

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Кафедра прикладної електродинаміки

Кафедрою прикладної електродинаміки протокол № від

« » 202 p.

здобувача другого рівня вищої освіти «РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ
АНТЕН ДЛЯ СИСТЕМ БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ ПРОТОКОЛУ
LORA»

Освітня програма Радіофізика і електроніка

Науковий керівник _____ Вадим ПЛАХТІЙ _____
(підпис) (ім'я, прізвище)

1

РЕФЕРАТ

Дипломний проект містить 42 рисунків, 49 сторінок, 8 бібліографічних посилань.

Проведено аналіз принципів роботи бездротових мереж стандарту LoRa та досліджено вплив узгодження радіочастотного тракту на дальність і стабільність зв'язку. Показано, що метод розширення спектра CSS забезпечує високу завадостійкість та енергоефективність LoRaWAN, однак якість антенно-фідерної системи залишається визначальним фактором чутливості приймача та ефективності передавання. Виконано моделювання, виготовлення та налаштування двох типів антен для діапазону 433 МГц: монопольної антени типу «Ground Plane» та направленої антени хвильового каналу. За результатами інструментальних вимірювань із використанням векторного аналізатора LiteVNA 64 встановлено залежність резонансної частоти від геометричних параметрів випромінювача та ефективність поетапного узгодження елементів направленої антени. Продемонстровано, що антени власного виготовлення за умови точного підбору розмірів можуть забезпечити резонансні характеристики, необхідні для застосування в LoRa-системах зв'язку.

LORA, LORAWAN, CSS-МОДУЛЯЦІЯ, АНТЕНИ UHF, МОНОПОЛЬ, ХВИЛЬОВИЙ КАНАЛ, УДА-ЯГІ, ІМПЕДАНСУ, КСХН, ВЕКТОРНИЙ АНАЛІЗАТОР.

ABSTRACT

The diploma project contains 42 figures, 49 pages, and 8 bibliographic references.

A comprehensive analysis of the operating principles of LoRa wireless networks has been carried out, along with an investigation of how RF path matching affects communication range and link stability. It is shown that the CSS spread-spectrum technique provides LoRaWAN systems with high interference immunity and energy efficiency; however, the quality of the antenna–feeder system remains a decisive factor for receiver sensitivity and transmission performance. Two types of antennas for the 433 MHz band were designed, fabricated, and tuned: a Ground Plane monopole antenna and a Yagi–Uda directional antenna. Instrumental measurements using the LiteVNA 64 vector network analyzer confirmed the dependence of the resonance frequency on the geometric parameters of the radiating elements and demonstrated the effectiveness of step-by-step matching of the directional antenna components. The results indicate that self-manufactured antennas, when precisely dimensioned, can provide the resonance characteristics required for reliable operation in LoRa communication systems.

LORA, LORAWAN, CSS MODULATION, UHF ANTENNAS, MONOPOLE, UDA–YAGI, IMPEDANCE MATCHING, VSWR, VECTOR NETWORK ANALYZER.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	2
ABSTRACT	3
1. Вступ	5
2. Протокол LoRa та LoRaWAN	9
2.1 Архітектура LoRaWAN	9
2.2 Елементи мережі LoRaWAN	9
2.2.2 Шлюзи LoRaWAN	10
2.2.3 Мережевий сервер	11
2.2.4 Сервери додатків	12
2.3 Класи пристроїв: A, B, C	13
2.3.1 Пристрої класу A	13
2.3.2 Пристрої класу B	15
2.3.3 Пристрої класу C	16
2.4 Фізичний рівень LoRa	17
2.4.1 Chirp Spread Spectrum	18
2.4.2 Ключові властивості модуляції LoRa	19
2.4.3 Типові RF-модулі для LoRa-систем	20
2.5 Вимоги до антен для LoRa-систем	21
2.5.1 Робоча частота та ширина смуги	21
2.5.2 Вплив KСХ на дальність та лінк-бюджет	23
2.5.3 Поляризація	24
2.5.4 Вплив заземлення та розмірів плати	25
3. Типи антен, що застосовуються в LoRa	28
3.1 Монопольні антени	28
3.2 Спіральні антени	29
3.3 F-shaped (IFA) і PIFA антени	30
3.4 Patch-антени	31
4. Експериментальна частина	34
4.1 Ненаправлена антена	38
4.2 Направлена антена	42
5. Висновки	47

1. Вступ

Сучасні міста переповнені різною складною електронікою та речами, без яких людство вже не уявляє своє життя. Різні прилади зв'язку, датчики та системи моніторингу утворюють складну систему, яка передає та обробляє терабайти даних, забезпечуючи безпеку, комфорт та високий рівень автоматизації багатьох процесів. Цей урбаністичний простір увесь час модернізується та вдосконалюється, що призводить до того, що межі фізичної інфраструктури та цифрового всесвіту майже стерті. Йдеться не тільки про персональні гаджети, які стали невід'ємною частиною нашого життя, але й про невидимі для нас «помічники», які роблять колосальну роботу для модернізації всіх сфер побуту та праці. Наприклад, системи «розумного освітлення» чи надскладні алгоритми керування дорожнього трафіку давно є частиною мегаполісів, хоча ми їх майже не помічаємо.

Всі ці прилади можна об'єднати під одним терміном Internet of Things (IoT). IoT - це мережа фізичних пристроїв, які мають програмне забезпечення, сенсори та інші технології, які дають їм можливість виходити в Інтернет та обмінюватися даними з іншими приладами. Основна мета полягає в тому щоб зробити ці прилади «розумними» та отримати можливість автоматизувати багато процесів, оптимізувати час виконання роботи та підвищення ефективності без посередньої участі людини [1] .

З появою "Інтернету речей" з'явилась потреба в удосконаленні потреб живлення та їх енергоефективності. Ця проблема вийшла на перший план через різкий стрибок кількості підключених електронних пристроїв, а без її вирішення масштабування технологій IoT неможливе. Це вимагає від інженерів пошуку нових рішень та створення більш покращених винаходів. Як приклад можна взяти можливість мікроконтролерів знаходитись більшу частину часу знаходитись у стані глибокого сну (deep sleep). Паралельно з розробкою нових підходів у програмному забезпеченні відбувається пошук альтернативних джерел енергії.

Ще один момент, який обумовлений сучасними вимогами «розумних девайсів» - це можливість життя продукту протягом одного циклу, що може дорівнювати 5-10 років. Для досягнення таких показників треба застосовувати складний та комплексний підхід: від використання енергоефективних протоколів зв'язку до створення багатшарових та інтелектуальних алгоритмів управління живлення, які динамічно підлаштовують потужність передавача залежно від умов зв'язку, мінімізуючи марні втрати енергії.

Крім того, критичною умовою для розгортання Інтернету речей та повсюдного використання може знадобитися пристрої для періодичної передачі невеликих пакетів інформації на великі відстані, причому датчики можуть знаходитися на відстані багатьох кілометрів один від одного. Така просторова розгалуженість вимагає високої чутливості приборів та проникної здатності сигналу, щоб гарантувати цілісність каналу зв'язку, там де інші рішення можуть бути не ефективними.

Для забезпечення таких мереж з'явилася технологія LPWAN – енергоефективна мережа далекого радіусу дії. LPWAN (англ. Low-power Wide-area Network - «енергоефективна мережа пального радіуса дії») - це бездротова технологія невеликих за розміром даних на великі відстані розроблена для розподілених мереж телеметрії, міжмашинної взаємодії та інтернету речей[2]. В основі роботи передачі даних через LPWAN на фізичному рівні використовується властивість радіосистем - збільшення енергії, а значить дальності зв'язку при зменшенні швидкості передачі.

LPWAN-мережа побудовано за топологією «зірка», як і мережа мобільного зв'язку, де всі пристрої пов'язані та взаємодіють з основною станцією.

Топологія «зірка» - це один з основних та найпоширеніших конфігурацій комп'ютерних систем, в якій всі пристрої підключаються до центрального вузла, такого як комутатор (світч) або концентратор (хаб). Цей метод організації мережі візуально нагадує зірку, де променями є кабелі, що йдуть від кожного пристрою до центру.

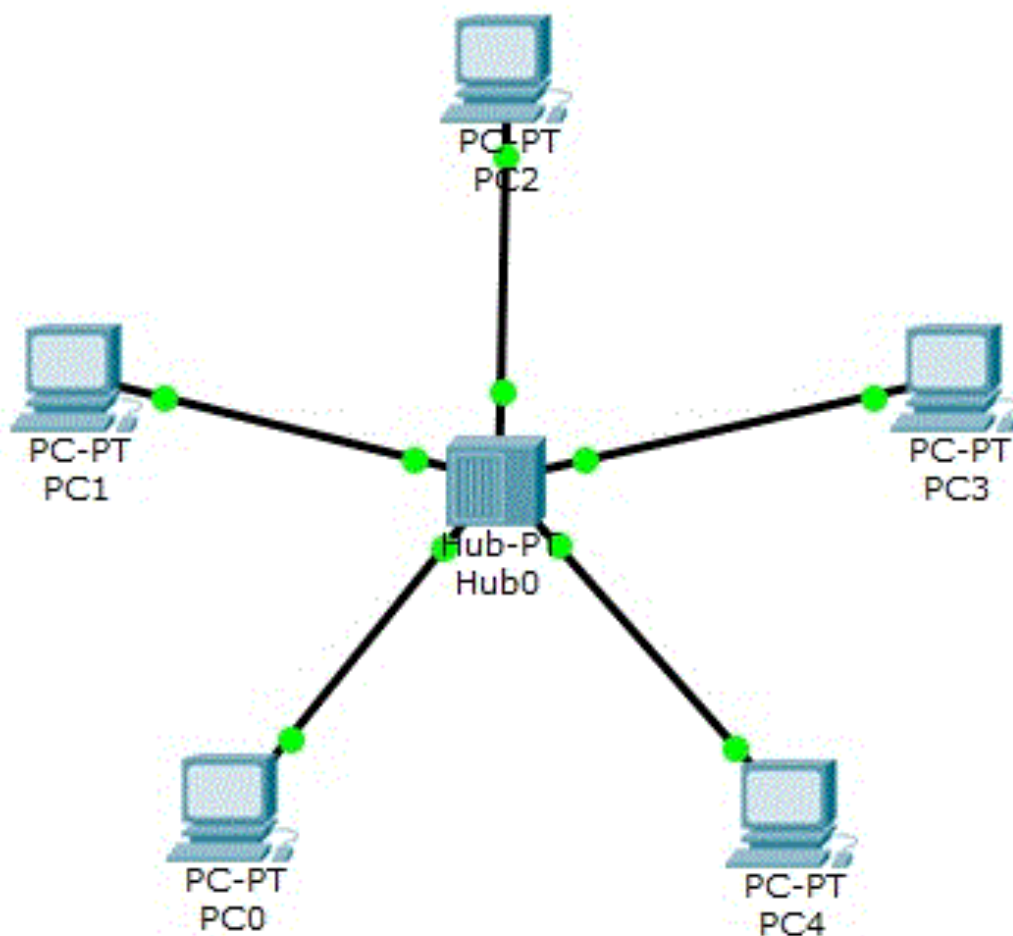


Рис. 1

В архітектурі мереж із радіальною топологією типу "зірка" будь-яка комунікація між робочими станціями реалізується виключно через центральний комутаційний вузол, який виступає обов'язковим посередником при маршрутизації трафіку. Специфіка обробки даних у такій схемі напряму залежить від інтелектуальності центрального пристрою: у випадку використання концентраторів (хабів) відбувається просте дублювання вхідного сигналу на всі активні порти, через що пакет надходить до кожного учасника мережі, створюючи надлишкове навантаження на канали зв'язку. Натомість застосування комутаторів (світчів) дозволяє оптимізувати цей процес завдяки аналізу адреси одержувача та спрямуванню інформації виключно на відповідний порт, що не лише ліквідує проблему паразитного трафіку, але й

суттєво підвищує загальну продуктивність та рівень інформаційної безпеки системи.

Для вирішення всіх цих питань корпорація Semtech на початку 2015 року показала світу новий відкритий енергоефективний мережевий протокол LoRaWAN, який надавав великі переваги над протоколом Wi-Fi та мережевим зв'язком через можливість розгортання міжмашинних (M2M) комунікацій. Цей протокол працює в загальнодоступних радіодіапазонах, які використовуються в різних нішах. Він забезпечує зв'язок на великі відстані з низьким енергоспоживанням та добре підходить для розгортання IoT у розумних містах.

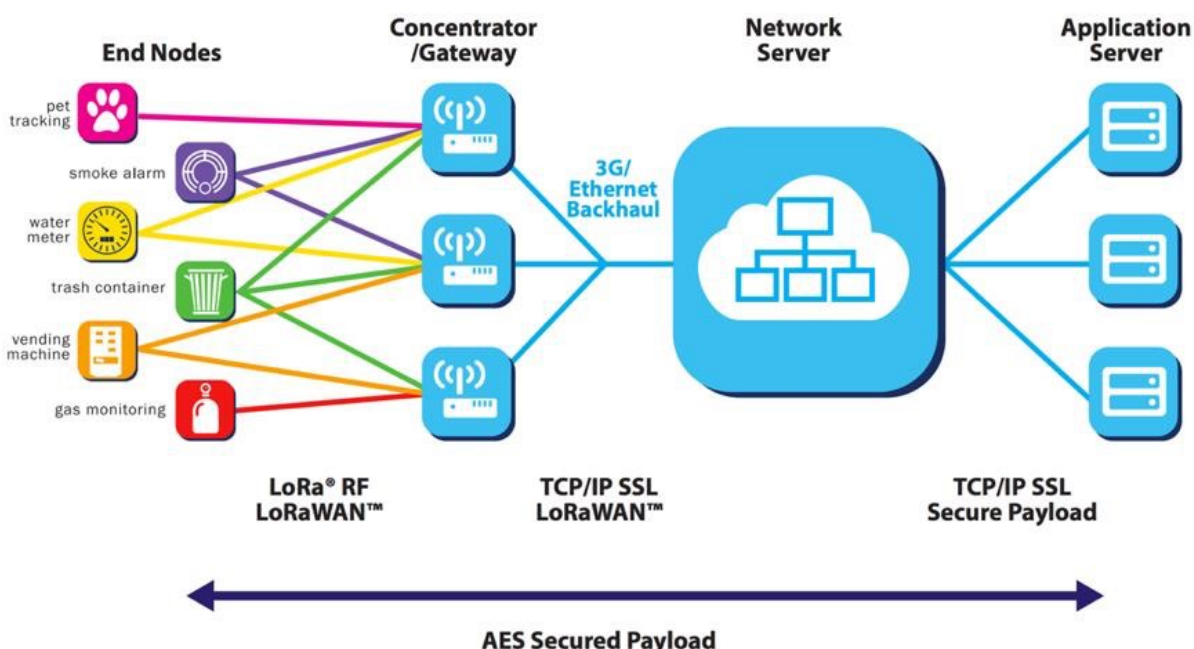


Рис. 2

Технологія Lora (Long Range) працює безпосередньо на фізичному рівні, являє собою передовий метод бездротової модуляції, який використовується для створення каналу зв'язку на великі відстані. Lora заснована на модуляції з розширеним спектром ЛЧМ (лінійна частотна модуляція), яка підтримує ті ж самі характеристики низької потужності, що й модуляція FSK (Frequency Shift Keying, з англ. Частотна модуляція), але значно збільшує дальність зв'язку. Інноваційність цього методу полягає в тому, що це перша успішна адаптація дорогої та складної технології для цивільного сектору, що зробила її економічно доступною для повсюдного використання в системі Інтернету речей.

2. Протокол Lora та LoRaWAN

2.1 Архітектура LoRaWAN

Для кращого розуміння архітектури протоколу LoRaWAN розглянемо її технологічний стек. Як показано рис. 3 Lora являє собою фізичний рівень (PHY), тобто бездротову модуляцію, що використовується для створення каналу

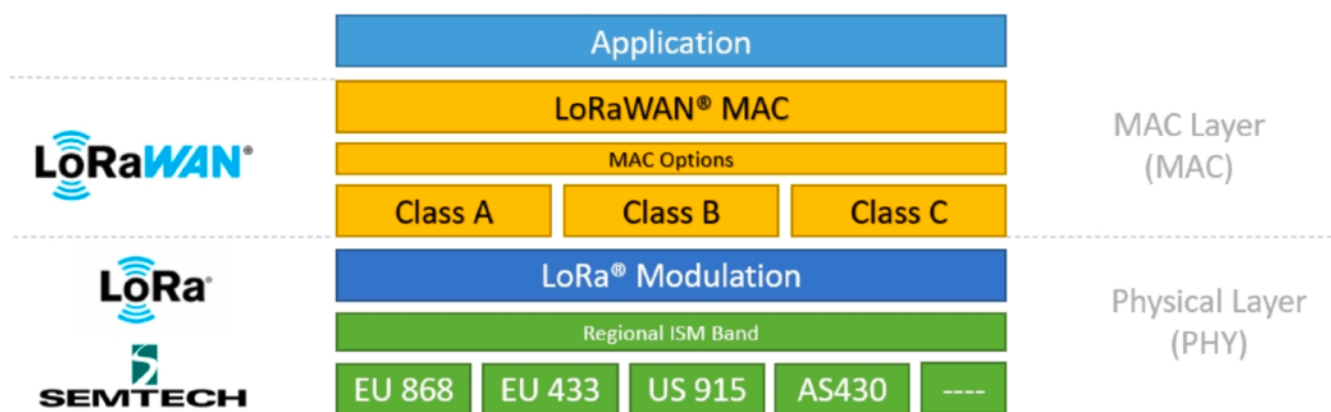


Рис. 3

передачі даних на великі відстані. LoRaWAN - це відкритий мережевий протокол, що забезпечує двосторонній зв'язок, мобільність та послуги локалізації, стандартизовані та підтримувані LoRa Alliance [3].

2.2 Елементи мережі LoRaWAN

Сама мережева архітектура LoRaWAN складається з чотирьох основних компонентів:

- Кінцеві пристрої або сенсори
- Шлюзи
- Мережевий сервер
- Сервер додатків

2.2.1 Кінцеві пристрої на базі LoRa

Кінцевий пристрій з підтримкою LoRaWAN - це датчик або привід, що бездротові може під'єднуватися до мережі LoRaWAN через радіошлюзи за допомогою радіочастотної модуляції LoRa. В основному ці прибори є автономні та працюють від батарейок або акумуляторів. Наприклад, запобігання потоків, бездротові замки або вуличне освітлення.

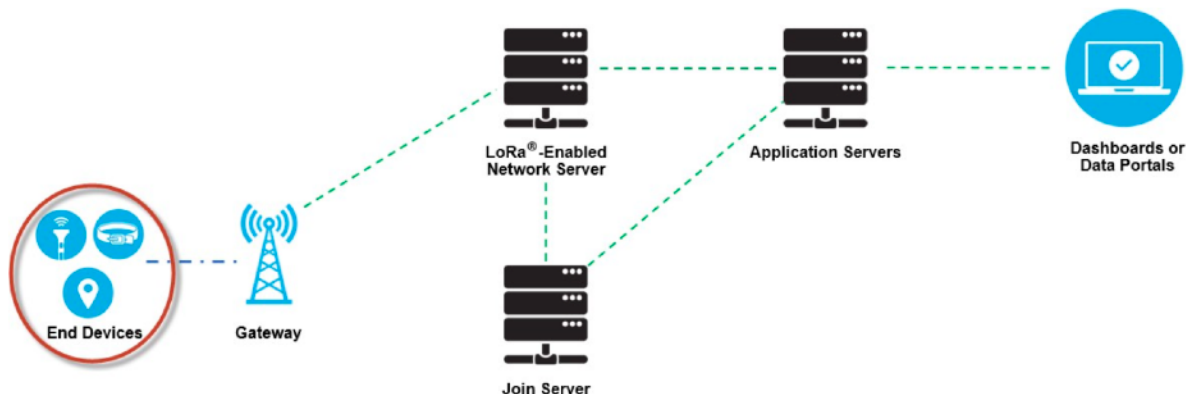


Рис. 4

2.2.2 Шлюзи LoRaWAN

Шлюзи LoRaWAN приймає модульовані LoRa радіочастотні повідомлення від будь-якого кінцевого пристрою, що знаходиться в зоні видимості і пересилає ці повідомлення на сервер мережі LoRaWAN (LNS), який підключений через магістральську мережу IP. Між кінцевим пристроєм та конкретним шлюзом немає фіксованого зв'язку. Тобто, один і той самий датчик може обслуговуватися декількома шлюзами в даній області.

За допомогою LoRaWAN кожен пакет, що надсилається кінцевим пристроєм, буде отриманий усіма шлюзами в межах досяжності. Така схема значно зменшує частоту помилок пакетів та навантаження на батарею мобільних датчиків.

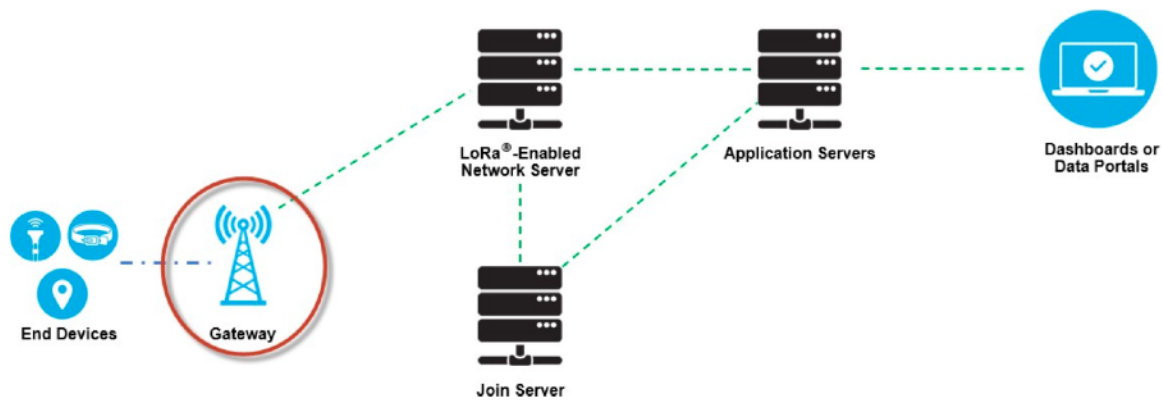


Рис. 5

Шлюзи LoRaWAN працюють виключно на фізичному рівні і, по суті, є лише переадресаторами радіоповідомлень LoRa. Вони тільки можуть перевірити цілісність даних кожного вхідного радіочастотного повідомлення LoRa. Якщо цілісність порушення повідомлення буде відкинута.

Крім того, LoRa дозволяє реалізувати масштабовані, оптимізовані за вартістю шлюзи, залежно від цілей розгортання. Наприклад, у Північній Америці доступні 8-, 16- і 64-канальні шлюзи. 8-канальні шлюзи є найдешевшими. Тип необхідного шлюзу залежить від випадку використання. 8- і 16-канальні шлюзи доступні як для внутрішнього, так і для зовнішнього використання. 64-канальні шлюзи доступні тільки у варіанті операторського класу. Цей тип шлюзу призначений для розгортання в таких місцях, як базові станції стільникового зв'язку, дахи дуже високих будівель.

2.2.3 Мережевий сервер

Сервер мережі LoRaWAN (LNS) управляє всією мережею, динамічно контролює параметри мережі для адаптації системи до постійно мінливих умов і встановлює безпечні 128-бітні AES-з'єднання для передачі даних від кінцевого пристрою LoRaWAN до кінцевих користувачів.

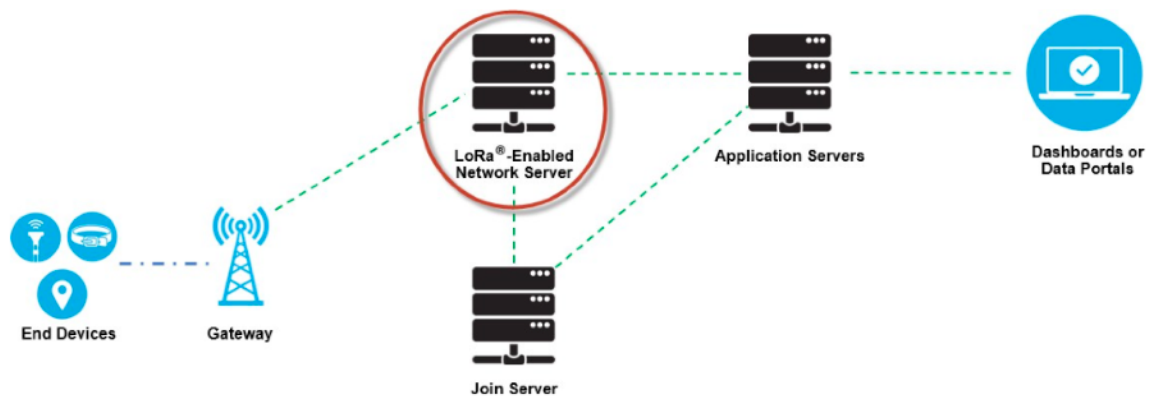


Рис. 6

Мережевий сервер забезпечує автентичність кожного датчика в мережі та цілісність кожного повідомлення. В той самий час сервер не може бачити дані додатка та не має до них доступу.

2.2.4 Сервери додатків

Сервери додатків відповідають за безпечну обробку, управління та інтерпретацію даних додатків датчиків. Вони також генерують всі корисні дані додатків на рівні додатків для підключення кінцевих пристроїв.

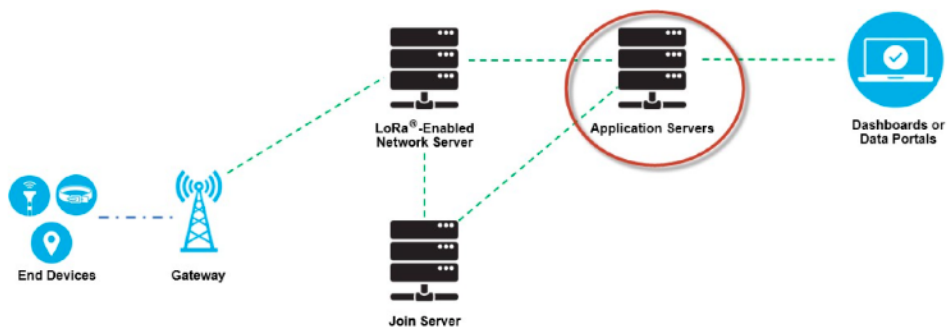


Рис. 7

2.3 Класи пристроїв: А, В, С

Архітектура кінцевих вузлів передбачає три можливих режимів, які залежить від класу пристроїв. Основним стандартом є клас А: його підтримка є обов'язковою для кожного сертифікованого обладнання LoRa. Це означає, що всі девайси, незалежно від їхньої складності чи призначення, за замовчуванням повинні реалізовувати функціонал цього базового рівня. Пристрої класу В повинні підтримувати режими класу А і класу В, коли пристрої класу С мають бути сумісними з режимом класу А, при цьому режим класу В є опціональним. Ці режими роботи пов'язані з тим, як пристрої спілкуються з мережею.

2.3.1 Пристрої класу А

На рис. 8 проілюстровано як працює режим роботи класу А.

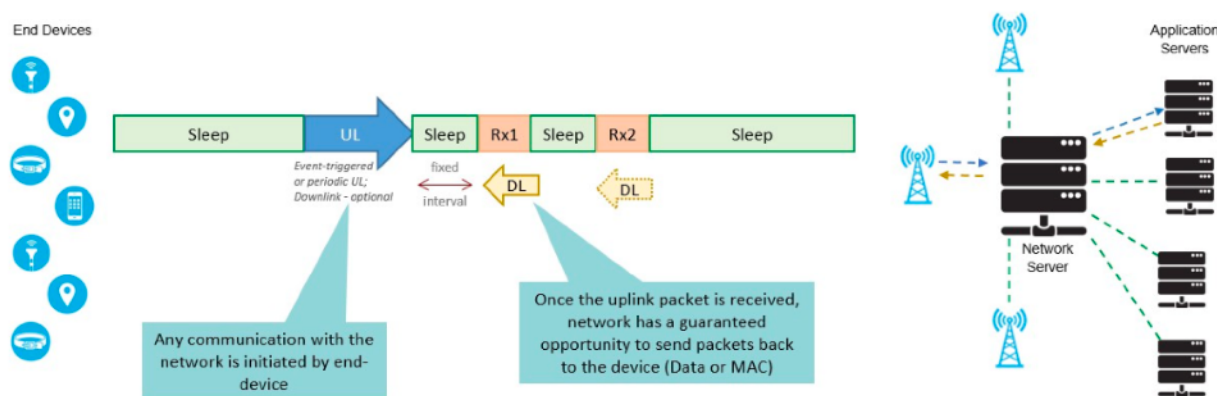


Рис. 8

Коли кінцевий пристрій працює в цьому режимі, він більшу частину часу працює в режимі очікування (тобто в режимі сну). Коли в середовищі відбуваються якісь зміни, пов'язані з тим, що пристрій повинен контролювати, він прокидається та ініціює висхідний канал, по якому передає дані про змінений стан до мережі. Потім пристрій чекає на відповідь від мережі, зазвичай протягом однієї секунди (цей параметр може бути налаштований). Якщо протягом цього вікна прийому (Rx1) воно не отримує зв'язку, воно на

короткий термін повертається в режим сну, прокидається знов та очікує відповідь (Rx2). Якщо протягом цього другого вікна Rx відповідь не надходить, пристрій повертається в режим сну до наступного разу, коли йому буде що повідомити. Затримка між Rx1 і Rx2 налаштовується як затримка від кінця передачі вгору.

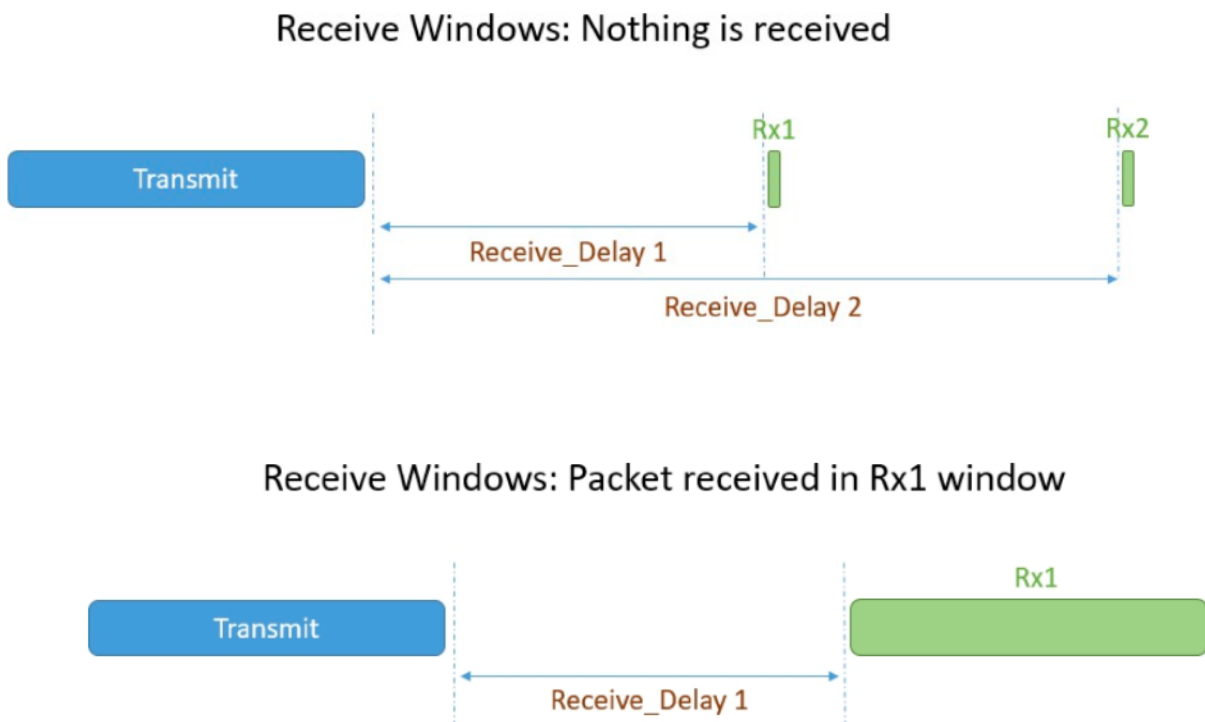


Рис. 9 Робота класу А, коли нічого не приймається

Рис. 10 Робота класу А, коли пакет даних отримано в першому вікні прийому

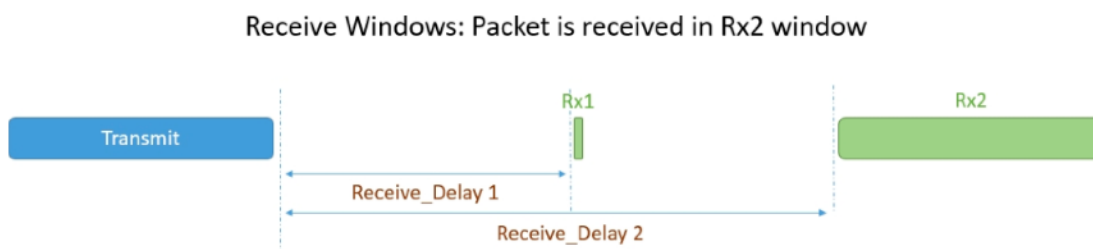


Рис. 11 Робота класу А, коли пакет даних отримано в другому вікні прийому

2.3.2 Пристрої класу В

Пристрої класу В пропонуються як вдосконалення класу А, де є регулярні, фіксовані за часом можливості для кінцевого пристрою отримувати даунлінк з мережі, що робить кінцеві пристрої класу В придатними для моніторингу датчиків, так і приводів.

Для роботи режиму зв'язку класу В необхідний процес, який називається маркуванням. Під час процесу маскування мережа повинна періодично транслювати синхронізований за часом маяк через шлюзи, як показано на рис. 12. Кінцевий пристрій повинен отримувати один з цих мережевих маяків, щоб узгодити свій внутрішній еталон часу з мережею.

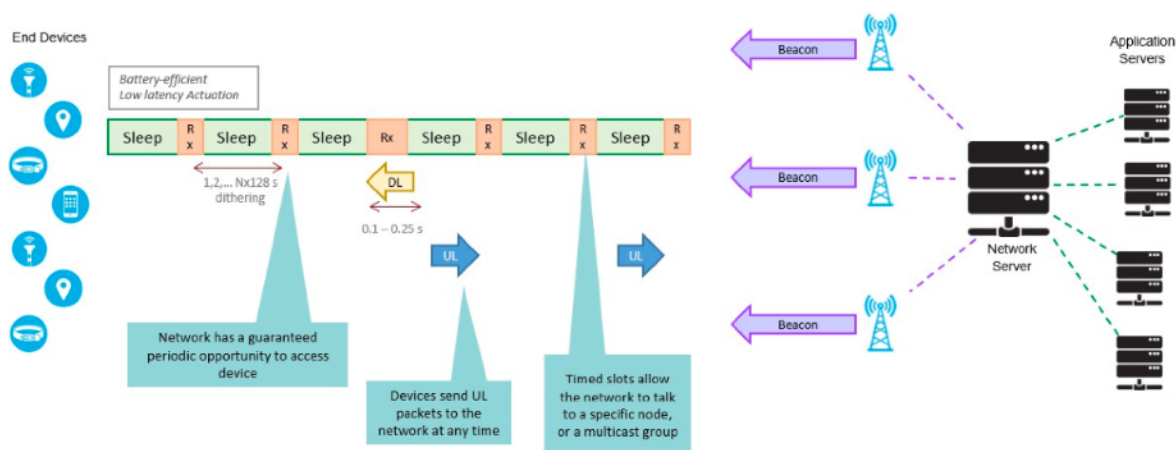


Рис. 12 Операції маякування класу В

Пристрої використовують маяки для визначення та синхронізації своїх внутрішніх годинників з мережею. Пристрої не потребують обробки кожного маяка, якщо пристрій вже синхронізовано.

На основі часової референції маяка кінцеві пристрої можуть періодично відкривати вікна прийому (слоти пінгу). Будь-який з цих слотів Ping може використовуватися інфраструктурою для ініціювання зв'язку вниз, як показано на рис. 13. Щоб мережа LoRaWAN підтримувала пристрої класу В, всі шлюзи LoRaWAN у цій мережі повинні мати вбудоване джерело синхронізації з GPS, щоб вони всі могли бути синхронізовані з точним часом маяка.

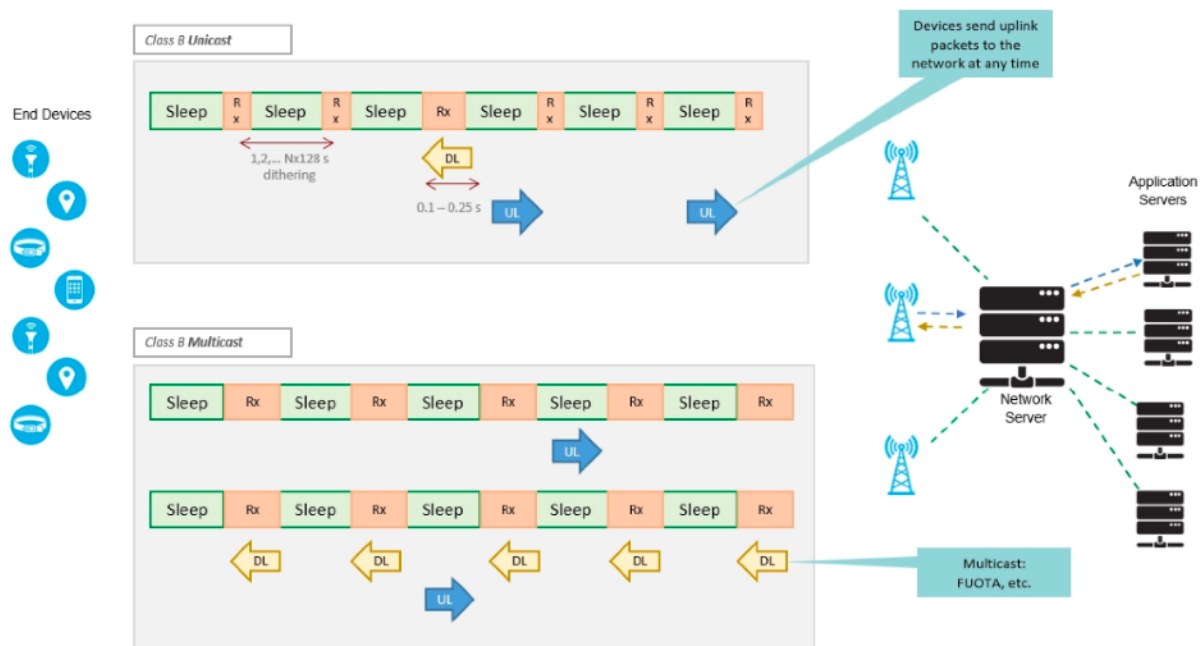


Рис. 13 Слоти Ping класу В

2.3.3 Пристрої класу С

Пристрої класу С завжди увімкнені, тобто вони не залежать від живлення від батареї. До пристроїв класу С належать такі пристрої, як вуличні ліхтарі, електролічильники тощо. Ці пристрої завжди приймають повідомлення з низхідного каналу, якщо вони не передають дані по висхідному каналу. Як

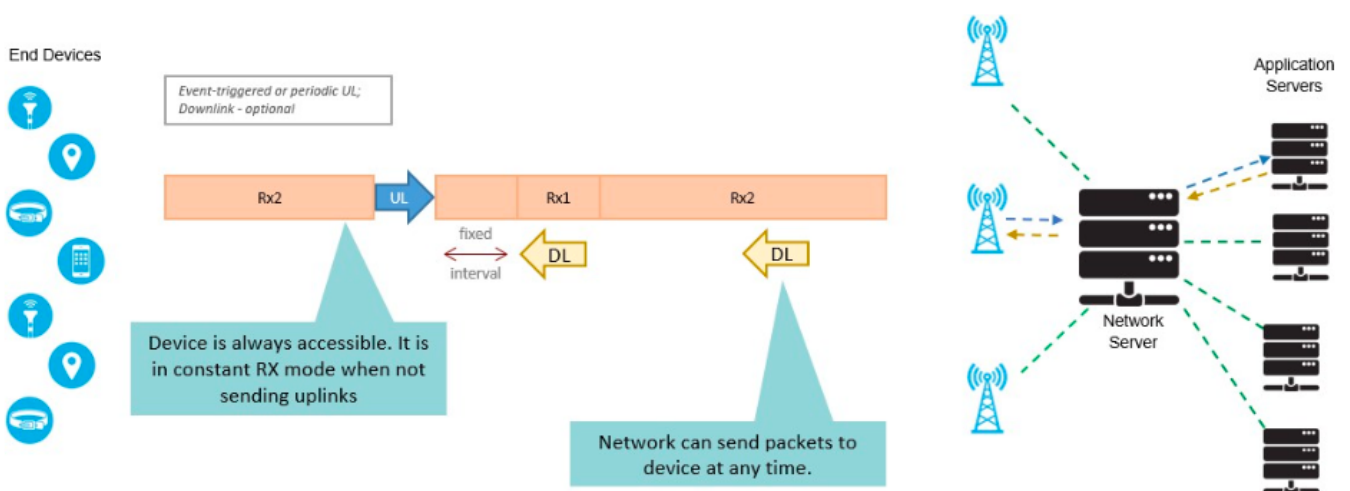


рис. 14 Робота класу С

результат, вони забезпечують найнижчу затримку для зв'язку між сервером і кінцевим пристроєм.

Кінцеві пристрої класу С реалізують ті самі два вікна прийому, що й пристрої класу А, але вони не закривають вікно Rx2, поки не надішлють наступну передачу назад на сервер. Тому вони можуть приймати низхідний канал у вікні Rx2 практично в будь-який час. Коротке вікно на частоті Rx2 і швидкості передачі даних також відкривається між кінцем передачі і початком вікна прийому Rx1, як показано на рисунку 14.

2.4 Фізичний рівень LoRa

LoRa - це запатентована технологія модуляції з розширеним спектром модуляції, яка походить від існуючої технології Chirp Spread Spetrum (CSS), який забезпечує компроміс між чутливістю та швидкістю передачі даних, працюючи в каналі з фіксованою пропускну здатністю 125 кГц або 500 МГц (для каналів висхідного зв'язку) та 500 кГц (для каналів низхідного зв'язку)[3].

Окрім всього іншого, LoRa використовує ортогональні коефіцієнти розширення. Ця особливість надає змогу продовжити термін служби батареї підключених кінцевих вузлів за рахунок адаптивної оптимізації рівнів потужності та швидкості передачі даних окремих вузлів. Якщо кінцевий пристрій знаходиться поблизу шлюзу, він повинен передавати дані з низьким коефіцієнтом розширення тому, що для цього потрібен дуже маленький коефіцієнт розширення. Навпаки, пристрій, що знаходиться за декілька кілометрів від шлюзу, повинен передати дані з набагато вищим коефіцієнтом розширення.

LoRa є чисто фізичним (PHY) або «побітовим» рівнем реалізації, як визначено в семирівневій моделі мережі OSI, де замість кабелів передачі радіохвиль LoRa від радіочастотного передавача в пристрої IoT до радіочастотного приймача в шлюзі використовується повітря.

У традиційній системі або системі прямої послідовності розширення спектру (DSSS) фаза несучої частоти сигналу передавача змінюється відповідно

до послідовності коду. При множенні сигналу даних на заздалегідь визначений бітовий шаблон із значно вищою швидкістю, також відомий як код розширення (або послідовність чіпів), створюється «швидший» сигнал, який має вищі частотні компоненти, ніж вихідний сигнал даних. Це означає, що смуга пропускання сигналу розширюється за межі смуги пропускання вихідного сигналу. У радіочастотній термінології біти послідовності коду називаються чіпами (для того, щоб відрізнити їх від довших, некодованих бітів вихідного сигналу даних). Коли переданий сигнал надходить до радіочастотного приймача, він множиться на ідентичну копію коду розширення, що використовується в радіочастотному передавачі, в результаті чого отримується копія вихідного сигналу даних. Один з головних недоліків DSSS є те, що вона вимагає високоточного опорного тактового генератора.

2.4.1 Chirp Spread Spectrum

Технологія LoRa Chirp Spread Spectrum пропонує дешеву та енергоефективну альтернативу DSSS, яка не вимагає високоточного опорного тактового генератора. В модуляції LoRa розширення спектру сигналу досягається шляхом генерації сигналу chirp, частота якого постійно змінюється, як показано рис. 15

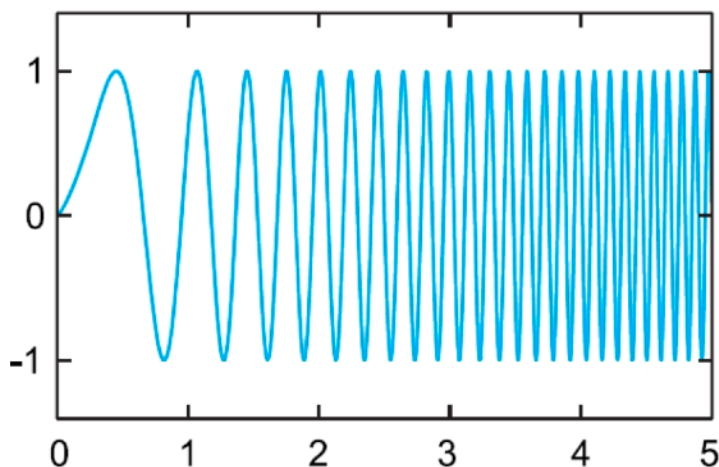


Рис. 15 Ілюстрація розширення спектру LoRa Chirp

Ключовою архітектурною перевагою даного методу є лінійна залежність між часовими та частотними зміщеннями сигналу. Така еквівалентність дозволяє нівелювати негативний вплив розсинхронізації між передавачем і приймачем, що, своєю чергою, дає змогу суттєво спростити апаратну реалізацію приймального тракту без втрати якості зв'язку. При цьому спектральна ширина сформованого сигналу повністю використовує доступну смугу пропускання каналу.

Процес передачі даних від кінцевого вузла до шлюзу передбачає модуляцію інформаційного потоку на несучу частоту з використанням заданої швидкості. Особливої уваги заслуговує інтегрована в протокол LoRa система попереджувальної корекції помилок (Forward Error Correction — FEC). Цей механізм адаптивно підвищує завадостійкість каналу шляхом введення надлишковості: наприклад, у базовій конфігурації до кожного блоку з чотирьох бітів корисних даних додається п'ятий біт парності, що дозволяє відновлювати пошкоджені пакети.

2.4.2 Ключові властивості модуляції LoRa

Коефіцієнт посилення LoRa вводиться в радіочастотний канал шляхом множення сигналу даних на код розширення або послідовність чіпів. Збільшуючи швидкість чіпів, ми збільшуємо частотні складові загального спектру сигналу. Іншими словами, енергія загального сигналу тепер розподіляється на ширшому діапазоні частот, що дозволяє приймачу розпізнавати сигнал з нижчим (тобто гіршим) відношенням сигнал/шум (SNR). У термінах LoRa кількість коду розширення, що застосовується до вихідного сигналу даних, називається коефіцієнтом розширення (SF). Модуляція LoRa має 1 цілому шість коефіцієнтів розширення (SF7 до SF12). Чим більший коефіцієнт розширення використовується, тим далі сигнал зможе пройти і все одно бути прийнятий без помилок радіочастотним приймачем.

На рис. 16 показано чотири різні коефіцієнти розширення [SF7...SF10], які можна використовувати для повідомлень у висхідному каналі (UL) на каналі

125 КГц. Він показує еквівалентну швидкість передачі даних, а також приблизний діапазон. Також показано значення часу перебування в ефірі (TOA) для 11-байтового корисного навантаження для кожного з чотирьох коефіцієнтів розширення.

Spreading Factor (For UL at 125 KHz)	Bit Rate	Range (Depends on Terrain)	Time on Air for an 11-byte payload
SF10	980 bps	8 km	371 ms
SF9	1760 bps	6 km	185 ms
SF8	3125 bps	4 km	103 ms
SF7	5470 bps	2 km	61 ms

Рис. 16 Коефіцієнт розширення LoRa

Важливо, що коефіцієнти розширення модуляції LoRa є за своєю суттю ортогональними. Це означає, що сигнали, модульовані з різними коефіцієнтами розширення і передані на одному частотному каналі одночасно, не створюють один одному перешкод. Натомість сигнали з різними коефіцієнтами розширення просто сприймаються один одним як шум.

Сигнали LoRa є надійними і дуже стійкими до механізмів внутрішньосмугових і позасмугових перешкод. Модуляція LoRa також забезпечує стійкість до багатопроменевого поширення і затухання, що робить її ідеальною для використання в міських і приміських умовах, де обидва механізми є домінуючими. Крім того, доплерівські зсуви викликають невеликий зсув частоти на часовій осі сигналу основної смуги. Ця толерантність до зсуву частоти зменшує вимогу до джерел опорного тактового сигналу з жорсткою толерантністю і, отже, робить LoRa ідеальним для передачі даних з мобільних пристроїв.

2.4.3 Типові RF-модулі для LoRa-систем

Для реалізації фізичного рівня LoRa використовуються спеціалізовані радіочастотні тракти, серед яких найбільш розповсюдженими є рішення сімейств SX127x та SX126x.

Сімейство SX127x (зокрема SX1272, SX1276) являє собою першу хвилю трансиверів, які забезпечили комерційний успіх технології. Вони характеризуються стабільною роботою в широкому спектрі частот (від 137 до 1020 МГц) та високою стійкістю до блокуючих перешкод. Взаємодія з мікроконтролером здійснюється через інтерфейс SPI, проте схема вимагає певної кількості зовнішніх пасивних компонентів для узгодження антени.

Новітнє сімейство SX126x розроблялося з прицілом на максимальне подовження терміну служби батареї. Завдяки вдосконаленій схемотехніці та наявності власного процесора для обробки команд, ці модулі розвантажують головний мікроконтролер системи. Це дозволяє досягти рекордних показників автономності, роблячи SX126x пріоритетним вибором для сучасних датчиків, розрахованих на 10+ років роботи без обслуговування

2.5 Вимоги до антен для LoRa-систем

2.5.1 Робоча частота та ширина смуги

Фундаментальною особливістю фізичного рівня LoRa є гнучкість налаштування радіоінтерфейсу, яка базується на можливостях сучасних трансиверів, таких як сімейство SX1276/78. Апаратна архітектура цих чіпів дозволяє програмно варіювати ширину смуги пропускання (BW) у широкому діапазоні від 7.8 до 500 кГц. Попри доступність проміжних значень, у регістрах конфігурації модема (RegModemConfig1) стандартом де-факто стали три основні налаштування ширини смуги: 125, 250 та 500 кГц. Варто зазначити, що фізичні обмеження накладаються на роботу в низькочастотному діапазоні (зокрема 169 МГц), де використання широких смуг у 250 та 500 кГц апаратно

не підтримується. Робочий частотний спектр обладнання охоплює діапазон від 137 до 1020 МГц, що дозволяє адаптувати системи під вимоги різних ISM-діапазонів світу: від європейського EU868 (863–870 МГц) до північноамериканського US915 (902–928 МГц) та китайського CN490.

На рівні протоколу LoRaWAN, на відміну від «чистої» модуляції LoRa, використання частотного ресурсу суворо регламентується регіональними специфікаціями. Яскравим прикладом є план US915, де для висхідного каналу (Uplink) виділяється масив із 64 каналів шириною 125 кГц та 8 каналів шириною 500 кГц, тоді як для низхідного зв'язку (Downlink) використовуються виключно смуги по 500 кГц. Центрування каналів відбувається з кроком у 200 кГц, а мережевий сервер має повноваження динамічно керувати частотним планом кінцевих пристроїв за допомогою спеціалізованих MAC-команд, таких як NewChannelReq для створення нових каналів або LinkADRRReq для адаптації швидкості та потужності.

Вибір ширини смуги пропускання є результатом пошуку інженерного компромісу між швидкістю передачі даних, енергоефективністю та дальністю зв'язку. Існує пряма залежність: розширення смуги, наприклад зі 125 кГц до 500 кГц, пропорційно збільшує швидкість передачі та скорочує час знаходження передавача в ефірі (Time on Air), що критично важливо для збереження заряду батареї. Однак зворотним боком цього процесу є зниження чутливості приймача через збільшення рівня теплового шуму в ширшій смузі. Експериментальні дані показують, що при фіксованому коефіцієнті розширення спектра (SF7) перехід зі 125 кГц на 500 кГц призводить до погіршення чутливості приблизно на 7 дБ (з -123 дБм до -116 дБм), що відповідно зменшує ефективний радіус дії мережі. Сучасні шлюзи, особливо в регіонах з широким доступним спектром, можуть частково нівелювати ці обмеження, підтримуючи режим повного дуплексу та одночасну демодуляцію десятків пакетів з різними параметрами завдяки частотному розділенню каналів прийому та передачі.

2.5.2 Вплив КСХ на дальність та лінк-бюджет

Головна увага приділяється параметрам узгодження антенно-фідерного тракту та дотриманню енергетичних стандартів. Ключовим індикатором якості узгодження виступає коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ). Вимоги до нього різняться залежно від типу обладнання: для кінцевих пристроїв на базі трансіверів серії SX1276–79 припустимим є значення КСХ до 3:1 (за умови роботи на потужності +20 дБм та робочому циклі до 1%), тоді як для шлюзів встановлено суворіші межі — типове значення становить 1.3, а максимально допустиме не перевищує 2.0.

Для забезпечення паспортних характеристик передавача, зокрема досягнення вихідної потужності +14 дБм на виводах RFO або +20 дБм на PA_BOOST, критично важливим є узгодження антени з імпедансом 50 Ом, оскільки саме на таке навантаження розраховані електричні специфікації чіпів. Крім того, ефективність антенної системи регламентується нормами ефективної ізотропно-випромінюваної потужності (EIRP). Специфікації LoRaWAN вимагають, щоб сумарна потужність передавача та підсилення антени не перевищувала регіональних лімітів, які можуть варіюватися від 8 до 36 дБм. Відповідно, застосування антен із високим коефіцієнтом підсилення може потребувати програмного зниження потужності передавача для відповідності місцевому законодавству.

Технологія LoRa забезпечує бюджет до 168 дБ завдяки високій чутливості (-148 дБм) та потужному передавачу, однак неякісна антена нівелює цю перевагу, скорочуючи дальність покриття. Таким чином, пріоритетом є не абстрактний відсоток ефективності, а забезпечення КСХ у межах 2:1–3:1, коректне узгодження з 50-омним трактом та дотримання лімітів EIRP.

2.5.3 Поляризація

У побудові та експлуатації мереж LoRa та LoRaWAN де-факто промисловим стандартом є використання лінійної вертикальної поляризації. Цей вибір продиктований архітектурою розгортання інфраструктури, де переважна більшість базових станцій (шлюзів) оснащується колінеарними антенами, встановленими вертикально для забезпечення рівномірної кругової діаграми спрямованості в горизонтальній площині. Згідно з документацією профільних спільнот, таких як The Things Network, та рекомендаціями виробників обладнання, для досягнення максимальної ефективності радіоканалу антени кінцевих вузлів повинні мати ідентичну вертикальну орієнтацію, що дозволяє уникнути поляризаційних втрат.

Відхилення від цього стандарту, зокрема виникнення лінійної горизонтальної поляризації, найчастіше є ситуативним і небажаним явищем, пов'язаним із конструктивними особливостями монтажу датчиків або зміною їх положення (наприклад, падінням). У випадках, коли вертикально поляризований шлюз взаємодіє з горизонтально розміщеним кінцевим пристроєм, виникає ефект крос-поляризації. Технічні розрахунки показують, що при ортогональній розбіжності (90°) теоретичні втрати можуть сягати 20–30 дБ, що критично скорочує дальність зв'язку та може призвести до повної втрати сигналу.

Окремим випадком є застосування кругової поляризації (RHCP або LHCP), яка використовується у специфічних сценаріях, таких як супутниковий сегмент LoRa Space (LR-FHSS) або телеметрія мобільних об'єктів (дронів, тварин). Необхідність такого рішення зумовлена постійною зміною орієнтації передавача у просторі або ефектом Фарадея при проходженні сигналу крізь іоносферу. Головною перевагою антен із круговою поляризацією на стороні приймача є здатність детектувати сигнали будь-якої лінійної орієнтації з

фіксованими втратами на рівні 3 дБ, що є значно надійнішим рішенням у динамічних умовах порівняно з ризиками глибокого завмирання сигналу при лінійній неузгодженості.

2.5.4 Вплив заземлення та розмірів плати

Критичним аспектом монтажу трансіверів, виконаних у корпусі QFN 28, є обов'язкова інтеграція центрального відкритого контактного майданчика (Pin 0) із загальною системною шиною землі. Ця вимога обумовлена подвійною функціональністю елемента: він не лише формує необхідний опорний електричний потенціал, але й виступає основним каналом термовідведення, до якого безпосередньо прив'язаний паспортний параметр теплового опору.

Паралельно з цим, схемотехнічне рішення передбачає наявність дубльованих виводів заземлення (зокрема, пінів 15, 23, 26), комутація яких є необхідною умовою для мінімізації шумів та забезпечення стабільності роботи як високочастотних блоків, так і цифрового ядра мікросхеми. Додатковим фактором експлуатаційної надійності виступає правильна організація кіл живлення: для коректного функціонування інтегрованих регуляторів напруги (блоків VR_PA, VR_DIG, VR_ANA) необхідно застосовувати систему розв'язувальних конденсаторів, розташування та номінали яких повинні суворо відповідати рекомендаціям референсного дизайну.

2.5.5 RF-тракт: узгодження та фільтри

Фундаментальною передумовою для забезпечення паспортних показників чутливості та вихідної енергетики радіосистеми є прецизійне узгодження імпедансів. Виробник нормує всі ключові електротехнічні параметри трансіверів — від динамічного діапазону до струму споживання — виходячи з базового припущення про роботу пристрою на узгоджене навантаження з хвильовим опором 50 Ом.

Особливі вимоги висуваються до проектування вихідних кіл при використанні підсилювача високої потужності (PA_HP). Для реалізації режиму передачі через пін PA_BOOST з рівнем сигналу до +20 дБм критично важливою

є інтеграція спеціалізованого кола узгодження (dedicated matching network). Відсутність такого вузла унеможлиблює ефективну передачу повної потужності в антенний тракт.

Водночас, архітектура підсилювачів високої ефективності (виходи RFO_LF / RFO_HF, розраховані на +14 дБм) допускає гнучкішу комутацію. Їх можна поєднувати з радіочастотними входами приймача, використовуючи лише пасивні компоненти, що дозволяє реалізувати схемотехніку трансівера з єдиним уніфікованим антенним портом. Варто зазначити, що для інфраструктурного обладнання, такого як шлюзи, оптимізація RF-узгодження (зокрема через вдосконалення BOM) розглядається як ефективний метод підвищення загальної продуктивності та мінімізації похибок при калібруванні I/Q-сигналів.

Забезпечення частотної вибірковості у системах LoRa базується на дворівневій архітектурі, яка поєднує зовнішні апаратні компоненти RF-тракту та внутрішні алгоритми цифрової обробки всередині чіпа. На фізичному рівні, особливо при проектуванні повнодуплексних шлюзів, критичним елементом виступають дуплексери, головне завдання яких полягає в надійній ізоляції чутливого входу приймача від потужного сигналу власного передавача. Залежно від вимог до габаритів та ефективності, застосовуються різні конструктивні рішення: для зовнішнього монтажу, де пріоритетом є максимальна продуктивність, обирають об'ємні порожнинні фільтри, тоді як для компактних пристроїв внутрішнього використання оптимальними є менші за розміром керамічні варіанти.

Ефективність таких апаратних бар'єрів є високою: типові характеристики для частотного плану US915 демонструють здатність пригнічувати позасмугові сигнали (у діапазоні 50–849 МГц) на рівні до 90 дБ. Окрім того, дуплексери відіграють важливу роль у спектральному очищенні сигналу, забезпечуючи ослаблення другої та третьої гармонік до 80 дБ. Додаткову смугову селекцію у схемотехніці приймально-передавальних трактів (зокрема після малошумливого підсилювача LNA) реалізують за допомогою фільтрів на поверхневих акустичних хвилях (SAW-фільтри).

Другий ешелон захисту від завад реалізовано на цифровому рівні безпосередньо в структурі трансіверів серії SX127x. Основу цієї підсистеми складає інтегрований канальний фільтр зі скінченною імпульсною характеристикою (FIR-фільтр на 16 відводів). Його функція полягає у відсіканні шумів за межами корисної смуги, хоча на практиці гранична здатність відхилення завад від сусіднього каналу часто лімітується не стільки математикою фільтра, скільки фізичним фазовим шумом гетеродина. Гнучкість системи забезпечується можливістю програмного конфігурування ширини смуги пропускання ($RxBw$) через відповідні регістри, що дозволяє інженерам точно адаптувати параметри приймача до обраної швидкості передачі даних.

3. Типи антен, що застосовуються в LoRa

Вибір конструктивного виконання антени в системах LoRa базується на компромісі між фізичними габаритами пристрою, необхідним коефіцієнтом підсилення та умовами експлуатації. У сучасній практиці проектування IoT-вузлів виділяють п'ять домінуючих класів випромінювачів.

3.1 Монопольні антени

Найпоширенішим типом є дрютяні антени, серед яких базовим рішенням вважається чвертьхвильовий монополь. Таке виконання, часто реалізоване у вигляді зовнішнього штиря ("rubber duck") або простого відрізка проводу, забезпечує найкращі показники ефективності та широку смугу пропускання, проте вимагає наявності ефективної площини заземлення (ground plane) на платі для формування дзеркального відображення хвилі.

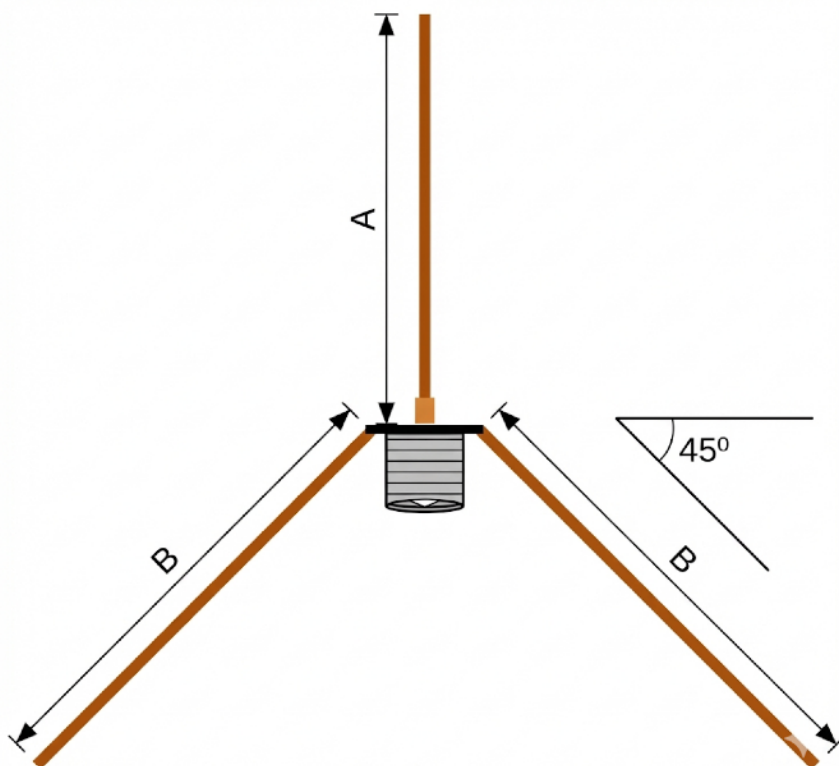


Рис. 17 ground plane антена

Для задач, що вимагають компактності, широко застосовуються спіральні модифікації, відомі як пружинні антени («spring antennas»). Шляхом згортання провідника у соленоїд досягається значне фізичне вкорочення випромінювача при збереженні його електричної довжини. Однак така мініатюризація призводить до зростання добротності системи (Q-factor), наслідком чого є звуження робочої смуги частот та підвищена чутливість до де-налаштування через близькість сторонніх об'єктів або корпусу.

Окремим технологічним напрямком є інтегровані РСВ-монополі, які формуються безпосередньо у провідному шарі друкованої плати. Часто вони виконуються у формі меандру для економії площі. Головною перевагою друкованих монополів є нульова вартість компонентів та висока повторюваність параметрів у серійному виробництві. Втім, їх проектування вимагає ретельного електромагнітного моделювання, оскільки діелектричні властивості склотекстоліту (FR-4) та розташування сусідніх компонентів мають критичний вплив на резонансну частоту та імпеданс антени.

3.2 Спіральні антени

У сегменті компактних кінцевих вузлів LoRa, де лімітований внутрішній об'єм корпусу унеможливорює використання повнорозмірних вібраторів, безальтернативним рішенням часто стають спіральні антени, що працюють у режимі нормального випромінювання (NMHA). Інженерна сутність такої конструкції полягає в електромагнітній компресії класичного монополя: провідник згортається у формі соленоїда, що дозволяє радикально зменшити фізичну висоту випромінювача порівняно з його електричною довжиною. Проте в такій топології резонансна частота перестає бути функцією виключно довжини дроту; вона стає похідною від складної геометричної матриці, що включає діаметр витка, крок намотки (відстань між витками) та загальну кількість витків. Зміна будь-якого з цих параметрів змінює розподілену індуктивність та ємність системи, зміщуючи робочу точку антени.

Критичним наслідком такої мініатюризації є фундаментальна зміна енергетичного профілю антени, а саме — суттєве зростання її добротності (Q-factor). З точки зору радіофізики, висока добротність нерозривно пов'язана зі звуженням смуги пропускання. Саме тому пружинні антени LoRa характеризуються надзвичайно гострим резонансним піком і дуже вузькою робочою смугою частот. Це створює значні виклики при інтеграції: найменша деформація пружини (розтягнення або стиснення) або зміна діелектричної проникності середовища (наприклад, наближення пластикового корпусу чи руки користувача) призводить до розлаштування системи. У результаті резонанс може зміститися за межі виділеного діапазону (868 МГц), що призведе до різкого падіння ефективності передачі даних та зростання коефіцієнта відбиття.

3.3 F-shaped (IFA) і PIFA антени

У сегменті мініатюрних пристроїв LoRa, де дизайн корпусу виключає використання зовнішніх випромінювачів, промисловим стандартом стали інтегровані антени на основі інвертованої F-подібної топології (IFA — Inverted-F Antenna). З електродинамічної точки зору, ця конструкція є еволюційним розвитком класичного чвертьхвильового монополя, який було зігнуто паралельно до площини землі для зменшення фізичної висоти профілю. Характерна форма, що нагадує літеру «F», утворюється завдяки додаванню критичного елемента — заземлюючого штиря (shorting pin), розташованого паралельно до точки живлення.

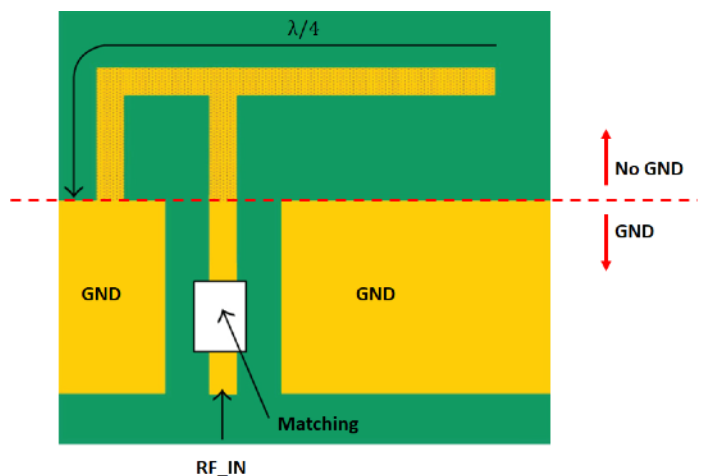


рис. 18 Inverted-F антена

Функціональне призначення цього заземлюючого елемента полягає в трансформації імпедансу: він вносить індуктивну складову, яка компенсує ємнісний характер короткого випромінювача. Змінюючи відстань між точкою живлення та заземлюючим штирем, розробник отримує можливість точно налаштувати вхідний опір антени до стандартних 50 Ом безпосередньо на платі, часто відмовляючись від необхідності використання зовнішніх узгоджувальних компонентів (matching network).

Подальшим розвитком цієї концепції є планарна інвертована F-антена (PIFA — Planar Inverted-F Antenna). Відмінність PIFA полягає у заміні дрютяного випромінювача на широку провідну пластину (patch) або полігон на друкованій платі, розміщений над площиною землі. Така геометрична модифікація суттєво змінює характеристики системи: збільшення площі провідника розширює робочу смугу частот та підвищує ефективність випромінювання. Крім того, PIFA демонструє вищу стабільність параметрів в умовах реальної експлуатації, будучи менш чутливою до впливу навколишніх металевих об'єктів та рук користувача порівняно з тонкоплівковими IFA-аналогами. Це робить PIFA домінуючим вибором для ношеної електроніки та компактних IoT-вузлів, де стабільність зв'язку є пріоритетом над граничною мінімізацією площі.

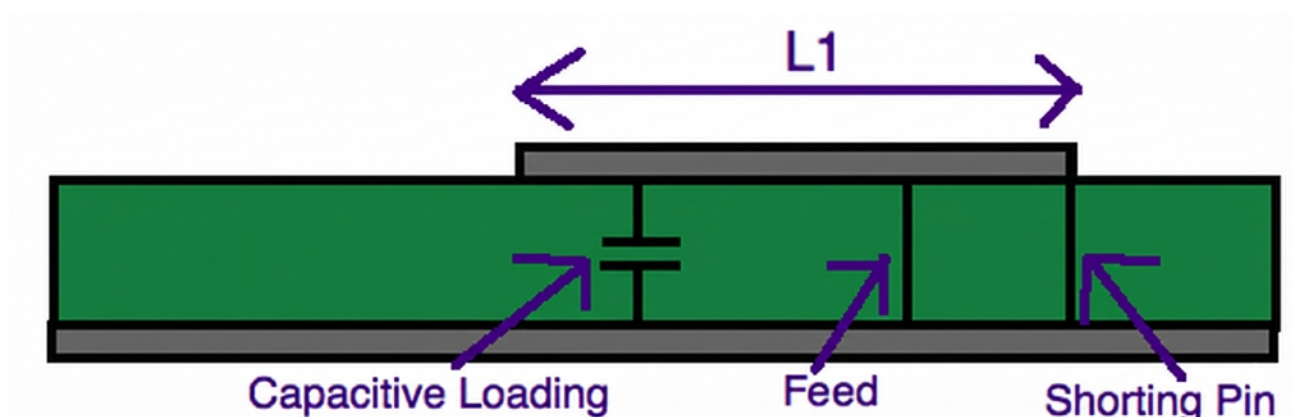


Рис. 19 планарна інвертована F-антена

3.4 Patch-антени

Ось технічний опис мікросмужкових (патч) антен, адаптований для вашої роботи. Окремий клас випромінюючих структур у системах бездротового зв'язку становлять мікросмужкові або патч-антени (Patch Antennas), архітектура яких базується на технології друкованих плат. Конструктивно такий випромінювач являє собою багат шаровий «сендвіч», що складається з провідної топологічної структури (власне патча) певної геометричної форми, суцільного екрану заземлення (ground plane) та шару діелектрика (підкладки) між ними. Принцип роботи патч-антени базується на резонансних явищах у напіввідкритому резонаторі: випромінювання відбувається не з поверхні провідника, а через крайові поля (fringing fields), що виникають по периметру патча між його краями та землею.

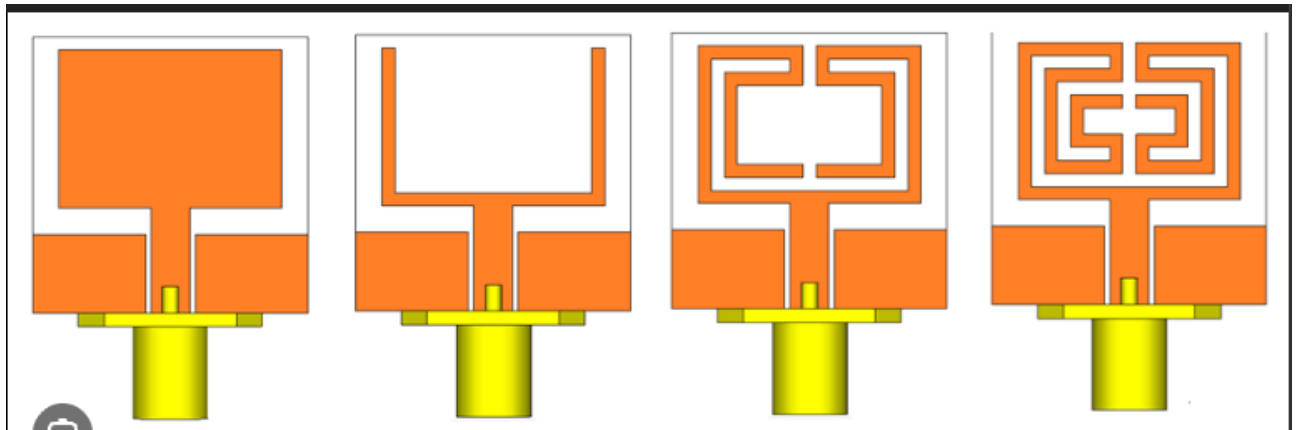


рис.20 Різновиди patch-антен

У контексті систем LoRa використання класичних повітряних або текстолітових патч-антен має певну специфіку, пов'язану з фізикою поширення хвиль. Оскільки резонансний розмір патча зазвичай становить половину довжини хвилі, для частоти 868 МГц габарити такої антени виходять доволі значними (близько 8–10 см), що обмежує їх застосування в компактних кінцевих вузлах. Проте цей недолік нівелюється використанням спеціалізованих керамічних підкладок із високою діелектричною проникністю, що дозволяє «стиснути» електромагнітне поле та зменшити фізичний розмір випромінювача без зміни робочої частоти.

Ключовою перевагою патч-антен є їхня висока гнучкість у формуванні діаграми спрямованості та типу поляризації. На відміну від штирьових антен, патч випромінює переважно в одну півсферу (спрямована дія), що підвищує енергетичний потенціал лінії зв'язку в заданому напрямку. Більше того, шляхом незначної модифікації геометрії (наприклад, зрізання кутів квадратного патча або зміщення точки живлення) можна легко отримати кругову поляризацію (RHCP/LHCP). Саме ця властивість робить керамічні патч-антени безальтернативним стандартом для модулів LoRa Space та GPS-трекерів, де необхідно приймати сигнал від супутників незалежно від орієнтації об'єкта, або ж компенсувати обертання площини поляризації при проходженні іоносфери.

4. Експериментальна частина

Спочатку спроектуємо антени в комп'ютерній програмі FEKO та отримаємо ось такі моделі та їх діаграми спрямованості:

- для ненаправленої антени:

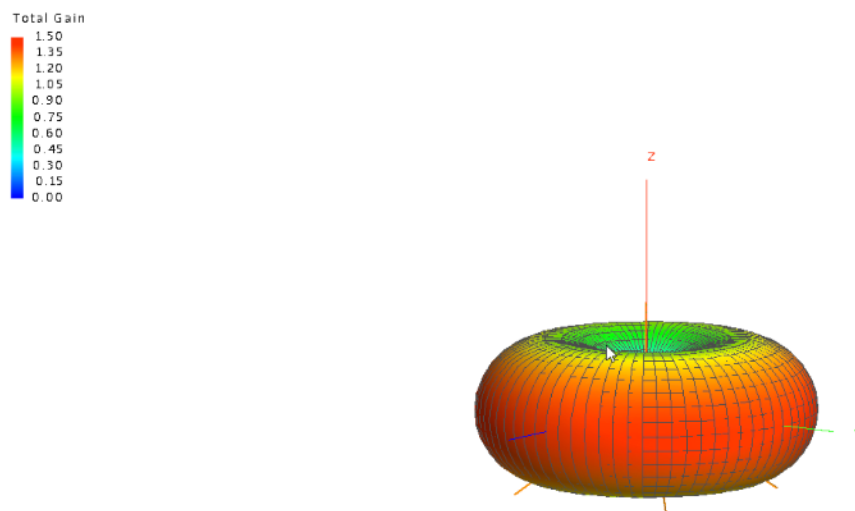


Рис. 21 Модель Ненаправленої антени

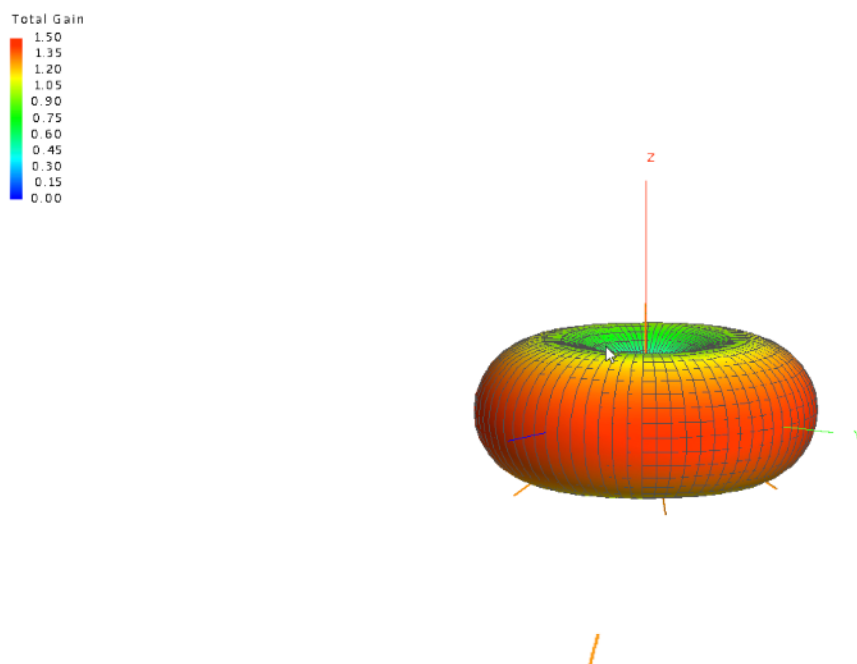


Рис. 22 Діаграма спрямованості ненаправлена антена

- для направленої антени:

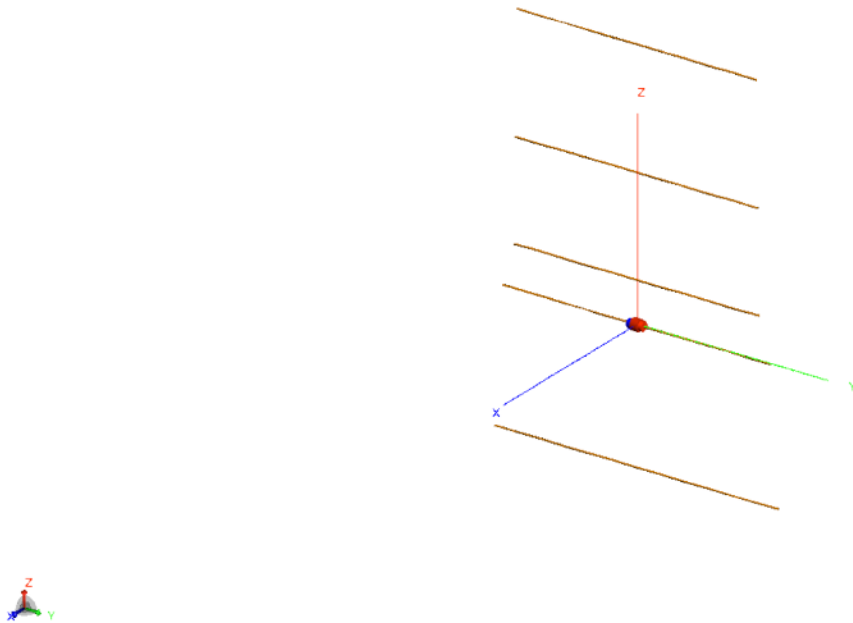


Рис. 23 Модель направленої антени

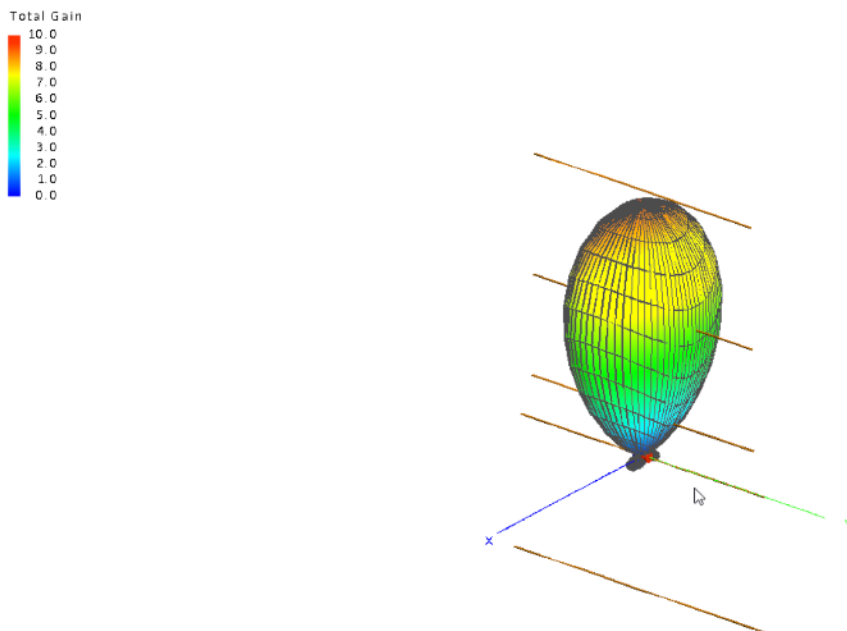


Рис. 24 Діаграма спрямованості направленої антени

Вимірювання проводились на імпровізованому дерев'яному штативі за допомогою 3-х метрового коаксіального кабелю та векторного аналізатора LiteVNA 64.



Рис. 25



Рис. 26 Фото процесу вимірювання

Для правильного вимірювання виготовлених антен необхідно провести калібровку векторного аналізатора, а саме щоб врахувати щонайменше коаксіальний дрiт калібровка проводилась на його кiнець. Для цього були використані відповідні три опорні вимірювання: OPEN, SHORT та LOAD. Калібровка проводилась для діапазону частот 100-700 МГц.



Рис. 27

Для перевірки правильності калібровки, можна поглянути на значення імпедансу на діаграмі Смітта для випадку LOAD, пристрій калібрується на 50 Ом, що відповідає розташуванню точки в центрі діаграми.



Рис. 28

4.1 Ненаправлена антена

Числові розрахунки для цього типу антени (вказати її правильну назву) вказали, що резонанс буде при довжині монополя 16,45 см, а довжини рефлекторів 21,34 см.

Спочатку була виготовлена антена з завідомо довшими дротами для подальшого налаштування. Товщина дроту 1 мм.:



Рис. 29

Перше фото резонанс 315 - 20см монополь, рефлектори 30см:

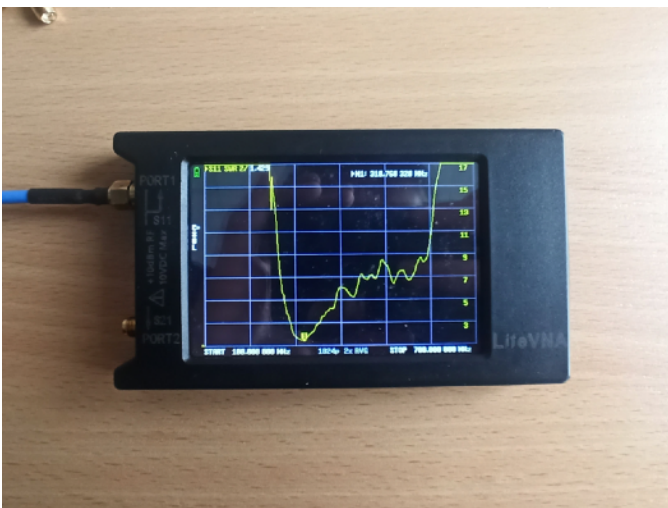


Рис. 30

Рефлекторы 25см, монополю 19.5см 350МГц:

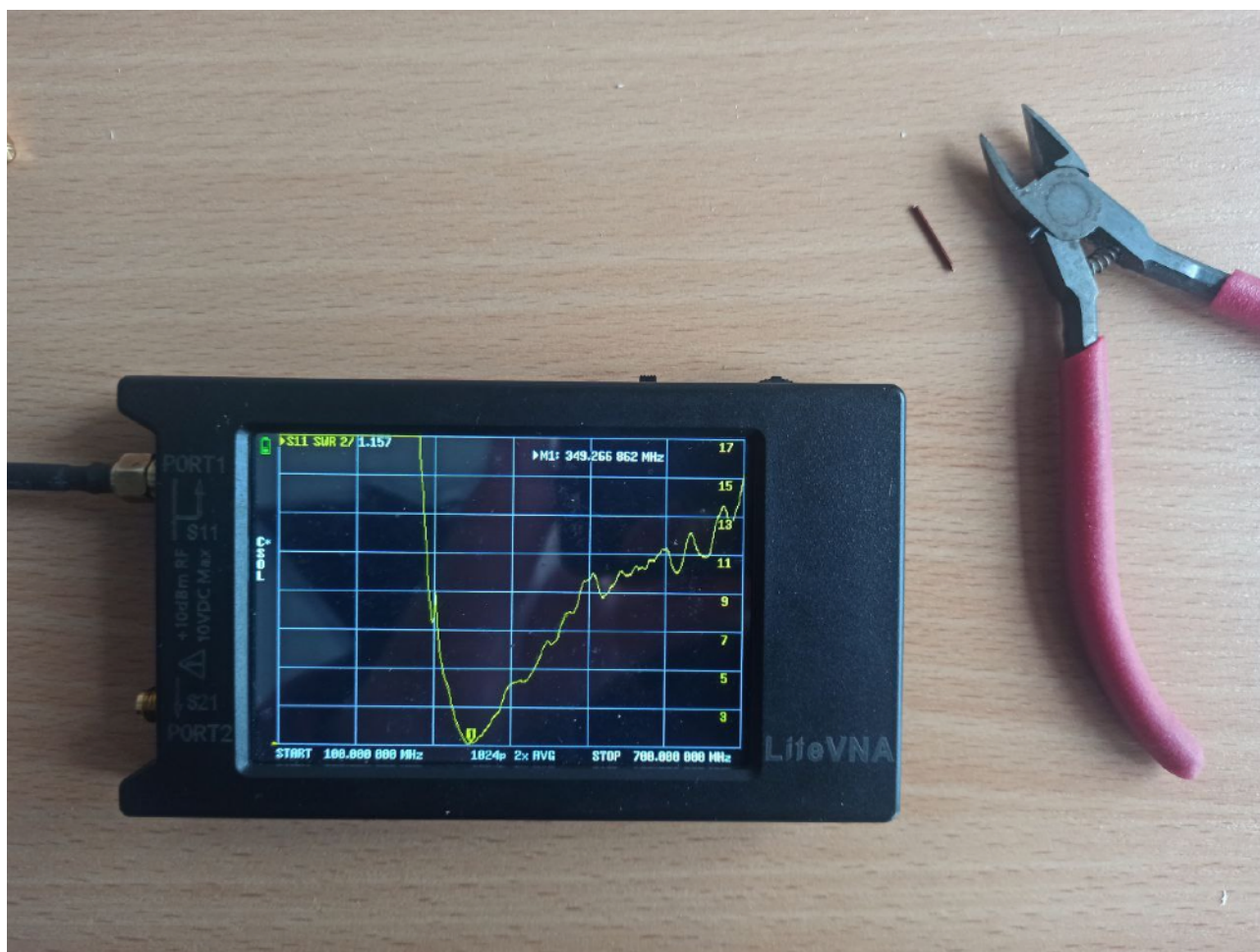


Рис. 31

Рефлектор 21.5, монополю 16.5см 396МГц:

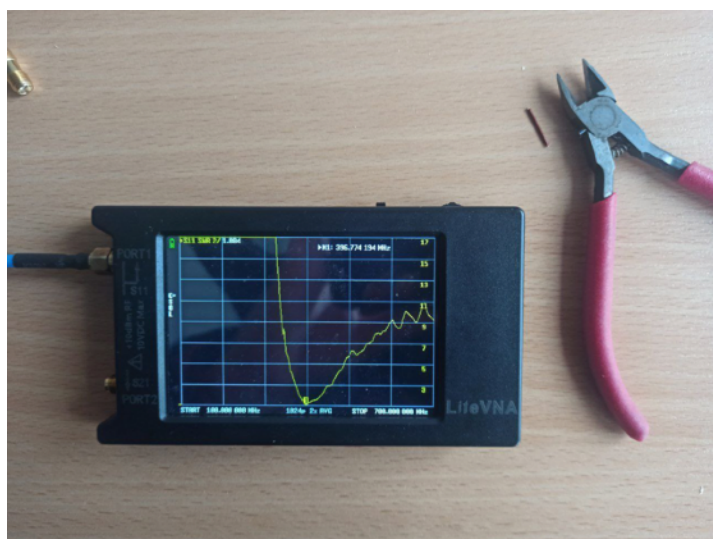


Рис. 32

Монополь 15.5см рефлектор 20см 433:

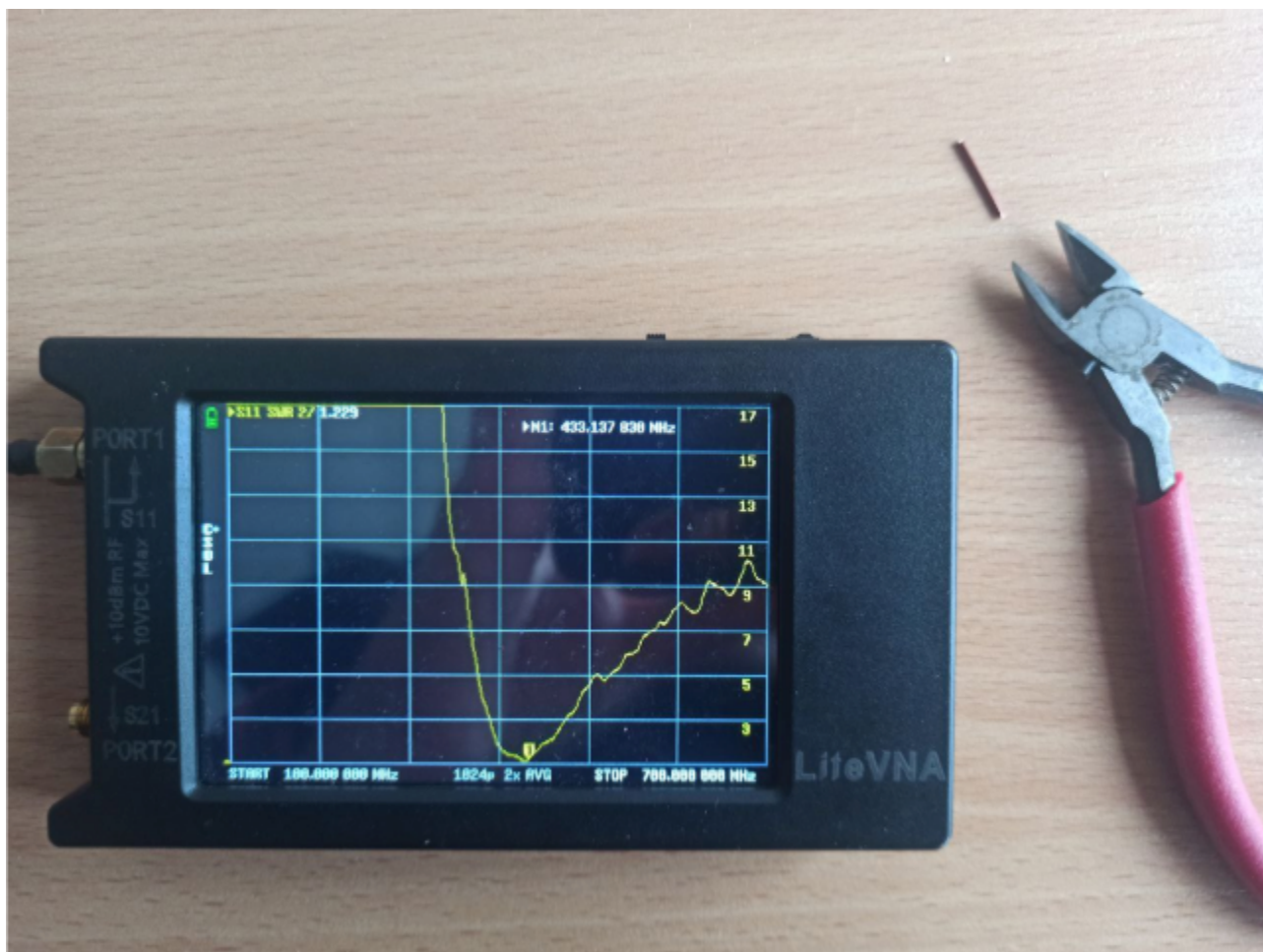


Рис. 33

Результующий вид антени:

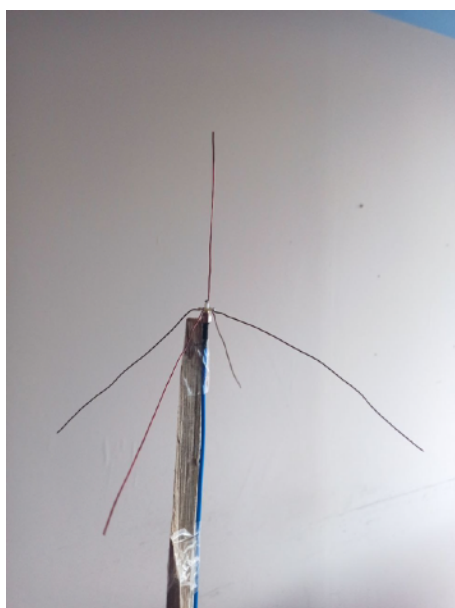


Рис. 34

4.2 Направлена антена

Для виготовлення директорної антени були використані наступні матеріали, коаксіальний кабель RG58CU, водопровідна труба для основи, дріт з діаметром 2 мм мідний та з діаметром 1 мм.

Спочатку був виготовлений фідер з коаксіалу, а саме обжати під конектор SMA Female коаксіальний кабель необхідної довжини.

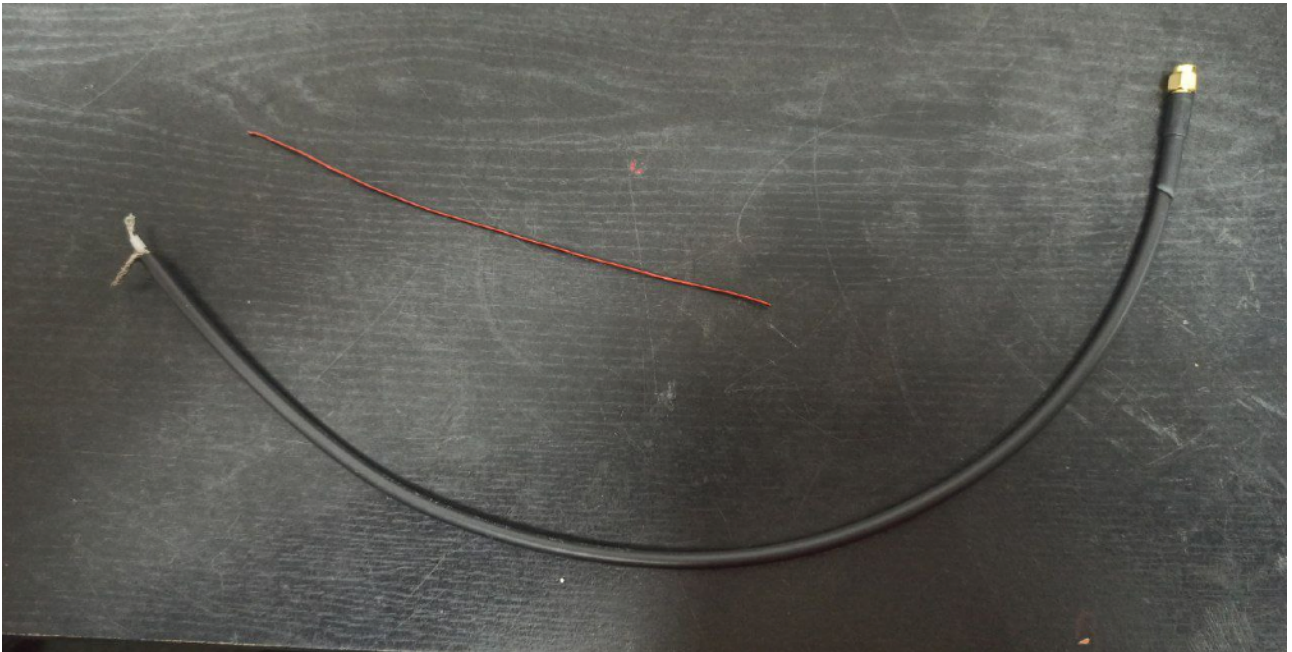


Рис. 35

Далі для симетрування фідерної системи був використаний шматок дроту 17,3 см довжини.



Далі в трубі були виконані монтажні отвори для кріплення вібратора, директорів та рефлектора.

Рис. 36

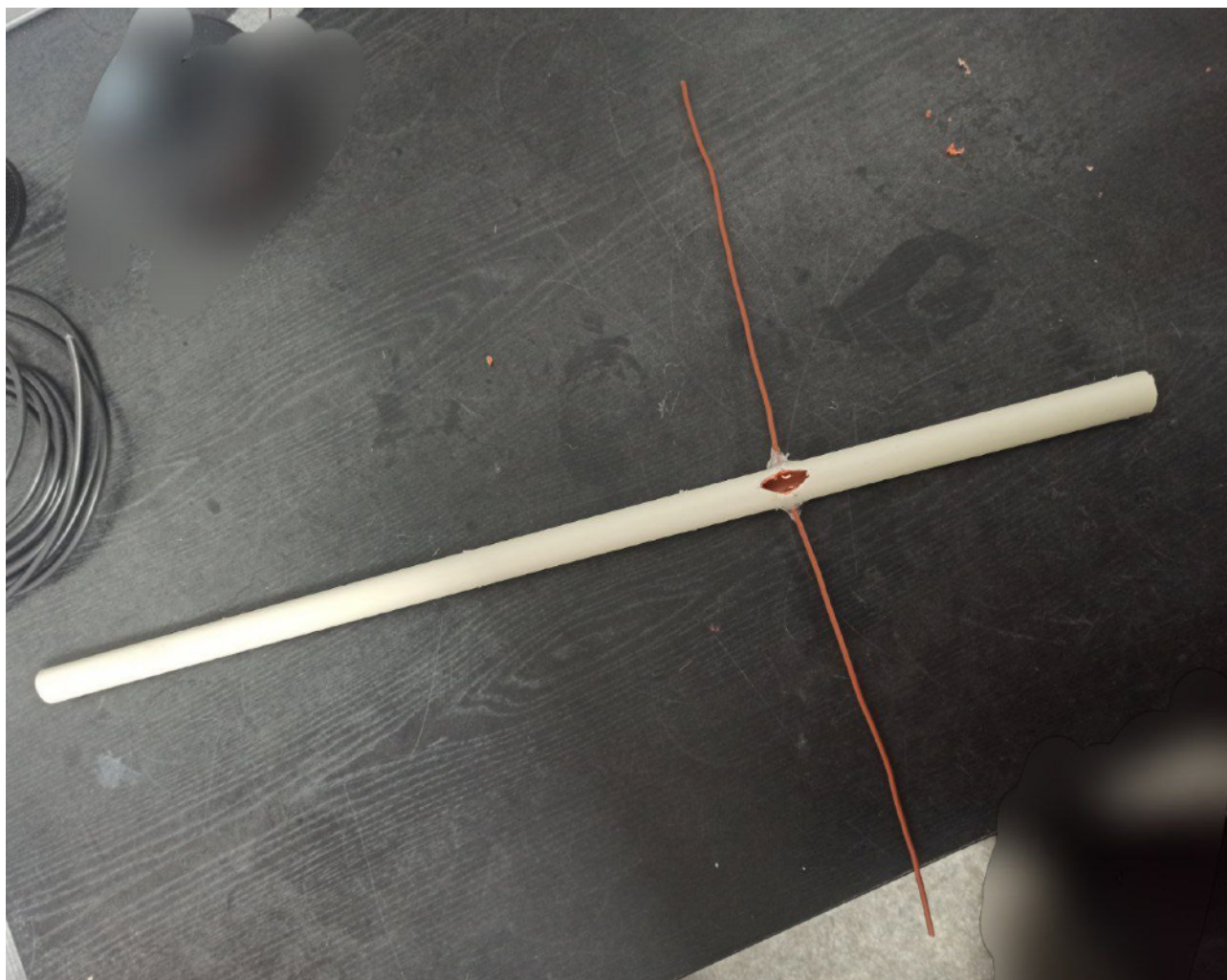


Рис. 37

Перед тим, як додавати рефлектор та директори, спочатку монтуємо антену з активним вібратором, у якого плечі завідомо довші:



Рис. 38

Налаштування одиночного диполя, 48 см повна довжина, зазор 1см між плечами, резонанс 285МГц

Вимірювання КСХН:

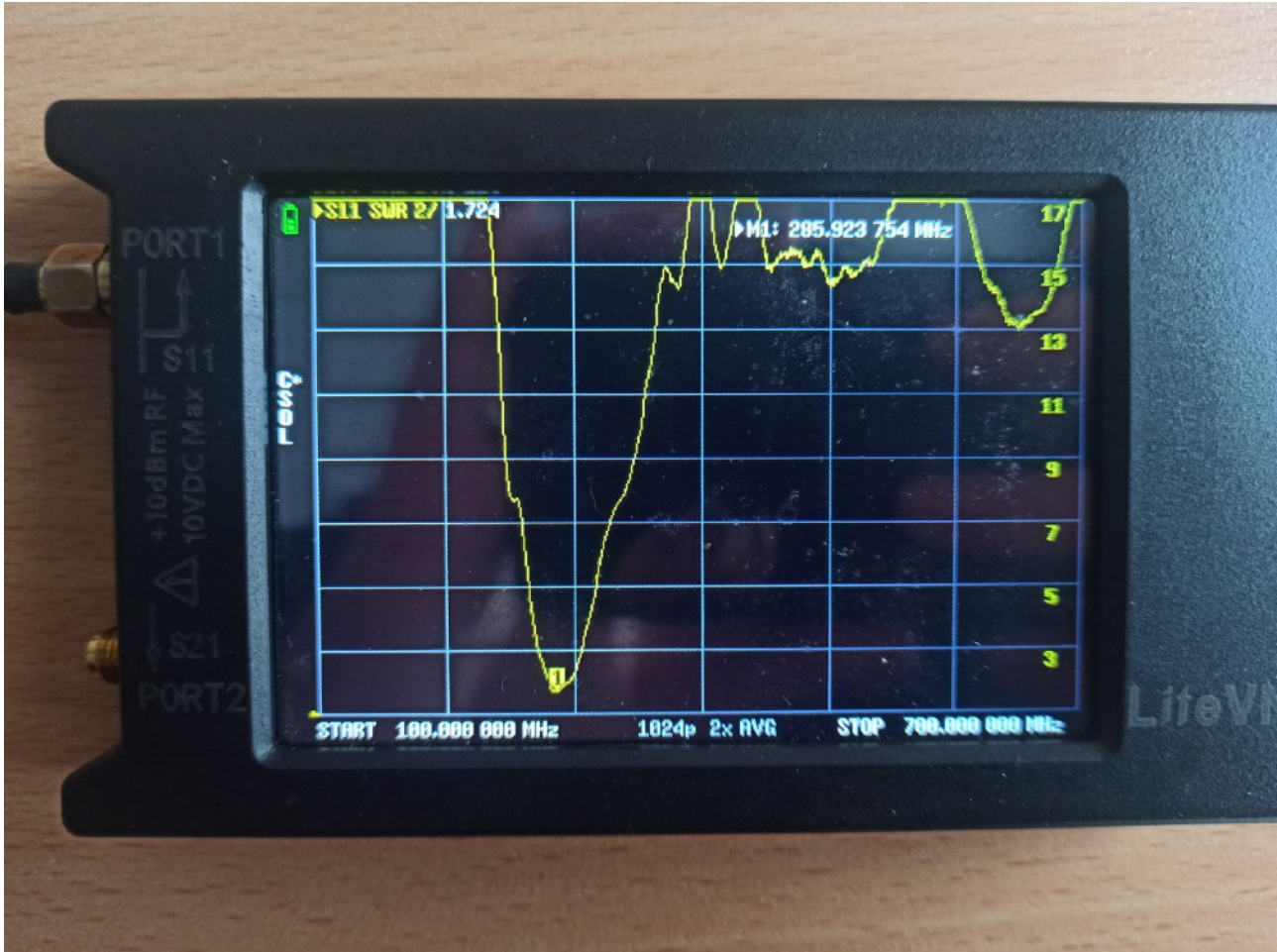


рис.39

Тепер підрізаємо дрiт однаково з обох кiнцiв. 29.5см повна довжина, резонанс 433МГц.

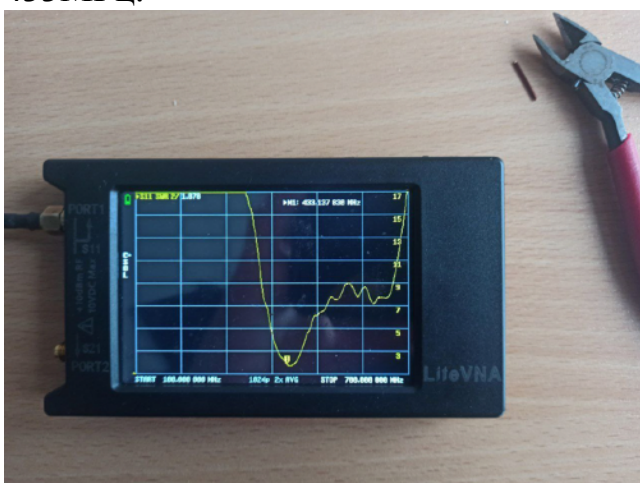


Рис.40

Фото результату підрізання:

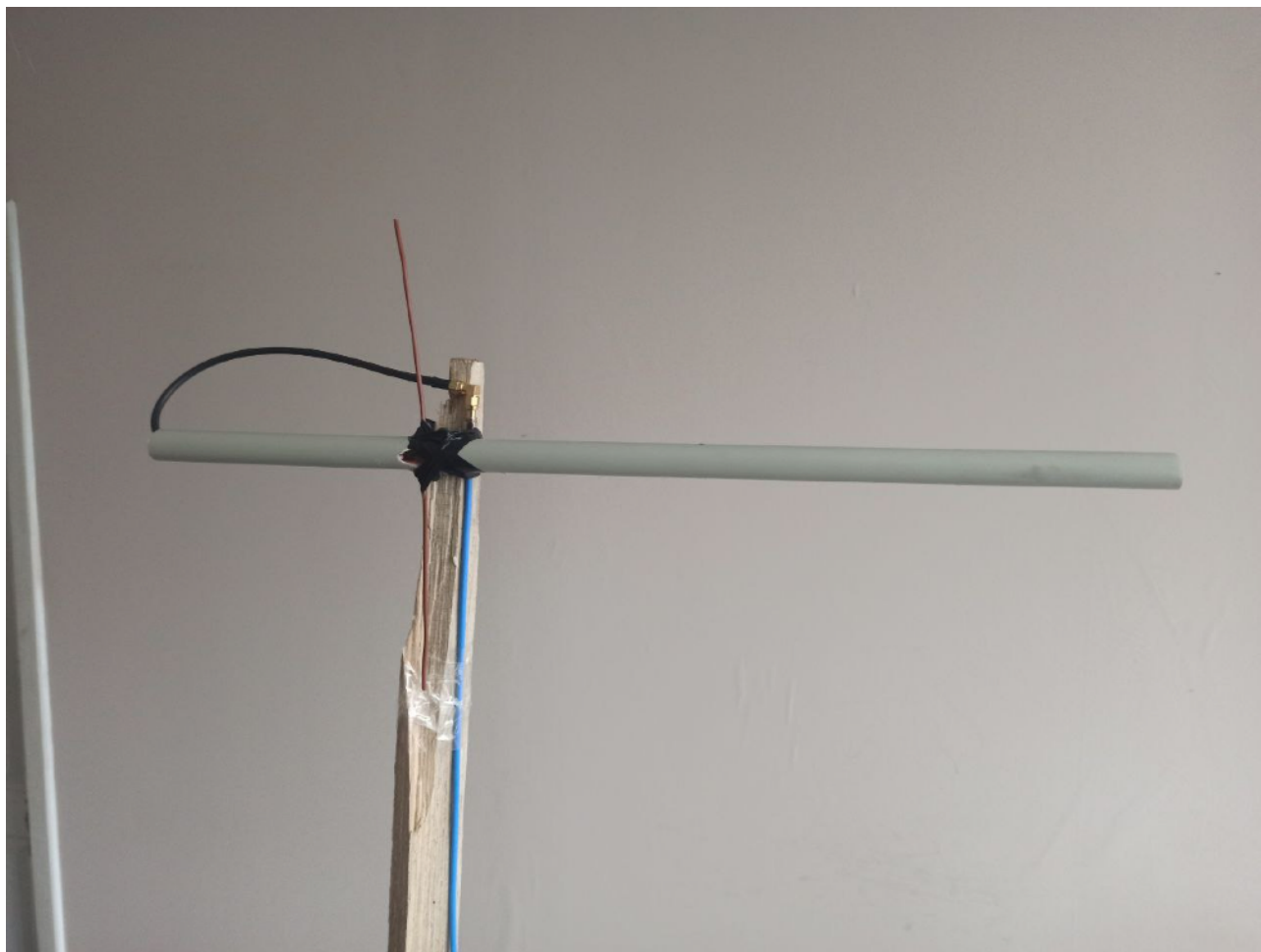


Рис. 41

Далі додаємо рефлектор та директори:

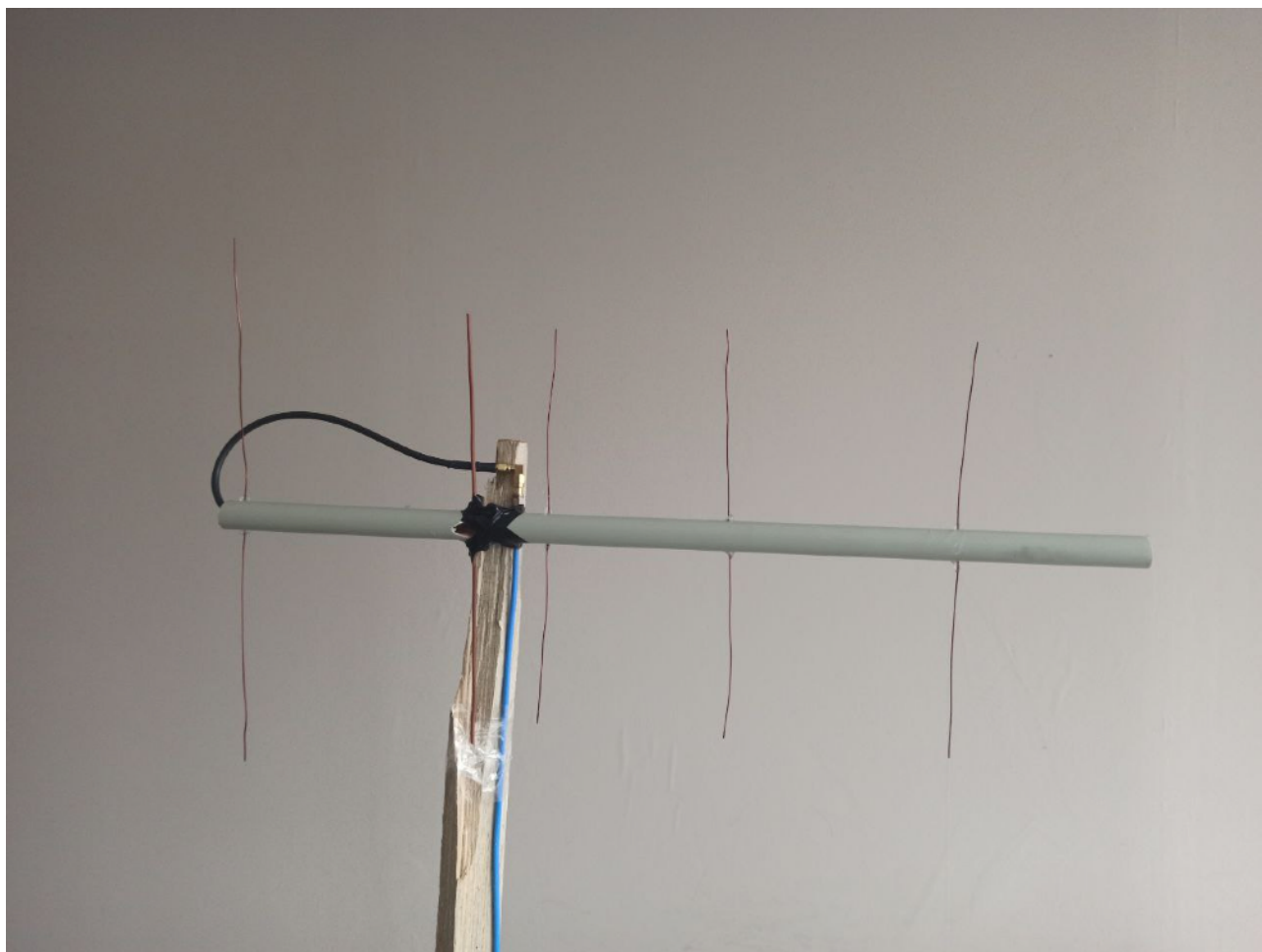


Рис. 42

Остаточні параметри антени: рефлектор - 36см, диполь - 29.5см, директор 1 та директор 2 дорівнюють один одному - 27 см, директор 3 - 26.5 см.

5. Висновки

У ході виконання кваліфікаційної роботи було проведено комплексний аналіз принципів побудови та функціонування бездротових мереж на базі технології LoRa, а також виконано практичну розробку та налаштування антенно-фідерних пристроїв для цього стандарту зв'язку. Теоретичне дослідження підтвердило, що використання методу розширення спектра за допомогою лінійної частотної модуляції (CSS) забезпечує системам LoRaWAN високу завадостійкість та енергоефективність, що є критичним для розгортання масштабованих мереж Інтернету речей (IoT). Детальний огляд апаратної частини трансіверів серій SX127x та SX126x виявив, що ключовим фактором досягнення паспортної дальності зв'язку та чутливості приймача є якісне узгодження радіочастотного тракту. Було встановлено, що відхилення імпедансу від стандартних 50 Ом та високий коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ) призводять до значних енергетичних втрат, які неможливо компенсувати програмними налаштуваннями коефіцієнта розширення (SF) або смуги пропускання.

Практична складова роботи полягала у фізичному моделюванні, виготовленні та інструментальному контролі двох типів антен: ненаправленої (монополь типу «Ground Plane») та направленої (хвильовий канал або антена Удо-Ягі). Вимірювання параметрів проводилися за допомогою векторного аналізатора кіл LiteVNA 64 із застосуванням повного циклу калібрування (Open-Short-Load) для виключення впливу фідерної лінії.

У процесі налаштування ненаправленої антени експериментально підтверджено пряму залежність резонансної частоти від геометричної довжини випромінювача. Шляхом ітеративного вкорочення активного елемента з 20 см до 15,5 см та корекції довжини противаг вдалося змістити резонанс з 315 МГц до необхідної частоти 433 МГц, досягнувши мінімального значення КСХ. Цей етап довів, що навіть найпростіші дротяні антени потребують індивідуального налаштування через вплив матеріалів та конструктивних особливостей монтажу.

При розробці направленої антени на діелектричній основі було реалізовано поетапне налаштування елементів. Визначено, що критичним етапом є узгодження активного напівхвильового диполя (оптимальна довжина склала 29,5 см для резонансу в діапазоні 433 МГц) перед встановленням пасивних елементів. Фінальна конфігурація з рефлектором довжиною 36 см та системою директорів (26,5–27 см) продемонструвала ефективність обраної методики розрахунку та налаштування.

Результати дослідження свідчать, що самостійно виготовлені антени, за умови використання векторного аналізатора для точного підганяння геометричних розмірів, здатні забезпечити необхідні резонансні характеристики для роботи в мережах LoRa. Отримані дані підкреслюють важливість врахування коефіцієнта вкорочення матеріалів та впливу оточуючих предметів при проектуванні антен для діапазонів UHF, оскільки теоретичні розрахунки завжди потребують емпіричної корекції на етапі фізичної реалізації.

Література

1. Wikipedia, “Internet of things,” *Wikipedia*, Mar. 16, 2019. https://en.wikipedia.org/wiki/Internet_of_Things
2. “Low-power wide-area network,” *Wikipedia*, Aug. 25, 2021. https://en.wikipedia.org/wiki/Low-power_wide-area_network
3. “LoRa® and LoRaWAN® AN1200.86 LoRa® and LoRaWAN®,” 2024. Available: <https://www.semtech.com/uploads/technology/LoRa/lora-and-lorawan.pdf>
4. Balanis, Constantine A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 4th Edition, Wiley, 2016.
5. [1]“Long Range, Low Power, 2.4 GHz Transceiver with Ranging Capability,” 2019. Accessed: Dec. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.tme.eu/Document/1042f35a88b6ee421559d19923804032/SX128x.pdf>
6. “Access to this page has been denied.,” *Mouser.com*, 2025. <https://www.mouser.com/datasheet/2/761/sx1276-1278113.pdf?srltid=AfmBOoq3wB0a6TQS6mJPSh64xuUcdOVabEvHQQarvSu1LkJWnBtNhbfPf> (accessed Dec. 05, 2025).
7. LoRaWAN® Specification v1.0.3, “LoRaWAN® Specification v1.0.3,” *Lora-alliance.org*, Sep. 15, 2023. <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/lorawan-specification-v1-0-3>
8. Lea, Perry. *Internet of Things for Architects*. Packt Publishing, 2018.