинної маршрути-

зації, резервування та адаптивного вибору каналів у забезпеченні надійної передачі даних для інтелектуальних транспортних систем [10]. У разі необхідності агреговані дані з mesh-сегмента можуть передаватися до вищих рівнів системи.

Супутниковий сегмент (зокрема мережа Starlink) розглядається не як базовий, а як резервний канал зв'язку, який активується в умовах деградації, перевантаження або глушіння наземної GSM-інфраструктури. У такій конфігурації супутниковий канал забезпечує передачу телеметричних даних, отриманих із платформи Meshtastic або інших локальних джерел, до центрального вузла обробки, підтримуючи безперервність функціонування системи оперативного керування.

1 Мета та завдання дослідження

Метою даної роботи є розвиток організаційних аспектів моделей оперативного керування та віддаленого контролю мобільних платформ шляхом обґрунтування доцільності використання резервного децентралізованого каналу передачі телеметричних даних на основі mesh-мереж LoRa в умовах деградації традиційних каналів зв'язку та навігації.

Для досягнення поставленої мети у роботі сформульовано та вирішено такі основні завдання:

- проаналізувати існуючі архітектури передачі даних у системах оперативного керування мобільними платформами;
- визначити організаційні обмеження централізованих каналів зв'язку в умовах міського середовища та вплив факторів втрати або глушіння GPS;
- формалізувати місце резервного каналу передачі даних у структурно-функціональній моделі системи керування;
- здійснити порівняльний аналіз основного і резервного каналів передачі телеметричної інформації за критеріями надійності та автономності.

2 Аналіз існуючих архітектур передачі даних у системах керування мобільними платформами

У більшості сучасних систем віддаленого контролю мобільних об'єктів використовується централізована архітектура передачі даних, у якій кожна мобільна платформа здійснює обмін інформацією безпосередньо з центральним сервером через стільникову мережу. Такий підхід спрощує обробку даних і реалізацію управлінських рішень, проте формує єдину точку відмови

та підвищує залежність від зовнішньої інфраструктури [2, 3].

Порівняльний аналіз LPWAN-технологій (LoRa, NB-IoT, Sigfox) показує, що централізовані архітектури, зокрема NB-IoT, характеризуються високою енергоефективністю та глибокою інтеграцією з інфраструктурою операторів мобільного зв'язку, однак зберігають залежність від базових станцій та магістральних сегментів мережі. У той же час LoRa-підхід допускає як класичну LoRaWAN-архітектуру з центральним сервером, так і децентралізовані mesh-конфігурації, що підвищують автономність та стійкість системи в умовах деградації інфраструктури [14, 15].

У роботах, присвячених моделям оперативного керування та віддаленого контролю мобільних платформ, обґрунтовується доцільність використання багаторівневих архітектур збору, передачі та обробки телеметричних даних, що враховують динамічний характер міського середовища та обмеженість ресурсів мобільних об'єктів [7]. У таких моделях особлива увага приділяється організаційним складовим процесів керування, зокрема надійності каналів зв'язку та безперервності інформаційних потоків. Оглядові дослідження у сфері LPWAN також підкреслюють необхідність врахування питань масштабованості, енергоефективності та інтероперабельності при інтеграції низькопотужних радіотехнологій у багаторівневі IoT-архітектури міського типу [11].

Альтернативою жорстко централізованим рішенням є децентралізовані архітектури, що передбачають багатоточковий обмін даними між об'єктами системи. Ефективність застосування mesh-топологій у задачах міської інфраструктури та Smart City підтверджується дослідженнями, що демонструють їхню здатність забезпечувати масштабованість, самовідновлення та стійкість до відмов окремих вузлів у розподілених середовищах [12]. У таких рішеннях окремі вузли можуть виконувати роль ретрансляторів, забезпечуючи передачу телеметрії навіть за відсутності прямого зв'язку з центром. Практичні пілотні проекти Smart City із застосуванням LoRa підтверджують ефективність децентралізованих телеметричних рішень для міської інфраструктури [13]. Для задач оперативного керування мобільними платформами, що функціонують у динамічному міському середовищі, децентралізований підхід підвищує стійкість системи та знижує ризик повної втрати керуваності, що узгоджується з підходами, що розглядаються у в дисертаційному дослідженні.

На відміну від класичної LoRaWAN-моделі «зірка», у якій вузли передають дані виключно

до шлюзу, mesh-топологія дозволяє реалізувати багатохопову передачу між мобільними об'єктами, що підвищує імовірність доставлення пакетів у випадку локальної відмови окремих сегментів мережі. Ефективність мультихопових LoRa-архітектур підтверджена у дослідженнях, присвячених класифікації та аналізу LoRaWANMesh-рішень [9].

3 Моделі та методи дослідження

У межах даної роботи дослідження здійснюється на основі структурно-функціональної моделі системи оперативного керування та віддаленого контролю мобільних платформ, у якій мобільні об'єкти, засоби збору телеметричних даних, канали передачі інформації та центр прийняття рішень розглядаються як взаємопов'язані елементи єдиного контуру керування. Така модель дозволяє формалізувати інформаційні зв'язки між елементами системи та проаналізувати вплив деградації окремих компонентів на загальну працездатність.

Окрему увагу приділено моделі інформаційних потоків, у межах якої виділено основний та резервний канали передачі телеметричних повідомлень. Основний канал забезпечує регулярну передачу даних у штатних умовах функціонування, тоді як резервний канал розглядається як елемент моделі забезпечення безперервності інформаційного обміну в умовах зниження доступності стільникового зв'язку або втрати навігаційних даних.

У роботі застосовано методи структурного аналізу для декомпозиції системи керування на функціональні підсистеми, а також методи порівняльного аналізу для оцінювання характеристик різних каналів передачі даних за критеріями надійності, автономності та залежності від зовнішньої інфраструктури. Оцінювання відмовостійкості системи здійснюється на якісному рівні з урахуванням організаційних обмежень та умов експлуатації мобільних платформ у міському середовищі.

4 Meshtastic як клас mesh-рішень на базі LoRa

Meshtastic є програмно-апаратною платформою, що реалізує принципи самоорганізованих mesh-мереж із використанням радіоканалів LoRa. Ключовою особливістю таких мереж є можливість багатохопової передачі повідомлень між вузлами без необхідності централізованого керування або постійного підключення до глобальних мереж зв'язку.

На рис. 1 показано дві основні траєкторії передачі телеметричних даних мобільних платформ (сміттевозів). Нижня частина ілюструє стандартний канал передачі через GPS та GSM/LTE, де мобільні платформи передають координати та статусні дані безпосередньо на центральний сервер. Верхня частина відображає резервну архітектуру: дані з сенсорів зчитуються модулем Meshtastic/LoRa, встановленим на сміттевозі, який виступає шлюзом, і передаються через mesh-мережу. У схемі також присутній блок прийняття рішення щодо достовірності роботи GPS; у випадку виявлення глушіння або аномалій система може переключитися на резервний супутниковий канал Starlink. Передача інформації завершується на сервері керування з формуванням звітності та відображенням виконаних завдань у диспетчерській системі.



Рис. 1. Структурна схема відмінностей передачі телеметричних даних у системі оперативного керування мобільними платформами з використанням Meshtastic (LoRamesh) та стандартного каналу GPS.

Огляд мультихорових LoRa WAN-архітектур демонструє перспективність mesh-топологій для підвищення відмовостійкості розподілених телеметричних систем [9].

З точки зору систем оперативного керування мобільними платформами, Meshtastic доцільно розглядати не як заміну основних каналів

зв'язку, а як резервний або допоміжний механізм передачі обмежених обсягів телеметричних даних у час часткової деградації мережевих сегментів, впливу зовнішніх завад чи примусового відключення. Низьке енергоспоживання, значна дальність зв'язку та автономність роботи роблять такі мережі придатними для функціонування в умовах часткової або повної відмови традиційної інфраструктури.

Порівняльні дослідження LPWAN-технологій підтверджують, що LoRa забезпечує ефективне поєднання дальності, енергоефективності та масштабованості для міських IoT-систем. Зокрема, у порівняльному аналізі LPWAN-технологій показано [14], що LoRa характеризується вигідним співвідношенням між дальністю покриття, енергоспоживанням та вартістю розгортання, що робить її придатною для масштабних міських телеметричних систем із обмеженими ресурсами.

5 Розширення моделі віддаленого контролю за рахунок резервного каналу зв'язку

У межах моделей оперативного керування мобільними платформами, сформованих у дослідженні, використання Meshtastic може бути інтерпретоване як організаційне розширення контуру передачі даних без зміни базових принципів керування. За нормальних умов експлуатації обмін телеметриєю здійснюється через основні канали зв'язку (GSM/LTE, NB-IoT), тоді як mesh-мережа активується у разі зниження їх доступності або надійності [15].

У порівнянні з NB-IoT, який передбачає повну залежність від інфраструктури мобільного оператора, запропонована гібридна модель із використанням Meshtastic дозволяє реалізувати локальний обмін даними між мобільними платформами навіть за повної втрати зв'язку з мережею оператора. Подібні підходи до підвищення автономності IoT-систем у міських умовах розглядаються в роботах, присвячених практичним розгортанням LPWAN у SmartCity [13, 17].

Такий підхід дозволяє забезпечити передачу критично важливих повідомлень, зокрема статусу мобільної платформи, фактів виконання операцій або узагальненої інформації про переміщення, навіть за відсутності точних GPS-координат. З позицій організаційних складових моделей оперативного керування це підвищує прозорість та інформативність процесів, узгодженість рішень та зменшує залежність від єдиного централізованого джерела даних.

Графічне відображення вузлів Meshtastic та їхніх двосторонніх з'єднань надано на рис. 2.

Лінії між вузлами символізують можливі канали передачі даних у децентралізованій мережі.

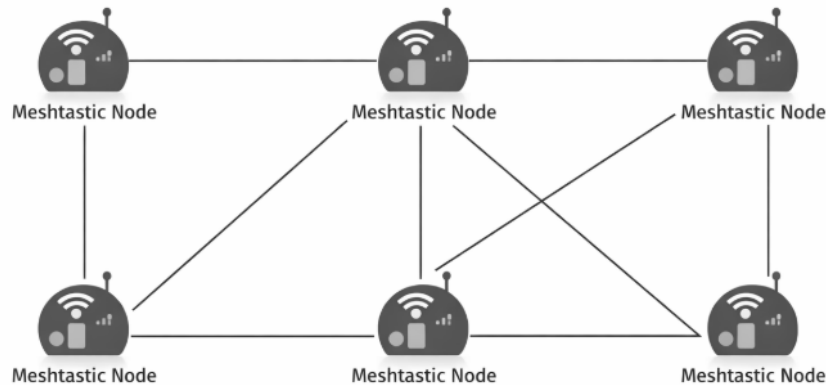


Рис. 2. Структура mesh-мережі Meshtastic у вигляді неорієнтованого графа

6 Методика проведення імітаційного моделювання

Для перевірки ефективності мультиканальної системи передачі телеметричних даних було проведено дискретно-подієве імітаційне моделювання руху мобільних платформ у міському середовищі.

6.1 Модель мобільної платформи

Мобільна платформа (смітєвез) у момент часу t описується вектором телеметричних даних:

$$P_t = (x_t, y_t, v_t, \tau_t),$$

де x_t, y_t - координати;
 v_t - швидкість;
 τ_t - час зчитування даних.

6.2 Модель каналів зв'язку

• **Основний канал (GSM/GPS):** Використовується, якщо GPS достовірний ($\delta_t=1$) та GSM доступний ($S_t=1$).

$$P_t \xrightarrow{\frac{\text{GSM}}{\text{GPS}}} \text{Центр керування, якщо } \delta_t \cdot S_t = 1$$

• **Резервний канал (Meshtastic/LoRa):**

$$P_t \xrightarrow{\text{LoRa mesh}} V_i \xrightarrow{\text{шлюз}} \text{Центр керування, активується якщо } \delta_t = 0 \text{ або } S_t = 0$$

Мережа Meshtastic представлена графом

$$G = (V, E),$$

де V - вузли;
 E - LoRa-з'єднання.

Передача через mesh-мережу описується рівнянням:

$$T_{\text{mesh}} = \sum_{i=1}^k \tau_i,$$

де k - кількість хопів до шлюзу.

• **Супутниковий канал (Starlink):** Використовується при недоступності GSM та недостовірності GPS:

$$P_t \xrightarrow{\text{Starlink}} \text{Центр керування, якщо } \delta_t = 0 \text{ та } S_t = 0$$

Час доставки визначається як:

$$T_{SL} = \tau_{\text{startlink}} + \frac{|P_t|}{B_{SL}},$$

де $\tau_{\text{startlink}}$ - затримка ініціалізації супутникового каналу передачі даних (час встановлення з'єднання та синхронізації);

B_{SL} - ефективна пропускна здатність супутникового каналу (біт/с);

$|P_t|$ - обсяг телеметричного пакета в момент часу t .

Параметр $\tau_{\text{startlink}}$ враховує часові витрати на встановлення сеансу зв'язку та початкову маршрутизацію даних через супутниковий сегмент, тоді як B_{SL} відображає доступну швидкість передачі інформації з урахуванням реальних умов мережі.

6.3 Індикатор достовірності GPS

Достовірність навігаційних даних перевіряється функцією:

$$\delta_t = \begin{cases} 1, & \text{якщо наданий GPS достовірний,} \\ 0, & \text{якщо GPS відсутній або спуфінг.} \end{cases}$$

На Рис.3 продемонстровано ефект «стрибка» координат, характерний інтенсивного радіоелектронного впливу. У той час як мобільна платформа фактично знаходиться в міському секторі (Україна), навігаційний приймач формує хибний вектор, що переносить позицію, що відображається на значну відстань (в Південну Америку).

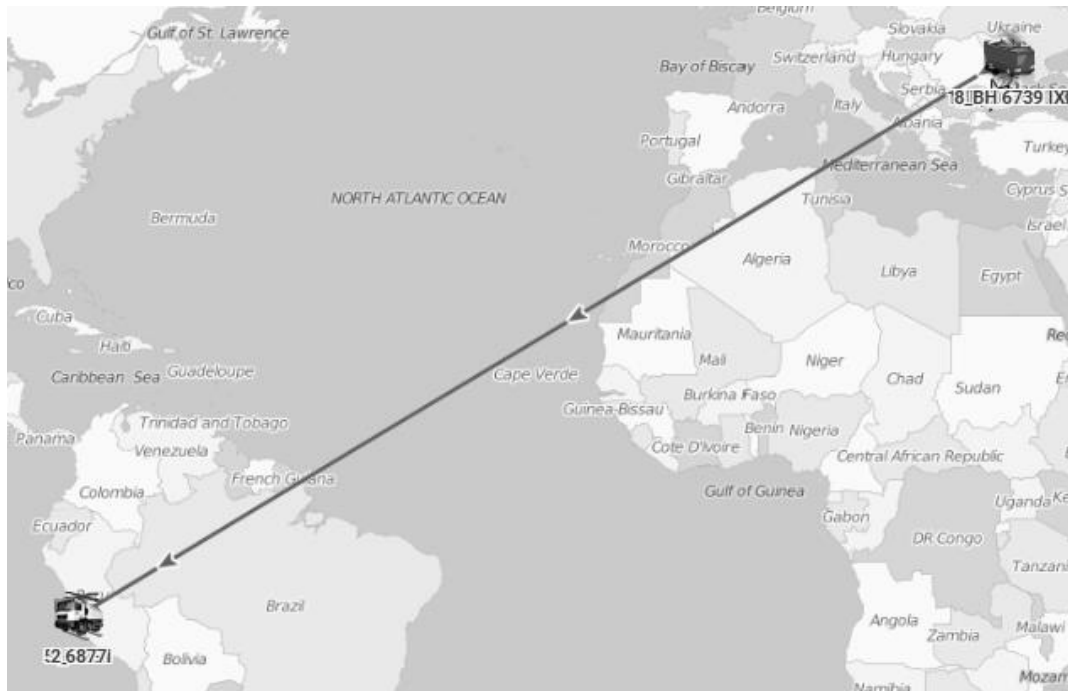


Рис. 3 - Приклад критичного спотворення навігаційних даних (спуфінгу), у якому розрахункове становище мобільної платформи відображається поза фактичного регіону експлуатації.

Це унеможливує використання основного каналу GPS для оперативного керування і вимагає негайного перемикання на резервний канал Meshtastic для отримання коректних телеметричних даних від локальних датчиків.

Подібні ситуації можуть виникати не лише внаслідок навмисного спуфінгу, але й у результаті часткової деградації навігаційного сигналу або помилок визначення координат.

Рис. 4 ілюструє ситуацію, коли через щільну

забудову або роботу засобів РЕБ координати GPS починають відображатися з великою похибкою або дрейфом (кругові зони). Ламані лінії показують некоректно реконструйований маршрут, який не збігається із реальною дорожньою мережею. У цій моделі система ідентифікує параметр достовірності і переходить до оцінки положення за моделлю середньої швидкості та даними з mesh-мережі Meshtastic, що дозволяє відновити реальний трек руху платформи.



Рис. 4 Деградація точності позиціонування, що призводить до розходження між реальною траєкторією та даними GPS.

6.4 Відновлення положення за відсутності GPS

Якщо $\delta_t=0$ (відсутній актуальний GPS-сигнал у момент часу t), положення мобільної платформи оцінюється за моделлю середньої швидкості та останнього достовірного виміру координат:

$$\hat{L}_t = L_{t_0} + v_t \cdot (t - t_0),$$

де \hat{L}_t - оцінене (прогнозоване) положення мобільної платформи;

L_{t_0} - останнє достовірно зафіксоване положення у момент часу t_0 ;

v_t - середня швидкість руху платформи на інтервалі спостереження;

$(t-t_0)$ - інтервал часу з моменту втрати GPS-сигналу;

δ_t - індикатор наявності актуального GPS-виміру (1 - сигнал наявний, 0 - сигнал відсутній).

Запропонована модель використовується для короткочасної оцінки координат у періоди втрати навігаційного сигналу. Такий підхід дозволяє зберігати безперервність інформаційного потоку в системі оперативного керування та мінімізувати втрату контексту маршруту до моменту відновлення GPS-позиціонування.

Слід зазначити, що точність оцінки положення залежить від стабільності швидкісного режиму та тривалості відсутності сигналу. У разі тривалого періоду без GPS доцільним є використання додаткових телеметричних параметрів (напрям руху, інерційні дані, інформація від суміжних вузлів mesh-мережі) для корекції прогнозу.

6.5 Логіка вибору каналу

Вибір каналу передачі реалізується через логічний блок:

$$\text{Канал}(P_t) = \begin{cases} \text{GSM/GPS}, \delta_t \cdot S_t = 1 \\ \text{Meshtastic}, \delta_t = 0 \text{ або } S_t = 0 \\ \text{Starlink}^*, \delta_t = 0 \text{ та } S_t = 0, \end{cases}$$

Starlink * - коли шлюз Meshtastic недоступний

6.6. Метрики оцінки ефективності

- **Відсоток доставлених пакетів:**

$$\eta = \frac{N_{\text{згенеровано}}}{N_{\text{доставлено}}} \cdot 100\%$$

- **Затримка доставки:**

$$T_{\text{доставки}} = T_{\text{канал}} + T_{\text{обробка}}$$

- **Логічна узгодженість координат:** порівняння фактичної траєкторії з реконструйованою

за допомогою Meshtastic та Starlink.

7 Методика моделювання

Імітаційне моделювання роботи системи передачі телеметричних даних виконувалося у середовищі Scilab. Метою моделювання було оцінити стійкість передачі даних у системі з резервуванням каналів зв'язку (GSM, mesh-мережа на базі LoRa та супутниковий канал).

У моделі кожна мобільна платформа періодично формувала телеметричний пакет, який передавався через доступний канал зв'язку за принципом пріоритетності: спочатку GSM, у разі його недоступності - mesh-мережа, а як резерв - супутниковий канал.

Для кожного каналу враховувалася ймовірність тимчасової недоступності. Час передачі пакета через супутниковий канал визначався з урахуванням затримки встановлення з'єднання та швидкості передачі даних.

Моделювання проводилося для заданої кількості мобільних платформ протягом визначеного інтервалу часу. Для отримання надійних результатів виконано багаторазові прогони моделі. Основним показником оцінювання обрано частку успішно доставлених пакетів.

8 Проведення симуляцій

Моделювання виконувалося у середовищі Scilab із використанням дискретно-подієвого підходу з кроком Δt . У межах експериментальних сценаріїв варіювалися такі параметри:

- щільність вузлів mesh-мережі;
- швидкість руху мобільних платформ;
- ймовірність тимчасової недоступності GSM-каналу;
- імовірність втрати або деградації GPS-сигналу.

Для підвищення достовірності результатів виконано багаторазові прогони моделі з різними початковими умовами. Оцінювання ефективності системи здійснювалося за показником частки успішно доставлених телеметричних пакетів.

Отримані результати свідчать, що запропонована комбінована архітектура, яка базується на використанні mesh-мережі (Meshtastic) та супутникового резервування (Starlink), забезпечує високий рівень надійності зв'язку. Зокрема, у більшості змодельованих сценаріїв, включаючи умови тривалого відключення GSM-каналу та відсутності GPS-сигналу, рівень доставлення даних досягає 0,99. За результатами 100 прогонів моделі середнє значення частки доставлених пакетів склало $0,987 \pm 0,006$.

Встановлено, що щільність вузлів істотно впливає на показники надійності та пропускної здатності LoRaWAN-мережі, що узгоджується з результатами досліджень масштабованості, у яких доведено залежність коефіцієнта доставлення пакетів від щільності розміщення вузлів та інтенсивності трафіку [16].

9 Обговорення результатів та перспективи подальших досліджень

Запропонований підхід до використання Meshtastic як резервного каналу зв'язку не суперечить існуючим моделям оперативного керування, а доповнює їх з позицій надійності та відмовостійкості. Водночас доцільність впровадження таких рішень залежить від характеру задач, щільності мобільних об'єктів та вимог до обсягу переданих даних. Емпіричні дослідження реальних розгортань LPWAN підтверджують доцільність комбінування LoRaWAN з альтернативними каналами зв'язку для підвищення стабільності міських IoT-систем [17].

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на формалізацію умов ефективного використання mesh-мереж у складі гібридних комунікаційних архітектур, а також на інтеграцію таких рішень у загальні моделі оперативного керування мобільними платформами, що функціонують у міському середовищі з обмеженими ресурсами.

Висновки

У статті розглянуто можливість розширення моделей оперативного керування та віддаленого контролю мобільних платформ за рахунок використання Meshtastic як резервного каналу передачі даних. Показано, що децентралізовані mesh-мережі на базі LoRa можуть підвищити стійкість систем керування в умовах деградації стільникового зв'язку та глушення GPS, що безпосередньо корелює з тематикою дисертаційного дослідження.

Запропонований підхід до використання Meshtastic як резервного каналу зв'язку не суперечить існуючим моделям оперативного керування, а доповнює їх з позицій надійності та відмовостійкості.

Окремої уваги потребує ситуація періодичної відсутності або деградації актуального GPS-сигналу, що характерно умов інтенсивного радіоелектронного впливу, та для щільної міської забудови, тунелів, навмисного чи ненавмисного радіоелектронного впливу. У таких випадках використання децентралізованої mesh-мережі на

базі LoRa (Meshtastic) залишається реальною можливістю отримання інформації з маршрутів мобільних платформ, зокрема через передачу останніх відомих координат, службових телеметричних параметрів та міжвузловий обмін даними.

Для міських мобільних платформ при частій втраті GPS дані Meshtastic можуть використовуватись для корекції траєкторій при інтеграції з централізованою диспетчерською системою.»

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на формалізацію умов ефективного використання mesh-мереж у складі гібридних комунікаційних архітектур, а також на отримання додаткової інформації від мобільних платформ, завдяки інтеграції таких рішень у загальні моделі оперативного керування мобільними платформами, що функціонують у міському середовищі з обмеженими ресурсами.

Конфлікти інтересів

Автори цієї статті не мають конфлікту інтересів під час її написання. Немає жодних фінансових, особистих чи інших питань, які могли б вплинути на чесність цієї статті. Стаття є повністю власною роботою дослідника, не була скопійована з жодних інших джерел і ніколи не надсилалася до жодної іншої публікації для розгляду.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Усі дані доступні в числовій або графічній формі в основному тексті дослідження.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони використовували технології штучного інтелекту для пошуку та огляду загальнодоступної інформації. Водночас, остаточний аналіз наукового дослідження, висновки та написання тексту, цієї статті є виключними результатами роботи авторів.

Внесок авторів

Стрельцов О. В.: наукове консультування, рецензування та редагування текстів;
Молодожон Ю. М.: концептуалізація, написання тексту – оригінальний, чернетка, редагування.

Список використаної літератури

1. Молодожон, Ю. М., Ситніков, В. С. та Водічев, В. А. (2025). Моделі та методи оперативного керування та дистанційного моніторингу мобільних платформ. *ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ ТА КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ*, (44(120)), с. 29–41. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.44.120.2025.4>.
2. Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. and Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38(4), pp.393–422. doi:[https://doi.org/10.1016/s1389-1286\(01\)00302-4](https://doi.org/10.1016/s1389-1286(01)00302-4).
3. Perkins, C., Belding-Royer, E. and Das, S. (2003). *Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing*. [online] Available at: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc3561> [Accessed 07 May 2026].
4. Goulart, A., Chennamaneni, A., Torre, D., Hur, B. and Al-Aboosi, F. Y. (2022). On Wide-Area IoT Networks, Lightweight Security and Their Applications—A Practical Review. *Electronics*, 11(11), p.1762. doi:<https://doi.org/10.3390/electronics11111762>.
5. József Orbán (2025). Overview of GNSS Interference Risks in Transport Safety and Resilient Responses. [online] pp.42–42. doi:<https://doi.org/10.3390/engproc2025113042>.
6. Atzori, L., Iera, A. and Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A Survey. *Computer Networks*, 54(15), pp.2787–2805. doi:<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>.
7. Bellini, P., Nesi, P. and Pantaleo, G. (2022). IoT-Enabled Smart Cities: A Review of Concepts, Frameworks and Key Technologies. *Applied Sciences*, [online] 12(3), p.1607. doi:<https://doi.org/10.3390/app12031607>.
8. Li, S., Xu, L. D. and Zhao, S. (2014). The internet of things: a survey. *Information Systems Frontiers*, 17(2), pp.243–259. doi:<https://doi.org/10.1007/s10796-014-9492-7>.
9. Cotrim, J. R. and Kleinschmidt, J. H. (2020). LoRaWAN Mesh Networks: A Review and Classification of Multihop Communication. *Sensors*, 20(15), p.4273. doi:<https://doi.org/10.3390/s20154273>.
10. Almeida, J., Rufino, J., Alam, M. and Ferreira, J. (2019). A Survey on Fault Tolerance Techniques for Wireless Vehicular Networks. *Electronics*, 8(11), p.1358. doi:<https://doi.org/10.3390/electronics8111358>.
11. Qadir, Q. M., Rashid, T. A., Al-Salihi, Nawzad K., Ismael, B., Kist, A. A. and Zhang, Z. (2020). Low Power Wide Area Networks: A Survey of Enabling Technologies, Applications and Interoperability Needs. arXiv (Cornell University). doi:<https://doi.org/10.48550/arxiv.2008.08639>.
12. Morabito, R., Riccardo Petrolo, Loscri, V. and Mitton, N. (2019). Reprint of : LEGIoT: A Lightweight Edge Gateway for the Internet of Things. 92, pp.1157–1171. doi:<https://doi.org/10.1016/j.future.2018.10.020>.
13. Pasolini, G., Buratti, C., Feltrin, L., Zabini, F., De Castro, C., Verdone, R. and Andrisano, O. (2018). Smart City Pilot Projects Using LoRa and IEEE802.15.4 Technologies. *Sensors*, 18(4), p.1118. doi:<https://doi.org/10.3390/s18041118>.
14. Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F. and Meyer, F. (2019). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*, [online] 5(1), pp.1–7. doi:<https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005>.
15. Sinha, R. S., Wei, Y. and Hwang, S.-H. (2017). A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. *ICT Express*, [online] 3(1), pp.14–21. doi:<https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.03.004>.
16. Foures, D., Albert, V. and Nketsa, A. (2016). A new specification-based qualitative metric for simulation model validity. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 66, pp.1–15. doi:<https://doi.org/10.1016/j.simpat.2016.03.002>.
17. Orlovs, D., Rusins, A., Skrastiņš, V. and Judvaitis, J. (2025). LPWAN Technologies for IoT: Real-World Deployment Performance and Practical Comparison. *IoT*, [online] 6(4), p.77. doi:<https://doi.org/10.3390/iot6040077>.

References

1. Molodozhon, Y. M., Sytnikov, V. S. and Vodichev, V. A. (2025). Models and Methods of Operational Control and Remote Monitoring of Mobile Platforms. *ELECTROTECHNIC AND COMPUTER SYSTEMS*, (44(120)), pp.29–41. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.44.120.2025.4>.
2. Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. and Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38(4), pp.393–422. doi:[https://doi.org/10.1016/s1389-1286\(01\)00302-4](https://doi.org/10.1016/s1389-1286(01)00302-4).
3. Perkins, C., Belding-Royer, E. and Das, S. (2003). *Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing*. [online] Available at: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc3561> [Accessed 07 May 2026].

4. Goulart, A., Chennamaneni, A., Torre, D., Hur, B. and Al-Aboosi, F. Y. (2022). On Wide-Area IoT Networks, Lightweight Security and Their Applications—A Practical Review. *Electronics*, 11(11), p.1762. doi:<https://doi.org/10.3390/electronics11111762>.
5. József Orbán (2025). Overview of GNSS Interference Risks in Transport Safety and Resilient Responses. [online] pp.42–42. doi:<https://doi.org/10.3390/engproc2025113042>.
6. Atzori, L., Iera, A. and Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A Survey. *Computer Networks*, 54(15), pp.2787–2805. doi:<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>.
7. Bellini, P., Nesi, P. and Pantaleo, G. (2022). IoT-Enabled Smart Cities: A Review of Concepts, Frameworks and Key Technologies. *Applied Sciences*, [online] 12(3), p.1607. doi:<https://doi.org/10.3390/app12031607>.
8. Li, S., Xu, L. D. and Zhao, S. (2014). The internet of things: a survey. *Information Systems Frontiers*, 17(2), pp.243–259. doi:<https://doi.org/10.1007/s10796-014-9492-7>.
9. Cotrim, J. R. and Kleinschmidt, J. H. (2020). LoRaWAN Mesh Networks: A Review and Classification of Multihop Communication. *Sensors*, 20(15), p.4273. doi:<https://doi.org/10.3390/s20154273>.
10. Almeida, J., Rufino, J., Alam, M. and Ferreira, J. (2019). A Survey on Fault Tolerance Techniques for Wireless Vehicular Networks. *Electronics*, 8(11), p.1358. doi:<https://doi.org/10.3390/electronics8111358>.
11. Qadir, Q. M., Rashid, T. A., Al-Salihi, Nawzad K., Ismael, B., Kist, A. A. and Zhang, Z. (2020). Low Power Wide Area Networks: A Survey of Enabling Technologies, Applications and Interoperability Needs. arXiv (Cornell University). doi:<https://doi.org/10.48550/arxiv.2008.08639>.
12. Morabito, R., Riccardo Petrolo, Loscri, V. and Mitton, N. (2019). Reprint of : LEGIoT: A Lightweight Edge Gateway for the Internet of Things. 92, pp.1157–1171. doi:<https://doi.org/10.1016/j.future.2018.10.020>.
13. Pasolini, G., Buratti, C., Feltrin, L., Zabini, F., De Castro, C., Verdone, R. and Andrisano, O. (2018). Smart City Pilot Projects Using LoRa and IEEE802.15.4 Technologies. *Sensors*, 18(4), p.1118. doi:<https://doi.org/10.3390/s18041118>.
14. Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F. and Meyer, F. (2019). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*, [online] 5(1), pp.1–7. doi:<https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005>.
15. Sinha, R. S., Wei, Y. and Hwang, S.-H. (2017). A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. *ICT Express*, [online] 3(1), pp.14–21. doi:<https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.03.004>.
16. Foures, D., Albert, V. and Nketsa, A. (2016). A new specification-based qualitative metric for simulation model validity. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 66, pp.1–15. doi:<https://doi.org/10.1016/j.simpat.2016.03.002>.
17. Orlovs, D., Rusins, A., Skrastiņš, V. and Judvaitis, J. (2025). LPWAN Technologies for IoT: Real-World Deployment Performance and Practical Comparison. *IoT*, [online] 6(4), p.77. doi:<https://doi.org/10.3390/iot6040077>.

Отримано (Received) 28.04.2026

Отримано після доопрацювання (Received after revision) 05.05.2026

Прийнято (Accepted) 07.05.2026

Опубліковано (Published) 31.05.2026

Expanding the Capabilities of Data Transfer in Models of Operational Servicing and Remote Control of Mobile Platforms with Meshtastic

Yurii Molodozhon ¹, Postgraduate Student

ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-1881-9498>; e-mail: 4852185@stud.op.edu.ua

Oleh Streltsov ¹, Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4691-5703>; e-mail: streltsov.o.v@op.edu.ua;

Scopus Author ID: 57210373473

¹ Odesa Polytechnic National University

Abstract. *The article is devoted to the problem of ensuring the stability of operational control and remote monitoring systems for mobile platforms operating in complex urban environments. A critical destabilizing factor is the strong dependence of modern telemetry services on centralized communication infrastructure (GSM/LTE) and satellite navigation systems (GPS), which are vulnerable to overload, electronic interference, deliberate jamming, and spoofing.*

The scientific novelty of the research lies in the development of a multi-channel data transmission model through the integration of decentralized LoRa-based mesh networks (implemented via the Meshtastic platform) as a backup communication layer. Unlike conventional architectures, the proposed approach enables the preservation of system controllability under conditions of complete unavailability of cellular infrastructure and degradation of navigation signals. Within the framework of the study, a structural and functional model of the system was formalized, where the mesh subsystem acts as an intermediate layer for collecting and relaying critical telemetry between mobile nodes until connectivity with a gateway or satellite segment (e.g., Starlink) is restored.

The study employs methods of structural analysis and discrete-event simulation modeling in the Scilab Environment. Simulation results demonstrate that the combined architecture ensures a telemetry data delivery rate of up to 0.99 under conditions of primary communication channel degradation.

The practical significance of the results lies in the possibility of implementing the proposed architecture in municipal transport management systems, such as waste collection logistics and special-purpose vehicle coordination, to enhance fault tolerance during emergency and infrastructure disruption scenarios. The results obtained confirm that the integration of a LoRa-based mesh subsystem provides the required level of autonomy and communication resilience, minimizing the risk of losing operational control over mobile assets in critical situations.

Key words: *operational connectivity, mobile platforms, Meshtastic, LoRa mesh, GPS spoofing, telemetry, fault tolerance, Smart City.*

Article citation: Molodozhon Y. M, Streltsov O. V. (2026). Expanding the Capabilities of Data Transfer in Models of Operational Servicing and Remote Control of Mobile Platforms with Meshtastic. *Electrotechnic and Computer Systems*, 2026, 46(122), pp.82-92. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.46.122.2026.8>

Про авторів (About the authors)



Молодожон Юрій Михайлович, аспірант кафедри комп'ютерних систем, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E-mail: 4852185@stud.op.edu.ua; тел.: +380 67 4852185

Yurii Molodozhon, postgraduate student of the Department of Computer Systems, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine.
E-mail: 4852185@stud.op.edu.ua; ph.: +380 67 485 2185

ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-1881-9498>



Стрельцов Олег Васильович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса, Україна.
E-mail: streltsov.o.v@op.edu.ua, тел. +38-067-773-2156

Oleh Streltsov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Computer Systems Department, Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave., Odesa, Ukraine.
E-mail: streltsov.o.v@op.edu.ua; ph. +38-067-773-2156

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4691-5703>; Scopus Author ID: 57210373473