

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет програмування та комп'ютерних і телекомунікаційних систем

Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

ДИПЛОМНА РОБОТА

Другий (Магістерський)

Освітній рівень

Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації

Шифр і назва спеціальності

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Шифр і назва спеціальності

на тему: «Технологія побудови ефективної безпроводової мережі з використанням протоколу LoRaWAN»

ДРТР.215033.01.01.ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група ТР_м-19-1


підпис

Є.О. Крикун
Ініціали, прізвище

Керівник: д-р техн. наук, доц.


підпис

С.К. Підченко
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, доц.


підпис

С.К. Підченко
Ініціали, прізвище

10.12.2020 р.

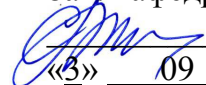
Хмельницький, 2020

Хмельницький національний університет

Факультет програмування та комп'ютерних і телекомунікаційних систем
 Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій
 Освітній рівень другий (магістерський)
 Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації
 Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка
 Освітня-професійна програма Телекомунікації та радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою ТМІТ _____

 _____
 «3» 09 2020 р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Крикуну Євгену Олександровичу

1 Тема роботи: «Технологія побудови ефективної безпроводової мережі з використанням протоколу LoRaWAN»

керівник роботи Підченко Сергій Костянтинівич, д.т.н, доцент
 Затверджено наказом по університету від «1» вересня 2020 р. № 118

2 Строк подання студентом роботи на кафедру: 10.12.2020 р.

3 Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)

Мета роботи: дослідження технології побудови ефективної безпроводової мережі з використанням протоколу LoRaWAN та побудова програмної моделі радіоінтерфейсу.

Об'єкт дослідження: процеси збору інформації від пристроїв мережі LoRaWAN.

Предмет дослідження: технологія мереж LoRaWAN та програмна модель радіоінтерфейсу.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

1. Аналіз ринку широкосмугових безпроводових технологій.
2. Архітектура та технічні характеристики стандарту LoRaWAN.
4. Побудова програмної моделі радіоінтерфейсу стандарту LoRaWAN.
5. Розробити та описати програмне забезпечення.

Завдання отримав  _____

Науковий керівник  _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів (розділів) дипломної роботи	Строк виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	Аналіз літературних джерел	15.09.2020 р.	<i>виконано</i>
2	Написання 1 розділу ДР	25.09.2020 р.	<i>виконано</i>
3	Визначення проблеми дослідження	30.09.2020 р.	<i>виконано</i>
4	Написання 2 розділу	25.10.2020 р.	<i>виконано</i>
5	Розробка моделі	30.10.2020 р.	<i>виконано</i>
6	Написання тез конференції	2.11.2020 р.	<i>виконано</i>
7	Написання 3 розділу ДР	10.11.2020 р.	<i>виконано</i>
8	Теоретичне та практичне моделювання	15.11.2020 р.	<i>виконано</i>
9	Написання 4 розділу ДР	24.11.2020 р.	<i>виконано</i>
10	Оформлення пояснювальної записки до ДР	26.11.2020 р.	<i>виконано</i>
11	Оформлення презентаційних матеріалів	1.12.2020 р.	<i>виконано</i>

Студент


 Підпис

Крикун Є.О.
 Ініціали, прізвище

Керівник роботи


 Підпис

Підченко С.К.
 Ініціали, прізвище

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 АНАЛІЗ РИНКУ ШИРОКОСМУГОВИХ БЕЗПРОВОДОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....	9
1.1 Широкопasmові технології LPWAN.....	9
1.2 Стандарт IEEE 802.15.4.....	11
1.3 Технологія SigFox.....	14
1.4 Технологія вузькопasmового інтернету речей NB-IoT.....	17
1.5 Технологія Weightless P.....	23
1.6 Технологія LoRa.....	25
Висновки до першого розділу.....	28
2 АРХІТЕКТУРА ТА ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАНДАРТУ LORAWAN	29
2.1 Архітектура мережі технології LoRaWAN	29
2.1.1 Кінцеві пристрої мережі LoRaWAN	31
2.1.2 Шлюзи мережі LoRaWAN	32
2.1.3 Мережний сервер LoRaWAN	33
2.1.4 Сервери додатків мережі LoRaWAN	34
2.1.5 Сервер активації кінцевих пристроїв мережі LoRaWAN	35
2.2 Три типи класів кінцевих пристроїв LoRaWAN	35
2.3 Архітектура відкритого протоколу LoRaWAN	41
2.4 Частотний діапазон LoRaWAN	42
Висновок до другого розділу	44
3 МОДЕЛЬ РАДІОІНТЕРФЕЙСУ СТАНДАРТУ LoRaWAN	45
3.1 Формування радіосигналів LoRaWAN з лінійною частотною модуляцією	45
3.2 Синхронізація приймача та приймача в системах LoRa	47
3.3 Детектування широкопasmових радіосигналів з ЛЧМ	49

	5
3.4 Алгоритм роботи приймача	50
3.5 Розрахунок характеристик LoRa	52
Висновки до третього розділу	55
4 РОЗРОБКА ТА ОПИС ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	56
4.1 Опис математичного пакету та мови програмування MATLAB	56
4.2 Розробка програмного забезпечення	56
Висновки до четвертого розділу	63
ВИСНОВКИ	64
Перелік посилань	66

ВСТУП

На теперішній час, концепція інтернет речей (абр. Internet of Things - IoT) завойовує все більше місця в різних галузях народного господарства. При цьому кількість пристроїв за останні роки значно зростає. Так за прогнозами аналітиків, найбільше зростання IoT - пристроїв до 2022 року очікується в таких областях, як: транспорт; логістика; автомобілебудування; охорона здоров'я; сільське господарство та промислового секторі. При цьому, за їх словами, для ефективного використання IoT – рішень та збільшення бізнес – прибутку необхідно використання комплексних базових технологій зі збору даних з сенсорів та їх аналізу в контексті інших даних: довідкової інформації; фінансових даних і т. інш. [1].

Всі існуючі пристрої IoT використовують вихід в мережу інтернет і взаємодіють через неї один з одним. Керування IoT здійснюється через глобальну мережу Інтернет за допомогою відправлення певних команд користувачами цих пристроїв. Економічне підключення пристроїв IoT до Інтернету є важливою проблемою для вбудованих пристроїв із низьким енергоспоживанням, які призначені для конкретного завдання [2].

На сьогодні, у всьому світі, активно впроваджуються та розгортаються широкосмугові мережі з низькими потужностями та швидкостями передачі, які забезпечують покриття великих територій. До таких технологій відносяться LoRaWAN, SigFox, NB-IoT, Weightless та інші комунікаційні технології, що працюють у ГГц діапазонах та успішно забезпечують усі перелічені вище функціональні можливості, однак LoRaWAN привернула найбільшу увагу організацій, спільнот та дослідників і стала популярною технологією LPWAN (англ. Low-power Wide-area Network - «енергоефективна мережа дальнього радіусу дії»), придатною саме для IoT - рішень. Мережі LPWAN мають на меті вирішити проблеми, які можуть бути придатними для широкомасштабного розгортання та підключення кінцевих пристроїв IoT малої потужності.

Технології LPWAN заміняють існуючі безпроводові технології на базі традиційного стільникового зв'язку в таких областях, як контроль вуличного

освітлення, контроль витрати води, газу та електрики, індустриальні автоматизовані технологічні лінії, вендінгові автомати, логістика та т.п. У тих додатках, де необхідно використовувати коміркові мережі, технології LPWAN приходять на зміну системам ближнього радіусу дії на базі ZigBee.

Технології LPWAN працюють в неліцензійному діапазоні частот, та перш за все привабливі тим, що користувачам немає необхідності платити за використання ефіру і патентовані технології.

В Україні найбільш перспективними вважаються два стандарти: NB-IoT і LoRaWAN. На сьогодні національним оператором lifecell сумісно з компанією IoT Ukraine планується національне покриття мережами LoRaWAN всієї території України, яка зможе обслуговувати до 7-10 млн. підключених до неї кінцевих пристроїв [3].

Питанням проектування та побудови ефективних безпроводових мереж LoRaWAN і присвячена дана дипломна робота.

Метою дипломної роботи є: дослідження технології побудови ефективної безпроводової мережі з використанням протоколу LoRaWAN та побудова програмної моделі радіоінтерфейсу.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні задачі:

1. Проведення аналізу ринку широкосмугових безпроводових технологій.
2. Побудувати архітектуру та навести технічні характеристики стандарту LoRaWAN.
4. Побудувати програмну модель радіоінтерфейсу стандарту LoRaWAN.
5. Розробити та описати програмне забезпечення.

Об'єкт дослідження: процеси збору інформації від пристроїв мережі LoRaWAN.

Предмет дослідження: технологія мереж LoRaWAN та програмна модель радіоінтерфейсу.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Запропонована програмна модель радіоінтерфейсу LoRa, яка на відміну від існуючих, враховує умови обміну сигналів безпроводовим каналом

зв'язку між передавальними і приймальними пристроями в мережі.

Практична значимість отриманих результатів:

1. В результаті аналізу сучасного стану M2M – та IoT - мереж виявлено, що широке впровадження даних технологій потребує енергоефективних дешевих каналів радіозв'язку підвищеної дальності. Показано, що використання технології LPWAN (*Low-Power Wide-Area Network*) відкриває нові можливості щодо створення високоефективних, енергоекономічних та дешевих M2M – та IoT - мереж.

2. Запропонований та досліджений алгоритм обробки сигналів LoRa-приймачем пристрою IoT - мережі. Відмінність даного алгоритму полягає у використанні ЛЧМ - сигналів з великою базою $B \gg 1$, що суттєво підвищує завадостійкість радіоканалу передачі даних.

3. В середовищі MATLAB розроблене програмне забезпечення для аналізу характеристик каналу передачі даних LoRa - мережі, яке дозволяє проводити вибір параметрів ЛЧМ - модуляції в залежності від величини допустимої смуги пропускання радіоканалу.

Апробація результатів дослідження: Результати досліджень представлені у вигляді доповіді на науково-практичній інтернет - конференції молодих науковців і студентів «Інтелектуальний потенціал-2020».

Дипломна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків до кожного розділу, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 67 сторінок комп'ютерного тексту, у тому числі: 37 рисунків, 5 таблиць, список використаних джерел вміщує 22 найменування.

1 АНАЛІЗ РИНКУ ШИРОКОСМУГОВИХ БЕЗПРОВОДОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

1.1 Широкопсмугові технології LPWAN

Сьогодні один з основних напрямків розвитку безпроводових M2M –та IoT - мереж пов'язаний з розвитком енергоефективності мереж з дальнім радіусом дії LPWAN. Дешеві, економічні мобільні пристрої LPWAN, що працюють в неліцензованому діапазоні частот, можна розбити на два основні класи [4]:

- технологія над широкопсмугового зв'язку (Ultra Wide Band), що мають смугу для одного каналу шириною більше 100 кГц, наприклад LoRa;
- вузькопсмугові (Narrow Band), смуга одного каналу, якого займає ширину менше 100 кГц, наприклад SIGFOX.

Розрізняють технології LPWAN, які розвиваються переважно операторами стільникового зв'язку під егідою Асоціації GSM і в рамках консорціуму 3GPP, і використовують ліцензований спектр - LTE-M, NB-IoT і EC-GSM-IoT.

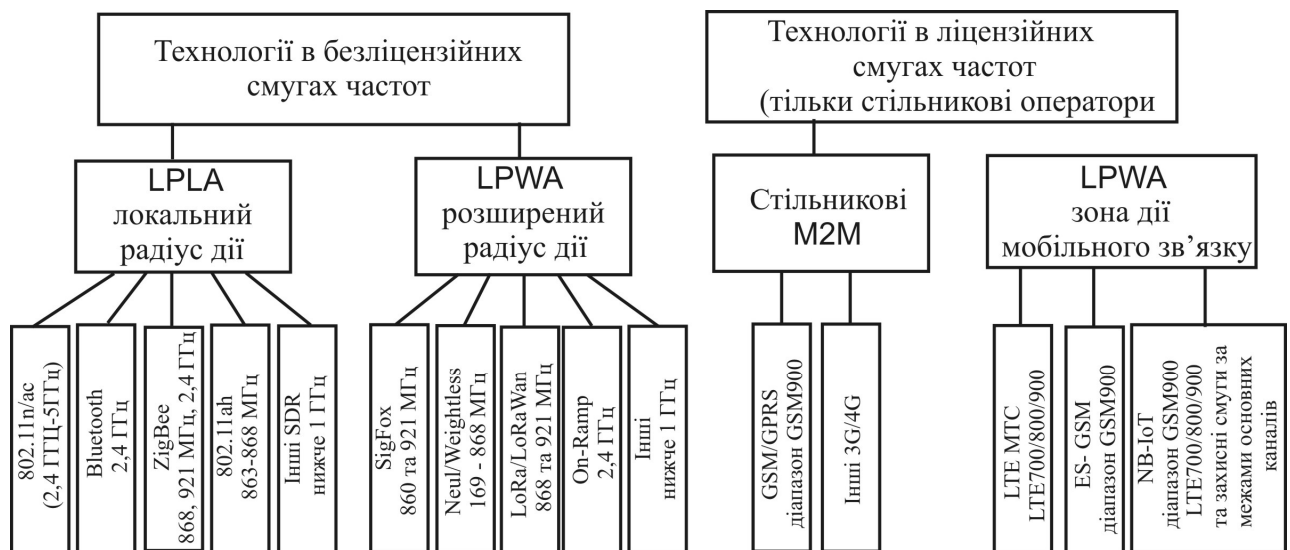
За прогнозами IDTechEx, до 2024 р. до мереж LPWAN буде підключено близько 12 млрд. пристроїв. Основні області застосування таких технологій включають «розумні» будинки і міста, відстеження активів і сільське господарство.

До пристроїв, призначених для використання в проектах M2M (англ. Machine-to-machine) і IoT, пред'являється ряд спеціальних вимог. Найбільш важливі з них - мінімальне енергоспоживання при оптимальній функціональності. Пристрої подібного типу, що діють на автономних батареях, повинні забезпечувати роботу без заміни джерела живлення протягом кількох років. Важливе значення мають і інші чинники, зокрема обсяг і періодичність інформації, що передається, швидкість передачі, радіус дії мережі, топологія, дуплекс або симплекс, кількість пристроїв в мережі, мережева інфраструктура в даному регіоні, сукупна вартість пристрою, монтажу і експлуатації та інші.

Мережі LPWAN мають на меті вирішити проблеми, які можуть бути придатними для широкомасштабного розгортання та підключення кінцевих пристроїв IoT малої потужності. Загальними характеристиками LPWAN, що відрізняють їх від інших технологій традиційних телекомунікаційних мереж є [2]:

- мале енергоспоживання підключених мережевих та пристроїв IoT при високій швидкості – більше 500 метрів;
- невелика вартість використання та обслуговування каналу зв'язку;
- усі пристрої та додатки системи потребують потужного механізму безпеки;
- можливість побудови мереж в приміщеннях та забезпечення стійкого зв'язку;
- необхідність забезпечення завадостійкості передачі та використання потужної модуляції при розгортанні мереж в щільно забудованих територіях;
- наявність сервера обробки та аналізу даних отриманих з інформаційних та вимірювальних сенсорів.

Використання радіочастотного спектру мережами LPWAN наведено на рисунку 1.1.



LPWA (Low Power Wide Area) – Низько енергоефективна мережа дальньої дії

LPLA (Low Power Local Area) – Низько енергоефективна мережа локальної дії

Рисунок 1.1 - Використання радіочастотного спектру мережами LPWAN

1.2 Стандарт IEEE 802.15.4

Стандарт IEEE 802.15.4 [4] – це серія безпроводових протоколів.

Стандарт IEEE 802.15.4 розроблений ZigBee Alliance (www.zigbee.org) та визначає фізичний рівень РНУ та рівень керування доступом до середовища MAC для безпроводових персональних мереж, які працюють з низькою швидкістю і пристроїв з мінімальним енергоспоживанням. Стандарт підтримується робочою групою IEEE 802.15.

При розробці цього стандарту враховувалися дві основні мети - мінімальна вартість і гранично низьке енергоспоживання.

Базові радіотехнології і протоколи 802.15.4 описані в стандарті 802.15.4b, де вказані діапазон частот, тип модуляції, структура пакетів, правила формування контрольної суми, способи запобігання колізій і т. п.

Стандарт IEEE 802.15.4 описує два нижніх рівня моделі OSI: фізичний рівень (РНУ) і рівень управління доступом до радіоканалу (MAC layer) для трьох не ліцензованих діапазонів з центральними частотами: 2,4 ГГц, 915 і 868 МГц (рисунок 1.2). У цих частотних інтервалах для обміну даними зарезервовано 27 каналів.

В стандарті 802.15.4 додатково розглянуті рівень управління логічної передачею даних (LLC) і підрівень конвергенції спеціальних сервісних функцій (SSCS), які призначені для узгодження різних технологій. На фізичному рівні 802.15.4 (РНУ) визначаються основні параметри приймачів, включаючи методи кодування / декодування і механізми, призначені для забезпечення необхідної швидкості передачі в залежності від середовища.

Використовуваний в технології 802.15.4 метод модуляції DSSS (англ. Direct Sequence Spread Spectrum – розширення спектру методом прямої послідовності) відрізняється високою надійністю зв'язку, стійкістю до шумів і наведень. Тому пристрої 802.15.4 можуть впевнено працювати в районі потужних передавачів інших стандартів діапазону 2,4 ГГц.

У діапазонах 868 і 915 МГц допустимо застосування як двійкової, так і квадратурної фазової маніпуляції з можливістю динамічного перемикавання між частотними шарами, що підтримуються.

Обов'язки рівня мережевого рівня (NWK) ZigBee (рисунок 1.2) повинні включати механізми, що використовуються для [5]:

- приєднання та виходу з мережі;
- захисту кадрів;
- маршрутизації кадрів за призначенням;
- виявлення та підтримки маршрутів між пристроями;
- виявлення сусідніх прийомо- передавачів в межах одного стрибка;
- зберігання відповідної інформації про мережу та ключі безпеки.

Також рівень NWK відповідає за роботу координатора ZigBee, формування нової мережі, коли це доречно, і присвоєння адрес новим пов'язаним пристроям [5].

Шар додатків ZigBee представляє користувальницький інтерфейс, і він складається з трьох основних компонент (рисунок 1.2) [5]:

- підрівню підтримки додатків APS (англ. application support sublayer), що забезпечує інтерфейс між мережею та додатком та контролює і управляє даними, що надсилаються та отримуються іншими рівнями протоколу. Також APS забезпечує належну передачу та шифрування пакетів;

- визначений виробником об'єкт додатків ZDO (англ. ZigBee Device Objects), який відповідальний за процедури ініціалізації APS та мережевого рівня ZigBee для визначення служб та нових вузлів у мережі;

- фреймворк додатків AF (англ. Application Framework), середовище виконання для «об'єктів додатків», кожний з яких ідентифікований адресою кінцевої точки від 1 до 254 (0 зарезервовано для ZDO, 255 для широкомовних повідомлень). Об'єкти додатків зазвичай реалізуються різними виробниками. З метою підвищення сумісності продуктів ZigBee Alliance опублікував різні профілі додатків. Найпоширеніші з них - це автоматизація будинку, розумна енергія, системи освітлення та зелена потужність [6].



Рисунок 1.2 – Архітектура стеку ZigBee

У діапазонах 868 та 915 МГц допустимо застосування як двійкової, так і квадратурної фазової маніпуляції (QPSK) з можливістю динамічного переключення між частотними шарами, що підтримуються.

Ортогональна маніпуляція O-QPSK передбачає енергозощадливі методи переключення потужностей передавача.

Метод CSMA-CA (ймовірнісний мережний протокол каналного (MAC) рівня) технології ZigBee, дозволяє встановлювати зв'язки між сенсорами без колізії по одному каналу з кількома пристроями в різні інтервали часу. Мобільні пристрої, які працюють за стандартом 802.15.4 передають кілька разів у сутки невеликі за об'ємом пакети даних.

У стандарті 802.15.4 розглядаються два типи пристроїв різної складності [5].

1. Повністю функціональний пристрій (англ. FFD - Full Function Device) може приймати і передавати дані, у тому числі і чужі, за ланцюжком.

2. Пристрій з обмеженим набором функцій RFD (англ. Reduced Function Device) - найпростіший тип, який може тільки вести переговори з пристроєм - координатором. При об'єднанні в мережі пристрій RFD може працювати тільки в топології «зірка». Люба мережа повинна мати, по крайній мірі один FFD - пристрій, який діє як координатор мереж.

Технології 802.15.4 залежать від потужності передавача, середовища поширення сигналів та пристроїв малої і середньої потужності, які можуть працювати в межах від 10 до 75 м. Більш потужні пристрої (100 мВт), здатні працювати в зоні прямої видимості у відкритому просторі на відстані до 1000 м [7].

1.3 Технологія SigFox

SIGFOX є приватною компанією, яка спрямована на створення всесвітньої мережі, спеціально розробленої для підключення до неї пристроїв Інтернет речей - IoT [8].

Технологія дозволяє здійснювати передачу даних на далекі відстані, використовуючи малі потужності передавального пристрою і батареї малої ємності. Мережа відмінно підходить для простих і автономних пристроїв, які посилають невелику кількість даних в цю мережу. Стандарт SigFox визначає максимальну кількість повідомлень від базової станції до кінцевого пристрою в день: 140 повідомлень, кожне з яких не більше 12 байт, не враховуючи заголовку та інформації про передачу. І в зворотному напрямку від кінцевого пристрою – 4 повідомлення в день розміром 8 байт. Швидкість передачі в мережі обмежена 100 біт/с [7].

Мережа SIGFOX схожа за своєю архітектурою із стільниковою інфраструктурою (GSM- і GPRS-3G-4G), однак є більш енергоефективною і в той же час менш витратною. SIGFOX використовує ультра-вузьку смугу частот- 100 Гц на канал UNB (англ. Ultra Narrow Band), на основі безпроводової технології для підключення пристроїв до глобальної мережі. Використання UNB - ключовий фактор у забезпеченні дуже низького рівня потужності передавача, який використовується під час стану підтримки з'єднання надійних даних поміж пристроями IoT [8].

Мережа працює в неліцензованому промисловому, науковому, та медичному діапазоні ISM [9] (рисунок 1.3,а) (англ. The industrial, scientific and medical) в глобальному масштабі і співіснує в цих частотах з іншими радіотехнологіями без проблеми перекриття мережі або проблеми пропускну здатності (рисунок 1.3,б).

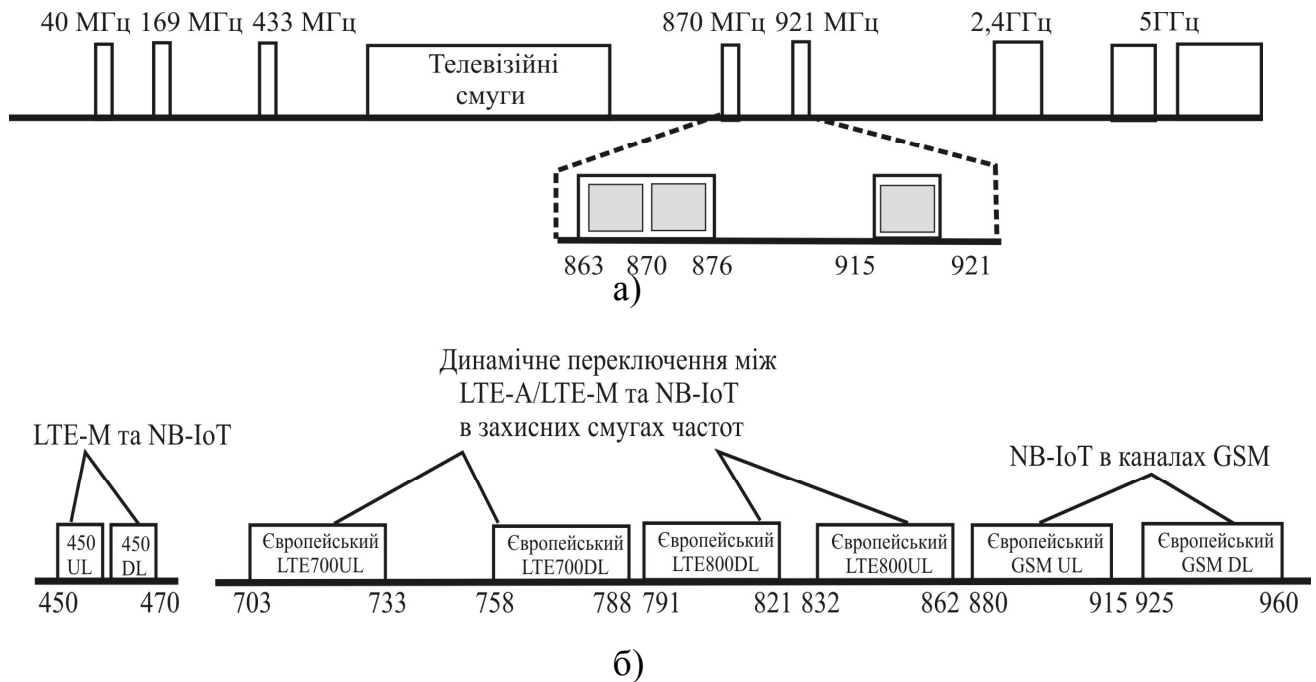


Рисунок 1.3 – Використання спектру LPWAN: неліцензійні смуги частот (а); ліцензовані смуги частот до 1 ГГц

В Європі широко використовується діапазон 868,8 МГц, як визначено Європейським інститутом телекомунікаційних стандартів ETSI (англ. European Telecommunications Standards Institute) і Європейською конференцією адміністрацій поштових служб та служб зв'язку СЕРТ (англ. Conference of European Post and Telecommunications), а в США 902 МГц, як визначено FCC (англ. Federal Communications Commission) (таблиця 1.1) [10].

Зона дії мережі SIGFOX складає біля 30–50 км у сільській місцевості та в міських районах з невеликими забудовами. В районах з шумом та великими забудовами цей діапазон знижується в межах від 3 до 10 км [8].

Таблиця 1.1 – Діапазони частот SIGFOX в різних країнах

	RC1	RC2	RC3	RC4
Частота	868 МГц	902 МГц	923 МГц	920 МГц
Вихідна потужність	14дБм	22дБм	14дБм	22дБм
Країни	Європа Близький Схід Африка	Північна Америка Бразилія	Японія	Азія Південна Америка

На рисунку 1.4. наведена топологія мережі технології SIGFOX [10]. Дана мережа побудована за топологією «зірка» на основі коміркової інфраструктури, є високопродуктивною та з низьким споживанням енергії. В такій мережі кінцеві пристрої підключаються до центральної базової станції.

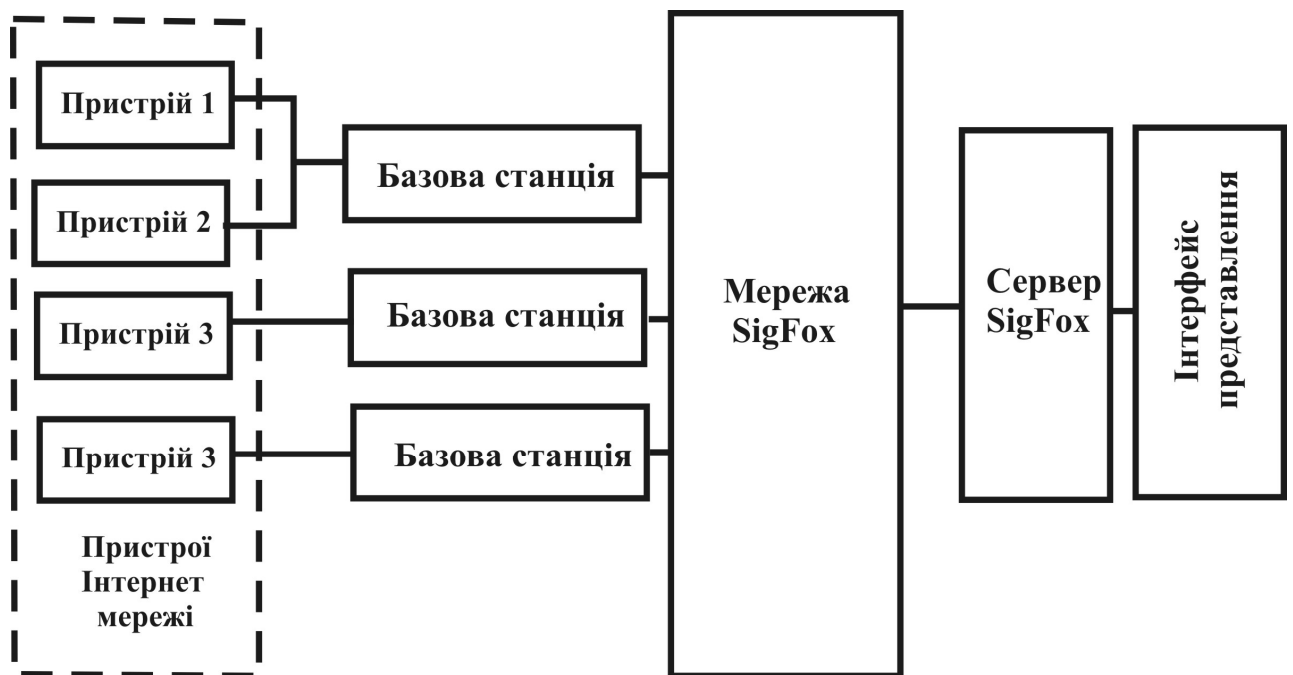


Рисунок 1.4 – Архітектура мережі технології SIGFOX

Вузли в мережі SIGFOX працюють у двох конфігураціях [10]:

1. Режим «точка-точка» (P2P) прямого зв'язку між вузлами, які використовують інтерфейс LAN.

2. Гібридний режим, в якому використовуються з'єднання «точка-точка» (P2P) прямого зв'язку між вузлами P2P та SIGFOX шлюзи.

У режимі P2P, вузли можуть підключатися один до одного і відразу відправляти безкоштовні повідомлення, не використовуючи платні транзитні канали. При цьому, швидке створення вторинних мереж не вимагає зміни прошивки. Достатньо використати команди поточної бібліотеки.

У гібридному режимі, де використане поєднання SIGFOX і P2P режимів, відправляються тільки певні повідомлення через мережу, в якій один вузол працює в якості шлюзу мережі (режим P2P + SIGFOX), а інші вузли в режимі «точка-точка».

Мережі SIGFOX використовуються в ряді додатків, які включають в себе: автоматизацію будинків; споживчі товари; інтелектуальний облік в енергетичних комунікаціях; додатки mHealth; транспорт та технічне управління; віддалений моніторинг та контроль; додатки безпеки.

Стандарт має ряд переваг в порівнянні з іншими базовими технологіями LPWAN мереж. Це велика зона покриття; висока проникаюча здатність; низьке енергоспоживання - до 20 років роботи сенсора від 2-х акумуляторів AA; низька вартість.

До недоліків мереж SIGFOX слід віднести: низьку швидкість передачі даних; залежність від стільникового інфраструктури та обмежену стійкість.

1.4 Технологія вузькосмугового інтернету речей NB-IoT

Стандарт стільникового зв'язку NB-IoT (англ. Narrow Band Internet of Things), або, іншими словами стандарт LTE-Cat.M2, призначений для збору даних пристроїв телеметрії з малим обсягом обміну даними та охоплює широкі зони обслуговування. Високонадійні, безпечні мережі стандарту NB-IoT можна швидко модернізувати, вони мають низьке енергоспоживання та гарантований строк служби від одного акумулятора без заміни до 10 років [10].

NB-IoT, що потребує ліцензування, розширюють область від стільникового зв'язку до області інтернет – речей та ідеально відповідають вимогам ринку LPWAN.

Дана технологія дозволяє операторам працювати з традиційними напрямками IoT: промисловий IoT; проекти «розумний будинок» і «розумне місто»; інтелектуальні системи обліку та системи електронної охорони здоров'я, завдяки їх низької вартості. Тобто стандарт NB-IoT, який є різновидом вузькосмугових безпроводових глобальних мереж, призначений в першу чергу для додатків M2M.

Стандарт NB-IoT – розширення стандарту LTE (LTE Advanced Pro) за угодою 3GPP (Release 13), з 2016 року і по сьогодні проходить тестування.

Багато чого, NB-IoT перейняв у стандарту LTE. Так стандарт LTE використовує принцип поділу каналів OFDM з рознесеними підносійними на 15 кГц. В напрямку від базової станції DL (англ. Downlink) використовується OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing), а в напрямку на базову станцію UL (англ. Uplink) - SC-FDMA (англ. Single-Carrier Frequency Division Multiple Access). Уся носійна в LTE розділена на ресурсні блоки RB (англ. Resource block), кожний з яких складається з 12 підносійних загальною смугою 180 кГц. Кожний ресурсний блок розділений на $12 \times 7 = 84$ ресурсних елементи RE (англ. Resource element) [11,12].

Особливістю мереж NB-IoT являється можливість роботи при більш низьких рівнях сигналу і при високому рівні шумів. NB-IoT призначений тільки для передачі коротких повідомлень, і від нього не вимагається передача аудіо-відео контенту, великих файлів і іншого.

Виходячи з цього, на фізичному рівні є певні особливості, які допомагають забезпечити необхідні характеристики [11]:

- загальна смуга для NB-IoT обмежена в один RB шириною в 180 кГц;
- безпроводовий тракт користувачького пристрою має всього одну антену, приймач і передавач;
- передача і прийом відбувається в напівдуплексному режимі;

- можливість передавати в напрямку на базову станцію UL на одній підносійній;

- використовувані типи модуляції BPSK і QPSK, на відміну від стандарту LTE, де використовуються модуляції вищого порядку;

- використання повторної передачі сигналу (англ. coverage enhancement).

Для NB-IoT використовуються наступні діапазони: 800 МГц; 900 МГц та 1800 МГц.

Існує три способи виділення частотного ресурсу для передачі NB-IoT [12]:

1. Виділений частотний канал шириною в 200 кГц. Цей найбільш ефективний варіант для роботи NB-IoT, але і найбільш витратний за рахунок використання цінного спектру від 300 до 600 кГц. Але при такому варіанті роботи пристроїв NB-IoT взаємні інтерференції з іншими технологіями мінімальні (рисунок 1.5).

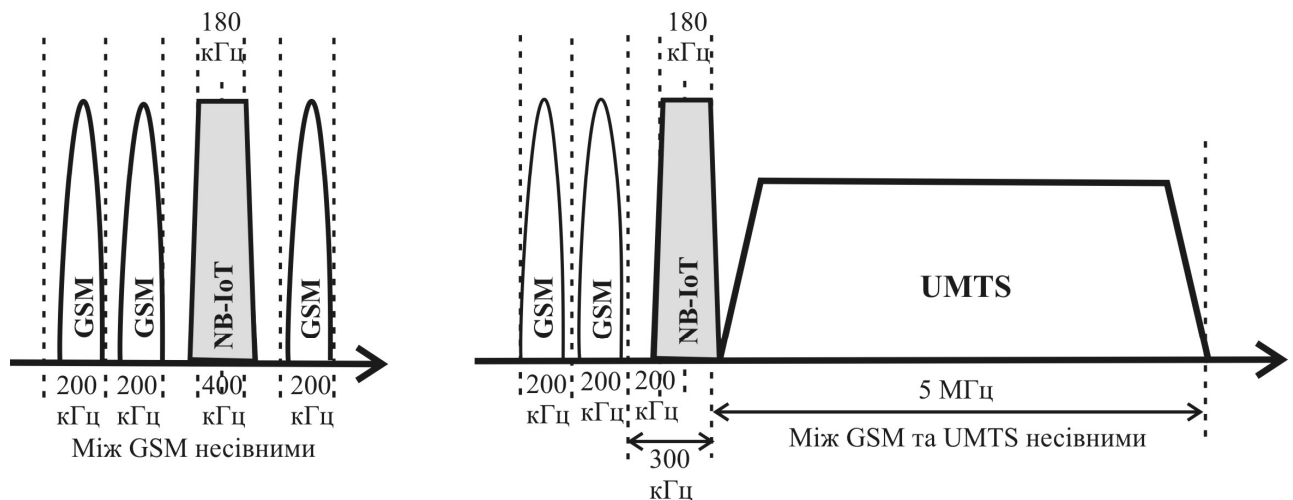


Рисунок 1.5 – Розміщення NB-IoT в окремому діапазоні частот

2. Для роботи пристроїв NB-IoT виділяються ресурси всередині існуючої носійної LTE діапазону. При цьому, носійна NB-IoT на 6дБ вища за потужність пристроїв LTE. Такий варіант роботи економить частотний ресурс, але при цьому є проблема взаємного впливу з LTE-мережею (рисунок 1.6).

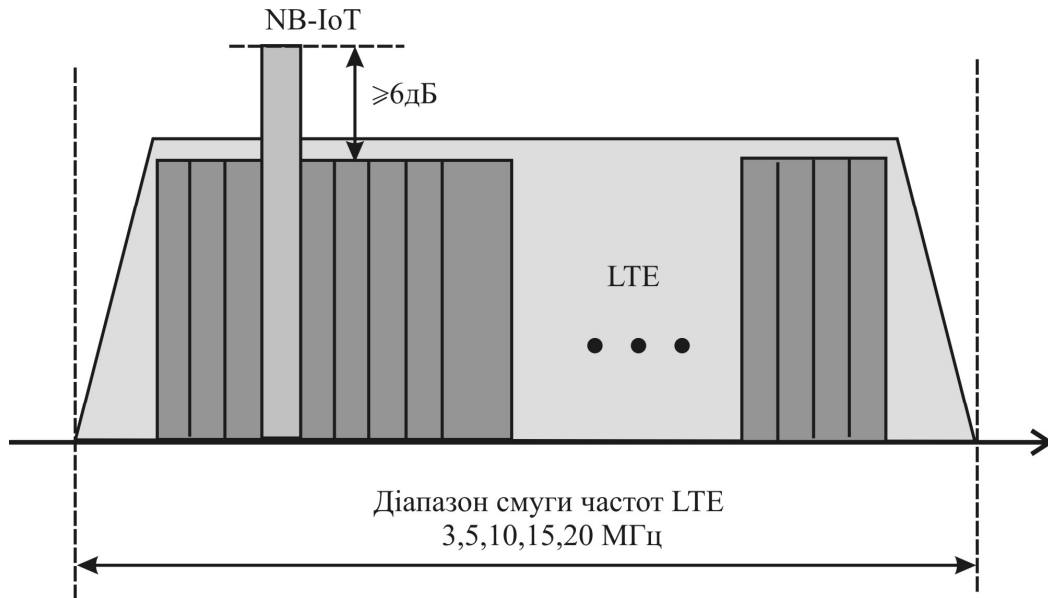


Рисунок 1.6 – Розміщення NB-IoT в діапазоні смуги частот систем LTE

3. Робота NB-IoT мережі в захисному інтервалі в смузі LTE, в межах захисного інтервалу спектру 500 кГц. Так як і в другому режимі (рисунок 1.6) для більшої дальності NB-IoT- носійна має підвищену потужність на 6-9 дБ в порівнянні з ресурсними блоками LTE (рисунок 1.7). Розміщення смуги NB-IoT в захисному варіанті дозволяє заощадити частотний ресурс та зменшити взаємний вплив з LTE мережею. Але у цьому випадку погіршуються параметри позасмугових випромінювань для LTE.

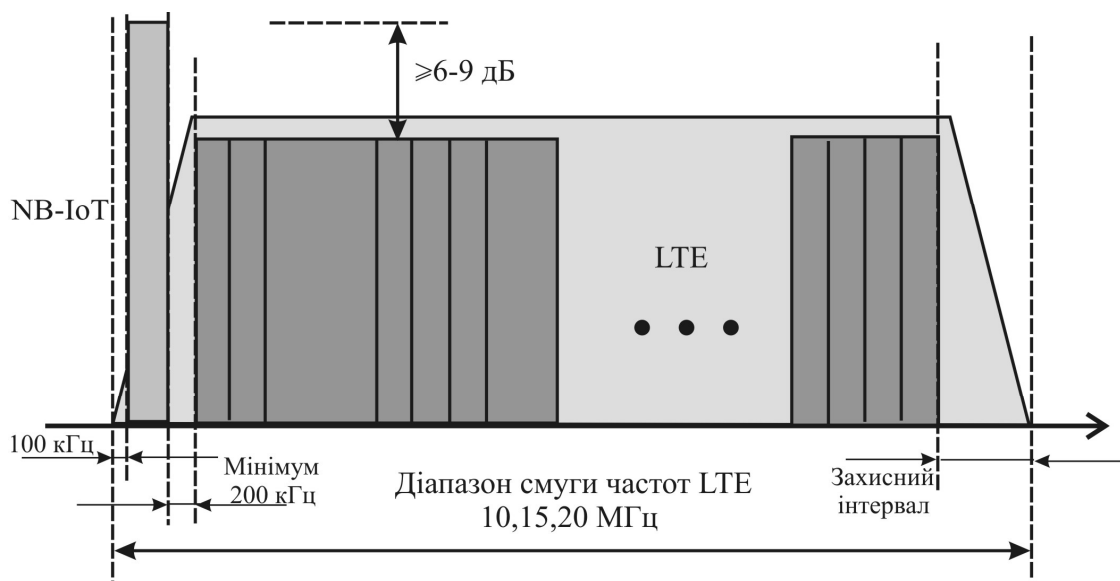
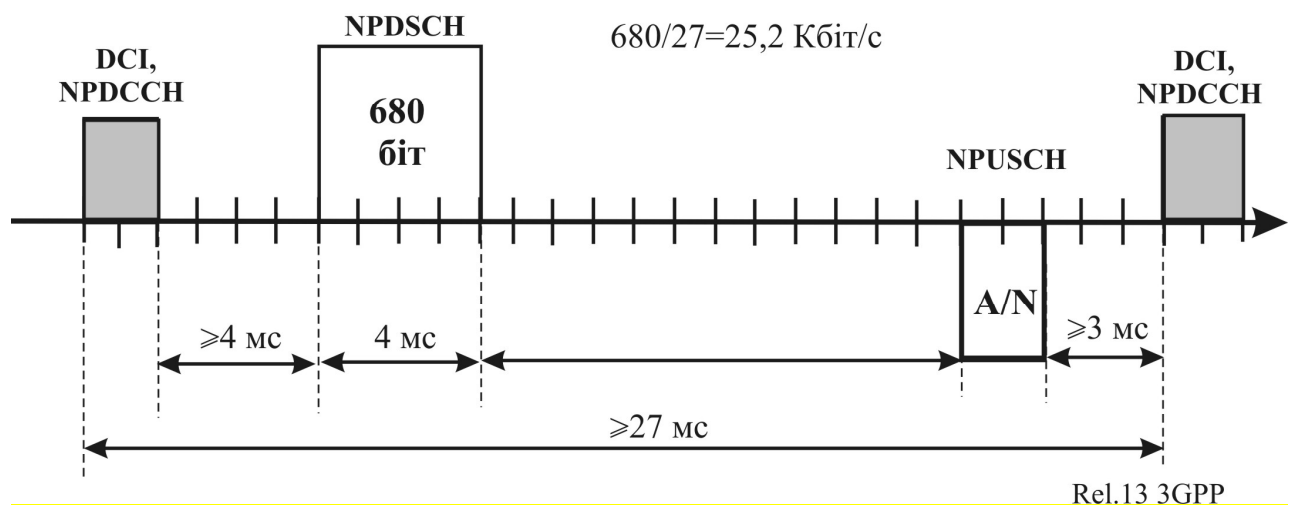


Рисунок 1.7 – Розміщення NB-IoT в захисному інтервалі частотного ресурсу LTE

Швидкості передачі в NB-IoT також залежать від багатьох факторів. Більша швидкість передачі інформації між пристроями досягається за умови хорошої якості сигналу. Неадаптований, як в LTE, сигнальний обмін на призначення каналу на відповідь від серверу, також вносить свої корективи в отримання максимальної швидкості.

За стандартом NB-IoT пристрій передає всього одне-два коротких повідомлення, і в цьому випадку не зовсім однозначно, що розуміти під швидкістю передачі.

В релізі 13 3GPP наведені приклади розрахункових швидкостей від базової станції (DL) для користувача (рисунок 1.8).

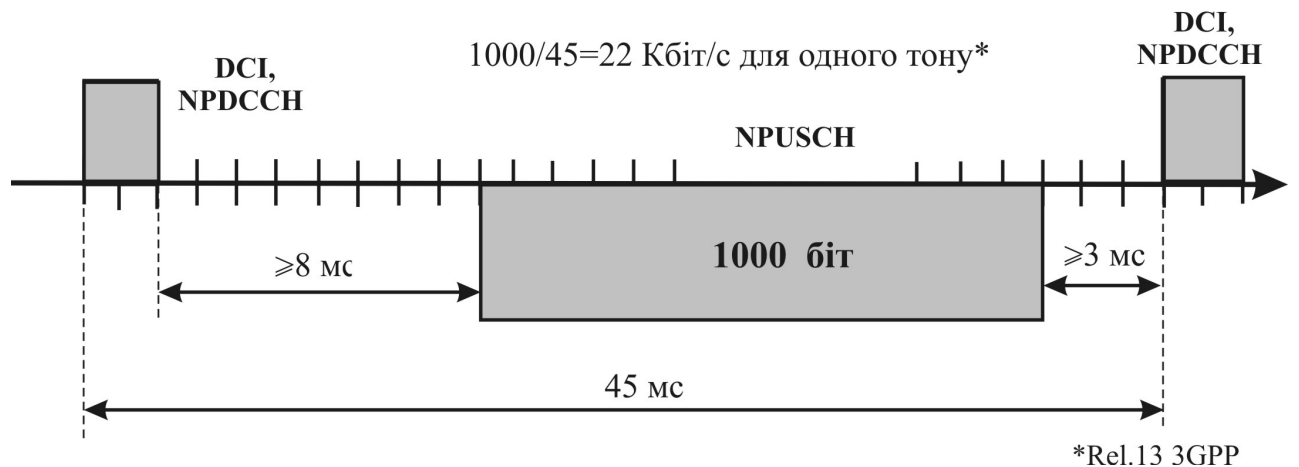


NPDCCH (англ. Narrowband Physical Downlink Control Channel) – фізичний канал керування лінії «вниз»; NPDSCH (англ. Narrowband Physical Downlink Shared Channel) – фізичний канал з поділом користувачів; NPUSCH (англ. Narrowband Physical Uplink Shared Channel) – фізичний канал з поділом користувачів лінії «вверх»)

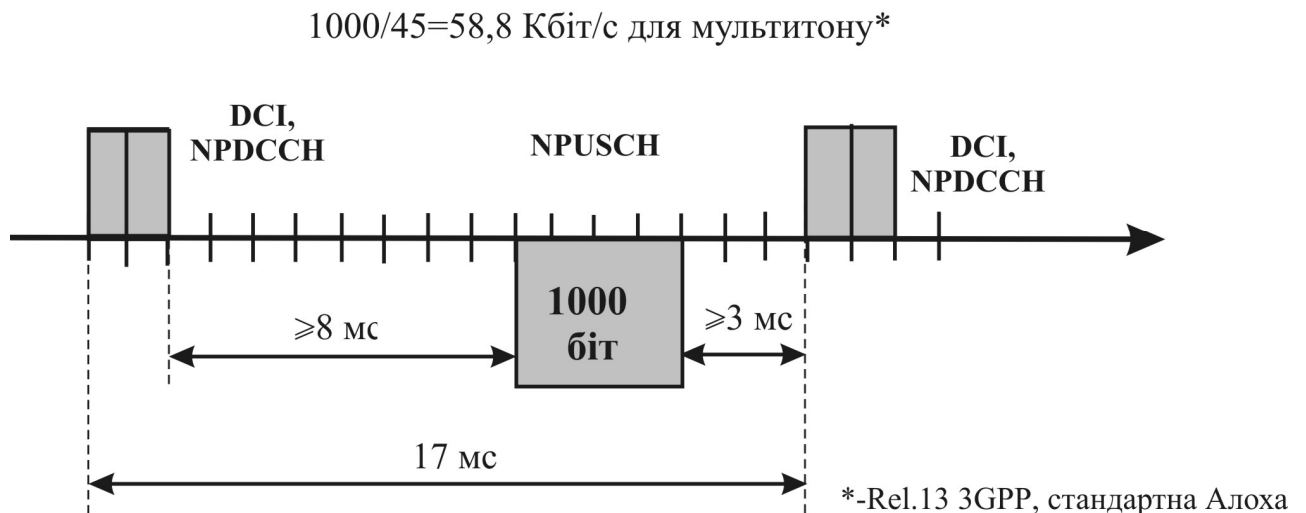
Рисунок 1.8 – Швидкість передачі в напрямку від базової станції

З рисунка 1.8,а видно, що в NB-IoT, на відміну від LTE, призначений для користувача пристрій не може зайняти весь доступний радіо-ресурс для передачі інформації. І решту радіо-ресурсу базова станція може використовувати для зв'язку з іншими пристроями. Аналогічна ситуація

складається в напрямку «вверх», від користувацького пристрою (рисунок 1.8, б).



а)



б)

Рисунок 1.9 – Швидкість передачі в напрямку «вверх», від користувацького пристрою: для одиночного сигналу (а); для багатотонального сигналу (б)

Як видно з вищеприписаного, мережі NB-IoT можливо розгорнути в існуючих частотних діапазонах, в яких сьогодні працює стандарт GSM, після його переходу в LTE, або в «захисних» інтервалах між мережами GSM та LTE. Швидкість передачі даних в NB-IoT сягає 200 кбіт/с. Така швидкість передачі інформації є достатньою для пристроїв NB-IoT, які періодично передають однотипні данні невеликих обсягів.

1.5 Технологія Weightless P

Weightless - являє собою відкритий стандарт надсмугового зв'язку UNB призначений для мереж LPWAN підвищеної потужності просувається під торговою маркою Weightless («невагомий»). Лідером розробки стандарту Weightless стала промислова IoT компанія Ubiik [13].

«Невагомий» - це стандарт безпроводового зв'язку у державних або приватних мережах із кінцевими пристроями, що мають відношення до «Інтернету речей» (IoT) з обмеженою пропускнуою здатністю та невимушеними затримками. Стандарт, в даний час визначений для роботи в діапазонах частот: 138 МГц; 433 МГц; 470 МГц; 780 МГц; 868 МГц; 915 МГц та 923 МГц та робить акцент на надзвичайно широку зону покриття замість високих швидкостей передачі даних [14].

У спеціальній групі інтересів Weightless (англ. Special Interest Group, SIG) пропонується три різних протоколи - Weightless-N, Weightless-W, і Weightless-P, які підтримують різні форми і варіанти використання [13].

Weightless-P це вузькосмугова технологія LPWAN для IoT-рішень, яка потребує високої щільності кінцевих пристроїв та має довгострокову службу батареї при двосторонньому зв'язку.

На відміну від Weightless-N і Weightless-W, протокол Weightless-P не потребує температурної компенсації кварцового генератора (англ. Temperature Compensated Crystal Oscillator, TCXO) через широкий діапазон [13].

Визначальними характеристиками Weightless-P є наступні [14]:

- 100% двоспрямований, надійний зв'язок;
- оптимізований для великої кількості низькоскладних кінцевих пристроїв з асинхронним зв'язком, де домінують висхідні лінії зв'язку, з короткими розмірами корисного навантаження (зазвичай <48 байт)
- оптимізований для споживання наднизького енергоспоживання;
- стандартна швидкість передачі даних від 0,625 кбіт / с до 100 кбіт / с;
- типова потужність передачі кінцевого пристрою 14 дБм (до 30 дБм);

- типова потужність передачі базової станції 27 дБм (до 30 дБм).

Невагомі мережі Weightless-P складаються з таких елементів (рисунок 1.9):

- кінцеві пристрої: вузли з яких отримується інформація у не складній та не вартійній мережі, зазвичай з низькою тривалістю робочого циклу;

- базові станції - центральний вузол у кожній комірці, з яким усі кінцеві пристрої взаємодіють через топологію зірки;

- мережа базових станцій мережі: з'єднує всі базові станції єдиної мережі для управління розподілом радіоресурсів та плануванням у мережі, а також обробляє автентифікацію, роумінг та планування електромагнітним випромінюванням.

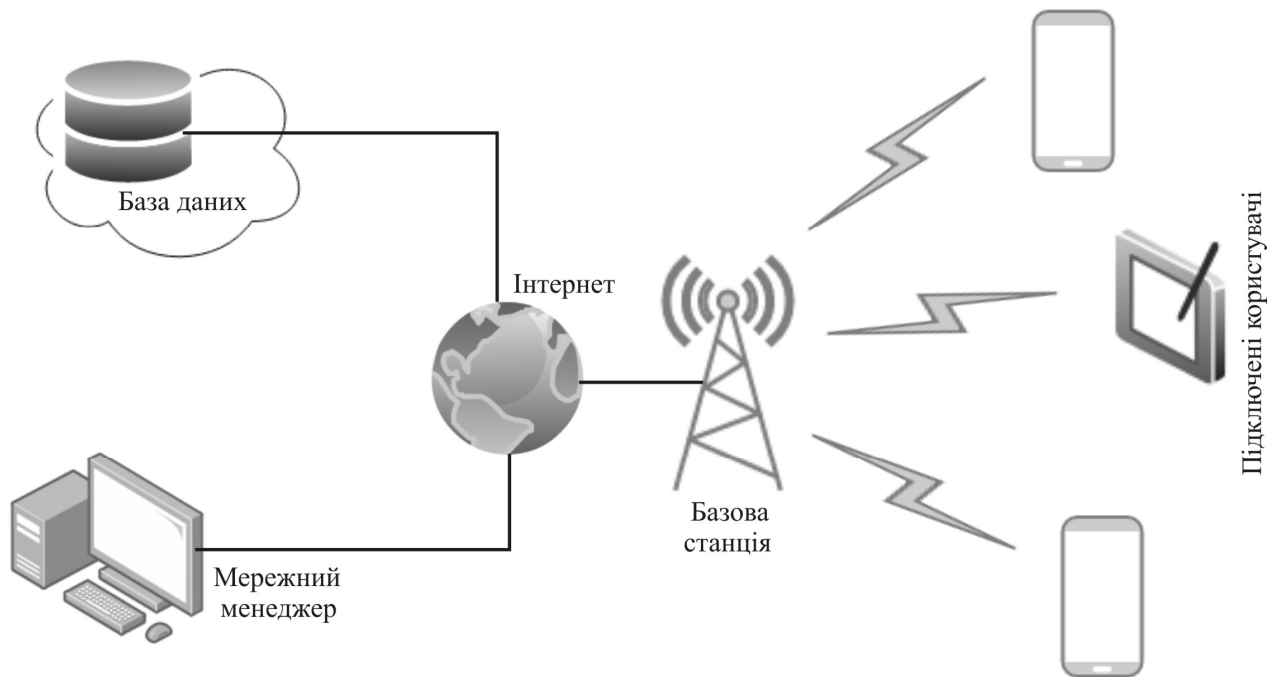


Рисунок 1.10 – Архітектура мережі Weightless-P

Одна базова станція Weightless-P підтримує більше пристроїв, ніж будь-яка інша технологія LPWAN в суб-ГГц діапазоні і є найбільш масштабована субгігагерцова технологія LPWAN. Висока ємність базових станцій Weightless-P мінімізує витрати на розгортання. Даний вузькосмуговий протокол використовує 12,5 кГц канали, що дає змогу передавати в 7 разів більше даних, чим SIGFOX.

Технологія Weightless-N призначена для створення широких зон покриття при невисоких швидкостях передачі даних 500 біт/с та забезпечує однонапрямлений зв'язок до 10 км, при низькому енергоспоживанні. Weightless-N ідеально підходить для сенсорних мереж на базі отримання показів температури, контролю рівня рідини в резервуарі, вимірювань і інш. [13].

Технологія Weightless-W - відкритий стандарт, що призначений для роботи на частотах телевізійного діапазону 470-790 МГц TVWS (англ. TV white space). Технологія Weightless-W з зонами покриття до 5 км використовується, зазвичай, в додатках для нафтової та газової промисловості.

1.6 Технологія LoRa

Стандарт зв'язку LoRa (анг. Long Range) - глобальна мережа далекого радіусу дії) забезпечує мережний принцип передачі даних на великі відстані. Він призначений для одночасного обслуговування великої кількості малопотужних, промислових абонентських пристроїв.

LoRa розрахована на передачу невеликих обсягів даних в сфері житлово-комунального господарства, електроенергетики, транспорту і логістики, в рамках концепції «розумного міста». Очікується, що впровадження стандарту дозволить збирати дані з мінімальними витратами на установку пристроїв, уніфікувати процес збору інформації та забезпечити сумісність пристроїв збору інформації від різних виробників [2].

За словами розробників LoRa Alliance технологія LoRa має значні переваги перед Wi-Fi та стільниковими мережами, завдяки можливостям розгортання міжмашинних з'єднань M2M на відстань до 30 км при швидкості до 50 Кбіт/с, а також мінімальному споживанні електроенергії, що забезпечується до десятків років автономної роботи на одному акумуляторі типу АА. Області використання даної технології дуже великі: від автоматизації домашніх хазяйств і інтернету речей до промислових застосувань та «розумних» міст [15].

Таблиця 1.1 – Порівняльні характеристики мереж LPWAN неліцензованого діапазону

Технологія	802.15.4/ZigBee	SigFox	Weightless	LoRa
Діапазон частот	2,4 ГГц, 915 МГц, 868 МГц	863-870 МГц	169, 433, 470, 780, 868, 915, 923 МГц	863-870 МГц
Базовий метод	DSSS, BPSK, QPSK	UNB, DBPSK (“вверх” - UL), GFSK (“вниз” - DL)	OQPSK, PSK/GMSK, FDMA/TDMA	SSM, CSS
Чутливість приймача	-85дБм (2,4 ГГц) -92 дБм (900 МГц)	-126 дБм (для чипу AX)	-128 дБм (для швидкості 0,625 кбіт/с)	
Ширина каналів	2,5 МГц	100 Гц	12,5 кГц	125 кГц, 250 кГц, 500 кГц
Максимальний розмір пакету	102 байти	12 байт	200 байт	256 байти
Радіус дії місто/пряма видимість	10 м/75 м	1 км/20 км	5 км/15 км	3 км/30 км
Доступ до Інтернету	немає	немає	немає	IPv6, 6LoWPAN
Швидкість передачі даних	від 20 до 256 кбіт/с	від 30 біт/с (PSK) до 600 біт/с (FSK)	від 0,625 кбіт/с до 100 кбіт/с	від 30 біт/с до 50 кбіт/с
Базова топологія	«зірка» пряме з'єднання (P2P)	«зірка»	«зірка»	коміркова, однорангова (Mesh)

LoRa є наступним етапом розвитку LPWAN рішення, яке було розроблено і запатентовано Корпорацією Semtech. За розробленим стандартом LoRa використовує варіації лінійної частотної модуляції CSS (англ. Chirp Spread Spectrum) та кодування даних широкосмуговими імпульсами з частотами, які зменшуються або збільшуються на деякому часовому інтервалі.

Таке рішення дозволяє приймачу бути стійким до відхилень частоти від номінального значення і спрощує вимоги до тактового генератора, тим самим дозволяє використовувати недорогі кварцові резонатори [15].

У той час, як реалізація LoRa є закритою, однак інша частина стеку протоколів, відома як LoRaWAN, остається відкритою та її розвиток здійснюється LoRa Alliance, що управляється компанією IBM.

Висновки до першого розділу

Проведений аналіз існуючих на сьогодні технологій широкосмугового безпроводового зв'язку показав, що у кожній технології є свої особливості використання, переваги та недоліки, які необхідно враховувати під час вирішення конкретної задачі.

На теперішній час, основні конкуренти на ринку безпроводових мереж LPWAN є технології надширокосмугового зв'язку неліцензійного діапазону ISM, та технології ліцензованого діапазону, що регламентовані стандартами 3GPP та NB-IoT.

Для України найбільш перспективною технологією, яку можна використовувати в глобальних мережах з низьким енергоспоживанням для ринку інтернету речей є відкрита неліцензована частина стеку LoRa під назвою- LoRaWAN. Дана технологія може використовуватись як окремо, так і сумісно з іншими прилаштованими для IoT – речей ліцензованими технологіями LTE, або діючими технологіями LPWAN.

2 АРХІТЕКТУРА ТА ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАНДАРТУ LORAWAN

2.1 Архітектура мережі технології LoRaWAN

Технологія LoRaWAN (анг. Long Range Wide Area Network – сукупна система, що використовує протокол фізичного рівня LoRa та каналного рівня LoRaWAN моделі OSI [2], яка застосовується в комплексних рішеннях IoT для збору і обробки даних з інформаційних сенсорів. Пристрої LoRaWAN працюють в неліцензованих частотних ISM- діапазонах (433, 868, 915 МГц), що є додатковою перевагою використання даної технології. Архітектура мережі LoRaWAN наведена на рисунку 2.1.

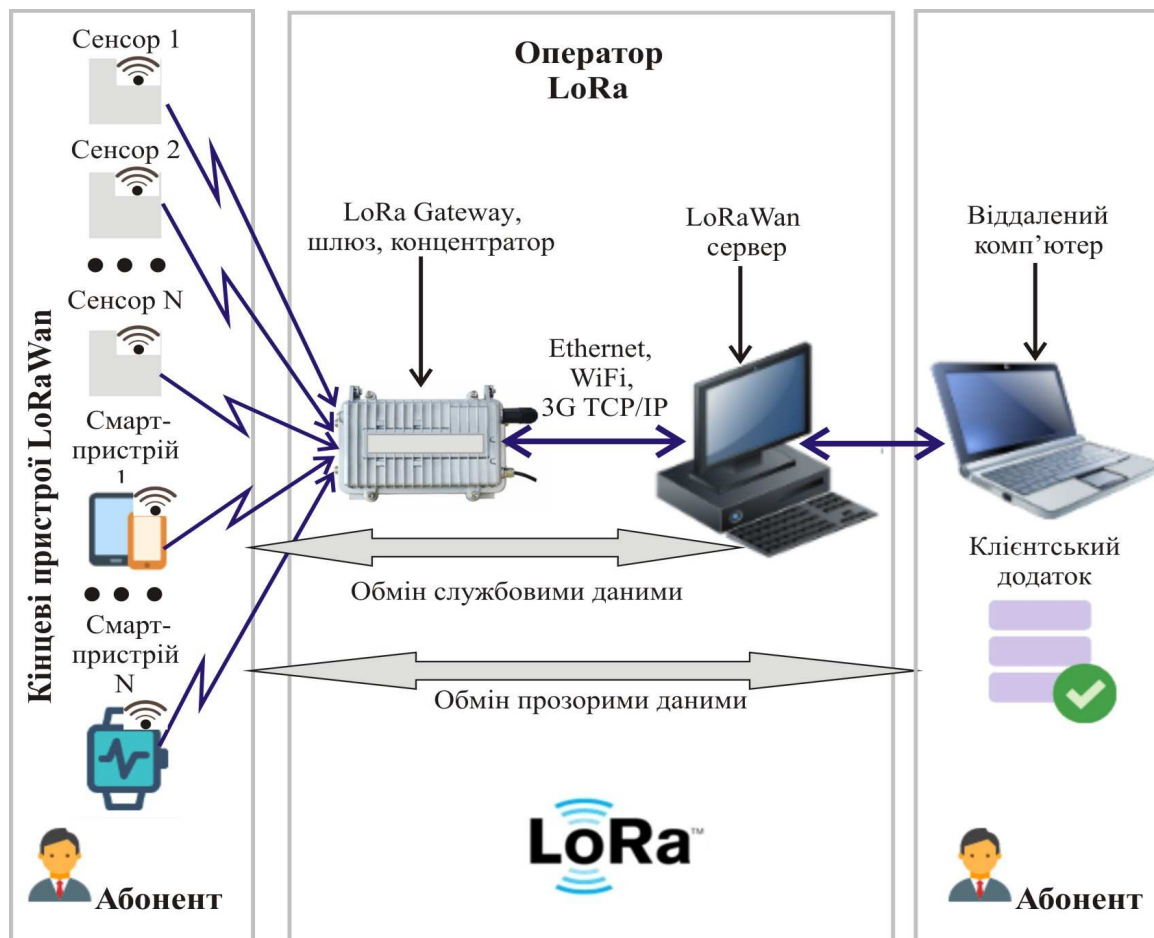


Рисунок 2.1 - Архітектура мережі LoRaWAN

Архітектура мережі LoRaWAN містить (рисунок 2.1) [2]:

1. Кінцеві вузли, у якості яких зазвичай виступають сенсори фізичних величин, смарт – пристрої, що здійснюють функції вимірювання або керування та пристрої IoT. LoRaWAN рахується самою енергоефективною технологією за рахунок того, що кінцеві пристрої LoRa, які повністю автономні, можуть працювати від батарей на одному заряді до 10 років [2].

2. Шлюз, або концентратор LoRa, який приймає по безпроводовому каналу дані від кінцевих пристроїв LoRa і передає їх в канали зв'язку. Зв'язок з сервером відбувається за стандартними протоколами TCP/IP за допомогою телекомунікаційних каналів Ethernet, Wi-Fi, 4G/LTE і інш. В LoRaWAN передбачений захист інформації, що передається за допомогою використання шифрування блоковими кодами AES128.

3. Мережний сервер LoRa, який управляє мережею та реалізує функції усунення дублювання пакетів, управління розкладом, підтвердження і управління швидкістю передачі даних та вихідною потужністю радіопередавача для кожного кінцевого пристрою окремо, завдяки реалізації алгоритму адаптивної швидкості передачі даних (adaptive data rate, ADR) та використання технологій з розширенням спектру. За таким алгоритмом дані, які передаються від різних кінцевих вузлів з різними швидкостями не заважають один одному і створюють різні віртуальні канали, що збільшує пропускну здатність шлюзу. Максимальна швидкість передачі даних в мережах LoRaWAN дорівнює 50 Кбіт/с.

4. Віддалений комп'ютер, який може контролювати дії кінцевих вузлів або збирати дані з них.

5. Віддалений сервер (клієнтський додаток), що призначений для розшифрування переданої інформації. При цьому, кожен кінцевий пристрій має вбудований ідентифікатор за яким сервер додатків розпізнає приналежність кожного пакету даних певному IoT пристрою мережі.

Мережі LoRaWAN побудовані за фізичною топологією зірка, де кінцеві вузли LoRa через шлюзи утворюють прозорі мости для ретрансляції

повідомлень та спілкуються з центральним сервером мережі. Зазвичай передбачається, що шлюзами і серверами володіє оператор LoRa мережі, а абоненти підключають свої модеми, по аналогії зі стільниковим зв'язком.

Мережний протокол LoRaWAN оптимізований для кінцевих пристроїв, які працюють від акумуляторів і можуть бути як мобільними, так і встановленими у фіксованому місці [16].

2.1.1 Кінцеві пристрої мережі LoRaWAN

Розглянемо побудовану архітектуру мережі LoRaWAN (рисунок 2.1) більш детально [17].

Кінцевий пристрій із підтримкою LoRaWAN - це сенсор або виконавчий механізм, який підключений до мережі LoRaWAN безпроводовим з'єднанням через радіошлюзи за допомогою радіочастотної (RF –модуляції) LoRa (рисунок 2.2).

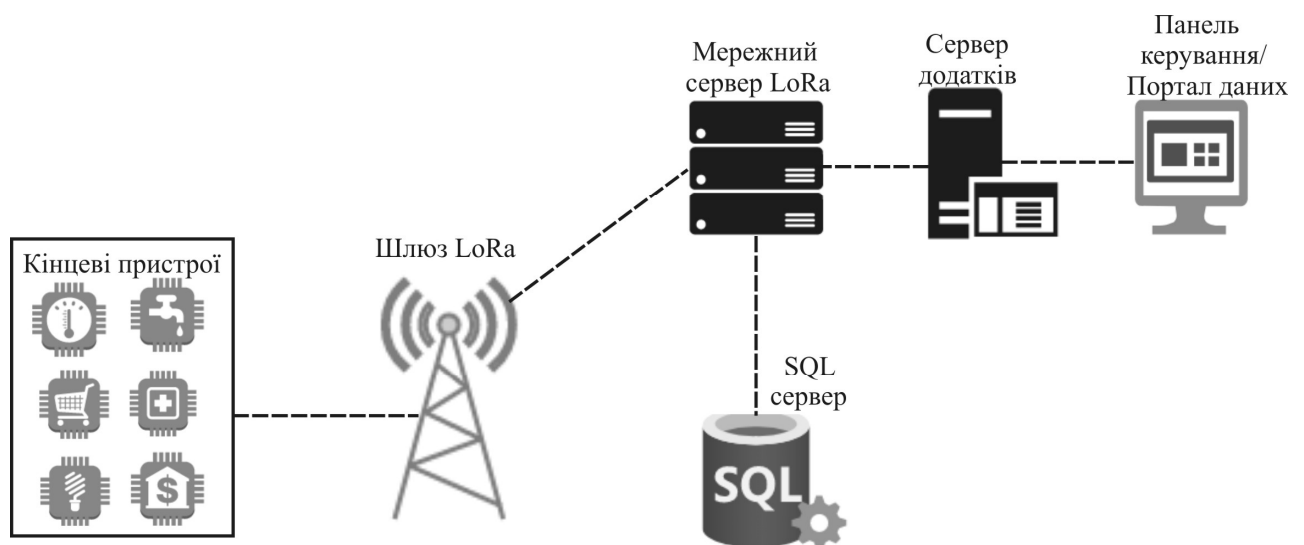


Рисунок 2.2 – Типове підключення кінцевих пристроїв в типовому розгортанні мережі LoRaWAN

У більшості програм кінцевий пристрій - це автономний датчик, який часто працює від акумулятора, який збирає інформацію про фізичні умови та

екологічні явища. Типові використання сенсорів включають: вуличне освітлення, безпроводові замки, перекриття водяного клапана, запобігання витоку та інш.

2.1.2 Шлюзи мережі LoRaWAN

Шлюз LoRaWAN отримує модульовані LoRa RF-повідомлення з будь-якого кінцевого пристрою на відстані його прослуховування, і пересилає ці повідомлення даних на мережний сервер LoRaWAN (англ. LNS - Lora Network Server), який підключений через магістраль IP. Немає фіксованого зв'язку між кінцевим пристроєм і певним шлюзом. Але один і той же сенсор може обслуговуватися кількома шлюзами в певному районі. З LoRaWAN кожен пакет лінії в напрямку до базової станції зв'язку, що надісланий кінцевим пристроєм, буде прийматись усіма шлюзами, які знаходяться в зоні досяжності (рисунок 2.3). Така схема значно зменшує частоту помилок пакетів (оскільки шанс, що хоча б один шлюз отримає повідомлення, дуже великий), значно зменшує накладні витрати на акумулятор для мобільних / кочових датчиків і дозволяє здійснити недорогу геолокацію (припускаючи, що ці шлюзи мають можливість геолокації) [17].

IP-трафік від шлюзу до мережевого сервера може бути змінений через Wi-Fi, проводований Ethernet або через стільникове з'єднання. Шлюзи LoRaWAN працюють повністю на фізичному рівні і, по суті, займаються лише пересилкою радіоповідомлень LoRa. Вони перевіряють цілісність даних лише кожного вхідного повідомлення LoRa RF. Якщо цілісність порушена, тобто, якщо циклічний надлишковий код (англ. Cyclic redundancy check) неправильний, повідомлення буде скинуто. Якщо повідомлення цілісне то шлюз буде пересилати його до LNS разом з деякими метаданими, які включають рівень отримання RSSI повідомлення, а також необов'язкову мітку часу.

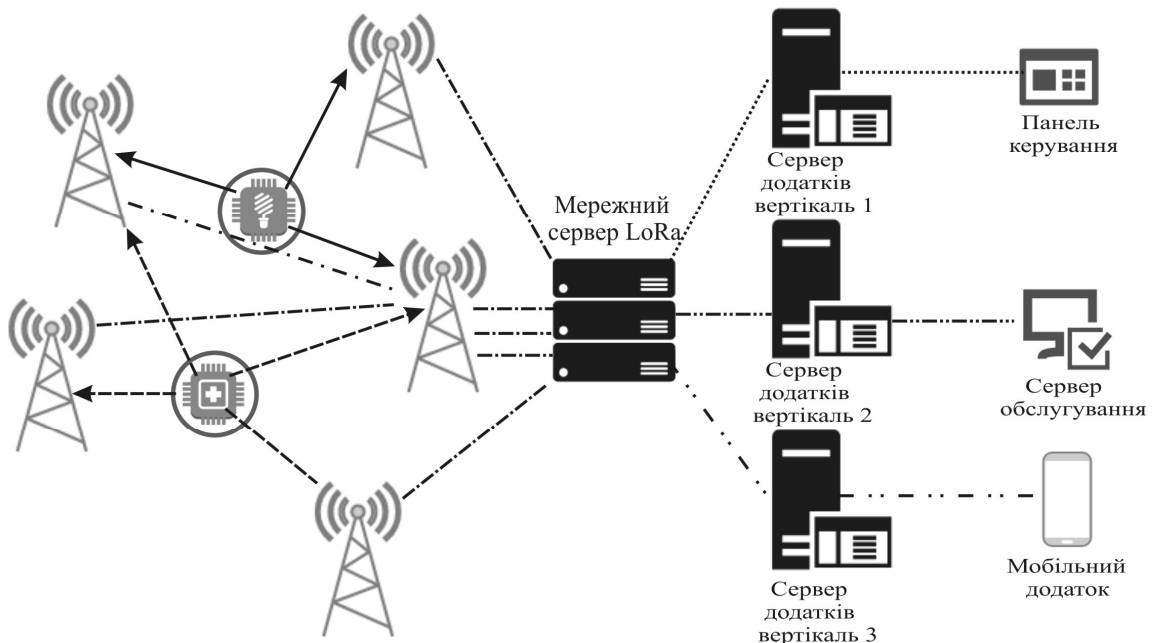


Рисунок 2.3 – Типова схема прийому / передачі повідомлень від кінцевих пристроїв

Для повідомлень LoRaWAN від кінцевих пристроїв шлюз виконує запити на передачу, що надходять від LNS, без будь-якої інтерпретації корисного навантаження. Оскільки декілька шлюзів можуть отримувати одне і те ж повідомлення LoRa RF від одного кінцевого пристрою, LNS видаляє всі дубльовані повідомлення та залишає тільки одне [17].

2.1.3 Мережний сервер LoRaWAN

Мережний сервер LoRaWAN (LNS) управляє всією мережею (рисунок 2.4), динамічно контролює параметри мережі, щоб адаптувати систему до постійно мінливих умов, і встановлює захищені 128 - розрядні AES - з'єднання для транспортування кінцевих даних від кінцевого пристрою LoRaWAN до кінцевих користувачів у додатки хмари, а також для управління трафіком, що надходить від кінцевого пристрою LoRaWAN до LNS (і назад). Мережний сервер забезпечує достовірність кожного сенсора у мережі та цілісність кожного повідомлення. У той же час мережний сервер не може бачити або

отримувати доступ до даних програми.

Мережеві сервери LoRaWAN виконують наступні функції [16]:

- перевіряють адреси пристрою;
- здійснюють автентифікацію кадру та управління лічильником кадрів;
- видають повідомлення про отримані повідомлення;
- здійснюють адаптацію швидкості передачі даних;
- відповідають на всі запити рівня MAC, що надходять від кінцевих пристроїв,
- перенапряляють корисні навантаження додатків лінії «вверх» зв'язку на відповідні сервери додатків;
- здійснюють переадресацію повідомлень про запит на приєднання та прийняття приєднання між пристроями та сервером, до якого приєднуються кінцеві пристрої.

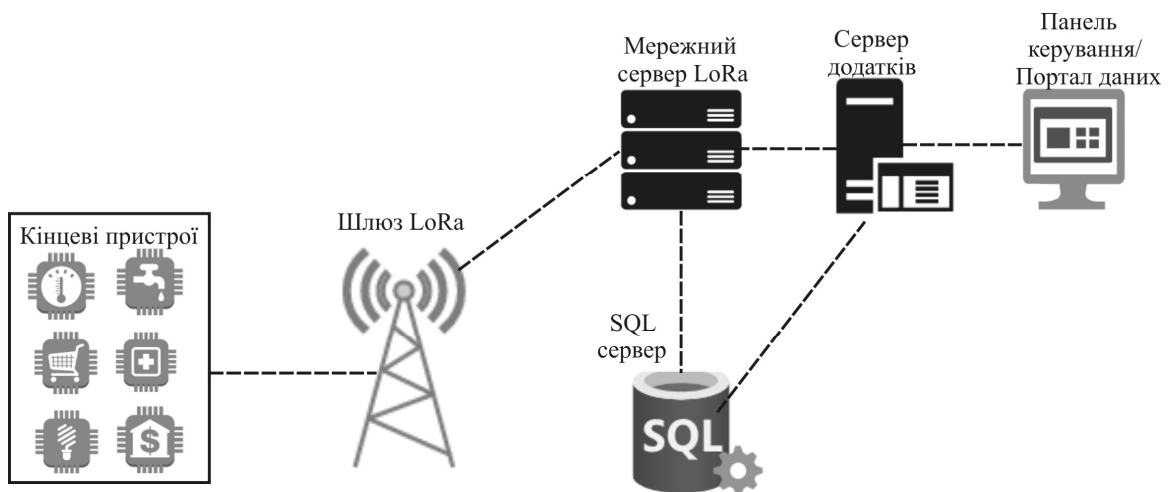


Рисунок 2.4 – Схема роботи мережного серверу у типовому розгортанні мережі LoRaWAN

2.1.4 Сервери додатків мережі LoRaWAN

Сервери програм відповідають за безпечну обробку, управління та інтерпретацію даних додатків сенсорів. Вони генерують усі корисні навантаження на рівні додаткового рівня до підключених кінцевих пристроїв (рисунок 2.5).

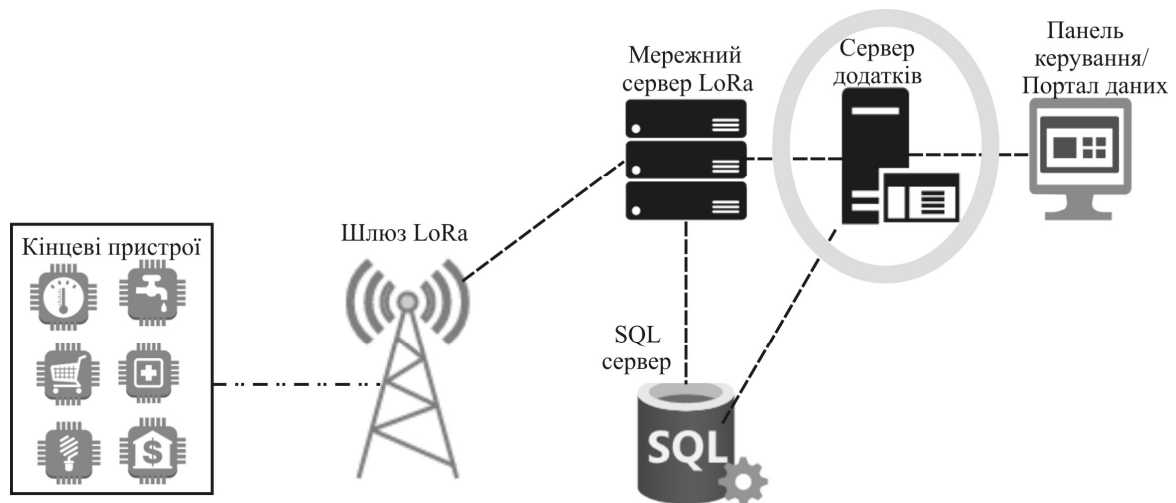


Рисунок 2.5 – Приклад роботи серверу додатків у типовому розгортанні мережі LoRaWAN

2.1.5 Сервер активації кінцевих пристроїв мережі LoRaWAN

Сервер активації кінцевих пристроїв мережі LoRaWAN управляє безпроводовим процесом активації кінцевих пристроїв, які підключаються до мережі. Сервер містить інформацію, необхідну для обробки кадрів запиту на приєднання до висхідної лінії зв'язку та генерації кадрів прийняття приєднання для висхідної лінії зв'язку. Він сигналізує мережевому серверу, який сервер додатків слід підключити до кінцевого пристрою, та виконує виведення ключів шифрування мережі та додатків. Він передає мережний ключ сеансу пристрою мережевому серверу, а ключ сеансу додатків - відповідному серверу додатків (рисунок 2.6) [17].

2.2 Три типи класів кінцевих пристроїв LoRaWAN

Відмінною особливістю LoRaWAN мережі є те, що вона передбачає три класи пристроїв для вирішення різних завдань і застосувань в мережі.

На рисунку 2.7 відображені класи пристроїв LoRaWAN: клас А (базовий рівень), клас В (базовий рівень) і клас С (постійний) (рисунок 2.7) [2,15]:

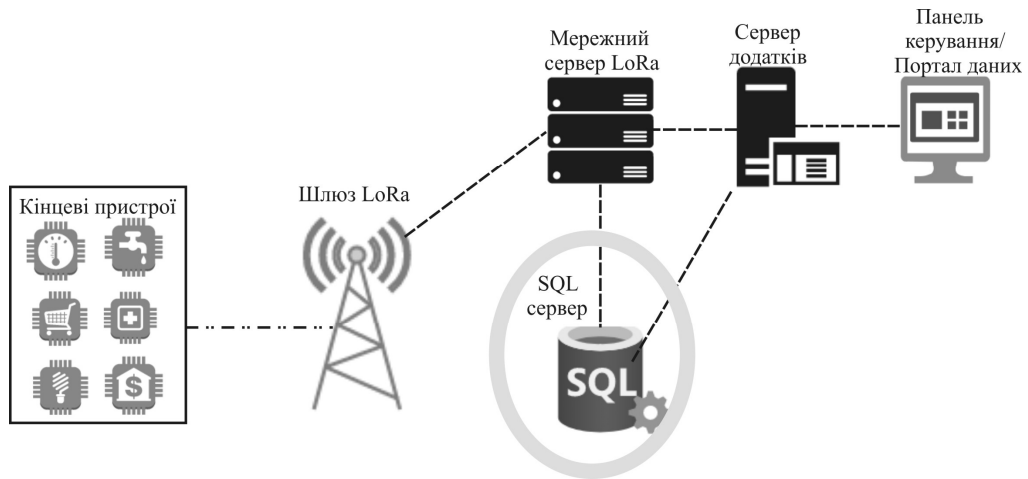


Рисунок 2.6 – Схема роботи серверу активації кінцевих пристроїв мережі LoRaWAN

Додаток				
LoRa MAC				
MAC опції				
Клас А (базовий рівень)	Клас В (базовий рівень)	Клас С (постійний)		
LoRa модуляція				
Регіональний діапазон ISM				
EU 868	EU 433	US 915	AS 430	—

Рисунок 2.7 – Класи пристроїв LoRaWAN

1. «Клас А» визначає функціональний режим за замовчуванням в мережах LoRa. У «класі А» сеанс зв'язку здійснює кінцевий пристрій. Вузол передає дані короткими послідовностями за заданим графіком на шлюз [15].

При роботі в мережі пристроїв класу А (рисунок 2.8) кожний кінцевий пристрій проводить більшу частину часу в режимі очікування (тобто в режимі сну). Коли в середовищі відбуваються зміни, пов'язані з тим, що пристрій запрограмований для моніторингу, він прокидається і ініціює висхідну лінію,

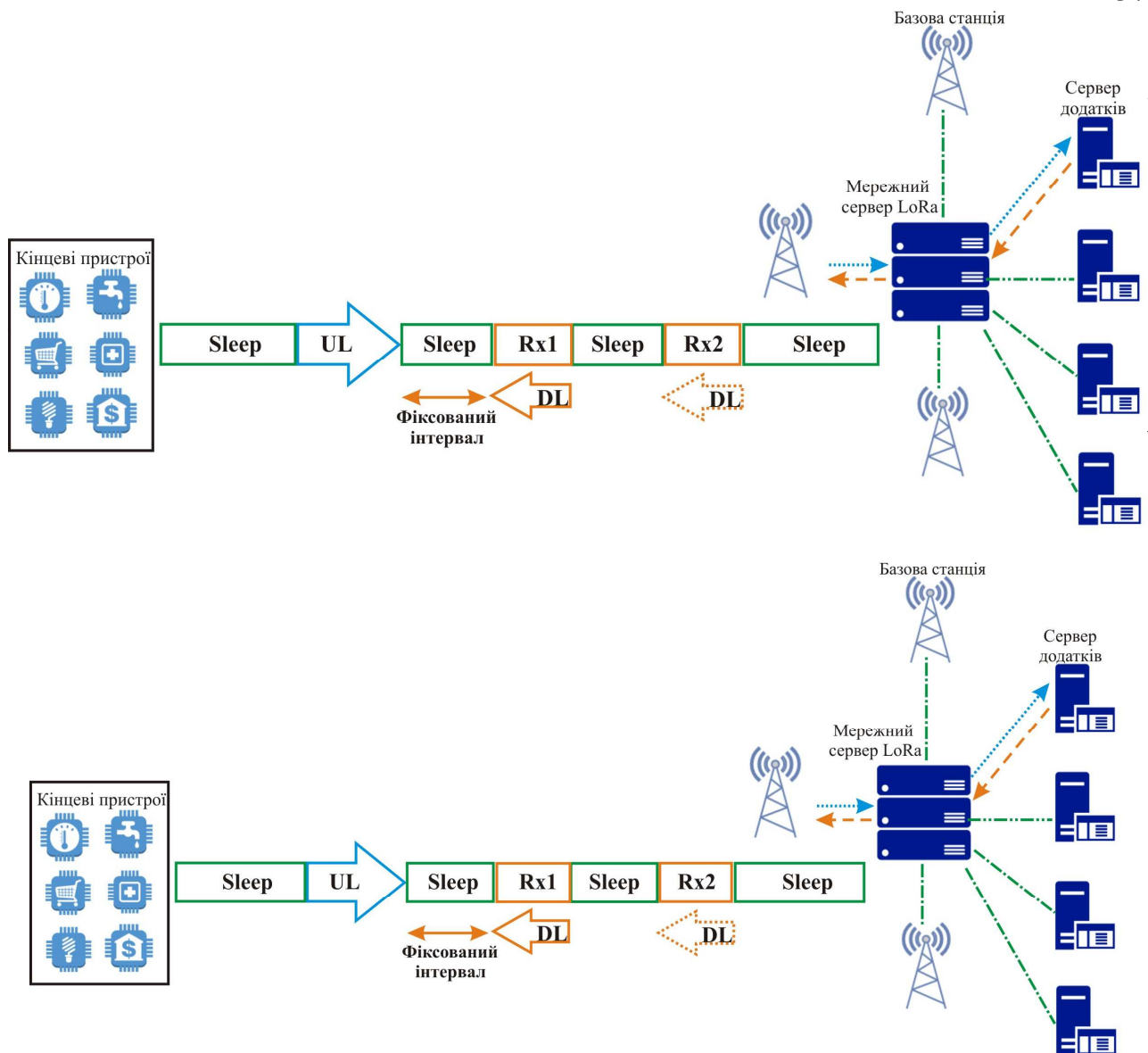


Рисунок 2.8 – Режим роботи класу А

2. У «класі В» виділено додаткове вікно прийому, яке відкривається пристроєм за розкладом. За спеціальним сигналом «маяк» від шлюзу кінцевий пристрій здійснює синхронізацію внутрішнього часу з часом мережі, тим самим складаючи розклад. Таким чином, завдяки такому вікну, у сервера з'являється можливість почати передачу даних в заздалегідь певний час.

Під час процесу «маяка» мережа, що синхронізується за часом, повинна періодично транслюватись мережею через шлюзи, як показано на рисунку 2.10. Кінцевий пристрій повинен періодично приймати один із цих мережевих «маяків», для можливості вирівнювання свого внутрішнього повідомлення про час з мережею.

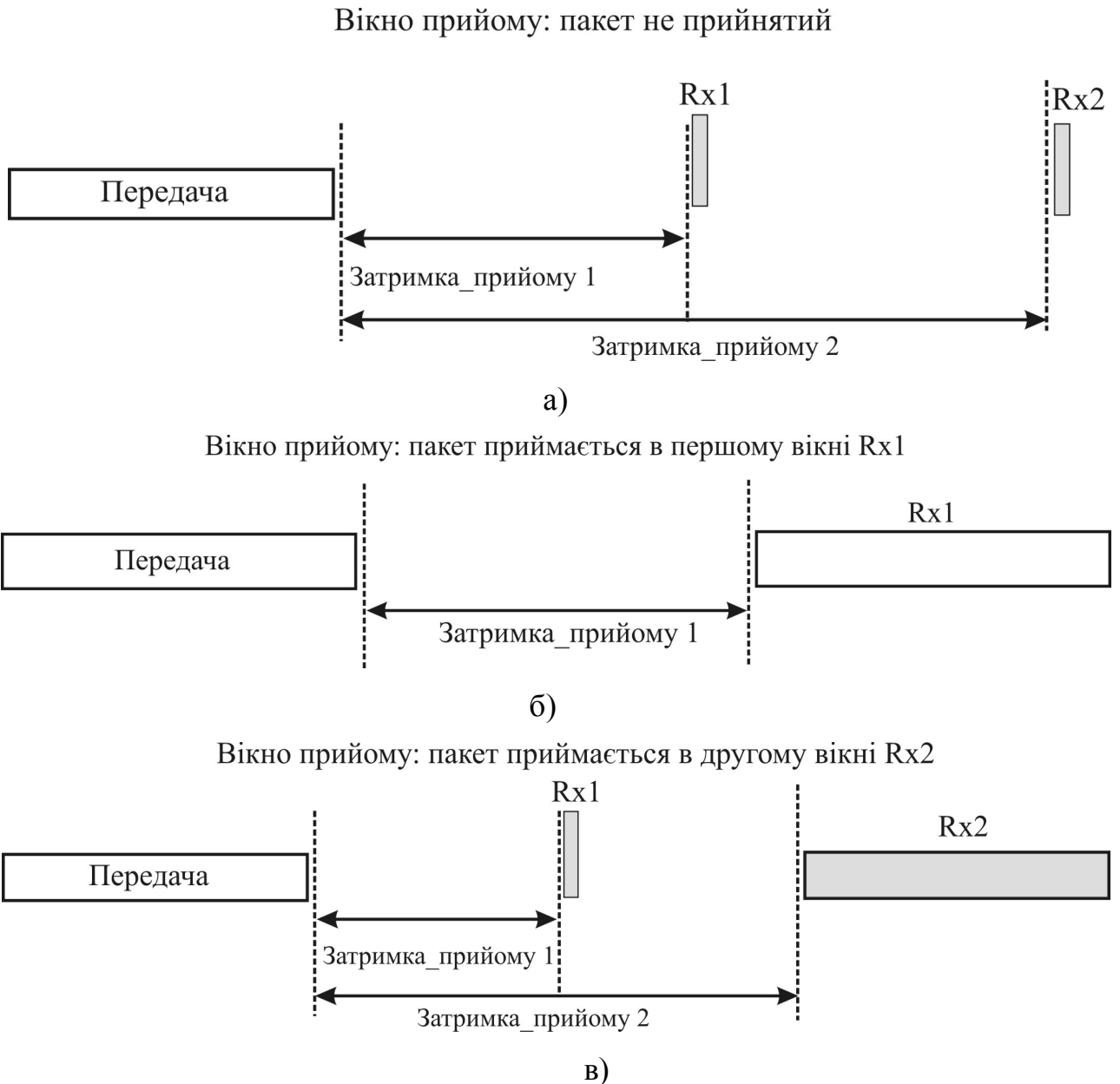


Рисунок 2.9 – Виконання операцій пристроями в режимі класу А: ситуація, коли пакет не отриманий (а); ситуація, коли пакет даних отримується у першому вікні прийому (б); ситуація, коли пакет даних отримується у другому вікні прийому (в)

Пристрої використовують «маяки» для синхронізації своїх внутрішніх годинників з мережею. Пристроям не потрібно обробляти всі «маяки», якщо пристрій уже вирівняно. У більшості випадків достатньо синхронізувати свої годинники декілька разів на день, з мінімальним впливом на час автономної роботи (рисунок 2.11).

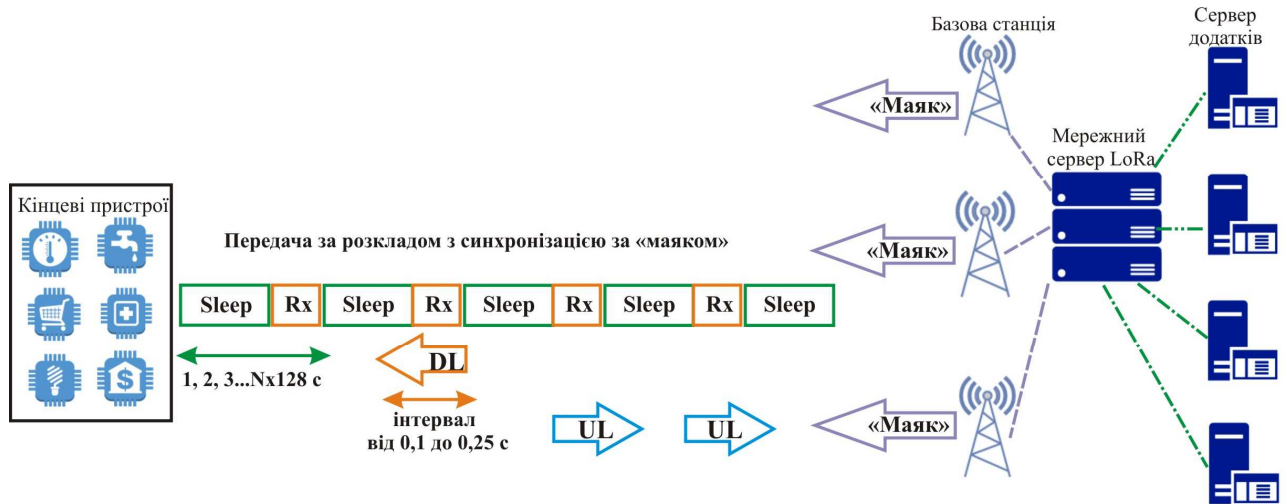


Рисунок 2.10 – Ситуація синхронізації пристроїв в мережі за допомогою «маяків»

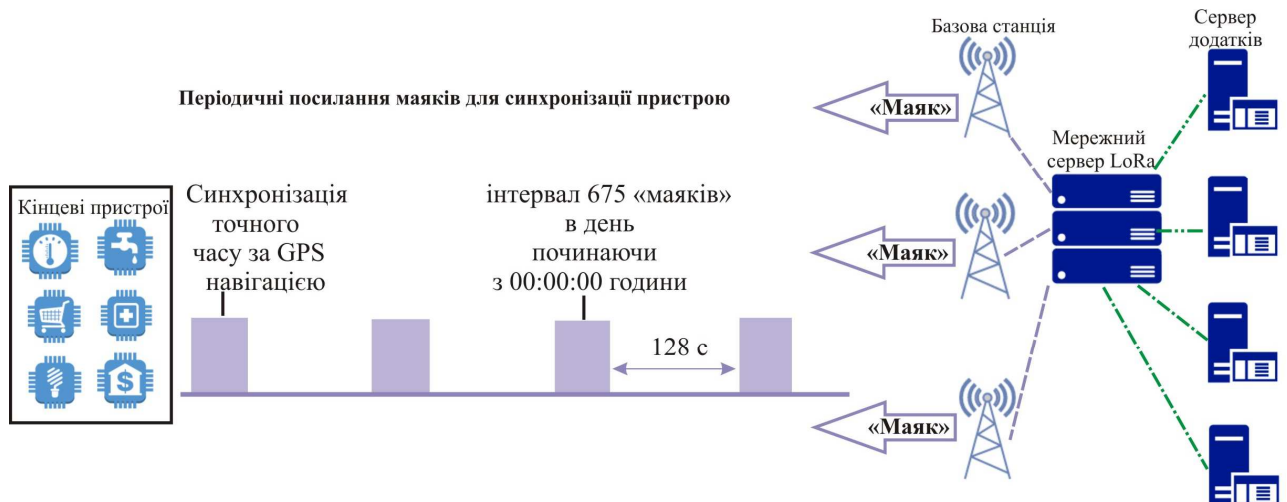


Рисунок 2.11 - Періодичні посилення «маяків» для синхронізації пристрою

Виходячи з еталону часу маяка, кінцеві пристрої можуть періодично відкривати вікна прийому (пінг - слоти). Будь-який з цих пінг-слотів може використовуватися мережевою інфраструктурою для ініціації низхідної лінії зв'язку, як показано на рисунку 2.12, 2.13. Для того, щоб мережа LoRaWAN підтримувала пристрої класу B, усі шлюзи LoRaWAN у цій мережі повинні мати вбудоване джерело GPS навігації, тому всі вони можуть бути синхронізовані за точною синхронізацією «маяка».

3. Пристрої «класу C» мають максимальне, майже безперервне вікно прийому, яке закривається тільки на час передачі даних. Це дозволяє

застосовувати їх для вирішення завдань, що вимагають одержання великого обсягу даних. Цей клас пристроїв споживає найбільшу кількість енергії, тому зазвичай не використовує акумуляторне живлення, але отримує дані від сервера мережі з найменшими затримками [17].

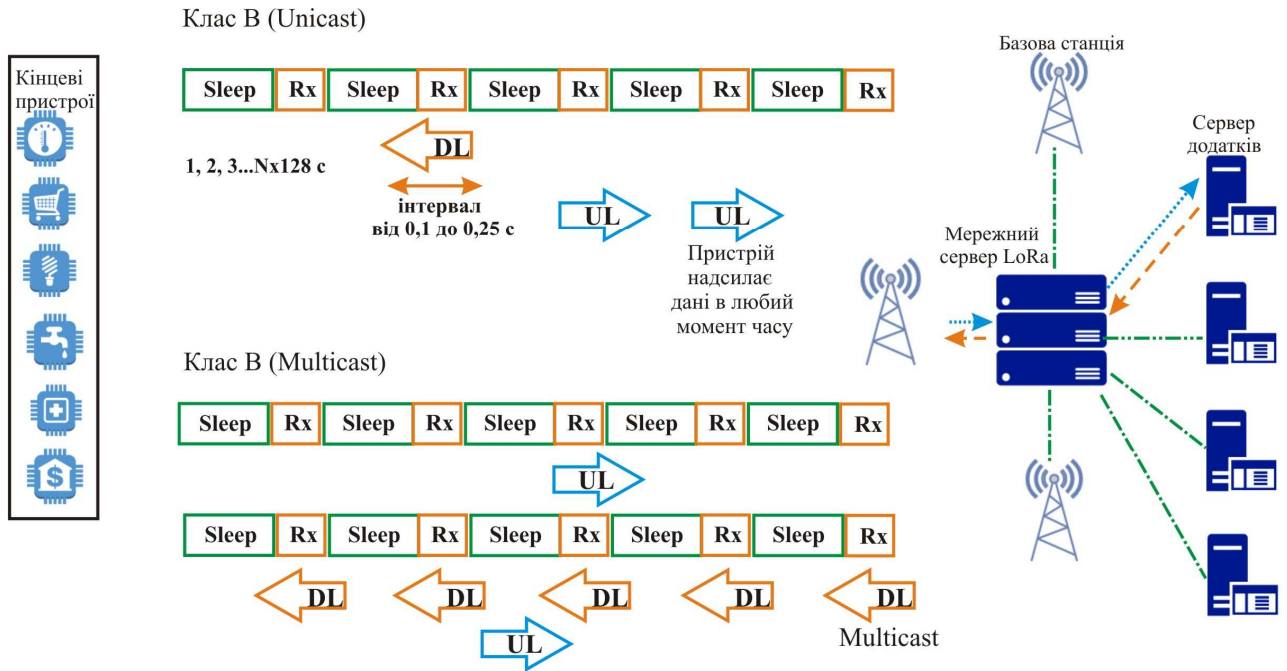


Рисунок 2.12 – Пінг – слоти класу В

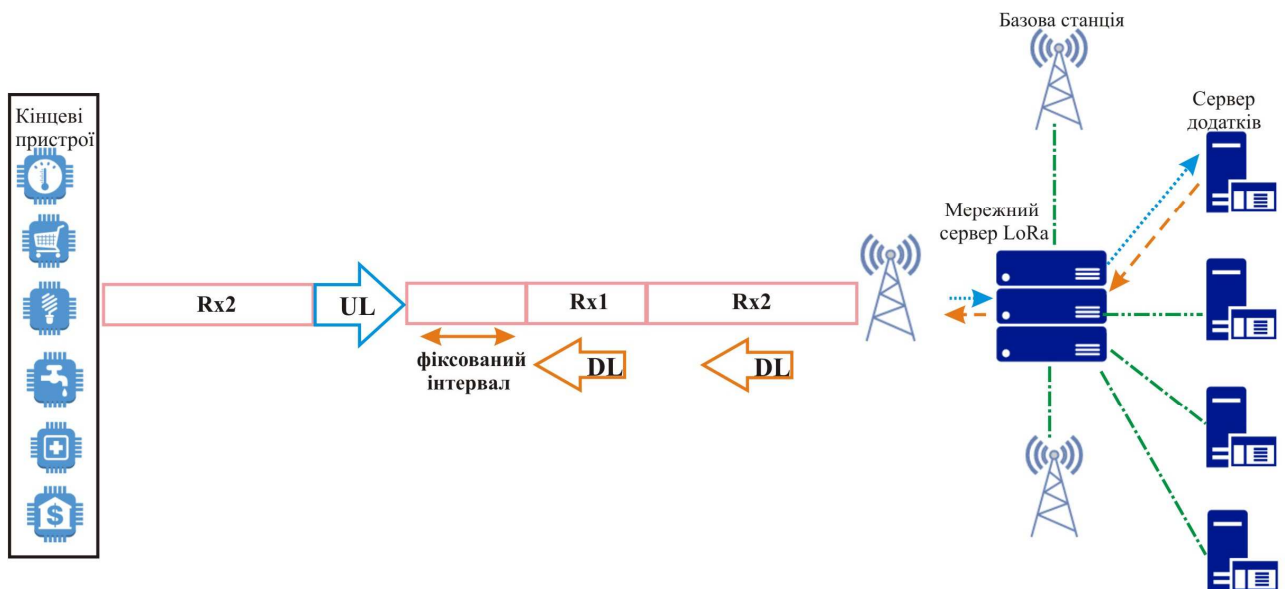


Рисунок 2.13 – Схема роботи кінцевих пристроїв класу С в мережі LoRaWAN

Кінцеві пристрої класу С реалізують ті самі два вікна прийому, що й пристрої класу А, але вони не закривають вікно Rx2, поки не відправлять наступну передачу назад на сервер. Отже, вони можуть отримувати низхідну лінію зв'язку у вікні Rx2 майже в будь-який час. Коротке вікно з частотою Rx2 і швидкістю передачі даних також відкривається між кінцем передачі та початком вікна прийому Rx1 (рисунок 2.13).

2.3 Архітектура відкритого протоколу LoRaWAN

LoRa - це суто фізичний або «бітовий» рівень реалізації, як визначено семирівневою моделлю OSI (рисунок 2.14) [16,17].

Замість кабелю використовується безпроводове середовище для транспортування LoRa радіохвиль від радіочастотного (РЧ) передавача до пристроїв IoT, або до РЧ - приймача в шлюзі, і навпаки.

Кожний поточний повноцінний LoRa шлюз забезпечує паралельну обробку до 9 LoRa каналів, де канал ідентифікується конкретним піддіапазоном та коефіцієнтом розширення [18]. Шлюзи передають повідомлення між кінцевими пристроями та сервером за архітектурою протоколу, яка наведена на рисунку 2.14.

Радіоінтерфейс фізичного рівня визначає всі аспекти передачі радіосигналів між різними вузлами мережі (шлюзами LoRa) і кінцевими пристроями (сенсорами IoT). Радіоінтерфейс LoRa заснований на використанні широкосмугових радіосигналів з великою базою В, багато більшої одиниці. Радіоінтерфейс LoRa встановлює робочі частоти, види модуляції, рівні потужності, сигналізацію і обмін сигналами між передавальними і приймальними пристроями в мережі LoRa.

Мережева архітектура LoRa, яка включає абонентські пристрої IoT / M2M, шлюзи LoRa (базові станції), мережеві сервера, підключені по транспортній мережі до мережі Інтернет та сервера додатків.

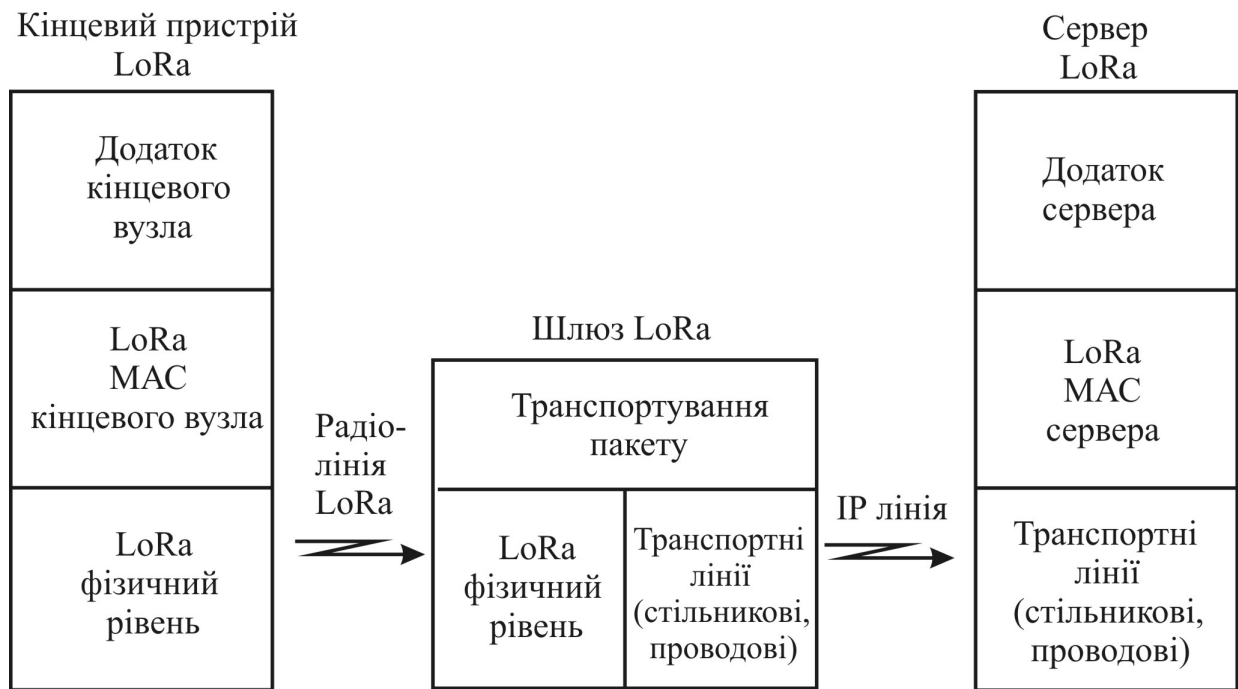


Рисунок 2.14 - Архітектура відкритого протоколу LoRaWAN

2.4 Частотний діапазон LoRaWAN

Для роботи мереж технології LoRa, як правило, використовує нелицензовані ділянки спектра, які визначені і регулюються на основі регіональних обмежень, визначених в Технічних специфікаціях LoRaWAN 1.1. Регіональні параметри, в наступних смугах частот:

- 430 МГц - для регіонів Азії;
- 780 МГц - для регіону Китаю;
- 433 МГц - для регіону Європа;
- 866 МГц - для регіону Європа;
- 915 МГц - для регіонів США.

У смузі частот 864-868 МГц три частотних канали загального доступу використовуються в режимі LBT (англ. Listen Before Talk), тобто після обов'язкового прослуховування на всіх абонентських пристроях і шлюзах LoRa: 868,10; 868,30; 868,50 МГц, а також три частотних канали 864,10; 864,30; 864,50 МГц, щоб гарантувати отримання запитів серверу активації

(JoinReq message) в ширококомовному каналі загального доступу для управління в мережі.

Типові значення ширини радіоканалу для мережі LoRa залежать не тільки від технологічних рішень, а й від вимог регіональних регуляторів радіочастотного спектру.

Частотний план мережі LoRaWAN зведений до таблиці 2.1 [2].

Таблиця 2.1 - Частотний план мережі LoRa/LoRaWAN

LoRa/LoRaWAN	Директиви 2013/752/EU	Узагальнені умови
868,1; 868,3; 868,5 МГц до 25 мВт 1% робочий цикл або LBT	868-868,6 МГц до 25 мВт Директива 1999/5/ЕС 1% робочий цикл	868,0-868,6 МГц Ефективна потужність передавача до 25 мВт робочий цикл < 1%. Робочий цикл > 1% за умови відкл. режиму контролю спектра LBT
867,1-867,9 МГц до 25 мВт 1% робочий цикл або LBT	868,7-868,9 МГц до 25 мВт Директива 1999/5/ЕС або 1% робочий цикл	Індуктивні радіозастосування 865-869 МГц
869,525 МГц до 25 мВт 0,1% робочий цикл або LBT	869,4-868,65 МГц до 50 мВт Директива 1999/5/ЕС або 0,1% робочий цикл	Цифровий стільниковий радіозв'язок CDMA-800 869,07-876,63 МГц
868,8 МГц до 25 мВт 0,1% робочий цикл або LBT	868,7-869,2 МГц 25 мВт Директива 1999/5/ЕС або 0,1% робочий цикл	Індуктивні радіозастосування 865-869 МГц

Приймач LoRa формують CSS радіосигнали з смугами 125, 250 і 500 кГц. Технологія LoRa підтримує в мережі передачі даних IoT / M2M різну ширину частотного каналу і швидкості [2]:

- від 250 біт / с до 5,47 кбіт / с при ширині каналу 125 кГц;
- до 11 кбіт / с при ширині каналу 250 кГц;
- до 50 кбіт / с при використанні модуляції FSK при ширині каналу 500 кГц.

Висновок до другого розділу

Єдиний шлюз на основі LoRa може приймати та передавати сигнали на відстань більше 15 кілометрів у сільській місцевості. Навіть у щільному міському середовищі повідомлення можуть передаватись на відстань до п'яти кілометрів, залежно від того, наскільки глибоко в приміщенні розташовані кінцеві пристрої (кінцеві вузли).

Робота LoRa - мережі здійснюється в основному в безліцензійному діапазоні частот 433 МГц, 868 МГц або 2,4 ГГц з потужністю 10–100 мВт та, найчастіше, з обмеженим робочим циклом 0,1% або 1%.

Час автономної роботи може складати декілька років. Це пояснюється тим, що енергія, яка необхідна для передачі пакету даних, є мінімальною, враховуючи, що пакети даних дуже малі і передаються лише кілька разів на день. Крім того, в сплячому режимі кінцеві пристрої споживають дуже малу потужність (одиниці міліват).

Мережа LoRaWAN може підтримувати мільйони повідомлень. Однак кількість повідомлень, що підтримуються в будь-якому розгортанні, залежить від кількості встановлених шлюзів. Один восьмиканальний шлюз може підтримувати до 1,5 млн. повідомлень протягом 24-годинного періоду. Якщо потрібна більша ємність, потрібно лише додати додаткові шлюзи до мережі.

Враховуючи специфіку кінцевих вузлів і шлюзів на основі LoRa, для обслуговування потрібно лише кілька шлюзів - налаштованих в мережі, побудованої за топологією «зірка». Це означає, що капітальні та операційні витрати можуть бути відносно низькими. Крім того, коли економічно ефективні модулі LoRa RF, вбудовані в недорогі кінцеві вузли та використовуються разом із відкритим стандартом LoRaWAN рентабельність мережі може бути ще підвищена.

3 МОДЕЛЬ РАДІОІНТЕРФЕЙСУ СТАНДАРТУ LoRaWAN

3.1 Формування радіосигналів LoRaWAN з лінійною частотною модуляцією

Технологія LoRa об'єднує в себе метод модуляції LoRa, що заснований на лінійній частотній модуляції CSS (англ. chirp spread spectrum), в беспроводних мережах LPWAN разом з відкритим протоколом LoRaWAN.

У радіосигналів з лінійною частотною модуляцією частота змінюється за лінійним законом. ЛЧМ - модуляція є приватним випадком систем з розширенням спектра та способом підвищення ефективності передачі інформації за допомогою модульованих сигналів через канал з сильними лінійними спотвореннями, або завмираннями, що приводить до збільшення бази сигналу [20].

Фізичний радіоінтерфейс LoRa заснований на використанні широкосмугових радіосигналів з великою базою B , багато більшою одиниці. Даний вид радіосигналів має певні особливості:

- ширина спектра радіосигналу BW значно більші швидкості передачі даних R_b ($BW \gg R_b$);
- кореляційна функція вузькосмугового сигналу з базою $B \sim 1$.

Широкосмуговий радіосигнал LoRa представляє собою сигнал з ЛЧМ [2]. Для різних випадків, частота радіосигналу CSS може як збільшуватись (up-chirp), так і зменшуватись (down-chirp). Математично ЛЧМ сигнал можна представити як:

$$x(t) = A_0 \cdot \cos\left(\omega_0 \cdot t + \frac{\mu}{2} \cdot t^2\right), \quad (3.1)$$

де $\frac{T_{sym}}{2} \leq t < \frac{T_{sym}}{2}$; $\omega_0 = 2\pi f_0$ - центральна носійна частота радіосигналу;

$T_{sym} = 2^{SF} / BW$ - тривалість радіосигналу; SF – коефіцієнт розширення спектра,

який може змінюватись від 7 до 12; $f_n = f_0 - BW / 2$; $\omega_n = 2\pi f_n$ - нижня частота радіосигналу; $f_b = f_0 + BW / 2$; $\omega_b = 2\pi f_b$ - верхня частота радіосигналу; $\mu = BW / T_{sym}$ - швидкість зміни частоти радіосигналу; $B = BW \cdot T_{sym} = 2^{SF}$ - база радіосигналу.

Передавачі LoRa формують CSS радіосигнали з шириною спектру BW – 125; 250 або 500 кГц, що демодульовані при 19,5 дБ нижче рівня шуму.

При фіксованій ширині спектра радіосигналу BW зміна його бази здійснюється за рахунок зміни тривалості T_{sym} та швидкості зміни частоти (рисунок 3.1). Частотна надмірність широкосмугового радіосигналу обумовлює його високу стійкість до перешкод (рисунок 3.2) [19].

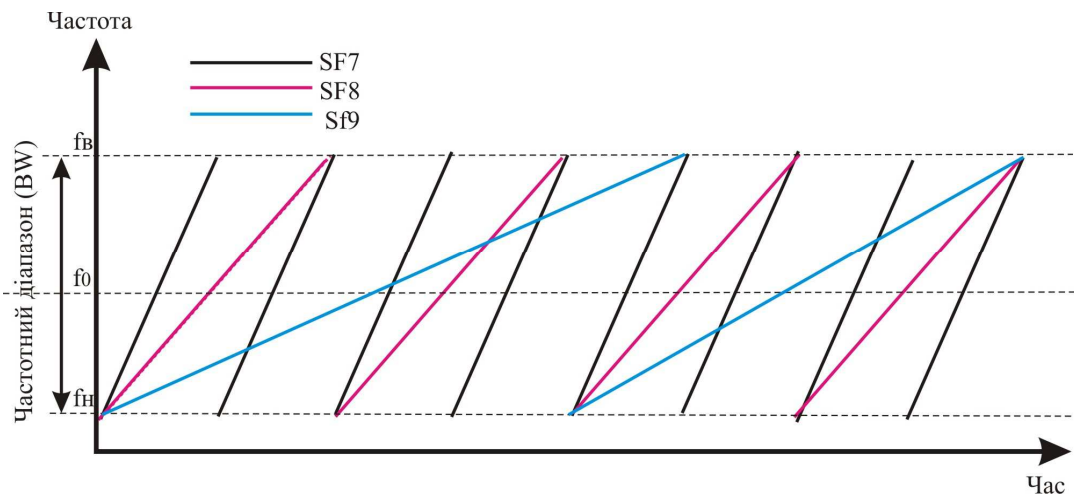


Рисунок 3.1 - Зміна ширини спектру радіосигналу BW при T_{sym} та SF7, SF8, SF9

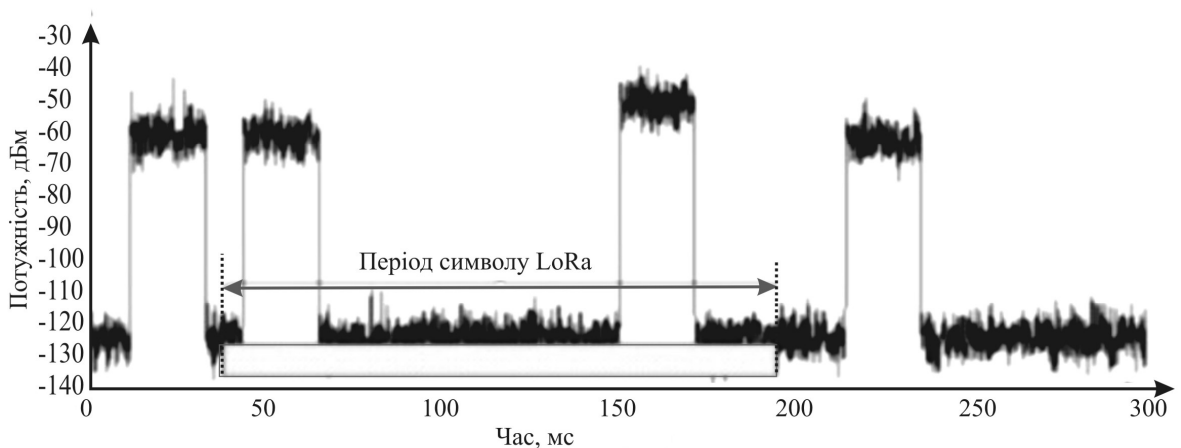
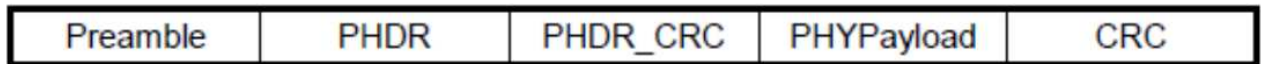


Рисунок 3.2 - Стійкість до перешкод ЛЧМ сигналу

3.2 Синхронізація приймача та приймача в системах LoRa

Структура пакетів, що передаються в мережі технології LoRaWAN наведена на рисунку 3.3 [2].



Preamble – преамбула; PHDR– поле заголовку; PHDR_CRC – поле заголовка з кодуванням; PHYPayload– поле кодової послідовності; CRC – поле захисту послідовності

Рисунок 3.3 - Структура пакетів, що передаються в мережі технології LoRaWAN

Структура кадру LoRa складається: з преамбули; з поля заголовку PHDR; з поля з PHDR_CRC; з поля кодової послідовності PHYPayload; з поля CRC після корисного навантаження для захисту послідовності.

Пакети (рисунок 3.3) передаються в лінії вгору (Uplink), використовуючи режим передачі радіопакетів LoRa, в який включені фізичний заголовок LoRa (PHDR) плюс CRC заголовка (PHDR_CRC). Переданий трафік корисного навантаження захищений циклічними кодами перевірки надмірності CRC, PHDR_CRC і поля корисного навантаження, які вставляються радіопередавачем.

Кожен пакет повідомлення в лінії вниз (рисунок 3.4) відправляється сервером тільки на один кінцевий пристрій LoRa і ретранслюється одним мережевим сервером. В пакетах повідомлень в лінії вниз використовується режим передачі радіопакетів, в який включені фізичний заголовок LoRa (PHDR) і циклічний код перевірки надмірності заголовка (PHDR_CRC).

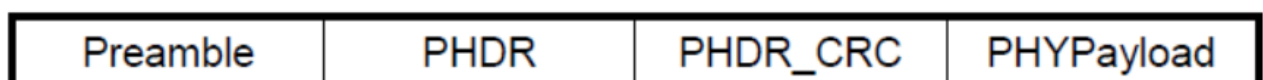


Рисунок 3.4 - Пакет повідомлення в лінії «вниз» LoRa

Для успішного функціонування системи обміну інформацією LoRa необхідна взаємна синхронізація приймача і передавача, що дозволяє визначити часові межі прийому та передачі як цілого блоку даних (або кадру), так і одиничних символів. Вузька кореляційна функція радіосигналу забезпечує високу точність часової синхронізації.

Технологія LoRa використовує асинхронний режим прийому-передачі при якому передавач може почати генерацію радіосигналу в будь-який момент часу. В цьому випадку потрібний механізм, що забезпечує синхронізацію приймача по сигналу від передавача. В якості такого механізму використовується преамбула, що передує кожному сеансу зв'язку [16]. Преамбула включає в себе послідовність символів, що дозволяють приймачу виявити активність передавача, визначити використовуваний передавачем коефіцієнт розширення спектра (SF) і виконати символну синхронізацію. Тривалість преамбули є величиною, що конфігурується і повинна бути не менше, ніж $T1 + 2 \cdot T2$, де $T1$ - визначає максимальний час знаходження приймача в стані "сну" (Sleep), $T2$ - визначає час пошуку приймачем преамбули (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Початок передачі сеансу зв'язку за допомогою передачі преамбули кадру LoRa

Після закінчення передачі преамбули слідує слово синхронізації (англ. Sync Word) та блок даних фізичного рівня. Довжина слова синхронізації налаштовується в діапазоні від 1 до 8 байт. Специфічні значення визначені специфікацією LoRa. Так довжина слова синхронізації дорівнює 0x34 для публічних мереж, 0x12 – для приватних мереж та 0xC194C1 – для каналів з

частотною модуляцією з частотним зсувом (FSK).

На рисунку 3.6 приведена загальна структура кадру, що забезпечує передачу одного блоку даних [20].

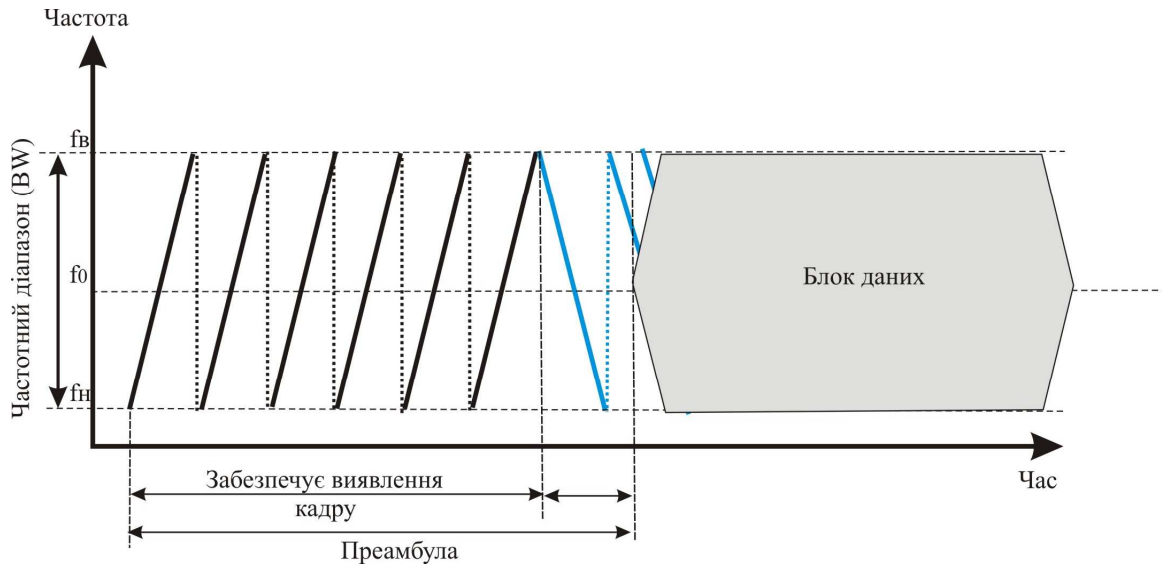


Рисунок 3.6 - Загальна структура кадру передачі одного блоку даних

3.3 Детектування широкосмугових радіосигналів з ЛЧМ

Механізм функціонування детектора преамбули оснований на використанні узгодженого фільтру, чия імпульсна характеристика комплексно спряжена з ЛЧМ радіосигналом в частотній області та має дзеркальне відображення його у часі [20]:

$$h(t) = A_1 \cdot \cos\left(\omega_n \cdot (T_{sym} - t) - \frac{\mu}{2} \cdot (T_{sym} - t)^2\right), \quad 0 \leq t < T_{sym} \quad (3.2)$$

Символи інформаційного блоку даних фізичного рівня (PHY DATA) передаються широкосмуговим радіосигналом LoRa, який визначається в частотному зміщенні $e^{j \cdot \Delta\omega \cdot k \cdot t}$ відносно опорного ЛЧМ радіосигналу $e^{j(\omega_n \cdot t + \mu \cdot t^2)}$, де $k=0,1,2,\dots,2^{\text{SF}}$ – інформаційний символ, розмірністю SF біт (рисунок 3.7):

$$x(t) = \begin{cases} A_0 \cdot \cos\left(\omega_n \cdot t + \Delta\omega \cdot k \cdot t + \frac{\mu}{2} \cdot t^2\right), & 0 \leq t < T_0 \\ A_0 \cdot \cos\left(\omega_n \cdot t + \Delta\omega \cdot k \cdot t - BW \cdot t + \frac{\mu}{2} \cdot t^2\right), & T_0 \leq t < T_{sym} \end{cases} \quad (3.3)$$

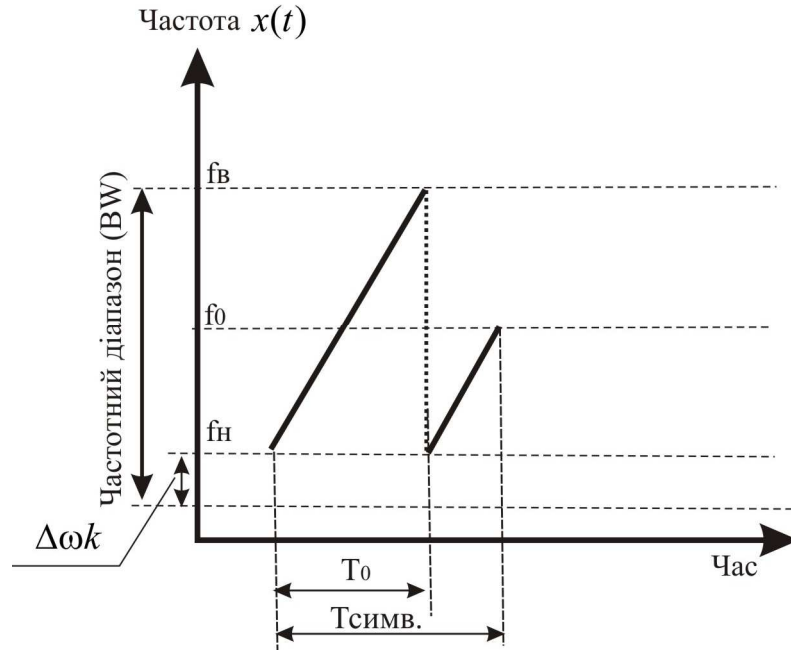


Рисунок 3.7 - Інформаційний символ, розмірністю SF біт

3.4 Алгоритм роботи приймача

Розглянемо можливу схему роботи приймача:

1. На вхід приймача LoRa, що переносить блок даних фізичного рівня, поступає еталонний ЛЧМ сигнал [20]:

$$c(t) = A_1 \cdot \cos\left(\omega_n \cdot t + \frac{\mu}{2} \cdot t^2\right), \quad 0 \leq t < T_{sym}. \quad (3.4)$$

Декодований сигнал (де-chirped): $y(t) = x(t) \cdot c(t) =$

$$= \frac{A_0 \cdot A_1}{2} \cdot \begin{cases} \cos(\Delta\omega \cdot k \cdot t) + \cos(2 \cdot \omega_n \cdot t + \Delta\omega \cdot k \cdot t + \mu \cdot t^2), & 0 \leq t < T_0 \\ \cos(BW - \Delta\omega \cdot k \cdot t) + \cos(2 \cdot \omega_n \cdot t + \Delta\omega \cdot k \cdot t - BW \cdot t + \mu \cdot t^2), & T_0 \leq t < T_{sym} \end{cases}$$

$$n_y(t) = n(t) \cdot c(t).$$

У виразі $y(t)$ відкинемо другі складові (високочастотні складові) в фігурних дужках:

$$y(t) = \frac{A_0 \cdot A_1}{2} \cdot \begin{cases} \cos(\Delta\omega \cdot k \cdot t), & 0 \leq t < T_0 \\ \cos([BW - \Delta\omega \cdot k] \cdot t), & T_0 \leq t < T_{sym} \end{cases} \quad (3.5)$$

2. $\tilde{x}(t) = x(t) + n(t)$, де $n(t)$, $0 \leq t < T_{sym}$ - адитивний білий Гаусівський шум.

3. $\tilde{y}(t) = y(t) + n_n(t)$ - змішаний сигнал.

4. На виході блоку перетворення Фур'є (FFT+) отримуємо наступний комплексний сигнал [20]:

$$\begin{aligned} Y(\omega) = & \int_{-\infty}^{\infty} y(t) \cdot e^{-i\omega t} dt = \frac{A_0 \cdot A_1}{4} \times e^{-j(\omega - \Delta\omega k) \frac{T_0}{2}} \cdot T_0 \cdot \frac{\sin[(\omega - \Delta\omega k) \cdot T_0 / 2]}{(\omega - \Delta\omega k) \cdot T_0 / 2} + \\ & + \frac{A_0 \cdot A_1}{4} \times e^{-j(\omega - (BW - \Delta\omega k)) \frac{T_0 + T_{sym}}{2}} (T_{sym} - T_0) \cdot \frac{\sin[(\omega - (BW - \Delta\omega k)) \cdot (T_{sym} - T_0) / 2]}{(\omega - (BW - \Delta\omega k)) \cdot (T_{sym} - T_0) / 2} + \\ & + \frac{A_0 \cdot A_1}{4} \times e^{-j(\omega + \Delta\omega k) \frac{T_0}{2}} \cdot T_0 \cdot \frac{\sin[(\omega + \Delta\omega k) \cdot T_0 / 2]}{(\omega + \Delta\omega k) \cdot T_0 / 2} + \frac{A_0 \cdot A_1}{4} \times e^{-j(\omega + (BW - \Delta\omega k)) \frac{T_0 + T_{sym}}{2}} \times \\ & \times (T_{sym} - T_0) \cdot \frac{\sin[(\omega + (BW - \Delta\omega k)) \cdot (T_{sym} - T_0) / 2]}{(\omega + (BW - \Delta\omega k)) \cdot (T_{sym} - T_0) / 2}. \end{aligned}$$

Відкинувши дві останні складові, що мають суттєвий вплив в області від'ємних частот і низьке в області позитивних, отримуємо:

$$Y^+(\omega) = Y_1(\omega) + Y_2(\omega), \text{ де}$$

$$Y_1(\omega) = \frac{A_0 \cdot A_1}{4} \times e^{-j(\omega - \Delta\omega k) \frac{T_0}{2}} \cdot T_0 \cdot \frac{\sin[(\omega - \Delta\omega k) \cdot T_0 / 2]}{(\omega - \Delta\omega k) \cdot T_0 / 2},$$

$$Y_2(\omega) = \frac{A_0 \cdot A_1}{4} \times e^{-j(\omega - (BW - \Delta\omega k)) \frac{T_0 + T_{sym}}{2}} (T_{sym} - T_0) \cdot \frac{\sin[(\omega - (BW - \Delta\omega k)) \cdot (T_{sym} - T_0) / 2]}{(\omega - (BW - \Delta\omega k)) \cdot (T_{sym} - T_0) / 2}.$$

Отримуємо $\tilde{Y}^+(\omega) = Y^+(\omega) + N_Y^+(\omega)$ - сигнал після швидкого перетворення Фур'є.

Для запобігання перекриття двох складових $Y^+(\omega)$ при різних значеннях k повинна виконуватись вимога [20]:

$$\Delta\omega < \frac{BW}{2 \cdot k}. \quad (3.6)$$

Отже,

$$\Delta\omega < \frac{BW}{2^{SF+1} + 1}. \quad T_0 = \frac{(2^{SF+1} - k)}{2^{SF+1}} \cdot T_{sym}. \quad (3.7)$$

$$5. \text{ Функція прийняття рішення } \tilde{z}(\omega) = \left| \tilde{Y} + \left(\omega = 0 \dots \frac{BW}{2} \right) \right| + \left| \tilde{Y} + \left(\omega = \frac{BW}{2} \dots BW \right) \right|$$

та отриманий сигнал:

$$\tilde{z}(\omega) = z(\omega) + N_z(\omega).$$

6. Пошук максимального значення $\tilde{z}(\omega)$.

$$\text{Отримання } k = \frac{\omega_{\max}}{\Delta\omega}, \quad \tilde{z}(\omega = \omega_{\max}) = \text{MAX}[\tilde{z}(\omega)].$$

Тобто, значення декодованого приймачем інформаційного символу k .

Для цього знаходимо ω , при якому функція прийняття рішення $z(\omega)$ приймає максимальне значення (ω_{\max}).

$$z(\omega = \omega_{\max}) = \text{MAX}[z(\omega)], \quad (3.8)$$

$$k = \frac{\omega_{\max}}{\Delta\omega}. \quad (3.9)$$

3.5 Розрахунок характеристик LoRa

Фізичний рівень LoRa (рисунок 3.3) включає 8 символів преамбули, 2 символи синхронізації, фізичне корисне навантаження та додатковий кадр CRC. При цьому, коефіцієнт розширення спектру SF8 займає вдвічі більше часу, ніж - SF7, а SF9 - вдвічі більше, ніж SF8.

Швидкість передачі символів (R_s) при відомій пропускну здатності (BW) та коефіцієнті розширення спектру (SF) розраховується як:

$$R_s = BW / (2^{SF}) \quad (3.10)$$

Чим вищий коефіцієнт розширення спектру тим більший ефірний час. За допомогою Air time calculator [21] розрахуємо час в ефірі передачі повідомлення Hello World!, яке містить 12 байтів інформаційного повідомлення при значенні $BW=125$ кГц (таблиця 3.1) і $BW=250$ кГц (таблиця 3.2) та SF7- SF12 для обох випадків.

Таблиця 3.1 – Час в ефірі передачі повідомлення «Hello World!» при $BW=125$ кГц

SF	7	8	9	10	11	12
BW,кГц	125	125	125	125	125	125
t_e ,мс CR=4/5, біт/с	41,22	82,43	144,38	288,77	577,54	1155,07
t_e , мс CR=4/6, біт/с	45,31	90,62	156,67	313,34	626,69	1253,38
t_e , мс CR=4/7, біт/с	49,41	98,82	168,96	337,92	675,84	1351,68
t_e , мс CR=4/8, біт/с	53,50	107,01	181,25	362,50	724,99	1449,98

При зниженні коефіцієнту розширення спектру, стає вища швидкість передачі даних (дані розрахунку у відповідності до 3.10 зведені до таблиці 3.3).

Перші 8 символів «вверх» - це символи преамбули, що використовуються для виявлення сигналів LoRa, наступні 2 «символи вверх» - це символи синхронізації, що використовуються для синхронізації приймача та передавача, далі використовується 5 модульованих символів (корисне навантаження). Стрибок частоти являє собою модульований символ.

Таблиця 3.2 – Час в ефірі передачі повідомлення «Hello World!» при $BW=250\text{кГц}$

SF	7	8	9	10	11	12
BW, кГц	250	250	250	250	250	250
t_e , мс CR=4/5, біт/с	20,61	41,22	72,19	144,38	288,77	405,62
t_e , мс CR=4/6, біт/с	22,66	45,31	78,34	156,67	313,34	528,38
t_e , мс CR=4/7, біт/с	24,70	49,41	84,48	168,96	337,92	561,15
t_e , мс CR=4/8, біт/с	26,75	53,50	90,62	181,25	362,50	593,92

Таблиця 3.3 – Швидкість передачі даних при $BW=125\text{кГц}$ та різних значеннях CR, біт/с

SF	7	8	9	10	11	12
BW, кГц	125	125	125	125	125	125
R_s , CR=1 (без кодування FEC), біт/с	6835,94	3906,25	2197,27	1220,70	671,39	366,21
R_s , CR=4/5, біт/с	5468,75	3125,00	1757,81	976,56	537,11	292,97
R_s , CR=4/6, біт/с	4557,29	2604,17	1464,84	813,80	447,59	244,14
R_s , CR=4/7, біт/с	3906,25	2232,14	1255,58	697,54	383,65	209,26
R_s , CR=4/8, біт/с	3417,97	1953,13	1098,63	610,35	335,69	183,11

Висновки до третього розділу

Час передачі пакетів мережею LoRa та її ємність визначається коефіцієнтом розширення спектру. При цьому потрібно дотримуватись певного балансу між якістю сигналу мережі та часом передачі пакетів.

Типова тривалість передачі одного up-link пакета з корисним навантаженням 10 байт за умови використання мінімального коефіцієнта розширення спектру (SF=7) складає 59,65мс, а за умови використання максимального коефіцієнта розширення спектру (SF=12) – 1253,38мс.

Перші 8 символів «вверх» - це символи преамбули, що використовуються для виявлення сигналів LoRa, наступні 2 «символи вверх» - це символи синхронізації, що використовуються для синхронізації приймача та передавача, далі використовується модульовані символи (корисне навантаження). Стрибок частоти являє собою модульований символ.

4 РОЗРОБКА ТА ОПИС ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

4.1 Опис математичного пакету та мови програмування MATLAB

Серед безлічі існуючих математичних пакетів, таких як Mathematica, MathCad і ін., система MATLAB займає лідируюче місце завдяки зручній вбудованій мові програмування для реалізації найрізноманітніших математичних алгоритмів і завдань математичного моделювання. Крім того, даний пакет має додатково інструмент візуального моделювання Simulink, що дозволяє будувати і досліджувати математичні моделі, не вдаючись до їх програмування [22,23].

Для моделювання радіонтерфейсу LoRa використано систему програмування та мову, що називається MATLAB. Вона проста у вивченні, універсальна і дуже корисна для інженерів та інших професіоналів.

MATLAB - це спеціальна мова, яка є чудовим вибором для написання програм середнього розміру, які вирішують проблеми, пов'язані з маніпулюванням цифрами. Дизайн мови дає можливість написати потужну програму в кілька рядків. Проблеми можуть бути відносно складними, тоді як програми MATLAB, які їх вирішують, відносно прості: відносні, тобто до еквівалентної програми, написаної мовою загального призначення, такою як C ++ або Java.

MATLAB використовується в самих різних сферах - від природничих наук, до всіх інженерних дисциплін, а також він широко використовується в промисловості. Для студентів досвід роботи в MATLAB є необхідною навичкою на сучасному ринку праці.

4.2 Розробка програмного забезпечення

Текст програми для побудови ЛЧМ сигналу в часовій області (3.1) наведений нижче:

```

%% ЛЧМ сигнал
fd = 150000; % частота дискретизації
td = 1/fd; % період дискретизації
N=1000; T=100; step=T/N;
t=0:step:T;
f0=0.01; F=0.0175;
S=cos(2*pi*(f0+F*t).*t);
figure;
plot(t, S, 'LineWidth', 1.5);
ylabel('Значення випадкової величини');
xlabel('Час');
title('Радіоімпульс ЛЧМ');
xlim([0 20]);

```

На рисунку 4.1 приведений отриманий ЛЧМ радіосигнал у часовій області.

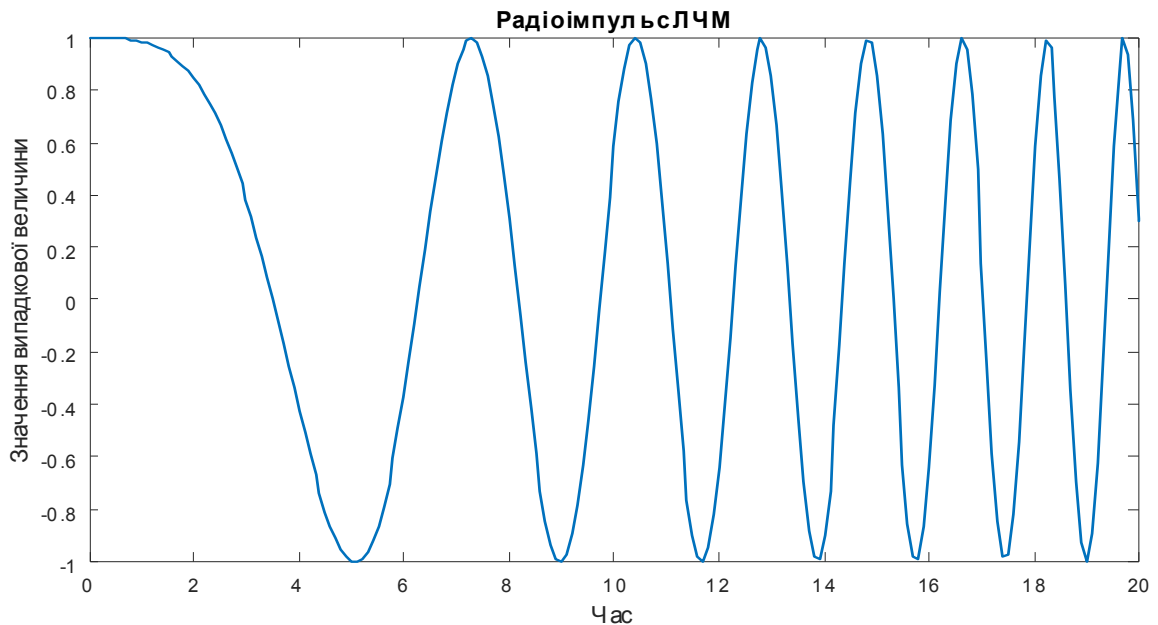


Рисунок 4.1 – Вигляд ЛЧМ радіосигналу у часовій області

Нижче наведений текст програми та спектр ЛЧМ сигналу (рисунок 4.2).

```

%% Спектр ЛЧМ сигналу
Sf = abs(fft(S)); % амплітудний спектр
fx = fd/2*linspace(-1,1,length(Sf)); % значення частот
figure
plot(fx/1000,fftshift(Sf))
grid on
xlim([-60 60])
title('Спектр ЛЧМ сигналу')
xlabel('Частота, кГц')

```

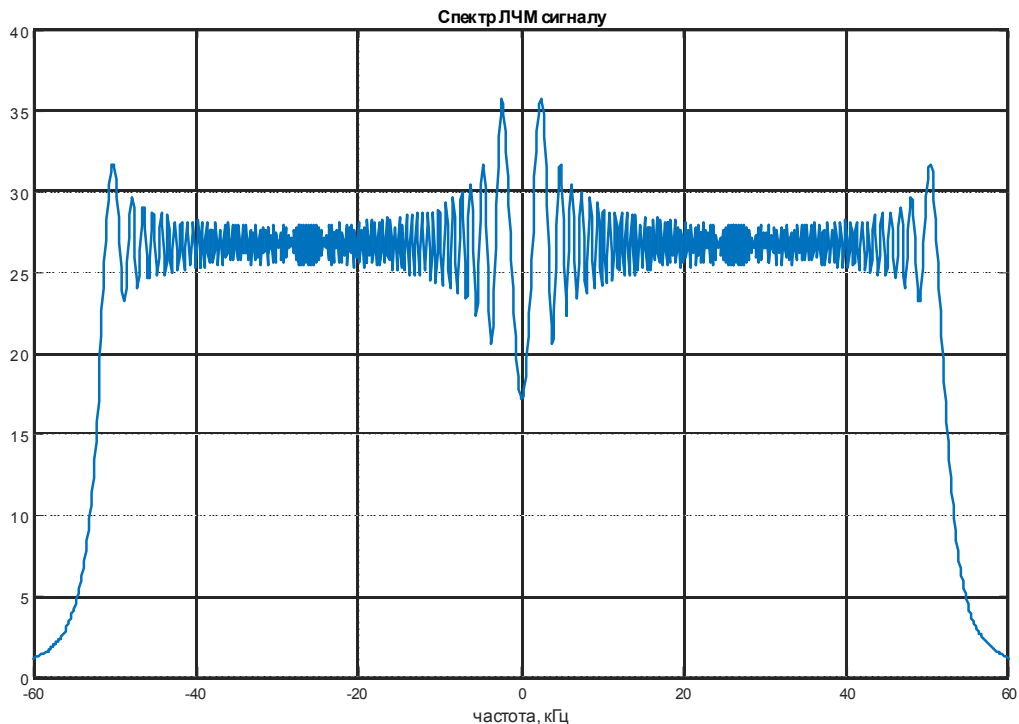


Рисунок 4.2 – Спектр ЛЧМ радіосигналу

Текст програми (код MATLAB) відправлення повідомлення передавачем LoRa "Hello World!" наведений нижче:

```
% CSS
message = "Hello World!" ; % повідомлення корисного навантаження
Power = 14 ; % потужність передачі, дБ
Fs = 10e6 ; % частота дискретизації
fc = 863e6 ;
Fc = 865e6 ;
dF = Fc - fc ; % частотний зсув
for BW = [125e3 250e3 500e3] % смуга пропускання сигналу LoRa
for SF = [7 8 9 10 11 12] % коефіцієнт розширення
title_txt = sprintf('SF = %1d, BW = %1.0f ???', SF, BW/1000) ;
signalIQ = LoRa_Tx(message,BW,SF,Power,Fs,Fc - fc) ;
figure
set(gcf, 'Position', [100, 100, 700, 400])
spectrogram(signalIQ,500,0,500,Fs,'yaxis','centered') ;
ylim([1.5 2.5]);
ylabel('Частота, МГц')
xlabel('Час');
title(title_txt)
end
end
```

Спектри сигналу для різних коефіцієнтів розширення SF7- SF12 та смуги пропускання BW=125;250;500 кГц технології LoRa наведені на рисунках 4.3 - 4.5.

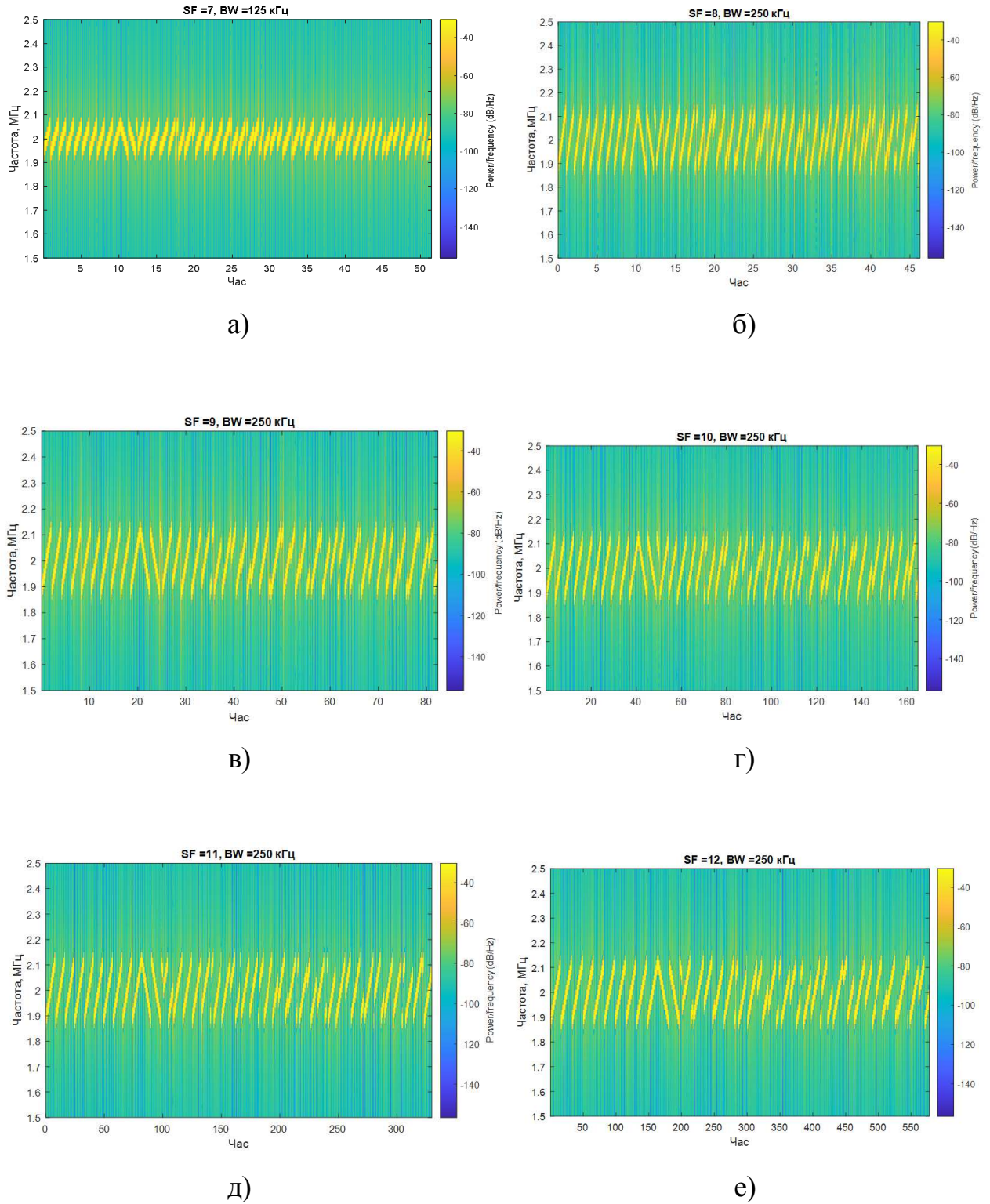


Рисунок 4.3 - Спектр сигналу для різних коефіцієнтів розширення: SF7 (а); SF8 (б); SF9 (в); SF10 (г); SF11 (д); SF12 (е) та смуги пропускання BW= 250кГц

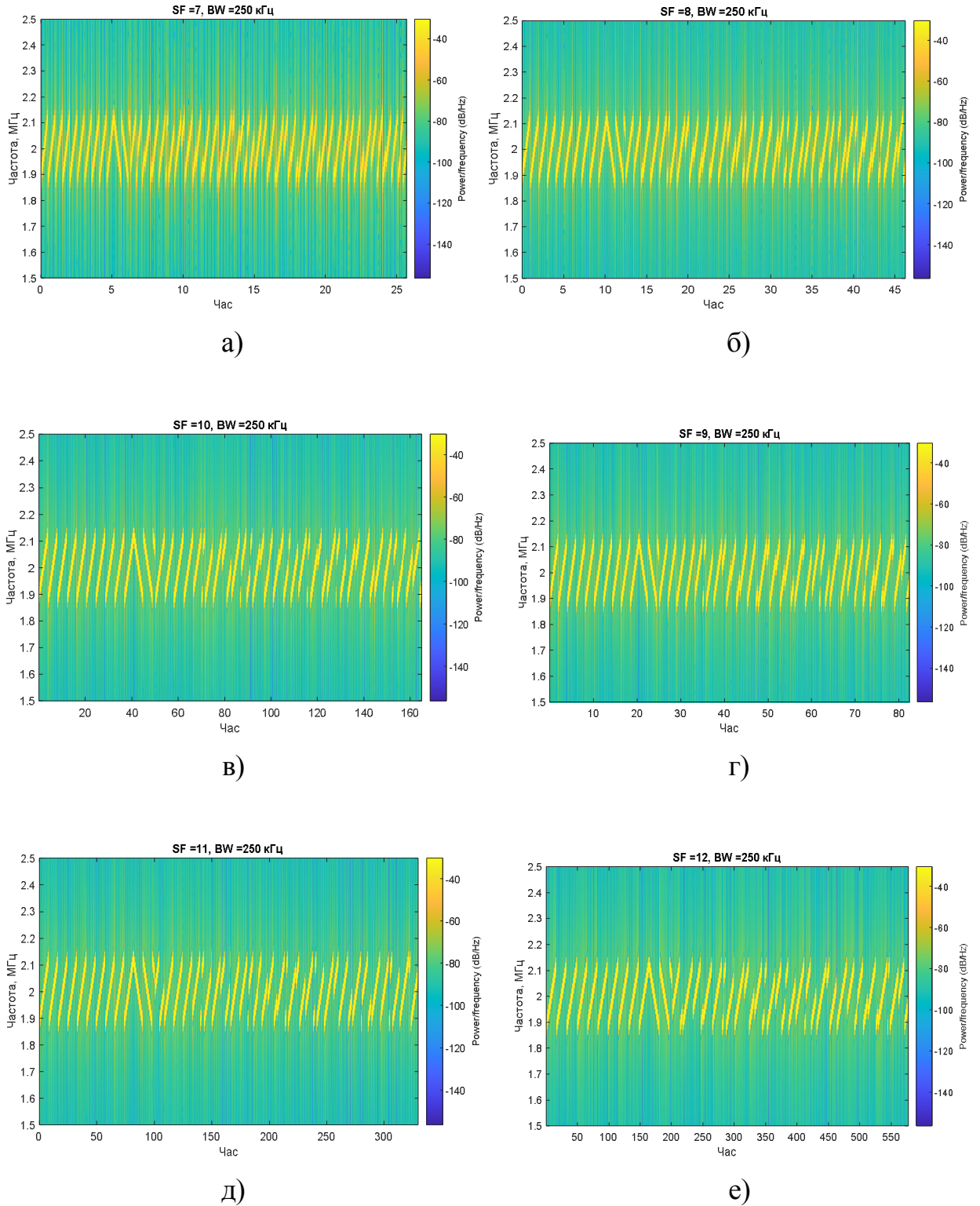


Рисунок 4.4 - Спектр сигналу для різних коефіцієнтів розширення: SF7 (а); SF8 (б); SF9 (в); SF10 (г); SF11 (д); SF12 (е) та смуги пропускання BW= 125 кГц

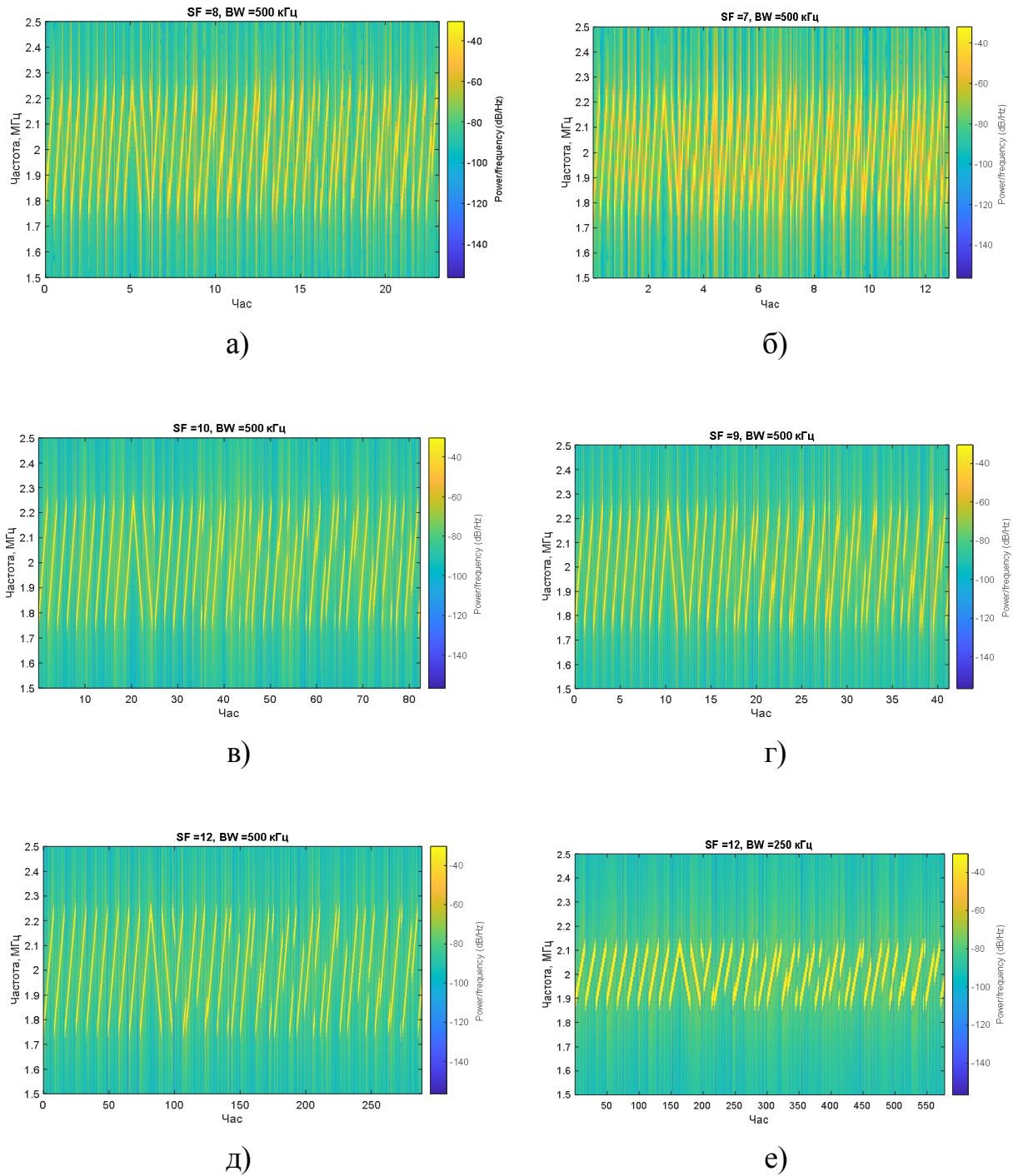


Рисунок 4.5 - Спектр сигналу для різних коефіцієнтів розширення:

$SF7$ (а); $SF8$ (б); $SF9$ (в); $SF10$ (г); $SF11$ (д); $SF12$ (е) та

смуги пропускання $BW = 500 \text{ кГц}$

Оцінимо зайняту смугу пропускання Chirp-сигналу та покажемо її на графіку спектральної щільності потужності (PSD), використовуючи функцію: $obw(x, Fs)$

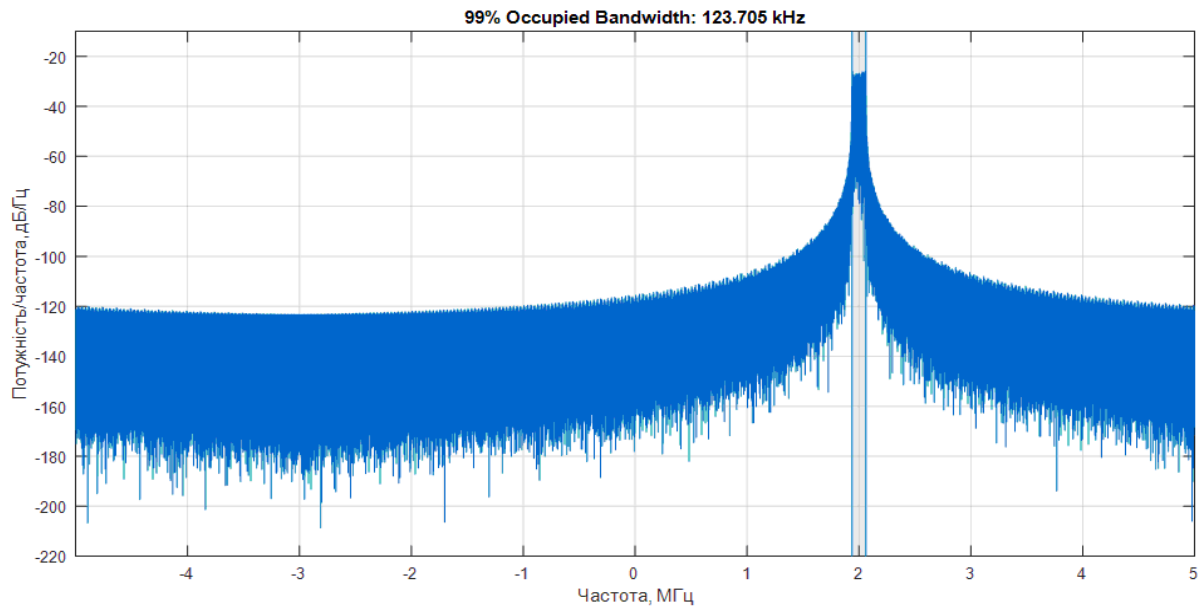


Рисунок 4.6 - Графік спектральної щільності потужності (PSD)

Код програми:

```
% CSS
message = "Hello World!" ; % повідомлення корисного навантаження
Power = 14 ; % потужність передачі, дБ
Fs = 10e6 ; % частота дискретизації
fc = 863e6 ;
Fc = 865e6 ;
dF = Fc - fc ; % частотний зсув
SF = 10 ;
BW = 125e3 ;

%% Transmit Signal
signalIQ = LoRa_Tx(message,BW,SF,Power,Fs,Fc - fc) ;
Sxx = 10*log10(rms(signalIQ).^2) ;
disp(['Transmit Power = ' num2str(Sxx) ' dBm'])
%% Plots
figure(1)
spectrogram(signalIQ,500,0,500,Fs,'yaxis','centered')
figure(2)
obw(signalIQ,Fs) ;
%% Received Signal
message_out = LoRa_Rx(signalIQ,BW,SF,2,Fs,Fc - fc) ;
%% Message Out
disp(['Message Received = ' char(message_out)])
```

Отже, як видно з рисунку 4.6 зайнята смугу пропускання сигналу 123,67 кГц, що показано на графіку спектральної щільності потужності (PSD).

Висновки до четвертого розділу

Широкопasmовий радіосигнал LoRa є сигналом з лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ) або CSS (Chirp Spread Spectrum), де в свою чергу CHIRP є аббревіатурою Compressed High-Intensity Radiated Pulse (стислий високоінтенсивний випромінюємий сигнал). Частота CSS радіосигналу може як збільшуватися (up-chirp), так і зменшуватися (down-chirp).

Методи CSS (chirp-розширений спектр) допомагають передавати сигнали на дуже великі відстані. В LoRa - мережах даний тип модуляції забезпечує низьку потужність споживання кінцевих пристроїв за низької швидкості передачі даних.

В LoRa - мережах використовується три різні смуги пропускання: 125kHz, 250kHz і 500kHz (стандартне значення 125kHz). Символи LoRa модулюються в діапазоні ширини смуги пропускання 125 кГц, а різні ортогональні (майже) коефіцієнти розширення використовуються на основі вимог до швидкості передачі даних та умов радіоканалу. В LoRa - мережах використовуються коефіцієнти розширення SF7 - SF12.

ВИСНОВКИ

Для України найбільш перспективною технологією, яку можна використовувати в глобальних мережах з низьким енергоспоживанням для ринку інтернету речей є відкрита неліцензована частина стеку LoRa під назвою - LoRaWAN. Дана технологія може використовуватись як окремо, так і сумісно з іншими прилаштованими для IoT – речей ліцензованими технологіями LTE, або діючими технологіями LPWAN.

Широкосмуговий радіосигнал LoRa є сигналом з лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ) або CSS (Chirp Spread Spectrum), де в свою чергу CHIRP є аббревіатурою Compressed High-Intensity Radiated Pulse (стислий високоінтенсивний випромінюємий сигнал). Частота CSS радіосигналу може як збільшуватися (up-chirp), так і зменшуватися (down-chirp).

Методи CSS (chirp-розширений спектр) допомагають передавати сигнали на дуже великі відстані. В LoRa - мережах даний тип модуляції забезпечує низьку потужність споживання кінцевих пристроїв за низької швидкості передачі даних. Єдиний шлюз на основі LoRa може приймати та передавати сигнали на відстань більше 15 кілометрів у сільській місцевості. Навіть у щільному міському середовищі повідомлення можуть передаватись на відстань до п'яти кілометрів, залежно від того, наскільки глибоко в приміщенні розташовані кінцеві пристрої (кінцеві вузли).

Робота LoRa - мережі здійснюється в основному в безліцензійному діапазоні частот 433 МГц, 868 МГц або 2,4 ГГц з потужністю 10–100 мВт та, найчастіше, з обмеженим робочим циклом 0,1% або 1%. Час автономної роботи може складати декілька років. В сплячому режимі кінцеві пристрої споживають дуже малу потужність (одиниці міліват).

Мережа LoRaWAN може підтримувати мільйони повідомлень. Однак кількість повідомлень, що підтримуються в будь-якому розгортанні, залежить від кількості встановлених шлюзів. Один восьмиканальний шлюз може

підтримувати до 1,5 млн. повідомлень протягом 24-годинного періоду. Якщо потрібна більша ємність, потрібно лише додати додаткові шлюзи до мережі.

Враховуючи специфіку кінцевих вузлів і шлюзів на основі LoRa, для обслуговування потрібно лише кілька шлюзів - налаштованих у зірковій мережі. Це означає, що капітальні та операційні витрати можуть бути відносно низькими. Крім того, коли економічно ефективні модулі LoRa RF, вбудовані в недорогі кінцеві вузли та використовуються разом із відкритим стандартом LoRaWAN рентабельність мережі може бути ще підвищена.

Типова тривалість передачі одного up-link пакета з корисним навантаженням 10 байт за умови використання мінімального коефіцієнта розширення спектру (SF=7) складає 59,65мс, а за умови використання максимального коефіцієнта розширення спектру (SF=12) – 1253,38мс.

В LoRa - мережах використовується три різні смуги пропускання: 125kHz, 250kHz і 500kHz (стандартне значення 125kHz). Символи LoRa модулюються в діапазоні ширини смуги пропускання 125 кГц, а різні ортогональні (майже) коефіцієнти розширення використовуються на основі вимог до швидкості передачі даних та умов радіоканалу.

Перелік посилань

1. DataArt IoT trends and predictions for 2019: IoT goes mainstream. – Назва з екрану. – [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <http://surl.li/gkvb>
2. What is LoRaWAN. – Назва з екрану. – [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <https://lora-alliance.org/resource-hub/what-lorawanr>
3. Тимур Ягофароф. Национальное LoRaWAN-покрытие появится к 2020г. Назва з екрану. – [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <http://surl.li/gkvq>
4. IEEE Std 802.15.4™-2003. IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). IEEE Computer Society. IEEE-SA Standards Board, 12 May 2003. - 679 p.
5. ZigBee specification. Document 053474r13. - ZigBee Standards Organization, Dec. 1, 2006. - 534 p.
6. e. a. C. M. Ramya, "Study on zigbee technology," vol. 6, pp. 297–301, 2011.
7. I. Dotlic and R. Miura, "IEEE 802.15.4a-based Impulse Radio Ultra-Wideband system with joint channel equalization and decoding," 2014 IEEE International Conference on Ultra-WideBand (ICUWB), Paris, 2014, pp. 234-239, doi: 10.1109/ICUWB.2014.6958984.
8. Sigfox technology – Назва з екрану. – [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sigfox.com/en/what-sigfox/technology>
9. Стандарты беспроводной связи диапазона ISM– Назва з екрану. – [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <https://russianelectronics.ru/standarty-besprovodnoj-svyazi-diapazona-ism/>
10. Nolan K. E., Guibene W., Kelly M. Y. An Evaluation of Low Power Wide Area Network Technologies for the Internet of Things//International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2016, pp. 439– 444.

11. Эволюция современных сетей мобильной связи 2G/3G/4G. – Назва з екрану. – [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <http://surl.li/gtdf>.
12. Технология сотовой связи LTE – почти 4G. – Назва з екрану. – [Електроний ресурс]. – Режим доступу: http://www.electronics.ru/files/article_pdf/0/article_162_584.
13. Виктор Алексеев. Сравнительные характеристики широкополосных и узкополосных сетей LPWAN нелицензируемого диапазона для приложений M2M и IoT / Беспроводные технологии № 3 (19), стр. 9-20.
14. Weightless Specification – Назва з екрану. – [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.weightless.org/about/weightless-specification>
15. Кумаритова Д. Л., Киричек Р. В. Обзор и сравнительный анализ технологий LPWAN сетей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Том 4. № 4. С. 33–48.
16. LoRaWAN™ Specification (Version: V1.0.2) / N. Sornin, M. Luis, T. Eirich, T. Kramp, O. Hersent. 6 LoRa™ Alliance, 2016.
17. LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview Technical Paper February 11, Proprietary Semtech 2020. – Pp. 26.
18. Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A., Zorzi, M. Long-Range Communications in Unlicensed Bands: the Rising Stars in the IoT and Smart City Scenarios // IEEE Wireless Communications, 2016. Vol. 23. Iss. 5. pp. 60–97.
19. Internet of Things следующий виток развития телекоммуникаций– Назва з екрану. – [Електроний ресурс]. – Режим доступу: www.deps.ua.
20. Calculate the air time of your LoRa frame. – Назва з екрану. – [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.loratools.nl/#/airtime>
21. Дьяконов В. П. MATLAB 7.*/R2006/2007. Самоучитель. – М.: «ДМК-Пресс», 2008. – 768 с. – ISBN 978-5-94074-424-5.
22. Math. Graphics. Programming. Назва з екрану. – [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет програмування та комп'ютерних і телекомунікаційних систем

Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

ДИПЛОМНА РОБОТА
«ТЕХНОЛОГІЯ ПОБУДОВИ ЕФЕКТИВНОЇ БЕЗПРОВОДОВОЇ
МЕРЕЖІ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОТОКОЛУ LORAWAN»

Спеціальність 172 – «Телекомунікації та радіотехніка»

Виконав: студент 2 курсу, група ТР_м-19-1

Є. О. Крикун

Керівник: д-р. техн. наук, доц.

С. К. Підченко

Хмельницький, 2020

Мета роботи — дослідження технології побудови ефективною безпроводовою мережі з використанням протоколу LoRaWAN та побудова програмної моделі радіоінтерфейсу.

Завдання, які вирішуються в роботі

1. Проведення аналізу ринку широкосмугових безпроводових технологій.
2. Побудувати архітектуру та навести технічні характеристики стандарту LoRaWAN.
3. Побудувати програмну модель радіоінтерфейсу стандарту LoRaWAN.
4. Розробити та описати програмне забезпечення.

Об'єкт дослідження: *процеси збору інформації від пристроїв мережі LoRaWAN.*

Предмет дослідження: *технологія мереж LoRaWAN та програмна модель радіоінтерфейсу.*

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Запропонована програмна модель радіоінтерфейсу LoRa, яка на відміну від існуючих, враховує умови обміну сигналами безпроводовим каналом зв'язку між передавальними і приймальними пристроями в мережі.

Практична значимість отриманих результатів:

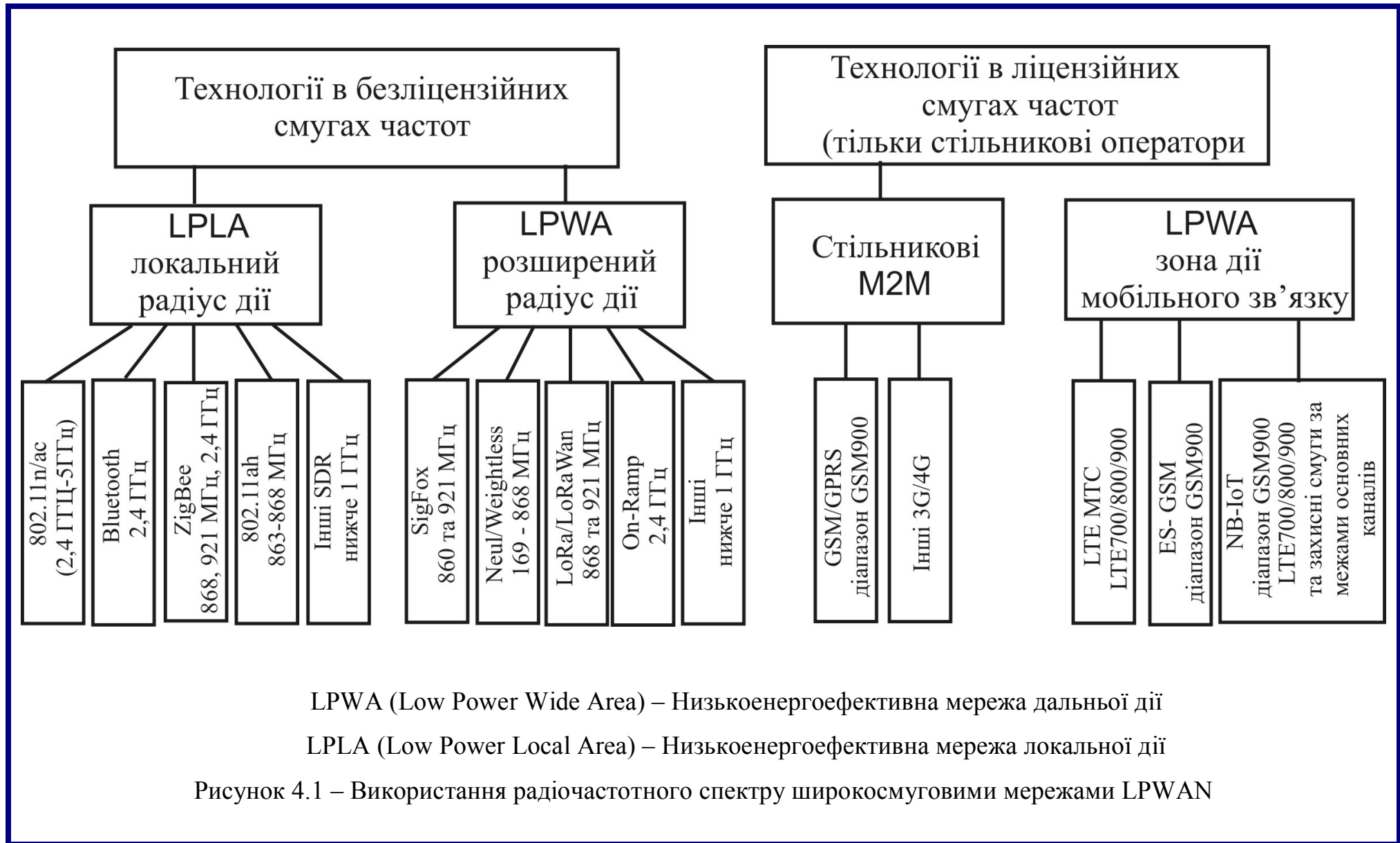
1. В результаті аналізу сучасного стану M2M – та IoT-мереж виявлено, що широке впровадження даних технологій потребує енергоефективних дешевих каналів радіозв'язку підвищеної дальності. Показано, що використання технології LPWAN (*Low-Power Wide-Area Network*) відкриває нові можливості щодо створення високоефективних, енергоекономічних та дешевих M2M – та IoT-мереж.

2. Запропонований та досліджений алгоритм обробки сигналів LoRa-приймачем пристрою IoT-мережі. Відмінність даного алгоритму полягає у використанні ЛЧМ-сигналів з великою базою $B \gg 1$, що суттєво підвищує завадостійкість радіоканалу передачі даних.

3. В середовищі MATLAB розроблене програмне забезпечення для аналізу характеристик каналу передачі даних LoRa-мережі, яке дозволяє проводити вибір параметрів ЛЧМ-модуляції в залежності від величини допустимої смуги пропускання радіоканалу.

Структура і обсяг дипломної роботи. Дипломна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків до кожного розділу, висновків, списку посилань, додатку. Загальний обсяг роботи складає 67 сторінок комп'ютерного тексту, у тому числі: 37 рисунків, список використаних джерел вміщує 22 найменувань.

1. ВИКОРИСТАННЯ РАДІОЧАСТОТНОГО СПЕКТРУ ШС МЕРЕЖАМИ LPWAN



2 АРХІТЕКТУРА ТА ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАНДАРТУ LoRaWan

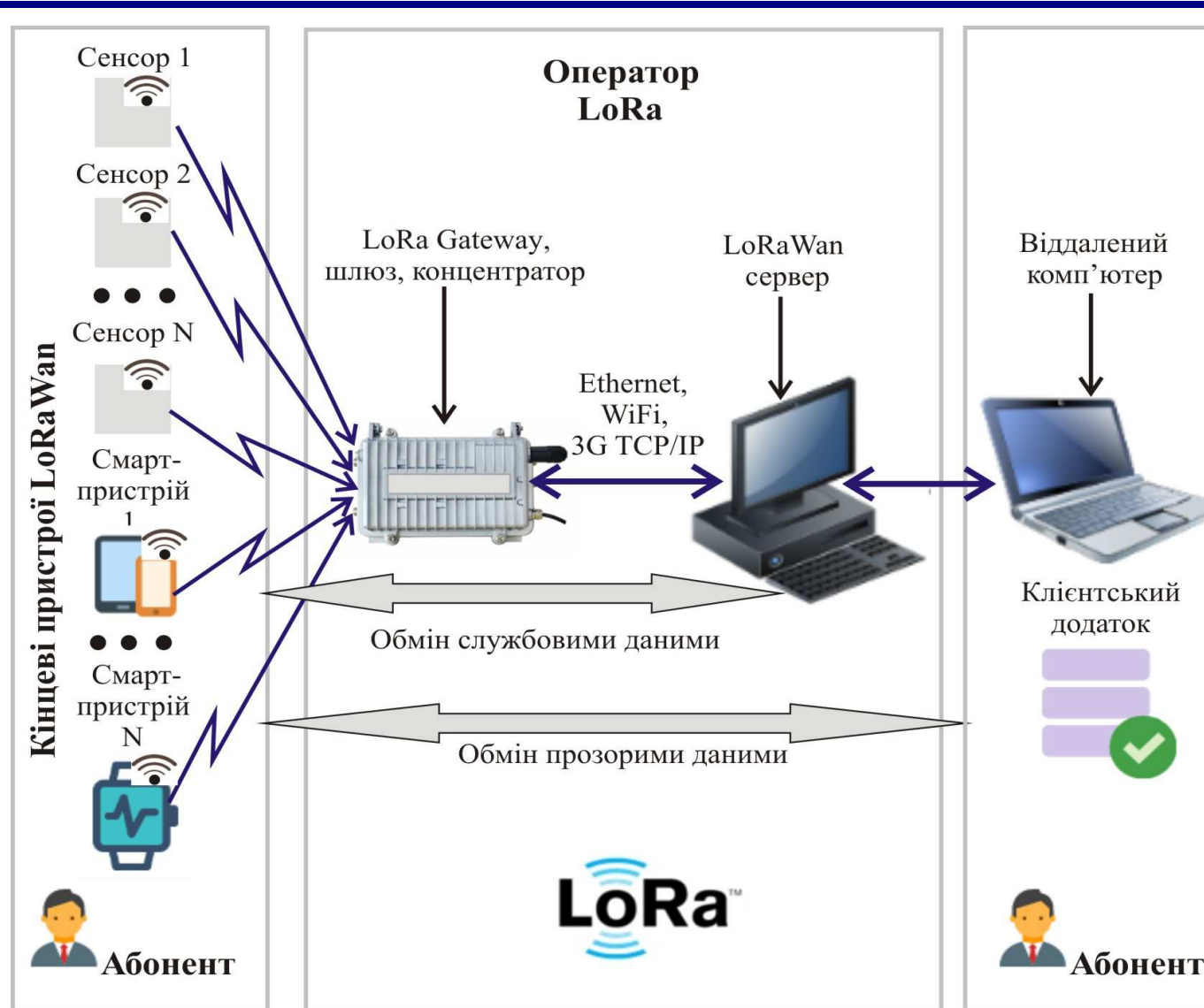


Рисунок 5.1 – Архітектура мережі LoRaWAN

3.1 МЕРЕЖА LORAWAN. ТИПОВІ СХЕМИ РОБОТИ

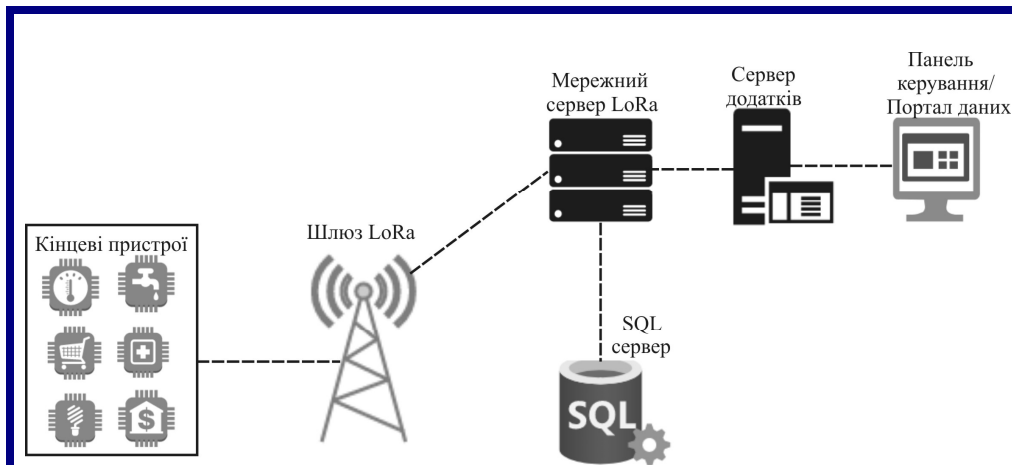


Рисунок 6.1 – Типове підключення кінцевих пристроїв в типовому розгортанні мережі LoRaWAN

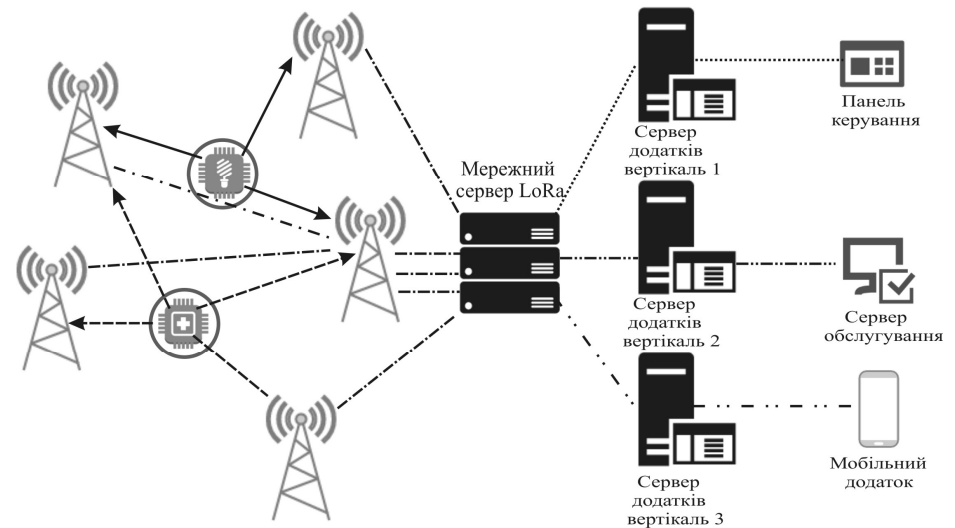


Рисунок 6.2 – Типова схема прийому / передачі повідомлень від кінцевих пристроїв

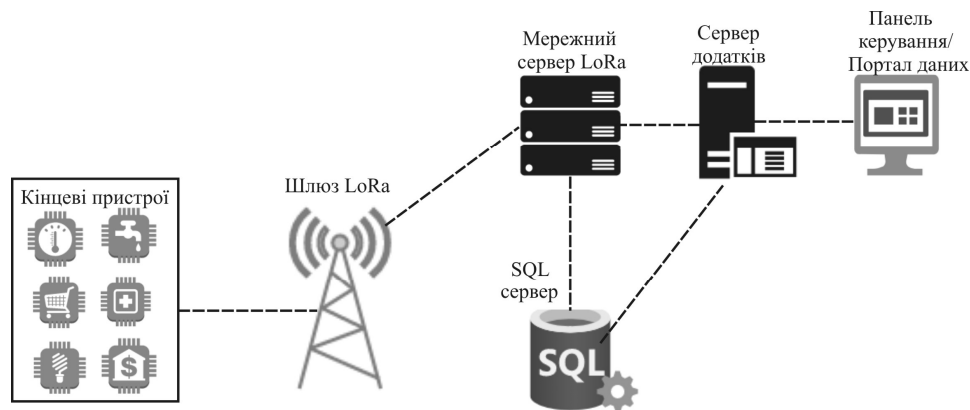


Рисунок 6.3 – Схема роботи мережного серверу у типовому розгортанні мережі LoRaWAN

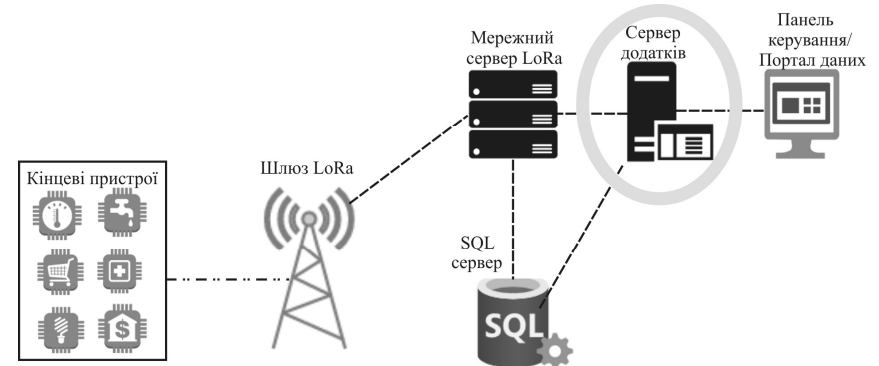


Рисунок 6.4 – Приклад роботи серверу додатків у типовому розгортанні мережі LoRaWAN

3.2 МЕРЕЖА LORAWAN. СИНХРОНІЗАЦІЯ. КЛАСИ ПРИСТРОЇВ LORAWAN

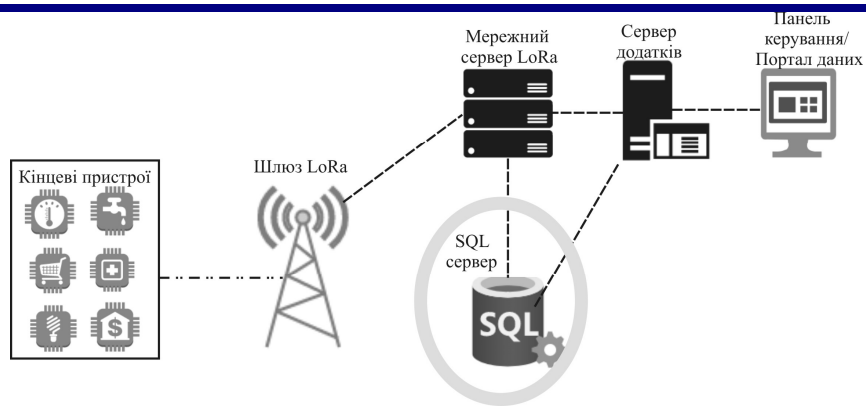


Рисунок 7.1 – Схема роботи серверу активації кінцевих пристроїв мережі LoRaWAN

Додаток				
LoRa MAC				
MAC опції				
Клас А (базовий рівень)	Клас В (базовий рівень)	Клас С (постійний)		
LoRa модуляція				
Регіональний діапазон ISM				
EU 868	EU 433	US 915	AS 430	—

Рисунок 7.2 – Класи пристроїв LoRaWAN

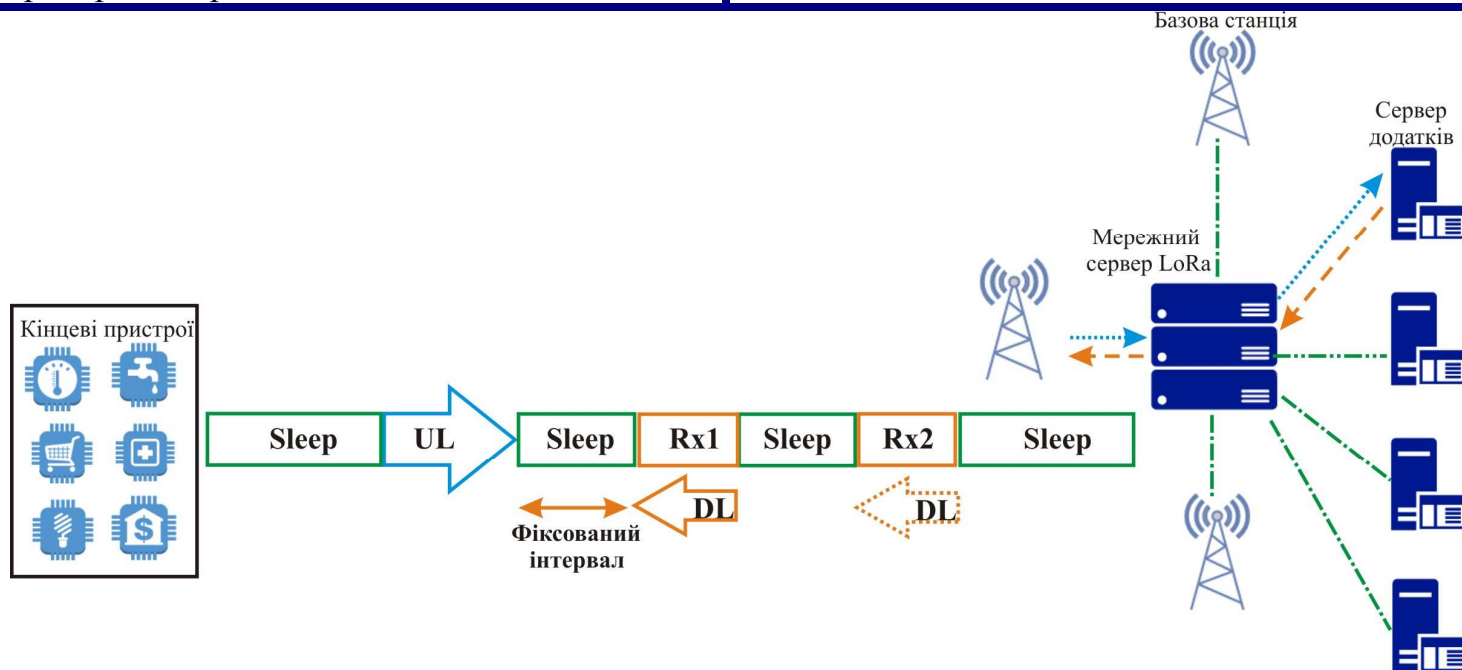


Рисунок 7.3 – Режим роботи класу А

3.3 МЕРЕЖА LORAWAN. СИНХРОНІЗАЦІЯ

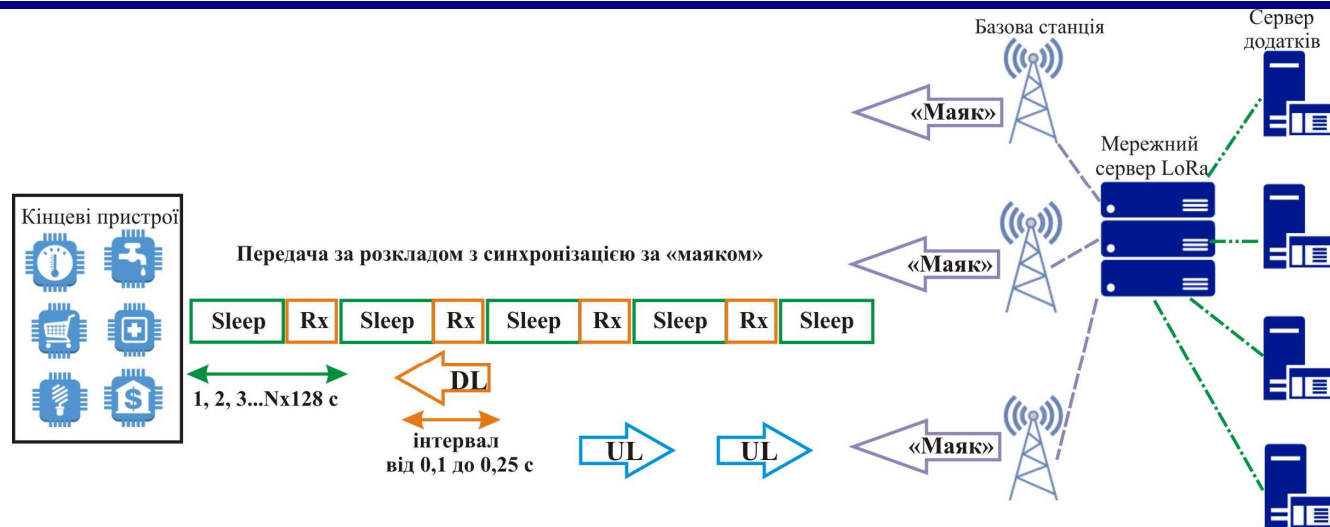


Рисунок 8.1 – Ситуація синхронізації пристроїв в мережі за допомогою «маяків»

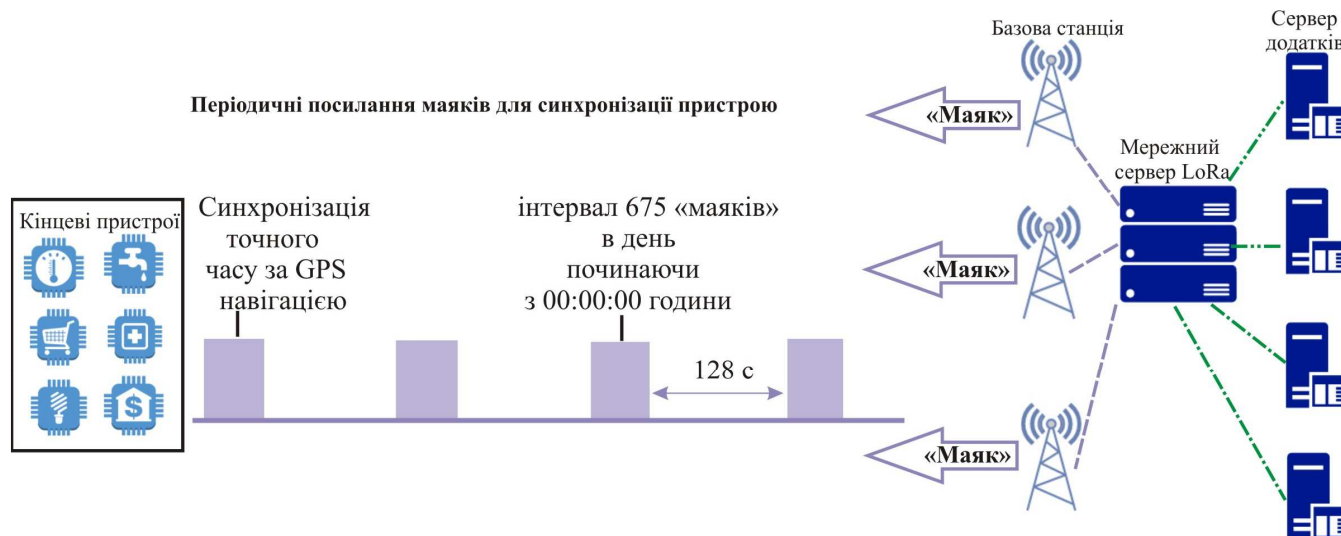


Рисунок 8.2 – Періодичні посилання «маяків» для синхронізації пристрою

3.4 МЕРЕЖА LORAWAN

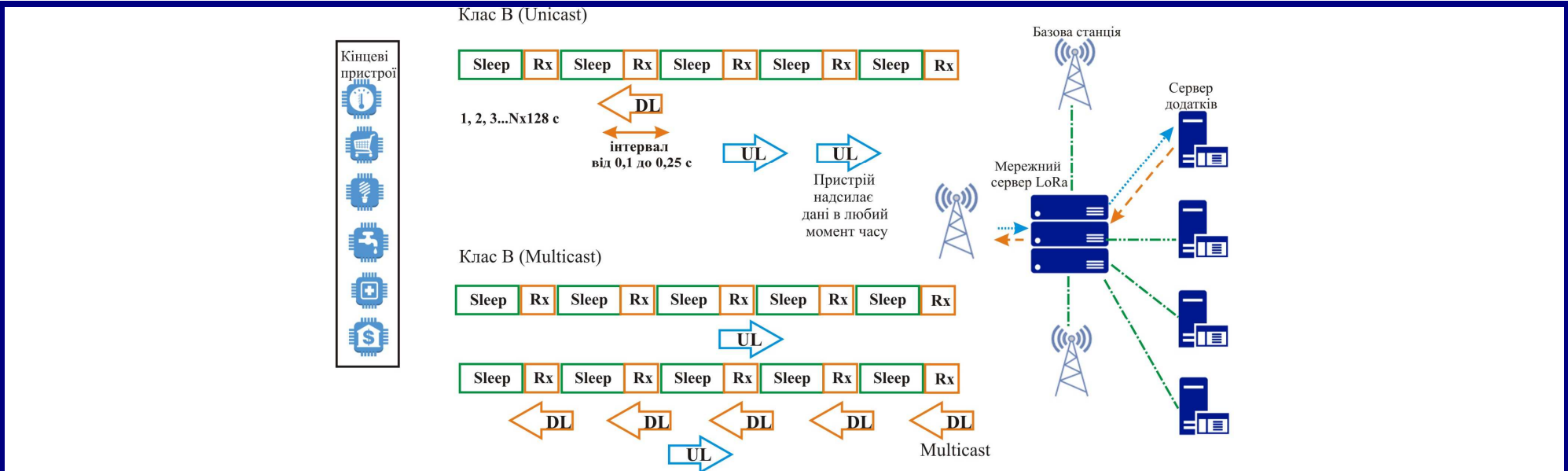


Рисунок 9.1 – Пінг – слоти класу В

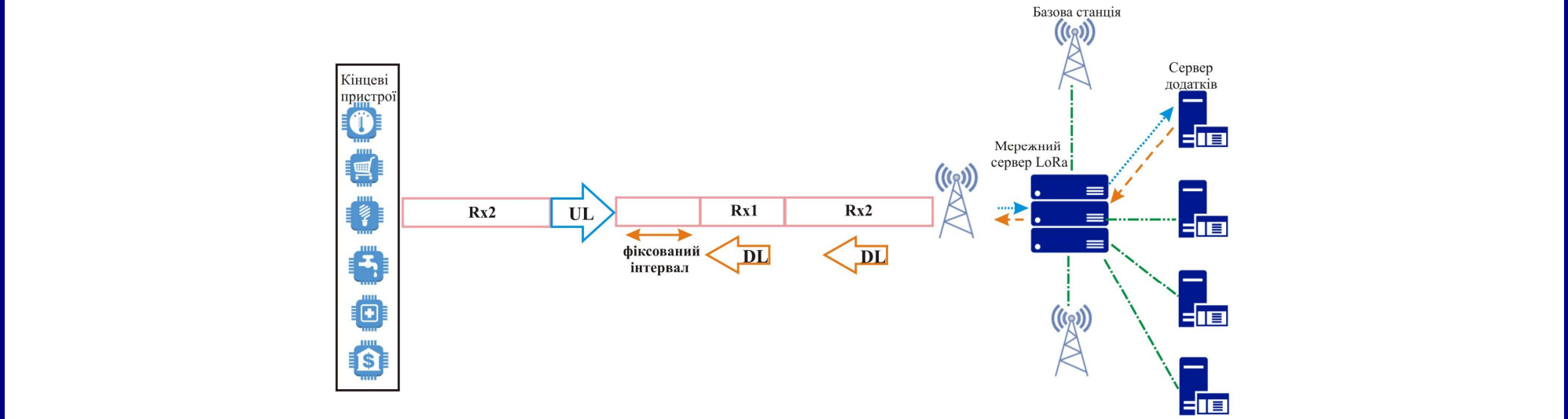


Рисунок 9.2 – Схема роботи кінцевих пристроїв класу С в мережі LoRaWAN

4 ЧАСТОТНИЙ ДІАПАЗОН LORAWAN

Регіональні параметри, в наступних смугах частот:

- 430 МГц - для регіонів Азії;
- 780 МГц - для регіону Китаю;
- 433 МГц - для регіону Європа;
- 866 МГц - для регіону Європа;
- 915 МГц - для регіонів США.

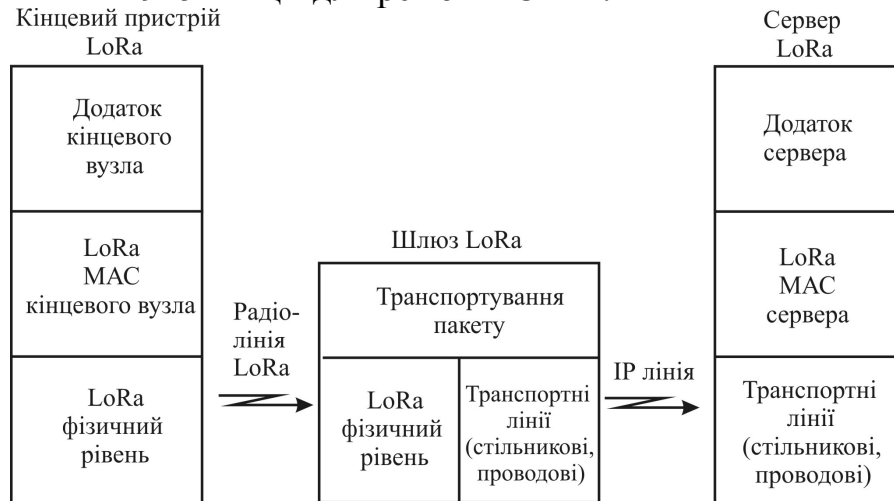


Рисунок 10.1 – Архітектура відкритого протоколу LoRaWAN

Приймач LoRa формують CSS радіосигнали з смугами 125, 250 і 500 кГц. Технологія LoRa підтримує в мережі передачі даних IoT / M2M різну ширину частотного каналу і швидкості [2]:

- від 250 біт / с до 5,47 кбіт / с при ширині каналу 125 кГц;
- до 11 кбіт / с при ширині каналу 250 кГц;
- до 50 кбіт / с при використанні модуляції FSK при ширині каналу 500 кГц.

Таблиця 10.1 – Частотний план мережі LoRa/LoRaWAN

LoRa/LoRaWAN	Директиви 2013/752/EU	Узагальнені умови
868,1; 868,3; 868,5 МГц до 25 мВт 1% робочий цикл або LBT	868-868,6 МГц до 25 мВт Директива 1999/5/ЕС 1% робочий цикл	868,0-868,6 МГц Ефективна потужність передавача до 25 мВт робочий цикл < 1%. Робочий цикл > 1% за умови відкл. режиму контролю спектра LBT
867,1-867,9 МГц до 25 мВт 1% робочий цикл або LBT	868,7-868,9 МГц до 25 мВт Директива 1999/5/ЕС або 1% робочий цикл	Індуктивні радіозастосування 865-869 МГц
869,525 МГц до 25 мВт 0,1% робочий цикл або LBT	869,4-868,65 МГц до 50 мВт Директива 1999/5/ЕС або 0,1% робочий цикл	Цифровий стільниковий радіозв'язок CDMA-800 869,07-876,63 МГц
868,8 МГц до 25 мВт 0,1% робочий цикл або LBT	868,7-869,2 МГц 25 мВт Директива 1999/5/ЕС або 0,1% робочий цикл	Індуктивні радіозастосування 865-869 МГц

5 МОДЕЛЬ РАДІОІНТЕРФЕЙСУ СТАНДАРТУ LORAWAN

ЛЧМ сигнал:

$$x(t) = A_0 \cdot \cos\left(\omega_0 \cdot t + \frac{\mu}{2} \cdot t^2\right), \quad (11.1)$$

де $\frac{T_{sym}}{2} \leq t < \frac{T_{sym}}{2}$; $\omega_0 = 2\pi f_0$ - центральна носійна частота радіосигналу; $T_{sym} = 2^{SF} / BW$ - тривалість радіосигналу; SF - коефіцієнт розширення спектру, який може змінюватись від 7 до 12; $f_n = f_0 - BW / 2$; $\omega_n = 2\pi f_n$ - нижня частота радіосигналу; $f_b = f_0 + BW / 2$; $\omega_b = 2\pi f_b$ - верхня частота радіосигналу; $\mu = BW / T_{sym}$ - швидкість зміни частоти радіосигналу; $B = BW \cdot T_{sym} = 2^{SF}$ - база радіосигналу.

При фіксованій ширині спектра радіосигналу BW зміна його бази здійснюється за рахунок зміни тривалості T_{sym} та швидкості зміни частоти (рисунок 11.1). Частотна надмірність широкосмугового радіосигналу обумовлює його високу стійкість до перешкод (рисунок 11.2)

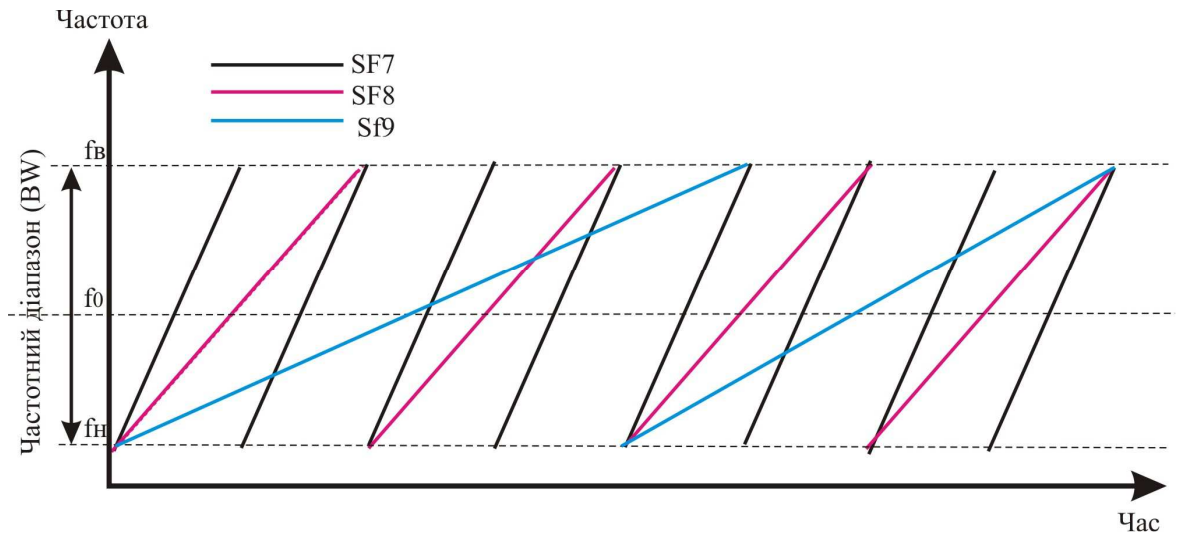


Рисунок 11.1 – Зміна ширини спектру радіосигналу BW при T_{sym} та SF7, SF8, SF9

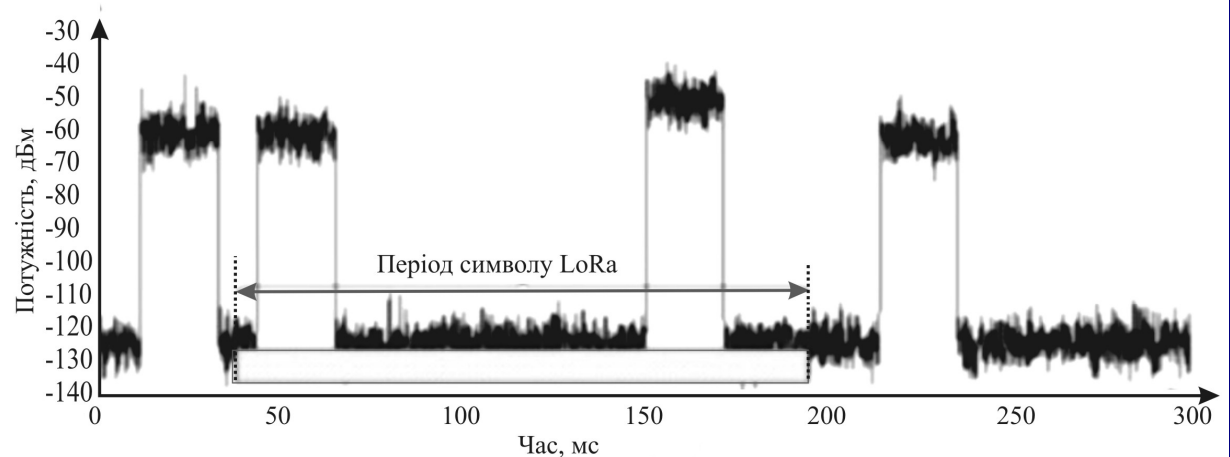


Рисунок 11.2 – Стійкість до перешкод ЛЧМ сигналу

6.1 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ. ЛЧМ РАДІОСИГНАЛ ТА ЙОГО СПЕКТР

Програма побудови ЛЧМ сигналу в часовій області (12.1):

```
%% ЛЧМ сигнал
fd = 150000; % частота дискретизації
td = 1/fd; % період дискретизації
N=1000; T=100; step=T/N;
t=0:step:T;
f0=0.01; F=0.0175;
S=cos(2*pi*(f0+F*t).*t);
figure;
plot(t, S, 'LineWidth', 1.5);
ylabel('Значення випадкової величини');
xlabel('Час');
title('Радіоімпульс ЛЧМ');
xlim([0 20]);
```

Програми та спектр ЛЧМ сигналу (рисунок 12.2)

```
%% Спектр ЛЧМ сигналу
Sf = abs(fft(S)); % амплітудний спектр
fx = fd/2*linspace(-1,1,length(Sf)); % значення частот
figure
plot(fx/1000,fftshift(Sf))
grid on
xlim([-60 60])
title('Спектр ЛЧМ сигналу')
xlabel('Частота, кГц')
```

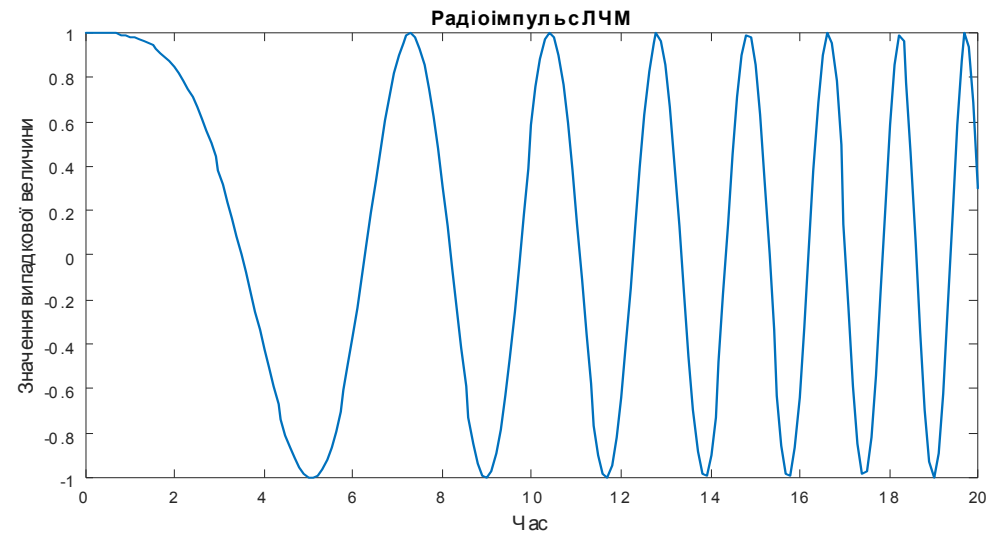


Рисунок 12.1 – Вигляд ЛЧМ радіосигналу у часовій області

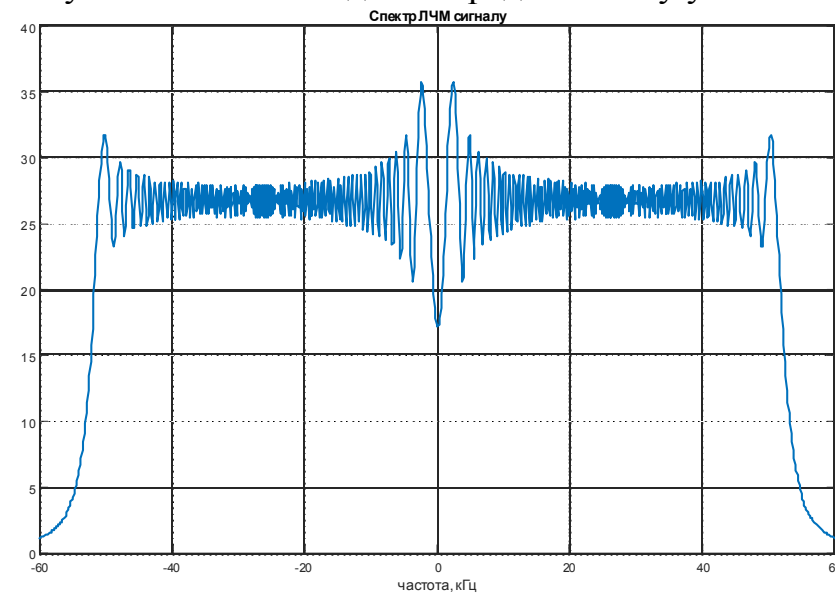


Рисунок 12.2 – Спектр ЛЧМ радіосигналу

6.2 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ. СПЕКТР СИГНАЛУ ДЛЯ РІЗНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ РОЗШИРЕННЯ

Текст програми (код MATLAB) відправлення повідомлення передавачем LoRa "Hello World!" наведений нижче:

```
% CSS
message = "Hello World!" ; % повідомлення корисного навантаження
Power = 14 ; % потужність передачі, дБ
Fs = 10e6 ; % частота дискретизації
fc = 863e6 ;
Fc = 865e6 ;
dF = Fc - fc ; % частотний зсув
for BW = [125e3 250e3 500e3] % смуга пропускання сигналу LoRa
for SF = [7 8 9 10 11 12] % коефіцієнт розширення
title_txt = sprintf('SF = %1d, BW = %1.0f ???', SF, BW/1000) ;
signalIQ = LoRa_Tx(message,BW,SF,Power,Fs,Fc - fc) ;
figure
set(gcf, 'Position', [100, 100, 700, 400])
spectrogram(signalIQ,500,0,500,Fs,'yaxis','centered') ;
ylim([1.5 2.5]);
ylabel('Частота, МГц')
xlabel('Час');
title(title_txt)
end
end
```

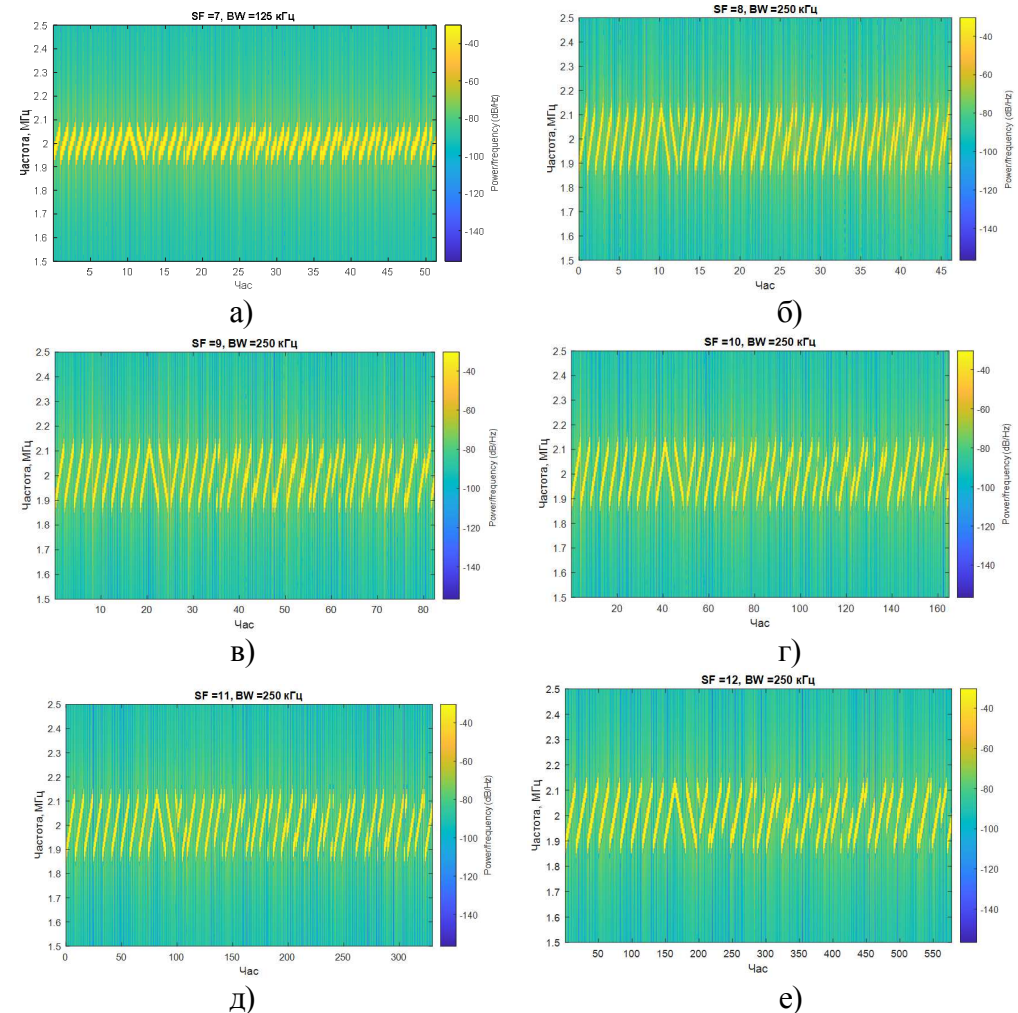


Рисунок 13.1 – Спектр сигналу для різних коефіцієнтів розширення: SF7 (а); SF8 (б); SF9 (в); SF10 (г); SF11 (д); SF12 (е) та смуги пропускання $BW=250\text{кГц}$

6.3 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ. ЛЧМ РАДІОСИГНАЛ ТА ЙОГО СПЕКТР

Код програми:

```
% CSS
message = "Hello World!" ; % повідомлення корисного
навантаження
Power = 14 ; % потужність передачі, дБ
Fs = 10e6 ; % частота дискретизації
fc = 863e6 ;
Fc = 865e6 ;
dF = Fc - fc ; % частотний зсув
SF = 10 ;
BW = 125e3 ;

%% Transmit Signal
signalIQ = LoRa_Tx(message,BW,SF,Power,Fs,Fc - fc) ;
Sxx = 10*log10(rms(signalIQ).^2) ;
disp(['Transmit Power = ' num2str(Sxx) ' dBm'])
%% Plots
figure(1)
spectrogram(signalIQ,500,0,500,Fs,'yaxis','centered')
figure(2)
obw(signalIQ,Fs) ;
%% Received Signal
message_out = LoRa_Rx(signalIQ,BW,SF,2,Fs,Fc - fc) ;
%% Message Out
disp(['Message Received = ' char(message_out)])
```

Проведена оцінка зайнятої смугу пропускання Chirp-сигналу та побудований графік спектральної щільності потужності (PSD), використовуючи функцію: `obw(x, Fs)`

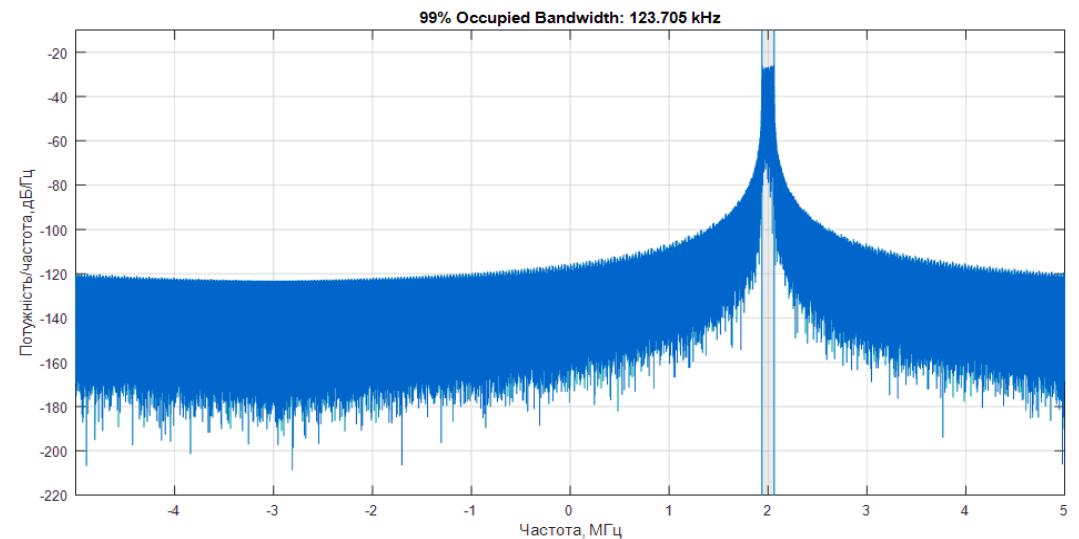


Рисунок 14.1 - Графік спектральної щільності потужності (PSD)

Висновок. З рисунку 14.1 видно, що зайнята смуга пропускання сигналу 123,67 кГц, що показано на графіку спектральної щільності потужності (PSD)

ВИСНОВКИ

Для України найбільш перспективною технологією, яку можна використовувати в глобальних мережах з низьким енергоспоживанням для ринку інтернету речей є відкрита неліцензована частина стеку LoRa під назвою - LoRaWAN. Дана технологія може використовуватись як окремо, так і сумісно з іншими прилаштованими для IoT – речей ліцензованими технологіями LTE, або діючими технологіями LPWAN.

Широкопasmовий радіосигнал LoRa є сигналом з лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ) або CSS (Chirp Spread Spectrum), де в свою чергу CHIRP є аббревіатурою Compressed High-Intensity Radiated Pulse (стислий високо-інтенсивний випромінюємий сигнал). Частота CSS радіосигналу може як збільшуватися (up-chirp), так і зменшуватися (down-chirp).

Методи CSS (chirp-розширений спектр) допомагають передавати сигнали на дуже великі відстані. В LoRa - мережах даний тип модуляції забезпечує низьку потужність споживання кінцевих пристроїв за низької швидкості передачі даних. Єдиний шлюз на основі LoRa може приймати та передавати сигнали на відстань більше 15 кілометрів у сільській місцевості. Навіть у щільному міському середовищі повідомлення можуть передаватись на відстань до п'яти кілометрів, залежно від того, наскільки глибоко в приміщенні розташовані кінцеві пристрої (кінцеві вузли).

Робота LoRa - мережі здійснюється в основному в безліцензійному діапазоні частот 433 МГц, 868 МГц або 2,4 ГГц з потужністю 10–100 мВт та, найчастіше, з обмеженим робочим циклом 0,1% або 1%. Час автономної роботи може складати декілька років. В сплячому режимі кінцеві пристрої споживають дуже малу потужність (одиниці міліват).

Мережа LoRaWAN може підтримувати мільйони повідомлень. Однак кількість повідомлень, що підтримуються в будь-якому розгортанні, залежить від кількості встановлених шлюзів. Один восьмиканальний шлюз може підтримувати до 1,5 млн. повідомлень протягом 24-годинного періоду. Якщо потрібна більша ємність, потрібно лише додати додаткові шлюзи до мережі.

Враховуючи специфіку кінцевих вузлів і шлюзів на основі LoRa, для обслуговування потрібно лише кілька шлюзів - налаштованих у зірковій мережі. Це означає, що капітальні та операційні витрати можуть бути відносно низькими. Крім того, коли економічно ефективні модулі LoRa RF, вбудовані в недорогі кінцеві вузли та використовуються разом із відкритим стандартом LoRaWAN рентабельність мережі може бути ще підвищена.

Типова тривалість передачі одного up-link пакета з корисним навантаженням 10 байт за умови використання мінімального коефіцієнта розширення спектру (SF=7) складає 59,65мс, а за умови використання максимального коефіцієнта розширення спектру (SF=12) – 1253,38мс.

В LoRa-мережах використовується три різні смуги пропускання: 125kHz, 250kHz і 500kHz (стандартне значення 125kHz). Символи LoRa модулюються в діапазоні ширини смуги пропускання 125 кГц, а різні ортогональні (майже) коефіцієнти розширення використовуються на основі вимог до швидкості передачі даних та умов радіоканалу.

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Хмельницький національний університет

Військовий інститут Київського національного університету
ім.Тараса Шевченка

ПВНЗ “Університет економіки і підприємництва”

Вінницький національний технічний університет

Західноукраїнський національний університет

Інтелектуальний потенціал - 2020

збірник наукових праць молодих науковців і студентів

сформовано за матеріалами
Всеукраїнської науково-практичної конференції
молодих науковців і студентів
«Інтелектуальний потенціал – 2020»

9-10 листопада 2020 р.

Частина 1

Хмельницький
2020

ББК 74.480.278

С.88

«Інтелектуальний потенціал – 2020» - збірник наукових праць молодих науковців і студентів / Колектив авторів – Хмельницький: ПВНЗ УЕП, 2020. – Частина 1. – 104 с.

***Відповідальний редактор:** Желавська Н.В.*

***Відповідальний за випуск:** Чешун В.М.*

Редакційна колегія:

Желавський О.Б.

Кльоц Ю.П.

Чешун В.М.

Тимофєєва Л.В.

ЗМІСТ

Білаш О. Ю., Пятін І.С. Модель визначення спектральної густини потужності сигналу на антені	5
Біндер Т. С., Пятін І.С. Модель цифрової системи зв'язку з завадостійким згортковим кодуванням	8
Гадомський А.В., Таранчук А.А. Метод моніторингу мережі WLAN WI-FI	11
Горбань В.В. Таранчук А.А. Високошвидкісна локальна корпоративна мережа з послугою VoIP – телефонії	14
Данілова Л.В., Лавров Є.А., Токар А.С. Оптимізація діалогової людино-машинної взаємодії в комп'ютерних системах	18
Єрмаков М. С., Борисенко О.А. Завадостійкий біноміальний таймер	21
Казімірко А.О., Таранчук А.А. Аналіз механізмів захисту мережевого устаткування від хакерської атаки типу TCP SYN Flood	23
Ковальчук О.Л., Кучерявий Є.І., Таранчук А.А. Модель «розумної» мережі енергопостачання житлового будинку	26
Красильников С.Р. Зміст курсу «Комп'ютерний практикум» у професійній підготовці фахівців спеціальності 015.20 «Професійна освіта. Транспорт»	30
Крикун Є. О., Підченко С.К. Технологія побудови сенсорної мережі IoT з використанням протоколу LoRaWAN	32
Кубатий Н. О., Таранчук А.А. Пропускна здатність мережі голосової IP-телефонії	35
Локашок В.Ю., Медзатий Д.М. Розробка системи відкритого світу в Unreal Engine 4	39
Маниленко М.П., Полікаровських О.І. Обчислювальний метод формування вихідного сигналу синтезатора високих частот	42
Матюк Д.С., Мишко О.Є., Деркач М.В. Вплив температури повітря на точність локалізації мобільного робота	46
Мельник О. Д., Журавська І. М. Використання технології розпізнавання образів для автоматизації обліку показників побутових лічильників енергії	49
Михальський В.М, Полікаровських О.І. Метод нейромережевого керування системою адаптивного радіозв'язку Software Defined Radio ...	53
Ніколайчук І.А., Пятін І.С. Моделювання транспортного каналу з полярними кодами для мобільного зв'язку п'ятого покоління	57

Провайдери.

- Структура HTML-документа і елементи форматування тексту.
- Карти-зображення математичні формули на веб-сторінках.
- Ознайомлення з технологією каскадних таблиць стилів (CSS).
- Ознайомлення з мовою сценаріїв JAVASCRIPT.
- Загальні відомості про програмне середовище КОМПАС 3D.

Підготовка файлу креслення.

- Ознайомлення з основними командами системи КОМПАС 3D.

Самостійна робота передбачає вивчення студентами динаміки розвитку інформаційних технологій та представлення результатів самостійної роботи у вигляді презентацій, рефератів, есе тощо. Індивідуальне завдання з курсу полягає у розробленні веб-сторінок за заданною тематикою.

Отже, запропонована структура та зміст курсу «Комп'ютерний практикум» забезпечують подальше поглиблення та удосконалення цифрових навичок майбутніх педагогів з професійної освіти, сприяють їх успішній професійній діяльності.

Перелік посилань

1. Стандарт вищої освіти України перший (бакалаврський) рівень, галузь знань 01 – «Освіта / Педагогіка», спеціальність 015 – «Професійна освіта (за спеціалізаціями)» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/vishcha-osvita/zatverdzeni%20standarty/2019/11/22/2019-11-22-015-B.pdf> / (дата звернення: 4.11.2020)

2. Бакалавр. Професійна освіта. Транспорт. 2017. URL: <https://www.khnu.km.ua/root/page.aspx?l=0&r=50&p=1&f=%D0%91> (дата звернення: 4.11.2020).

Технологія побудови сенсорної мережі IoT з використанням протоколу LoRaWAN

Крикун Є. О.

Науковий керівник – д.т.н., доц. Підченко С.К.

Хмельницький національний університет

На теперішній час концепція інтернет речей (абр. internet of things - IoT) завойовує все більше місця в різних галузях народного господарства. При цьому кількість пристроїв за останні роки значно зростає. Так за прогнозами аналітиків, найбільше зростання IoT - пристроїв до 2022 року очікується в таких областях, як: транспорт; логістика; автомобілебудування; охорона здоров'я; сільське господарство та промислового секторі. При цьому, за їх словами, для ефективного використання IoT – рішень та збільшення бізнес – прибутку необхідно використання комплексних базових

технологій зі збору даних з сенсорів та їх аналізу в контексті інших даних: довідкової інформації; фінансових даних і т. інш. [1].

Всі існуючі пристрої IoT використовують вихід в мережу інтернет і взаємодіють через неї один з одним. Керування IoT здійснюється через глобальну мережу Інтернет за допомогою відправлення певних команд користувачами цих пристроїв. Економічне підключення пристроїв IoT до Інтернету є важливою проблемою для вбудованих пристроїв із низьким енергоспоживанням, які призначені для конкретного завдання [2].

Існуючі технології безпроводового зв'язку такі як GSM та LTE не спроможні забезпечити вимоги, щодо споживання енергії та вартості обслуговування великої кількості IoT – пристроїв.

На сьогодні, у всьому світі, активно впроваджуються та розгортаються ширококутові мережі з низькими потужностями та швидкостями передачі, які забезпечують покриття великих територій. До таких технологій відносяться LoRaWAN, SigFox, NB-IoT, Weightless та інші комунікаційні технології, що працюють у ГГц діапазонах та успішно забезпечують усі перелічені вище функціональні можливості, однак LoRaWAN привернула найбільшу увагу організацій, спільнот та дослідників і стала популярною технологією LPWAN (англ. Low-power Wide-area Network - «енергоєфективна мережа дальнього радіусу дії»), придатною саме для IoT - рішень. Мережі LPWAN мають на меті вирішити проблеми, які можуть бути придатними для широкомасштабного розгортання та підключення кінцевих пристроїв IoT малої потужності. Загальними характеристиками LPWAN, що відрізняють їх від інших технологій традиційних телекомунікаційних мереж є [2]:

- мале енергоспоживання підключених мережевих та пристроїв IoT;
- невелика вартість використання та обслуговування каналу зв'язку;
- усі пристрої та додатки системи потребують потужного механізму безпеки;
- можливість побудови мереж в приміщеннях та забезпечення стійкого зв'язку;
- необхідність забезпечення завадостійкості передачі та використання потужної модуляції при розгортанні мереж в щільно забудованих територіях;
- наявність сервера обробки та аналізу даних отриманих з інформаційних та вимірювальних сенсорів.

Технологія LoRaWAN – сукупна система, що використовує протокол фізичного рівня LoRa (абр. Long Range) та канального рівня LoRaWAN моделі OSI [2], яка застосовується в комплексних рішеннях IoT для збору і обробки даних з інформаційних сенсорів. Пристрої LoRaWAN працюють в неліцензованих частотних ISM- діапазонах (433, 868, 915 МГц), що є додатковою перевагою використання даної технології. Архітектура мережі LoRaWAN наведена на рисунку 2.

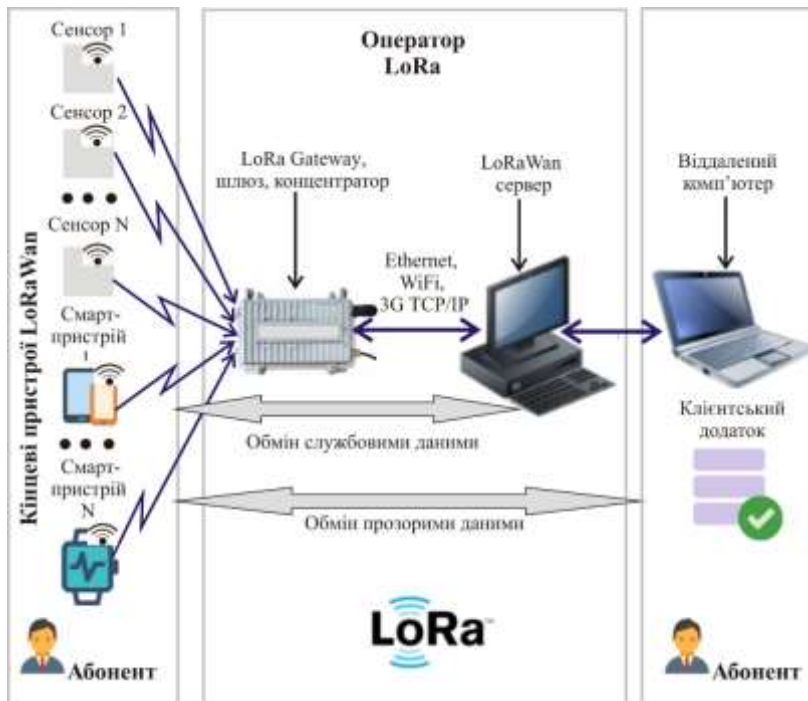


Рисунок 2- Архітектура мережі LoRaWAN

Архітектура мережі LoRaWAN містить (рисунок 2) [2]:

1. Кінцеві вузли, у якості яких зазвичай виступають сенсори фізичних величин, смарт – пристрої, що здійснюють функції вимірювання або керування та пристрої IoT. LoRaWAN рахується самою енергоефективною технологією за рахунок того, що кінцеві пристрої LoRa, які повністю автономні, можуть працювати від батарей на одному заряді до 10 років [2].

2. Шлюз, або концентратор LoRa, який приймає по безпроводовому каналу дані від кінцевих пристроїв LoRa і передає їх в канали зв'язку. Зв'язок з сервером відбувається за стандартними протоколами TCP/IP за допомогою телекомунікаційних каналів Ethernet, Wi-Fi, 4G/LTE і інш. В LoRaWAN передбачений захист інформації, що передається за допомогою використання шифрування блоковими кодами AES128.

3. Мережевий сервер LoRa, який управляє мережею та реалізує функції усунення дублювання пакетів, управління розкладом, підтвердження і управління швидкістю передачі даних та вихідною потужністю радіопередавача для кожного кінцевого пристрою окремо, завдяки реалізації

алгоритму адаптивної швидкості передачі даних (adaptive data rate, ADR) та використання технологій з розширенням спектру. За таким алгоритмом дані, які передаються від різних кінцевих вузлів з різними швидкостями не заважають один одному і створюють різні віртуальні канали, що збільшує пропускну здатність шлюзу. Максимальна швидкість передачі даних в мережах LoRaWAN дорівнює 50 Кбіт/с.

4. Віддалений комп'ютер, який може контролювати дії кінцевих вузлів або збирати дані з них.

5. Віддалений сервер (клієнтський додаток), що призначений для розшифрування переданої інформації. При цьому, кожен кінцевий пристрій має вбудований ідентифікатор за яким сервер додатків розпізнає приналежність кожного пакету даних певному IoT пристрою мережі.

Мережі LoRaWAN побудовані за фізичною топологією зірка, де кінцеві вузли LoRa через шлюзи утворюють прозорі мости для ретрансляції повідомлень та спілкуються з центральним сервером мережі. Зазвичай передбачається, що шлюзами і серверами володіє оператор LoRa мережі, а абоненти підключають свої модеми, по аналогії зі стільниковим зв'язком.

На сьогодні національним оператором lifecell сумісно з компанією IoT Ukraine планується національне покриття мережами LoRaWAN всієї території України, яка зможе обслуговувати до 7-10 млн. підключених до неї кінцевих пристроїв [4].

Перелік посилань

1. DataArt IoT trends and predictions for 2019: IoT goes mainstream. – Назва з екрану. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://surl.li/gkvb>

2. What is LoRaWAN. – Назва з екрану. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://lora-alliance.org/resource-hub/what-lorawan>

3. Mehmet Ali Ertürk. A Survey on LoRaWAN Architecture, Protocol and Technologies / Mehmet Ali Ertürk, Muhammed Ali Aydın, Muhammet Talha Büyükakka and Hayrettin Evirgen //MDPI. – Future internet, 2019, no.11. – P. 34.

4. Тимур Ягофаров. Национальное LoRaWAN-покрытие появится к 2020 г. Назва з екрану. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://surl.li/gkvq>

Пропускна здатність мережі голосової IP- телефонії

Кубатий Н. О.

Науковий керівник – к.т.н., доц. Таранчук А.А.

Хмельницький національний університет

Телекомунікаційні мережі для передачі голосу через Інтернет (англ. Voice over Internet Protocol, або іншими словами – VoIP телефонія)

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальное совпадение с одним документом 0.0%

Словари проверки: en_US, ru_RU, ua_UA. Ошибок в документах: 11%

ID: 82571 Название: Технологія побудови ефективної безпроводової мережі з використанням протоколу LoRaWAN Добавлено в БД: 2020-12-05 Авторы: Крикун Євген Олександрович Руководители: Підченко Сергій Костянтинович Консультанты: Опоненты:	Документ		Суммарное совпадение по Базе Данных	
	Символы	Лексемы	Символы	Лексемы
	59622	491	510 (1%)	8 (2%)

Источник плагиата

ID	Описание	Наличие плагиата в документе	
		Символы	Лексемы

Имя пользователя:
Kafedra TMIT KhNU

ID проверки:
1005386798

Дата проверки:
07.12.2020 12:35:55 EET

Тип проверки:
Doc vs Internet + Library

Дата отчета:
07.12.2020 16:24:54 EET

ID пользователя:
100005657

Название файла: Крикун_ТРМ-19-1

Количество страниц: 63 Количество слов: 10352 Количество символов: 73637 Размер файла: 6.13 MB ID файла: 1005668969

635 слов помечены как "исключенные" и не учитываются в подсчете слов

Обнаружены модификации текста (могут влиять на процент совпадений)

6.08% Совпадения

Наибольшее совпадение: 1.72% с Интернет-источником (https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/30861/1/Bokovyj_magi...)

6.04% Источники из Интернета 149 Страница 65

0.25% Источники из Библиотеки 4 Страница 66

0.46% Цитат

Цитаты 3 Страница 67

Не найдено ни одной ссылки

0% Исключений

Некоторые источники исключены автоматически (фильтры исключения: количество найденных слов меньш...

Нет исключенных Интернет-источников

0% Исключенного текста из Библиотеки 3 Страница 67

Модификации

Обнаружены модификации текста. Подробная информация доступна в онлайн-отчете.

Замененные символы 50

Подозрительное форматирование 23
страницы

ВІДЗИВ

на дипломну роботу другого (магістерського) рівня студента групи ТРМ-19-1
Крикуна Євгена Олександровича

«Технологія побудови ефективної безпроводової мережі з використанням протоколу LoRaWAN»

На сьогодні, у всьому світі, активно впроваджуються та розгортаються широкосмугові мережі з низькими потужностями та швидкостями передачі, які забезпечують покриття великих територій. До таких технологій відносяться LoRaWAN, SigFox, NB-IoT, Weightless та інші комунікаційні технології, що працюють у ГГц діапазонах та успішно забезпечують усі перелічені вище функціональні можливості, однак LoRaWAN привернула найбільшу увагу організацій, спільнот та дослідників і стала популярною технологією LPWAN.

Тому питання проектування та побудови ефективних безпроводових мереж LoRaWAN, що розглядаються в даній роботі є актуальними.

Метою дипломної роботи є: дослідження технології побудови ефективної безпроводової мережі з використанням протоколу LoRaWAN та побудова програмної моделі радіоінтерфейсу.

Для досягнення поставленої мети в магістерській роботі виконується ряд задач, а саме:

1. Проведення аналізу ринку широкосмугових безпроводових технологій.
2. Побудова архітектури та опис технічних характеристик стандарту LoRaWAN.

3. Побудова програмної моделі радіоінтерфейсу стандарту LoRaWAN.

4. Розробка та опис програмного забезпечення.

За змістом робота є докладною та містить достатньо посилань на літературу. Викладення матеріалу є послідовним та логічно правильним.

Висновки мають достатнє обґрунтування та детальне пояснення. Мова викладення роботи є технічно грамотною, зрозумілою.

Дипломна робота представлена пояснювальною запискою обсягом 67 сторінок, складається з чотирьох основних розділів та 2-х додатків. Оформлення пояснювальної записки знаходиться на належному рівні.

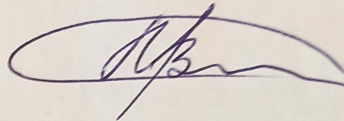
Однією із переваг, даної роботи, є розроблене програмне забезпечення в середовищі MATLAB для аналізу характеристик каналу передачі даних LoRa - мережі, яке дозволяє проводити вибір параметрів ЛЧМ - модуляції в залежності від величини допустимої смуги пропускання радіоканалу.

Серйозних недоліків робота не містить. Присутні незначні неточності, орфографічні та стилістичні помилки, які не впливають на суть роботи.

Вважаю, що дана робота відповідає загальним вимогам щодо дипломних робіт другого (магістерського) рівня, і заслуговує оцінки "добре", а Крикун Євген Олександрович – присвоєння кваліфікації магістра зі спеціальності 172 – "Телекомунікації та радіотехніка".

Рецензент:

Зав. каф. АКІТТ
д.т.н., професор



Мартинюк В.В.

Завідувачу кафедри ТМІТ

Підченко С.К.

здобувача вищої освіти

Крикун Євген Олександрович

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений (а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

08.12.2020

дата

Мее

підпис

РІШЕННЯ ЕКСПЕРНОЇ КОМІСІЇ ПО КАФЕДРИ
Телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій (ТМІТ)
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: «Технологія побудови ефективної безпроводової мережі з використанням протоколу LoRaWAN»

Автор: Крикун Євген Олександрович

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітня програма: Телекомунікації та радіотехніка

Науковий керівник: Підченко Сергій Костянтинович, д.т.н, доцент

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

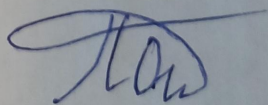
№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту.	Відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягненні. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження:

Виявленні в роботі збіги складають 6,08%, що виявленні в роботі не є плагіатом. Найбільший збіг з однією роботою не перевищує -1,72%, де співпадають поодинокі слова стандартних назв протоколів системи LoRa/LoRaWAN. Критичних запозичень немає. На виявлені цитати є посилання вище. Це технічні дані стандарту LoRa/LoRaWAN. Дипломна робота допускається до захисту.

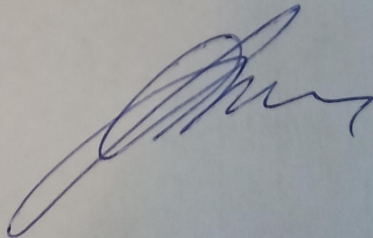
7.12.2020 р.

Відповідальний за перевірку на плагіат
к.т.н., доцент



Пивовар О.С.

Зав. каф. ТМІТ
д.т.н., доц.



Підченко С.К.