

Міністерство освіти та науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет ННЦЗФН
(повна назва)

Кафедра інформаційно-мережної інженерії
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Аналіз антенного устаткування абонентських терміналів 4G
(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи ІМІзм-21-2
Белов В.С.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 Телекомунікації та
радіотехніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Інформаційно
мережна інженерія
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. ІМІ Іваненко С.А.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Безрук В.М.
(прізвище, ініціали)

2023 р.

Не містить відомостей, заборонених
до відкритого публікування

Керівник _____ / *С.А. Іваненко*

Студент _____ / *В.С. Белов*

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ ННЦЗФН _____
(повна назва)
Кафедра _____ інформаційно-мережної інженерії _____
(повна назва)
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
Спеціальність _____ 172 Телекомунікації та радіотехніка _____
(код і повна назва)
Тип програми _____ Освітньо-наукова _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма _____ Інформаційно мережна інженерія _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)
«_____» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

_____ студенту _____ Белову Віталію Сергійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розробка пристрою дистанційного управління сервоприводом на основі інтегрального таймера»

затверджені наказом ВНЗ від "24" 03 2023 р. № 59 Стз

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 26.05.2023

3. Вихідні дані до роботи Розглянути загальні характеристики та класифікацію антенного устаткування, конструктивні особливості та технічні характеристики. Розглянути комерційне антенне устаткування, яке присутнє на ринку. Розробити антенне устаткування для абонентського терміналу 4G.

4. Перелік запитань, що необхідно опрацювати в роботі

1) Аналіз технології 4G та її актуальність на ринку телекомунікаційних послуг в Україні

2) Аналіз антенного та термінального устаткування для стандарту 4G.

3) Розробка портативної антени для стандарту 4G.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслень, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п. 5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Слайди у форматі Power Point (назва та мета роботи, актуальність роботи, агрегація частот, визначення території покриття, профіль радіолінії, бездротові модеми, практична реалізація антени, оцінка результатів роботи, висновки).

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Ознайомлення із завданням. Уточнення ТЗ.	25.03.23	
2	Підбір літератури за темою роботи.	30.03.23	
3	Виконання розділу 1	10.04.23	
4	Виконання розділу 2	15.04.23	
5	Виконання розділу 3	15.05.23	
6	Виконання розділу 4	18.05.23	
7	Оформлення презентаційного матеріалу	25.05.23	
8	Підготовка до захисту ЕК.	26.05.23	

Дата видачі завдання _____ 20__ р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц.. каф. ІМІ Іваненко С.А.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 70 с., 36 рис., 5 табл., 8 формул, 18 джерел, 1 додаток

Мета роботи – Розробка всесіпазонної портативної антени для абонентського терміналу 4G.

В кваліфікаційні роботі проведений аналіз антен абонентського обладнання стандарту 4G- антен та виконаний огляд 4G модемів. Визначені основні недоліки більшості комерційних антен для портативного використання. Розглянуті особливості радіоінтерфейса стандарту 4G, які накладають певні обмеження під час вибору антенного обладнання та його проектування. Вироблені основні рекомендації для абонента щодо покращення рівню сигналу в точці прийому.

В роботі розроблена така антена система, яка позбавлена притаманних недоліків інших типів комерційних антен. Її використання просте для мобільного абонента і при цьому вона володіє вищими показниками підсилення відносно вбудованої антени.

4G, USB МОДЕМ, WI FI, LTE ADVANCED, АНТЕНА 4G, ПІДСИЛЕННЯ СИГНАЛУ, АГРЕГАЦІЯ ЧАСТОТ.

THE ABSTRACT

Explanatory note: 70 p., 36 fig., 5 tabl., 8 form., 18 sources, 1 ap.

The object of the work is -development of an all-band portable antenna for a 4G subscriber terminal.

In the qualification work, an analysis of subscriber equipment antennas of the 4G antenna standard and an inspection of 4G modems were carried out. The main disadvantages of most commercial antennas for portable use have been identified. Features of the radio interface of the 4G standard, which impose certain limitations when choosing antenna equipment and its design, are considered. Basic recommendations for the subscriber on improving the signal level at the reception point have been developed.

In the work, such an antenna system was developed, which is devoid of the inherent disadvantages of other types of commercial antennas. Its use is simple for a mobile subscriber, and at the same time it has higher amplification indicators compared to the built-in antenna.

4G, USB MODEM, WI FI, LTE ADVANCED, 4G ANTENNA, SIGNAL AMPLIFICATION, FREQUENCY AGGREGATION.

ЗМІСТ

	С.
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	10
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ 4G ТА ЇЇ АКТУАЛЬНІСТЬ НА РИНКУ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ПОСЛУГ УКРАЇНИ.	11
1.1 Актуальність бездротового зв'язку.....	11
1.2 Стандарт 4G та його технічні характеристики.....	12
1.3 Особливості бездротового інтерфейсу стандарту 4G.....	13
2 АНАЛІЗ ЧАСТОТНИХ ДІАПАЗОНІВ 4G ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇХНЬОГО ВИКОРИСТАННЯ	18
2.1 Особливості розповсюдження радіохвиль частотних діапазонів 4G	18
2.2 Визначення найближчих базових станцій в заданій точці прийому для отримання послуг 4 G	21
2.3 Особливості використання частотних діапазонів 4G в залежності від типу місцевості.	24
3 АНАЛІЗ АБОНЕНТСЬКОГО УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ СТАНДАРТУ 4G	27
3.1 Вибір абонентського терміналу	27
3.2 Розширення функціоналу бездротового модему	31
3.3 Аналіз комерційних зовнішніх антен для 4G.....	39
4 РОЗРОБКА ЗОВНІШНЬОЇ АНТЕННОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ АБОНЕНТСЬКОГО ТЕРМІНАЛУ 4G	49
4.1 Вибір типу антенної системи	49
4.2. Моделювання антени в середовищі MMANAGAL	51
4.3 Перевірка працездатності антени та отримані результати.	53
ВИСНОВКИ.....	59
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	60
ДОДАТОК А СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ	62

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- 2G, 3G, 4G, 5G, 6G** – Покоління бездротового стільникового зв'язку;
- LTE (Long Term Evolution)** – стандарт стільникового зв'язку 4-го покоління;
- FDD** – частотне розділення каналів;
- TDD** – частотне розділення каналів;
- MIMO** – технологія рознесенного прийому;
- WI-FI** – бездротова технологія локальних мереж зв'язку;
- SINR** – відношення сигнал/шум;
- RSSI** – рівень потужності сигналу;
- RCRP** – середнє значення потужності прийнятого сигналу;
- RCRQ** – якість прийнятого сигналу;
- BTS** – базова станція системи стільникового зв'язку;
- АЧХ** – амплітудо-частотна характеристика;
- ЕМХ** – електромагнітна хвиля;
- ККД** – коефіцієнт корисної дії;
- КСХ** – коефіцієнт стоячої хвилі;

ВСТУП

Бездротові технології в останній час стали не просто зручним засобом спілкування і зв'язку із забезпеченням мобільності, а і можливістю забезпечувати його за умови відсутності дротового з'єднання.

Багато сучасних абонентів телекомунікаційних послуг взагалі користуються тільки мобільним зв'язком, оскільки він завжди під рукою. Що доволі актуально для абонентів, які постійно переміщуються в силу професії чи інших обставин.

Проте до недоліків можна віднести погіршення якості такого зв'язку через погане покриття в певних точках території, що може бути спричинене різними факторами. Це може стримувати використання бездротових технологій.

Виходом із даної ситуації може бути використання більш досконалого термінального обладнання та виносних антен. Проте і ці пристрої не позбавлені недоліків, одними з яких є низький функціонал, та обмежені технічні можливості при доволі високій вартості.

Дана робота розглядає покращення можливостей абонента щодо підвищення якісних показників бездротового зв'язку 4G. Дослідження спрямовані на підвищення функціоналу бездротового модему та розробці портативної всесіпазонної антени для 4G.

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ 4G ТА ЇЇ АКТУАЛЬНІСТЬ НА РИНКУ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ПОСЛУГ УКРАЇНИ

1.1 Актуальність бездротового зв'язку

Бездротовий зв'язок дозволяє отримувати не тільки зручність та мобільність, завдяки своїм властивостям, але і інколи бути повною альтернативою іншим видам зв'язку, особливо це стосується таких випадків як то природні та техногенні катастрофи, бойові дії, тощо.

В Україні бездротовий зв'язок активно представлений багатьма операторами та провайдерами. Регулярно впроваджуються нові технології та послуги, які роблять наше життя та роботу зручнішими і більш ефективними. Особливо, коли людям за якихось обставин приходить доволі часто змінювати своє місце проживання, або переміщуватися в межах своїх робочих обов'язків.

Не дивлячись на активне тестування, а в деяких країнах і експлуатацію технології 5G та навіть 6G. Але на поточний стан, бездротовий мережі в Україні представлений саме технологією 4G LTE.

Особливої актуальності бездротовий зв'язок набув під час короткотривалих відключень електроенергії. Тому що у більшості випадків дротові провайдери не мають технічної можливості надавати свої послуги, через те, що подібного роду інфраструктура потребує розвинутої та розподіленої системи безперебійного живлення на всіх ділянках магістралі. В той же час інфраструктура мобільних операторів є більш концентрованою та гнучкою щодо пристосування до таких умов, що робить її переважною над звичайним дротовим зв'язком.

В таких умовах достатньо мати резервні джерела живлення на ділянках які не класифікуються як «остання миля», а тому є завжди в доступі до обслуговування для технічного персоналу на відміну від того ж дротового зв'язку, де ті ж самі комутатори можуть бути встановлені в кожному під'їзді,

що ускладнює їх забезпечення резервними джерелами живлення за рахунок їхньої великої географічної розподіленості та великої кількості.

Однак під час відключення світла базові станції мобільних операторів, як правило, знижують свою потужність випромінювання, що в свою чергу висуває підвищені вимоги до абонентського обладнання, зокрема до антенних систем, які мають компенсувати зменшення потужності сигналу від BTS.

Зазвичай вбудовані антенні системи не є не достатньо ефективними для таких випадків.

1.2 Стандарт 4G та його технічні характеристики

Розглянемо більш детально, що являє собою стандарт 4G.

4G — наступне покоління зв'язку після 3G і 2G, є стандартом мобільної передачі даних та мови для пристроїв користувачів, таких як:

- смартфони;
- планшети або спеціальні USB модеми з ретрансляторами WI-FI.

Абревіатура LTE, яку часто можна зустріти поруч із 4G розшифровується як «Long Term Evolution» її переклад – це «довгостроковий розвиток» в рамках досягнення характеристик, які в повній мірі відповідають стандарту 4G.

Цей термін зазвичай використовується для того, щоб визначити бездротові мережі із пропускнуою здатністю яка сягає понад 10 Мбіт/с. На початку свого існування стандарт LTE не відносився до четвертого покоління мобільного зв'язку 4G і розроблявся як вдосконалена версія стандарту 3G, а саме 3GPP, яка мала бути перехідним етапом між 3G та 4G.

Але після проведення тестів Міжнародний союз електрозв'язку в 2012 році офіційно було визнано, що LTE є технологією, яка відповідає всім необхідним вимогам стандарту 4G. Саме після цього цей стандарт набув суттєвої популярності в мобільних операторів стільникового зв'язку завдяки тому, що даний підхід дозволяв отримувати нові можливості і при цьому його

реалізація відбувалася на наявних стільникових мережах, що суттєво зменшило втрати мобільних операторів.

На поточний стан, цей стандарт підтримується всіма українськими мобільними операторами, вся інфраструктура зв'язку базується на його використанні. Даний стандарт підтримується пристроями, котрі були виготовлені після 2012 року.

Швидкість передачі даних при цьому може складати до 1000 Мбіт/сек, але, як правило в реальних умовах можна отримати до 100 Мбіт/с за сприятливих умов. Таку розбіжність можна пояснити втратами під час розповсюдження сигналу; велику кількість пристроїв, що одночасно використовують підключення до мережі на 1 км² [1].

Окрім швидкісних показників існують ще декілька критеріїв які є атрибутами стандартів групи 4G:

- комутація пакетів з використанням IP-технологій;
- швидкість передачі даних має зберігатися для абонентів, що переміщуються зі швидкістю в межах від 10 до 120 км/год;
- використовується динамічний розподіл мережених ресурсів;
- забезпечення плавного переходу абонента від однієї базової станції до іншої без розриву з'єднання.

1.3 Особливості бездротового інтерфейсу стандарту 4G

В Україні стандарт зв'язку четвертого покоління 4G LTE запущений у 2018 році і використовується великою трійкою мобільних операторів - Київстар, Vodafone Ukraine та Lifecell. У період впровадження 4G в Україні оператори отримали ліцензії на стандарт LTE на частотах 1800 МГц та 2600 МГц, а 2020 року ще й на частоту 900 МГц. Таким чином, з другої половини 2020 року LTE в Україні працює на частотах 900, 1800 і 2600 МГц. 4G у нашій країні працює у дуплексному режимі FDD [2].

Деякі абоненти вітчизняних мобільних операторів можуть побачити в статусі режиму роботи мережі позначку 4G+. Її можна спостерігати вгорі

екрану поруч із рівнем сигналу мережі. Ця позначка свідчить про режим роботи із розширенням смуги частот для збільшення швидкості передачі інформації.

Технологія, яка реалізує даний підхід, називається carrier aggregation (агрегація частот). Такий режим з'явився в LTE Advanced (LTE-A). Цей режим роботи доступний для сучасних пристроїв середнього та високого цінових сегментів.

Щоб краще зрозуміти сутність агрегація частот в стандарті LTE, варто зрозуміти, що кожен мобільний оператор надає свої послуги на певних ділянках частотного ресурсу.

В Україні мережа LTE запущена в діапазонах 900 МГц, 1800 МГц та 2600 МГц. Діапазон LTE-1800 розділений між національними мобільними операторами таким чином, що кожен з них отримав смугу певної ширини (5 МГц, 10 МГц і т.д.):

- «Київстар» має п'ять каналів по 5 МГц (всього 25 МГц безперервного спектру);
- Vodafone – 20 МГц;
- Lifecell – 15 МГц.

Чим більший спектру отримав оператор, тим більшу ємність мережі він може організувати, тим більше користувачів можуть отримувати високу швидкість передачі даних.

Коли діапазон 1800 МГц сильно завантажений, то за допомогою іншого діапазону можна поліпшити цю ситуацію, мова йде про діапазон 2600 МГц. Останній мобільні оператори використовують для розгортання мережі там, де існує велика сконцентрованість користувачів – наприклад, це можуть бути великі міста [2].

Не зважаючи на більше згасання радіохвиль даного діапазону 2600 МГц відносно 1800 МГц, як перевагу отримуємо суттєве збільшення ємності мережі майже в рази.

Саме для того, щоб отримати переваги використання всіх доступних діапазонів необхідне їх поєднання, що і забезпечується технологією агрегації носійних.

Агрегація частот – це режим, в якому радіомодем одночасно підключається до декількох каналів зв'язку, при цьому їхні пропускні здатності поєднуються.

Самі дані передаються та приймаються паралельно за двома (або більше) каналами, таким чином швидкість інтернет-з'єднання за технологією 4G LTE збільшується [3].

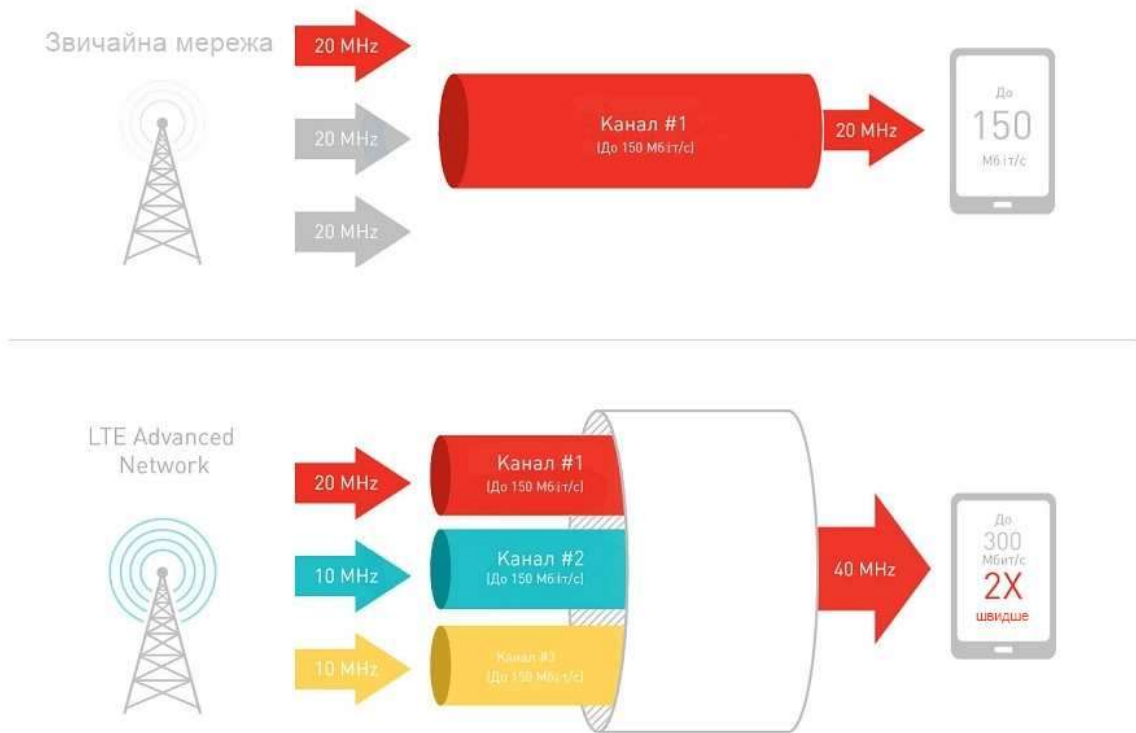


Рисунок 1.1 – Агрегації частотних каналів в мережах 4G

Агрегація частот об'єднує декілька вузькосмугових каналів, наприклад, робить з двох або трьох по 20 МГц – один широкосмуговий, загальною шириною 40 або 60 МГц. Таким чином завдяки розширенню смуги, швидкість підключення теоретично може збільшуватися до двох або трьох разів, згідно формули Шенона:

$$C = F \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right). \quad (1.1)$$

Агрегація частот може з'єднувати пропускну спроможність як двох діапазонів одного бенду, так і декількох. Наприклад, об'єднати два канали в рамках LTE Band 7, так і агрегувати канали Band 7 та Band 3. Це дозволяє операторам та абонентам отримувати можливість гнучкого використання частотного спектру, незалежно від того яка специфіка мережі в конкретному місті.

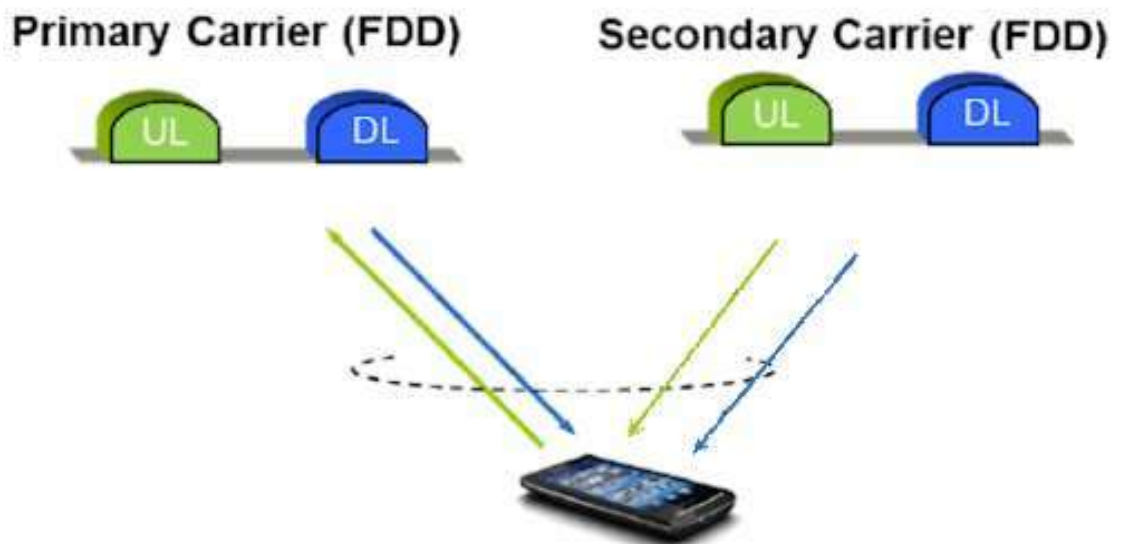


Рисунок 1.2 – Агрегації частотних каналів FDD+TDD

Слід зазначити, що агрегувати можна частоти не тільки різних бендів, а й різних стандартів розділення каналів. Технологія агрегації доступна навіть для одночасного об'єднання FDD-мережі з Band 3, де використовується частотний розподіл каналів та TDD-мережі Band 38, в якій використовується часове розділення каналів для прийому та передачі сигналу. Щоправда, такий різновид агрегації можуть підтримувати не всі абонентські термінали [3].

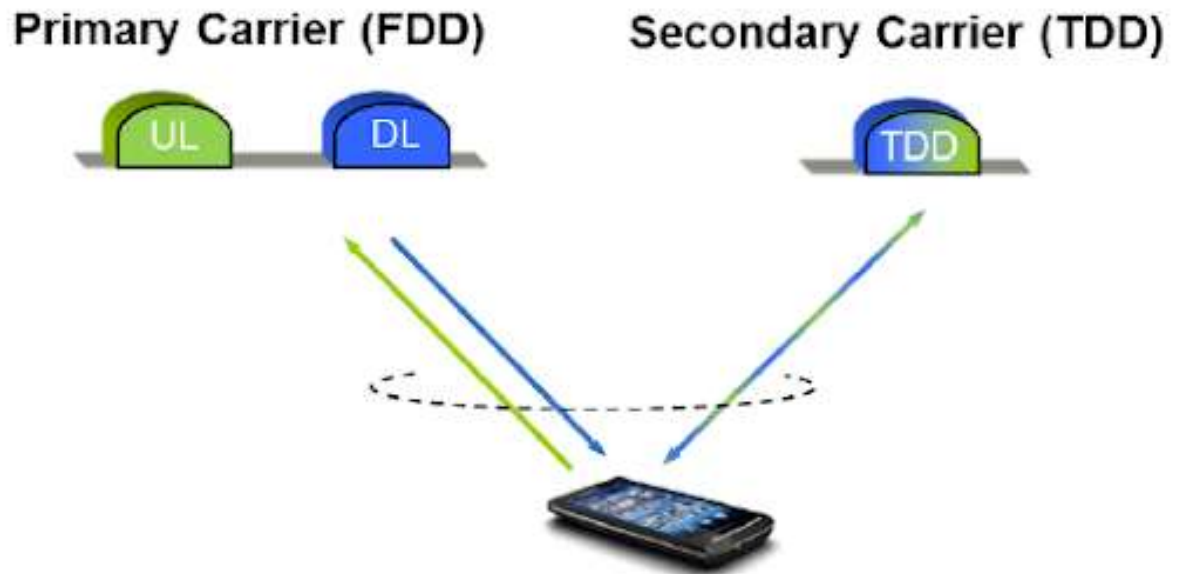


Рисунок 1.3 –Агрегації частотних каналів FDD+TDD

Ще 6 травня 2020 року оператор «Vodafone Україна» повідомив про введення в експлуатацію обладнання останнього покоління компанії Huawei для 4G в Одесі. Завдяки агрегації LTE1800 4×4 MIMO + LTE2600 4×4 MIMO Carrier Aggregation ще одне місто (після Києва), досягло максимальної швидкості мобільного з'єднання у 538 МБіт/сек на частотах 1800 МГц та 2600 МГц [4].

2 АНАЛІЗ ЧАСТОТНИХ ДІАПАЗОНІВ 4G ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇХНЬОГО ВИКОРИСТАННЯ

2.1 Особливості розповсюдження радіохвиль частотних діапазонів 4G

Умови розповсюдження радіохвиль в мобільному зв'язку, особливо в міських умовах, можуть розрізнятися від найпростішої ситуації однопроменевого поширення до багатопроменевого поширення коли відбуваються багатократні відбиття від штучних споруд та місцевості в умовах доплерівського зсуву під час руху об'єкта. При цьому радіоканал є статистичною системою, а її властивості можуть бути визначені тільки з деяким рівнем ймовірності.

В міських умовах розповсюдження, як в інших типах реального середовища, виділяють три основних механізми, що визначають характер поширення радіохвиль: відбиття, розсіювання й дифракція [5, 6].

Якщо радіохвилі зустрічаються з нерівною поверхнею, то це також призводить до розсіювання або відбиття радіохвиль у всіх напрямках. В умовах міста типові перешкоди, що викликають розсіювання – це ліхтареві стовпи, дорожні знаки і навіть листя дерев [6].

Особливістю умов поширення радіохвиль в міських умовах є приступність великої кількості струмопровідних перешкод (наприклад будівель) складної форми та різної висоти, які створюють умови для виникнення багатопроменевого розповсюдження.

На умови поширення радіохвиль суттєво впливає положення (орієнтування) міських вулиць по відношенню до напрямку поширення радіохвиль.

Якщо в умовах прямої видимості приймальна потужність сигналу зменшується за законом $\frac{1}{r^2}$ по мірі збільшення відстані між передавальною та

приймальною антенами, то в умовах відсутності прямої видимості середні втрати збільшуються пропорційно деякій степені κ відстані, тобто приймальна потужність дорівнює [5]

$$P_{пр.м} = \alpha P_{пд} r^{-\kappa}, \quad (2.1)$$

де $P_{пд}$ - потужність передавача;

r - відстань між приймальною та передавальною антенами;

κ - показник загасання радіохвиль ($2 < \kappa < 5$);

α - нормований коефіцієнт, який залежить від умов поширення радіохвиль, частоти сигналу та висоти антени.

Експериментальні дослідження показують, що для типових систем стільникового зв'язку поза будівлями при відсутності прямої видимості $3,5 \leq \kappa \leq 5$, а для зв'язку всередині будівель $2 \leq \kappa \leq 5$. Величина $\hat{\epsilon}$ істотно залежить від висоти підвісу антени базової станції й зменшується зі збільшенням останньої.

Як показує аналіз смуг частот, які використовуються в системах стільникового зв'язку 4G, вони відносяться до дециметрового діапазону [7]. Як відомо, хвилі цього діапазону поширюються в основному в межах прямої видимості (за прямою лінією); дифракція на цих частотах проявляється слабо. Проте мала відстань поверхні землі та наявність перешкод (будівель), особливо в міських умовах, що в принципі характерно для застосування стільникового зв'язку, спричинює появи відбитих сигналів, що призводять до інтерференції з сигналом, що пройшов за прямим шляхом. Це явище називається багатопроменевим поширенням радіохвиль, його механізм зображений на рис. 2.1.

Фізичні механізми явища багатопроменевості радіохвиль для різних частотних діапазонів відрізняються, але їх наслідки однакові.

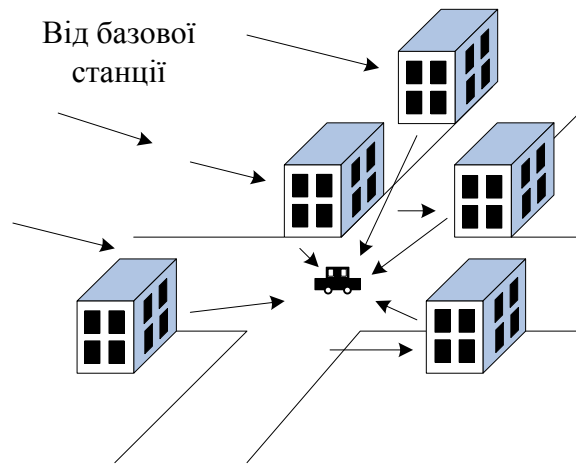


Рисунок 2.1 – Механізм багатопроменевого поширення в умовах міської забудови

При складенні сукупності сигналів з різними фазами, які прийшли в точку прийому різними шляхами, сигнал-сума може бути вище середнього рівня, і нижче його. Завмирання сигналу, які утворюються таким чином – можуть бути дуже глибокими [6]. Крім завмирання сигналу за рахунок багатопроменевого розповсюдження виникають спотворення сигналу, які називаються міжсимвольною інтерференцією [7].

Також слід зазначити, що різні перешкоди (стіни, стелі, меблі, металеві двері тощо), розташовані між абонентським обладнанням і базовими станціями, можуть частково або суттєво знижувати рівні радіосигналів, що призводить до часткової або повної втрати сигналу і як наслідок неможливістю надання сервісів із заданим рівнем якості або як таких.

У містах із багатоповерховою забудовою основною перешкодою для радіосигналів є будівлі. Наявність капітальних стін (бетон+арматура), листового металу, штукатурки на стінах, сталевих каркасів тощо. впливає на якість радіосигналу та може значно погіршувати роботу бездротових пристроїв.

Всередині приміщення причиною перешкод радіосигналу також можуть бути дзеркала та тоновані вікна. Навіть людське тіло послаблює сигнал приблизно на 3 дВ.

Нижче показано таблицю втрати ефективності сигналу Wi-Fi під час проходження через різні середовища. Дані згасань наведені для частоти 2.4 ГГц.

Таблиця 2.1 – Значення втрат під час проходження через різні матеріали

Тип перепоми	Втрати від проходження перепоми, dB	Залишкова відстань передачі сигналу після проходження перепоми, %
Відкритий простір	0	100
Вікно без тонування (металевого)	3	70
Вікно з тонуванням (металевим)	5-8	50
Дерев'яна стіна	10	30
Міжкімнатна стіна (15 см)	15-20	15
Носійна стіна (30 см)	20-25	10
Бетонна стеля, підлога	15-25	10-15
Монолітне з/б перекриття	20-25	10

Тому для отримання максимальних рівнів сигналів від базових станцій, і таким чином максимальної швидкості якості з'єднання, абонентське обладнання треба розташовувати його якнаймога ближче до вікон, якщо воно знаходиться всередині приміщення.

2.2 Визначення найближчих базових станцій в заданій точці прийому для отримання послуг 4 G

Оскільки на даний момент в Україні інколи існує доволі велика проблема з доступом до інтернету, то в даному розділі буде систематизована інформація щодо того, як дізнатися яка базова станція знаходиться найближче до користувача, якого саме оператора і як дізнатися на якій частоті вона працює.

Як показує практика зазвичай таку інформацію пересічний абонент не знає як отримати самостійно.

В основному будуть розглянуті три найбільших оператора України – Vodafone , Київстар та Lifecell , так як вони мають найбільш розвинену 4G мережу по всій території України.

Частоти, на яких оператори надають послуги 4G:

- 900 МГц – 4G/LTE зв'язок Vodafone, Київстар та Lifecell у селищах малих населених пунктах;
- 1800 МГц – 4G/LTE зв'язок Vodafone, Київстар та Lifecell у великих селищах, райцентрах, а також у великих та дрібних містах;
- 2600 МГц – 4G/LTE зв'язок Vodafone, Київстар та Lifecell у великих містах.

Для того, щоб знайти розташування найближчої базової станції мобільного оператора, яка надає послуги 4G стандарту, можна використати кілька методів:

- онлайн карти із покриттям, які можна завантажити з офіційних сайтів самих мобільних операторів, але мінусом такого підходу є низька інформативність, але він доволі точно демонструє зону покриття мобільним сигналом;

- спеціальні мобільні додатки для смартфонів із ОС Android, серед них: Base Stations, Netmonitor, NetMonster або будь-яким іншим (для коректної роботи подібних додатків необхідно знаходитися в зоні покриття базової станції оператора і мати підключення до інтернет);

- сервіс cellmapper.net або аналогічний додаток, максимально інформативним та точним.

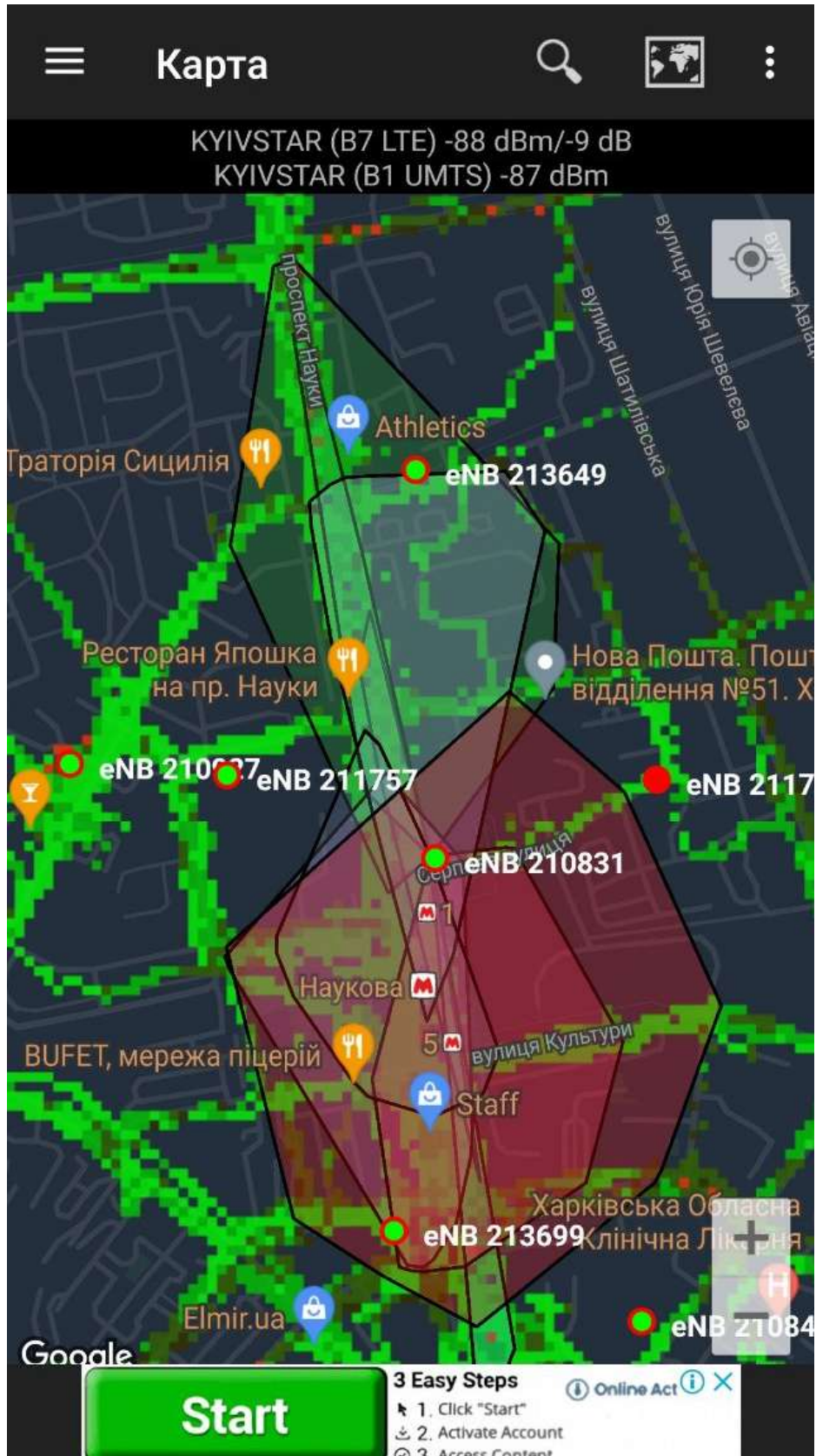


Рисунок 2.2 – Карта із покриттям базової станції LTE

LTE B3 B7 B8		eNB 210831
Tracking Area Code		54713
Первое обнаружение		10,02,2020
Последнее наблюдение		04,05,2023
Sector		21
Signal		-68 dBm
Стандарт сети		LTE
Первое обнаружение		20,04,2023
PCI		260
Последнее наблюдение		23,04,2023
Азимут		168
EA/UA/A/RFCN		3575
Диапазон		8
Frequency		892.5/937.5 MHz
Sector		22
Signal		-60 dBm
Стандарт сети		LTE
Первое обнаружение		17,06,2022
PCI		246
Последнее наблюдение		23,04,2023
Азимут		164
EA/UA/A/RFCN		3575
Диапазон		8
Frequency		892.5/937.5 MHz
Sector		31
Signal		-72 dBm
Стандарт сети		LTE
Первое обнаружение		10,02,2020
PCI		54
Bandwidth		20
Последнее наблюдение		30,11,2022
Max Download		30 Mbps
Азимут		144
Average Download		20 Mbps

Рисунок 2.3 – Параметри базової станції в програмі Cellmapper

2.3 Особливості використання частотних діапазонів 4G в залежності від типу місцевості

Як правило кожний частотний бенд використовується згідно місцевості та потреб, де розгорнута мобільна мережа. Розглянемо деяку специфіку використання частотних діапазонів:

- LTE-900 – станції мають найбільший можливий радіус дії, який приблизно дорівнює 30 км та здатні обслуговувати досить великі території з відносно невеликою густиною користувачів; такі станції встановлюють у сільській місцевості та передмістях, вздовж автомобільних трас національного та місцевого значення, де потрібно охопити великі площі, але на яких кількість користувачів суттєво менша, ніж у великих містах;

- LTE-1800 – станції можуть бути розташовані як у сільській місцевості, так і в невеликих та великих містах; такі станції має радіус покриття до 20 км і вже досить велику ємність, для того, щоб мати можливість підключити одночасно велику кількість абонентів;

- LTE-2600 – станції мають доволі невеликий радіус покриття території (до 10 км) але найбільшу ємність серед інших станцій з нижчими частотами, саме тому їх розташовують у великих містах, де знаходиться велика концентрація абонентів.

Якщо абонент знаходиться на більшій відстані ніж зазначено вище, то отримати доступ до інтернет буде неможливо. Також важливим чинником виступатиме рельєф місцевості.

Слід зазначити, що для отримання максимальних відстаней зв'язку, абонент повинен мати пряму видимість на базову станцію, оскільки це пов'язано із специфікою розповсюдження УКХ. Якщо ж ця вимога не виконується і на шляху до базової станції є перешкоди, або ж базова станція знаходиться в низині, то відстань можливого зв'язку знижується.

Для того щоб дізнатися характеристики рельєфу місцевості в напрямку до базової станції, можна скористатися спеціальними програмами:

- Google Earth для ПК;
- сервіси Ейрлінк або Лінкстест.

Приклад оцінки рельєфу за допомогою програми Google Earth зображений на рис.2.4.

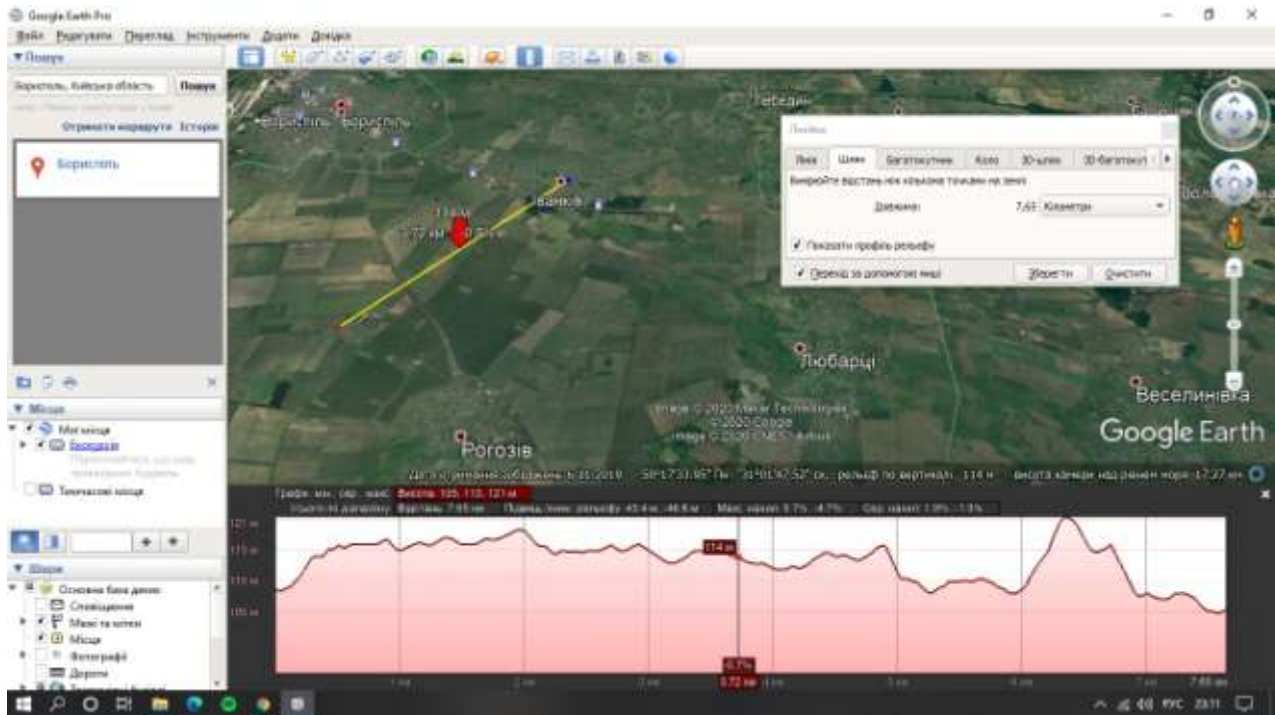


Рисунок 2.4 – Графік рельєфу радіолінії між абонентом та базовою станцією

За подібними графіками можна визначити «вузькі» місця на профілі рельєфу і з'ясувати відносну координату перепони.

Виходячи з місцезнаходження абонента можна оцінити якість рельєфу та визначити такі ситуації [8]:

- рельєф забезпечує пряму видимість;
- рельєф є несприятливим з точки зору прямої видимості і потребуються додаткові дії, щодо її забезпечення (використання щогли більшої висоти, пошук іншої базової станції і т.д.).

3 АНАЛІЗ АБОНЕНТСЬКОГО УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ СТАНДАРТУ 4G

3.1 Аналіз характеристик абонентського терміналу 4G

В документації на абонентське обладнання вказуються смуги робочих частот, як правило ці значення може вказуватися або у вигляді назви бенду: 4G LTE-FDD B1/B3/B5/B7/B8/B20 [2].

Як вже згадувалося раніше в Україні мережа LTE запущена в діапазонах 900 МГц, 1800 МГц та 2600 МГц.

Таким чином, якщо абонент хоче отримувати послуги 4G він має придбати: смартфон, USB модем або Wi-Fi роутер з такими характеристиками, щоб він підтримував усі українські частоти LTE: 4G LTE-FDD B3/B7/B8.

Відповідність центральних частот і бендів наведена в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Відповідність частот номерам бендів 4G

Номера бендів	B3	B7	B8
Центральні частоти	900 МГц	1800 МГц	2600 МГц
Тип доступу	FDD	FDD	FDD

Модеми або роутери 4G можуть об'єднувати в один широкопугувий канал як кілька вузьких каналів одного діапазону, наприклад, Bands 3+3, а також і різних – наприклад, 3+8. Можливі і потрібні комбінації каналів– 3+7+8. Особливості механізму агрегації залежать як і від мережі оператора: який варіант він підтримує, так і від конкретного абонентського обладнання. В Україні актуальною є такі схеми агрегації:

- Band 3 + Band 7;
- Band 3 + Band 8.

Пристрої 4G має таку характеристику вбудованого радіомодулю зв'язку, як «LTE Cat.». Агрегація частот LTE підтримується пристроями з версіями

Cat.6 і вище, де максимальна швидкість сягає 300 Мбіт/с і більше. Якщо взяти найновіші моделі модемів або роутерів, які використовують радіомодулі із LTE Cat.20 і вище, то такі пристрої видають швидкість до 2 Гбіт/с, що вже доволі близько до швидкостей, які регламентовані у мережах 5G.

Найбільш розповсюдженим обладнанням бездротових мереж після смартфонів є бездротові USB модеми.

Їх висока популярність поруч з смартфонами пояснюється тим, що використання смартфонів в якості точки доступу обмежене і це пов'язано із деякими незручностями:

- зменшення і так обмеженого часу роботи смартфона, бо сучасне високошвидкісне бездротове з'єднання є доволі енерговитратним;
- незручність прив'язки всіх інших абонентів до смартфона користувача – це означає, що він фізично прив'язаний до інших абонентів, що обмежує його у переміщенні.

Саме через ці фактори смартфони доволі обмежені в цьому використанні. Це і обумовлює попит на 4G USB Wi-Fi модеми.

Функціонально 4G Wi-Fi модем – це пристрій, який за допомогою власного Wi-Fi інтерфейсу може забезпечити швидкісним мобільним інтернетом певну кількість абонентів. Такі пристрої, як правило, оснащені доволі гнучким інтерфейсом і функціоналом, що вигідно їх відрізняє від смартфонів.



Рисунок 3.1 – Принцип надання підключення абонентських пристроїв до мережі із використанням 4 G WI FI модему

Найчастіше такий тип підключень (рис.3.1) використовують у приватних будинках чи квартирах:

- де абонент немає змоги підключитися до високошвидкісного дротового інтернет;

- місця, де необхідно забезпечення декількох каналів зв'язку – основний канал за дротовим каналом інтернету і один резервний канал від мобільного оператора; такий тип з'єднання дозволяє завжди бути підключеним до всесвітньої мережі, що може бути актуальним для деяких типів сервісів.

Звернемо увагу, на деякі характеристики модемів, які треба враховувати під час обрання даного типу пристроїв.

На сьогодні існують два основні типи 4G модемів: портативні та стаціонарні.

Портативні модеми дуже зручні у користуванні завдяки своїм малим розмірам, для живлення вони обладнані акумулятором. Такий тип модемів актуальний для активних людей, які потребують підключення до інтернету у дорозі: в автомобілі або автобусі тощо. Основними перевагами такого модему є автономна робота без мережі центрального живлення та компактні габарити для зручного транспортування. Відповідно коли обирається портативний модем слід звернути увагу на ємність акумуляторної батареї, бо від цього параметру залежить час автономної роботи пристрою. Не зайвою буде наявність роз'ємів для підключення зовнішніх антен.

Слід зазначити, що також існують портативні модеми, які не мають вбудованого акумулятора і живляться через USB роз'єм.

Стаціонарні 4G модеми використовуються коли необхіден доступ до інтернету з певного місця, наприклад приватного будинку, в який немає змоги провести дротовий інтернет. По факту такий тип модему являє собою повноцінний Wi-Fi роутер із вбудованим 4G модемом та широким функціоналом. Такий пристрій може підключатись як до дротового інтернету локального провайдера, так і до мобільного інтернету від стільникового

оператора. До таких пристроїв як правило висуваються вимоги щодо наявності розвинених інтерфейсів для підключення зовнішніх антен, функціональності прошивки тощо.

В роботі для проведення досліджень серед багатьох комерційних пристроїв за сукупністю технічних показників і показників якості був обраний 4G USB модем із функцією Wi-Fi ZTE MF79U [10]. За порівняно однакових технічних характеристик цей модем має можливість розширення свого функціоналу із встановленням кастомної прошивки, яка суттєво розширює функціонал пристрою. Про це більш докладно буде розглянуто в наступному розділі.



Рисунок 3.2 – Зовнішній вигляд 4G модему ZTE MF79U

Розглянемо основні технічні характеристики обраного модему, вони наведені в табл 3.2.

Таблиця 3.2 – Технічні характеристик ZTE MF79U

Швидкість downlink	до 150 Мбіт/с
Швидкість uplink	до 50 Мбіт/с
Частотний діапазон пристрою	4G LTE: Bands B1 / B3 / B5 / B7 / B8 / B20 (2100/1800/850/2600/900/800 МГц); 3G: UMTS / HSDPA / HSPA / HSPA + / DC-HSPA +
Підтримка стандартів	GSM, 2G, 2.5G, 3G, 4G (LTE)
Інтерфейс	USB, Wi-Fi
Стандарт Wi-Fi	802.11 b/g/n
Функції	Є роз'єми для підключення зовнішньої антени: два роз'єми TS9, підтримка технології MIMO.
Розміри, мм	101 x 30,5 x 13,5

Як можна побачити з таблиці технічні характеристики даного модему повністю відповідають вимогам щодо роботи в мережі 4G України. Крім того він підтримує і всі попередні покоління мереж мобільного зв'язку, що може стати у нагоді не дивлячись на доволі розвинену мережу 4G в Україні, все ж такі є частини території, де таке покриття відсутнє.

3.2 Розширення функціоналу бездротового модему

Під час використання обраного модему інколи було необхідно використовувати певний частотний бенд для отримання бездротового з'єднання. Така ситуація може трапитися в зоні обслуговування із нестійким рівнем сигналу особливо на межі двох стільників мобільного оператора.

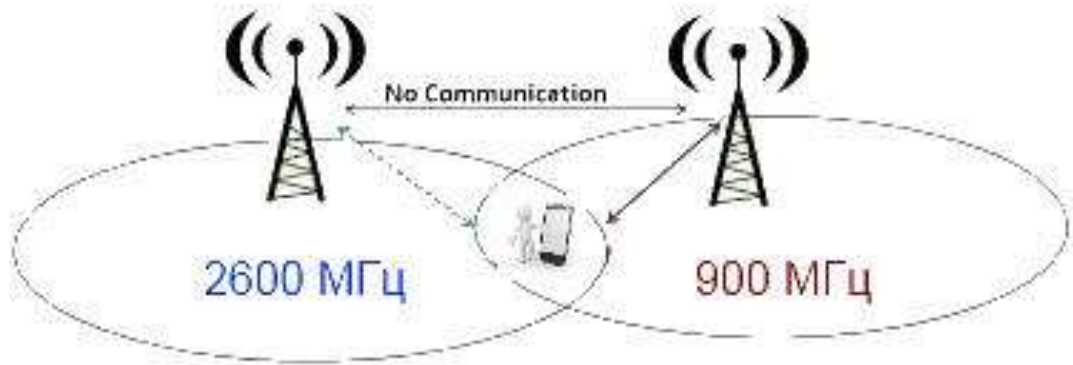


Рисунок 3.3 – Приклад «невдалого» місцерозташування абонента на межі двох стільників із різними бендами

В такому випадку можлива ситуація, коли модем постійно намагатиметься знайти кращий рівень сигналу між двома базовими станціями і це призведе до нестійкого з'єднання і постійних розривів зв'язку, що може бути неприпустимим для деяких типів сервісів, наприклад таких як відеоконференція, завантаження даних, тощо.

Для того, щоб не відбувалося вищезгаданої ситуації було б доцільно вручну обирати необхідний бенд, але проблема в тому, що стандартний web-інтерфейс модему не дозволяє це зробити, хоча технічна можливість для цього є. До того ж технічна інформація щодо прийнятого сигналу доволі обмежена, що не дає повністю розкрити цього пристрою.

В джерелі [11] була отримана кастомна прошивка, яка дозволяє значно розширити можливості цього модему:

- усунена проблема із оператором lifecell, яка присутня на модемі ZTE MF79U з його заводською прошивкою;
- можна фіксувати частоти (BAND) на яких працює модем, оскільки раніше можна було обрати тільки стандарт зв'язку без можливості контролювати частоти, на яких ведеться надання бездротових послуг;
- відображаються параметри сигналу SINR RSSI RCRP RCRQ, а також інші параметри (трафік, май та ін.), що в свою чергу дозволяє

оцінювати більш детально параметри отриманого сигналу з метою більш ефективного розташування модему або його виносних антен в просторі з метою отримання більшого рівня сигналу від базової станції, порівнювати ефективність антен, тощо.

Для того щоб встановити цю прошивку потрібно зробити певні послідовність дій (на комп'ютері має бути встановлена ОС WIN10):

- 1) В завантаженому архіві треба запустити файл SCSI.exe
- 2) Відкриваємо Terminal.exe, якщо Terminal не побачив модем, то треба встановити драйвери із папки «драйвери». Після цього необхідно дати команду:

`AT+ZMODE=1`

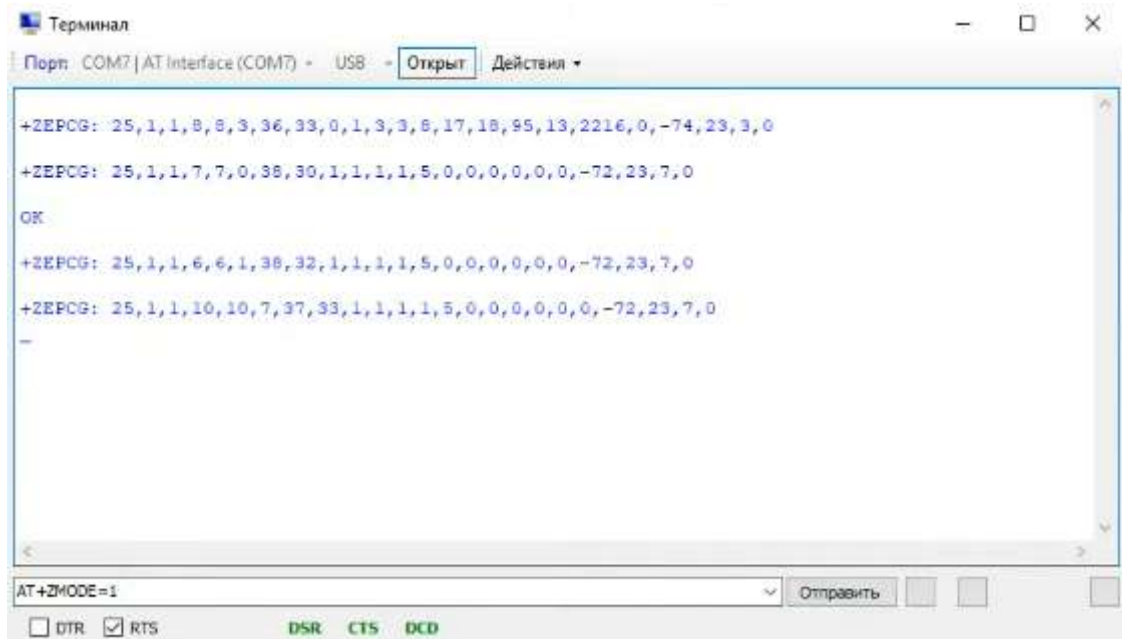


Рисунок 3.4 – Результат роботи команди `AT+ZMODE=1`

Після цього має з'явитися відповідь «ОК» від модему.

3. Після цього потрібне перезавантаження модему, для цього достатньо зняти з нього живлення і подати знову – це можна виконати шляхом його від'єднання від USB порту із подальшим підключенням.

4. Після завантаження модему необхідно відкрити файл із інсталятором нового web-інтерфейсу MF79U Mod-web.exe.

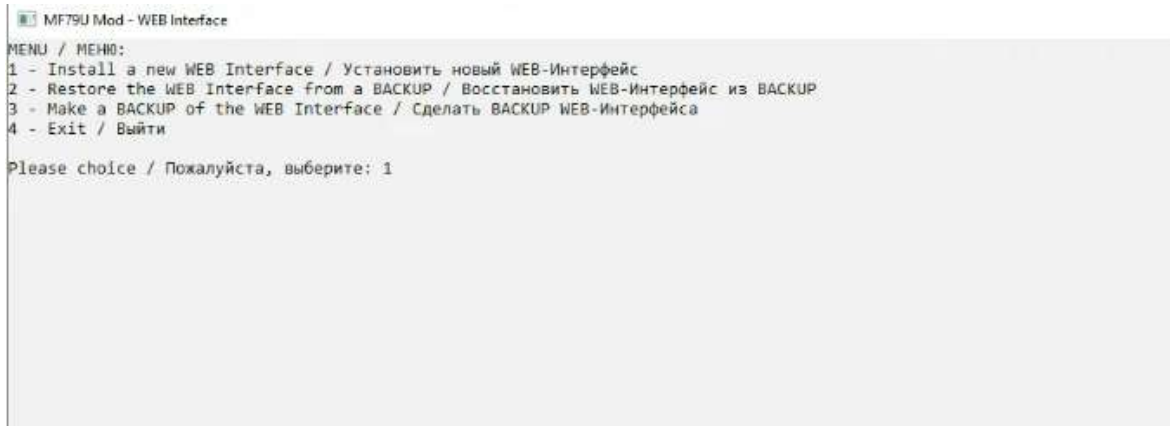


Рисунок 3.5 – Меню інсталятора web- інтерфейсу

Для початку встановлення необхідно натиснути цифру «1» після цього «enter», це розпочне інсталяцію. Також за допомогою пунктів меню можна зробити резервну копію поточною прошивки, або відновити прошивку з бекап-файлу.

5. Після встановлення нового web-інтерфейсу необхідно перезавантажити модем. На цьому перепрошивка завершена.

Як можна побачити із рис. 3.6 кількість інформації в полі Status Information суттєво збільшилася.

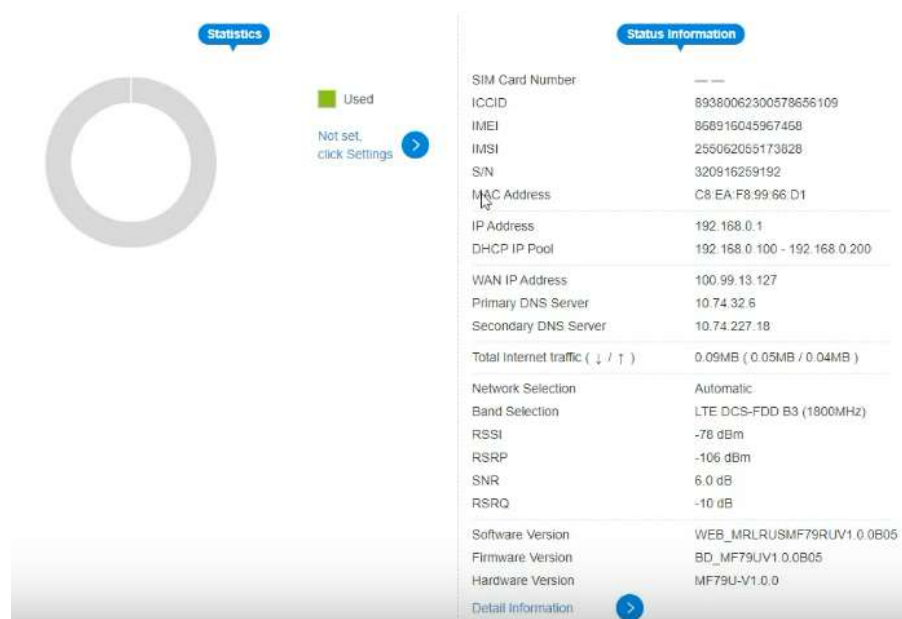


Рисунок 3.6 – Поле Status Information в новому web-інтерфейсі

Для 4G/LTE якість сигналу визначатиметься чотирма параметрами:

- RSSI – рівень потужності сигналу (що ближче до 0, тим краще);
- RSRP – середнє значення потужності прийнятого сигналу (що ближче до 0, краще);
- RSRQ - якість прийнятого сигналу (що ближче до 0, тим краще);
- SINR або Ec/Lo – відношення сигнал/шум (що більше 0, тим краще).

Якщо натиснути Detail Information відкриється додаткоа інформація наступного плану, рис. 3.7.

Status Information	
SIM Card Number:	380935147469
ICCID	89380062300578556109
IMEI	868916045967468
IMSI	255062055173828
S/N	320916259192
MAC Address:	C8:EA:F8:99:66:D1
<hr/>	
LAN Domain	ufi.ztedevice.com
IP Address	192.168.0.1
Subnet Mask	255.255.255.0
Default Gateway	192.168.0.1
DHCP IP Pool	192.168.0.100 - 192.168.0.200
<hr/>	
Network Name (SSID)	ZTE_9968D1
Max Access Number	10
<hr/>	
WAN IP Address	100.99.13.127
Subnet Mask	255.0.0.0
Primary DNS Server	10.74.32.6
Secondary DNS Server	10.74.227.18
<hr/>	
Current connection (↓ / ↑)	0.01MB (0.01MB / 0MB)
Total Internet traffic (↓ / ↑)	0.09MB (0.05MB / 0.04MB)
<hr/>	
Network Selection	Automatic
Band Selection	LTE DCS-FDD B3 (1800MHz)
Operator	lifecell
PLMN (MCC / MNC)	25506 (255 / 06)
LAC DEC / LAC HEX	32001 / 7D01
CID DEC / CID HEX	235527701 / E09DE15
PCI (PSS / SSS)	306 (0 / 102)
Signal Strength	-105 dBm

Рисунок 3.7 – Детальна інформація щодо параметрів підключення та BTS

Це дозволяє побачити більш детальну інформацію щодо параметрів сигналу та базової станції. Наприклад можна переконатися, що ви під'єдналися до бажаної базової станції, яку ви попередньо знайшли та обрали за допомогою Cell Mapper, оскільки там присутні ідентифікатори BTS.

І перейдемо до одного з найважливіших надбань оновленої прошивки: можливість обрання частотних бендів:

1. Перед тим як обирати необхідний частотний бенд, необхідно відключити з'єднання з інтернетом.

2. Переходимо до вкладки Connection Settings

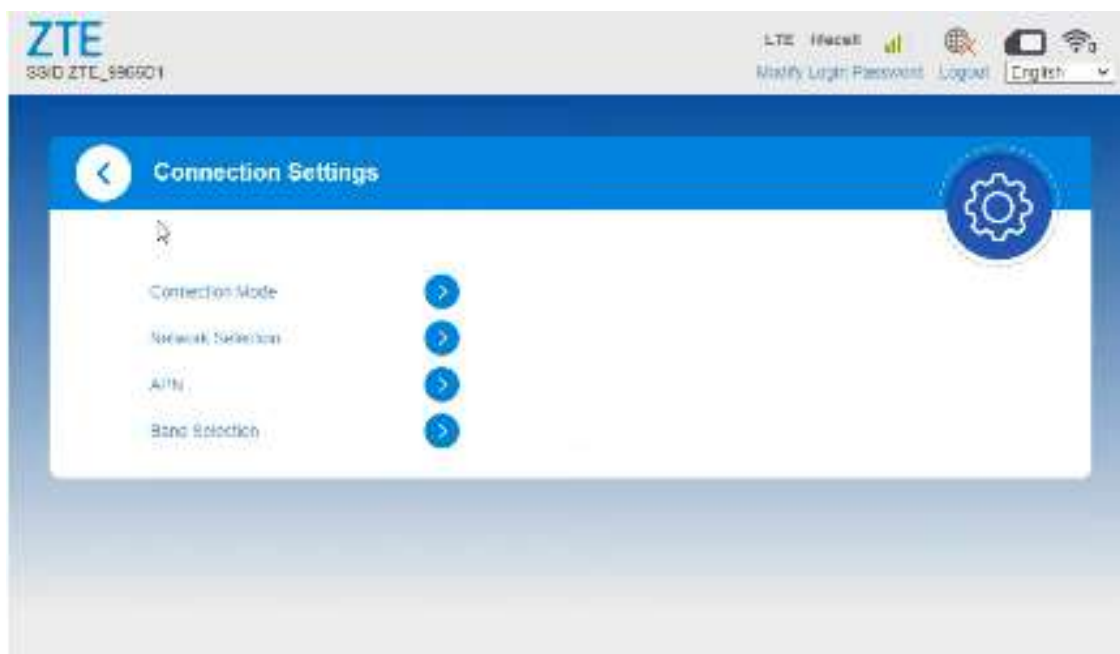


Рисунок 3.8 – Вкладка налаштування з'єднання.

В цій вкладці можна обрати тип з'єднання, тип обрання мережі, параметри WI FI точки доступу, та обрати бенд, рис

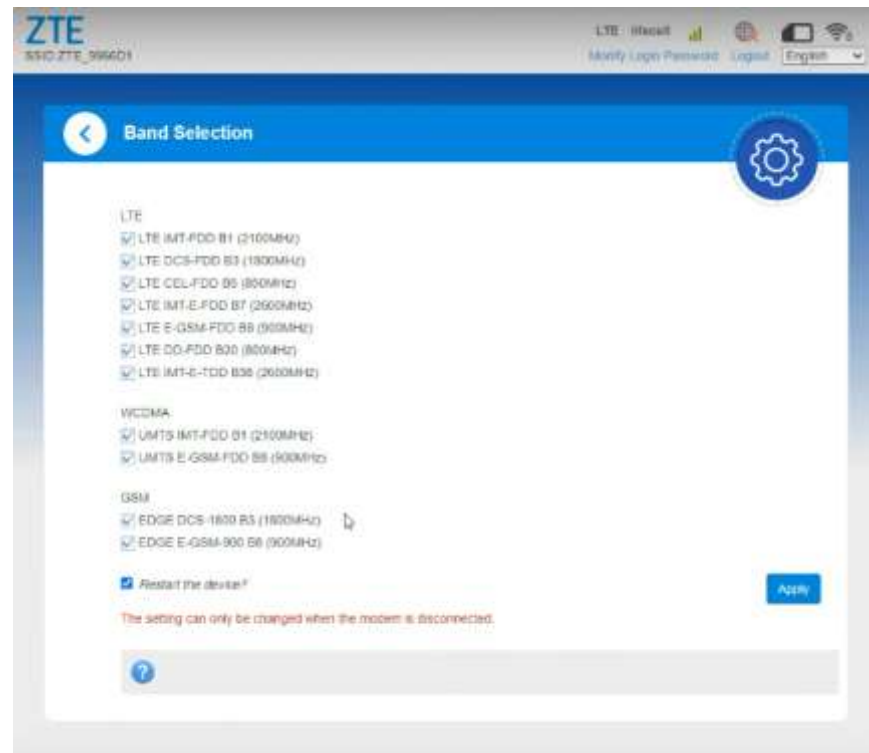


Рисунок 3.9 – Обрання частотних діапазонів

Таким чином користувач тепер повністю в ручному режимі може обрати бажаний частотний діапазон для вирішення своїх задач та покращення якості з'єднання у певних умовах.

Дана функція дозволяє використовувати такий модем як тестер надання послуг на заданій території на певному частотному діапазоні. Для рівню сигналу:

Щодо останнього пункту, а саме рівня сигналу. Для 4G/LTE якість сигналу визначатиметься чотирма параметрами:

- RSSI – рівень потужності сигналу (що ближче до 0, тим краще);
- RSRP – середнє значення потужності прийнятого сигналу (що ближче до 0, краще);
- RSRQ - якість прийнятого сигналу (що ближче до 0, тим краще);
- SINR або Es/Lo – відношення сигнал/шум (що більше 0, тим краще).

Великою перевагою даної моделі модему є можливість під'єднання зовнішніх антен, для цього в ньому присутні два роз'єми TS-9, що забезпечує

роботу MIMO режиму. Необхідність під'єднання зовнішніх антен існує майже завжди, окрім нормальних умов роботи BTS (штатному режимі) в межах надійного покриття. Це пов'язано з тим, що вбудовані антени володіють доволі малим підсиленням сигналу, і достатню швидкість та якість з'єднання можна отримати тільки при таких умовах. Ситуація може суттєво погіршитися, коли базова станція переходить в режим аварійного резервного живлення через зникнення централізованої електрики, наприклад через бойові дії, або явища природного характеру. В такому випадку базова станція суттєво знижує потужність випромінювання передавача (P_2) з метою економії акумуляторних батарей резервного живлення, або палива на резервних генераторах. В такому випадку площа надійного покриття (R_1) може сильно знижуватися і абоненти які мали змогу нормально працювати та отримувати послуги, залишаються без них (R_2).

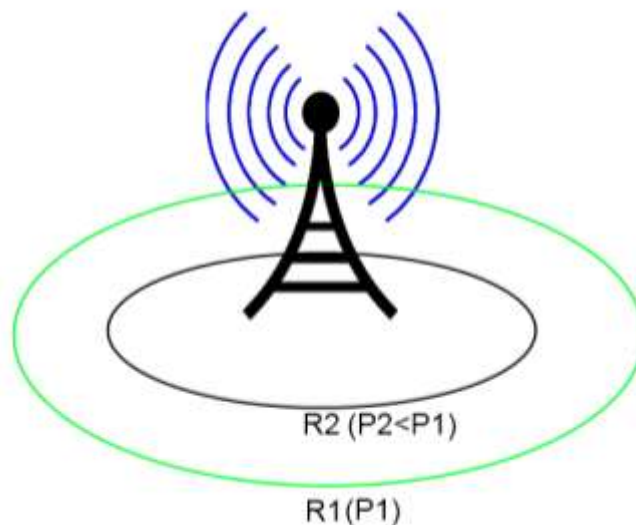


Рисунок 3.10 – Зменшення радіусу обслуговування через зменшення потужності випромінювання

Тому для забезпечення запасу енергетичного бюджету радіолінії доцільне використання зовнішніх антен з більшим підсиленням ніж штатні, що допоможе зберегти з'єднання в подібних ситуаціях розглянутих вище, або

мати його там, де штатні антени не в змозі його забезпечити навіть за нормальних умов, наприклад через велику відстань до базової станції.

$$E = \frac{\sqrt{30P \cdot G}}{r} \quad (3.1)$$

Виходячи з (3.1) для компенсації зменшення потужності в 2 рази на базовій станції, що суттєво для економії електроенергії, достатньо використати збільшення підсилення антени в 2 рази, це значить, що треба збільшити підсилення антени на 3 дБ відносно штатної для збереження того ж самого рівня сигналу в точці прийому.

Або при збереженні потужності BTS та інших умов, для того, щоб збільшити відстань покриття в N разів достатньо збільшити підсилення антени в N^2 разів.

3.3 Аналіз параметрів антен та огляд зовнішніх антен для 4G

На ринку зараз присутня велика кількість різноманітних типів антен. Для того щоб зорієнтуватися серед них та обрати необхідну для вирішення конкретної задачі давайте розберемося із технічними характеристиками цих пристроїв.

Антенна – пристрій, призначений для перетворення енергії струму високої частоти в енергію радіохвиль або, навпаки, енергії радіохвиль в енергію струму високої частоти. Основними параметрами антен є:

- діаграма спрямованості;
- коефіцієнт підсилення;
- хвильовий опір в точці живлення;
- смуга пропускання.

До складу антенної системи як правило, окрім самої антени, входить ще кабель живлення, який необхідний для передачі ЕМХ з найменшими втратами від передавача до антени або від антени до приймача. Для правильної роботи

антенного пристрою фідер має бути узгодженим із антеною за хвильовим опором.

Діаграма спрямованості – графічне зображення амплітудної характеристики спрямованості антени. Частіше за все, діаграми спрямованості (ДС) будують у двох площинах: горизонтальній (площина Н) та вертикальній (площина Е). Як правило, площини обираються так, щоб в одній з них було розташовано вектор Е, а в іншій – Н.

Коефіцієнт підсилення антени визначає, у скільки разів щільність потоку енергії, що випромінюється антеною в певному напрямі, більше щільності потоку енергії, який був би зафіксований у разі використання ізотропної антени. Коефіцієнт підсилення антени вимірюється у децибелах (дБі або dB).

Так, якщо коефіцієнт підсилення антени в заданому напрямі складає 5 дБі, то це означає, що в цьому напрямі потужність випромінювання на 5 дБ більша, ніж потужність випромінювання ідеальної ізотропної антени.

Зазначимо, що збільшення потужності сигналу в одному напрямі спричиняє за собою зменшення потужності в інших напрямках, оскільки антена є пасивним пристроєм і досягати підсилення випромінювання в одному напрямку може лише через зменшення його в іншому. Звичайно, коли говорять, що коефіцієнт підсилення антени складає X дБі, то мається на увазі максимальне можливе підсилення антени (за головною пелюсткою діаграми спрямованості) [12].

Коефіцієнт підсилення G враховує ККД. антени η_A і дорівнює:

$$G = D \cdot \eta_A. \quad (3.2)$$

В діапазоні дециметрових та сантиметрових хвиль ($f > 1\text{ГГц}$) $\eta_A \approx 1$, отже можна рахувати $G = D$.

Коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ) – розраховується як відношення найбільшого значення амплітуди напруженості електричного або магнітного поля стоячої хвилі в лінії передачі до найменшого її значення. КСХ визначається якістю узгодження навантаження (наприклад, антени) з лінією передачі (фідером). Значення КСХ в однорідній лінії передач без втрат постійне

за всією довжиною лінії передачі та не залежить від її довжини. Цей параметр визначає ККД антено-фідерного тракту в цілому [13].

Смуга пропускання антени – діапазон частот, у межах якого амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) акустичного, радіотехнічного або оптичного пристрою є досить рівномірною для того, щоб забезпечити передачу сигналу без суттєвого викривлення його форми. Смуга пропускання частіше за все визначається за рівнем КСХ (КСХ = 3) [14].

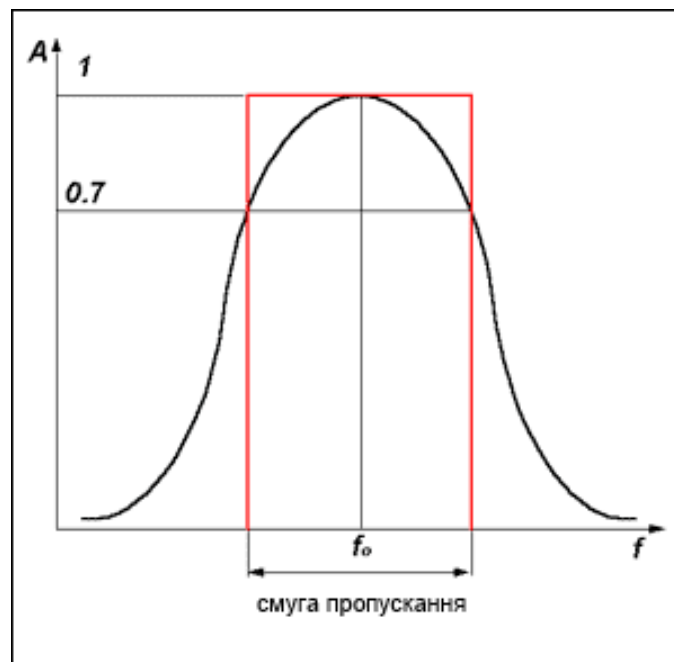


Рисунок 3.11 – Смуга пропускання антени за рівнем -3 дБ

Поляризація антен буває декількох типів:

- горизонтальна;
- вертикальна;
- кругова або циклічна.

Поляризація електромагнітної хвилі є її просторово-часовою характеристикою та визначається видом траєкторії, яку описує кінець вектора електричного поля в фіксованій точці простору. При круговій або циклічній поляризації електромагнітне поле обертається навколо осі X з певним циклом

або кроком так, що в різних точках простору приймає або вертикальну, або горизонтальну поляризацію.

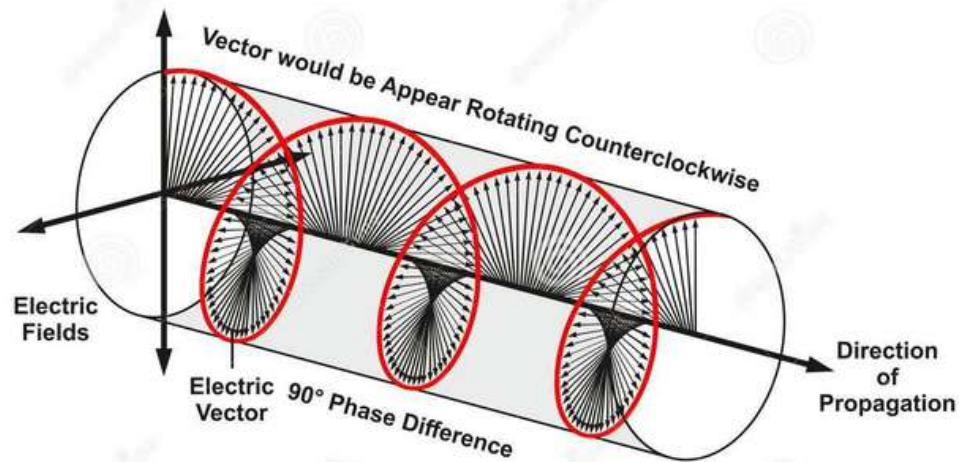


Рисунок 3.12 – Кругова поляризація ЕМХ

В пласкій електромагнітній хвилі вектори вертикального електричного E та магнітного H полів в кожний момент часу орієнтовані у вільному просторі певним фіксованим чином.

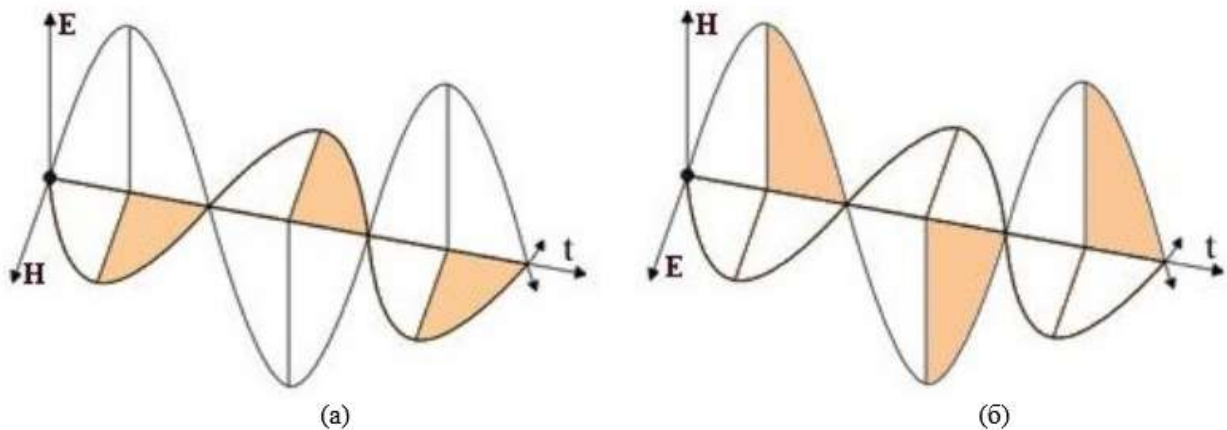


Рисунок 3.13 – Вертикальна (а) та горизонтальна (б) поляризації ЕМХ

Хвильовий опір в точці живлення – це відношення напруги в точці живлення до струму в точці живлення антени. Введення вхідного опору антени

грунтоване на її розгляді як двополюсника. Вхідний опір антени важливий при визначенні ККД антени і коефіцієнта посилення антени [9].

По теоремі взаємності значення вхідного опору антени в режимах передачі і прийому співпадають. У вхідному опорі Z антени виділяють опір випромінювання $R1$ і опір втрат $R2$:

$$Z = R1 + R2 \quad (3.3)$$

Опір втрат $R2$, у свою чергу, складається з омичних втрат в матеріалах конструкції антени (провідниках і ізоляційних матеріалах) і об'єктах, розташованих у ближній зоні антени (наприклад, в ґрунті, опорах антени). Для підвищення ККД антени необхідно прагнути до узгодження вхідного імпедансу антени з внутрішнім опором джерела (з хвильовим опором лінії передачі), а також до зменшення втрат в антені (тобто зниженню $R2$) [16].

Види антен за діапазоном робочих частот:

- однодіапазонні (працюють тільки в одному бенді);
- мультидіапазонні (працюють в декількох бендах).

За конструкцією зовнішні антени розділяють на:

- панельні;
- спрямовані (хвильовий канал, Ягі);
- кругові всеспрямовані;
- секторні;
- параболічні;
- штирьові.

Розглянемо більш детально кожен тип антен та специфіку їхнього застосування.

Панельні антени — найпоширеніший тип антен для діапазонів частот в межах 1-5 ГГц.



Рисунок 3.14 – Панельна антена

Є різновидом спрямованих антен, проте мають ширшу, ніж хвильовий канал, діаграму спрямованості, що полегшує їхнє налаштування в перед експлуатацією: здебільшого їх достатньо повернути у бік базової станції. Крім того, такі антени є доволі широкосмуговими: можуть підтримувати більшість стандартів стільникового зв'язку, включаючи GSM, 3G та 4G.

Серцем такої антени є антенна решітка – являє собою набір розташованих диполів один під одним у два стовпці. Цей спосіб розташування називається горизонтальним рознесенням, що дозволяє досягти покращення якості сигналу у напрямку базової станції. Залежно від поляризації диполі можуть бути розташовані вертикально, горизонтально, нахилом 45° або Х-образно в обох стовпцях. Для економії місця такі решітки поєднуються в єдиний корпус у вигляді плоскої панелі, звідки і походить власне назва антени [17].

Наступний тип це класичні спрямовані антени: має вузьку діаграму спрямованості і високий коефіцієнт підсилення. Але такі антени вимагають особливо точного позиціонування на BTS, інакше їх ефективність не може бути реалізована. Приклад такої антени зображено на рис. 3.15. Такі антени зазвичай використовують при сильному віддаленні від BTS, їхнє підсилення може сягати понад 20 dBi [17].



Рисунок 3.15 – Спрямована антена Уда-Ягі

Кругова всеспрямована антена підходить як універсальна антена для загальних потреб (рис.3.16). Завдяки свої ДС в горизонтальній площині не потребує точного встановлення на BTS. Як негативний наслідок – доволі низький коефіцієнт підсилення, відносно гарних екземплярів спрямованих антен. Підсилення таких антен зазвичай менше 10 dBi.



Рисунок 3.16 – Всеспрямована антена

Секторні антени використовуються при розгортанні базових станцій з великою абонентською базою та спроектовані спеціально для операторських вишок із секторною організацією зони покриття. Вони побудовані за схемою фазованих антенних решіток і формують необхідні сектори: 60° або 120° .

Секторні випромінювачі як правило замкнуті за постійним струмом, тому їх можна використовувати у районах із підвищеною грозовою активністю без додаткового грозозахисного обладнання.



Рисунок 3.17 – Секторна антена

Параболічний тип антен використовується при великій віддаленості від вежі оператора, як правило понад 20 км. Володіють найбільшим підсиленням серед інших типів антен, при цьому головна пелюстка має дуже малий кут розкриву. Процес установки та налаштування досить трудомісткий, і як правило потребує спеціального обладнання [17].



Рисунок 3.18 – Параболічна антена

Вертикальні штирьові моделі є різновидом кругових всепрямованих антен. Такі антени компактні зручні у користуванні і як правило використовуються у якості штатних антен на багатьох портативних пристроях як то роутери, точки доступу, тощо.

Вони не вимагають налаштування та отримують сигнал з усіх напрямків в горизонтальній площині.



Рисунок 3.19 – Штирьова антена

Висновки-рекомендації щодо застосування розглянутих типів антен:

1. Коли в точці прийому слабкий сигнал слід віддавати перевагу спрямованим антенам: чим більша відстань до BTS тим з більшим підсиленням треба використовувати антену. Сигналі в місці встановлення застосовуйте спрямовану антену.
2. Панельні антени є переважними серед спрямованих антен, бо простіші в налаштуванні і мають доволі високий коефіцієнт підсилення.
3. При апріорно високому рівні сигналу (наприклад, у місті) інколи буває достатньо розмістити модем біля вікна.
4. У складних випадках слід розглядати параболічні антени, але їх встановлення та налаштування може вимагати виклику фахівця.

Розглянуті антени, можуть вирішувати широкий спектр задач. Проте більшість проблем із низьким рівнем сигналу в міських умовах може бути вирішено шляхом використання зовнішніх всеспрямованих антен. Це пов'язано з тим, що абонент не завжди має змогу визначити напрям на базову станцію і таким чином всеспрямована антена може стати рішенням, бо не потребує спеціального позиціонування. При цьому рівня підсилення, який вони забезпечують відносно вбудованих в модеми буває достатньо для відчутного покращення рівня сигналу в точці прийому. До цього додається зручність і компактність таких антен у порівнянні із тими ж панельними, щодо повсякденного використання.

Проте існує інша проблема: як правило більшість всеспрямованих комерційних антен розраховані для ефективної роботи тільки на одному частотному діапазоні. Що на практиці буває недостатньо, так як абонент заздалегіть не знає який бенд буде використовуватися в конкретній ситуації в конкретному місці, а мати та використовувати декілька антен незручно.

4 РОЗРОБКА ЗОВНІШНЬОЇ АНТЕННОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ПОРТАТИВНОГО АБОНЕНТСЬКОГО ТЕРМІНАЛУ 4G

Саме тому в рамках магістерської роботи було вирішено розробити мультибендову всеспрямовану антену, яка б здатна була перекривати всі бенди LTE в Україні.

4.1 Вибір типу антени

В основу розробки такої антени була покладена ідея, яка була реалізована в конструкції, яка зображена на рис. 4.1 [18].

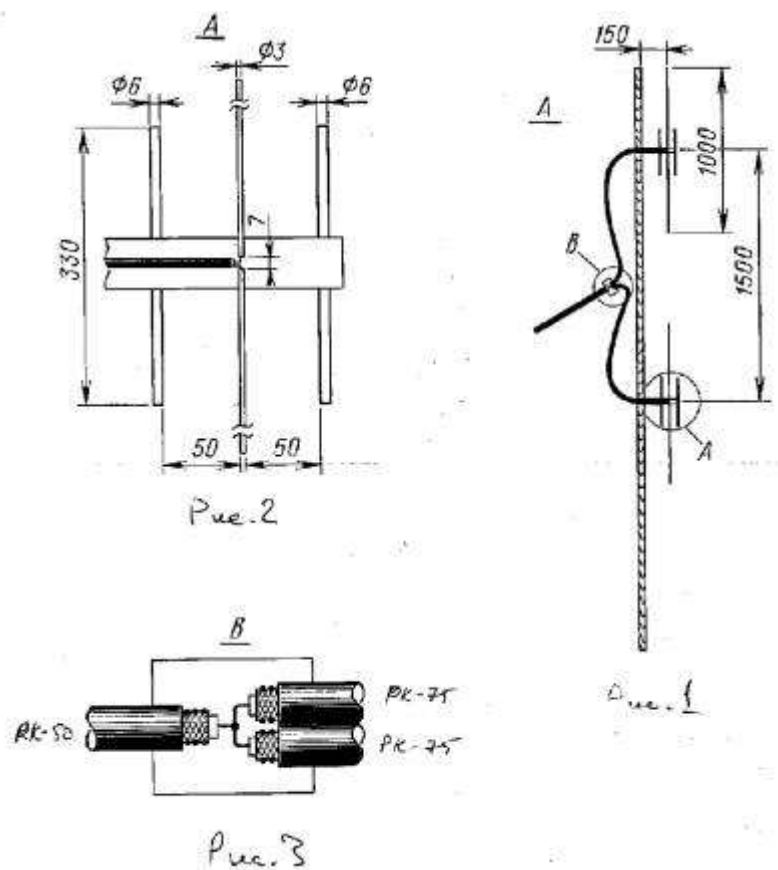


Рисунок 4.1 – Вертикальна двдіапазонна антена RA3WDK

Ця конструкція представляє собою дводіапазонну антенну, яка складається із двоелементного стеку. Антена має вертикальну поляризацію і фактично кругову ДС.

Дана конструкція привернула увагу тим, що дозволяє мати два діапазони та живиться одним кабелем, якщо мова йде про один елемент стеку.

В результаті аналізу, було встановлено, що фактично кожен стек антени являє собою один $\frac{\lambda}{2}$ діполь на 145 МГц і два $\frac{\lambda}{2}$ діполі на 435 МГц розташовані в одній площині по обидві сторони від діполю на 145 МГц. Низькочастотний діполь працює в якості активного випромінювача, а високочастотні діполі фактично є пасивними елементами і перевипромінюють електромагнітне поле, яке формує низькочастотний діполь.

Така антена була виготовлена практично і показала добрі результати роботи на обох діапазонах, до того ж на частоті 435 МГц така антена має певне підсилення у напрямку площини в якій знаходяться елементи 435 МГц.

Завдяки перевагам, якими володіє ця конструкція, було вирішено за її основою спроектувати широкосмугову антену 4G LTE для всіх бендів.

Перед початком проектування такої конструкції необхідно розрахувати довжини всіх необхідних елементів на всі бенди 4G LTE. Всі вони являють собою $\frac{\lambda}{2}$. Такий тип диполя також добре відомий як «Діполь Герца». Він є доволі простою і в той же час достатньо ефективною антеною із круговою ДС. Класичною формулою для розрахунку параметрів такої антени є наступна:

$$l_{ел,м} = \frac{142,5}{f, МГц} \quad (4.1)$$

Враховуючи коефіцієнт укорочення отримана електрична довжина $l_{ел}$ множиться на 0,95:

$$l_{геом,м} = 0,95 * l_{ел} \quad (4.2)$$

Проведемо розрахунки геометричних розмірів $\frac{\lambda}{2}$ диполів для частот: 900 МГц, 1800 МГц, 2100 МГц та 2600 МГц. Частота 2100 МГц в Україні зараз виділена для 3G, проте все може змінитися і цей бенд може бути доданий в 4G. Тому додамо цю частоту в розрахунки, щоб антена могла і працювати і на ній в тому числі.

$$\begin{aligned}
 l_{\text{геом}}(900\text{МГц}), м &= 0,95 * \frac{142,5}{900\text{МГц}} = 0,15\text{м}; \\
 l_{\text{геом}}(1800\text{МГц}), м &= 0,95 * \frac{142,5}{1800\text{МГц}} = 0,075\text{м}; \\
 l_{\text{геом}}(2100\text{МГц}), м &= 0,95 * \frac{142,5}{2100\text{МГц}} = 0,0644\text{м}; \\
 l_{\text{геом}}(2600\text{МГц}), м &= 0,95 * \frac{142,5}{2600\text{МГц}} = 0,052\text{м}.
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

Вихідна конструкція з рис. 4.1 була дещо модифікована, з неї вилучений один елемент стеку, також було прийнято рішення використовувати лише по одному пасивному перевипромінювачу на кожен високочастотний діапазон.

Подальше проектування переноситься в спеціально призначену для подібних задач програму MMANA GAL.

4.2. Моделювання антени в середовищі MMANAGAL

Використання такої програми призначено в першу чергу для визначення оптимальних відстаней між активним випромінювачем і пасивними випромінювачами. В результаті комбінацій ручних і автоматичних оптимізацій була отримана наступна конструкція, креслення якої зображено на рис. 4.2.

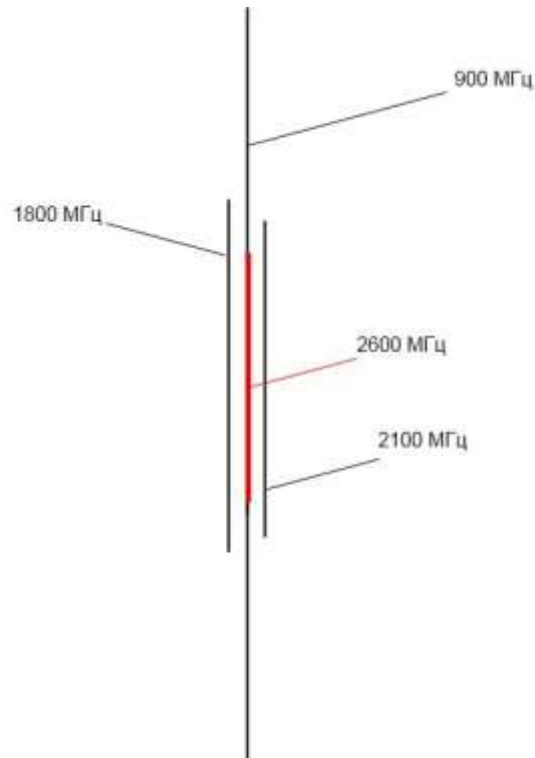


Рисунок 4.2 – Зовнішній вигляд спроектованлі антени із взаємним розташуванням активного і пасивних випромінювачів

Параметри антени розраховувалися для діаметру дроту 1,5 мм. При цьому взаємні відстані між елементами складають 5 мм.

Діаграма спрямованості в 3D вигляді.

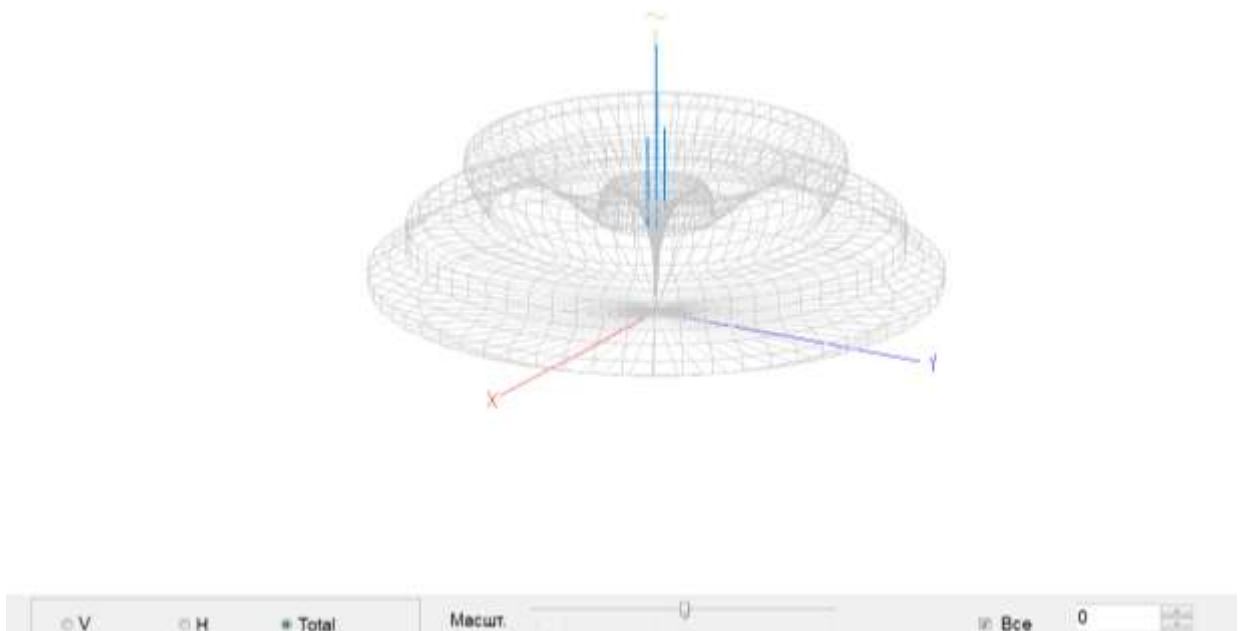


Рисунок 4.3 – Розрахуноква діаграма спрямованості антени

Отримані результати моделювання антени свідчать про те, що в горизонтальній площині вона має кругову спрямованість, у вертикальній площині певним чином виражені пелюстки.

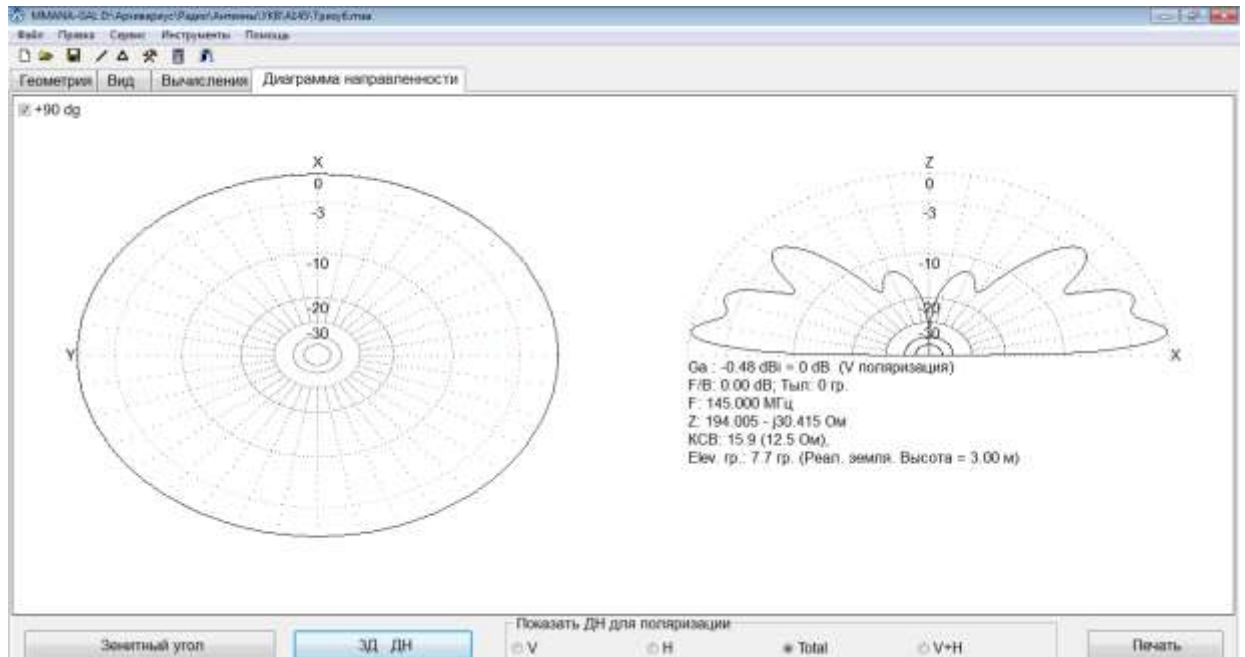


Рисунок 4.4 – Розрахунок діаграма спрямованості антени в горизонтальній та вертикальній площинах

4.3 Перевірка працездатності антени та отримані результати.

Для підключення антени до модему або роутера використовується фідерна лінія. В якості кабелю для цієї лінії був використаний коаксіальний кабель RG-58U EUROSAT. Цей кабель має технічні характеристики, які зведені в табл.4.1.

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики кабелю RG-58U

Частота, МГц	Загасання, дБ/100 м	Частота, МГц	Загасання, дБ/100 м
150	13,4	1200	40,6
450	24,1	1800	51,1
800	32,7	1900	52,6
900	34,8	2450	60,4

Як можна побачити цей кабель в принципі володіє доволі прийнятними характеристиками щодо згасання навіть на верхніх частотах 4G.

Спроектвана антена має зовнішній вигляд, зображений на рис.4.5.

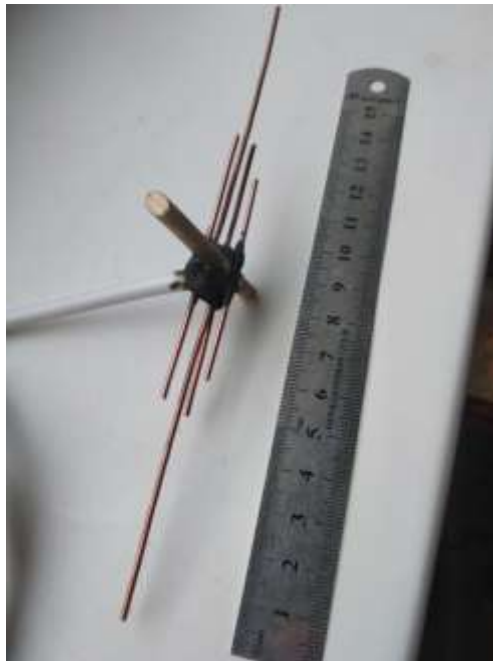


Рисунок 4.5 – Зовнішній вигляд виготовленої антени

За допомогою антенного аналізатора LiteVNA 64 було виміряне значення узгодження отриманої конструкції на всіх заданих робочих частотах. Результати вимірювань зображені на рис. 4.6.

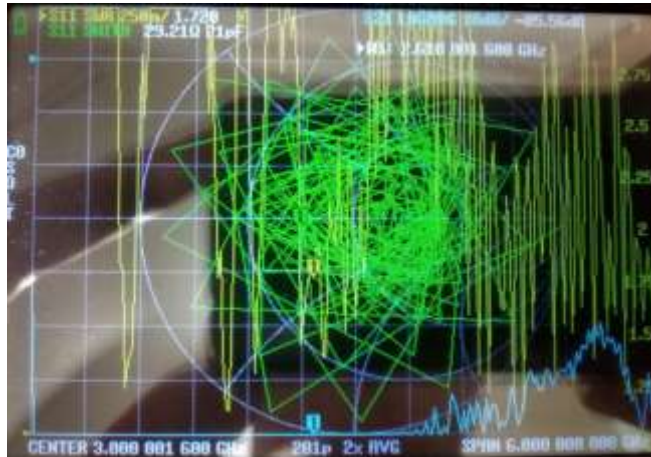


Рисунок 4.6 – Залежність КСХ від частоти

Як можна побачити із отриманих вимірювань результати узгодження вийшли наступні:

- 900 МГц – 1,25;
- 1800 МГц – 1,1;
- 2100 МГц – 1,45;
- 2600 МГц – 1,3.

Дані значення КСХ цілком прийнятні, тому узгодження можна вважати задовільним. Перейдемо до практичної оцінки ефективності антени. Для цього була зібрана лабораторна установка яка складалася із 4G модему ZTE MF79U із встановленою на нього кастомною прошивкою, яка дозволяє вручну вмикати необхідний частотний діапазон для роботи.

Алгоритм оцінки був наступний:

- 1) Включаємо необхідний бенд для перевірки якості роботи вбудованої антени на заданому бенді.
- 2) Оцінюємо потужність сигналу.
- 3) Підключаємо виготовлену антену, розташували її в тому ж місці де і сам модем, для чистоти експерименту і знов оцінюємо потужність сигналу
- 4) Порівнюємо отриману різницю.

Оцінка параметрів сигналу для частоти 900 МГц із вбудованою антеною зображена на рис. 4.7

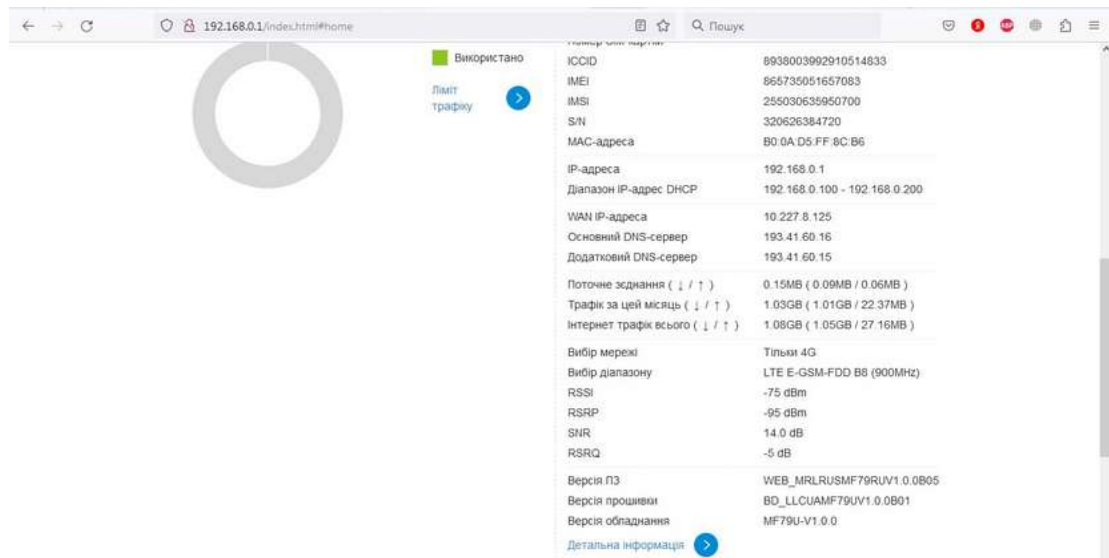


Рисунок 4.7 – Параметри прийнятого сигналу на частоті 900 МГц із використанням вбудованої антени

Виконуємо підключення антени і перевіряємо параметри прийнятого сигналу.

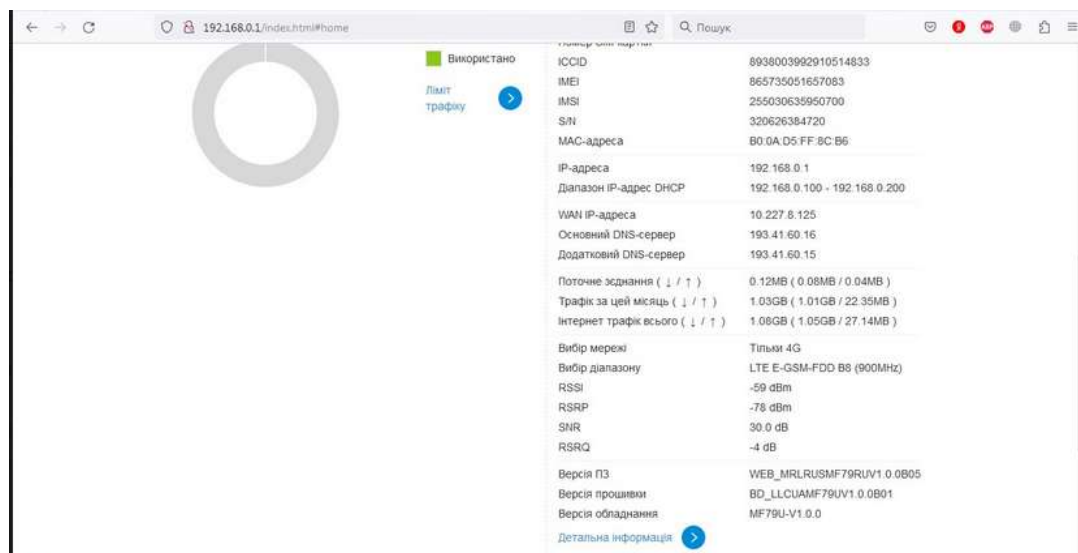


Рисунок 4.8 – Параметри прийнятого сигналу на частоті 900 МГц із використанням розробленої антени

Порівняльну оцінку параметрів сигналу можна виконати, звернувшись до рис. 4.9.

Оцінка сигналу	RSRP (дБі)	RSRQ (дБ)	SINR (дБ)
Відмінний	≥ -80	≥ -10	≥ 20
Добрий	від -80 до -90	від -10 до -15	від 13 до 20
Середній	від -90 до -100	від -15 до -20	від 0 до 13
Поганий	≤ -100	≤ -20	≤ 0

Рисунок 4.9 – Оцінка якості сигналу в залежності від рівня показників для 4G з'єднання

Для порівняльної характеристики двох антен: вбудованої та розроблено, будемо використовувати параметр RSSI. Оскільки саме він демонструє рівень потужності сигналу.

Для оцінки підсилення розробленої антени на всіх частотах діапазону 4G, були проведені експерименти аналогічні рис.4.7-4.8 для частот 1800 МГц та 2600 МГц. Дані зведені у табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Рівні прийнятого сигналу в RSSI досліджуваними антенами за різними діапазонами частот

Частота, МГц	900	1800	2600
Вбудована, RSSI dBm	-75	-62	-71
Розроблена, RSSI dBm	-59	-50	-65
Різниця, RSSI dBm	16	12	6

Зведена порівняльна характеристика в графічному вигляді за підсиленням для антен зображена на рис. 4.10.



Рисунок 4.10 – Залежність рівню сигналу досліджуваних антен в залежності від діапазонів: вбудована (синій), розроблена (червоний)

Порівнюючи графіки підсилення обох антен можна побачити, що розроблена антена має суттєву перевагу над вбудованою за підсиленням. Із результатів експерименту визначено, що середнє підвищення рівню сигналу за трьома діапазонами для розробленої антени відносно вбудованої складає 11,3 dBm.

Слід зазначити, що для чистоти експерименту розроблена антена знаходилась в безпосередній близькості до модему, щоб нивілювати ефект зміни точки прийому. Тому якщо антену оснастити виносним кабелем то ефект може бути ще більшим, за рахунок обрання кращої точки прийому, наприклад біля вікна, або за ним.

Найбільшою перевагою розробленої антени є та, що вона має широкую смугу роботи, яка перекриває всі бенди 3G та 4G, чого не забезпечує більшість комерційних виносних антен, що працюють в діапазоні 2,1-5,8 ГГц. Таким чином розроблена антена може підтримувати всі можливі комбіанції агрегації частот, які передбачені стандартом LTE.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі проведений аналіз абонентського обладнання для 4G.

Даний тип зв'язку особливої актуальності набув під час короткотривалих відключень електроенергії. Тому що у більшості випадків дротові провайдери не мають технічної можливості надавати свої послуги.

Виявлено, що під час відключення світла базові станції мобільних операторів, як правило, знижують свою потужність випромінювання, що в свою чергу висуває підвищені вимоги до абонентського обладнання, зокрема до антенних систем, які мають компенсувати зменшення потужності сигналу від BTS. І зазвичай вбудовані антенні системи не є достатньо ефективними для таких випадків.

Саме тому в роботі був проведений аналіз абонентського обладнання, яке може бути використане для забезпечення зв'язком в подібних умовах.

Серед бездротових USB модемів перевага була надана моделі ZTE MF79U, який володіє рядом переваг над іншим при співрозмірній вартості. І суттєвою перевагою якого є наявність виходу під зовнішні антени. Також забезпечене розширення функціоналу данного модему завдяки кастомній прошифці.

Проведений детальний аналіз різних типів антен, які використовуються для 4G, виявлені переваги та недоліки. До недоліків можна віднести: незручність для портативного використання, та обмежений частотні діапазони.

Тому в роботі спроектований та розроблений практичний екземпляр, який полишений цих недоліків. Розроблена антена має малі габарити, її підсилення більше вбудованої в середньому на 11,3 dBm, при цьому вона охоплює всі частотні бенди 3G та 4G і живиться одним кабелем, що дозволяє безперешкодно використовувати одну з основних переваг 4G LTE Advanced – агрегацію частот.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Стандарти мобільного зв'язку 4G-5G-6G – подібність, відмінності, перспективи. URL: <https://www.itbox.ua/ua/blog/Standarti-mobilnogo-zvyazku-4G5G6G--podibnist-vidminnosti-perspektivi/> (дата звернення: 15.04.2023)
2. Діапазони частот 4G LTE (LTE Bands), що використовуються в Україні. URL: <https://mobitech.com.ua/ua/articles/diapazonu-chastot-4g-lte-lte-bands-ispolzuemue-v-ukraine> (дата звернення: 15.04.2021)
3. Агрегація частот LTE. URL: <https://mobitech.com.ua/ua/articles/agregatsiia-chastot-lte> (дата звернення: 20.04.2021)
4. Что такое агрегация частот на смартфоне или всё о значке 4G+7. URL: <https://www.gsmsota.ua/blog/stati/chto-takoe-agregatsiya-chastot-na-smartfone/> (дата звернення: 20.04.2023)
5. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра: Пер. с англ. / Под ред. В.И. Журавлева. – М.: Радио и связь, 2000
6. Гепко И.А., Олейник В.Ф., Чайка Ю.Д., Бондаренко А.В., Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития. – К.: «ЕКМО», 2009
7. Ратынский М.В. Основы сотовой связи / Под ред. Д.Б. Зими́на. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 2000
8. Як вибрати 3G/4G антену для мобільного інтернету? URL: <https://save.com.ua/poleznye-stati/kak-vybrat-3g4g-antennu-dlya-mobilnogo-interneta> (дата звернення: 20.04.2023)
9. Як вибрати 3G/4G антену для мобільного інтернету? URL: <https://save.com.ua/poleznye-stati/kak-vybrat-3g4g-antennu-dlya-mobilnogo-interneta> (дата звернення: 20.04.2023)

10. 4G/3G модем Wi-Fi роутер ZTE MF79U з адаптером та MIMO роз'ємами під антену (Київстар, Vodafone, Lifecell) URL: <https://rozetka.com.ua/ua/305782538/p305782538/> (дата звернення: 20.04.2023)
11. Хороший Интернет в Частный дом URL: <https://www.patreon.com/goodnet> (дата звернення: 20.04.2023)
12. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн: учебник для ВУЗов / Г.А. Ерохин, О.В. Чернышев, Н.Д. Козырев, В.Г. Кочержевский; под ред. Г.А. Ерохина. – [3-е изд.]. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007
13. ГОСТ 18238-72. «Линии передачи сверхвысоких частот. Термины и определения».
14. Смуга пропускання [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Смуга_пропускання. – 27.05.2017 – головна з екрану.
15. Ротхаммель К. Антенны: пер. с нем./К. Ротхаммель – 3-е изд., доп. – М.: Энергия, 1979. – 320 с.
16. Входной импеданс антенны [Електронний ресурс] URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Входной_импеданс_антенны (дата звернення: 20.04.2023)
17. Как выбрать антенну 4G. URL: <https://gsm-repiteri.ru/kak-vybrat-antennu-4g> (дата звернення: 20.04.2023)
18. Простые антенны УКВ. Часть 7.Вертикал RA3WDK. URL: https://qrz.ucoz.net/publ/antenny_ukv/ukv/prostye_antenny_ukv_chast_7_vertikal_ra3wdk/5-1-0-18 (дата звернення: 20.04.2023)