

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»  
ВІДОКРЕМЛЕНИЙ СТРУКТУРНИЙ ПІДРОЗДІЛ  
«ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
до дипломної роботи  
фахового молодшого бакалавра**

на тему: **Дослідження побудови інформаційних мереж на базі технології  
WI MAX**

Виконав студент IV курсу, групи ТК-41  
спеціальності 172 Телекомунікації та  
радіотехніка  
ОПП «Телекомунікації та комп'ютерні  
технології»  
**Терлак Олег Юрійович**

Керівник	_____	Анатолій РОМАНЮК
	(підпис)	
Нормоконтролер	_____	Володимир ПЛІШ
	(підпис)	
Рецензент	_____	Володимир ПЛІШ
	(підпис)	
Голова ЕК	_____	Андрій ВАХ
	(підпис)	
Члени ЕК	_____	Ігор ТИБЕЛЬ
	(підпис)	
	_____	Володимир ПЛІШ
	(підпис)	

Дипломна робота захищена в ЕК «\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

з оцінкою «\_\_\_\_\_»

Львів 2025

**ВІДОКРЕМЛЕНИЙ СТРУКТУРНИЙ ПІДРОЗДІЛ  
«ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

Циклова комісія	<i>Телекомунікації</i>
Освітньо-професійний ступінь	<i>Фаховий молодший бакалавр</i>
Освітньо-професійна програма	<i>Телекомунікації та комп'ютерні технології</i>
Спеціальність	<i>172 Телекомунікації та радіотехніка</i>

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач відділення  
«Телекомунікацій та  
комп'ютерних технологій»  
\_\_\_\_\_ Ігор ТИБЕЛЬ  
« 25 » квітня 2025 року

**ЗАВДАННЯ  
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ**

*Терлаку Олега Юрійовичу*

(прізвище, ім'я та по батькові)

1. Тема роботи

*Дослідження побудови інформаційних мереж на  
базі технології WI MAX*

керівник роботи

*Анатолій РОМАНЮК к.т.н., викладач вищої  
категорії*

(ім'я, прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом директора від “ 20 ” березня 2025 року № 20-СТ

2. Строк подання студентом роботи “10” червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи     3.1 *Провести аналіз існуючих систем  
бездротового зв'язку та порівняти технології  
Bluetooth, Wi-Fi та WiMAX.*

*3.2 Вивчити протоколи, архітектуру та принципи роботи технології WiMAX.*

*3.3 Розробити модель трансивера для телекомунікаційної системи в діапазоні  
3,5 ГГц.*

*3.4 Здійснити енергетичний розрахунок радіолінії та провести техніко-  
економічне обґрунтування розробки.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки

*4.1 Характеристика систем бездротового зв'язку*

*4.2 Особливості побудови бездротових мереж доступу зв'язку на базі  
технології WiMAX*

*4.3 Практичні аспекти побудови телекомунікаційних систем з використанням  
технології WiMAX*

*4.4 Техніко-економічне обґрунтування.*

*4.5 Охорона праці та безпека життєдіяльності*

## 5. Перелік графічного матеріалу

5.1.	<i>Класифікація технологій бездротової передачі даних</i>
5.2.	<i>Види доступу WiMAX</i>
5.3.	<i>Виділений діапазон частот</i>
5.4.	<i>Схема мультиплексування OFDM та OFDMA</i>
5.5.	<i>Схема трансивера</i>

## 6. Консультанти розділів дипломної роботи

Розділ	Ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Завдання отримав
Техніко-економічне обґрунтування	<i>Мар'яна СМУК викладач вищої категорії</i>	25.04.2025р.	25.04.2025р.
Охорона праці та безпека життєдіяльності	<i>Олена МЕЛЬНИКОВА викладач першої категорії</i>	25.04.2025р.	25.04.2025р.

7. Дата видачі завдання « 25 » квітня 2025 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання	Примітка
1	<i>Вступ.</i>	25.04-01.05	
2	<i>Характеристика систем бездротового зв'язку</i>	02.05-08.05	
3	<i>Особливості побудови бездротових мереж доступу зв'язку на базі технології WiMAX</i>	09.05-15.05	
4	<i>Практичні аспекти побудови телекомунікаційних систем з використанням технології WiMAX</i>	16.05-22.05	
5	<i>Техніко – економічне обґрунтування</i>	23.05-29.05	
6	<i>Охорона праці та безпека життєдіяльності</i>	30.05-03.06	
7	<i>Висновки</i>	04.06-05.06	
8	<i>Підготовка графічного матеріалу.</i>	06.06-09.06	

Здобувач

\_\_\_\_\_ (підпис)

Олег ТЕРЛАК

\_\_\_\_\_ (ім'я, прізвище)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Анатолій РОМАНЮК

\_\_\_\_\_ (ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Текстова частина дипломної роботи: 74 с., 9 рис., 8 табл., 11 джерел.

Об'єкт дослідження дипломної роботи – система бездротового доступу на базі технології WIMAX.

Мета роботи – дослідження та створення інформаційної системи з використанням технології WIMAX.

Метод дипломної роботи – технічний з використанням комп'ютерних технологій.

У дипломній роботі здійснений аналіз систем бездротового зв'язку, наведені приклади використання технології WIMAX, особливості побудови таких мереж, розрахована система WIMAX і зроблений висновок, що незважаючи на всі переваги, на шляху розповсюдження WIMAX існує вагомий бар'єр – нестача частотного ресурсу, що істотно заважає виходу нових операторів на український ринок.

Галузь використання – бездротовий зв'язок в Україні.

БЕЗДРОВОТА МЕРЕЖА, ТЕХНОЛОГІЯ WIMAX, ПРЯМА І НЕПРЯМА ВИДИМІСТЬ, МОДУЛЯЦІЯ, БАЗОВА СТАНЦІЯ, МОДЕМ, ТЕРМІНАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ, ПОТУЖНІСТЬ ПЕРЕДАВАЧА, КПК, PC CARD, АНТЕНА, СИГНАЛ, ALTERNET.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМ БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ .....	9
1.1 Основні поняття.....	9
1.2 Технологія Bluetooth.....	11
1.3 Технологія WI-FI.....	14
1.4 Технологія WIMAX.....	19
2 ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖ ДОСТУПУ ЗВ'ЯЗКУ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ WIMAX.....	25
2.1 Опис основних протоколів систем фіксованого і бездротового доступу технології WIMAX.....	25
2.2 Різновиди доступу WIMAX.....	28
2.3 Принцип побудови бездротової мережі WiMAX.....	32
2.4 Принцип роботи WiMAX.....	33
2.5 Стратегії побудови мережної інфраструктури WiMAX і їх реалізація...	34
2.6 Апаратні засоби для технології WiMAX.....	39
3 ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ПОБУДОВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ WIMAX .....	49
3.1 Принципи побудови телекомунікаційних систем з використанням технології WiMAX .....	49
3.2 Типова схема трансивера і особливості його побудови .....	50
3.3 Особливості розповсюдження сигналу в залежності від характеру місцевості.....	51
3.4 Енергетичний розрахунок радіолінії.....	52
3.5 Розробка трансивера для телекомунікаційної системи в діапазоні 3,5 ГГц з використанням технології Wi-MAX.....	31 52
4 ТЕХНІКО – ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ.....	56
4.1 Розрахунок капітальних витрат на розробку .....	56
4.2 Складові структури витрат на розробку .....	56
4.3 Витрати на відлагодження розробки .....	58
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЕДІЯЛЬНОСТІ.....	61
5.1 Загальні положення.....	61
5.2 Організація охорони праці на підприємстві.....	62
5.3 Заходи безпеки на робочому місці.....	64

5.4 Санітарно-гігієнічні вимоги.....	65
ВИСНОВКИ .....	67
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	68
КОПІЇ ОBOB'ЯЗKOBИХ KPECЛEНЬ.....	69
Лист 1 Класифікація технологій бездротової передачі даних .....	70
Лист 2 Види доступу WiMAX .....	71
Лист 3 Виділений діапазон частот .....	72
Лист 4 Схема мультиплексування OFDM та OFDMA .....	73
Лист 5 Схема трансивера.....	74

## ВСТУП

Сучасний світ не може без інформації. Інформаційні магістралі сьогодні не є менш важливими за транспортні, вони усюди - і на суші, і на дні океану, і у космосі. Передача байта по лінії зв'язку важлива також як і передача бареля нафти або кубометра газу. На планеті стає тісно від дротових ліній зв'язку. Тому не дивно, що бездротові телекомунікаційні технології переживають сьогодні справжній бум. Користувачам необхідні все більші об'єми трафіку та швидкості передачі даних.

Вже кілька десятиліть люди застосовують комп'ютерні мережі для забезпечення зв'язку між персоналом, комп'ютерами та серверами в компаніях, в навчальних закладах і містах. Однак спостерігається тенденція до більш широкого використання бездротових мереж. І дійсно, зараз доступні бездротові інтерфейси, що дозволяють використовувати мережні служби, працювати з електронною поштою і переглядати Web-сторінки незалежно від того, де перебуває користувач.

Бездротові мережі відіграють важливу роль у житті людей, де б вони не знаходились - на роботі, удома або в громадському місці, навіть якщо бездротова мережа створюється із простою метою - забезпечити зв'язок користувачів з джерелами інформації без використання проводів.

Бездротові мережі використовуються людьми вже багато років. Так, до примітивних форм бездротового зв'язку можна віднести димові сигнали американських індіанців, коли вони кидали у вогонь шкіри бізонів, щоб передати на велику відстань якесь повідомлення. Або використання переривчастих світлових сигналів для передачі за допомогою абетки Морзе інформації між кораблями, цей метод був і залишається важливою формою зв'язку в мореплаванні. І, звичайно, настільки популярні нині стільникові телефони, які дозволяють людям спілкуватися через величезні відстані, також можна віднести до бездротового зв'язку.

Існує безліч різновидів бездротового зв'язку, але найважливішою особливістю бездротових мереж є те, що зв'язок здійснюється між комп'ютерними

пристроями. До них належать персональні цифрові помічники (personal digital assistance, PDA), ноутбуки, персональні комп'ютери (ПК), сервери та принтери. Комп'ютерними пристроями вважаються такі, які мають процесори, пам'ять і засоби взаємодії з якоюсь мережею. Звичайно стільникові телефони не відносять до числа комп'ютерних пристроїв, однак новітні телефони і навіть головні гарнітури (наушники) вже мають певні обчислювальні можливості та мережні адаптери. Все іде до того, що скоро більшість електронних пристроїв будуть забезпечувати можливість підключення до бездротових мереж.

Бездротові технології, безумовно, так чи інакше, присутні поруч із нами. Спочатку, це була передача мови потім даних. Стандарти FDMA, TDMA, CDMA. Йшов час, удосконалювалася технологія, вдосконалювалось і устаткування, а значить і зростав сервіс, який можуть надати нові бездротові системи.

Дана дипломна робота присвячена новому у світі бездротових технологій, технології WiMAX.

Технологія WiMAX все активніше входить у наше життя. Компанії щосили ведуть тестові випробування самої мережі, виробники устаткування представляють свої продукти, наукові інститути та організації працюють над розробкою і прийняттям стандартів, деякі провайдери вже розвертають комерційні мережі.

# 1 ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМ БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

## 1.1 Основні поняття

Існує всього два способи позбутися проводів - передавати інформацію за допомогою інфрачервоного променя або радіоканалу. Перший спосіб, на жаль, не забезпечує мобільності - він працює тільки в умовах прямої видимості передавача та приймача інформації. Залишається радіоканал, який достатньо активно використовують для створення бездротових мереж за допомогою різних технологій.

Бездротова мережа – система передачі даних, в якій в якості носія використовуються радіохвилі. Комп'ютери користувачів, комутатори та інше мережне обладнання залишаються на місці, тільки кабель замінюється радіоканалами.

У цей час найбільше поширення, принаймні, у сфері побутової електроніки і комп'ютерного устаткування одержали кілька технологій бездротової передачі даних по радіоканалу – Bluetooth, Wi-Fi і WiMAX.

Залежно від розмірів фізичної зони, у якій бездротові пристрої здатні забезпечити зв'язок, бездротові мережі підрозділяються на кілька категорій (рис.1.1):

- бездротова персональна мережа (wireless personal-area network, PAN);
- бездротова локальна мережа (wireless lokal-area network, LAN);
- бездротова міська мережа (wireless metropolitan-area network, MAN);
- бездротова глобальна мережа (wireless wide-area network, WAN).

Рисунок 1.1 – Класифікація технологій бездротової передачі даних

В табл. 1.1 представлена коротка характеристика різновидів таких мереж. Кожний тип бездротової мережі має особливості, які доповнюють інші мережі, завдяки чому задовольняються різні висунуті до мереж вимоги.

Таблиця 1.1 – Різновиди бездротових мереж

Тип	Сфера дії	Характеристики	Стандарти	Область застосування
Персональна бездротова мережа	У безпосередній близькості від користувача	Середні	Bluetooth, IEEE 802.15, IRDA	Заміна кабелів периферійних пристроїв
Локальні бездротові мережі	У межах будинків	Високі	IEEE 802.15, Wi-Fi, HiperLAN	Мобільні розширення дротових
Регіональні бездротові мережі	У межах міста	Високі	Патентовані, IEEE 802.16, WIMAX	Фіксований бездротовий зв'язок між будинками і підприємствами та Internet
Глобальні бездротові мережі	По усьому світі	Низькі	Стільникові системи телефонного зв'язку поколінь 2, 2,5 і 3	Мобільний доступ до Internet поза приміщеннями

## 1.2 Технологія Bluetooth

Технологія Bluetooth - міжнародний стандарт для бездротових комунікацій малого радіуса дії, давно і широко рекламується як одна з найбільш багатообіцяючих технологічних новинок серед пристроїв для мобільних комунікацій.

Основне призначення Bluetooth - забезпечення економічного (з погляду споживання живлення) і дешевого радіозв'язку між різними типами електронних пристроїв, причому чимале значення надається компактності електронних компонентів, що дає можливість застосовувати Bluetooth у малогабаритних пристроях розміром з наручний годинник.

Віддаючи належне простоті цієї технології, багато фахівців вважають, що Bluetooth не має конкурентів в області створення невеликих локальних мереж і бездротового об'єднання пристроїв у межах будинку, офісу або, наприклад, в автомобілі.

### Стандарт IEEE 802.15.1 (Bluetooth)

Активно просуває консорціумом Bluetooth Special Interest Group (Bluetooth SI), технологія Bluetooth (стандарт IEEE 802.15.1 базується на специфікаціях

Bluetooth v1.x) призначена для побудови так званих персональних бездротових мереж (Wireless Personal Area Network, WPAN).

Бездротова технологія Bluetooth є стандартом, а також набором специфікацій, які визначають функціонування компактних систем зв'язку на невеликих відстанях між мобільними персональними комп'ютерами, мобільними телефонами і іншими портативними пристроями.

Bluetooth являє собою недорогий радіоінтерфейс із низьким енергоспоживанням (потужність передавача всього порядку 10 мВт) для організації персональних мереж, який забезпечує передачу в режимі реального часу як цифрових даних, так і звукових сигналів. Спочатку дальність дії радіоінтерфейсу розроблялась рівною 10 метрам, (тобто приблизно в межах однієї кімнати), однак зараз специфікаціями Bluetooth вже визначена і друга зона близько 100 м - для покриття стандартного будинку або поза ним. При цьому немає необхідності в тому, щоб пристрої, що з'єднуються, перебували в зоні прямої видимості один від одного, їх можуть розділяти "радіопрозорі" перешкоди (стіни, меблі тощо), і до того ж прилади можуть перебувати в русі. Для роботи радіоінтерфейсу Bluetooth використовується так званий нижній (2,45 ГГц) діапазон ISM (industrial, scientific, medical), призначений для роботи промислових, наукових і медичних приладів.

Радіоканал має повну пропускну здатність в 1 Мбіт/с, що забезпечує створення асиметричного каналу передачі даних на швидкостях 723,3/57,6 кбіт/с або повнодуплексного каналу на швидкості 433,9 кбіт/с. Якщо дані не передаються, то через Bluetooth-з'єднання можна передавати до 3-х дуплексних аудіоканалів по 64 кбіт/с у кожному напрямку. Можлива також комбінована передача даних і звуку. В частині організації обміну даними Bluetooth відповідає специфікації стандарту локальних мереж IEEE 802 і використовує сигнали з розширенням спектру шляхом стрибкоподібної перебудови частоти (FHSS) за псевдовипадковим законом зі швидкістю 1600 перемикань в секунду в смузі 2400-2483,5 МГц.

Bluetooth працює як багатоточковий радіоканал, керований аналогічно стільниковому зв'язку GSM багаторівневим протоколом. В якості засобів захисту в Bluetooth передбачене кодування переданих даних, а також виконання процедури авторизації пристроїв. При цьому можливі три рівні захисту: мінімальна (дані кодуються загальним ключем і можуть прийматися будь-якими пристроями без обмежень); захист на рівні пристроїв (безпосередньо в чіпі прописується рівень доступу, відповідно до якого пристрій може одержувати певні дані від інших пристроїв); захист на рівні сеансу зв'язку (дані кодуються 128-бітними випадковими числами, що зберігаються в кожній парі пристроїв, які беруть участь в конкретному сеансі зв'язку).

#### Стандарт IEEE 802.15.3

Орган стандартизації телекомунікаційних технологій Інститут інженерів по електротехніці та електроніці (IEEE) повідомив про завершення розробки нового протоколу бездротового зв'язку IEEE 802.15.3, призначений для бездротових приватних мереж (WPAN) і являється прямим спадкоємцем Bluetooth (частота 2,4 ГГц). IEEE 802.15.3 забезпечує швидкість передачі даних до 55 Мбіт/с на відстані до 100 метрів, одночасно працювати в такій мережі можуть до 245 користувачів. При виникненні перешкод з боку інших побутових пристроїв або інших мереж, мережі на основі IEEE 802.15.3 будуть автоматично перемикає канали. Також підтримують швидкості передачі даних - 11, 22, 33 і 44 Мбіт/с. Шифрування даних у мережах IEEE 802.15.3 може здійснюватись по стандарту AES 128.

#### Стандарт IEEE 802.15.4 (ZigBee)

Стандарт IEEE 802.15.4 (ZigBee) орієнтований, головним чином, на використання як засобу зв'язку між автономними приладами і устаткуванням. В корпоративному секторі це можуть бути, наприклад, системи на складах, системи автоматизації виробництва, різні датчики, сенсори, електронні мітки, а в домашніх умовах - ПК, ігрові приставки, системи безпеки, освітлення, кондиціонування, радіофіковані іграшки і навіть пульти ДУ.

Стандарт IEEE 802.15.4 визначає специфікації фізичного рівня (PHY) і протоколу керування доступом (MAC), пропонуючи підтримку різних топологій

мереж. Схеми мережної маршрутизації використовуються для забезпечення збереження енергії і найкоротших затримок, щоб вміститися в гарантований часовий інтервал, а за рахунок наявності декількох маршрутів до кожного вузла в мережах ZigBee, запобігти можливості "збою в одній точці".

Ключові функції РНУ містять у собі контроль за енергією і якістю ланок, а також оцінку каналів для більш успішного співіснування з мережами інших бездротових операторів. MAC визначає автоматичне підтвердження одержання пакетів, забезпечує можливість передачі даних у певні часові інтервали і підтримує 128-бітні функції безпеки AES. Якщо в межах досяжності ZigBee устаткування виявиться устаткування Wi-Fi або Bluetooth, їх канали можуть бути використані як тунель для трафіку ZigBee.

Стандарт IEEE 802.15.4 передбачає невелику дальність дії (близько 10 метрів) і пропускну здатність каналу - до 250 кбіт/с. Передача на цій швидкості ведеться в діапазоні 2,4 ГГц. Невелика потужність і швидкість обумовлені малими енергоресурсами пристроїв, що з'єднуються. Доступні також діапазони 858 МГц (20 кбіт/с) і 902- 928 МГц (40 кбіт/с).

Даний стандарт активно просувається Альянсом ZigBee, він заповнить вакуум в спектрі бездротових мережних технологій, оскільки він пропонує розроблювачам можливість створювати недорогі продукти з дуже низькою споживчою потужністю і надзвичайно гнучкими функціями підтримки бездротових мереж.

Стандарт IEEE 802.15.4a (Ultra Wideband, UWB)

Технологія широкопasmового зв'язку (Ultra Wideband, UWB) заснована на передачі множини закодованих імпульсів не гармонічної форми дуже малої потужності (0,05 мВт) і малої тривалості в широкому діапазоні частот (від 3,1 до 10,6 ГГц). Передача даних на відстані до 5 метрів здійснюється зі швидкістю від 400 до 500 Мбіт/с.

За допомогою UWB-технології можна створювати спеціальні мережі, в яких декілька широкопasmових пристроїв зможуть підтримувати зв'язок між будь-якими вузлами. Короткі сигнали UWB порівняно стійкі до багатопроменевого

загасання, яке виникає при відбитті хвилі від стін, стелі, будинків, транспортних засобів. Високошвидкісні UWB-пристрої добре підходять для роботи з відеопотоками і послугами, які вимагають швидкої передачі даних. Низькошвидкісне UWB-устаткування може застосовуватися для відстеження місця розташування на місцевості власників бездротових пристроїв і різних об'єктів.

### **1.3 Технологія Wi-Fi**

Спочатку термін Wi-Fi використовувався тільки для позначення технології, яка забезпечує зв'язок у діапазоні 2,4 ГГц і працює за стандартом IEEE 802.11b (швидкість передачі інформації - до 11 Мбіт/с). Однак у цей час цей термін все частіше використовується і стосовно до інших технологій бездротових локальних мереж. Найбільш важливі серед них визначені стандартами IEEE 802.11a і 802.11g (швидкість передачі - до 54 Мбіт/с, частотні діапазони, відповідно, 5 ГГц і 2,4 ГГц). Розглянемо більш детально стандарти технології Wi-Fi.

#### **Стандарт IEEE 802.11a**

Це широкосмуговий стандарт, в якому передбачена швидкість передачі даних до 54 Мбіт/с. Редакцію стандарту затверджено в 1999 році. В ній визначені три обов'язкових швидкості - 6, 12 і 24 Мбіт/с і п'ять необов'язкових - 9, 18, 36, 48 і 54 Мбіт/с).

На відміну від базового стандарту, орієнтованого на діапазон частот 2,4 ГГц, специфікаціями 802.11a передбачена робота в діапазоні 5 ГГц. Як метод модуляції сигналу обране ортогональне частотне мультиплексування (OFDM). Найбільш істотна відмінність між цим методом і радіо технологіями, DSSS і FHSS, полягає в тому, що OFDM дозволяє здійснювати паралельну передачу корисного сигналу одночасно на декількох частотах діапазону, у той час як технології розширення спектру передають сигнали послідовно. В результаті поліпшуються пропускна здатність каналу і якість сигналу.

До недоліків 802.11a відносять високу споживчу потужність радіопередавачів для частот 5 ГГц, а також менший радіус дії (устаткування для 2,4 ГГц може працювати на відстані до 300 м, а для 5 ГГц - близько 100 м).

#### Стандарт IEEE 802.11b

Завдяки високій швидкості передачі даних (до 11 Мбіт/с), майже еквівалентній пропускній здатності звичайних дротових ЛЗ Ethernet, а також орієнтації на "освоєний" діапазон 2,4 ГГц, цей стандарт завоював найбільшу популярність у виробників устаткування для бездротових мереж.

В остаточній редакції стандарт 802.11b, відомий також як Wi-Fi (wireless fidelity), був прийнятий в 1999 році. В якості базової радіотехнології в ньому використовується метод DSSS з 8-розрядною послідовністю Уолша.

Оскільки устаткування, яке працює на максимальній швидкості 11 Мбіт/с має менший радіус дії, чим на більш низьких швидкостях, то стандартом 802.11 b передбачене автоматичне зниження швидкості при погіршенні якості сигналу.

Як і у випадку базового стандарту 802.11, чіткі механізми роумінгу специфікаціями 802.11b не визначені.

#### Специфікація IEEE 802.11d

Прагнучи розширити географію поширення мереж стандарту 802.11, IEEE розробляє універсальні вимоги до фізичного рівня 802.11 (процедури формування каналів, псевдовипадкові послідовності частот, додаткові параметри для МІВ і т.д.).

#### Специфікація IEEE 802.11e

Специфікації стандарту 802.11e дозволяють створювати мультисервісні бездротові ЛЗ, орієнтовані на різні категорії користувачів, як корпоративних так і індивідуальних. При збереженні повної сумісності з вже прийнятими стандартами 802.11a і b, він дозволить розширити їх функціональність за рахунок підтримки потокових мультимедіа даних і гарантованої якості послуг (Qo).

#### Специфікація IEEE 802.11f

Специфікація 802.11f описує протокол обміну службовою інформацією між точками доступу (Inter-Access Point Protocol, IAPP), що необхідно для побудови розподілених бездротових мереж передачі даних.

#### Специфікація IEEE 802.11g

Специфікації 802.11g являє собою розвиток стандарту 802.11b і дозволяє підвищити швидкість передачі даних у бездротових ЛЗ до 22 Мбіт/с завдяки використанню більш ефективної модуляції сигналу. Однією з переваг є зворотня сумісність із 802.11b.

#### Специфікація IEEE 802.11h

Робоча група IEEE 802.11h розглянула можливість доповнення існуючих специфікацій 802.11 MAC (рівень доступу до середовища передачі) і 802.11a PHY (фізичний рівень у мережах 802.11a) алгоритмами ефективного вибору частот для офісних і вуличних бездротових мереж, а також засобами керування використанням спектру, контролю за випромінюваною потужністю і генерацією відповідних звітів.

Передбачається, що рішення цих завдань буде базуватися на використанні протоколів Dynamic Frequency Selection (DFS) і Transmit Power Control (TPC), запропонованих Європейським інститутом стандартів по телекомунікаціях (ETSI).

Зазначені протоколи передбачають динамічне реагування клієнтів бездротової мережі на інтерференцію радіосигналів шляхом переходу на інший канал чи зниженням потужності, або обома способами.

#### Специфікація IEEE 802.11i

Стандарт дає змогу розширити можливості протоколу 802.11 MAC, передбачає засоби шифрування переданих даних, а також централізовану аутентифікацію користувачів і робочих станцій.

В результаті масштаби бездротових локальних мереж можна буде нарощувати до сотень і тисяч робочих станцій. В основі 802.1X лежить протокол аутентифікації Extensible Authentication Protocol (EAP), що базується на PPP. Сама процедура аутентифікації допускає участь у ній трьох сторін - викликаючого

(клієнта), викликаного (точки доступу) і серверу аутентифікації (як правило, серверу RADIUS).

#### Специфікація IEEE 802.11j

Передбачається, що в стандарті буде йти мова про існування в одному діапазоні мереж стандартів 802.11a і HiperLAN2.

#### Специфікація IEEE 802.11n

Інститут IEEE веде роботу над створенням нової специфікації протоколу зв'язку в бездротових локальних мережах (WLAN). 802.11n працює вдвічі швидше, ніж 54-мегабітні "g" і "a": на швидкості від 90 Мбіт/с. Новий стандарт зробить рівними дротові і бездротові системи, що дозволить корпоративним клієнтам використовувати бездротові мережі там, де це було неможливо через обмежену швидкість.

Визначення швидкісних характеристик для стандарту "n" буде більше строгим, чим в "g" або "b". Воно ґрунтується на фактичній швидкості передачі файлів і потоків, а не на розмірі низькорівневого трафіку, якому постачається безліч службових заголовків. Прискорення досягається за рахунок більш оптимального використання частотного діапазону, аналогових радіочіпів, виконаних за поліпшеною CMOS- технологією і інтеграцією WLAN- адаптера в один чіп.

Взагалі технологія Wi-Fi розроблялася для двох цілей:

- перша та основна - організація локальних комп'ютерних мереж усередині приміщень (офісів або квартир);
- друга - зв'язок двох або декількох провідних локальних мереж, що перебувають на відносно невеликій відстані один від одного. Під невеликою відстанню мається на увазі сотні метрів, в окремих випадках - кілька кілометрів.

Максимальна швидкість передачі даних, яка забезпечується цією технологією, спочатку становила 1 Мбіт/с, а у підсумку виросла до 11 Мбіт/с. Паралельно росту швидкості дешевшало устаткування для бездротового зв'язку. В результаті воно стало по кишені приватним особам і до кінця 1990-х територія великих міст США і Європи була покрита зонами, перебуваючи всередині яких

можна було безкоштовно вийти в Інтернет, використовуючи ноутбук з бездротовим адаптером. Такі зони одержали сленгову назву hot spot («гаряча пляма»).

Звичайно, щоб скористатися послугами хот-спота, потрібно було знати «ім'я» відповідної бездротової мережі, але воно могло бути визначене і простим «прослуховуванням» трафіку. Ентузіасти використання нової технології в північній частині Лондона навіть стали позначати хот-споти крейдою, виробивши свою систему позначень.

Комерційна привабливість таких хот-спотів виявилася дуже швидко і їх стали організовувати в аеропортах, готелях, ресторанах. Одночасно з'явилися технології шифрування трафіку в бездротових мережах і системи авторизації, які дозволяли «закрити» хот-спот від доступу «чужих» користувачів. Таке зв'язування бездротової передачі даних з їх захистом стала називатися Wi-Fi . В результаті бездротовий офіс став мобільним, задовольняючи потребу сучасної людини до «зміни місць», і ділові люди могли користуватися послугами Інтернету під час поїздки і працювати в готелі, як у себе в офісі.

#### **1.4Технологія WiMAX**

WMAN - бездротова мережа для організації зв'язку в масштабах міста. Є логічним розвитком WLAN, забезпечуючи більш високі швидкості передачі даних і більшу область покриття. Як правило, такі системи призначені для забезпечення бездротового зв'язку між будинками, застосування в бізнесі, телекомунікаційній галузі, а також як альтернатива традиційним дротовим мережам. Функціонування цього класу бездротових мереж описується сімейством стандартів IEEE 802.16. Аналогічно Wi-Fi, ця технологія також має свою комерційну назву - WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), підтримкою якої займається асоціація WiMAX Forum.

WiMAX - група стандартів IEEE 802.16, створена з метою забезпечення широкопasmового бездротового доступу "останньої милі". Поняття доступу "останньої милі" на сьогоднішній день все більше використовується в описах

бездротових мереж. Значення цього терміна пояснюється економічним фактором: легше і дешевше поставити одну колективну точку бездротового доступу в густонаселеному районі, чим тягти мережу в кожний будинок, офіс і так далі.

В 2001 р. фірмами Nokia, Harris Corp., Ensemble і Crossspan була створена організація "WiMAX forum" з метою підтримки та просування стандарту IEEE 802.16, а також забезпечення взаємодії з іншими стандартами (HIPERMAN (Європа) і WiBro (Південна Корея)).

Робоча група, що займається розробкою стандартів IEEE 802.16, була організована в 1999 р. для роботи над WLL (Wireless Local Loop). Метою групи стала побудова стандарту широкосмугового бездротового доступу з наступними характеристиками:

- IP - орієнтований стандарт;
- забезпечення якості обслуговування QoS (Quality of Service) для кожного з'єднання окремо ;
- робота в неліцензованому та ліцензованому спектрі;
- збільшення дистанції між передавачем і приймачем.

В табл. 1.2 представлені стандарти IEEE 802.16 у міру їхньої розробки, починаючи з 2001 р.

Таблиця 1.2 – Стандарти IEEE 802.16

IEEE	802.16	802.16a	802.16REVd	802.16e
Схвалений	грудень 2001	січень 2003	липень 2004	липень 2005
Частотний діапазон	від 10 до 66 ГГц	менше 11 ГГц	менше 11 ГГц	від 2 до 6 ГГц
Видимість	пряма, LOS	непряма, NLOS	непряма, NLOS	непряма, NLOS
Модуляція	QPSK, 16QAM і 64QAM	OFDM 256, OFDMA + 802.16	OFDM 256, OFDMA + 802.16	OFDM 256, OFDMA + 802.16
Швидкість	32 - 134 Мбіт/с	1 – 75 Мбіт/с	див. 802.16a	до 15 Мбіт/с
Мобільність	ні	ні	ні	так, з можливістю регіонального роумінгу

Ширина каналу	20, 25 и 28 МГц	Змінюється від 1,25 до 20 МГц з 16 логічними каналами	див. 802.16а	Більше 5 МГц
Радіус чарунки	Від 1 до 5 км	Від 5 до 8 км; максимум 50 км в залежності від типу антени і при максимальній потужності передавача	див. 802.16а	Від 1 до 5 км
Термінальне обладнання		зовнішнє з виносною антеною	Зовнішнє з вбудованою антеною	РС – карта

Різні стандарти сімейства IEEE 802.16 орієнтовані на різні сегменти ринку. Наприклад, стандарт IEEE 802.16-2004 забезпечує рішення "останньої милі" для фіксованих користувачів. IEEE 802.16e орієнтований на обслуговування мобільних користувачів

IEEE 802.16 (IEEE 802.16-2001), схвалений у грудні 2001 р., став першим стандартом "точка-багатоточка" в області WMAN. Стандарт був орієнтований на роботу в частотному діапазоні від 10 до 66 ГГц і, як наслідок, вимагав знаходження передавача і приймача в зоні прямої видимості (LOS, Line of Sight). Це істотний недолік при використанні технології в умовах міста. IEEE 802.16 не був добре опрацьований і навіть після його затвердження залишилася велика кількість відкритих запитань.

IEEE 802.16а став першим діючим стандартом, де було усунуто більшість недоліків попереднього. Головна відмінність - зниження робочої частоти до 2-11 ГГц, реалізація функціонування в зоні непрямой видимості (NLOS, Non Line of Sight). Забезпечувалася робота в ліцензованих і неліцензованих частотах спектру, використовуючи принцип модуляції OFDM. Швидкість передачі даних по такій мережі становила до 75 Мбіт/с.

IEEE 802.16REVd (IEEE 802.16-2004) - виправлена версія стандарту IEEE 802.16а з підтримкою фіксованого офісного або домашнього кінцевого термінального устаткування відповідно до NLOS за допомогою таких додаткових функцій, як формування антеною спрямованого сигналу і використання

піднесучих OFDM (ортогональний частотний поділ каналу). Використовує частоту 2-11 ГГц і не вимагає наявності прямої видимості. IEEE 802.16-2004 з можливість обміну даними зі швидкістю до 70 Мбіт/с між передавачем і стаціонарним абонентським устаткуванням, що перебуває від нього в радіусі до 50 км. Цей стандарт найбільше підходить для комунікаційних компаній, для побудови корпоративних мереж, вузли яких сильно розподілені.

IEEE 802.16e наступний крок розвитку ідей попередніх стандартів з орієнтацією на мобільність кінцевого користувача. Прийнятий у другій половині 2005 року. Устаткування працює на частотах 2-6 ГГц і забезпечує можливість роботи в непрямій видимості. Клієнтське устаткування може бути віддалене на відстань до 5 км при швидкості зв'язку до 15 Мбіт/с.

Оператори, що надають послуги зв'язку, мають можливість досить гнучко будувати мережі WiMAX у відповідності зі своїми потребами:

- для віддалених на десятки кілометрів від базової станції користувачів:
- забезпечення телефонним зв'язком, доступом в Інтернет;
- необхідна наявність зовнішньої спрямованої антени на стороні користувача в зоні LOS, причому антена може бути використана як точка колективного доступу;
- для віддалених на 5-20 км від базової станції користувачів:
- забезпечення ширококутового доступу до послуг зв'язку;
- необхідна наявність зовнішньої антени на стороні користувача в зоні LOS, причому антена може бути використана як точка колективного доступу;
- для віддалених на 5 км від базової станції користувачів:
- забезпечення ширококутового доступу до послуг зв'язку з використанням вбудованих антен;
- користувач може бути обмежено мобільним – в залежності від рівня сигналу.

У цей час іде обговорення питань, пов'язаних із проектуванням нових специфікацій 802.16f і 802.16h, призначених для роботи з MIB (Management Information Base, базами керуючої інформації) для мереж доступу, а робота

мобільних клієнтів буде забезпечена при швидкості їх руху до 300 км/ч. Передбачається, що максимальна швидкість передачі досягне 10 Тбіт/с.

Ще однією особливістю WiMAX є вбудована підтримка QoS, що забезпечує мінімальний час затримки в каналі передачі для сервісів типу VoIP, TDM Voice, оптимальний транспорт VBR (Variable Bit Rate) трафіка, а також можливість пріоритетності переданих даних.

Стандарт припускає підтримку шифрування методами 3DES, RSA і AES. Для забезпечення додаткового рівня безпеки при аутентифікації пристроїв користувача передбачений обмін сертифікатами по протоколу X.509. У цілому, як відзначають фахівці, технологія WiMAX більше надійна в плані безпеки, чим Wi-Fi.

Незважаючи на всі переваги, певні незручності може доставити використання ліцензованого спектру частот. На рис.1.2 зображено виділений діапазон частот, який використовується різними технологіями бездротових мереж.

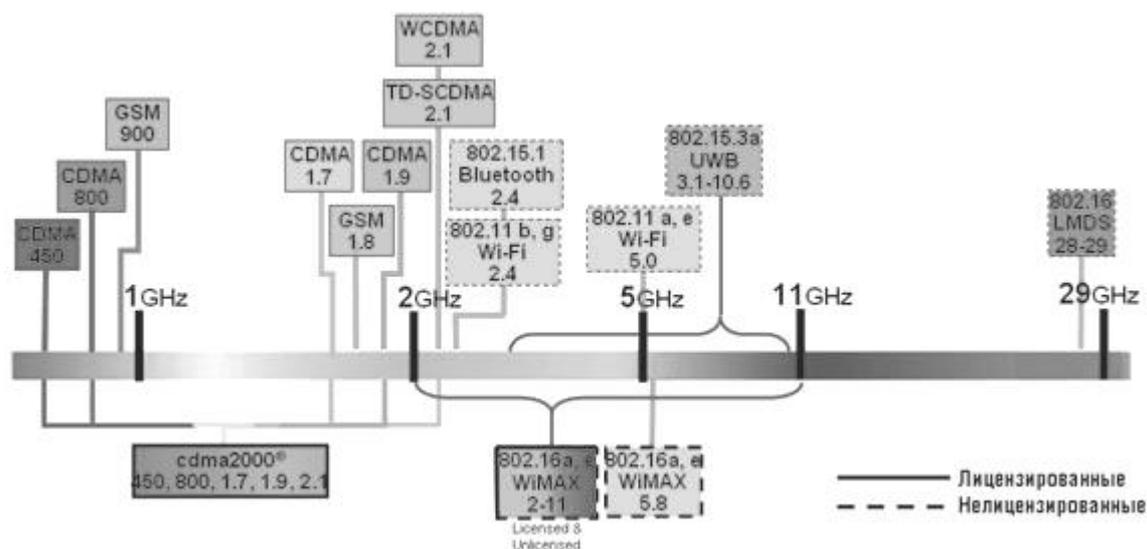


Рисунок 1.2 – Виділений діапазон частот

В табл. 1.3 відображені головні відмінності WiMAX від популярного на сьогоднішній день Wi-Fi (IEEE 802.11). Останній не є прямим конкурентом

WiMAX, так як створювався для інших цілей. Однак це не заважає їм взаємодіяти один з одним, створюючи комплекси бездротових мереж (рис. 1.5).

Таблиця 1.3 – Порівняння технологій WiMAX та Wi-Fi

IEEE 802.11 (Wi-Fi)	IEEE 802.16 (WiMAX)
Орієнтований на доступ до мережі Інтернет, в основному орієнтуючись на послуги Best Effort	Розроблюється для надання мультимедійних і голосових послуг із заданою якістю
Не орієнтований на з'єднання	Повністю орієнтований на з'єднання
Орієнтований на неліцензовані частоти, кількість користувачів порівняно мала	Орієнтований як на ліцензовані, так і на неліцензовані частоти, очікувана кількість користувачів повинна бути великою
Дистанція передачі даних – метри	Дистанція передачі даних - кілометри

Опираючись на вище сказане порівняємо основні характеристики сучасних бездротових мереж доступу (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 – Порівняння основних характеристик бездротових мереж доступу

№ з/п	Назва	Стандарт IEEE	Робоча частота	Методи модуляції, розширення спектру	Швидкість передачі сигналу	Потуж. перед.	Відстань дії
1	Home RF, Bluetooth	802.15.1	2,4-2,483 ГГц	FM-2, TDD, FHSS, DSSS	1;2 Мбіт/с	100мВт	100 м
2	Bluetooth	802.15.3	2,412-2,462 ГГц	QPSK; 16, 32, 64-QAM; DSSS	11; 22; 33; 44 ; 55 Мбіт/с	10мВт	10м
3	Bluetooth	802.15.3a	3,1-4,85; 6,9-9,7 ГГц	QPSK, DQPSK, MB-OFDM; 16, 32, 64-QAM, DSSS	110-1320 Мбіт/с	1мВт	10м
4	ZigBee	802.15.4	0,86; 9,02-9,28; 2,4-2,483 ГГц	BPSK, O-QPSK	250 кбіт/с	10мВт	10м
5	WLAN	802.11	2,4-2,483	QPSK,	1;2 Мбіт/с	100мВт	100м

			ГГц	FHSS,DSSS			
6	WLAN	802.11 a	5,1-5,9 ГГц	OFDM, 64- QAM, DSSS	1;2 Мбіт/с	100МБТ	100м
7	WLAN	802.11 b	2,4-2,483 ГГц	QPSK, DSSS	1;2;11;22;3 3 Мбіт/с	100МБТ	100м
8	WLAN	802.11 g	2,4-2,483 ГГц	CCK-OFDM, PBCC, DSSS	54 Мбіт/с	100МБТ	100м
9	DECT		1,88-1,9 ГГц	GFSK,TDMA, TDD,	32 кбіт/с	250МБТ	5км
1 0	Wireless MAN (WiMAX )	802.16	2-11; 10-66 ГГц	OFDM; QPSK, 16,64,128,256- QAM, DSSS	120Мбіт/с	100МБТ	60км
1 1	Wi-Fi	802.11 n	2,4 ГГц	OFDM, 64- QAM, DSSS	до 54 Мбіт/с	10МБТ	100м

## 2 ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖ ДОСТУПУ ЗВ'ЯЗКУ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ WiMAX

### 2.1 Опис основних протоколів систем фіксованого і бездротового доступу технології WiMAX

Підрівень конвергенції (Convergence Sublayer - CS)

Підрівень розташований над MAC рівнем і призначений для організації взаємодії між вищими рівнями мережі та MAC рівнем. У стандарті визначені два типи рівня конвергенції: ATM і пакетний. Перший забезпечує взаємодію MAC рівня 802.16 і ATM протоколу, другий - взаємодію з пакетними протоколами.

Протокол MAC рівня

Протокол описує порядок взаємодії між MAC рівнем і підрівнем CS, формат фрейму MAC (MAC Protocol Data Units - PDU), сервіси і механізми опитування (поллінга), які забезпечують підтримку якості обслуговування - QoS:

- Unsolicited Grant Service (UGS) призначений для підтримки потоків реального часу, що генерують пакети даних фіксованого розміру, таких, як передача потоків E1 і голосу поперх IP без подавлення пауз;

- Real-Time Polling Service (rtPS) призначений для підтримки потоків реального часу, що формують пакети даних змінної довжини, таких, як MPEG відео;

- Non-Real-Time Polling Service (nrtPS) призначений для підтримки потоків, що вимагають пакетів змінної довжини, таких як широкосмугова FTP;

- Best Effort (BE) service призначений для ефективного обслуговування трафіку best effort.

В протоколі MAC рівня передбачена підтримка дуплекса (частотного або часового), синхронізації, дозвіл колізій, можливих на етапі встановлення системи або на інтервалах запиту на передачу. На цьому рівні також забезпечується вимір дальності до абонентських станцій (АС), необхідний для коректної роботи

протоколу, відновлення опису каналу і поділ абонентського устаткування на абонентські групи.

Описує алгоритми шифрування на ділянці між базовою станцією (БС) і АС. Рівень безпеки включає два протоколи:

– протокол інкапсуляції для шифрування пакетів, який включає кілька варіантів пар шифрування-аутентифікації та правила їх застосування до пакетів MAC рівня;

– протокол керування ключами шифрування РКМ (Privacy Key Management), що забезпечує розподіл ключів від БС для АС.

Протоколи фізичного рівня описують методи організації дуплекса, способи адаптації, методи множинного доступу і модуляції.

Передбачено режими часового і частотного дуплекса. Вид модуляції і кодування можуть змінюватися адаптивно від пакету до пакету індивідуально для кожного абонента, що дозволяє збільшити реальну пропускну здатність приблизно вдвічі в порівнянні з неадаптивними системами.

Передача від АС до БС будується на комбінації двох методів множинного доступу: DAMA - доступ по запиті і TDMA - доступ з часовим поділом каналів. Структура пакетів фізичного рівня підтримує змінну довжину пакету MAC рівня. Передбачена рандомізація, завадостійке кодування і три методи модуляції: QPSK, 16QAM і 64QAM. Два останніх методи передбачені для АС як опційні.

Передача від БС до АС ведеться в режимі часового дуплекса в єдиному потоці для всіх АС одного сектору. Передавач здійснює рандомізацію, завадостійке кодування і модуляцію QPSK, 16QAM і 64QAM. Останній метод модуляції передбачений для БС як опційний.

Інформація в системі передається фреймами, які діляться на два субфрейми. Перший використовується для передачі БС, другий - АС.

Стандартом також рекомендуються смуги частот і відповідні швидкості передачі при різних видах модуляції. Максимальна швидкість передачі, передбачена в стандарті - 134,4 Мбіт/с при смузі 28 МГц і модуляції 64 QAM.

У першій версії стандарту передбачалося використання діапазону частот 10-66 ГГц для якого рекомендувався режим передачі на одній несучій - single-carrier (SC). Особливості поширення радіохвиль цього діапазону обмежують можливості роботи в умовах прямої видимості. В типових міських умовах це дозволяє підключити близько 50% абонентів, що перебувають у межах робочої дальності від базової станції. До інших 50% прямої видимості, як правило, немає цієї можливості. Тому в процесі роботи над стандартом діапазон частот був розширений включенням смуги 2-11 ГГц, у якій, крім SC, передбачені ще і режими ортогонального частотного мультиплексування (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM) і множинного доступу на основі ортогонального частотного мультиплексування (Orthogonal Frequency Division Multiply Access - OFDMA).

У режимі OFDM передбачена одночасна передача на 256 піднесучих, що дозволяє за рахунок збільшення приблизно у стільки ж раз тривалості елементарного символу, одночасно приймати прямі і відбиті від перешкод сигнали або взагалі працювати тільки на відбитих сигналах поза межами прямої видимості. Режим OFDMA передбачає роботу на 2048 піднесучих у режимі відразу з декількома абонентами. При стандартній кількості піднесучих - 256, забезпечується одночасна робота з 8 абонентами.

У стандарті також описані моделі середовищ поширення радіохвиль і на цій основі сформульовані вимоги до параметрів радіоустаткування. Передбачено можливості автоматичного регулювання посилення, динамічного вибору частоти в неліцензованих діапазонах. Крім топології точка-багатоточка стандартом опціонально передбачена повнозв'язна топологія - Mesh Mode, що дозволяє забезпечити прямий зв'язок між АС, здолати перешкоди, характерні для безліцензійних діапазонів, за рахунок вибору напрямку прийому вільного від них, створювати добре масштабовані мережі і працювати поза прямою видимістю навіть в одночастотному режимі SC, за рахунок ретрансляції сигналів АС.

## 2.2 Різновиди доступу WiMAX

Стандарт 802.16e - 2005 ввібрав у себе все з тих версій, що вийшли раніше і на даний момент має наступні види доступу (рис.2.1).

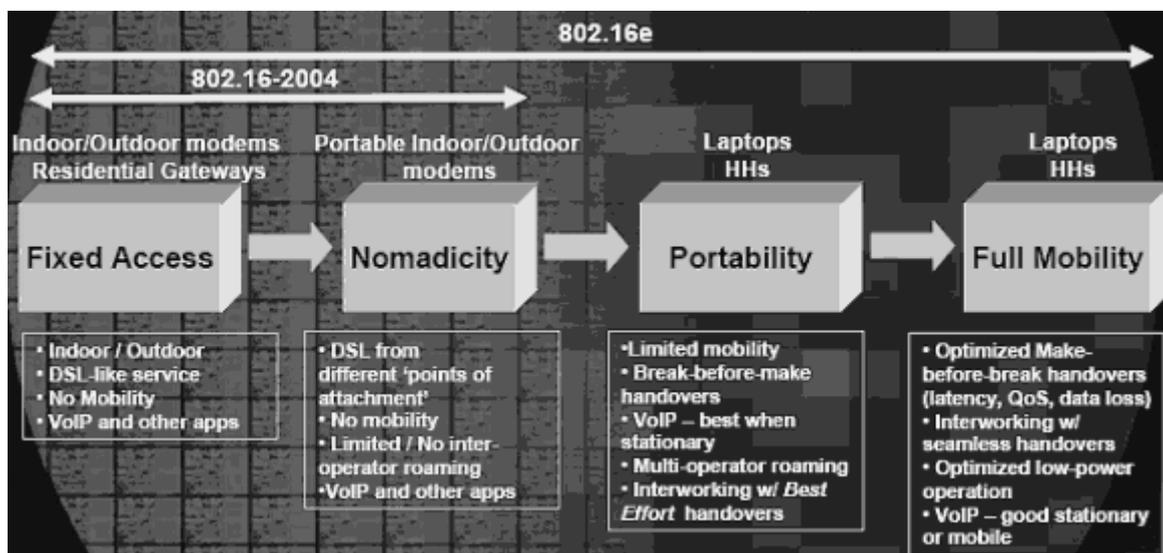


Рисунок 2.1 – Види доступу WiMAX

- Fixed WiMAX - фіксований доступ;
- Nomadic WiMAX - сеансовий доступ;
- Portable WiMAX - доступ у режимі переміщення;
- Mobile WiMAX - мобільний доступ.

Fixed WiMAX (рис.2.2). Фіксований доступ являє собою альтернативу широкопasmовим дротовим технологіям (xDSL, T1, т.п.). Стандарт використовує діапазон частот 10-66 ГГц. Цей частотний діапазон через сильне загасання коротких хвиль вимагає прямої видимості між передавачем і приймачем сигналу. З іншого боку, даний частотний діапазон дозволяє уникнути однієї з головних проблем радіозв'язку - багатопроменевого поширення сигналу. При цьому ширина каналів зв'язку в цьому частотному діапазоні досить велика (типове значення - 25 або 28 МГц), що дозволяє досягти швидкостей передачі до 120 Мбіт/с. Фіксований режим входить до версії стандарту 802.16d-2004 і вже використовується в деяких країнах. Однак більшість компаній, що пропонують

послуги Fixed WiMAX, очікують швидкого переходу на портативний і надалі мобільний WiMAX.

Nomadic WiMAX. Сеансовий (кочуючий) доступ додав поняття сесій до вже існуючого Fixed WiMAX. Наявність сесій дозволяє вільно переміщати клієнтське устаткування між сесіями та відновлювати з'єднання вже за допомогою інших вишок WiMAX, ніж тих, що були використані під час попередньої сесії. Такий режим розроблений в основному для портативних пристроїв, таких, як ноутбуки, КПК. Введення сесій дозволяє також зменшити витрата енергії клієнтського пристрою, що теж важливо для портативних пристроїв.

Portable WiMAX. Для режиму Portable WiMAX додано можливість автоматичного перемикавання клієнта від однієї базової станції WiMAX до іншої без втрати з'єднання. Однак для даного режиму все ще обмежена швидкість пересування клієнтського устаткування - 40 км/ч. Але, вже в такому виді можна використовувати клієнтські пристрої в дорозі (в автомобілі при русі житловими районами міста, де швидкість обмежена, на велосипеді, рухаючись пішки і т.д.). Введення даного режиму зробило доцільним використання технології WiMAX для смартфонів і КПК. В 2006 році початий випуск пристроїв, що працюють у портативному режимі WiMAX. Вважається, що до 2008 року впровадження та просування на ринок саме цього режиму буде пріоритетним.

Отже, WiMAX є широкосмуговою бездротовою технологією, що підтримує всі чотири типи доступу, наведених вище. Для того, щоб задовольнити всі необхідні вимоги, були запропоновані дві версії WiMAX. Перша ґрунтується на стандарті IEEE 802.16-2004 і оптимізована для фіксованого доступу з різних місць. Друга версія розроблена для підтримки інших двох типів доступу і буде базуватися на модифікації до першого стандарту IEEE 802.16e.

Дві версії WiMAX відображують потреби ринку в продуктах, які оптимізовані або для фіксованого, або для мобільного доступу. Вимоги для цих двох типів доступу різні, тому і їх рішення, що реалізують, також будуть різними. Кілька опційних функцій, які підтримуються в обох специфікаціях, включені в продукти 802.16e, оскільки мобільні сервіси тільки виграють від доданої

функціональності. Серед цих функцій - поліпшена підтримка MIMO і адаптивних антенних систем (AAS), які істотно підвищують пропускну здатність і прийом в умовах непрямой видимості.

Ключовою відмінністю між стандартами 802.16-2004 і 802.16e є техніка мультиплексування: у першому використовується мультиплексування з поділом за ортогональними частотами (OFDM), тоді як у другому - множинний доступ з поділом за ортогональними частотами (OFDMA) або масштабований OFDMA (Scalable OFDMA - SOFDMA).

Набір параметрів 802.16-2004 краще підходить для фіксованого доступу, при якому застосовуються спрямовані антени, оскільки OFDM по своїй суті простіша, ніж SOFDMA.

Перетворення Фур'є дозволяє розділити частотний діапазон на піднесучі, спектри яких перекриваються, але все-таки залишаються ортогональними. З останнього випливає, що кожна з піднесучих містить ціле число (унікальне) коливань на період передачі символу. У методі ж OFDMA множина несучих розділяється на N груп. Кожна група містить M піднесучих, з яких формуються M підканалів: по одній піднесучій із групи (рис.2.2).

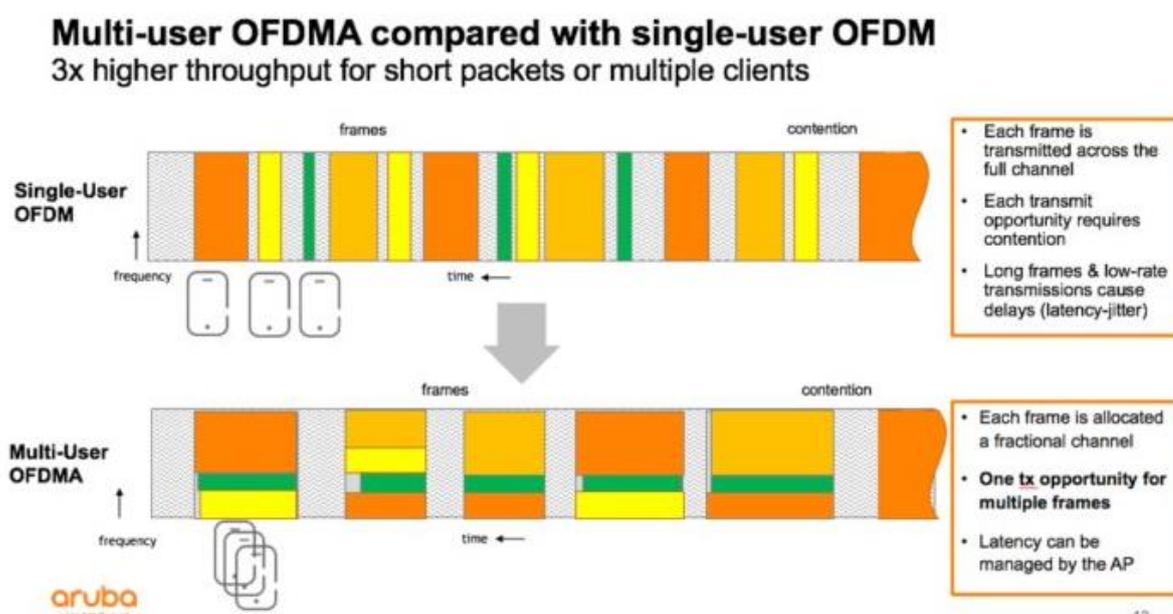


Рисунок 2.2 – Схема мультиплексування OFDM та OFDMA

Концепція масштабованості базується на змінній структурі підканалів, інакше кажучи, на змінному числі піднесучих, поєднаних у канал. При цьому піднесучі не обов'язково повинні бути суміжними. Залежно від числа піднесучих у підканалі використовується перетворення Фур'є (звичайно швидке - ШПФ) з різною кількістю членів у сумі, або різним числом точок.

Метод OFDMA дозволяє одержати більшу гнучкість при керуванні різними пристроями користувача з різними типами антен. Він зменшує взаємні перешкоди для пристроїв із всенапрямленими антенами і поліпшує прийом в умовах непрямой видимості, що досить істотно для мобільних користувачів. Підканали можуть бути розподілені між різними абонентами залежно від умов передачі і необхідної пропускної здатності. Цим досягається більш ефективне використання ресурсів.

Розбиття на підканали для вихідного потоку поліпшує продуктивність, тому що потужність переданого пристроєм користувача сигналу вкрай обмежена. При застосуванні OFDM пристрій передає дані, використовуючи весь набір піднесучих. OFDMA підтримує множинний доступ, за допомогою якого передача ведеться тільки на піднесучих виділеного користувачеві підканала. Наприклад, якщо OFDMA використовує 2048 піднесучих і 32 підканали і користувачеві виділяється тільки один підканал, то вся потужність передавача буде сконцентрована в  $1/32$  доступного спектру і може бути на 15 дБ більше, ніж при OFDM.

Іншим важливим доповненням у стандарті 802.16e є підтримка передачі керування при переміщенні між чарунками. При цьому буде можливий як твердий (hard), так і м'який (soft) режим передачі керування. У першому випадку пристрій повинен розірвати зв'язок з поточною чарункою, перш ніж підключитися до наступної. Цей метод досить простий, однак має тривалу затримку. М'який режим працює аналогічно стільниковому зв'язку і дозволяє пристрою користувача залишатися на зв'язку зі старою станцією доти, поки вона не підключиться до нового. Перевагами цього режиму можуть скористатися ігрові додатки і VoIP, тоді як для передачі даних цілком достатньо твердого режиму передачі керування.

Що стосується переходу від одного оператора до іншого (roaming), то ці можливості можуть бути реалізовані в обох стандартах - 802.16-2004 і 802.16e, хоча вони особливо цінні для мобільного доступу.

Хоча Mobile WiMAX забезпечує і фіксований доступ, однак, найімовірніше, обидві версії стандарту залишаться на ринку, оскільки кожна з них ефективніше виконує ті функції, для яких розроблялася.

### **2.3 Принцип побудови бездротової мережі WiMAX**

Устаткування WiMAX постачається вже більш ніж 100 фірмами, однак все воно будується всього на декількох чіпах, випущених фірмами Alvarion, Intel, Wavesat і т.п.

Базова станція WiMAX, як правило, будується за модульним принципом, тобто якщо буде потреба, можуть бути інсталювані додаткові модулі. Базова станція обладнана як мінімум однією всенапрямленою антеною, також можлива установка додаткових напрямлених антен з високим коефіцієнтом підсилення для покриття заданих секторів.

Устаткування користувача в продуктах WiMAX може складатися з терміналу (лаптоп або кишеньковий комп'ютер) і підключеною до нього антеною. Для стандарту IEEE 802.16a передбачається антена, яка буде виносною і встановлюватися на дах будинку, де перебуває користувач. Наступним кроком розвитку WiMAX є стандарт 802.16-2004, де зовнішня антена встановлюється в приміщенні, де перебуває користувач. Останній і найбільш прогресивний крок розвитку мереж WiMAX зроблений із впровадженням стандарту IEEE 802.16e, який підтримує мобільність терміналу користувача, у зв'язку із чим антена повинна бути виконана у вигляді PC-карти. У результаті користувач має можливість пересуватися між доменами WiMAX "без розриву з'єднання", тому цю можливість називають "портативний Інтернет" (portable Internet), у той час як на більш ранніх етапах користувачеві був доступний Інтернет тільки в рамках одного домену WiMAX. Розвиток мереж WiMAX приведе до ситуації, коли

користувач (або програмне забезпечення його мультимедійного терміналу) перебуваючи в зонах покриття мереж GPRS/EDGE, UMTS, WiMAX, WLAN при здійсненні звернень до послуг на базі протоколу IP повинен мати можливість вибору найбільш доступної, з погляду швидкості, вартості, якості і т.д., мережі доступу. У такий спосіб мережа WiMAX стає учасником послуги за назвою Always Best Connected (завжди найкраще підключення), логічно інтегруючись із іншими технологіями.

## **2.4 Принцип роботи WiMAX**

З'єднання між базовою станцією та клієнтським приймачем відбувається в низькочастотному діапазоні 2-11 ГГц. Дане з'єднання в ідеальних умовах дозволяє передавати дані зі швидкістю до 20 Мбіт/с і не вимагає наявності прямої видимості між станцією та користувачем. Цей режим роботи базової станції WiMAX близький до стандарту 802.11 (Wi-Fi), що допускає сумісність вже випущених клієнтських пристроїв WiMAX.

Варто пам'ятати, що технологія WiMAX застосовується як на "останній милі" - кінцевій ділянці між провайдером і користувачем, так і для надання доступу регіональним мережам: офісним, районним.

Між сусідніми базовими станціями встановлюється постійне з'єднання з використанням режиму НВЧ (надвисокі частоти 10-66 ГГц) радіозв'язку прямої видимості (line-of-sight). Дане з'єднання в ідеальних умовах дозволяє передавати дані зі швидкістю до 120 Мбіт/с. Обмеження за умови прямої видимості, зрозуміло, не є перевагою, однак воно накладається тільки на базові станції, які беруть участь у цілісному покритті району, що цілком можливо реалізувати при розміщенні устаткування.

Як мінімум, одна з базових станцій може бути постійно зв'язана з мережею провайдера через широкопasmову швидкісне з'єднання (ТЗ, або інше, яке гарантує стабільно високу швидкість передачі даних). Фактично, чим більше станцій мають доступ до мережі провайдера, тим вище швидкість і надійність передачі

даних. Однак навіть при невеликій кількості точок система здатна коректно розподілити навантаження за рахунок стільникової топології.

На базі стільникового принципу розробляються також шляхи побудови оптимальної мережі, яка огинає великі об'єкти (наприклад, гірські масиви), коли серія послідовних станцій передає дані за естафетним принципом.

За структурою мережі стандарту IEEE 802.16 дуже схожі на традиційні мережі мобільного зв'язку: тут теж є базові станції, які діють у радіусі до 50 км, при цьому їх також не обов'язково встановлювати на вишках - для них цілком підходять дахи будинків, потрібно лише дотримання умови прямої видимості між станціями. Для з'єднання базової станції з користувачем необхідна наявність абонентського устаткування. Далі сигнал може надходити на стандартний Ethernet-кабель, як безпосередньо на конкретний комп'ютер, так і на точку доступу стандарту 802.11 Wi-Fi або в локальну дротову мережу стандарту Ethernet.

Це дозволяє зберегти існуючу інфраструктуру районних або офісних локальних мереж при переході з кабельного доступу на WiMAX. Це дозволяє також максимально спростити розгортання мереж, дозволяючи використовувати знайомі технології для підключення комп'ютерів.

## **2.5 Стратегії побудови мережної інфраструктури WiMAX і їх реалізація**

Технологія широкосмугового бездротового доступу Broadband Wireless Access (BWA) стандарту IEEE 802.16 (WiMAX) призначена для надання послуг віддаленим абонентам з передачі даних, зокрема, доступу в Інтернет, телефонії (IP телефонії), передачі відео та аудіо інформації (відео на вимогу, відеоконференції та ін.).

Стандарт IEEE 802.16 обумовлює застосування широкосмугового шумоподібного радіосигналу з модуляцією OFDM (OFDMA для мобільних додатків) із частотним FDD (Frequency Division Duplex) і часовим методом поділу сеансів прийому-передачі даних TDD (Time Division Duplex) і методом

мультиплексування з часовим поділом каналів TDMA (Time Division Multiply Access) множинного доступу абонентів.

Устаткування FDD для дуплексного прийому та передачі радіосигналу використовує різні смуги частот, рознесені на 100 МГц. В устаткуванні TDD для прийому та передачі використовується той самий частотний канал з поділом сеансу прийому передачі за часовими інтервалами.

Технологія WiMAX має ряд конкурентних переваг у порівнянні із дротовими і існуючими мобільними технологіями за багатьма показниками ефективності та вартості мережі. Зокрема, технологія WiMAX, у порівнянні із дротовими технологіями, забезпечує найвищу в сегменті широкопasmового доступу ємність мережі, вимірювану максимальною кількістю абонентів, що обслуговуються одночасно, і найбільшу дальність зв'язку при менших витратах на розгортання і обслуговування мережі.

Технологія WiMAX забезпечує найвищу, у порівнянні із дротовими широкопasmовими і мобільними системами зв'язку, продуктивність, вимірювану щільністю потоку даних - швидкістю передачі даних з розрахунком на один квадратний кілометр території, що покривається, при менших або однакових витратах на розгортання і обслуговування мережі. Зокрема, у порівнянні з технологією 3G мобільного зв'язку, WiMAX забезпечує значно більшу щільність потоку даних при однаковій ємності і витратах на будівництво та обслуговування мережі. Для реалізації даних переваг розрізняють дві стратегії побудови мережної інфраструктури WiMAX.

Перша стратегія орієнтована на одержання максимальної щільності потоку даних на заданій території. Дана стратегія застосовується у великих містах з високою щільністю населення з розвиненою дротовою мережною інфраструктурою з метою забезпечення конкурентної із провідним широкопasmовим доступом DSL щільності потоку даних і надання мультимедійних послуг.

Друга стратегія застосовується в умовах відсутності або низького рівня конкуренції з боку дротових систем, вона передбачає таке розміщення базових

станцій, що забезпечує одержання максимальної зони покриття із забезпеченням заданої щільності потоку даних. Дана стратегія застосовується в сільських районах, а також у містах і обласних центрах з низьким розвитком дротової інфраструктури, що характерно для більшості регіонів України. Реалізація даної стратегії дозволяє одержувати щільність потоку даних 1-6 Мбіт/с/кв.км. Метою реалізації даної стратегії полягає в забезпеченні необхідної для надаваних оператором послуг швидкості передачі на максимальних територіях.

В устаткуванні стандарту IEEE 802.16 діапазону частот 5 ГГц реалізується часовий (TDD) метод підтримки дуплекса. В інших відведених під WiMAX діапазонах частот 2.3, 2.5, 3.5 ГГц застосовується як FDD, так і TDD устаткування.

У цілому, устаткування TDD забезпечує меншу в порівнянні з устаткуванням FDD ємність мережі та продуктивність. Однак TDD устаткування має ряд інших переваг, що дозволяє успішно реалізовувати стратегію максимізації територій, які покриваються, і будувати високопродуктивні мережі WiMAX у діапазоні частот 5 ГГц.

TDD устаткування більш ефективно використовує спектр частот за рахунок того, що підтримується прийом і передача в одному частотному каналі. Навпроти, FDD устаткування вимагає наявності широких захисних смуг частот між каналами передачі і прийому з метою виключення взаємних перешкод. Це призводить до того, що майже половина FDD частотного ресурсу фактично не використовується.

TDD устаткування дозволяє повторно використовувати спектр частот, коли, наприклад, сусідні сектори базової станції і навіть сусідні базові станції можуть працювати на тому самому частотному каналі завдяки синхронізації часових інтервалів прийому - передачі.

Устаткування TDD дешевше устаткування FDD. Причому, ключове значення має ціна абонентських терміналів. Дуплексні FDD термінали має два передавачі і тому дорожче TDD терміналів. Напівдуплексні термінали FDD

оснащені так само як і TDD одним передавачем, але при їхньому використанні втрачається перевага за продуктивністю режиму FDD.

FDD устаткування підтримує тільки симетричний прямий і зворотний трафік і не може регулювати співвідношення uplink/downlink.

FDD устаткування орієнтоване на надання так званого TDM сервісу, зокрема, організації високошвидкісних симетричних цифрових телефонних каналів зв'язку. TDD устаткування більше орієнтоване надання доступу в Інтернет, відеотрансляцій і інших послуг, для яких характерна перевага асиметричного трафіку.

Реалізація стратегії максимізації щільності потоку даних на базі устаткування TDD у діапазоні частот 5 ГГц дозволяє при обмеженому частотному ресурсі одержати конкурентну з DSL щільність потоку даних ( 20-40 Мбіт/с/кв.км) при високій щільності розміщення базових станцій (БС) Base Spacing, на відстані 1-2 км. При цьому TDD БС мають можливість повторного використання частот на одній БС і можливістю collocation БС – синхронізації роботи БС із метою виключення взаємних перешкод. В умовах обмеженості частотного ресурсу це дозволяє TDD БС досягати більших значень щільності потоку даних у порівнянні з більш продуктивним FDD устаткуванням, що вимагає для своєї роботи значного частотного ресурсу.

Реалізація стратегії максимізації площі територій, що покриваються послугою, ускладнюється відносно високими втратами потужності радіосигналу при поширенні радіохвиль у діапазоні частот 5 ГГц. Ці втрати на частоті 5 ГГц трохи вище аналогічних втрат на більш низьких частотах 2.5 ГГц і 3.5 ГГц. Проте, при застосування стратегії максимізації площі території, що покривається на частоті 5 ГГц, для фіксованого бездротового доступу досить ефективно. Справа в тому, що фіксований доступ передбачає оснащення абонентських терміналів зовнішніми антенами. У мережах WiMAX це можуть бути антени для використання всередині приміщень, якими оснащуються ( self-installable) абонентські термінали, встановлювальні абонентами самостійно, і зовнішні антени, установлені поза приміщеннями, що вимагають професійної установки

оператором зв'язку. За оцінками фахівців, більшість абонентських терміналів, що працюють у мережах WiMAX фіксованого доступу в діапазоні частот 5 ГГц, будуть оснащені зовнішніми антенами. При цьому зовнішні антени 5 ГГц мають у середньому на 5-7 дБі більше підсилення в порівнянні з антенами аналогічних розмірів діапазону 2.5 і 3.5 ГГц. Більш високе підсилення зовнішніх абонентських антен саме і компенсує підвищені втрати при поширенні радіосигналу.

Таким чином, застосування TDD устаткування стандарту IEEE 802.16-2004 у діапазоні частот 5 ГГц дозволяє покривати послугою широкосмугового доступу великі території з мінімумом витрат, тобто ефективно реалізовувати стратегію максимізації території, що покривається. При цьому важливою особливістю WiMAX мереж у діапазоні частот 5 ГГц є відносно невеликий радіус обслуговування self-installable абонентських терміналів. Втрати потужності при поширенні радіосигналу в умовах міської забудови поза прямою видимістю в діапазоні 5 ГГц значно більші чим, наприклад, у діапазоні частот 2.5 ГГц. Ці підвищені втрати неможливо компенсувати застосуванням в self-installable абонентських терміналах потужніших антен. Тому максимальна дальність обслуговування таких абонентів поза прямою видимістю базової станції в діапазоні частот 5 ГГц значно менша, ніж на більше низьких частотах, і не перевищує 1 км.

Встановлення абонентського терміналу не вимагає наявності прямої видимості на базову станцію за умови дотримання двох умов:

- 1) наявності необхідного для використовуваної модуляції відношення SNR сигнал/шум (перешкода);

- 2) необхідного перевищення (fade margin 6-12 дБ) рівнем корисного сигналу відповідної використовуваної модуляції порогу чутливості. Звичайно дані умови виконуються для абонентських терміналів, оснащених зовнішньою антеною або інтегрованою антеною з високим підсиленням, на відстані не більше 3-5 км від базової станції. На більших відстанях при установці абонентських терміналів потрібно забезпечити пряму видимість (без обмежень на ступінь закриття зони Френеля).

## 2.6 Апаратні засоби для технології WiMAX

### 2.6.1 Різновиди антен базових станцій WiMAX

Вибір антен для мереж WiMAX - не настільки тривіальне завдання, як може здатися на перший погляд. Наприклад, вимоги, пропоновані до антен для базових станцій мереж WiMAX, істотно відмінні від вимог до антен інших систем широкопasmового бездротового доступу Broadband Wireless Access (BWA) , наприклад, стандарту IEEE 802.11 a/b/g .

На рис. 2.3 представлені приклади трьох типів антенних систем, які використовуються в базових станціях бездротового широкопasmового доступу BWA. Чи можуть такі антенні системи бути використані для базових станцій WiMAX, однозначної відповіді на це питання немає. Все залежить від рівня взаємної інтерференції радіосигналів, випромінюваних кожною антеною, що заважає нормальній роботі системи. Вимоги до максимально припустимих рівнів інтерференції розрізняються для різних систем BWA , і в тому числі, і WiMAX.

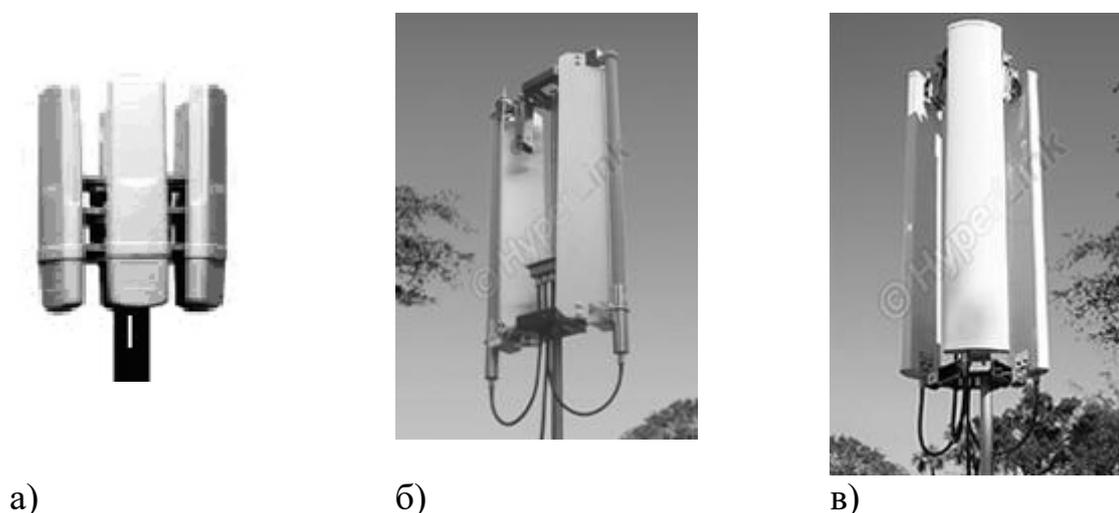


Рисунок 2.3 – Типи антен WiMAX

В принципі, для того щоб два та більше радіосигналів заважали роботі один одного, необхідно, щоб вони співпадали (перетиналися) по частоті (частотному спектру), часу і у просторі. Тим самим, кожна система для свого нормального

функціонування повинна мати частотно-територіальний розподіл (ЧТР) із сигналом, що заважає (інтерференцією). Крім того, оскільки ми маємо справу із цифровими системами, в яких радіосигнали мають форму імпульсу, то умова збігу за часом означає збіг або накладення за часом імпульсів сигналів, що приходять у систему. Тим самим, часовий розподіл імпульсів радіосигналів може бути забезпечений часовою синхронізацією роботи системи із джерелами інтерференції.

Кожна антена в антенній системі теоретично може бути підключена через антенний розгалужувач (дільник) до прийомо-передаючого пристрою базової станції (BS). У цьому випадку антена система являє собою єдину антену і інтерференція між антенами відсутня. Такий спосіб підключення антен значно знижує ефективну випромінювану потужність системи (EIRP) і збільшує втрати радіосигналу в антенно-фідерному тракті, що негативно позначається на дальності зв'язку та продуктивності базової станції. Тому антенні дільники в системах WiMAX практично не застосовується.

Кожна антена підключається до окремого прийомо-передаючого пристрою BS, що працює на певному частотному каналі. Таким чином, для того, щоб прийомо-передаючі пристрої BS, кожний з яких підключений до окремої секторної антени, не заважали нормальній роботі один одного, необхідно, щоб виконувалися вимоги частотного (рознесення по частоті між каналами), територіального (територіальне рознесення антен) і часового (синхронізація за часом) рознесення.

Найбільше істотно інтерференція на BS проявляється в несприятливому впливі радіосигналу, випромінюваного передавачем одного каналу (сектора), на приймач сусіднього каналу (сектора) BS. Якщо центральні частоти цих сусідніх каналів розташовані досить близько один від одного так, що їхні частотні спектри перекриваються, і антени розташовані досить близько один від одного, то міжканальна (міжсекторна) інтерференція може перевищувати припустимі норми.

Антени в антенних системах, представлених на рис.2.3(а,б,в), розташовуються досить близько одна від одної, що означає фактичну відсутність

територіального рознесення. Ця обставина в даному випадку повинна компенсуватися забезпеченням необхідного частотного і/або часового рознесення.

Частотне рознесення може бути забезпечене двома способами. Перший спосіб реалізується в системах Frequency Division Duplex (FDD), де канали прийому Uplink (UL) і передачі Downlink (DL) рознесені по частоті (звичайно на 100 МГц). Тобто канали прийому UL і передачі DL прийомо-передаючого пристрою працюють на різних частотах. Враховуючи, що ширина каналу BW системи FDD становить кілька МГц (для WiMAX FDD максимальна ширина каналу становить 7 МГц), то рознесення в 100 МГц означає практичну відсутність інтерференції між каналами UL і DL. Тим самим в FDD системах міжканальна інтерференція передавача одного сектора на приймач іншого сектора виключена внаслідок значного частотного рознесення каналів прийому і передачі. Тобто рівень інтерференції в FDD системах не залежить від територіального рознесення антен сусідніх секторів BS і, крім того, системі FDD не потрібна часова синхронізація каналів. Тому в системі FDD може застосовуватися кожна із представлених на рис.2.3(а,б,в) антенних систем.

Другий спосіб забезпечення частотного рознесення, застосовуваний у системах Time Division Duplex (TDD), полягає у виборі центральних частот сусідніх каналів, що виключає перекриття (накладення) їх частотних спектрів.

Розглянемо антенну систему показану на рис.2.3а. Дана антенна система з 6 секторних антен призначена для роботи TDD системи BWA із шириною каналу  $BW = 20$  МГц, зокрема, у діапазоні частот 2400-2483, а також 5250-5350 МГц і ін. Очевидно, розмістити без перекриття 6 каналів по 20 МГц у смузі, наприклад, в смузі 100 МГц неможливо. Отже, шість каналів даної шести секторної станції перекриваються по частоті, що означає відсутність частотного рознесення між ними. Тим самим, для антенної системи на рис.2.3а не виконуються вимоги ні частотного, ні територіального рознесення, і єдиний можливий спосіб застосування такої системи - реалізація механізму синхронізації частотних каналів.

Синхронізація частотних каналів може застосовуватися в системах TDD і полягає в синхронізації за часом циклів передачі Tx MAC фреймів даних і Rx MAC фреймів прийому.

У цьому випадку Tx і Rx фрейми не перетинаються в часі і відповідно канали не створюють інтерференцію один одному навіть у випадку, якщо вони збігаються по частоті.

Для синхронізації за часом фреймів система використовує джерело еталонного часу, що одержують базові станції через систему GPS. Синхронізація частотних каналів забезпечує так зване повторне використання частоти (frequency re-use), коли різні сектори однієї BS або сусідні сектори близько розташованих BS можуть використовувати однакові або частотні канали, що перекриваються.

Таким чином, антенна система на рис.2.3а здатна працювати або за технологією FDD, або за технологією TDD з часовою синхронізацією фреймів даних DL і UL, що виключає їх накладення в частотних каналах, що перекриваються. Якщо використовувати антенну систему (рис. 2.3а) для TDD систем з шириною каналу, наприклад, 5 МГц, то можна виключити перекриття каналів, наприклад, у доступній смузі 40 МГц. Однак сам факт, що частотні канали не перекриваються, не є достатньою умовою відсутності взаємної інтерференції.

Розглянемо далі системи, які не підтримують синхронізацію каналів. Ступінь достатності частотного рознесення для системи BWA і, у тому числі WiMAX, залежить від багатьох факторів, і зокрема, від спектральних характеристик радіосигналу, рівня позасмугового випромінювання, вибіркості приймача за сусідніми каналами і багатьох інших параметрів системи.

Рівень інтерференції на сусідніх частотних каналах залежить не тільки від параметрів прийомо-передаючого пристрою, але і від характеристик використовуваних антен. В умовах, коли повністю виключити в TDD системах інтерференцію між сусідніми частотними каналами неможливо, застосування антен з параметрами, що забезпечують подавлення такої інтерференції, а також територіальне рознесення антен, дозволяє забезпечити нормальну роботу

багатосекторної BS в умовах обмеженості частотного ресурсу. При цьому, чим більш високоякісні антени застосовуються на BS, тим менші вимоги до їх територіального рознесення, і тим менші вимоги до необхідного для нормального функціонування BS частотному ресурсу.

Кожна секторна антена системи на рис. 2.3а виконана у вигляді інтегрованої 60 градусної антени в одному корпусі з передавачем. Для даної конструкції характерний високий рівень випромінювання поза основним пелюстком діаграми спрямованості (ДС) антени. Наприклад відношення F/V, що характеризує відношення потужностей, випромінюваних у напрямку головного і заднього пелюстка ДС такої антени дорівнює всього -15 дБ. Внаслідок цього для запобігання високого рівня міжсекторної інтерференції між такими антенами потрібне підвищене частотне рознесення каналів. Така побудова антенних систем, у цілому неефективно витрачає частотний ресурс і створює сильні перешкоди іншим РЕС, що працюють в цьому ж діапазоні частот. Застосування подібної антенної системи для нормальної роботи станцій WiMAX, наприклад, у смузі 5ГГц при ширині каналів 5 , 10 МГц викликало б неефективне використання значного частотного ресурсу, вимірюваного сотнями мегагерц. У цілому антенна система, представлена на рис.2.3 б, не є універсальною і розрахована на використання в конкретній системі BWA TDD із синхронізацією частотних каналів на низькошвидкісній, але стійкій до інтерференції модуляцією FSK, що дозволяє даній системі відносно більш менш нормально працювати, хоча і з неефективним використанням частотного ресурсу і створенням серйозних перешкод іншим РЕС.

Антенна система, представлена на рис.2.3а, є універсальною. Така система внаслідок своєї відносної невисокої вартості знайшла широке застосування в базових станціях BWA стандарту IEEE 802.11a/b/g. Однак вона мало придатна для базових станцій WiMAX. Причина також криється в неприйнятно високій інтерференції між сусідніми секторами (каналами) внаслідок конструктивних особливостей цих антен.

Секторна антена на рис.2.3б являє собою звичайну колінеарну всеснапрямлену антену, оснащену рефлектором, що і формує сектор ДС в 180 град. Такий спосіб виготовлення секторної антени простий і недорогий. Однак рефлектор не здатний значно погасити випромінювання в задній півсфері антени, що призводить до наявності значного рівня бічних і задніх пелюстків ДС такої антени. Як наслідок, така антена сильно випромінює в задній півсфері, що при недостатньому частотному рознесенні каналів також призводить до сильної міжканальної інтерференції. Така антенна система здатна забезпечити більш-менш нормальну роботу системи BWA на низькошвидкісній модуляції BPSK, QPSK на каналі, наприклад, шириною 20 МГц і рознесенні центральних частот каналів також не менш 20 МГц. Для систем BWA, що використовують сучасну високошвидкісну модуляцію 16QAM, 64QAM, до яких відноситься і WiMAX, рівень інтерференції, створюваний антенами даного типу, неприйнятний.

Антенна система з 3-х секторних 120 град антен, представлена на рис.2.3 в, виглядає в цілому дуже привабливо з погляду компактності, зручності монтажу і обслуговування. Однак для визначення можливості використання даної антенної системи в системах WiMAX необхідно, зокрема, знати рівні бічних і задніх пелюстків ДС даної антени і співставити їх з параметрами роботи конкретної WiMAX базової станції, де дана антенна система буде застосовуватися.

Мережі стандарту IEEE 802.16 WiMAX є на сьогоднішній день найбільш високотехнологічною системою BWA в області бездротових телекомунікацій і висувають підвищені вимоги до параметрів і якості свого антенно-фідерного тракту. Антени і НВЧ тракт у цілому є самою примхливою частиною будь-якої системи бездротового доступу, у випадку ж мереж WiMAX неправильна інтеграція активного устаткування і НВЧ може звести до нуля всі переваги даної технології. У базових станціях мереж WiMAX можуть використовуватися всеспрямовані і секторні антени на 60 град, 90 град і 120 град.

Європейський інститут стандартизації в області телекомунікацій ETSI визначає вимоги до антен, застосовуваним у системах BWA у діапазоні частот 3-11 ГГц і, у тому числі, в мережах WiMAX.

ETSI виділяє три класи антен, що розрізняються характеристиками ДС. Найбільш важливими характеристиками ДС є: коефіцієнт підсилення, ширина ДС, коефіцієнт подавлення бічних пелюстків ДС side-lobe suppression, коефіцієнт подавлення крос-поляризаційного випромінювання Cross-Polar Isolation/Discrimination (позначається як XPI, XPD або X-Pol). При цьому side-lobe suppression на рівні 180 град називається коефіцієнтом подавлення задніх пелюстків ДС ( випромінювання в задній півсфері) або відношенням Front to Back ratio (F/B ).

Кожний клас антен відповідає певним вимогам до параметрів, зокрема, до рівня подавлення випромінювання в задній півсфері F/B і side-lobe suppression. Наприклад, клас EN 301 085 CS1 має відношення F/B < -25 дБ, класи CS2 і CS-3 - F/B < -35 дБ. При цьому антени CS2 на рівні 135 град мають side -lobe suppression - 30 d, а CS3 -35 d. Відношення F/B і side-lobe suppression антени в значній мірі визначає рівень її випромінювання поза основним пелюстком ДС і, відповідно, рівень міжсекторної інтерференції на BS. На рис. 2.4 показана ДС ( antenna pattern ) у горизонтальній ( азимут azimuth ) і вертикальній ( кут місця elevation ) однієї її кращих у галузі 90 град. секторної антени SEC-55V-90-16 HP класу CS3 з вертикальною поляризацією виробництва Radiowaves.

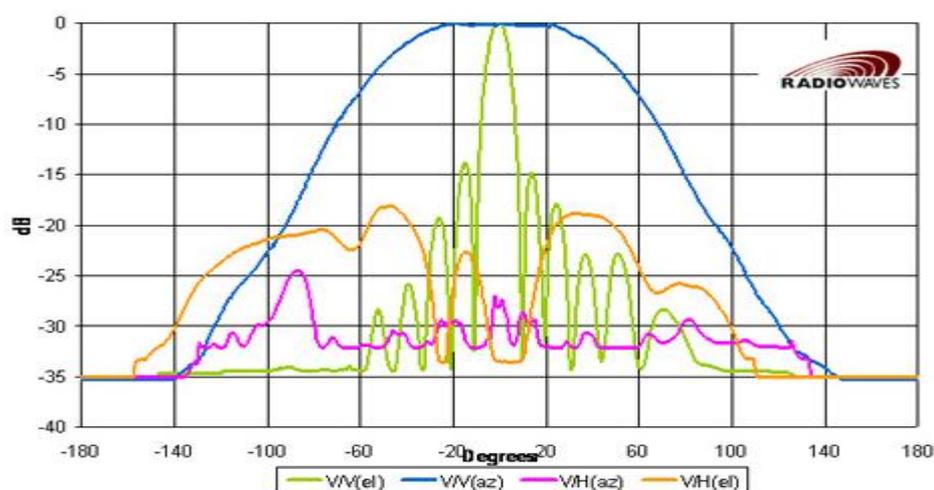


Рисунок 2.4 - ДС секторної антени SEC-55V90-16 HP виробництва Radiowaves

На рис.2.4 видно, що антена має  $F/B = -35$  дБ, , Side-lobe suppression  $V/V(AZ)$  на  $135$  deg =  $-35$ дБ), Side-lobe suppression  $V/V(EL)$  на  $90$  deg =  $-35$ дБ) , що означає, що дана антена по вертикальній поляризації сигналу і кутах по азимуті більш  $135$  град, у тому числі в задній півсфері, а також кутах місця починаючи від  $90$  град ( вертикально вниз або вверх ) випромінює радіосигнал з потужністю на  $35$  дБ менш потужності, випромінюваної в напрямку головного пелюстка ДС - сектора  $90$  град. Аналогічно дана антена підсилює радіосигнал, що приходить із напрямку головного сектора на коефіцієнт підсилення  $G$  ( у цьому випадку  $G=16$  дБі ) і подавляє радіо сигнал, що приходить позаду, збоку по азимуту від  $135$  град. і більше, а також знизу і зверху ( $180$  град кута місця ) на  $19$  дБ ( $16 - 35$  дБ= $-19$  дБ).

Таким чином, чим вище відношення  $F/B$  і side-lobe suppression антени, тим менше рівень міжсекторної інтерференції на BS. Однак антени з високим рівнем  $F/B$  і side-lobe suppression коштують відносно дорого. Наприклад, вартість секторної антени, що задовольняє вимогам класу CS3, може бути в три-чотири рази вище вартості типової антени класу CS2.

## 2.6.2 Огляд обладнання WiMAX провідних компаній

### OFDM-модем DM256 компанії Wavesat

У грудні 2004 року фірма Wavesat повідомила про початок продажі свого нового OFDM-модему - NBIC DM256 (рис.2.11). NBIC (надвеликі інтегральні схеми) реалізовані в корпусі PQFP-208. DM256 оснащена ЦАП і АЦП (10 розрядів). Вхідний /вихідний інтерфейс реалізовані як у вигляді квадратурних складових (I і Q), так і модульованого сигналу на проміжній частоті  $10$  МГц. Підтримується модуляція 2/4/16/ 64-QAM. В мікросхемі реалізовані розроблені компанією механізми часової і частотної синхронізації, підтримується часовий і частотний поділ каналів, в останньому випадку - дуплексний і напівдуплексний режими. Ширина каналу -  $1,75$ ;  $3$ ;  $7$  і  $10$  МГц, тривалість захисного інтервалу - від  $1/4$  до  $1/32$  від тривалості OFDM- символу. На апаратному рівні підтримується кодек Ріда-Соломона і декодер Вітербі. Для побудови устаткування на базі

DM256 додатково необхідні лише ВЧ-трансімітер і контролер MAC-рівня. НБІС може використовуватися як у БС, так і в абонентському устаткуванні. Слід зазначити, що DM256 сумісний з вимогами розширення стандарту широкопasmового доступу для мобільних послуг IEEE 802.16e.

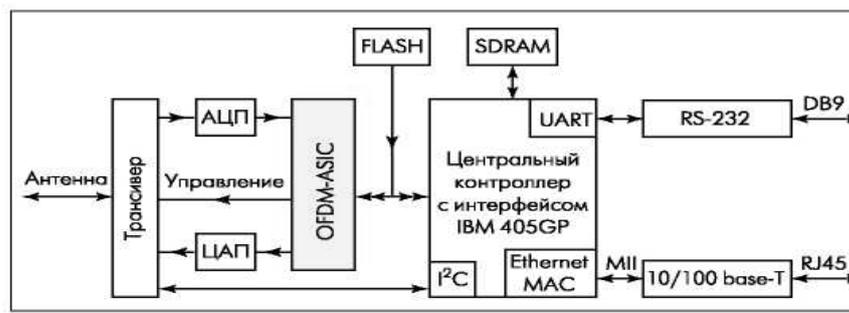


Рисунок 2.5 – Схема пристрою на базі OFDM-модему DM256

Система BreezeMAX розроблена компанією Alvarion (Ізраїль). Використовує OFDM- технологію і адаптивну модуляцію (до 64-QAM), система працює в умовах, близьких до відсутності прямої видимості (NLOS). Перша модель BreezeMAX 3500 використовує діапазон 3400- 3600 ГГц. Ширина каналу може становити 3,5 або 1,75 МГц (табл. 2.1). Висока спектральна ефективність системи BreezeMAX дозволяє операторам будувати мережі WiMAX вже сьогодні.

BreezeMAX як система бездротового доступу складається із трьох компонентів: базової станції (БС, BS), абонентського устаткування (Customer Premises Equipment - CPE) і системи керування (Management System).

Основні параметри системи BreezeMAX3500 наведені в табл.2.1.

Таблиця 2.1 – Основні параметри системи BreezeMAX3500

Частотний діапазон, МГц	Базова станція	Band a: UL: 3399,5-3452; DL: 3499,5-3553,5 Band b: UL: 3450-3500; DL: 3550-3600
	Абонентське устаткування (CPE)	UL: 3499,5-3600; DL: 3399,5-3500
Метод радіодоступу		TDMA TDD
Модуляція		OFDM 256 FFT з адаптивною модуляцією піднесучих: BPSK, QRSK, QAM 16, QAM 64
Ширина каналу, МГц		3,5 / 1,75 (обирається програмно)

Загальна ширина каналу базової станції, МГц	14	
Схема дуплексної передачі	Повнодуплексний	
Роздільна здатність центральної частоти, кГц	125	
Антенa (CPE)	17 дБi, вертикальна і горизонтальна поляризація, відповідає ETSI EN 302 085 V1.1.2 TS3	
Максимальна вихідна потужність (в порту антени), дБм	AU:28±1 SU:20 ± 1	
Чутливість, дБм	-82/85 при самій високій модуляції (QAM 64) -100/103 для самій низькій модуляції (BPSK)	
Електричні характеристики		
	Абонентський блок	Базова станція
Напруга живлення, В	~100-240 (50-60 Гц)	36-72 (постійний струм)
Максимальна використовуєма потужність	CPE ODU- 30 Вт CPE IDU дані: 40 Вт CPE IDU дані +голос: 50 Вт	BST PS: 200 кожний, до 4 PS AU IDU 2 канали: 38 Вт AU ODU: 38 Вт NPU: 70 Вт, PIU: 35 Вт , AVU: 24 Вт
Кліматичні умови		
	Внутрішній модуль	Зовнішній модуль
Діапазон робочих температур, °С	0-40	-40-55
Відносна вологість, %	5-95, без конденсату	5-95, без конденсату, захищений від непогоди

Якщо говорити про режим OFDMA, то лідером у виробництві елементної бази можна вважати ізраїльську фірму Runcom Technologies. Вона випустила НБІС RN-2234-модем з підтримкою режиму OFDMA стандарту IEEE 802.16 (рис.2.13). Дана НБІС реалізує схеми модуляції QPSK, 16- і 64- QAM. Підтримуються як турбо-коди, так і кодек Ріда-Соломона. Модем включає АЦП (10 біт) і ЦАП (12 біт). При ширині каналу 14 МГц НБІС RN-2234 забезпечує швидкість передачі даних до 56 Мбіт/с. Випускається в корпусі 304 LF BGA (19x19x1,5 мм). Напруга живлення ядра/периферії - 1,8/3,3 В. Максимальна споживча потужність - 2Вт.

### 3 ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ПОБУДОВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ WiMAX

#### 3.1 Принципи побудови телекомунікаційних систем з використанням технології WiMAX

Телекомунікаційні системи з використанням технології WiMAX призначені для організації передачі інформації на відстані до 60км. Структура побудови системи в основному використовує топологію «зірка». Іноді може використовуватись принцип побудови системи за схемою «точка-точка». При цьому створюється телекомунікаційна система з фіксованими абонентами. Безперечною перевагою систем є можливість їх побудови з мінімальними витратами в зв'язку з відсутністю необхідності прокладення кабельних ліній.

Враховуючи особливості розповсюдження сигналу, в системах слід використовувати спеціальні зовнішні антени з установкою їх на підвищеному об'єкті, що забезпечує умови безперешкодного розповсюдження сигналу. Як виняток в системах з робочою частотою до 3 ГГц та відстанню роботи до 5км можливо використання зовнішньої антени, що розташовується поруч з терміналом. У всіх випадках необхідно враховувати значне загасання сигналу під час опадів (рис. 3.1) – наприклад, до 3-х дБ/км на частоті 10 ГГц. При цьому доцільно використовувати метод автоматичного регулювання потужності передавача.

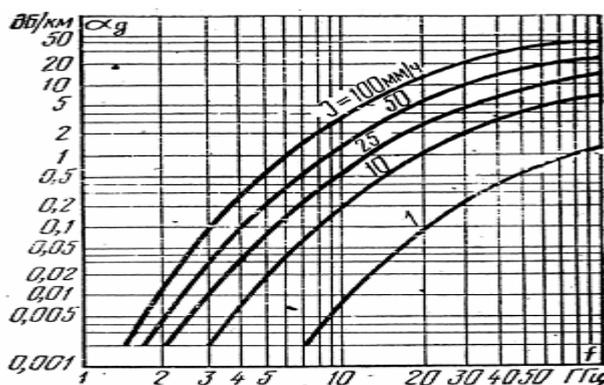


Рисунок 3.1 – Залежність послаблення сигналу від інтенсивності дощу і частоти

При побудові систем слід прийняти заходи щодо забезпечення електромагнітної сумісності сусідніх чарунок. Ця проблема вирішується завдяки використанню широкосмугового сигналу, частотного та кодового розподілу каналів.

Як правило, передача інформації здійснюється з використанням методів її шифрування, що забезпечує високу конфіденційність передачі інформації.

### 3.2 Типова схема трансивера і особливості його побудови

Трансивер будується за класичною схемою НВЧ прийомо-передавача з одно- або двукратним перетворенням частоти (рис 3.2). Стандартами встановлені діапазони робочих частот 2-11 ГГц і 10-66 ГГц.



Рисунок 3.2 – Схема трансивера

Особливу увагу звертають на забезпечення максимальної чутливості передавача, що досягається використанням сучасних входних малошумливих підсилювачів (МШП) та НВЧ фільтрів з мінімальними втратами сигналу.

В табл.3.1. наведені основні характеристики МШП, які можуть використовуватись в сучасних трансиверах WiMAX.

Таблиця 3.1– Основні характеристики МШП для трансиверів WiMAX

№з/п	Фірма-виробник	Тип	Діапазон частот, ГГц	Коефіцієнт шуму, дБ	Коефіцієнт підсилення, дБ
1	MITEQ INC	AFS3-02200230-06-13P-4	2,2-2,3	0,5	38
2	MITEQ INC	AFS3-03400420-10 -13P-6	3,4-4,2	0,5	40
3	MITEQ INC	AFS3-09001100-09-S4	9-11	0,5	26
4	TriQuint	TGA 8399B	6-13	1,75	25
5	TriQuint	TGA2801	28	2,6	16
6	UMS	CHA2069	13-31	2,5	22
7	UMS	CHA2069A	55-65	4	20

### 3.3 Особливості розповсюдження сигналу в залежності від характеру місцевості

При побудові практичних систем з використанням технології Wi-MAX сигнал, що розповсюджується від передавача до приймача зустрічає на своєму шляху ряд перешкод у вигляді стін, міжповерхових перекриттів, меблів, обладнання, дерев та ін., що призводить до загасання сигналу та його завмирання через багатопроменеве розповсюдження. Практично таке явище слід враховувати при робочій частоті до 4 ГГц. При більш високій робочій частоті будують лінії зв'язку, які не мають перешкод на шляху розповсюдження сигналу.

В результаті проведених досліджень, в основному для систем мобільного зв'язку запропоновано ряд моделей, які дозволяють в розрахунках використовувати певні коефіцієнти зменшення сигналу на вході приймача: моделі Лі, Окамури, Хата, COST231-Хата, COST231-Ущлфіш-Ікегами та ін.

В реальних системах потужність сигналу, що приймається приймачем на відстані  $R$  від передавача орієнтовно може бути виражений формулою:

$$P_{np} = \frac{P \cdot R_0^n}{4\pi^2 R^n}, \quad (3.1)$$

де  $R_0$  – опорна відстань, після якої сигнал від антени належить до дальньої зони, практично можна вважати, що  $R_0 = \lambda/2$ ,

$n$  – коефіцієнт, що враховує вплив місцевих умов на розповсюдження сигналу (табл.3.2)

Тоді з врахуванням формули (3.5) коефіцієнт загасання сигналу через перешкоди на шляху розповсюдження приблизно буде виражатись формулою

$$Z = 2^n 4\pi^2 R^n / \lambda^n. \quad (3.2)$$

Таблиця 3.2 – Значення коефіцієнта  $n$  для різних видів середовища

№з/п	Тип середовища	Значення $n$ , дБ
1	Вільний простір	2
2	Зв'язок в міській місцевості	2,7-3,5
3	Зв'язок в міській місцевості з перешкодами	3-5
4	В будівлі на лінії прямого бачення	1.6-1.8
5	В будівлі з перешкодами на лінії розповсюдження сигналу	4-6
6	На підприємствах з перешкодами на лінії розповсюдження сигналу	2-3

### 3.4 Енергетичний розрахунок радіолінії

Для енергетичного розрахунку радіолінії, зокрема визначення необхідної потужності передавача, використаємо рівняння радіолінії з врахуванням формули (3.2)

$$P = \frac{2^n 4\pi^2 R^n kT\Delta f \gamma NL}{\lambda^n G_1 G_2 Q} = \frac{2^n 4\pi^2 R^n P_{np.min} \gamma BL}{\lambda^n G_1 G_2 Q}, \quad (3.3)$$

де  $P$  – потужність передавача;

$G_1 G_2$  – коефіцієнт підсилення антен передавача і приймача

$T$  – приведена до опромінювача антени шумова температур приймальної системи;

$R$  – протяжність лінії зв'язку;

$k$  – стала Больцмана,  $k=1,38 \times 10^{-23}$  Вт/ Гц Град;

$\Delta f$  – смуга пропускання приймального тракту на вході приймача;

$\gamma$  – відношення сигнал/шум на вході приймача;

$N$  – коефіцієнт розширення спектру сигналу;

$L$  – загасання сигналу в лінії зв'язку;

$\lambda$  – довжина хвилі,

$Q$  – коефіцієнт збільшення сигналу при оптимальній фільтрації;

$P_{пр.мін}$  – чутливість приймача,

$$P_{пр.мін} = k T \Delta f. \quad (3.4)$$

Причому, коефіцієнт розширення спектру сигналу буде:

$$N=B/Y, \quad (3.5)$$

де  $B$  - база складного широкосмугового сигналу,

$Y$  - кодова швидкість кодованого сигналу,

Ширина спектру сигналу, який випромінюється передавачем та приймається приймачем буде:

$$\Delta f= \Delta F N, \quad (3.6)$$

де  $\Delta F$ - ширина спектру інформаційного сигналу.

Очевидно, що для забезпечення мінімального значення потужності передавача, що є основним критерієм ефективності радіолінії, необхідно використовувати новітні методи модуляції та кодування сигналу, які

забезпечують мінімальну ширину спектру інформаційного сигналу та мінімальне необхідне значення сигнал/шум.

### **3.5 Розробка трансивера для телекомунікаційної системи в діапазоні 3,5 ГГц з використанням технології Wi-MAX**

Виконаємо розробку терміналу WiMAX з робочою частотою 3,5 ГГц , що буде забезпечувати максимальну швидкість передачі сигналу 120 Мбіт/с на відстань 5000 м.

В даний час на ринку можна знайти готовий трансивер для побудови терміналу WiMAX, наприклад, чіп STLC4370 [3]. Однак значних характеристик радіолінії можна досягти при спеціальній розробці трансивера з використання дискретних інтегральних мікросхем з найкращими досягнутими характеристиками .

Для формування широкосмугового сигналу використаємо метод прямого розширення спектру за допомогою псевдовипадкової послідовності з довжиною  $V=100$  з використання комбінованої амплітудно-фазової маніпуляції КАМ-128. Для зменшення впливу шумів на систему використаємо турбокодування сигналу з кодовою швидкістю  $2/3$  і декодуванням за алгоритмом Вітербі, що дасть додатковий енергетичний вигаш 6 дБ, тобто забезпечить прийом сигналу на рівні 3 дБ для досягнення помилки  $10^{-6}$  .

Тоді ширина спектру сигналу буде:

$$\Delta f = (120 / \log 128) \times 100 \times 3/2 = 2,564 \text{ МГц} .$$

Розробку трансивера будемо здійснювати на основі схеми рис. 3.1.

В якості вхідного МШУ використаємо модуль МШУ AFS3-03100350-06-10P-4 фірми MITQ INC, який має  $K_{ш} = 0,6$  дБ [10].

Суттєвий вплив на ефективну шумову температуру приймача буде мати вхідний НВЧ фільтр.

В якості фільтра використаємо мікροстрічковий фільтр з розімкненими резонаторами [11], який буде мати втрати сигналу в смузі пропускання 0,2 дБ.

Розрахуємо приведену до входу ефективну шумову температуру приймача за формулою:

$$T = T_a + T_0 (M - 1) + T_0 (K_{ш} - 1) M, \quad (3.7)$$

де  $T_a$  - шуми антени, приймаємо  $T_a = 80$  К;

$T_0$  - температура навколишнього середовища,  $T_0 = 293$  К;

$M$  - втрати сигналу в фільтрі.

Відповідно до формули (3.7) отримаємо:

$$T = 80 + 293(1,05-1) + 293(1,15-1)1,05 = 140,8 \text{ К}$$

Приймемо значення  $n=3$  дБ підприємства з перешкодами на лінії розповсюдження сигналу. В якості антен виберемо друковану антену фірми PANORAMA з коефіцієнтом підсилення 21 дБі (рис 3.4).

Використовуючи вибрані значення параметрів за формулою (3.3) розрахуємо необхідну потужність передавача при  $L=1$  (загасання сигналу в атмосфері за умов інтенсивних опадів, див. рис. 3.1)

$$P = \frac{2^{3,2} \cdot 4\pi^2 \cdot 5^{3,2} \cdot 10^{9,6} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 140,8 \cdot 2 \cdot 2564 \cdot 10^6 \cdot 1,25}{125^2 \cdot 10^2 \cdot (0,085)^{3,2}} = 12,33 \text{ мВт}$$

Очевидно, що енергетика радіолінії відповідає встановленим стандартом вимогам. В якості вихідного підсилювача потужності може бути використаний підсилювач НММС-5021 з вихідною потужністю 56 мВт [9].

## 4 ТЕХНІКО – ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Завданням цієї дипломної роботи є дослідження та створення інформаційної системи на базі технології WIMAX. Ці дослідження проведено з метою надання абонентам, спеціалістам та користувачам зручного та швидкісного доступу до мережі Internet. Економічна вигода від впровадження цієї системи полягає в оптимізації часу, який співробітники компанії, спеціалісти та звичайні абоненти витрачають на пошук інформаційних ресурсів Internet.

### 4.1 Розрахунок капітальних витрат на розробку

Капітальні витрати на розробку становлять:

$$K=K_1+K_2 \quad (4.1)$$

де:  $K_1$  – витрати на розробку, грн.;

$K_2$  – витрати на налагодження і дослідну експлуатацію програмного засобу на ПК, грн.;

### 4.2 Складові структури витрат на розробку

Складові структури витрат на розробку та реалізацію розробки розраховуються за формулою:

$$K_1=Z_z+N_z+V_i, \quad (4.2)$$

де:  $Z_z$  – загальна зарплата розробників, грн;

$N_z$  – нарахування на зарплату, грн;

$V_i$  – інші витрати, грн;

Для проведення розрахунків зарплати (Зз) необхідно визначити спеціальність робітників, чисельність робітників і трудомісткість цих робіт. Для розробки проектного рішення потрібно чотири спеціалісти розробники:

- Керівник проекту(К);
- Студент-дипломник(СД);
- Консультант з економічної частини(КЕ);
- Консультант з охорони праці(КОП);

Згідно з штатним розписом сума витрат на оплату праці робітників, з 01.01.2025р. складає:

- Керівник (викладач вищої категорії) – 107,93 грн/год;
- Консультант з економічної частини (викладач вищої категорії) – 107,93 грн/год;
- Консультант з охорони праці(викладач вищої категорії) 93,70 грн/год;
- Час витрачений керівником –  $t_k = 14$  годин.
- Час витрачений консультантом з охорони праці –  $t_{ko} = 1$  година.
- Час витрачений консультантом з економічної частини –  $t_{ке} = 1$  година.
- Час витрачений студентом дипломником  $t_c = 3 \times 50 = 150$  годин.

Витрати на оплату праці керівника проекту:

$$S_k = 14 \text{ роб.год.} \times 107,93 \text{ грн.год.} = 1511,02 \text{ грн.}$$

Витрати на оплату праці консультанта з економічної частини:

$$S_{ке} = 1 \text{ роб.год.} \times 107,93 \text{ грн.год.} = 107,93 \text{ грн.}$$

Витрати на оплату праці консультанта з охорони праці :

$$S_{ко} = 1 \text{ роб.год} \times 93,70 \text{ грн.год.} = 93,70 \text{ грн.}$$

Денна оплата студента дипломника :

$$1510/173 = 8,73 \text{ грн.}$$

1510 – стипендія

173 – місячний фонд робочого часу, годин.

Витрати на оплату праці студента дипломника

$$S_c = 8,73 \times 150 = 1310 \text{ грн.}$$

Витрати на оплату праці робітників проекту становлять

$$Зз = Ск + Ске + Ско + Сс = 1511,02 + 107,93 + 93,70 + 1310 = 3022,65 \text{ грн.}$$

Нарахування на зарплату визначаються в розмірі 22% від фонду оплати праці

$$Нз = Зз \times 22\% = (3022,65 \times 22) / 100 = 664,98 \text{ грн.}$$

де 22 – норматив нарахування на зарплату, %

Інші витрати  $V_i$  відображають витрати які, не враховані в попередніх статтях витрат. Ці витрати розраховуються згідно структури витрат(5%)

$$V_i = 0.05 \times (Зз + Нз) = 0.05 \times (3022,65 + 664,98) = 1843,93 \text{ грн.}$$

$$K1 = Зз + Нз + V_i = 3022,65 + 664,98 + 1843,93 = 5578,56 \text{ грн.}$$

### 4.3 Витрати на відлагодження розробки

Витрати на від лагодження та дослідну експлуатацію розробки

$$K2 = S_{M-г.} \times t \quad (4.3)$$

де  $S_{M-г.}$  – вартість однієї машино-години роботи конкретно ПК, грн./год.;

$t$  – машинний час, витрачений на накладку та дослідну експлуатацію програмного засобу, год.

Вартість 1 машинно-години роботи ПК розраховуємо за складовими витрат на таку роботу:

$$S_{M-г.} = (A + E_n) / \Phi_d \quad (4.4)$$

де  $A$  – амортизація використаного ПК, грн;

$E_n$  – вартість електроенергії, яку споживає ПК, грн.;

$\Phi_d$  – дійсний час від лагодження програми, год.;

Розрахунок складових вартості 1 машино-години роботи ПК:

а) амортизація ПК становить

$$A = (K_T \times N_a) / 100 = (670,31 \times 15\%) / 100 = 100,55 \text{ грн.}$$

Де  $K_T$  – вартість використання ПК, грн..

$N_a$  – норма амортизації ( $N_a=15\%$ )

$$K_T = (K_c \times T_{\text{експ}}) / T_{\text{вик}} = (14625 \times 2,2) / 48 = 670,31 \text{ грн.}$$

де  $K_c$  – вартість компютерної системи, грн.

$T_{\text{експ}}$  – період експлуатації системи 2.2 місяців (50 робочих днів)

$T_{\text{вик}}$  – термін корисного використання 4 роки (48 місяців):

$$K_c = P_{\text{комп}} \times P\$ = 500 \times 41,00 = 14625 \text{ грн.}$$

де  $P_{\text{комп}}$  – вартість комп'ютерної системи у доларах США;

$P\$$  – курс долара США по курсу НБУ на момент купівлі системи.

б) вартість використання електроенергії розраховується за формулою:

$$E_n = (P \times T_f) \times \Phi_d \times K_{\text{вик}} = (0,25 \times 5,60) \times 150 \times 0,8 = 154,8 \text{ грн.}$$

де  $P$  – потужність обчислювальної системи, кВт ( $P=0,25$ )

$K_{\text{вик}}$  – коефіцієнт використання ПК

$T_f$  – ціна за 1кВт/год., грн. ( $T_f = 5,16$  грн.)

$\Phi_d$  – дійсний час від лагодження програми

$$\Phi_d = \text{пр.д.} \times T_{\text{сер}} = 50 \text{ р.дн.} \times 3 \text{ год.} = 150 \text{ год.}$$

Де пр.д. – кількість робочих днів ПК

$T_{\text{сер}} = 3$  год – середній щоденний час роботи ПК

Отже вартість 1 машино-години роботи і від лагодження на ПК становить

$$S_{M-Г} = (100,55 + 154,8) / 150 = 1,70 \text{ грн.}$$

Таким чином сумарні витрати на від лагодження і дослідну експлуатацію проектного рішення становлять:

$$K_2 = S_{M-Г} \times \Phi_d = 1,70 \times 150 = 255 \text{ грн.}$$

Отже, капітальні витрати на розробку проектного рішення за формулою становлять:

$$K = K_1 + K_2 = 5578,56 + 255 = 5833,56 \text{ грн.}$$

Загальний кошторис витрат на розробку проектного рішення приведений в таблиці 4.1

Таблиця 4.1 – Кошторис витрат на розробку проектного рішення

Складові елементи витрат	Умовне позначення	Сума витрат, грн
Витрати на оплату праці	Зз	3022,65
Нарахування на зарплату	Нз	664,98
Інші витрати	Ві	1843,93
Разом	К1	5578,56
Витрати на відлагодження	К2	255
Разом $K=K1+K2$	К	5833,56

## ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЕДІЯЛЬНОСТІ

### 5.1 Загальні положення

Визначення поняття охорони праці дається в ст. 1 Закону України від 14 жовтня 1992 р. «Про охорону праці». Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці. В поняття охорони праці входять і всі ті заходи, що спеціально призначені для створення особливих полегшених умов праці для жінок і неповнолітніх, а також працівників зі зниженою працездатністю. Охорону праці і здоров'я громадян віднесено до пріоритетних напрямків соціальної політики України. Так, Конституція України одним з основних соціальних прав громадян визначає право кожного на належні, безпечні й здорові умови праці, встановлює, що використання праці жінок і неповнолітніх на небезпечних для їхнього здоров'я роботах забороняється. Завдання охорони праці:

- проектування підприємств, технологічних процесів і конструювання обладнання з обов'язковим виконанням вимог охорони праці;
- знаходження оптимальних співвідношень між різними факторами виробничого середовища, що дозволяє забезпечити мінімум несприятливого впливу їх на здоров'я працівників;
- розробка конкретних заходів щодо покращення умов праці та забезпечення її безпеки на основі застосування у виробництві новітніх досягнень науки і техніки;
- застосування раціональних засобів захисту працівників від впливу несприятливих факторів виробничого середовища, а також втілення організаційних заходів, які нейтралізують або послаблюють ступінь їх впливу на організм людини;
- розробка та застосування методів і засобів оцінки ефективності заходів з охорони праці, що плануються і здійснюються.

## 5.2 Організація охорони праці на підприємстві

На сучасному етапі науково-технічного розвитку нашої держави питання охорони праці на підприємствах є одним із найактуальніших.

Належна організація охорони праці, яка відповідає вимогам нормативно-правових актів, є основним заходом профілактики та запобігання виробничому травматизму й професійній захворюваності. Крім того, кожним трудовим договором передбачаються зобов'язання роботодавця щодо забезпечення найманих працівників безпечними умовами праці.

Законодавство України покладає на всіх роботодавців обов'язок щодо забезпечення безпечних і нешкідливих умов праці. Витрати на охорону праці на підприємстві згідно зі ст. 19 Закону повинні становити не менше 0,5% від фонду оплати праці за попередній рік, а за невиконання законодавства про охорону праці до підприємства можуть бути застосовані санкції аж до заборони його експлуатації.

Для того щоб не поставити під загрозу існування підприємства, роботодавцю необхідно:

- створити службу охорони праці.

Згідно зі ст. 15 Закону така служба обов'язково повинна бути створена на підприємстві з кількістю працюючих 50 і більше осіб відповідно до Типового положення про службу охорони праці, затвердженого наказом Держкомітету з нагляду за охороною праці від 15.11.2004 № 255. На підставі цього документа також має бути розроблено Положення про службу охорони праці цього підприємства, визначено структуру такої служби, її чисельність, основні завдання, функції та права її працівників. На підприємствах із кількістю працівників менше 50 осіб функції служби охорони праці можуть виконувати в порядку сумісництва особи, які мають відповідну підготовку.

- Розробити та затвердити на підприємстві положення, інструкції та інші акти з охорони праці.

Обов'язок роботодавця стосовно розробки та затвердження документів, які повинні встановлювати правила виконання робіт і поведінки працівників на території підприємства, у виробничих приміщеннях, на будівельних майдан-чиках і робочих місцях, передбачений ст. 13 Закону про охорону праці.

– Організувати проведення інструктажів з питань охорони праці.

Перед початком роботи нового працівника роботодавець згідно зі ст. 29 КЗпП зобов'язаний проінформувати його під розпис про умови праці, наявні на його робочому місці, у тому числі про всі небезпечні чи шкідливі виробничі фактори, які ще не усунуто, та про можливі наслідки їх впливу на здоров'я працівника, а також про можливі пільги та компенсації за роботу в таких умовах.

– Забезпечити навчання і перевірку знань з питань охорони праці.

Згідно зі ст. 18 Закону працівники, зайняті на роботах з підвищеною безпекою або там, де є потреба у професійному доборі, проходять спеціальне навчання і перевірку знань відповідних нормативно-правових актів з охорони праці. Таке навчання з питань охорони праці може проводитись як безпосередньо на підприємстві, так і навчальним центром.

– Подбати про проведення медичних оглядів.

Згідно зі ст. 169 КЗпП роботодавець зобов'язаний за свої кошти організувати проведення попереднього (при прийнятті на роботу) та періодичних (протягом трудової діяльності) медоглядів працівників, зайнятих на важких роботах, роботах із шкідливими чи небезпечними умовами праці або таких, де є потреба у професійному доборі. Також він зобов'язаний проводити щорічний обов'язковий медогляд осіб віком до 21 року.

– Забезпечити працівників засобами індивідуального захисту.

На роботах із шкідливими й небезпечними умовами праці, а також на роботах, пов'язаних із забрудненням або несприятливими температурними умовами, працівникам згідно зі ст. 164 КЗпП необхідно безкоштовно видавати спеціальний одяг, взуття та інші ЗІЗ.

– Провести атестацію робочих місць.

На підприємствах, де технологічний процес, використовуване обладнання, сировина, матеріали є потенційними джерелами шкідливих і небезпечних виробничих факторів, які можуть негативно впливати на стан здоров'я працюючих, повинна проводитись атестація робочих місць за умовами праці. Така атестація повинна проводитись атестаційною комісією, склад і повноваження якої визначаються наказом по підприємству в строки, передбачені колективним договором, але не рідше одного разу на 5 років. Порядок проведення такої атестації передбачений постановою КМУ від 01.08.1992 № 442. Відомості про результати атестації заносяться в картку умов праці.

– Налагодити облік нещасних випадків.

Згідно зі ст. 22 Закону «Про охорону праці» роботодавець зобов'язаний організувати розслідування та вести облік нещасних випадків, професійних захворювань і аварій у порядку, встановленому постановою КМУ від 30.11.2011 № 1232. За результатами такого розслідування роботодавець повинен скласти акт за формою Н-5 (якщо нещасний випадок визнано таким, що не пов'язаний з виробництвом) або Н-1 (якщо він визнаний пов'язаним з виробництвом). Один із примірників повинен видатися потерпілому або іншій зацікавленій особі не пізніше трьох днів з моменту закінчення розслідування.

### **5.3 Заходи безпеки на робочому місці**

Конструкція робочого місця, його розміри та взаємне розташування його елементів повинні відповідати антропометричним, фізіологічним і психофізіологічним характеристикам людини, а також характеру роботи.

Організація робочих місць повинна забезпечувати стійке положення та вільність рухів працівника, безпеку виконання трудових операції виключати або допускати лише в деяких випадках роботу в незручну позиціях, котрі зумовлюють підвищену втомлюваність.

Загальні принципи організації робочого місця:

- на робочому місці не повинно бути нічого зайвого; всі необхідні для роботи предмети повинні знаходитись поряд з працівником, але не заважати йому;
- ті предмети, котрими користуються частіше, розташовуються ближче, ніж ті предмети, котрими користуються рідше;
- предмети, котрі беруть лівою рукою, повинні знаходитись зліва а ті предмети, котрі беруть правою рукою, повинні знаходитись справа;
- якщо використовують обидві руки, то місце розташування інструментів вибирається з врахуванням зручності захоплення його двома руками;
- небезпечніше, з точки зору можливості травмування обладнання повинне розташовуватись вище, ніж менш небезпечне. Однак слід враховувати, що важкі предмети під час роботи зручніше опускати, ніж піднімати.

#### **5.4 Санітарно-гігієнічні вимоги**

Санітарно-гігієнічні вимоги до умов праці під час виконання роботи мають відповідати визначеним нормативам:

- параметри мікроклімату у приміщенні забезпечували комфортне самопочуття організму. Параметри мікроклімату закритих приміщень унормовані за санітарні норми ДСН 3.3.6.042-99.
- освітлення приміщень та робочих місць забезпечене відповідно до встановлених вимог. Відносно вікна робоче місце розміщено так, що природне світло збоку, переважно з лівого та забезпечувало коефіцієнт природної освітленості не нижче 1,5 %. Освітленість за штучного освітлення в площині робочої поверхні становила 300 – 500 Лк. Відношення яскравості робочих поверхонь було 3:1, а яскравість робочих поверхонь і стін (іншого обладнання) – 5:1. Використана система вимикачів, що дозволяє регулювати інтенсивність штучного освітлення залежно від інтенсивності природного, а також дозволяє освітлювати тільки потрібні для роботи зони приміщення.

– Дотримані вимоги до рівнів шуму та вібрації. Було дотримано допустимих рівнів звукового тиску в октавних смугах частот, еквівалентні рівні звуку на робочих місцях встановлені санітарними нормами виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку ДСН 3.3.6.037-99.

– Надходження свіжого повітря регульоване, виходячи із відповідних нормативних.

– Передбачений захист від шуму та вібрацій.

Дотримані заходи особистої гігієни на робочому місці (підтримання чистоти, миття рук тощо). Заходи особистої гігієни на робочому місці передбачають щоденне вологе прибирання, утримання у чистоті робочого місця, наявність на робочому місці тільки необхідних для роботи засобів. На робочому місці необхідно дотримуватись вимог правил внутрішнього трудового розпорядку.

## ВИСНОВКИ

В роботі розглянуто особливості побудови, функціонування та впровадження нових рішень бездротового доступу на базі технології WiMAX.

Як відомо, мережі широкопasmового радіодоступу - це засіб для високошвидкісної доставки мережних послуг і інформації в те місце, де вони потрібні в цей момент. Вони мають гнучкість, необхідну для досягнення кращого співвідношення продуктивності та ціни, забезпечують множинний доступ, високу швидкість передачі різних типів даних, мінімальну затримку в передачі інформації та гарантують якість обслуговування, як для стаціонарних, так і мобільних абонентів.

Ми активно спостерігаємо, як технологія WiMAX проникає в усі аспекти нашого життя, у малий і великий бізнес, залучає все більше користувачів в усьому світі, як використовують WiMAX разом із дротовим широкопasmовим доступом або замість нього, у комбінації з іншими бездротовими технологіями.

Досліди показали, що цей ринок існує і попит на ньому є. Можливості WiMAX будуть спрямовані на надання комплексних телекомунікаційних послуг. Технологія дозволяє здійснювати передачу даних, надавати доступ до інтернету, будувати локальні мережі, з'єднувати між собою хот-споти, створювати окремі канали для з'єднання базових станцій мобільних операторів на тих ділянках, де вони в цей момент не можуть прокласти оптоволокно.

Зробимо висновок, що переваги від розгортання мереж WiMAX є як для операторів, так і для кінцевих споживачів. Компанії за рахунок великої зони покриття точок доступу WiMAX зможуть зменшити витрати на закупівлю устаткування і розширити асортимент пропонованих послуг завдяки високій пропускній здатності. Для рядових користувачів впровадження нової технології буде означати можливість підключення до інтернету на високій швидкості до бездротових каналів з віддалених місць, фактично постійну підтримку зв'язку з офісом і різноманітні мультимедійні служби (наприклад, відеотелефонія, відео по запиту та ін).

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Оптичні системи передачі / Б.В. Шпаків, В.И. Іванов, В.В. Крухмалев; Під ред. В.И. Іванова. - М.: Радіо і Зв'язок, 1994. - 224 с..
2. Будівництво і технічна експлуатація волоконно-оптичних ліній зв'язку / В.А. Андрєєв, В.А. Бурдин, Б.В. Попов, А.И. Польников; Під ред. Б.В. Попова. - М.: Радіо і Зв'язок, 1995. - 198 с
3. Дьоміна Е.В. і ін. Організація, планування й керування підприємством зв'язку. - М.: Радіо і Зв'язок, 1990. - 352 с.
4. Слепов Н.Н. Синхронні цифрові мережі SDH. , 1997. - 149 с.
5. Уїлкі Ю. Вплив каналних ефектів на характеристики систем МІМО // Електронні компоненти. 2009. № 10. С. 27 – 30.
6. Довгий С.О., Омеляненко Ю.І. Телекомунікації України. Частина друга / За зам. ред. С.О. Довгого. - К.: Укртелеком, 2002. - 352 с.
7. Атлас автомобільних доріг Львівської області. - Львів: Вид-во Львів, 2015..
8. S42022-D3502-N4-1-5618. Технічний опис SMA 1R2 фірми «SIEMENS» / Public Communication Networks Group Hofmannstrasse 51, D-81359Munchen.
9. Корнейчук В.И.,Макаров Т.В., Панфілов И.П.Дроживальський О.П. Проектування волоконно-оптичних систем передачі:Учеб.посібник / Укр. державна академія зв'язку ім. А.С. Попова. Одеса, 1999. 118с.
10. Оптичні кабелі. Основні характеристики та методи випробувань // Керівний нормативний документ з стандартизації Державного комітету зв'язку та інформатизації України. - Київ, 2001.
11. Організація волоконно-оптичних систем передавання двостороннього зв'язку по одному світловоду для міських мереж зв'язку // Рекомендації Державного комітету зв'язку та інформатизації України. Київ, 2000.

**КОПІЇ ОБОВ'ЯЗКОВИХ КРЕСЛЕНЬ**