



Прийнято 16.12.2025. Прорецензовано 23.12.2025. Опубліковано 29.12.2025.

УДК 004.75:004.934

DOI: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-121-129

ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ГОЛОСОВОГО ЗВ'ЯЗКУ В ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ MESH-МЕРЕЖАХ

Тогоєв О. Р. *

Доктор філософії, старший викладач
Чорноморський національний університет імені Петра Могили
54003, вул. 68 Десантників, 10, м. Миколаїв, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-3465-7767>
e-mail: oleksii.tohoiev@chmnu.edu.ua

Пузирьов С. В.

Кандидат фіз.- мат. наук, доцент
Чорноморський національний університет імені Петра Могили
54003, вул. 68 Десантників, 10, м. Миколаїв, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-0520-1496>
e-mail: svpuzyrev@gmail.com

Гаврилко С. М.

Кандидат юридичних наук, старший викладач кафедри ІТ
Університет Короля Данила
76018, м. Івано-Франківськ, вул. Коновальця, 35, Україна
<https://orcid.org/0009-0007-7811-5982>
e-mail: serhii.m.havrylko@ukd.edu.ua

Жуланов М. О.

Студент
Чорноморський національний університет імені Петра Могили
54003, вул. 68 Десантників, 10, м. Миколаїв, Україна
<https://orcid.org/0009-0009-6302-111X>
e-mail: maxim.zhulanov@gmail.com

Анотація. У статті представлено програмно-апаратний комплекс для організації голосового зв'язку в умовах децентралізованої багатонодової mesh-мережі, створений з використанням модулів Arduino Nano, ESP8266 та трансивера RFM95 на базі технології LoRa. Досліджено особливості функціонування mesh-топологій, зокрема чинники, що впливають на якість передавання голосу, такі як затримки, стабільність маршруту, кількість проміжних вузлів та рівень сигналу між ними. Проаналізовано сучасні рішення для децентралізованого

Запропоноване посилання: Тогоєв, О. Р., Пузирьов, С. В., Гаврилко, С. М. & Жуланов, М. О. (2025). Програмно-апаратний комплекс для організації голосового зв'язку в децентралізованих mesh-мережах. *Методи та прилади контролю якості*, 2(55), 121-129. doi: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-121-129

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

зв'язку й визначено їхні обмеження щодо забезпечення голосової комунікації в реальному часі, що підкреслює необхідність розробки спеціалізованої архітектури. Розроблено програмне забезпечення, що реалізує маршрутизацію, обробку голосових пакетів, керування передачею даних і відображення топології через вебінтерфейс та MQTT. Створено прототипи вузлів і шлюзу, які забезпечують стабільну передачу даних у багатоповій мережі. Експериментальні дослідження підтвердили працездатність комплексу, прийнятні затримки, стійкість до змін топології та можливість підтримки голосового зв'язку на дистанціях до 200 метрів. Запропоноване рішення демонструє можливість побудови автономних систем голосової комунікації для умов обмеженої інфраструктури та може слугувати основою для подальшої оптимізації та масштабування mesh-мереж.

Ключові слова: mesh-мережа, протокол маршрутизації, периферійний інтерфейс, мікроконтролер, трансвер.

Вступ

У сучасних умовах нестабільності інфраструктури зростає потреба у децентралізованих системах зв'язку, здатних забезпечувати стійку передачу інформації без доступу до центральних вузлів. Традиційні технології голосового зв'язку (мобільні мережі, VoIP, радіостанції тощо) мають обмеження щодо покриття, енергоспоживання, надійності та залежності від централізованих систем керування.

Mesh-мережі здатні усунути ці недоліки за рахунок самоорганізації та самовідновлення, проте існуючі реалізації переважно оптимізовані до передачі даних, а не голосу в реальному часі [1].

Висока затримка, варіативність маршруту, залежність якості від кількості хопів і відсутність апаратно-програмних комплексів, спеціально адаптованих під голосовий трафік, створюють науково-практичну проблему, що потребує вирішення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У сучасних публікаціях значна увага приділяється архітектурам бездротових mesh-мереж, протоколам маршрутизації (OLSR [1], AODV [2], DSR [3]), питанням самоорганізації та адаптації до змін топології. Дослідження зосереджуються на властивостях WMN (Wireless Mesh Network), енергоефективності, мультиканальності, надійності доставки та оптимізації маршрутів. Значний обсяг робіт присвячено використанню LoRa-технологій [4] і WiFi-модулів у малопотужних мережах [7], а також оцінюванню можливостей децентралізованих рішень [8], таких як OpenMesh,

goTenna Mesh, FireChat і Commotion Wireless.

Водночас аналіз джерел показує, що питання передачі голосового трафіку у WMN розкрито недостатньо: більшість моделей орієнтовані на пакетний трафік IoT-систем [9], а не на низьколатентні голосові потоки [10]. Відсутній комплексний підхід, що одночасно охоплює апаратну частину, мережеві протоколи та програмні алгоритми, що забезпечують стабільний голосовий зв'язок у динамічних багатопових мережах.

Отже, існує достатня наукова база в сфері mesh-мереж [5], маршрутизації, балансування каналів і стабільності передачі даних, але бракує цілісних рішень, які адаптовані під голосовий трафік з урахуванням практичних обмежень (енергоефективність, простота вузлів, стабільність маршруту, latency).

Формулювання цілей статті

З огляду на виявлені проблеми та аналіз наукових публікацій, визначено такі завдання дослідження:

1. Дослідити особливості функціонування mesh-мереж, їх здатність підтримувати голосовий трафік, а також чинники, що впливають на якість голосу в умовах багатопової маршрутизації.

2. Проаналізувати існуючі рішення для децентралізованого зв'язку та визначити їх обмеження щодо забезпечення голосової комунікації в реальному часі.

3. Обґрунтувати вибір апаратних модулів (ESP8266, RFM95, Arduino Nano) для побудови програмно-апаратного комплексу та сформулювати вимоги до його архітектури.

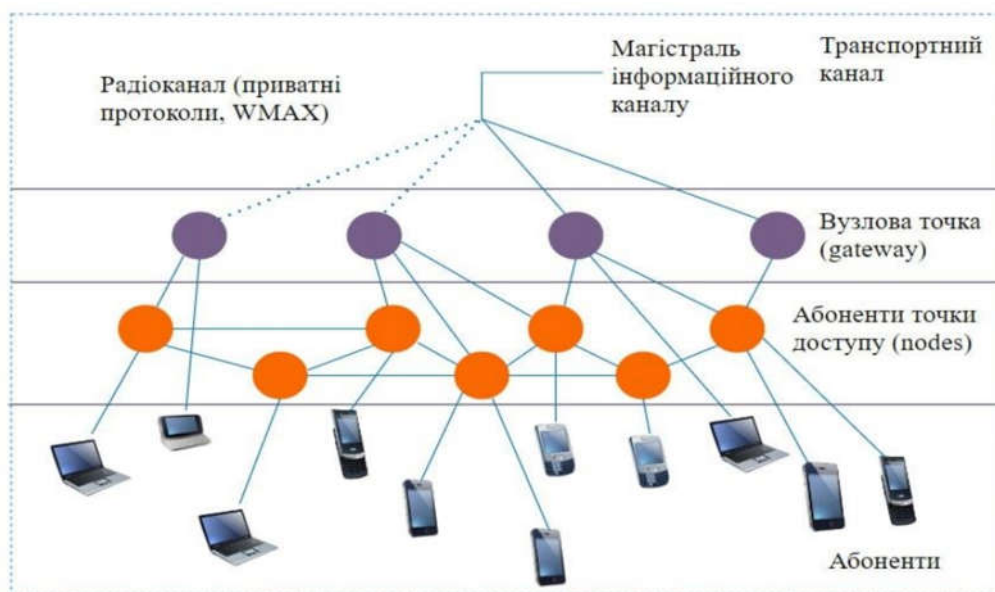


Рисунок 1 – Структурна схема типової Mesh-мережі

4. Розробити програмне забезпечення для керування маршрутизацією, обробкою голосових пакетів, зв'язком між вузлами та візуалізацією топології мережі.

5. Створити прототип вузлів mesh-мережі та мережевого шлюзу, що забезпечує передачу голосу.

6. Провести експериментальні дослідження роботи комплексу: визначити затримки, стабільність маршруту, якість голосу та стійкість мережі до змін топології.

7. Сформулювати рекомендації щодо оптимізації і масштабування розробленої системи.

Основний текст статті

Приклад типової Mesh-мережі наведено на рис. 1.

Функціонування децентралізованих бездротових mesh-мереж ґрунтується на здатності кожного вузла одночасно виконувати роль передавача, приймача та ретранслятора даних, що забезпечує багатохопову маршрутизацію та відмовостійкість топології. Аналіз особливостей такої архітектури свідчить, що підтримка голосового трафіку піднімає вимоги до стабільності маршруту, швидкості перебудови мережі та затримок. На якість голосової комунікації впливають такі чинники, як кількість проміжних хопів, рівень сигналу між вузлами, завантаження каналу, швидкість по-

вторного вибору маршруту та можливість локальної обробки пакетів. У мережах LoRa, які забезпечують значну дальність зв'язку, пропускна здатність є обмеженою, однак стабільність каналу та висока чутливість приймача компенсують ці недоліки в децентралізованих умовах.

У безперервному режимі прийому даних трансивер постійно шукає преамбулу та сигнали синхронізації, не зупиняючись (рис. 2). Цей режим використовується, коли потрібно постійно моніторити канал для отримання пакетів, наприклад, у випадку радіостанцій, які працюють у пожежній охороні або медичному обладнанні. У цьому режимі пакети приймаються без переривання, тому корисне навантаження потрібно витягувати з FIFO буфера засобами програми.

При цьому реєстри конфігурації не можна змінювати, поки трансивер знаходиться в цьому режимі, і переривання викликаються лише у випадку отримання пакету з правильним CRC. Цей режим потребує більшої кількості енергії, оскільки модем постійно перебуває в режимі прийому.

Порівняння з існуючими рішеннями демонструє, що поширені системи децентралізованого зв'язку орієнтовані переважно на передачу текстових або невеликих даних і не забезпечують необхідної якості роботи для голосових потоків у реальному

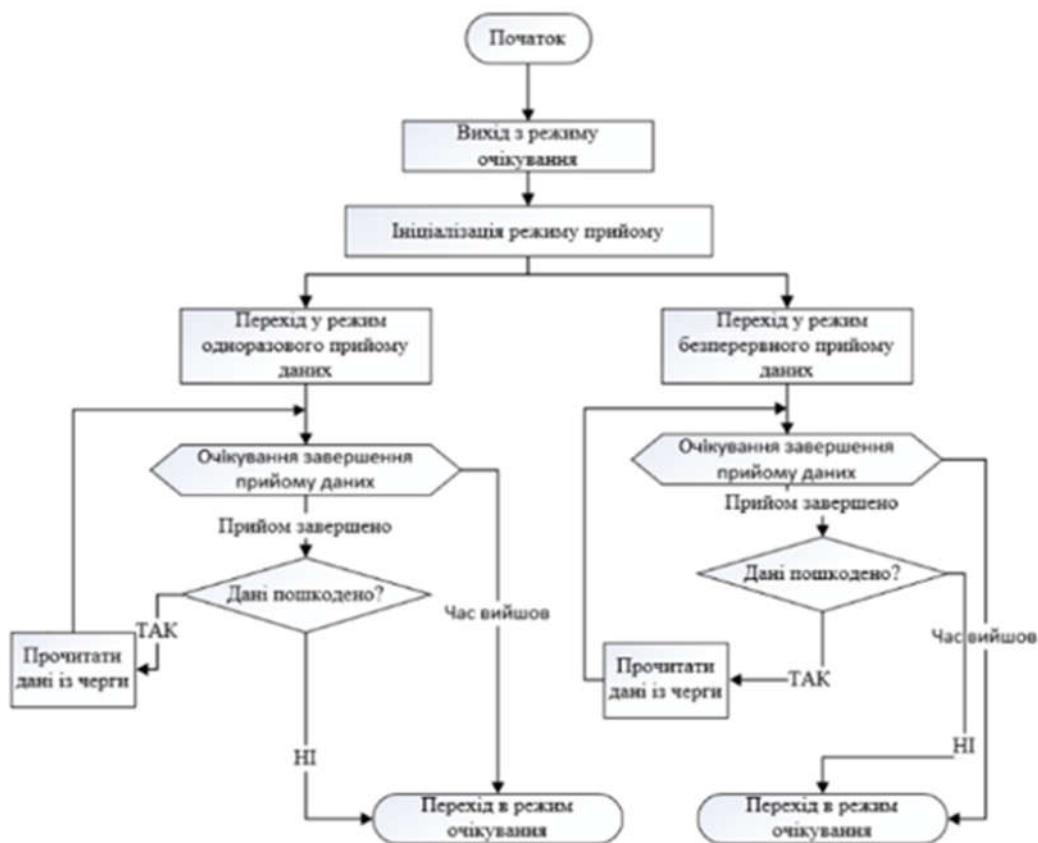


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритму прийому пакету в LoRa

часі. Їх обмеження стосуються недостатньої пропускну здатності, нестабільності маршрутизації при збільшенні кількості вузлів, високих затримок, а також відсутності апаратних рішень, які б враховували специфіку голосових пакетів. Таким чином, виникає потреба у створенні комплексного рішення, яке б поєднувало переваги LoRa та Wi-Fi у межах однієї мережевої архітектури.

Обґрунтування вибору апаратних модулів є важливим етапом формування архітектури системи. Arduino Nano забезпечує низьке енергоспоживання й достатню продуктивність для обробки пакетів, роботи з периферією та керування LoRa-трансивером. Трансивер RFM95 вибраний завдяки високій чутливості, великому радіусу дії та можливості роботи в середовищах із перешкодами.

Для реалізації шлюзу використано модуль ESP8266, що підтримує Wi-Fi, має вбудовану файлову систему, може працювати як точка доступу та дозволяє організовувати візуалізацію мережі через вебін-

терфейс. Така конфігурація забезпечує поєднання далекодії LoRa та ширших мережевих можливостей Wi-Fi.

Програмне забезпечення комплексу розроблено з урахуванням необхідності обробки голосових пакетів у режимі реального часу, підтримки маршрутизації та керування взаємодією між вузлами.

Реалізовано модулі для роботи з інтерфейсом SPI, драйвери трансивера RFM95, а також структури даних для маршрутизації та локального збереження параметрів у EEPROM. Модуль для ESP8266 включає файлову систему, вебсервер, MQTT-клієнт та механізми прийому і обробки мережевих команд. Завдяки наявності MQTT можлива централізована візуалізація топології та моніторинг роботи вузлів. Схема роботи програмно-апаратного комплексу зображена на рис. 3.

Для передачі даних за допомогою SPI-інтерфейсу до трансивера RFM95 спочатку потрібно налаштувати шину. У бібліотеці `RadioHead` доступна програмна емуляція SPI, що дозволяє підключати трансивер

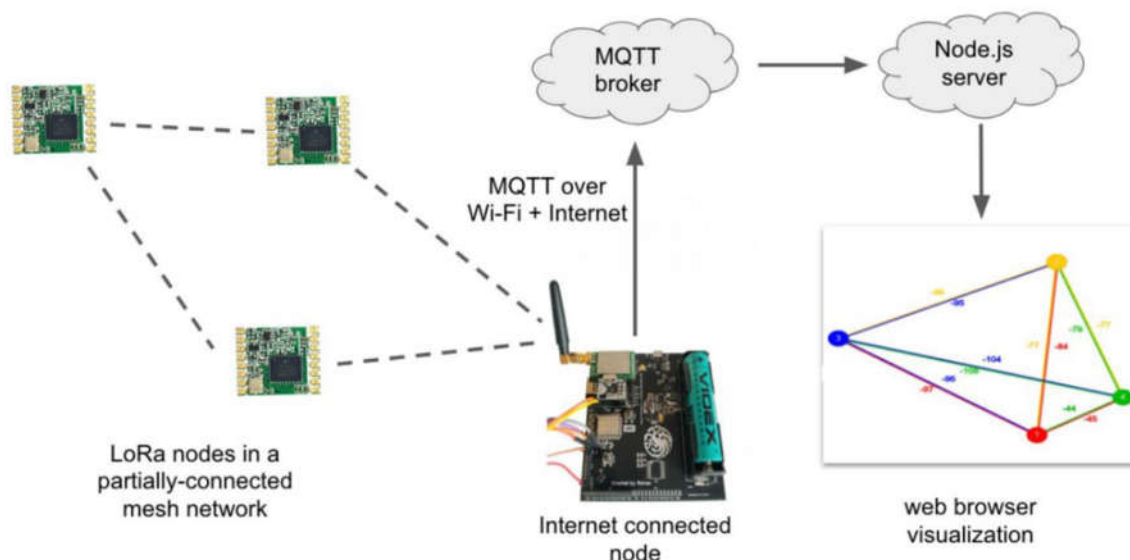


Рисунок 3 – Загальна схема роботи програмно-апаратного комплексу

до будь-якого з 14 цифрових портів вводу-виводу на платформі Arduino Nano крім RX та TX, які зайняті шиною UART (рис. 4).

```
// Ініціалізуємо трансивер та передаємо йому обрану частоту
if(rf95.init()) {
    Serial.println("RFM95W Module Init OK!");
} else {
    Serial.println("RFM95W Module Init Failed!");
}
rf95.setFrequency(915.0);

// Перевизначаємо пін для ліній DIO0 та SS
rf95.setPins(RFM95_CS, RFM95_INT);
```

Рисунок 4 – Ініціалізація трансивера

Також у трансивера є лінія DIO0, яку використовують для надсилання переривань мікроконтролеру. При отриманні переривання, мікроконтролер призупиняє виконання програми та обробляє його. Для переналаштування ліній DIO0 та SS, можна використати конструктор на початку програми.

На основі розробленого апаратного та програмного забезпечення створено прототип вузлів mesh-мережі та мережевого шлюзу. Вузлі забезпечують прийом і передачу LoRa-пакетів [6], визначають доступних сусідів і формують маршрути. Шлюз, у свою чергу, дозволяє інтегрувати мережу в локальне середовище Wi-Fi, вести журнал подій і відображати топологію в режимі реального часу.

У проєкті зі створенням мережі WMN платформа Arduino Nano використовується для передачі інформації про таблицю маршрутизації до шлюзу в форматі JSON-об'єктів. Для передачі цих даних використовується послідовний інтерфейс, який можна реалізувати з використанням бібліотеки SoftwareSerial. Ця бібліотека дозволяє створювати додаткові послідовні порти на цифрових входах-виходах Arduino Nano, що працюють на швидкості до 115'200 бод. Також в бібліотеці передбачено параметр, що дозволяє інвертувати сигнал для пристроїв, що працюють з інвертованим сигналом. Завдяки цій бібліотеці можна передавати дані від підключених пристроїв до шлюзу через послідовний інтерфейс, що є важливим елементом для успішної роботи мережі WMN.

Використання візуалізації в реальному часі дозволяє побачити формування та переконфігурування мережі та стан зв'язку між вузлами (рис. 5).

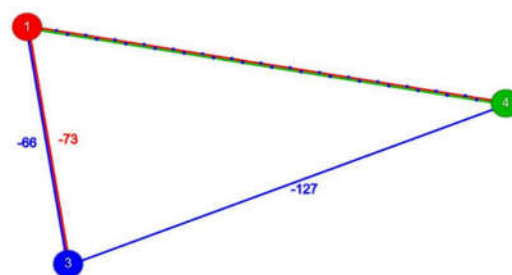


Рисунок 5 – Візуалізація Mesh-мережі з трьох вузлів

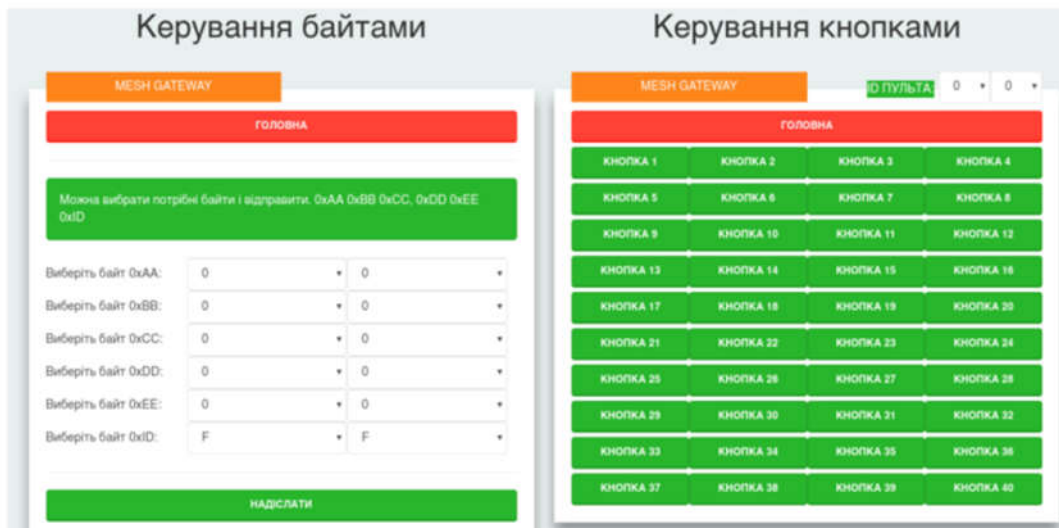


Рисунок 6 – Сторінки для віддаленого керування

Лінії між вузлами представлені як суцільні лінії, що означають прямий зв'язок, та лінії з точками, що означають непрямий зв'язок. Колір лінії відображає вузол, який здійснює маршрутизацію, а число вказує рівень сигналу між вузлами. Крім того, відстань між вузлами пропорційна силі сигналу. Сині точки на лініях вказують на непрямий зв'язок через інші вузли мережі.

Інтерфейс Mesh-модуля підтримує два способи керування: за допомогою восьми кнопок, що дозволяє вмикати лише одне навантаження, та «back end» та «front end» для мережевого шлюзу, який дозволяє передати будь-яку комбінацію. Крім того, можна призначити будь-який ідентифікатор для приймача, за замовчуванням це «back end» та «front end» для мережевого шлюзу з інтуїтивною комбінацією 0xFF. Використовуючи інтерактивний конструктор вебсторінок шлюзу, можна налаштувати свій спосіб взаємодії з мережею (рис. 6). Його можна відкрити комбінацією клавіш Ctrl+M.

JSON-об'єкт є форматом збереження вихідного коду сторінки. Змінюючи цей код, можна додавати або видаляти елементи сторінки.

Експериментальні дослідження підтвердили стабільність роботи мережі: зв'язок утримується на відстанях до 200 метрів, маршрути перебудовуються автономно, а передача даних залишається коректною навіть за зміни конфігурації

мережі. Затримки залишаються прийнятними для передачі голосових пакетів у середовищі LoRa за умови оптимізації розміру пакету та зменшення службового навантаження. Тестування показало стійкість мережі до появи й зникнення вузлів, що є ключовою властивістю для польових умов.

На основі отриманих результатів сформульовано рекомендації щодо подальшої оптимізації: застосування більш ефективних голосових кодеків із низькою затримкою, використання адаптивної маршрутизації з урахуванням якості каналу, впровадження методів пріоритетизації голосового трафіку, підвищення енергоефективності вузлів та розширення системи моніторингу для оцінки навантаження мережі. Існуюча архітектура дозволяє масштабувати мережу, розширювати функціонал і впроваджувати додаткові модулі без істотних змін у базовій конфігурації.

Висновки

Розроблений програмно-апаратний комплекс демонструє можливість створення децентралізованої системи зв'язку, здатної забезпечувати стабільну взаємодію між вузлами в умовах обмеженої інфраструктури. Використання модуля RFM95 на базі LoRa-технології дозволило сформувати малопотужну та відмовостійку мережу з розширеною зоною покриття, а застосування ESP8266 забезпечило універсальні засоби керування, доступ до зовнішніх ме-

реж і можливості інтерактивної взаємодії через MQTT та вебінтерфейс.

Комбінація апаратних і програмних рішень дала змогу реалізувати гнучку архітектуру, що підтримує динамічну маршрутизацію, моніторинг стану вузлів і адаптацію мережі до змін топології. Система демонструє стійку роботу, забезпечує коректне передавання даних і здатна слугувати основою для організації голосового зв'язку в автономних або мобільних мережах.

Отримані результати підтверджують доцільність використання децентралізованих mesh-мереж для голосових систем зв'язку та вказують на перспективи подальшого розвитку, зокрема вдосконалення алгоритмів маршрутизації, інтеграції спеціалізованих кодеків для стиснення голосових даних, підвищення енергоефективності й розширення засобів моніторингу та керування мережею. Система має потенціал для застосування в аварійних, польових та автономних комунікаційних рішеннях.

льшого розвитку, зокрема вдосконалення алгоритмів маршрутизації, інтеграції спеціалізованих кодеків для стиснення голосових даних, підвищення енергоефективності й розширення засобів моніторингу та керування мережею. Система має потенціал для застосування в аварійних, польових та автономних комунікаційних рішеннях.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Дакова Л. В., Даков С. Ю., Блаженний Н. В., Волошин В. О. Енергоефективний протокол маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах. *Зв'язок*. 2024. № 2. С. 9–13. doi: [10.31673/2412-9070.2024.020913](https://doi.org/10.31673/2412-9070.2024.020913)
2. Perkins C., Belding-Royer E., Das S. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. IETF Request for Comments: 3561. 2013. URL: <https://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt> (Last accessed: 02.05.2023).
3. Хажанець Ю., Білоус О. Класифікація протоколів маршрутизації mesh-мереж. *Повітряна міць України*. 2024. Т. 1, № 6. С. 56–62. doi: [10.33099/2786-7714-2024-1-6-56-62](https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-56-62)
4. Mohammad Al mojamad. LTM-LoRaWAN: A multi-hop communication system for LoRaWAN. *Electronics*. 2023. Vol. 12. No. 20. Article ID: 4225. 15 p. doi: [10.3390/electronics12204225](https://doi.org/10.3390/electronics12204225)
5. Thangadorai K. K., Sivalingam K. M., Pandey A., Murugesan K., Kanagarathinam M. R. WiLongH: A custom hand-held platform for long-range HaLow mesh networks in human-to-human communication. *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2025. Corpus ID: 276770094. 23 p. doi: [10.1109/OJCOMS.2025.3547615](https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2025.3547615)
6. Voudouris K. N., Patiniotakis M., Perdikouris S., Agapiou G. S., Dimitriadou E., et. al. Mesh Wi-Fi networks: Architectures and experimental results. *Wireless Technologies for Ambient Living and Health care: Systems and Applications, IGI Global publication* : Proc. of the Conf. Chapter V. 2011. doi: [10.4018/978-1-61520-805-0.ch005](https://doi.org/10.4018/978-1-61520-805-0.ch005)
7. Гаєвський О., Гаєвська Г., Бодняк В., Коновалов М. Причини підвищення напруги у вузлі підключення ФЕС до розподільної мережі та інверторне регулювання напруги. *Відновлювана енергетика*. 2022. Т. 1, № 68. С. 27–36. doi: [10.36296/1819-8058.2022.1\(68\)828](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68)828)
8. Ramanathan R., Dugaev D., Tan L., Ramanathan W. Mesh Augmentation of LoRaWAN-based IoT Networks. *Computer Science > Networking and Internet Architecture*. 2025. doi: [10.48550/arXiv.2512.00161](https://doi.org/10.48550/arXiv.2512.00161)
9. Qarash S. Wireless Mesh Networks (WMN) in IoT Networks. *Tobruk University Journal of Engineering Sciences*. 2024. Vol. 5. P. 1–7. doi: [10.64516/de33z795](https://doi.org/10.64516/de33z795)
10. Thakur R. Optimizing Real-Time Audio Filters for Low-Latency Voice Systems. *European Modern Studies Journal*. 2025. Vol. 9. P. 419–428. doi: [10.59573/emsj.9\(5\).2025.39](https://doi.org/10.59573/emsj.9(5).2025.39)

References

1. Dakova L., Dakov S., Blazhenyi N., Voloshyn V. Energy-efficient routing protocol in wireless sensor networks. *Connectivity*. 2024. Vol. 2. P. 9–13. doi: [10.31673/2412-9070.2024.020913](https://doi.org/10.31673/2412-9070.2024.020913) [in Ukrainian].
2. Perkins C., Belding-Royer E., Das S. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. IETF Request for Comments: 3561. 2013. URL: <https://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt> (Last accessed: 02.05.2023).
3. Khazhanets Yu., Bilous O. Classification of routing protocols in mesh networks. *Air Power of Ukraine*. 2024. Vol. 1. No. 6. P. 56–62. doi: [10.33099/2786-7714-2024-1-6-56-62](https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-56-62) [in Ukrainian].

4. Mohammad Al mojamad. LTM-LoRaWAN: A multi-hop communication system for LoRaWAN. *Electronics*. 2023. Vol. 12. No. 20. Article ID: 4225. 15 p. doi: [10.3390/electronics12204225](https://doi.org/10.3390/electronics12204225)
5. Thangadorai K. K., Sivalingam K. M., Pandey A., Murugesan K., Kanagarathinam M. R. WiLongH: A custom hand-held platform for long-range HaLow mesh networks in human-to-human communication. *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2025. Corpus ID: 276770094. 23 p. doi: [10.1109/OJCOMS.2025.3547615](https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2025.3547615)
6. Voudouris K. N., Patiniotakis M., Perdikouris S., Agapiou G. S., Dimitriadou E., et. al. Mesh Wi-Fi networks: Architectures and experimental results. *Wireless Technologies for Ambient Living and Health care: Systems and Applications, IGI Global publication* : Proc. of the Conf. Chapter V. 2011. doi: [10.4018/978-1-61520-805-0.ch005](https://doi.org/10.4018/978-1-61520-805-0.ch005)
7. Gaevskii O., Gaevska A., Bodnyak V., Konovalov M. Causes of voltage increase at the PV plant connection node to the distribution network and inverter voltage regulation. *Renewable Energy*. 2022. Vol. 1. No. 68. P. 27–36. doi: [10.36296/1819-8058.2022.1\(68\)828](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68)828) [in Ukrainian].
8. Ramanathan R., Dugaev D., Tan L., Ramanathan W. Mesh Augmentation of LoRaWAN-based IoT Networks. *Computer Science > Networking and Internet Architecture*. 2025. doi: [10.48550/arXiv.2512.00161](https://doi.org/10.48550/arXiv.2512.00161)
9. Qarash S. Wireless Mesh Networks (WMN) in IoT Networks. *Tobruk University Journal of Engineering Sciences*. 2024. Vol. 5. P. 1–7. doi: [10.64516/de33z795](https://doi.org/10.64516/de33z795)
10. Thakur R. Optimizing Real-Time Audio Filters for Low-Latency Voice Systems. *European Modern Studies Journal*. 2025. Vol. 9. P. 419–428. doi: [10.59573/emsj.9\(5\).2025.39](https://doi.org/10.59573/emsj.9(5).2025.39)

SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR ORGANIZING VOICE COMMUNICATION IN DECENTRALIZED MESH NETWORKS

Tohoiev O. R.

PhD, Senior Lecturer
Petro Mohyla Black Sea National University
54003, 68 Desantniki St., 10, Mykolaiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3465-7767>
e-mail: oleksii.tohoiev@chmnu.edu.ua

Puzyrov S. V.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor
Petro Mohyla Black Sea National University
54003, 68 Desantniki St., 10, Mykolaiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0520-1496>
e-mail: svpuzyrev@gmail.com

Gavrylko S. M.

Candidate of Law, Senior Lecturer, IT Department
King Danylo University
76018, Ivano-Frankivsk, Konovaltsa St., 35, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0007-7811-5982>
e-mail: serhii.m.havrylko@ukd.edu.ua

Zhulanov M. O.

student
Petro Mohyla Black Sea National University
54003, 68 Desantniki St., 10, Mykolaiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0009-6302-111X>
e-mail: maxim.zhulanov@gmail.com

Abstract. This article introduces a software and hardware system designed for organizing voice communication within a decentralized, multi-hop mesh network. This system was developed using Arduino Nano and ESP8266 modules, as well as an RFM95 transceiver that operates based on LoRa technology. Mesh topology features are investigated, particularly the factors affecting voice transmission quality, such as delays, route stability, the number of intermediate nodes, and signal levels between them. Modern solutions for decentralized communication are analyzed, and their limitations in providing real-time voice communication are identified. This highlights the need for a specialized architecture. The software implements routing, voice packet processing, data transfer control, and topology display via a web interface and MQTT. Prototypes of nodes and a gateway have been created to ensure stable data transfer in a multi-hop network. Experimental studies have confirmed the operability of the system, acceptable latency, tolerance to topology changes, and the capacity to support voice communication at distances of up to 200 meters. The proposed solution shows that autonomous voice communication systems can be built in areas with limited infrastructure and could serve as a basis for further optimizing and scaling mesh networks.

Keywords: mesh network, routing protocol, peripheral interface, microcontroller, transceiver.