

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія

Кондратюка»

(повне найменування закладу вищої освіти)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматичної, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему **Проектування радіомережі на базі штучного інтелекту**

Виконав: студент II курсу, групи 6 ДТТ

спеціальності 172 «Телекомунікації та

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

радіотехніка

Лизогуб Є.Г.

(прізвище та ініціали)

Керівник Індик С.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Шефер О.В.

(прізвище та ініціали)

Полтава - 2025 рік

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення – Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

Освітній рівень магістр

Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри автоматики,
електроніки та телекомунікацій**

_____ Олександр ШЕФЕР

“02 ” вересня 2024 року

З А В Д А Н Н Я НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

_____ Лизогубу Єгору Геннадійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. **Тема проекту (роботи)** Проектування радіомережі на базі штучного інтелекту.

керівник проекту (роботи) Індик Сергій Володимирович, к.т.н., доцент,
затверджені наказом вищого навчального закладу від «09» серпня року 2024 рік
№818 – ф,а

2. **Строк подання студентом проекту (роботи)** 20.12.2024

3. **Вихідні дані до проекту (роботи)** технологія CR; топологія безпроводових систем; умови розповсюдження радіосигналів.

4. **Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)** 1. Аналіз принципів функціонування радіомереж на основі протоколу IEEE 802.22 ; 2. Дослідження принципів проектування когнітивних радіомереж; 3. Розробка методики проектування мережі.

5. **Перелік графічного матеріалу**

Аналіз результатів дослідження розповсюдження радіохвиль.
Характеристики моделі когнітивної радіомережі. Методика проектування мережі.

7. Дата видачі завдання 02.09.24

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів	Строк виконання етапів	Примітка
1	Отримання завдання у консультантів	12.09.2024 р.	
2	Підготовка матеріалів до оглядово-аналітичної частини дипломного проекту (роботи)	30.09.2024 р.	
3	Розробка розділу оглядово-аналітичного характеру	03.10.2024 р.	
4	Розробка розділів спеціальної частини дипломного проекту (роботи) з елементами проектування (дослідження)	23.11.2024 р.	
		25.12.2024 р.	
5	Підготовка графічного матеріалу, доповіді, подання проекту (роботи) на рецензію та затвердження	15.01.2025 р.	

Студент

_____ Єгор ЛИЗОГУБ
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

_____ Сергій ІНДИК
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Тема магістерської роботи – Проектування радіомережі на базі штучного інтелекту

В першому розділі роботи було розглянуто принципи функціонування радіомереж на основі протоколу IEEE802.22..11

В другому розділі наведено дослідження принципів проектування радіомереж на основі штучного інтелекту.

В третьому розділі розглядається методика проектування системи когнітивного радіозв'язку з розрахунком радіомережі для сільського району.

Магістерська робота складається з 65 аркушів ПЗ, 22 рисунків, 12 таблиць, 22 використаних джерела.

Ключові слова: безпроводова технологія передачі даних, технологія когнітивного радіо, OFDM, кореляційна функція, BER, SNR, АБГШ.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
1 АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ РАДІОМЕРЕЖ НА ОСНОВІ ПРОТОКОЛУ IEEE 802.22.....	10
1.1 Опис протоколу IEEE 802.22	10
1.2 Огляд особливостей стандарту	13
1.3 Огляд технології, яку використовує стандарт IEEE 802.22 WRAN.....	16
1.4 Огляд антен, з якими працює стандарт.....	18
1.5 Опис архітектури протоколу IEEE 802.22	18
2 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ КОГНІТИВНОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ З РОЗРАХУНКОМ МЕРЕЖІ ДЛЯ СІЛЬСЬКОГО РАЙОНУ	26
2.1 Методика частотно-територіального та мережевого проектування когнітивної радіомережі	26
2.2 Частотно-територіальне планування мережі.....	28
2.2.1 Розрахунок пропускної здатності мережі, розрахунок кількості потенційних абонентів	33
2.2.2 Вибір обладнання транспортної мережі	39
3 РОЗРОБКА ПЕРВИННОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ СИСТЕМИ КОГНІТИВНОГО БЕЗПРОВОДОВОГО ДОСТУПУ	40
3.1 Вибір топології проектованої первинної мережі зв'язку	40
3.2 Синтез кільцевої топології проектованої мережі з мінімальною сумарною довжиною ребер	43

3.3 Вибір топології проєктованої мережі на основі аналізу кількості цифрових потоків, що проходять по кожному із сегментів мережі.....	52
3.4 Розрахунок довжини ділянок регенерації і кількості регенераторів	57
ВИСНОВКИ	65
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	65
ДОДАТОК А (Розділ 1 англійською).....	67

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

КР	- когнітивне радіо
КРС	- когнітивна радіосистема
ПК	- персональний користувач
РЕЗ КР	- радіоелектронні засоби когнітивного радіо
CR	- когнітивне радіо
HDC	- жорсткі рішення локального аналізу
ROC	- робоча характеристика приймального пристрою
SDC	- м'які рішення локального аналізу
SNR	- відношення сигнал/шум

ВСТУП

В умовах України з її великою територією і неоднорідною щільністю населення найбільш характерними у ДВЧ / УВЧ діапазоні є локальні мережі радіоконтролю, що складаються з декількох стаціонарних станцій, що обслуговують окремі великі міста та індустріальні центри. Планувати такі мережі можна шляхом пробного розрахунку зон охоплення радіоконтролем з урахуванням рельєфу місцевості для різних варіантів розміщення стаціонарних СРК (станція радіоконтролю) і вибору для реалізації найкращого варіанта за сукупністю бажаних ознак. За результатами розрахунків з урахуванням необхідної інфраструктури для організації обслуговуються СРК можна ототожнити ті станції, які повинні здійснювати всі види радіоконтролю і бути обслуговуваними, і ті, які можуть бути дистанційними автоматичними пеленгаторами.

Оптимізація існуючої мережі радіоконтролю, особливо у процесі її модернізації, може здійснюватися шляхом пробного віртуального розміщення нових стаціонарних СРК у різних точках території з недостатньо високим ступенем охоплення існуючими станціями з подальшим вибором для реалізації найкращого варіанта. В такий же спосіб, шляхом розрахунку зон охоплення існуючими станціями можна виявити ті з них, які, у силу тих чи інших обставин, не вносять істотного внеску у забезпечення необхідного охоплення і можуть бути кандидатами на перенесення у інші пункти, що забезпечують кращі результати.

Питання ефективного використання діапазону УКХ обумовлено селекцією сигналу на високих частотах (радіо і проміжної). Смуга пропускання приймального тракту в діапазоні УКХ визначається не шириною спектру корисного сигналу, який вимагає її значення в границях 130 - 180 кГц, а заданої величиною коефіцієнту нелінійних викривлень і становить у підсумку 450 - 500 кГц. Дана обставина призводить до істотного зниження ефективності використання діапазону УКХ (максимально можлива кількість радіомовних станцій у діапазоні УКХ скорочується в 2,6 рази). Мінімальний рознос частот між радіомовними станціями складає 400 кГц замість 180 кГц, необхідного з точки

зору ширини спектра сигналу. Необхідність здійснення селекції на радіо-та проміжної частотах ставить також завдання підвищення якості радіоприйому на кордонах суміжних зон обслуговування, тому що за існуючими правилами побудови радіомовних мереж в УКХ діапазоні мінімальний рознос частот радіомовних станцій в суміжних районах обслуговування складає всього 180 кГц, а селективність по сусідньому каналу приймального тракту при цьому становить максимум 3 дБ, тобто практично відсутня. Разом з тим, реалізація складних кіл частотної селекції в трактах радіо та проміжної частот вимагає застосування котушок індуктивності, які практично не реалізуються в інтегральному виконанні.

Сказане вище говорить про актуальність завдання дослідження і розробки радіоприймальних пристроїв, вільних від недоліків супергетеродинного способу прийому і обробки сигналів.

В ході підготовки та виконання роботи автором була використана інформація, у тому числі текст, алгоритми, методики проведення аналізу, досліджень, визначення певних характеристик, параметрів та вихідних даних, розрахунків тощо, які містяться у джерелах [1 – 22], наведених у списку використаних джерел, а також інформація, отримана в результаті консультування з керівником роботи, науковими, науково-педагогічними працівниками та іншими особами, яка є неопублікованими авторськими напрацюваннями (найсучасніша інформація дослідницького, інноваційного характеру), дозволеними для використання автору цієї роботи виключно при виконанні тільки цієї дипломної роботи. Результатами виконання магістерської роботи є розробка методики проектування радіомережі на основі штучного інтелекту.

1 АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ РАДІОМЕРЕЖ НА ОСНОВІ ПРОТОКОЛУ IEEE 802.22

1.1 Опис протоколу IEEE 802.22

Міжнародним інститутом інженерів з електротехніки та електроніки (Institute of Electrical and Electronics Engineers) оголошено про завершення робіт над стандартом безпроводного зв'язку IEEE 802.22, відомим під ім'ям "white space" ("пробіл"). Назва не випадково: для передачі даних передбачається використовувати "прогалини" в телевізійному ДВЧ / УВЧ-діапазоні (54-862 МГц) частот. Цей підхід став можливий за рахунок винаходу "розумного" радіо - технології когнітивної радіопередачі, яка забезпечує підстроювання параметрів приймально-передавальних пристроїв мережі, так щоб передача даних не вилазила на "ліцензійні" частоти. Розробку можна вважати близькою родичкою Wi-Fi (IEEE 802.11) і WiMAX (IEEE 802.16), але ніяк не заміною цих технологій.

IEEE 802.22 WRAN (Wi-Fi) - стандарт безпроводних регіональних мереж, що описує дворівневу архітектуру (рівень РНУ і рівень МАС) з багатоточковим (point-to-multipoint) з'єднанням. Мережа призначена як для роботи з професійними фіксованими базовими станціями, так і з портативними (або фіксованими) призначеними для користувача терміналами (модеми). Обмін даними по стандарту проводиться на «вільних» частотах ДВЧ / УВЧ (VHF / UHF) телевізійного мовлення, що складає смугу від 54 до 862 МГц. За твердженням розробників, мережа в основному призначена для використання у малонаселених пунктах, а також сільській місцевості, де найімовірніше буде достатня кількість вільних каналів в робочій смузі частот стандарту.

Обладнання стандарту IEEE 802.22 призначається для віддалених районів з малою щільністю заселення: подібної апаратури властива висока далекобійність, відносно низька швидкість передачі даних і мала кількість доступних каналів обміну інформацією. Дивно, але передавачі стандарту IEEE 802.22 можуть встановлювати зв'язок на дистанції до ста кілометрів - правда, більше 22 Мбіт/с з

таким з'єднанням досягти не вдасться. Важливо і те, що для взаємодії обладнання не потрібна пряма видимість - сигнал добре проникає у важкодоступні райони.

Створити IEEE 802.22 стало можливо завдяки використанню частотного діапазону, який раніше вважався недоторканим. Wi-Fi, WiMAX, Bluetooth і LTE працюють на частотах у декілька гігагерц, в той час як IEEE 802.22 займає частотний простір від декількох десятків до декількох сотень мегагерц. Цей же діапазон вже давно використовується аналоговим телебаченням, однак, зі слів розробників стандарту, це не повинно створювати проблем.

Як це відбувається? Система постійно аналізує спектр радіосигналу, що оточує фонові сигнали, а також поведінку користувачів мережі. Базова станція, зібравши всю інформацію про частотний діапазон і використовуючи інформацію про своє місцезнаходження (по GPS), визначає, які частоти можуть бути використані для встановлення зв'язку з користувачами мережі. При вже встановленому зв'язку система періодично сканує частотний діапазон на випадок появи нових сигналів і при виявленні таких відразу ж переходить на інші частоти.

Розробники відзначають, що IEEE 802.22 WRAN є однією з перших специфікацій, що використовують у повній мірі когнітивні технології у радіозв'язку. Таким чином, стандарт дозволяє ефективно використовувати наявний спектр частот, без необхідності отримання ліцензій. В результаті це дозволяє досягти швидкості передачі даних до 22 Мбіт /с і зону покриття з радіусом до 100 км.

Може виникнути питання навіщо потрібні нові стандарти бездротового зв'язку, коли вже є Wi-Fi, WiMAX і LTE? На це питання є відповідь: хоча б для того, щоб забезпечити зону покриття радіусом до 100 км і передачу даних до 22 Мбіт/с.

Специфікація 802.22 з'явилася завдяки роботам професора Джозефа Мітоли III, що опублікував результати своїх досліджень в 1999 р. спільно з Джеральдом Магуайром. Концепція, названа професором "cognitive radio» («когнітивне радіо»), дозволяє системам зв'язку використовувати "зайняті" частоти для передачі своїх даних за рахунок наявних у смузі "прогалин". Однак закон

забороняв працювати з зарезервованими частотними діапазонами, або можливість з'являлася при покупці дорогих ліцензій. Законодавча база заважала просуванню технології. Лише в 2004 р. Федеральний агентство по зв'язку (Federal Communications Commission) США внесло поправки, що дають можливість не ліцензованим абонентам використовувати ліцензійні смуги за умови, що ті не вносять перешкод у роботу законних користувачів. Ця подія ініціювала появу у листопаді 2004 р. в "стінах" IEEE робочої групи, яка стала вести розробку стандарту 802.22 з когнітивним радіозв'язком у якості базової технології. Остаточний реліз IEEE 802.22-2011 з'явився лише через сім років.

Новий стандарт було спроектовано для безпроводних регіональних мереж (Wireless Regional Area Network, WRAN). Це передбачає покриття зон радіусом у десятки кілометрів. Специфікація дозволить провайдером інтернет-послуг забезпечити жителям сільських районів доступ до широкосмугового доступу в Мережу там, де його ще немає. Збільшення радіусу дії вдалося досягти завдяки зменшенню робочих частот, зазвичай використовуваних в Wi-Fi, WiMax або LTE для передачі інформації. Підбір оптимальних частот залежить від багатьох факторів. Для забезпечення найбільшої дальності зі збереженням розумною потужності і прийнятною смугою пропускання кращим чином підійшли частоти діапазону від 54 до 862 МГц, так звані телевізійні частоти. Ширина смуги одного телевізійного каналу у США, Японії і більшій частині Центральної і Південної Америки становить 6 МГц, для України і більшості інших країн ця величина дорівнює 8 МГц, але зустрічаються також стандарти з 7-мегагерцовою смугою, наприклад у Австралії, Бельгії та Люксембурзі. Тому у 802.22 передбачається використовувати ширину смуги одного каналу у 6 (8, 7) МГц.

Існуюча система телемовлення може служити прикладом успішного використання цього діапазону для покриття великих площ. До того ж на дані частоти не впливають стіни і перешкоди. Однак у використанні ДВЧ / УВЧ є і недолік: менші частоти (довгі хвилі) мають потребу в більш габаритних антенних системах. Крім скрізь використовуваних систем аналогового телебачення NTSC (США, Канада, Японія), PAL (Європа), SECAM (Франція, Греція, Росія) діапазон

офіційно закріплений за радіозв'язком державних служб (поліції, протипожежної служби і т. д.) і комерційних сервісів (таксі і т. д.). У даній смузі також працюють бездротові мікрофони, системи цифрового телебачення ATSC / DVB-T і багато інших - важливо, що нікому з них не можна заважати.

1.2 Огляд особливостей стандарту

До особливостей даного стандарту можна віднести :

1) призначення - широкосмуговий безпроводний доступ до Інтернету для сільської місцевості ;

2) ядро- технологія когнітивної радіопередачі, призначена для без ліцензійного використання частот телевізійного діапазону ;

3) цільова аудиторія - промисловість, уряд і керуючі органи, академічні організації, провайдери ;

4) проекти - IEEE 802.22.1, IEEE 802.22.2 ;

5) портативність - можна використовувати у русі до 114 км/год ;

6) топологія мережі - багатоточкова (Point-to-Multipoint) ;

7) радіус зони покриття - 10-100 км (для фіксованого базової станції і модему);

8) потужність випромінювання - 4 Вт (під потужністю випромінювання розуміється ефективна ізотропно випромінювана потужність, EIRP) ;

9) антени - на базовій станції використовується ненаправлена (або секторна) приймально-передавальна антена, а на стороні абонента спрямована антена з 14 дБ пригніченням заднього пелюстка; крім цього, є ненаправлена антена для сканування частотного діапазону (когнітивний радіозв'язок) ;

10) гео-позиціонування - GPS або наземна (необхідно для функціонування системи).

Параметри діапазонів, які використовує стандарт наведені в таблиці 1.1

Таблиця 1.1- Параметри діапазонів, які використовує стандарт

Частотний діапазон	Границі діапазону	Хвильовий діапазон	Границі діапазону
Середні (СЧ)	0.3-3 МГц	Гектометрові	1-0.1 км
Високі (ВЧ)	3-30 МГц	Декаметрові	100-10 м
Дуже високі (ДВЧ)	30-300 МГц	Метрові	10-1 м
Ультрависокі (УВЧ)	0.3-3 ГГц	Дециметрові	1-0.1 м
Надвисокі (НВЧ)	3-30 ГГц	Сантиметрові	10-1 см
Надто високі (НВЧ)	30-300 ГГц	Міліметрові	10-1 мм
Гіпервисокі (ГВЧ)	0.3-3 ТГц	Дециміліметрові	1-0.1 мм

Головна відмінність цього стандарту від попередніх, наприклад, 802.11, в «далекобійності». Сигнал єдиною передавальною станцією можна буде піймати на відстані до 100 кілометрів. Діапазон частот, з яким працює стандарт безпроводного зв'язку 802.22, займає спектр від 54 МГц до 698 МГц. Таким чином, передачу даних можна здійснювати зі швидкістю до 22 Мбіт/с на відстанях до 100 кілометрів, на основі єдиної базової станції. Можливо, саме цей стандарт допоможе залучити у Глобальну Мережу віддалені регіони, жителі яких до цих пір залишаються без Інтернету, або ж платять за доступ до Мережі величезні гроші.

Слід відзначити, що новий стандарт використовує частотний діапазон, що залишився порожнім після того як були виведені з ужитку деякі стандарти аналогового телебачення.

Така дальність дії зв'язку нового стандарту має на увазі, що наприклад, чисто теоретично, для того, щоб накрити покриттям нового зв'язку стандарту всю територію Сполучених Штатів, буде потрібно всього 307 точок доступу. Але на практиці справа буде обстоять трохи інакше, і точок доступу знадобиться більше, що пов'язано, в першу чергу, з наявністю гір, лісів та інших об'єктів, що перешкоджають поширенню радіосигналів.

Згідно з новим IEEE стандартом, обладнання, сумісне зі стандартом 802.22, буде працювати на одній з частот вільного діапазону від 54 МГц до 698 МГц. Хвилі цього діапазону можуть поширюватися на набагато більші відстані, ніж хвилі діапазону 2.4 ГГц, які є основою стандарту Wi-Fi у даний час. Завдяки цьому стане можливим розгортання регіональних безпроводних мереж WRAN (wireless regional area networks).

Звичайно, 22 Мбіт/с за мірками теперішнього часу - це не така вже й велика швидкість для тих, хто звик до прямого підключення за допомогою Ethernet або оптоволокна, але, варто зазначити, що це значення є теоретичною максимальною швидкістю, яку можна досягти у радіоканалі, що працює у зазначеному вище частотному діапазоні.

Звичайно, прийняття стандарту 802.22 важко недооцінити. За допомогою обладнання цього стандарту є можливість забезпечити покриття сільських районів, жителі яких раніше могли тільки мріяти про Інтернет у їхньому будинку. Також, новий стандарт, буде корисним країнам, що розвиваються і відчують труднощі в забезпеченні недорогими і надійними комунікаціями.

Новий стандарт заснований на характеристиках телевізійних діапазонів VHF (ДВЧ, 30-300 МГц) і UHF (УВЧ, 300-3000 МГц), які з приходом цифрового телебачення у значній мірі стали вільними, і здатний забезпечити безпроводний широкосмуговий зв'язок на відстані до 100 км навколо передавача.

Більш того, мережі WRAN зможуть запропонувати цілком значну швидкість до 22 Мбіт/с на канал, а використання частот, не зайнятих телевізійними каналами, дозволяє досягти того, що сигнал не буде перетинатися з існуючими станціями ТВ-мовлення.

IEEE зазначає, що технологія особливо корисна для обслуговування малонаселених сільських районів і країн, що розвиваються, де велика частина телевізійних каналів не зайняті. З утвердженням стандарту комерційні організації можуть починати створення пристроїв, сумісних з технологією 802.22.

1.3 Огляд технології, яку використовує стандарт IEEE 802.22 WRAN

Стандарт IEEE 802.22 WRAN використовує технологію когнітивної радіопередачі, яка забезпечує підстроювання параметрів приймально-передавальних пристроїв мережі так, щоб передача даних не вилазила на «ліцензійні» частоти. Як це відбувається? Система постійно аналізує спектр радіосигналу, що оточують фонові сигнали, а також поведінку користувачів мережі. Базова станція, зібравши всю інформацію по частотному діапазону і використовуючи інформацію про своє місце розташування (по GPS), визначає які частоти можуть бути використані для встановлення зв'язку з користувачами мережі. При вже встановленому зв'язку, система періодично сканує частотний діапазон на випадок появи нових сигналів, і при виявленні таких, відразу ж перебудовується на інші частоти. Слід зазначити, що сканування частотного діапазону відбувається на стороні абонента, що дозволяє мати актуальну інформацію про обстановку в зоні покриття. Розробники відзначають, що IEEE 802.22 WRAN є однією з перших специфікацій, що використовують в повній мірі когнітивні технології в радіозв'язку. Таким чином, стандарт дозволяє ефективно використовувати наявний спектр частот, без необхідності отримання ліцензій.

Розробники розрізняють кілька основних «ліцензійних» систем, що використовують робочий діапазон стандарту:

1) аналогове телебачення;

у Північній Америці мовлення засноване на NTSC, а в Європі на PAL. Рівень при якому канал буде звільнений відповідає -94 дБм (дБ від 1 мВт), який вимірюється на піку синхроімпульсів. У Північній Америці використовується стандарт DTV (ATSC), в Європі DVB-T. Рівень сигналу для DTV (ATSC) складає -116 дБм.

2) безпроводні мікрофони;

у даній області стандартів не існує, і вони можуть мати різні формати. В основному для передачі використовується FM із смугою частот в 200 кГц. Рівень сигналу -107 дБм. Для того щоб вміло і нешкідливо використовувати "прогалини" у вже використовуваних частотах, передбачено цілий ряд когнітивних механізмів.

3) сканування (sensing) робочого спектра частот;

дозволяє виявляти зайняті канали, ця процедура проходить в обов'язковому порядку при ініціалізації мережі. Також інформація про частоти періодично оновлюється при роботі системи. Управління скануванням здійснюється базовою станцією, яка не тільки посилає управляючі команди для користувача устаткування, а й сама виробляє розвідку спектра і пошук нових абонентів. Така система дозволяє актуально підтримати інформацію про стан ефіру у всій зоні покриття базової станції і своєчасно конфігурувати мережу.

4) реєстрація та відстеження користувацького обладнання;

Реєстрація та відстеження - необхідна для ефективної організації частотного простору і швидкого підключення нових абонентів до мережі.

5) єдина база даних ліцензійних користувачів;

єдина база даних - діапазону спочатку запобігає роботу мережі на постійно зайнятих місцевими службами або регіональними телевізійними каналами частотах.

6) геолокація;

дозволяє дізнатися регіон розміщення і по базі даних визначити, які канали зайняті в конкретній місцевості, а також обрати оптимальний маршрут для передачі

пакетів інформації. В рамках специфікації передбачається застосовувати супутникове або наземне позиціонування. Для супутникової геолокації у кожного абонента буде розташовано GPS-обладнання. Інформація про місцезнаходження передається на базову станцію по протоколу NMEA 0183. Це текстовий протокол зв'язку морських навігаційних систем, повсюдно застосовується в GPS.

7) механізм спільного співіснування (coexistence) систем;

передбачає організацію спектра, так щоб стандарт не вносив перешкоди в роботу ліцензійних користувачів, а також організував внутрішньо системне ранжування абонентів в робочій смузі.

1.4 Огляд антен, з якими працює стандарт

Мережа призначена як для роботи з професійними фіксованими базовими станціями, так і з портативними (або фіксованими) призначеними для користувача терміналами (модемами). Для охоплення великих площ необхідні відповідні потужності сигналів. У специфікації передбачається, що для покриття зони з радіусом в 30 км знадобиться потужність випромінювання в 4 Вт. На базовій станції для цих цілей розміщується ненаправлена антена, щоб рівномірно покрити сигналом всю площу. При необхідності ізотропну антену можна замінити секторною. Така конфігурація дозволить ефективніше охоплювати зону з нерівномірним розподілом абонентів за площею або зі складним розміщенням декількох базових станцій. На стороні клієнта навпаки застосовується вузьконаправлена антена з орієнтуванням у бік базової станції (або базової станції з максимальним сигналом, якщо їх декілька). Крім того, в клієнтському обладнанні є скануюча (sensing) антена для функціонування когнітивних механізмів. При використанні супутникового позиціонування також може бути розміщена GPS-антена.

Важливо розуміти відмінність стандарту IEEE 802.22 від інших специфікацій, особливо від IEEE 802.16 (WiMax), з яким його часто порівнюють. Основна різниця у тому, що 802.22 орієнтований на сільські місцевості та віддалені регіони. Його радіус зони покриття в рази більше. Крім того, 802.22 є першим у світі стандартом, що використовує когнітивні технології для спільного використання оптимального частотного діапазону і не потребує оформлення ліцензій на використання певних частот.

1.5 Опис архітектури протоколу IEEE 802.22

Найбільш важливими вимогами з боку розробників до стандарту IEEE 802.22 були гнучкість і адаптивність системи, оскільки обладнанню доводиться працювати у спектрі з ліцензійними абонентами. У підсумку стандарт, що описує РНУ-(Physical) і МАС-рівні (Media Access Control) моделі OSI мережі, отримав особливу архітектуру.

Принципи організації РНУ рівня

Між базовою станцією та обладнанням, призначеним для користувача на фізичному рівні організовано двосторонній зв'язок з часовим поділом (Time Division Duplexing, TDD). В такому поділі вхідні і вихідні дані передаються на одній частоті, але в різні проміжки часу. Якщо потрібно змінити пріоритет по швидкості, то немає нічого простіше - досить продовжити виділений час для одного потоку даних і скоротити для іншого.

Як транспортний механізм у 802.22 використовується технологія мультиплексування з ортогональним частотно-часовим поділом каналів (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM). Аналогічна схема застосовується у WiMax. Суть її полягає у тому, що деякий потік даних розділяється між декількома спеціальними частотами. Кожен підпотік модулюється за своєю схемою.

У специфікації передбачено три види схем модуляції: квадратурна фазова маніпуляція (Quadrature Phase Shift Key, QPSK), квадратурна амплітудна маніпуляція порядку 16 і 64 (Quadrature Amplitude Modulation, 16 QAM і 64 QAM). Схеми відрізняються між собою кількістю інформації, яку можна передати одним символом. Та чи інша схема модуляції обирається виходячи з умов передачі. Чим вище швидкість передачі, тим нижче її надійність (тим вища ймовірність виникнення помилки). Тому якщо абонент мережі розташований далеко від базової станції і рівень сигналу під час зв'язку не дуже високий, то краще змінити схему модуляції, наприклад з 16 QAM на більш повільну, але зате стабільну QPSK. Система постійно адаптується, і для кожного користувача проводиться балансування оптимального режиму між швидкістю і завадостійкістю.

Важливим для стандарту є особливість OFDM протидіяти багатопроменевому поширенню. Даний ефект виникає при наявності яких-небудь перешкод між базовою станцією і абонентом. Сигнал може випробувати багато відбиттів від різноманітних об'єктів. В кінцевому рахунку до приймального пристрою приходять не один сигнал, а кілька з деякою затримкою, що може

привести до міжсимвольної інтерференції. Проти цього у OFDM застосовують спеціальну вставку, так званий циклічний префікс.

Для більш стабільної роботи у 802.22 передбачено використання кодів, що дозволяють коригувати помилки. У тому числі коди Галлагера (Gallager), які на даний момент становлять краще рішення для передачі інформації по каналу зв'язку з шумами в обмеженій смузі.

Для організації доступу до каналу зв'язку декількох абонентів одночасно застосовується техніка частотно-часового поділу (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA). Це унікальна технологія, що дозволяє використовувати доступний частотний простір максимально вигідним способом. OFDMA вже відмінно себе зарекомендувала у таких стандартах, як WiMax і LTE. У механізмі OFDM доступні спеціальні частоти діляться між користувачами мережі.

Спектральна ефективність за стандартом може варіюватися від 0,624 до 3,12 Біт/с/Гц. Ця величина характеризує швидкість передачі даних в заданій смузі частот. Чим вище значення, тим більшою пропускну здатністю володіє система, однак зі зростанням спектральної ефективності зменшується завадостійкість. Для компенсації низької пропускну здатності каналу при мінімальній спектральній ефективності використовується методика канального об'єднання (channel bonding). Суть методики полягає у використанні до трьох телевізійних каналів одночасно, щоб за рахунок ширини смуги в 18 (21, 24) МГц забезпечити прийнятну швидкість передачі.

Для захисту ліцензійних каналів необхідно витримувати частотний інтервал, щоб унеможливити виникнення перешкод. Ширину частотного інтервалу рекомендують робити порівнянної з шириною одного каналу. Фактично необхідно мати у ДВЧ / УВЧ-діапазоні прогалини шириною від трьох каналів (один інформаційний плюс два захисних з боків) і більше. Ця вимога ще раз підкреслює, що доцільно розгортати IEEE 802.22 у сільській та малонаселеній місцевості, де ефір відносно вільний.

При проектуванні стандарту, розробники були орієнтовані на те, щоб рівень продуктивності системи був анітрохи не гірше ніж у DSL. Для цього необхідно

було забезпечити швидкість вхідного (downlink) з'єднання (в межах дії базової станції) близько 1.5 Мбіт/с, а швидкість вихідного (uplink) 384 Кбіт/с для 12 одночасно працюючих у мережі користувачів. Забезпечення такої швидкості для користувачів вимагає, щоб пропускна здатність каналу для вхідного з'єднання становила $1.5 * 12 = 18$ Мбіт/с. Тому, при ширині смуги телевізійного каналу в 6 МГц (для США, великої частини Центральної і Південної Америки та Японії, в іншому світі смуга в основному 8 МГц), необхідна спектральна ефективність склала $C = 18/6 = 3$ біт/(с*Гц). На базі цих принципів було сформований стандарт, параметри якого зручно звести у таблицю 1.2.

Таблиця 1.2 - Параметри стандарту IEEE 802.22

Смуга каналу (МГц)	6, (7, 8)
Мультиплексування	OFDM, OFDMA (uplink)
Модуляція	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Кодування	Згортальні коди, Block Turbo Code
Пропускна здатність (downlink)	18 Мбіт/сек
Спектральна ефективність	0.624–3.12 біт/(с*Гц)
Користувальницька продуктивність	Downlink: 1.5 Мбіт/с Uplink: 384 Кбіт/сек

Схема OFDM була прийнята для того, щоб забезпечити стійку роботу системи в умовах багатопроменевого поширення і селективного завмирання сигналу, а також для забезпечення високої пропускної здатності та ефективного використання смуги пропускання. В залежності від різних умов стандарт дозволяє використовувати різні схеми модуляції: QPSK, 16-QAM або 64-QAM. Причому у рамках стандарту не виключається адаптивна динамічна конфігурація модуляції для конкретного користувача. Для забезпечення необхідної заявленої продуктивності, стандартом була введена система «Channel Bonding» (канальне з'єднання). Дана система дає змогу використовувати для передачі більш одного

телевізійного каналу за раз, щоб забезпечити потрібну пропускну здатність. Це є можливим, з причини того, що дуже часто у різних країнах між каналами, що віщають залишають 2 і більше вільних каналів, щоб позбутися перехресних перешкод. На практиці передбачається обмежитися 3 вільними каналами.

Принципи організації MAC рівня

Рівень керування доступом до середовища (Media Access Control) організовує адресацію і контроль доступу до мережі. MAC, заснований на когнітивних технологіях, повинен мати дуже динамічну і гнучку архітектуру, щоб оперативно реагувати на зміни в мережі. Для обміну даними в 802.22 використовуються суперфрейми (superframe). Тривалість одного суперфрейма складає 160 мс. На початку кожного суперфрейма розташована спеціальна преамбула (preamble) і контрольний заголовок суперфрейма (superframe control header, далі - SCH). По кожному з доступних і відповідають усім вимогам каналів базова станція посилає суперфрейми. Абоненти, що знаходяться в зоні дії станції і ще не підключені до мережі, "слухають" вільні канали на наявність суперфреймів. Отримавши дані, абонентське обладнання витягує з SCH всю необхідну інформацію для ініціалізації мережевого з'єднання. Кожен суперфрейм складається з фреймів (frame). Тривалість одного кадру становить 10 мс, відповідно в одному суперфреймі 16 фреймів. Фрейми є безпосередніми носіями даних.

Ініціалізація мережі в 802.22 складніше, ніж в інших безпроводних мережах. Все ускладнюється тим, що немає спочатку певного каналу зв'язку. Таким чином, обладнанню, призначеному для користувача спочатку необхідно просканувати сітку частот і скласти карту всього діапазону. Потім у вільних і відповідних прогалини шукати SCH базовій станції. Після того як SCH буде отриманий, модем абонента дає про себе знати базовій станції і залишається в каналі на час дії суперфрейма. Якщо за цей час модем отримує відповідь, то відбувається ініціалізація і підключення до мережі. Після встановлення з'єднання інформація про стан каналів відправляється на базову станцію.

Як говорилося вище, під час роботи в мережі базова станція періодично посилає команди абонентському обладнанню для запуску сканування діапазону на наявність ліцензійних користувачів. При цьому існують різних алгоритми сканування, які визначають граничний рівень сигналу в каналі, час сканування, діапазон, ймовірність виявлення помилкової тривоги. Існують певні порогові значення сигналів, при яких вони будуть інтерпретуватися як ліцензійні користувачі. Всі ці параметри впливають на успішність отримання достовірної частотної сітки в регіоні. Базова станція може розподіляти навантаження між абонентами при скануванні частотного спектра. Якщо основна базова станція довго "мовчить", то тоді абонентське обладнання шукає маяки від іншої сусідньої станції і в разі успішного пошуку підключається до неї. Моделювання мережі показало, що навіть при великому скупченні поруч розташованих станцій термінали абонентів швидко розподіляються між ними. В результаті навантаження на базові станції стає оптимальною.

Вимоги розробників по гнучкості архітектури стандарту породили ряд нових проблем, що наклало певні вимоги на структуру та принципи функціонування проекту, в тому числі і на MAC рівні. У першу чергу виникли проблеми з ініціалізацією і входом в мережу. Суть проблематики пов'язана з тим, що в мережі відсутній фіксований канал, а також немає можливості послати пілот-сигнал для пошуку мережі (каналу). Тому, спочатку доводиться сканувати весь частотний діапазон для відстеження доступних вільних каналів, а потім вже в знайденому відфільтрованому частотному діапазоні проводити сканування пілотним сигналом базових станцій, і вже потім підключатися до мережі.

Специфіка стандарту вимагає і певну організацію обміну інформацією. Для забезпечення передачі даних між користувачем і базовою станцією використовується дуплексний зв'язок з часовим поділом каналів (TDD). Це найбільш оптимальна схема, оскільки необхідний всього 1 канал для обміну, що простіше для контролювання на відміну від того ж FDD (частотне розділення), а також дозволяє динамічно змінювати пропускну здатність вхідного і вихідного потоків. Для такого роду передачі використовується особлива фреймова

структура даних. В рамках стандарту вводять фрейми (Frames) і супер-фрейми (Superframes).

- тривалість супер-фрейму: 160 мс ;
- тривалість кадру: 10 мс ;
- кожен супер-фрейм складається з фреймів;
- супер-фрейми забезпечують повну синхронізацію всієї роботи мережі, зокрема вони забезпечують ініціалізацію доступу до мережі і вхід в мережу. На початку кожного супер-фрейму є преамбула і керуючий заголовок супер-фрейму (Superframe Control Header), або коротко SCH. Заголовок і преамбула містять в собі всю необхідну інформацію для всіх нових абонентів, які хочуть підключитися до базової станції ;

- кожен фрейм поділяється на два підфрейма: вхідний (downlink sub-frame (DL)) і вихідний (uplink sub-frame (UL)). Кордон між двома підфреймами може змінюватись в залежності від необхідної пропускнуої спроможності ;

- кожен фрейм містить CBP (Co-existence Beacon Protocol) пакет, який містить в собі технічну інформацію про мережу, наприклад, гео-позиція, вільні канали, команди від базової станції клієнтам і т.д.

Зрештою, стандарт було спроектовано таким чином, щоб уникати конфліктів з існуючими каналами телемовлення, а також іншими системами радіопередач в даному частотному діапазоні. В результаті, система вийшла адаптивною, завдяки використанню когнітивних технологій, що також дає змогу позбутися різних перешкод і змін в поширенні радіохвиль, які періодично виникають на практиці.

Стандарт підтримує різні системи QoS, які наведені в таблиці 1.3

Таблиця 1.3 - Системи QoS для стандарту IEEE 802.22

QoS	додаток
UGS	VoIP, T1 / E1
rtPS	MPEG video streaming

nrtPS	FTP
BE	E-mail
Contention	BW запити і т.д.

Специфікація стандарту IEEE 802.22 проста і легка у розумінні. Розробники намагалися зробити найбільш оптимальну технологію обміну даними для відносно великих відстаней і прийнятних швидкостей передачі. Унікальний підхід з використанням когнітивних методів радіопередачі дозволяє ще на етапі проектування стандарту позбутися від ряду проблем, у тому числі на законодавчому рівні. Звичайно, не варто очікувати повністю без ліцензійного поширення технології, проте специфіка роботи пристроїв повинна забезпечити більш просту процедуру локалізації технології. Швидше за все першим стоїть очікувати появу пристроїв IEEE 802.22 на американському ринку на увазі вже врегульованого правового питання.

IEEE 802.22, що з'явився порівняно недавно, приніс із собою нові механізми, які можуть дозволити донести якісний зв'язок навіть у найвіддаленіші куточки планети. Унікальний підхід до вирішення питання про поділ частотного діапазону, який в Україні стоїть гостро, може зробити 802.22 найпоширенішим стандартом безпроводного зв'язку для покриття великих площ. Для цього застосовуються приватне сканування робочого діапазону, постійний моніторинг та відстеження змін, а також процедура спільного використання спектра з ліцензійними користувачами.

2 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ КОГНІТИВНОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ З РОЗРАХУНКОМ МЕРЕЖІ ДЛЯ СІЛЬСЬКОГО РАЙОНУ

Оскільки у даній дипломній роботі розглядається протокол IEEE 802.22, основне призначення якого забезпечення високошвидкісним доступом до Інтернет мешканців сільських та малозаселених районів, цілком доречно розробити когнітивну радіомережу для сільського району.

Ця мережа буде будуватися для Дергачівського району Харківської області.

2.1 Методика частотно-територіального та мережевого проектування когнітивної радіомережі

Розробка методики проектування когнітивної радіомережі включає в себе ряд особливостей та факторів які потрібно враховувати при проектуванні мережі, які відображені на рисунку 2.1

Для забезпечення сільського населення високошвидкісним доступом до мережі Інтернет необхідно виконати перелік завдань :

- проводимо розрахунок потенційних абонентів для даного району. Існують різні моделі стільникового планування. Найбільш відомі з них: Окамура-Хата і Волфіш-Ікегамі. Ми вибрали SUI (Stanford University Interim), яка є моделлю частотно-адаптованої до 4 ГГц. На відміну від інших моделей, які враховують будівлі, SUI має три різних профілю місцевості: А, В і С. Профіль А призначений для великих втрат, що включає гори, густу рослинність та ін. (але не будівлі). В - для середніх втрат і С - для незначних втрат (наприклад відкрита місцевість).

- процес планування радіомережі складається з двох етапів:

- а) формування максимальної площі покриття;
- б) забезпечення необхідної ємності.

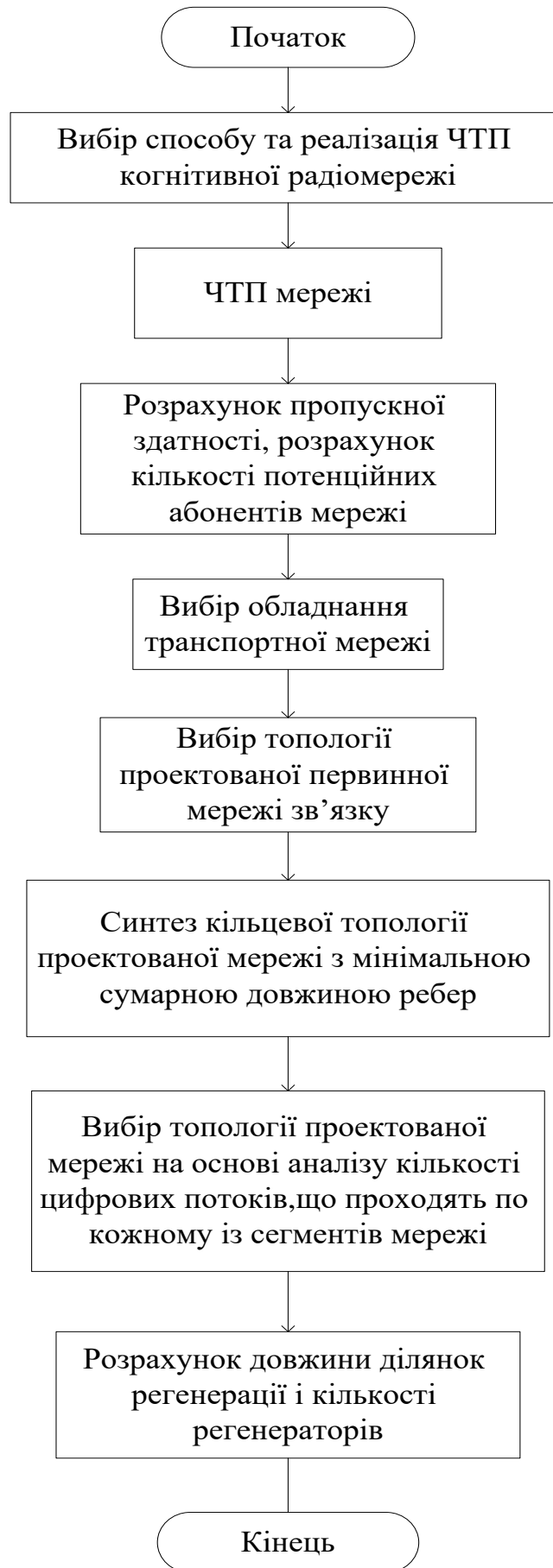


Рисунок 2.1 – Алгоритм реалізації методики проектування мережі

- планування радіомережі буде проводитися в сільській місцевості, а це означає, що щільність абонентів буде невисока і базові станції повинні встановлюватися на максимальному видаленні один від одного з метою закрити якомога більшу територію.

- устаткування транспортної мережі слід вибирати, в першу чергу керуючись особливостями технології LTE, що найкраще відображає жорсткі вимоги до реалізації технології когнітивного радіо, а так само, щоб дане устаткування відповідало вимогам надійності, відрізнялося ефективністю, гнучкістю, компактністю, володіло широким набором функцій і задовольняло поняттю «ціна - якість». Головною умовою при виборі обладнання транспортної мережі є надійна передача даних користувачів згідно розрахованої пропускної здатності мережі.

- найбільш характерною топологією мереж SDH є кільцева топологія, при значній відмінності кількості вхідних та вихідних цифрових потоків у вузлах мережі використання такої топології не завжди виправдано, тому що приводить до завищення необхідної кількості каналів, що циркулюють по кільцю, і, як наслідок, до необхідності використання SDH мультиплексорів ведення/виведення більш високого рівня.

- для вибору топології проекрованої мережі спочатку необхідно визначити кількість вхідних та вихідних цифрових потоків (2 Мбіт/сек) для кожного вузла.

2.2 Частотно-територіальне планування мережі

Дергачівський район розташовано на північному заході Харківської області. Чисельність населення на даний час складає 96,3 тис. осіб. Площа території – близько 900 км². Район розташовано на хвильовій рівнині, і рельєф місцевості виходить без різких перепадів висот.

Припустимо, що кількість абонентів, що користуються Інтернет в даному районі складає 40% від загальної кількості жителів.

Існують різні моделі стільникового планування. Найбільш відомі з них: Окамура-Хата і Волфіш-Ікегамі. Але вони можуть оперувати частотами лише до

2 ГГц, тому нам потрібно обрати іншу модель. Ми вибрали SUI (Stanford University Interim), яка є моделлю частотно-адаптованої до 4 ГГц. На відміну від інших моделей, які враховують будівлі, SUI має три різних профілю місцевості: А, В і С. Профіль А призначений для великих втрат, що включає гори, густу рослинність та ін. (але не будівлі). В - для середніх втрат і С - для незначних втрат (наприклад відкрита місцевість).

Втрати в моделі SUI можна розрахувати за наступним рівнянням:

$$PL = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X + X_h + s, d > d_0, \quad (2.1)$$

де d - відстань між абонентською і базовою станціями в метрах;

d_0 - стандартна відстань у 100 метрів; інші параметри розглянуті нижче:

$$A = 20 \log\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right), \quad (2.2)$$

$$X_f = 6 \log\left(\frac{f}{2}\right), \quad (2.3)$$

$$X_h = \begin{cases} -10,8 \log\left(\frac{h_r}{2}\right), & \text{профіль А та В} \\ -20,0 \log\left(\frac{h_r}{2}\right), & \text{профіль С,} \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\gamma = a - b \times h_b + \frac{c}{h_b}, \quad (2.5)$$

де h_b - висота базової станції в метрах;

h_r - висота абонентської станції в метрах;

f - частота в ГГц.

Значення a , b , c і s представлені в таблиці 2.1

Таблиця 2.1- Параметри SUI для різних профілів

	Профіль А	Профіль В	Профіль С
a	4,6	4,0	3,6
b	0,0075	0,0065	0,005
c	12,6	17,1	20
s	8,2	8,2	8,2

Також є можливість розрахувати найбільш прийнятну відстань від базової станції, як функцію від параметрів передавача і приймача:

$$d_{max} = d_0 \times 10^{\frac{(P_T - L_T + G_T + G_R - L_R) - S_R - (A + Xf + Xh + s)}{10\gamma}}, \quad (2.6)$$

де P_T – потужність передавача (дБм);

L_T – втрати передавача (дБ);

G_T – коефіцієнт посилення антени передавача (дБ);

G_R – коефіцієнт посилення приймача (дБ);

L_R – втрати приймача (дБ);

d_0 – стандартна відстань у 100 м;

S_R – чутливість приймача.

Чутливість приймача визначається як:

$$S_R = -102 + SNR + 10 \log \left(\frac{8}{7} \times f \times \frac{3}{4} \right), \quad (2.7)$$

де f – полоса пропускання (МГц);

SNR – співвідношення сигнал/шум.

Для розрахунків будемо використовувати адаптивну модуляцію, що означає можливість використання на одній соті різні схеми модуляції в залежності від SNR. Значення SNR в залежності від схеми модуляції наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Залежність значення SNR від схеми модуляції

Схема	Мінімальний SNR (дБ)
QPSK	9,4/11,2
16-QAM	16,4/18,2
64-QAM	22,7/24,4

Ємність мережі залежить від схеми модуляції, яка може бути QPSK (2 біт на символ), 16-QAM (4 біт на символ), 64-QAM (6 біт на символ).

Для оперування швидкістю передачі необхідно знати наступні дані: кількість слотів тайму на один підкадр (2 слота на тайм), тривалість передачі таймслота (0,5 мс), кількість символів в одному слоті (6 символів) тайма, кількість біт у символі в залежності від вида модуляції і кількість піднесних в одному ресурсному блоці (24 піднесні).

Можна розрахувати швидкість передачі системи в одному секторі при даній пропускній спроможності:

$$\text{Макс. шв./сота} = \frac{\text{кількість симв.у подкадрі}}{1mc} \times (\text{кільк. біт}) \times (\text{кільк. піднес}) \quad (2.8)$$

Інша відмінна риса IEEE 802.22 WRAN це її QoS. Як і інші бездротові технології, IEEE 802.22 WRAN побудована, щоб обробляти різні типи трафіку, деякі з них вимагають більшої смуги пропускання (такі як відео) інші потребують меншої смуги (такі як електронна пошта). Тому ми будемо вести наші розрахунки для різних видів трафіку для абонентів. Розрахуємо профіль користувачів нашої мережі. Будемо вважати, що третина від усієї кількості абонентів будуть складати корпоративні клієнти, а іншу частину абонентів - звичайні домашні користувачі. Значення бітових норм наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Значення бітових норм

Модуляція і кодування	Біт на символ	Використання MIMO	Смуга пропускання/кількість піднесних			
			3 МГц 5/180	5 МГц 25/300	10 МГц 50/600	20 МГц 100/1200
QPSK $\frac{1}{2}$	1	один потік	2,2	3,6	7,4	14,4
16-QAM $\frac{1}{2}$	2	один потік	4,3	7,2	14,4	28,8
64-QAM $\frac{3}{4}$	3	один потік	6,5	10,8	21,6	43,2
64-QAM $\frac{3}{4}$	4,5	один потік	9,7	16,2	32,4	64,8
64-QAM $\frac{1}{1}$	6	один потік	13,0	21,6	43,2	86,4
64-QAM $\frac{3}{4}$	9	2,2 MIMO	19,4	32,4	64,8	192,6
64-QAM $\frac{1}{1}$	12	2,2 MIMO	25,9	43,2	86,4	172,8
64-QAM $\frac{1}{1}$	24	4,4 MIMO	51,8	86,4	172,8	345,6

Значення параметрів для розрахунку втрат у моделі SUI наведені у табл. 2.4

Таблиця 2.4 - Параметри для розрахунку втрат у моделі SUI

Пар - p	Формула	Значення
A	$20 \log \left(\frac{4 \times 3,14 \times 100}{0,15} \right)$	78,46
X_f	$6 \log \left(\frac{2}{2} \right)$	0
$X_h(A, B)$	$-10,8 \log \left(\frac{1,5}{2} \right)$	1,35
$X_h(C)$	$-20,0 \log \left(\frac{1,5}{2} \right)$	2,5
$\gamma(A)$	$4,6 - 0,0025 \times 40 + \frac{12,6}{40}$	4,62

Продовження таблиці 2.4

Пар - p	Формула	Значення
$\gamma(B)$	$4,0 - 0,0065 \times 40 + \frac{17,1}{40}$	4,168
$\gamma(C)$	$3,6 - 0,005 \times 40 + \frac{20}{40}$	3,9
S_R	$-102 + 24,4 + 10 \log \left(\frac{8}{7} \times 10 \times \frac{3}{4} \right)$	-68,27
$d_{max}(A)$	$100 \times 10 \times \frac{(46 - 1 + 22 + 20 - 1) + 68,27 - (78,46 + 1,35 + 8,2)}{104,62}$	2716
$d_{max}(B)$	$100 \times 10 \times \frac{(46 - 1 + 22 + 20 - 1) + 68,27 - (78,46 + 1,35 + 8,2)}{104,168}$	3890
$d_{max}(C)$	$100 \times 10 \times \frac{(46 - 1 + 22 + 20 - 1) + 68,27 - (78,46 + 2,5 + 8,2)}{103,9}$	4677

2.2.1 Розрахунок пропускної здатності мережі, розрахунок кількості потенційних абонентів

У процесі планування когнітивних радіомереж на основі технології LTE є ряд відмінностей від процесу планування інших технологій безпроводового радіодоступу. Головна відмінність - це використання нового типу багатостанційного доступу на базі технології OFDM, у зв'язку з чим з'являються нові поняття і змінюються алгоритми проектування. Процес планування радіомережі складається з двох етапів:

- формування максимальної площі покриття;
- забезпечення необхідної ємності.

Планування радіомережі LTE буде проводитися в сільській місцевості, а це означає, що щільність абонентів буде невисока і базові станції повинні

встановлюватися на максимальному видаленні один від одного з метою закрити кожної eNB якомога більшу територію. У зв'язку з цим потрібно підібрати відповідний частотний діапазон. В даному випадку потрібно керуватися правилом, що чим нижче частота, тим далі поширення радіосигналу.

Пропускна здатність, або ємність, мережі оцінюють, базуючись на середніх значеннях спектральної ефективності стільниці в певних умовах.

Спектральна ефективність систем мобільного зв'язку являє собою показник, обчислюваний як відношення швидкості передачі даних на 1 Гц використовуваної смуги частот (біт/с/Гц). Спектральна ефективність є показником ефективності використання частотного ресурсу, а також характеризує швидкість передачі інформації в заданій смузі частот.

Спектральна ефективність може розраховуватися як відношення швидкості передачі даних усіх абонентів мережі в певній географічній області (стільника, зоні) на 1 Гц смуги частот (біт/с/Гц/стільника), а також як відношення максимальної пропускної здатності мережі до ширини смуги одного частотного каналу .

Середня спектральна ефективність для мережі LTE, ширина смуги частот якої дорівнює 20 МГц, для частотного типу дуплексу FDD на підставі 3GPPRelease 9 для різних конфігурацій MIMO, представлена в таблиці 2.5

Таблиця 2.5 - Середня спектральна ефективність для мережі LTE

Лінія	Схема MIMO	Середня спектральна ефективність (біт/ с/Гц)
UL	1 × 2	1,254
	1 × 4	1,829
DL	2 × 2	2,93
	4 × 2	3,43
	4 × 4	4,48

Для системи FDD середня пропускна здатність 1 сектора eNB може бути отримана шляхом прямого множення ширини каналу на спектральну ефективність каналу:

$$R = S \cdot W, \quad (2.9)$$

де S - середня спектральна ефективність (біт/с/Гц);

W - ширина каналу (МГц); $W = 10$ МГц.

Для лінії DL:

$$R_{DL} = 3,43 \cdot 10 = 34,3 \text{ Мбіт / с.}$$

Для лінії UL:

$$R_{UL} = 1,829 \cdot 10 = 18,29 \text{ Мбіт / с.}$$

Середня пропускна здатність базової станції R_{eNB} обчислюється шляхом множення пропускної здатності одного сектора на кількість секторів базової станції; число секторів eNB приймемо рівне 3, тоді:

$$R_{eNB} = R (DL / UL) \times 3. \quad (2.10)$$

Для лінії DL:

$$R_{eNB.DL} = 34,3 \cdot 3 = 102,9 \text{ Мбіт / с.}$$

Для лінії UL:

$$R_{eNB.UL} = 18,29 \cdot 3 = 54,87 \text{ Мбіт / с.}$$

Наступним етапом буде визначення кількості сот в мережі LTE яка проектується. Для розрахунку числа сот в мережі необхідно визначити загальне

число каналів, що виділяються для розгортання проекрованої мережі. Загальне число каналів N_k розраховується за формулою:

$$N_k = [\Delta f_{\Sigma} / \Delta f_k], \quad (2.11)$$

де Δf_{Σ} - смуга частот, виділена для роботи мережі і рівна 71 МГц;

Δf_k - смуга частот одного радіоканалу;

під радіоканалом в мережах LTE визначається таке поняття як ресурсний блок, який має ширину 180 кГц, $\Delta f_k = 180$ кГц.

$N_k = 71000/180 \approx 395$ каналів.

Далі визначимо число каналів $N_{k.сек}$, яке необхідно використовувати для обслуговування абонентів в одному секторі однієї соти:

$$N_{k.сек} = [N_k / (N_{кл} \cdot M_{сек})], \quad (2.12)$$

де N_k - загальна кількість каналів;

$N_{кл}$ - розмірність кластера, обране з урахуванням кількості секторів eNB, приймемо рівним 3;

$M_{сек}$ - кількість секторів eNB, прийнята 3.

$$N_{k.сек} = [395 / (3 \times 3)] \approx 43 \text{ канала.}$$

Далі визначимо число каналів трафіку в одному секторі однієї соти $N_{кт.сек}$. Число каналів трафіку розраховується за формулою:

$$N_{кт.сек} = N_{кт1} \times N_{(к.сек)}, \quad (2.13)$$

де $N_{кт1}$ - число каналів трафіку в одному радіоканалі, яке визначається стандартом радіодоступу (для OFDMA $N_{кт1} = 1 \dots 3$); для мережі LTE виберемо $N_{кт1} = 1$.

$N_{\text{кт.сек}} = 1 \times 43 \approx 43$ канала.

У відповідності з моделлю Ерланга, представленої у вигляді графіка на рисунку 2.2, визначимо допустиме навантаження в секторі однієї соти $A_{\text{сек}}$ при допустимому значенні ймовірності блокування рівною 1% і розрахованим вище значенні $N_{\text{кт.сек}}$. Визначимо, що $A_{\text{сек}} = 50$ Ерл.

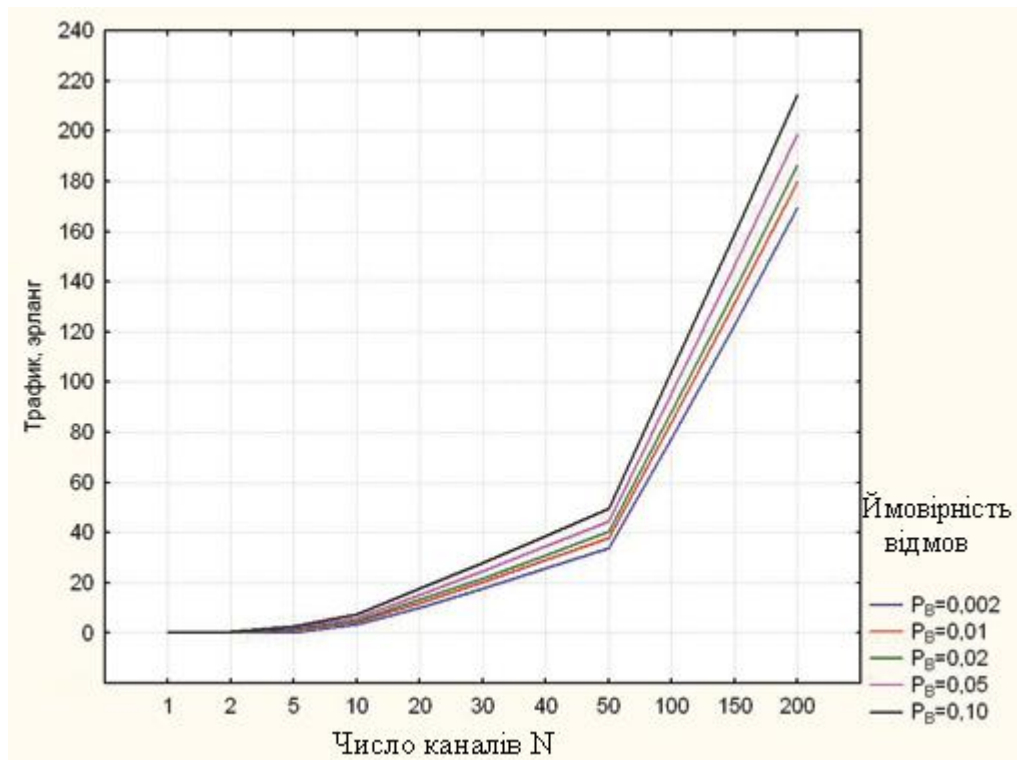


Рисунок 2.2- Залежність допустимого навантаження в секторі від числа каналів трафіку та ймовірності блокування

Кількість абонентів, які будуть обслуговуватися однією eNB, визначається за формулою:

$$N_{\text{аб.еNB}} = M_{\text{сек}} \cdot [A_{\text{сек}}/A1], \quad (2.14)$$

де $A1$ - середня за всіма видами трафіку абонентське навантаження від одного абонента; значення $A1$ може становити (0,04 ... 0,2) Ерл. Так як

проектowana мережа планується використовуватися для високошвидкісного обміну інформацією, то значення $A1$ приймемо рівним 0,2 Ерл. Таким чином:

$$Na_{b.eNB} = 3 \cdot [50/0, 2] \approx 750 \text{ абонентів.}$$

Число базових станцій eNB в мережі LTE яка проектується знайдемо за формулою:

$$NeNB = [Na_b / Na_{b.eNB}] + 1, \quad (2.15)$$

де Na_b - кількість потенційних абонентів. Кількість потенційних абонентів визначимо як 20% від загального числа жителів. Загальне число жителів Дергачівського району Харківської області становить 96 300 чоловік. Таким чином, кількість потенційних абонентів складе 19260 осіб, тоді:

$$NeNB = [19260/750] + 1 \approx 28 \text{ eNB.}$$

Середню плановану пропускну спроможність RN проектованої мережі визначимо шляхом множення кількості eNB на середню пропускну спроможність eNB. Формула набуде вигляду:

$$RN = (ReNB.DL) + R_{eNB.UL} \cdot NeNB, \quad (2.16)$$

$$RN = (102,9 + 54,87) \cdot 28 \approx 4415,56 \text{ Мбіт / с.}$$

Далі дамо перевірочну оцінку ємності проектованої мережі і порівняємо з розрахованою. Визначимо середній трафік одного абонента в ЧНН:

$$R_{т.ЧНН} = (T_T \cdot q) / (N_{ЧНН} \cdot N_d), \quad (2.17)$$

де T_T - середній трафік одного абонента в місяць, $T_T = 30$ Гбайт / міс;
 q - коефіцієнт для сільської місцевості, $q = 2$;
 $N_{\text{ЧНН}}$ - число ЧНН в день, $N_{\text{ЧНН}} = 7$;
 N_d - кількість днів у місяці, $N_d = 30$.

$$R_{T.\text{ЧНН}} = (30 \cdot 2) / (7 \cdot 30) = 0,28 \text{ Мбіт / сек}$$

Визначимо загальний трафік проектованої мережі в ЧНН $R_{\text{общ. / ЧНН}}$ за формулою:

$$R_{\text{общ. / ЧНН}} = R_{T.\text{ЧНН}} \cdot N_{\text{акт.аб}}, \quad (2.18)$$

де $N_{\text{акт.аб}}$ - число активних абонентів у мережі; визначимо число активних абонентів у мережі як 80% від загального числа потенційних абонентів $N_{\text{АБ}}$, тобто $N_{\text{акт.аб}} = 15408$ абонентів.

$$R_{\text{общ. / ЧНН}} = 0,28 \cdot 15408 = 4314,24 \text{ Мбіт / сек.}$$

Таким чином, $R_N > R_{\text{общ. / ЧНН}}$. Ця умова показує, що проектована мережа не буде піддаватися перевантажень в ЧНН.

2.2.2 Вибір обладнання транспортної мережі

Основними відмінностями технології CR на основі LTE від попередніх технологій мобільного зв'язку $2G$ і $3G$ є:

- організація зв'язку, як голосовий, так і передачі даних по IP -протоколу;
- високі швидкості передачі даних;
- спрощена архітектура мережі.

Устаткування транспортної мережі слід вибирати, в першу чергу керуючись особливостями технології CR на основі LTE , а так само, щоб дане устаткування відповідало вимогам надійності, відрізнялося ефективністю, гнучкістю,

компактністю, володіло широким набором функцій і задовольняло поняттю «ціна - якість». Головною умовою при виборі обладнання транспортної мережі є надійна передача даних користувачів згідно розрахованої пропускної здатності мережі LTE.

Транспортна мережа проектованої мережі когнітивного радіо на основі LTE буде реалізована за допомогою оптоволоконних ліній передач за технологією Ethernet. У технології Ethernet (стандарт IEEE 802.3) визначені наступні швидкості: Ethernet на швидкості 10 Мбіт / с, FastEthernet на швидкості 100 Мбіт / с, GigabitEthernet на швидкості 1 Гбіт / с і 10 GigabitEthernet на швидкості 10 Гбіт / с. Швидкості в 1 і 10 Гбіт / с підходять для транспортної мережі. Істотною перевагою систем Ethernet є широка масштабованість і максимальна наближеність до стека протоколів IP.

У світі проектування мобільних мереж існують різні рішення вибору обладнання як мережі радіодоступу, так і транспортної мережі. Компанії - виробники обладнання для мереж мобільного зв'язку надають операторам пакети готових рішень, що складаються з підбраного за різними показниками апаратури. У пакети готових рішень для реалізації транспортної мережі мобільного оператора можуть входити робочі станції, комутатори, маршрутизатори, мультисервісні станції, а також спеціалізоване обладнання для управління мережею.

На сьогоднішній день серед усіх рішень різних компаній-виробників комутаційного обладнання для реалізації транспортної мережі LTE виділяються рішення двох компаній: «CiscoSystems» і «Alcatel - Lucent».

3 РОЗРОБКА ПЕРВИННОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ СИСТЕМИ КОГНІТИВНОГО БЕЗПРОВОДОВОГО ДОСТУПУ

3.1 Вибір топології проектованої первинної мережі зв'язку

Незважаючи на те, що найбільш характерною топологією мереж SDH є кільцева топологія (рисунок 3.1), при значній відмінності кількості вхідних та

вихідних цифрових потоків у вузлах мережі використання такої топології не завжди виправдано, тому що приводить до завищення необхідної кількості каналів, що циркулюють по кільцю, і, як наслідок, до необхідності використання SDH мультиплексорів ведення/виведення більш високого рівня [22].

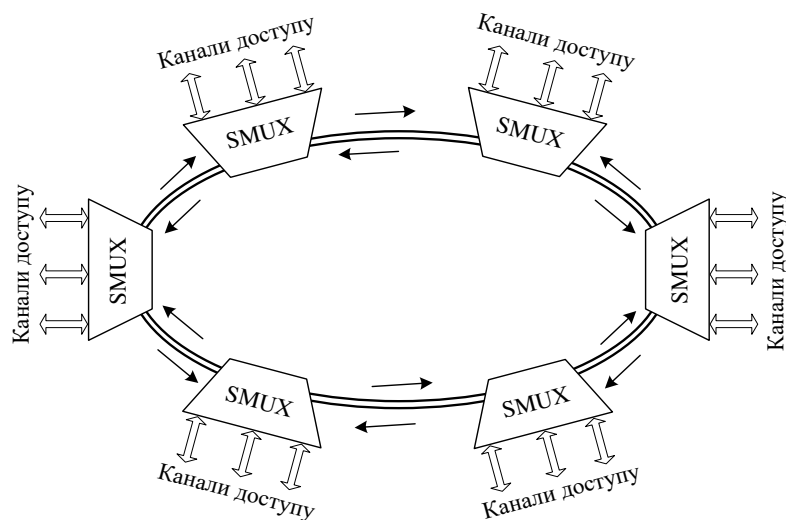


Рисунок 3.1 – Топологія «кільце»

В цьому випадку може виявитися, що доцільніше використовувати мережі з чарунковою структурою, засновані на топологіях «точка-точка», «послідовний лінійний ланцюг» або «зірка» на рисунку 3.2, тим більше, що сучасні мультиплексори дозволяють використовувати останню топологію з досить великою кількістю променів за рахунок використання більш гнучких схем крос-комутації в центральному вузлі. На рисунку 3.3 - топологія «послідовний лінійний ланцюг» без резервування; на рисунку 3.4 – топологія «послідовний лінійний ланцюг» з резервуванням; на рисунку 3.5 зображено топологія «зірка» з мультиплексором SMUX в ролі концентратора.

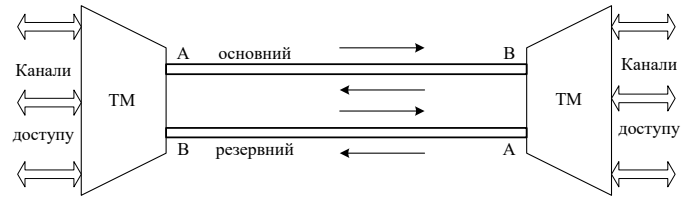


Рисунок 3.2 – Топологія «точка – точка»

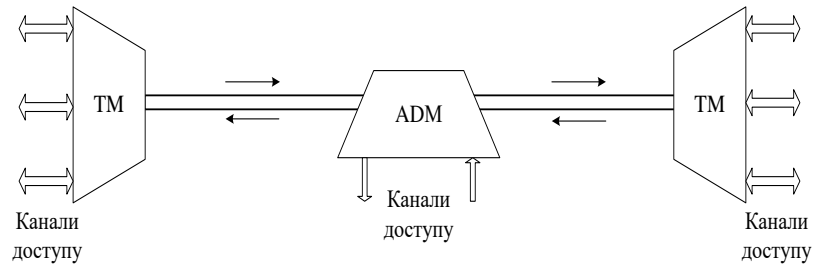


Рисунок 3.3 – Топологія «послідовний лінійний ланцюг» без резервування

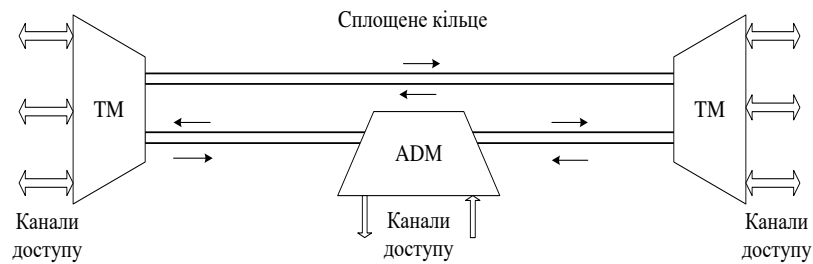


Рисунок 3.4 – Топологія «послідовний лінійний ланцюг» з резервуванням

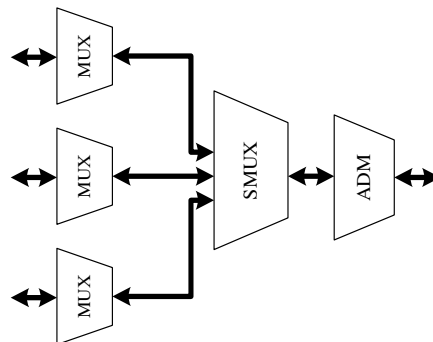


Рисунок 3.5 – Топологія «зірка» з мультиплексором SMUX в ролі концентратора

На основі заданих значень відстаней між кожним з вузлів мережі, будується повнозв'язна чарункова топологія рисунок 3.6.

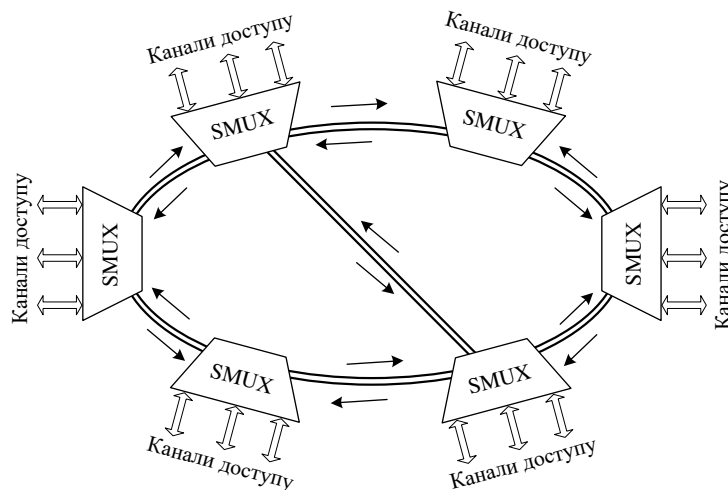


Рисунок 3.6 – Варіант чарункової топології

Так само істотним фактором при виборі топології проекрованої мережі може бути взаємне розташування вузлів мережі, можливість прокладання кабелю у вже існуючій кабельній каналізації й т.д.

Крім того, незалежно від обраної топології, повинна бути проведена оптимізація структури мережі за критерієм мінімальної довжини оптичного кабелю.

Таким чином, вибір топології проекрованої мережі є досить складним завданням, повне рішення якого виходить за рамки курсового проектування. Тому з метою спрощення при курсовому проектуванні вибір топології мережі будемо здійснювати в ході послідовного рішення таких завдань.

1. Синтез кільцевої топології проекрованої мережі з мінімальною сумарною довжиною ребер (сегментів).

2. Перетворення (при необхідності) кільцевої топології мережі в радіально-кільцеву або чарункову топологію на основі аналізу кількості цифрових потоків, що проходять по кожному із сегментів мережі і їхньої довжини.

3.2 Синтез кільцевої топології проекрованої мережі з мінімальною сумарною довжиною ребер

На основі заданих значень відстаней між кожним з вузлів мережі, які зведені в таблицю 3.1, відстані дані в кілометрах будується повнозв'язна (чарункова) топологія.

Таблиця 3.1 – Відстань між вузлами проектованої мережі, км

Вузол мережі	A	B	C	D	E	F
A	–	90	150	210	234	270
B	90	–	204	126	252	240
C	150	204	–	246	120	222
D	210	126	246	–	216	126
E	234	252	120	216	–	132
F	270	240	222	126	132	–

На рисунку 3.7 показано повнозв'язну топологію яку будемо перетворювати в кільцеву.

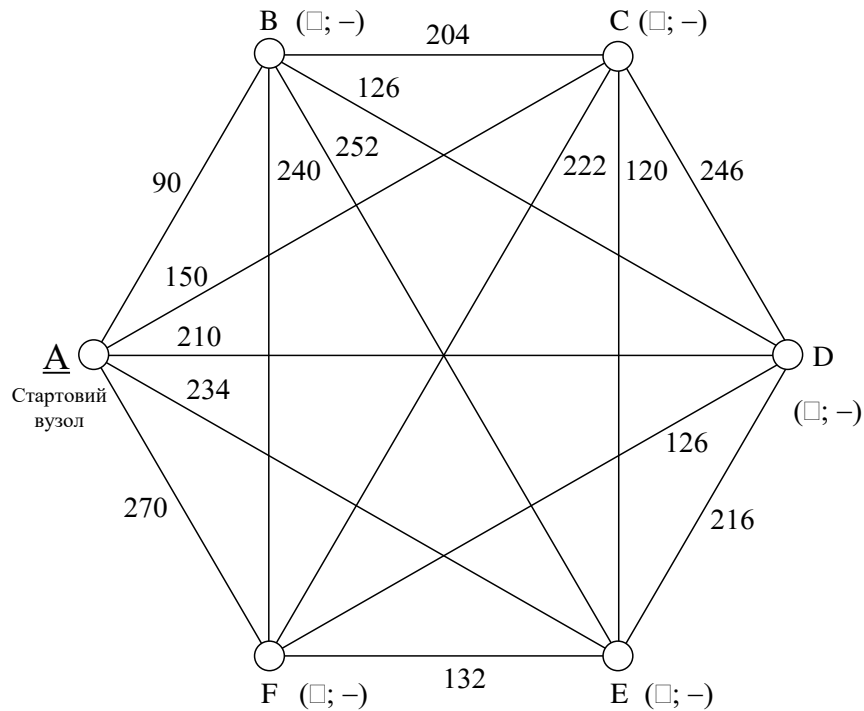


Рисунок 3.7 – Повнозв’язна (чарункова) топологія

Далі здійснюється перетворення повнозв’язної топології у кільцеву топологію таким чином, щоб сума відстаней між вузлами отриманої кільцевої топології була мінімальною із всіх можливих варіантів кільцевих топологій, які можуть бути виділені як складова частина чарункової топології.

Перетворення здійснюється по алгоритму Дейкстри, що застосовується для знаходження шляху з мінімальною сумарною вагою в графі з ненегативними вагами [22].

У загальному випадку, алгоритм Дейкстри складається з таких кроків.

1. Маркуємо всі вузли, крім стартового, парою значень, що складається з відстані до даного вузла (спочатку « ∞ ») і ім'я вузла підходу (спочатку « \leftarrow »), як показано на (рисунку 3.7), стартовим вузлом обраний вузол А. Вузол підходу це найближчий сусідній вузол, від якого здійснюється безпосередній підхід до вузла, який маркується.

2. Починаючи зі стартового вузла, вибирається вузол з найнижчою сукупною вагою й вважається «фіксованим».

3. Сусідні вузли з «фіксованим» вузлом маркуються сукупною відстанню від стартового вузла й ім'ям вузла підходу.

4. Якщо вузол уже маркірований, то його мітка замінюється на нову, сукупна відстань якої менше, ніж існуюча сукупна відстань.

5. Триває маркування вузлів, поки всі вузли не стануть «фіксованими».

Після фіксації всіх вузлів результуюча сукупна вага дозволяє розрахувати самий короткий шлях від вихідного вузла. Це можна зробити, читаючи у зворотному порядку вузли підходу кожного вузла на відповідному шляху.

Для побудови топології «кільце» знаходиться шлях мінімальної сумарної довжини, наприклад, з вузла А, далі по кільцю через всі інші вузли (BCDEF для нашого приклада) і закінчується також у вузлі А. Потім здійснюється побудова варіанта мережі з кільцевою топологією, що відповідає знайденому шляху. Таку процедуру варто проводити послідовно для всіх вузлів мережі. У результаті одержують набір кільцевих топологій з різною сумарною довжиною ліній зв'язку між вузлами.

Остаточне рішення про вибір варіанта мережі з кільцевою топологією приймається після порівняння сумарних відстаней між вузлами мережі й вибору найменшого.

Можливий випадок, коли в ході виконання алгоритму Дейкстри відстані між деякими вузлами будуть однакові. У цьому випадку необхідно розглядати всі можливі варіанти утворення кільцевої топології.

Нехай дана таблиця з відстанями між кожним з вузлів проектованої мережі (див. табл. 3.5) і повнозв'язна (чарункова) топологія (див. рис. 3.9). Синтезуємо кільцеву топологію мережі з мінімальною сумарною довжиною ребер за допомогою алгоритму Дейкстри.

1. Зафіксуємо стартовий вузол А і перемаркуємо всі сусідні з ним вузли з урахуванням відстаней від стартового вузла до кожного із сусідніх вузлів, рисунок 3.8.

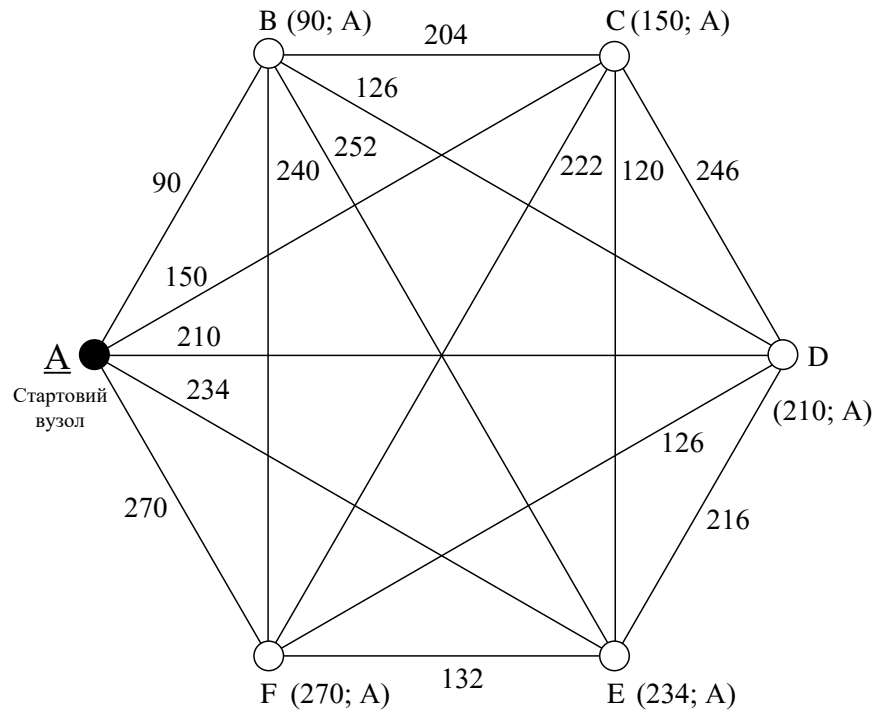


Рисунок 3.8 – Приклад застосування алгоритму Дейкстри, крок перший

2. Вибираємо з вузлів, маркірованих на кроці 1, вузол з найменшою відстанню до стартового вузла А – це вузол В з відстанню 90, рисунок 3.9. Після чого фіксуємо цей вузол.

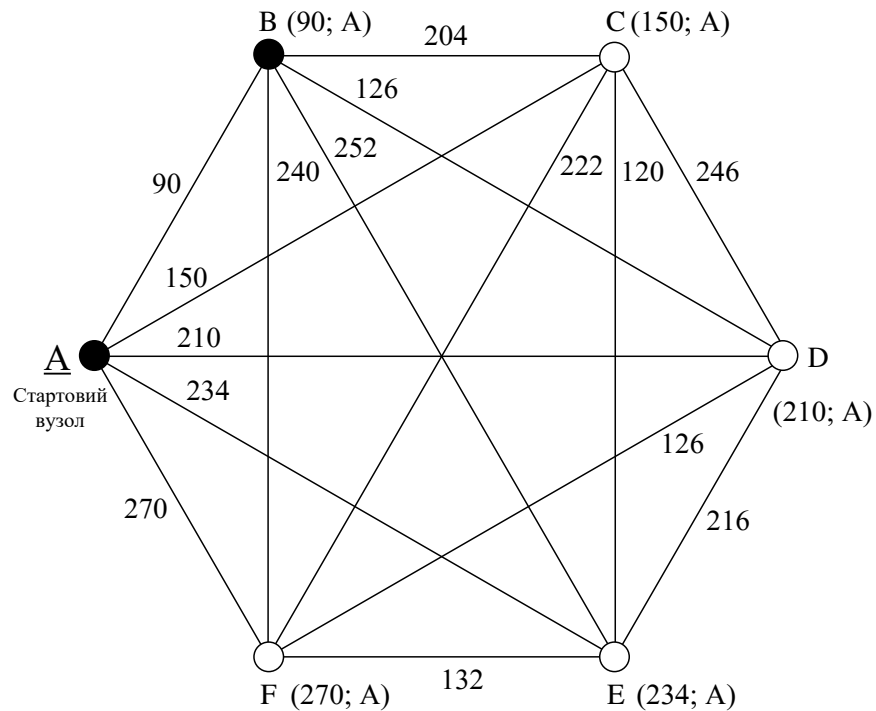


Рисунок 3.9 – Приклад застосування алгоритму Дейкстри, крок другий

3. Вузол В може бути безпосередньо пов'язаний з вузлами С, D, E, F (вузол А «фіксований», він не враховується). Тому що ми робимо синтез кільцевої топології, те тепер необхідно визначити найближчий до вузла В вузол з вузлів, які безпосередньо з ним зв'язані (С, D, E або F). Після чого мітку найближчого вузла необхідно замінити на нову.

Для нашого прикладу це вузол D (тому що довжина ребра AD дорівнює 126). Тому мітку вузла D заміняємо на нову – $(90+126; B) = (216; B)$, а цей вузол фіксується. Цей приклад показаний на рисунку 3.10.

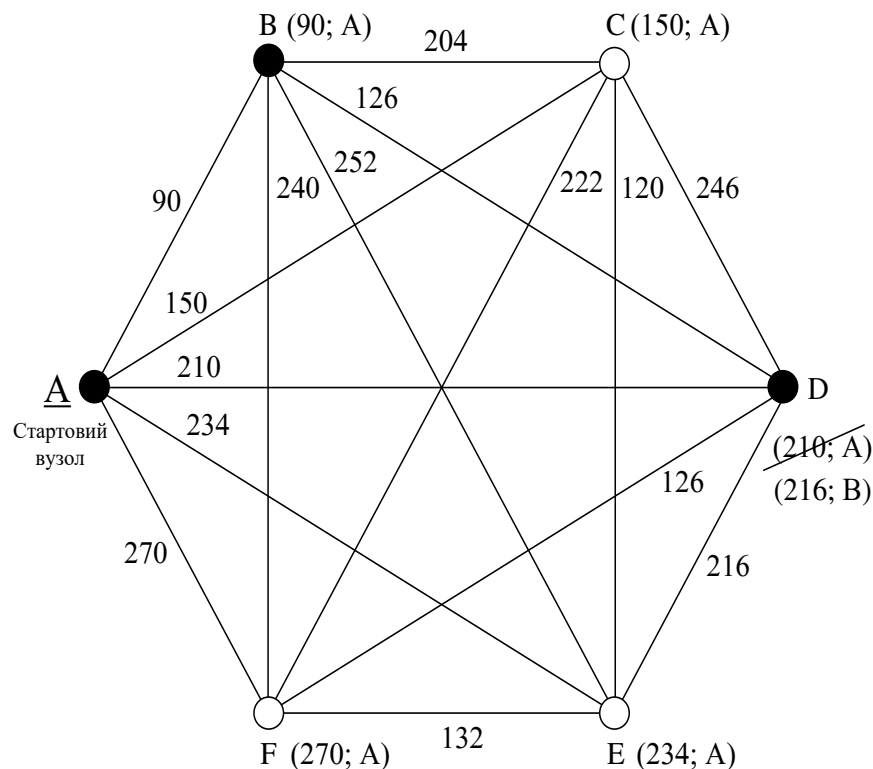


Рисунок 3.10 – Приклад застосування алгоритму Дейкстри, крок третій

4. Вузол D може бути безпосередньо пов'язаний з вузлами С, E, F (вузли А и В «фіксовані», вони не враховуються). Аналогічно кроку 3, знаходимо найближчий вузол до вузла D з вузлів С, E або F, заміняємо його мітку на нову й фіксуємо на рисунку 3.11. Для нашого прикладу це вузол F. Його нова мітка - $(342; D)$.

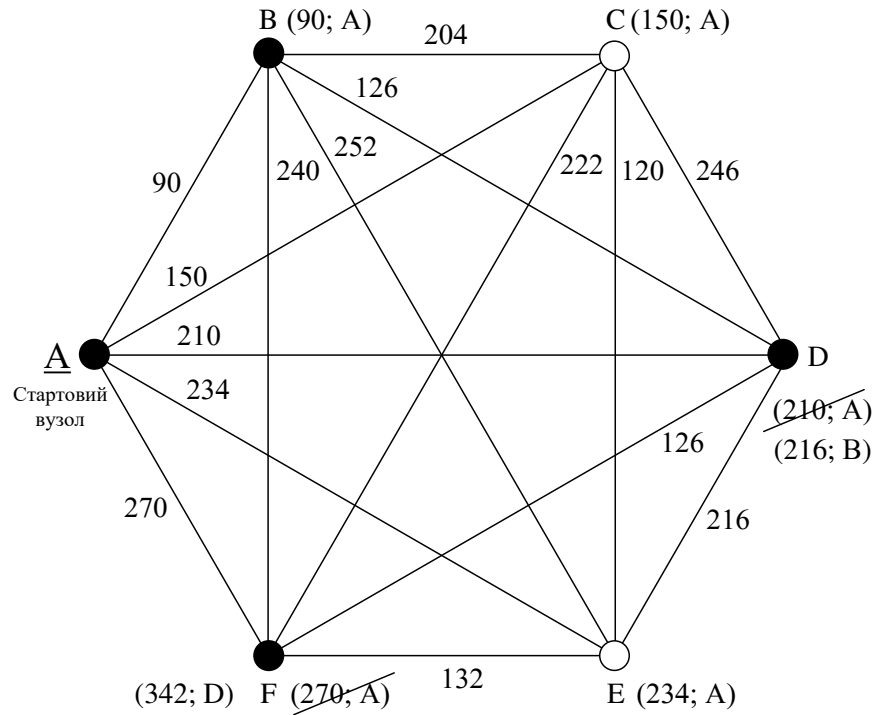


Рисунок 3.11 – Приклад застосування алгоритму Дейкстри, крок четвертий

5. Цей крок аналогічний попередньому. Найближчим вузлом до вузла F є вузол E. Далі змінюємо його мітку й фіксуємо на рисунок 3.12.

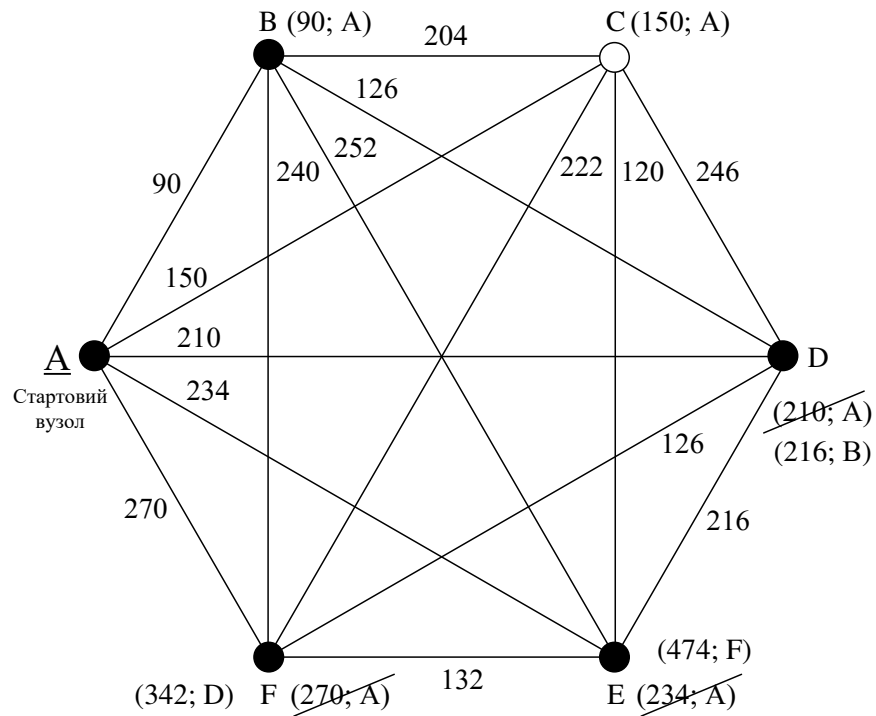


Рисунок 3.12 – Приклад застосування алгоритму Дейкстри, крок п'ятий

6. Тому що залишився тільки один незафіксований вузол – С, то вузол Е може бути з'єднаний тільки з ним, тому змінюємо мітку вузла С и фіксуємо його

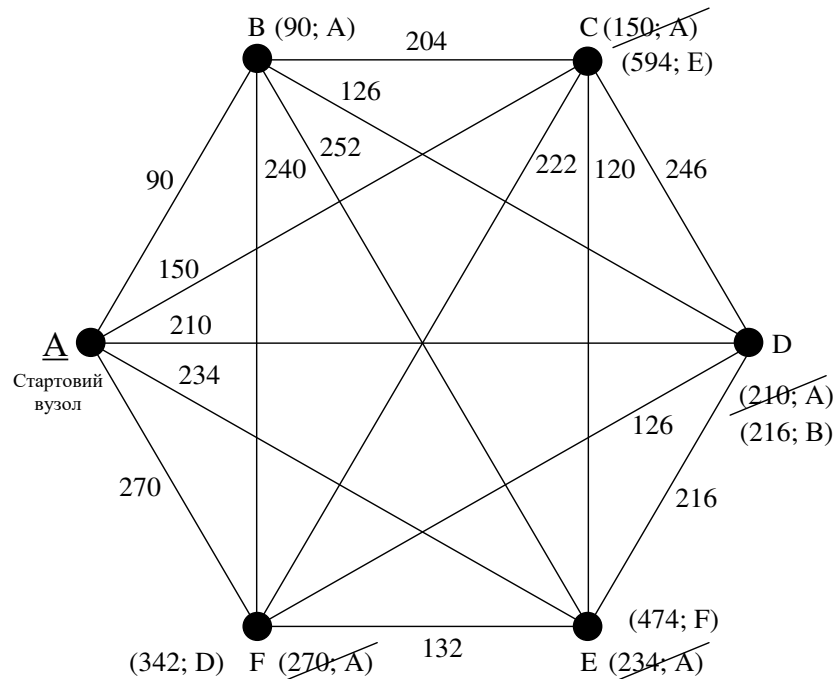


Рисунок 3.13 – Приклад застосування алгоритму Дейкстри, крок шостий

7. Для формування кільцевої топології тепер необхідно, щоб були безпосередньо зв'язані між собою вузли А и С. Тому міткою вузла А буде (714; С). На цьому кроці синтез варіанта кільцевої топології закінчений. Сумарна відстань між вузлами буде дорівнювати 744 км. Читаючи мітки, що починаються з вузла А в зворотному порядку, ми одержуємо найкоротший маршрут – А → С → Е → F → D → В → А рисунок 3.14. Тепер необхідно синтезувати інші варіанти кільцевих топологій. Для цього вибираємо як стартовий вузол вузли В, С, D, Е, F і виконуємо аналогічні дії (кроки 1-7) для кожного зі стартових вузлів. В результаті одержуємо 7 варіантів кільцевих топологій, з яких необхідно вибрати варіант із мінімальною сумарною довжиною ребер.

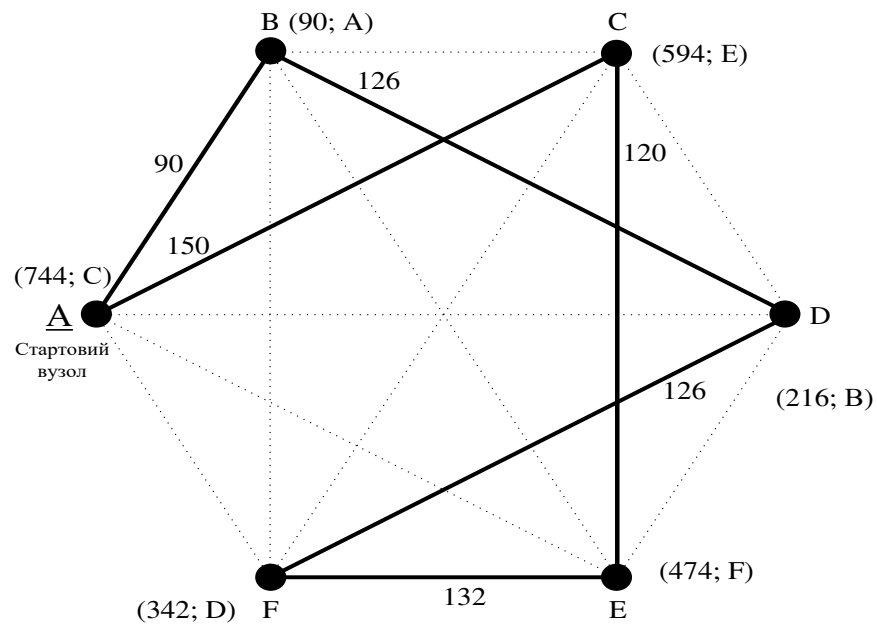


Рисунок 3.14 – Приклад застосування алгоритму Дейкстри, крок сьомий

Для розглянутого прикладу всі варіанти кільцевих топологій є ідентичними, тому оптимальним з погляду мінімізації довжини оптичного кабелю є варіант топології, показаний на (див. рис. 3.16). Для зручності проведення подальшого аналізу можна перетворити рисунок 3.15

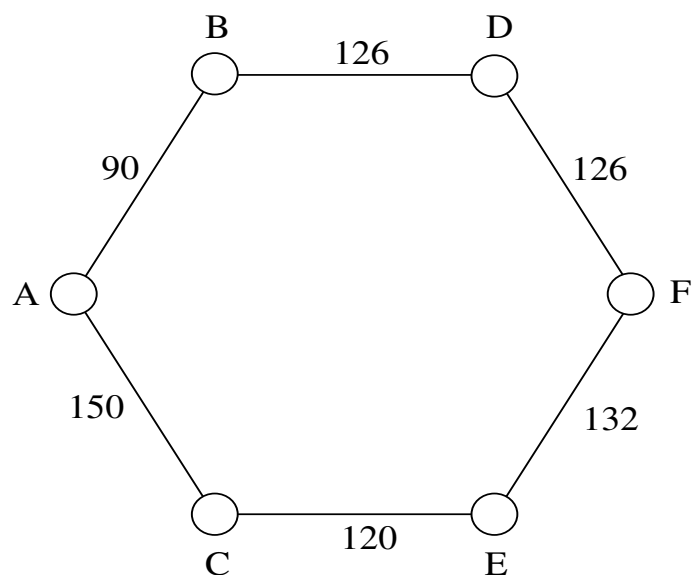


Рисунок 3.15 - Оптимізована мережа з топологією «кільце»

3.3 Вибір топології проекрованої мережі на основі аналізу кількості цифрових потоків, що проходять по кожному із сегментів мережі

Для вибору топології проекрованої мережі спочатку необхідно визначити кількість вхідних та вихідних цифрових потоків (2 Мбіт/сек) для кожного вузла. Це можна зробити на основі аналізу вихідних даних для проектування (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 - Розподіл цифрових потоків по напрямках зв'язку

Вузли	A	B	C	D	E	F
A	–	20	16	24	4	2
B	20	–	30	20	2	4
C	16	30	–	28	2	8
D	24	20	28	–	6	10
E	4	2	2	6	4	6
F	2	4	8	10	6	–
Разом	66	76	84	88	24	30

На основі аналізу таблиці 3.2 можна зробити попередні висновки про доцільність застосування тієї або іншої топології мережі й про рівень застосовуваних мультиплексорів у вузлах мережі (остаточний вибір рівня мультиплексорів можливий тільки після розрахунку кількості основних і резервних потоків, що приходяться на кожен сегмент мережі, а такий розрахунок можна провести тільки після вибору топології мережі). Для цього розглянемо три варіанти топології: кільцеву, радіально-кільцеву і чарункову.

Кільцева топологія. Об'єднання шести вузлів у кільце вимагає застосування мультиплексорів рівня STM-4 ($4 \times 63 = 252$ первинних цифрових потоків зі швидкістю передачі 2 048 Кбіт/с), тому що на мережі є чотири вузли (A, B, C, D) з кількістю вхідних та вихідних цифрових потоків більше 63 (STM-1). Недолік такого рішення полягає в завищенні рівня мультиплексорів у вузлах E й F (по

кількості вхідних та вихідних потоків у цих вузлах досить мультиплексорів рівня STM-1). Перевагою такого рішення може бути тільки стовідсоткове резервування всіх, а не тільки необхідних цифрових потоків.

Радіально-кільцева топологія. Оскільки тільки два вузли мережі (вузли E и F) мають менше 63 первинних цифрових потоків – 24 й 30, то кільце повинне мати у своєму складі 4 мультиплексори рівня STM-4 й одну радіальну гілку (якщо вузли E и F зв'язані між собою безпосередньо – рисунок 3.18) або дві радіальні гілки (якщо вузли E и F підключаються до кільця порізно – E к C, а F до D і не зв'язані між собою безпосередньо).

Радіальні гілки (ділянки) вимагають топології «точка -точка» типу «плоске кільце» або системи захисту типу «1+1». При цьому точка, що контактує з кільцем на рисунку 3.16, або мультиплексор зв'язку повинен бути мультиплексором уведення/виведення, а не термінальним мультиплексором, з метою забезпечення перемикавання цифрового потоку з кільцевого маршруту на радіальний.

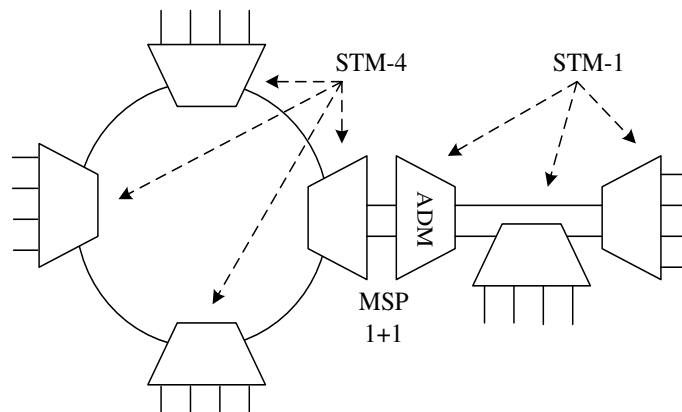


Рисунок 3.16 - Радіально - кільцева топологія з однією гілкою та мультиплексором зв'язку

Тому при першому варіанті рішення буде потрібно чотири мультиплексори рівня STM-4 і три мультиплексори рівня STM-1, а при другому - на один мультиплексор рівня STM-1 більше.

В ряді випадків (наявність вільних слотів для кросу-комутатора) роль мультиплексора зв'язку може грати мультиплексор кільцевого вузла, що зменшує надійність мережі, але приводить до економії одного (перший варіант) або двох (другий варіант) мультиплексорів зв'язку (рисунки 3.17, 3.18).

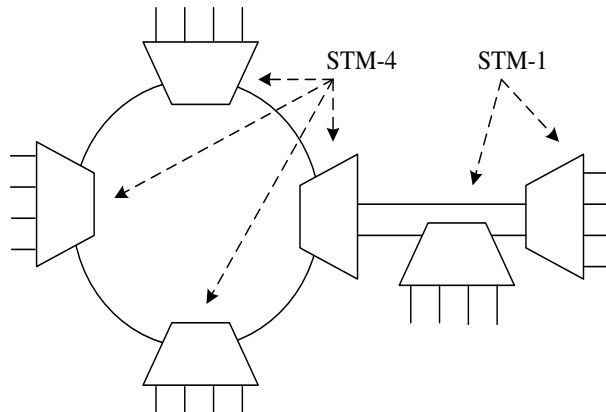


Рисунок 3.17 – Радіально – кільцева топологія з однією гілкою без мультиплексора зв'язку

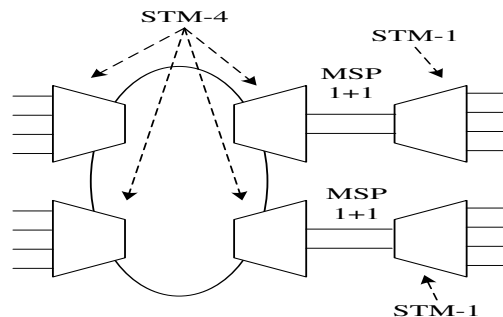


Рисунок 3.18 – Радіально – кільцева топологія з двома гілками без мультиплексора зв'язку

Чарункова топологія. Перетворимо отриману кільцеву топологію в чарункову шляхом додавання сегмента CD рисунок 3.19.

Чарункова мережа складається із двох чарунок і містить шість вузлів з мультиплексорами рівня STM-N. У розглянутому прикладі у вузлах А, В, С и D мережі знаходяться мультиплексори рівня STM-4, а у вузлах Е и F - рівня STM-1.

Відзначимо, що саме таке розташування мультиплексорів саме й дозволяє організувати чарунки з різними швидкостями цифрових потоків. У протилежному випадку при курсовому проектуванні будемо застосовувати радіально-кільцеву топологію з мультиплексорами різного рівня або ж виберемо варіант побудови мережі з мультиплексорами одного рівня (кільцева або чарункова топології).

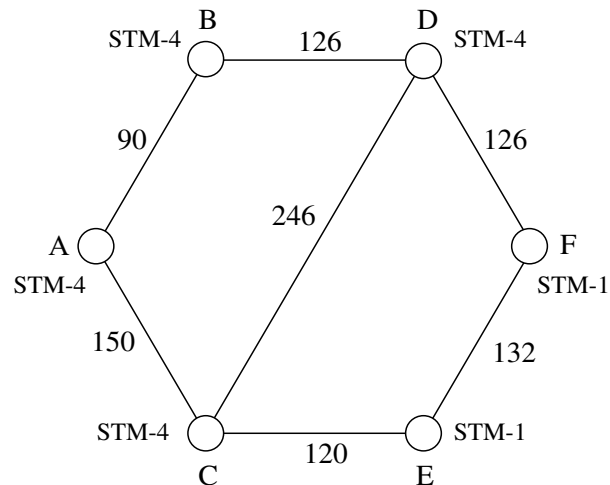


Рисунок 3.19 – Чарункова топологія

Представлена структура приводить до мінімальної кількості необхідних мультиплексорів різних рівнів при найбільшій надійності. Питання захисту тут вирішуються шляхом напрямку цифрових потоків по двох непересічних маршрутах зі співпадаючими кінцевими точками мережі, наприклад по маршрутах $A \rightarrow B$ і $A \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow B$.

Для розрахунку кількості потоків, що проходять по сегментах шляху, вибираємо основні й резервні шляхи проходження цифрових потоків у проектованій мережі. Обрані шляхи наведені в таблиці 3.3

Таблиця 3.3 - Основні й резервні шляхи проходження цифрових потоків

Шлях передавання	Основний шлях	Резервний шлях
AB	A – B	A – C – D – B

AD	A – B – D	A – C – D
AF	A – B – D – F	A – C – E – F
AE	A – C – E	A – B – D – F – E
AC	A – C	A – B – D – C
BD	B – D	B – A – C – D
BF	B – D – F	B – A – C – E – F
BE	B – A – C – E	B – D – F – E
BC	B – A – C	B – D – C
DF	D – F	D – C – E – F
DE	D – F – E	D – C – E
DC	D – C	D – B – A – C
FE	F – E	F – D – C – E
FC	F – E – C	F – D – C
EC	E – C	E – F – D – C

Використовуючи таблицю 3.3 необхідно розрахувати кількість основних і резервних потоків, що проходять по сегментах мережі. Відзначимо, що в структурі мережі, що розглядається, резервні цифрові потоки проходять по маршрутах у межах однієї чарунки.

Розрахунок кількості потоків, що проходять по сегментах шляху, наведений у таблиці 3.4, де введені такі позначення: «X» - основні канали; «P» - резервні канали; «-» - потоки, що не проходять по сегментах мережі.

Таблиця 3.4 – Розрахунок кількості потоків, що проходять по сегментах шляху

Шлях передавання	Кількість потоків	Сегменти шляху						
		AB	BD	DC	CA	DF	FE	EC
AB	20	X	P	P	P	-	-	-
AD	24	-	X	P	P	-	-	-

AF	2	X	X	–	P	X	X	X
AE	4	P	P	–	X	P	P	X
AC	16	P	P	P	X	–	–	–
BD	20	P	X	P	P	–	–	–
BF	4	P	X	–	P	X	X	X
BE	2	X	P	–	X	P	P	X
BC	30	X	P	P	X	–	–	–
DF	10	–	–	P	–	X	P	P
DE	6	–	–	P	–	X	X	P
DC	28	P	P	X	P	–	–	–
FE	6	–	–	P	–	P	X	P
FC	8	–	–	P	–	P	X	X
EC	2	–	–	P	–	P	P	X
Разом	Основний	54	50	28	52	22	26	22
	Резервний	72	100	142	98	22	18	22
	Всього	126	150	170	150	44	44	44

Отримана таблиця 3.4 підтверджує правильність вибору рівнів мультиплексорів у вузлах мережі. Таким чином, у результаті проведеного аналізу можливих топологій проектованої мережі, вибираємо мережу з чарунковою топологією, що показана на (див. рис. 3.18), тому що вона при мінімальній кількості мультиплексорів (чотири мультиплексори рівня STM-4 і два - рівні STM-1 задовольняє умові по резервуванню первинних цифрових потоків.

3.4 Розрахунок довжини ділянок регенерації і кількості регенераторів

При проектуванні безпроводної лінії зв'язку повинні розраховуватися окремо довжина ділянки регенерації по загасанню (L_{α}) і довжина ділянки регенерації по широкосмужності (L_B), тому що причини, що обмежують граничні значення L_{α} й L_B незалежні.

У загальному випадку необхідно розраховувати дві величини довжини ділянки регенерації по загасанню:

$L_{\alpha \max}$ – максимальна проектна довжина ділянки регенерації;

$L_{\alpha \min}$ – мінімальна проектна довжина ділянки регенерації.

Максимальна довжина ділянки регенерації. Для оцінки величини максимальної довжини ділянки регенерації $L_{\alpha \max}$ й L_B можуть бути використані наступні вирази:

$$L_{\alpha \max} < \frac{E_{\Pi} - M - n \times \alpha_{\text{pc}}}{\alpha_{\text{ок}} + \alpha_{\text{нс}} / L_{\text{стр}}}; \quad (3.1)$$

$$L_B = \frac{4,4 \times 10^5}{\sigma \times \Delta\lambda \times B}; \quad (3.2)$$

де $\alpha_{\text{ок}}$ (дБ/км) - кілометричне загасання у радіоканалі;

$\alpha_{\text{нс}}$ (дБ) - середнє значення загасання потужності базової станції;

$L_{\text{стр}}$ (км) - середнє значення будівельної довжини кабелю;

α_{pc} (дБ) - загасання потужності оптичного випромінювання рознімного оптичного з'єднувача;

n - кількість рознімних оптичних з'єднувачів;

σ (пс/(нм·км)) - сумарна дисперсія одномодового оптичного волокна;

$\Delta\lambda$, (нм) - ширина спектра джерела випромінювання;

B (МГц) – швидкість передачі цифрових сигналів в оптичному тракті;

M (дБ) - експлуатаційний запас (2-6 дБ);

E_{Π} - енергетичний потенціал.

Енергетичний потенціал розраховується по формулі :

$$E_{\Pi} = P_{\text{пер}} - P_{\text{пр min}}, \text{ дБм}, \quad (3.3)$$

де $P_{\text{пер}}$ - рівень потужності оптичного випромінювання на передачі, дБм;

$P_{pr\ min}$ - рівень чутливості приймача – мінімальне значення рівня потужності оптичного випромінювання на вході приймача, при якому забезпечується коефіцієнт помилок не більше $1 \cdot 10^{-10}$ к кінцю терміну служби апаратури.

Визначення рівня потужності оптичного випромінювання, тобто $P_{пер}$, здійснюють по формулі:

$$P_{пер} = P_c - \Delta P, \text{ дБм}, \quad (3.4)$$

де P_c - рівень середньої потужності оптичного сигналу на виході джерела випромінювання;

ΔP - зниження рівня середньої потужності, що залежить від характеру сигналу (для коду NRZ, що застосовується в апаратурі SDH, 3 дБ).

Мінімальна довжина ділянки регенерації. Для оцінки величини мінімальної довжини ділянки регенерації $L_{\alpha\ min}$ може бути використаний вираз :

$$L_{\alpha\ min} > \frac{P_{пер} - P_{пр\ max}}{\alpha_{ок} + \alpha_{нс} / L_{стр}}, \quad (3.5)$$

де $P_{пр\ max}$ - максимальний рівень потужності оптичного випромінювання на вході приймача, при якому забезпечується коефіцієнт помилок не більше $1 \cdot 10^{-10}$ до кінця терміну служби апаратури.

Якщо за результатами розрахунків отримано: $L_B < L_{\alpha\ max}$, то для проектування повинні бути обрані апаратура або кабель з іншими технічними даними ($\Delta\lambda$ та σ), що забезпечують більший запас по широкосмужності на ділянці регенерації. Розрахунок повинен бути виконаний знову.

Критерієм остаточного вибору апаратури або кабелю повинне бути виконання співвідношення $L_B > L_{\alpha\ max}$, з обліком необхідної пропускної здатності на перспективу розвитку.

Кількість регенераційних пунктів, що не обслуговуються (НРП):

$$N_{\text{НРП}} = \left\lfloor \frac{L}{L_{\text{ру}}} \right\rfloor - 1, \quad (3.6)$$

де L - відстань між вузлами мережі - регенераційними пунктами, що обслуговуються, - ОРП).

Проведемо розрахунок довжини ділянки регенерації й кількості регенераторів для лінії зв'язку між вузлами D й С.

Вихідні дані для розрахунку. Довжина лінії зв'язку складає 246 км. Нехай використовується одномодове оптичне волокно із таким параметрами: $\alpha_{\text{ок}} = 0,25$ дБ, $\sigma = 18$ пс/нм \times км на довжині хвилі 1550 нм, будівельна довжина – 4 км (обраний код застосування L-4.2 і оптичне волокно, що відповідає рекомендаціям G.652).

Рівень SDH мультиплексорів – STM-4 (622,08 Мбіт/с). Параметри оптичного передавача й приймача SDH мультиплексора STM-4 середня потужність передачі: 0 дБ; чутливість приймача при коефіцієнт помилок 10^{-10} : –28 дБ; максимальний рівень припустимий на вході: –8 дБ; ширина спектра джерела випромінювання: 0,3 нм.

Експлуатаційний запас – 6 дБ. Втрати в рознімних з'єднаннях – 0,6 дБ. Кількість рознімних з'єднань – 2. Втрати в нероз'ємних з'єднаннях – 0,02 дБ.

Розрахунок довжини ділянки регенерації й кількості регенераторів :

1. Розраховуємо енергетичний потенціал.

$$P_{\text{пер}} = P_{\text{с}} - \Delta P = 0 - 3 = -3 \text{ дБ};$$

$$E_{\text{п}} = P_{\text{пер}} - P_{\text{пр min}} = -3 - (-28) = 25 \text{ дБ}.$$

2. Розраховуємо максимальну довжину ділянки регенерації по загасанню й широкосмужності:

$$L_{\alpha \text{ max}} < \frac{E_{\text{п}} - M - n \times \alpha_{\text{рс}}}{\alpha_{\text{ок}} + \alpha_{\text{нс}} / L_{\text{стр}}} = \frac{25 - 6 - 2 \times 0,6}{0,25 + 0,02/4} = \frac{17,8}{0,255} = 69,8 \text{ км};$$

$$L_B = \frac{4,4 \times 10^5}{\sigma \times \Delta \lambda \times B} = \frac{4,4 \times 10^5}{18 \times 0,3 \times 622,08} = 130,9 \text{ км,}$$

Для розглянутого прикладу умова $L_B > L_{\alpha \max}$ виконується, тому ми можемо використовувати обране оптичне волокно.

3. Розраховуємо мінімальну довжину ділянки регенерації:

$$L_{\alpha \min} > \frac{P_{\text{пер}} - P_{\text{пр max}}}{\alpha_{\text{ок}} + \alpha_{\text{нс}}/L_{\text{стр}}} = \frac{-3 - (-8)}{0,25 + 0,02/4} = \frac{5}{0,255} = 19,6 \text{ км.}$$

4. Розраховуємо кількість регенераційних пунктів, що не обслуговуються:

$$N_{\text{НРП}} = \left\lfloor \frac{L}{L_{\text{ру}}} \right\rfloor - 1 = \left\lfloor \frac{246}{69,8} \right\rfloor - 1 = 3 .$$

Після проведення розрахунку кількості регенераторів для кожного сегмента мережі складається загальна схема проектованої первинної мережі (рисунок 3.20).

Сьогодні системи передачі SDH визнані в усьому світі як найсучасніша й добре відпрацьована технологія для побудови транспортних мереж зв'язку. Практично всі розвинені країни широко застосовують системи передачі SDH. Провідні фірми – виробники різко скоротили виробництво апаратури плезіохронних ЦСП. Альтернативи застосуванню систем передачі SDH на широкосмугових мультисервісних мережах. Сучасна технологія SDH забезпечує мультиплексування, пряму передачу цифрового потоку рівня STM-256 (40 Гбіт/с) по одному ООВ і демультиплексування прийнятого потоку.

Сутність технології DWDM полягає в одночасній передачі по одному волокну декількох десятків потоків, наприклад, технології SDH з різними швидкостями передачі по «вузьких» спектральних смугах, наприклад, 50 або 100 ГГц у заданому діапазоні довжин хвиль ООВ. Зазначені вище типи одномодових

волокон з нульовою зміщеною дисперсією спеціально розроблені для технології DWDM.

Таким чином, сучасні тенденції розвитку засобів телекомунікацій свідчать про перспективність систем передачі, що працюють по ООВ. У них сполучаються часове мультиплексування для утворення сигналів STM-N (Synchronous Transport Module of level N) і їх передача по одному ООВ з використанням технології DWDM.

На сьогоднішній день установлене на транспортній мережі обладнання волоконно – оптичного магістрального зв'язку в основному підтримує потоки рівнів від STM-1 до STM-16.

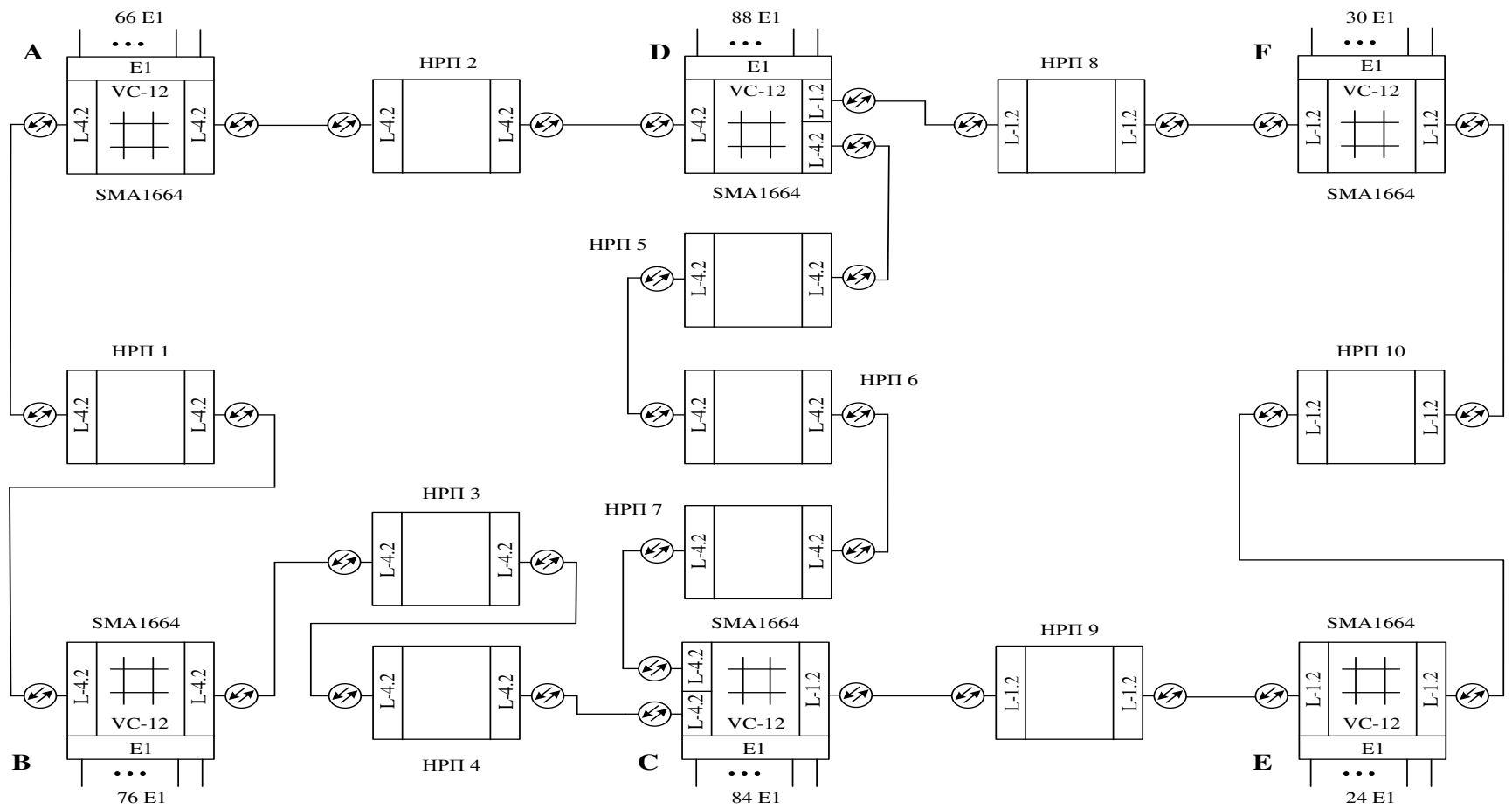


Рисунок 3.22 – Схема проектованої первинної мережі

ВИСНОВКИ

Робота присвячена галузі науки, що швидко розвивається – когнітивним радіо системам, що базуються на системах штучного інтелекту, які впроваджуються в сучасний радіозв'язок, так можуть розповсюджуватись в радіоефірі на значні відстані.

В результаті виконання дипломної роботи було розглянуто одну з найактуальніших проблем сьогодення - методи регулювання використання обмеженого частотного ресурсу, проведений аналіз принципів функціонування радіомереж на основі протоколу IEEE 802.22, досліджено принцип проектування когнітивної радіомережі, спроектовано когнітивну мережу.

Найбільшою перевагою когнітивного радіо є його здатність використовувати дефіцитні ресурси спектру ефективніше, ніж у звичайних радіосистемах. Когнітивне радіо врешті-решт приведе до об'єднання всіх безпроводних пристроїв і, за рахунок цього, поступово спроститься взаємодія користувача з усе більш складними пристроями.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. H. Urkowitz “Energy detection of unknown deterministic signals,” IEEE Proceedings, vol. 55, no. 4, pp. 523–531, 1967.
2. A. Ghasemi and E.S. Sousa “Opportunistic spectrum access in fading channels through collaborative sensing,” IEEE Journal of Communications, vol. 2, no. 2, pp. 71–81, 2007.
3. “Cognitive Radio Definition,” Virginia Tech Cognitive Radio Work Group Wiki. Available Online: http://support.mprg.org/dokuwiki/doku.php?id=cognitive_radio:definition
4. F.F. Digham, M.S. Alouini, and M.K. Simon “On the energy detection of unknown signals over fading channels,” IEEE Transactions on Communications, vol. 55, no. 1, pp. 21–24, 2007.
5. S. Haykin “Cognitive radio: brain-empowered wireless communications,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 23, no. 2, pp. 201–220, 2005.
6. P.K. Varshney Distributed Detection and Data Fusion, Springer, Secaucus, NJ, USA, 1996.
7. A. Goldsmith Wireless Communications, Cambridge University Press, New York, NY, USA, 2005.
8. I. Akyildiz, W.-Y. Lee, M.C. Vuran, S. Mohanty “A survey on spectrum management in cognitive radio networks,” IEEE Communications Magazine, vol. 46, no. 4, pp. 40–48, 2008.
9. F.E. Visser, G.J.M. Janssen, P. Pawełczak “Multinode spectrum sensing based on energy detection for dynamic spectrum access,” in Proceedings of the 67th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC '08), pp. 1394–1398, June 2008.
11. T. Weiss, J. Hillenbrand, and F. Jondral “A diversity approach for the detection of idle resources in spectrum pooling systems,” in Proceedings of the 48th International Scientific Colloquium, pp. 37–38, September 2003.
12. Лисечко В.П., Степаненко Ю.Г., Сопронюк І.І., Брюзгіна Н.О. / Дослідження методів аналізу спектру в когнітивних радіомережах / Лисечко В.П.,

Степаненко Ю.Г. / Збірник наукових праць. – Х.: Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба –2010. – Вип. 3 (25) – С.137-145.

13. Прокопчук О.М. Дослідження методів побудови дискретних каналів зв'язку / О.М. Прокопчук, Д.С. Климань // Тези доповідей 82 студентської науково-технічної конференції Українського державного університету залізничного транспорту (Харків, 3–5 листопада 2021 р.). – Харків: УкрДУЗТ, 2021, С. 77.

14. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. – М.: Радио и связь, 2000. – 468 с.: ил.

15. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. - М.: Эко-Трензд, 2000.

16. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи – М.: Техносфера, 2003.

17. Широков М.А. Методика расчета протяженности регенерационной секции волоконно-оптических систем передачи информации со спектральным разделением. – Lightwave, 2007, №7.- 10-12С.

18. Рекомендация ИТУ-Т G.957 Оптические интерфейсы для оборудования и систем синхронной цифровой иерархии.

19. Рекомендация ИТУ-Т G.652 Характеристики одномодового волоконно-оптического кабеля.

21. Рекомендация ИТУ-Т G.654 Характеристики одномодового волоконно-оптического кабеля с затуханием, минимизированным на волне 1550 мкм.

22. Приходько С.І. Проектування первинної мережі зв'язку на основі обладнання синхронної цифрової ієрархії / методичні вказівки до курсового та дипломного проектування з дисципліни «Системи передачі в електровз'язку» // С.І. Приходько, О.С. Жученко, В.П. Лисечко // Харків: УкрДУЗТ, 2008, С.97.

ДОДАТОК А (Розділ 1 англійською)

1 ANALYSIS OF THE PRINCIPLES OF RADIO NETWORK OPERATION BASED ON THE IEEE 802.22 PROTOCOL

1.1 Description of the IEEE 802.22 protocol

The International Institute of Electrical and Electronics Engineers has announced the completion of the IEEE 802.22 wireless standard, known as "white space". The name is not accidental: for data transmission it is planned to use "gaps" in the television VHF / UHF band (54-862 MHz) frequencies. This approach was made possible by the invention of "smart" radio - cognitive radio technology, which adjusts the parameters of the transceivers of the network so that data transmission does not go to the "licensed" frequencies. The development can be considered a close relative of Wi-Fi (IEEE 802.11) and WiMAX (IEEE 802.16), but not a replacement for these technologies.

IEEE 802.22 WRAN (Wi-Fi) is a wireless regional network standard that describes a two-tier architecture (PHY layer and MAC layer) with a point-to-multipoint connection. The network is designed to work with professional fixed base stations, as well as portable (or fixed) custom terminals (modems). Data exchange according to the standard is carried out on "free" frequencies of VHF / UHF (VHF / UHF) television broadcasting, which is a band from 54 to 862 MHz. According to the developers, the network is mainly intended for use in sparsely populated areas, as well as in rural areas, where there is likely to be a sufficient number of free channels in the working frequency band of the standard.

IEEE 802.22 equipment is intended for remote areas with low population density: such equipment is characterized by high range, relatively low data rate and a small number of available communication channels. Surprisingly, IEEE 802.22 transmitters can communicate up to a hundred kilometers - although more than 22 Mbps with such a connection can not be achieved. It is also important that the interaction of the equipment does not require direct visibility - the signal penetrates well into hard-to-reach areas.

The creation of IEEE 802.22 was made possible by the use of a frequency band that was previously considered inviolable. Wi-Fi, WiMAX, Bluetooth and LTE operate at frequencies of a few gigahertz, while IEEE 802.22 takes up a frequency space of several tens to several hundreds of megahertz. The same range has long been used by analog television, however, according to the developers of the standard, this should not be a problem.

How does this happen? The system constantly analyzes the spectrum of the radio signal surrounding the background signals, as well as the behavior of network users. The base station, having collected all the information about the frequency range and using information about its location (by GPS), determines which frequencies can be used to communicate with network users. When the connection is already established, the system periodically scans the frequency range in case of new signals and when it detects such immediately switches to other frequencies.

The developers note that the IEEE 802.22 WRAN is one of the first specifications to make full use of cognitive technologies in radio communications. Thus, the standard allows you to effectively use the available frequency range without the need for licenses. As a result, it allows you to achieve data rates up to 22 Mbps and a coverage area with a radius of 100 km.

The question may be, why do we need new wireless standards when we already have Wi-Fi, WiMAX and LTE? The answer to this question is: at least in order to provide a coverage area with a radius of 100 km and data transmission up to 22 Mbps.

The 802.22 specification is the result of the work of Professor Joseph Mitola III, who published his research in 1999 with Gerald Maguire. The concept, cognitively called "cognitive radio", allows communication systems to use "busy" frequencies to transmit their data due to "gaps" in the band. However, the law forbade working with reserved frequency bands, or the opportunity arose when buying expensive licenses. The legal framework hindered the advancement of technology. Only in 2004 did the US Federal Communications Commission amend unlicensed subscribers to use license strips, provided they did not interfere with the work of legitimate users. This event initiated the emergence in November 2004 in the "walls" of the IEEE working group,

which began to develop the standard 802.22 with cognitive radio communication as a basic technology. The final release of IEEE 802.22-2011 appeared only seven years later.

The new standard was designed for the Wireless Regional Area Network (WRAN). This involves covering areas with a radius of tens of kilometers. The specification will allow ISPs to provide rural people with access to broadband Internet access where it does not already exist. The increase in range was achieved by reducing the operating frequencies commonly used in Wi-Fi, WiMax or LTE to transmit information. The selection of optimal frequencies depends on many factors. To ensure the longest range while maintaining reasonable power and acceptable bandwidth, frequencies in the range from 54 to 862 MHz, the so-called television frequencies, are best suited. The bandwidth of one television channel in the US, Japan and most of Central and South America is 6 MHz, for Ukraine and most other countries this value is 8 MHz, but there are also standards with 7 MHz band, such as Australia, Belgium and Luxembourg. Therefore, 802.22 is expected to use the bandwidth of one channel at 6 (8, 7) MHz.

The existing broadcasting system can serve as an example of the successful use of this band to cover large areas. In addition, these frequencies are not affected by walls and interference. However, the use of VHF / UHF has a drawback: lower frequencies (long waves) require larger antenna systems. In addition to the widely used analogue television systems NTSC (USA, Canada, Japan), PAL (Europe), SECAM (France, Greece, Russia), the range is officially assigned to radio communications of public services (police, fire service, etc.) and commercial services (taxi, etc.). This band also has wireless microphones, ATSC / DVB-T digital television systems and much more - it is important that none of them can be disturbed.

1.2 Overview of the features of the standard

The features of this standard include:

- 1) destination - broadband wireless Internet access for rural areas;

2) core - cognitive radio transmission technology, designed for unlicensed use of television frequencies;

3) target audience - industry, government and governing bodies, academic organizations, providers;

4) projects - IEEE 802.22.1, IEEE 802.22.2;

5) portability - can be used in motion up to 114 km / h;

6) network topology - point-to-multipoint;

7) radius of the coverage area - 10-100 km (for a fixed base station and modem);

8) radiation power - 4 W (radiation power means effective isotropically radiated power, EIRP);

9) antennas - a non-directional (or sector) transceiver antenna is used at the base station, and a directional antenna with 14 dB suppression of the rear petal is directed on the subscriber's side; in addition, there is a non-directional antenna for scanning the frequency range (cognitive radio communication);

10) geo-positioning - GPS or ground (necessary for the operation of the system).

The range parameters used by the standard are given in Table 1.1

Table 1.1- Parameters of ranges used by the standard

Frequency Range	Range Limits	Wave Range	Range Limits
Medium (MF)	0.3-3 МГц	Hectometers	1-0.1 km
High (HF)	3-30 МГц	Decameter	100-10 m
Very high (VHF)	30-300 МГц	Meters	10-1 m
Ultrahigh (UHF)	0.3-3 GHz	Decimeter	1-0.1 m
Ultrahigh (UHF)	3-30 GHz	Centimeters	10-1 cm
Too high (microwave)	30-300 GHz	Millimeters	10-1 mm
Hyperhigh (HF)	0.3-3 THz	Decillimeters	1-0.1 mm

The main difference between this standard and previous ones, for example, 802.11, is "long range". The signal of a single transmitting station can be caught at a distance of up to 100 kilometers. The frequency range of the 802.22 wireless standard is in the spectrum from 54 MHz to 698 MHz. Thus, data transmission can be carried out at speeds up to 22 Mbps over distances of up to 100 kilometers, based on a single base station. It is possible that this standard will help attract remote regions to the World Wide Web, whose residents are still without the Internet, or pay a lot of money to access the Web.

It should be noted that the new standard uses the frequency range that remained empty after some analogue television standards were repealed.

This range of communication of the new standard implies that, for example, purely theoretically, only 307 access points will be required to cover the entire territory of the United States. But in practice, the situation will be a little different, and more access points will be needed, which is primarily due to the presence of mountains, forests and other objects that prevent the spread of radio signals.

Under the new IEEE standard, 802.22-compliant equipment will operate on one of the free frequencies from 54 MHz to 698 MHz. Waves in this range can travel much longer than waves in the 2.4 GHz band, which are the basis of the current Wi-Fi standard. This will make it possible to deploy wireless regional area networks (WRAN).

Of course, 22 Mbps by today's standards is not such a high speed for those who are used to direct connection via Ethernet or fiber, but it should be noted that this value is the theoretical maximum speed that can be achieved in a radio channel operating in the above frequency range.

Of course, the adoption of the 802.22 standard is hard to underestimate. With the help of this standard, it is possible to provide coverage of rural areas, whose residents could previously only dream of the Internet in their home. Also, the new standard will be useful to developing countries that have difficulty in providing low-cost and reliable communications.

The new standard is based on the characteristics of the TV bands VHF (VHF, 30-300 MHz) and UHF (UHF, 300-3000 MHz), which with the advent of digital television

have become largely free, and is able to provide wireless broadband at a distance of up to 100 km around the transmitter.

Moreover, WRANs will be able to offer a significant speed of up to 22 Mbps per channel, and the use of frequencies not occupied by TV channels, allows you to ensure that the signal will not intersect with existing TV stations.

The IEEE notes that the technology is particularly useful for serving sparsely populated rural areas and developing countries, where most television channels are not occupied. With the approval of the standard, commercial organizations can begin to create devices compatible with 802.22 technology.

1.3 Overview of the technology used by the IEEE 802.22 WRAN standard

The IEEE 802.22 WRAN standard uses cognitive radio transmission technology, which adjusts the parameters of network transceivers so that data transmission does not exceed the "licensed" frequencies. How does this happen? The system constantly analyzes the spectrum of the radio signal surrounding the background signals, as well as the behavior of network users. The base station, having collected all the information on the frequency range and using information about its location (GPS), determines which frequencies can be used to communicate with network users. When communication is already established, the system periodically scans the frequency range in case of new signals, and when it detects such, immediately switches to other frequencies. It should be noted that the scanning of the frequency range is on the side of the subscriber, which allows you to have up-to-date information about the situation in the coverage area. The developers note that the IEEE 802.22 WRAN is one of the first specifications to make full use of cognitive technologies in radio communications. Thus, the standard allows you to effectively use the available frequency range without the need for licenses.

The developers distinguish several basic "licensed" systems that use the working range of the standard:

- 1) analog television;

in North America broadcasting is based on NTSC, and in Europe on PAL. The level at which the channel will be released corresponds to -94 dBm (dB from 1 mW), which is

measured at the peak of the clock pulses. DTV (ATSC) is used in North America and DVB-T in Europe. The signal level for DTV (ATSC) is -116 dBm.

2) wireless microphones;

There are no standards in this area, and they may have different formats. FM with a bandwidth of 200 kHz is mainly used for transmission. Signal level -107 dBm. In order to skillfully and harmlessly use the "gaps" in the already used frequencies, a number of cognitive mechanisms are provided.

3) scanning (sensing) the operating spectrum of frequencies;

allows you to detect busy channels, this procedure is mandatory when initializing the network. Also, the frequency information is periodically updated during system operation. Scan control is performed by the base station, which not only sends control commands to the user of the equipment, but also performs spectrum exploration and search for new subscribers. This system allows you to keep up-to-date information about the state of the air in the entire coverage area of the base station and configure the network in a timely manner.

4) registration and tracking of user equipment;

Registration and tracking is necessary for efficient organization of frequency space and fast connection of new subscribers to the network.

5) a single database of licensed users;

single database - the band first prevents the network from operating on frequencies constantly occupied by local services or regional television channels.

6) geolocation;

allows you to find out the region of location and the database to determine which channels are occupied in a particular area, as well as choose the optimal route for transmission

information packets. The specification envisages the use of satellite or ground positioning. GPS equipment will be available for each subscriber for satellite geolocation. Location information is transmitted to the base station according to the protocol NMEA 0183. This is a text communication protocol for marine navigation systems, widely used in GPS.

7) the mechanism of coexistence of systems;

provides for the organization of the spectrum, so that the standard does not interfere with the work of licensed users, as well as organize the internal system ranking of subscribers in the work band.

1.4 Overview of antennas with which the standard works

The network is designed to work with professional fixed base stations, as well as portable (or fixed) custom terminals (modems). Appropriate signal strengths are required to cover large areas. The specification stipulates that to cover an area with a radius of 30 km will require a radiation power of 4 W. At the base station for these purposes is a non-directional antenna to evenly cover the entire area. If necessary, the isotropic antenna can be replaced by a sector one. This configuration will allow more efficient coverage of the area with an uneven distribution of subscribers by area or with a complex location of several base stations. On the client side, on the other hand, a narrow-directional antenna with an orientation towards the base station (or a base station with the maximum signal, if there are several) is used. In addition, the client equipment has a scanning antenna for the functioning of cognitive mechanisms. A GPS antenna can also be placed when using satellite positioning.

It is important to understand the difference between the IEEE 802.22 standard and other specifications, especially IEEE 802.16 (WiMax), with which it is often compared. The main difference is that 802.22 is targeted at rural and remote areas. Its radius of coverage is many times larger. In addition, 802.22 is the world's first standard to use cognitive technology to share the optimal frequency range and does not require licensing to use specific frequencies.

1.5 Description of the IEEE 802.22 architecture

The most important requirements from the developers to the IEEE 802.22 standard were the flexibility and adaptability of the system, as the equipment has to work in the spectrum with licensed subscribers. As a result, the standard describing the PHY

(Physical) and MAC (Media Access Control) models of the OSI network has received a special architecture.

Principles of PHY level organization

Two-way time division duplexing (TDD) communication is organized between the base station and the physical user equipment. In this division, the input and output data are transmitted on the same frequency, but at different intervals. If you need to change the speed priority, there is nothing easier - just extend the time allocated for one data stream and reduce it for another.

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) technology is used as a transport mechanism in 802.22. A similar scheme is used in WiMax. Its essence is that some data stream is divided between several special frequencies. Each substream is modulated according to its own scheme.

The specification provides for three types of modulation schemes: Quadrature Phase Shift Key (QPSK), Quadrature Amplitude Modulation (16 and 64). Schemes differ in the amount of information that can be transmitted in one character. One or another modulation scheme is chosen based on the transmission conditions. The higher the baud rate, the lower its reliability (the higher the probability of error). Therefore, if the network subscriber is located far from the base station and the signal level during communication is not very high, it is better to change the modulation scheme, for example from 16 QAM to a slower but stable QPSK. The system is constantly adapted, and for each user the optimal mode is balanced between speed and noise immunity.

Important for the standard is the feature of OFDM to counteract multipath. This effect occurs in the presence of any interference between the base station and the subscriber. The signal can experience many reflections from a variety of objects. Ultimately, the receiver receives not one signal, but several with some delay, which can lead to intersymbol interference. Against this, OFDM uses a special insert, the so-called cyclic prefix.

For more stable operation, 802.22 provides the use of codes that allow you to correct errors. Including Gallager codes, which are currently the best solution for transmitting information over the communication channel with noise in a limited band.

The Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) technique is used simultaneously to organize access to the communication channel of several subscribers. This is a unique technology that allows you to use the available frequency space in the most profitable way. OFDMA has already proven itself in standards such as WiMax and LTE. In the OFDM mechanism, special frequencies are shared between network users.

Spectral efficiency according to the standard can vary from 0.624 to 3.12 Bit / s / Hz. This value characterizes the data rate in a given frequency band. The higher the value, the higher the bandwidth of the system, but with increasing spectral efficiency, noise immunity decreases. To compensate for the low bandwidth of the channel with minimal spectral efficiency, the channel bonding technique is used. The essence of the technique is to use up to three TV channels simultaneously to ensure an acceptable transmission speed due to the bandwidth of 18 (21, 24) MHz.

To protect the license channels, it is necessary to maintain the frequency interval to prevent interference. The width of the frequency range is recommended to be comparable to the width of one channel. In fact, it is necessary to have gaps in the UHF / UHF range with a width of three channels (one information plus two protective on the sides) and more. This requirement emphasizes once again that it is advisable to deploy IEEE 802.22 in rural and sparsely populated areas where broadcasting is relatively free.

When designing the standard, the developers were focused on ensuring that the level of system performance was no worse than in DSL. To do this, it was necessary to ensure the speed of the input (downlink) connection (within the base station) of about 1.5 Mbps, and the speed of the output (uplink) 384 Kbps for 12 simultaneous users in the network. Providing this speed for users requires that the bandwidth of the channel for the input connection was $1.5 * 12 = 18$ Mbps. Therefore, with a bandwidth of 6 MHz (for the United States, much of Central and South America and Japan, in the rest of the world the band is mostly 8 MHz), the required spectral efficiency was $C = 18/6 = 3$ bits / (c * Hz)). Based on these principles, a standard was formed, the parameters of which can be conveniently summarized in Table 1.2.

Table 1.2 - Parameters of the IEEE 802.22 standard

Channel band (MHz)	6, (7, 8)
Multiplexing	OFDM, OFDMA (uplink)
Modulation	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Coding	Collapsible codes, Block Turbo Code
Bandwidth (downlink)	18 Mbit/s
Spectral efficiency	0.624–3.12 bit/(s*Hz)
Custom performance	Downlink: 1.5 Mbit/s Uplink: 384 kbit/s

The OFDM scheme was adopted in order to ensure the stable operation of the system in the conditions of multi-beam propagation and selective fading of the signal, as well as to ensure high bandwidth and efficient use of bandwidth. Depending on different conditions, the standard allows the use of different modulation schemes: QPSK, 16-QAM or 64-QAM. Moreover, the standard does not exclude adaptive dynamic configuration of modulation for a particular user. To ensure the required declared performance, the standard introduced the system "Channel Bonding" (channel connection). This system allows you to use more than one TV channel at a time to provide the desired bandwidth. This is possible due to the fact that very often in different countries between the broadcast channels leave 2 or more free channels to get rid of cross-barriers. In practice, it is expected to be limited to 3 free channels.

Principles of MAC level organization

The Media Access Control layer organizes addressing and network access control. MAC, based on cognitive technologies, must have a very dynamic and flexible architecture to respond quickly to changes in the network. Superframes are used to exchange data in 802.22. The duration of one superframe is 160 ms. At the beginning of each superframe there is a special preamble and a superframe control header (SCH). The base station sends superframes on each of the available and satisfying channels. Subscribers in the station's coverage area and not yet connected to the network "listen"

to free channels for the presence of superframes. Upon receipt of the data, the subscriber equipment retrieves from the SCH all the necessary information to initialize the network connection. Each superframe consists of frames. The duration of one frame is 10 ms, respectively, in one superframe 16 frames. Frames are direct storage data.

Network initialization in 802.22 is more difficult than in other wireless networks. Everything is complicated by the fact that there is no specific communication channel at first. Thus, the user equipment must first scan the frequency grid and map the entire range. Then in the free and corresponding gaps look for the SCH base station. Once the SCH is received, the subscriber's modem makes itself known to the base station and remains in the channel for the duration of the superframe. If during this time the modem receives the answer, then there is an initialization and connection to a network. After the connection is established, the channel status information is sent to the base station.

As mentioned above, while working in the network, the base station periodically sends commands to the subscriber equipment to run a range scan for the presence of licensed users. However, there are different scanning algorithms that determine the maximum signal level in the channel, scan time, range, probability of false alarm. There are certain thresholds for signals at which they will be interpreted as licensed users. All these parameters affect the success of obtaining a reliable frequency grid in the region. The base station can distribute the load between the subscribers when scanning the frequency spectrum. If the main base station is "silent" for a long time, then the subscriber equipment looks for beacons from another neighboring station and in case of a successful search connects to it. Network modeling has shown that even with a large concentration of adjacent stations, subscriber terminals are quickly distributed between them. As a result, the load on the base stations becomes optimal.

The requirements of the developers for the flexibility of the standard architecture have created a number of new problems, which imposed certain requirements on the structure and principles of the project, including at the MAC level. First of all, there were problems with initialization and logging in. The essence of the problem is due to the fact that the network does not have a fixed channel, and there is no possibility to send a pilot signal to search for the network (channel). Therefore, first you have to scan

the entire frequency range to track available free channels, and then in the found filtered frequency range to scan the pilot signal of base stations, and only then connect to the network.

The specificity of the standard requires a certain organization of information exchange. Duplex time division duplex communication (TDD) is used to provide data transmission between the user and the base station. This is the most optimal scheme, as only 1 channel is needed for exchange, which is easier to control in contrast to the same FDD (frequency separation), and also allows you to dynamically change the bandwidth of input and output streams. A special frame data structure is used for this type of transmission. Frames and Superframes are introduced as part of the standard.

- super-frame duration: 160 ms;
- frame duration: 10 ms;
- each super-frame consists of frames;
- super-frames provide full synchronization of all network operation, in particular, they provide initialization of network access and network entry. At the beginning of each superframe there is a preamble and a superframe control header, or SCH for short. The header and preamble contain all the necessary information for all new subscribers who want to connect to the base station;
- each frame is divided into two subframes: input (downlink sub-frame (DL)) and output (uplink sub-frame (UL)). The boundary between two subframes can vary depending on the required bandwidth;
- each frame contains a CBP (Co-existence Beacon Protocol) packet, which contains technical information about the network, such as geo-position, free channels, commands from the base station to customers, etc.

Finally, the standard has been designed to avoid conflicts with existing broadcast channels as well as other radio transmission systems in this frequency range. As a result, the system has become adaptive, thanks to the use of cognitive technologies, which also allows to get rid of various obstacles and changes in the propagation of radio waves, which periodically occur in practice.

The standard supports the various QoS systems listed in Table 1.3

Table 1.3 - QoS systems for the IEEE 802.22 standard

QoS	додаток
UGS	VoIP, T1 / E1
rtPS	MPEG video streaming
nrtPS	FTP
BE	E-mail
Contention	BW queries etc.

The IEEE 802.22 specification is simple and easy to understand. The developers tried to make the most optimal data exchange technology for relatively long distances and acceptable transmission speeds. The unique approach with the use of cognitive methods of radio transmission allows to get rid of a number of problems at the design stage of the standard, including at the legislative level. Of course, you should not expect completely without a licensed distribution of technology, but the specifics of the devices should provide a simpler procedure for localization of technology. Most likely, the first thing to expect is the appearance of IEEE 802.22 devices on the US market in view of the already settled legal issue.

IEEE 802.22, which appeared relatively recently, has brought with it new mechanisms that can bring quality communication even to the most remote corners of the planet. Unique approach to solving the issue of frequency division, which is acute in Ukraine, can make 802.22 the most common wireless standard to cover large areas. This uses private scanning of the operating range, continuous monitoring and tracking of changes, as well as the procedure of sharing spectrum with licensed users.