ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Методи оптимізації роботи РРЛ в умовах міської забудови»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка
освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

(підпис) Богдан СМІЛЯНЕЦЬ (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи АРДМ-62
Богдан СМІЛЯНЕЦЬ

Керівник: Андрій ЛЕМЕШКО

Рецензент: К. Лавріненко

Київ – 2023

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інститут телекомунікацій

Кафедра	Мобільних та відеоінформаційних технологій
Ступінь вищої освіти	Магістр
Спеціальність	172 Телекомунікації та радіотехніка
Освітньо-професійна програма	Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувачка кафедрою МВТ
_____ Наталія РУДЕНКО
« » _____ 2023 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Смілянцю Богдану Миколайовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Методи оптимізації роботи РРЛ в умовах міської забудови»,
керівник кваліфікаційної роботи Андрій ЛЕМЕШКО, PhD,
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від 19.10.2023 р. №145.

2. Строк подання кваліфікаційної роботи 25.12.2023 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
   1. Конфігурація та конструкція сучасного обладнання мережі РРЛ.
   2. Аналіз тренду технологій.
   3. Методи оптимізації мережі РРЛ.
   4. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
   1. Опис конструкцій радіорелейного зв'язку.
   2. Аналіз обсягу даних та визначення відповідних цілей транспортної мережі.
   3. Визначення методів оптимізації радіорелейної мережі на основі показників в ПАК "Atoll".

5. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація.

6. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури	19.10.23	Викон.
2.	Аналіз конструктивних та функціональних особливостей РРЛ	31.10.23	Викон.
3.	Параметри надійності та ефективності при плануванні та оптимізації перспективних радіорелейних мереж	15.11.23	Викон.
4.	Розробка та оптимізація мережі РРЛ з використанням пак атолл в умовах міської забудови	29.11.23	Викон.
5.	Висновки, вступ, реферат	11.12.23	Викон.
6.	Розробка презентації	18.12.23	Викон.

Здобувач вищої освіти _____ Богдан СМІЛЯНЕЦЬ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Андрій ЛЕМЕШКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 81 стор., 32 рис., 1 табл., 25 дж.

Мета роботи полягає у визначені та застосуванні методів оптимізації мережі РРЛ за допомогою ПАК Atoll.

Об'єкт дослідження - розроблена мережа РРЛ в умовах міської забудови в програмному комплексі Atoll.

Предмет дослідження – методи оптимізації мережі РРЛ.

Короткий зміст роботи: Виконано опис конструкції та особливостей сучасного радіорелейного обладнання. Визначено, що лавиноподібне зростання числа користувачів мобільного зв'язку, інтернету речей, мобільного відео та мереж призводить до постійного збільшення мобільного трафіку.

Описано умови поширення сигналу та їх вплив. Проведено аналіз перспективних методі оптимізації мережі РРЛ.

В роботі досліджено використання ПАК "Atoll" для створення перспективних мікрохвильових мереж, зазначено функціонал та параметри якості мережі.

Проведено дослідження топології мережі РРЛ в умовах міської забудови мобільного оператора зв'язку. За допомогою інструментів Atoll визначено методи оптимізації. В результаті, готова мережа, яка представлена в роботі, може забезпечити надійний сервіс та послуги надані постачальником.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: РАДІРЕЛЕЙНИЙ ЗВ'ЯЗОК, ТРАНСПОРТНА МЕРЕЖА, МІКРОХВИЛЬОВИЙ ЗВ'ЯЗОК, МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ, ATOLL.

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 81 pages, 32 pictures, 2 table, 25 sources.

The purpose of the work consists in the identification and application of methods of RRL network optimization using the Atoll PAK.

Object of research – developed a network of RRC in the conditions of urban development in the Atoll software complex.

Subject of research – RRC network optimization methods.

Summary of the work: The design and features of modern radio relay equipment are described. It was determined that the avalanche-like growth in the number of users of mobile communications, the Internet of Things, mobile video and networks leads to a constant increase in mobile traffic.

The conditions of signal propagation and their influence are described. The analysis of promising methods of optimization of the RRC network was carried out.

The work examines the use of the "Atoll" PAK for creating promising microwave networks, the functionality and quality parameters of the network are indicated.

A study of the topology of the RRC network in the conditions of the urban development of the mobile operator was carried out. Optimization methods are defined with the help of Atoll tools. As a result, the finished network, which is presented in the work, can provide reliable service and services provided by the supplier.

KEYWORDS: RADIO RELAY COMMUNICATION, TRANSPORT NETWORK, MICROWAVE COMMUNICATION, OPTIMIZATION METHODS, ATOLL.

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на здобуття освітнього ступеня магістра

Направляється здобувач Смілянець Б.М. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)

за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка
освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

на тему: Методи оптимізації роботи РРЛ в умовах міської забудови

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

Директор ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Смілянець Богдан Миколайович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння володіти технологіями нового покоління, вміло працювати з програмно-апаратними засобами мобільного зв'язку, довідковою і науково-технічною літературою. Працюючи над завданнями, які доручались керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до інженерної роботи.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу Смілянця Богдана Миколайовича на оцінку «відмінно» та присвоїти йому кваліфікацію «Магістр з телекомунікацій та радіотехніки».

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Андрій ЛЕМЕШКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

“ ” _____ 2023 року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Смілянець Б.М.
(прізвище та ініціали)

допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувачка кафедри
Мобільних та відеоінформаційних технологій _____ Наталія РУДЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

“ ” _____ 2023 року

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА

на кваліфікаційну магістерську роботу

здобувача вищої освіти Смілянця Богдана Миколайовича

на тему: «Методи оптимізації роботи РРЛ в умовах міської забудови»

Актуальність:

У міру прискорення розгортання 5G і збільшення кількості мобільних базових станцій, мікрохвильовий зв'язок став важливим методом передачі послуг за відсутності оптоволокона та продовжує відігравати важливу роль в еволюції до 5G. Щоб відповідати умовам сучасних мереж, радіорелейні системи необхідно постійно удосконалювати. Тому, сформульована у роботі наукова проблема є актуальною та важливою для розвитку мереж доступу.

Позитивні сторони:

1. Зміст магістерської роботи відповідає завданню. Її автор, показала високий рівень знань і ступінь підготовленості до майбутньої роботи за фахом.

2. Текст викладений грамотно, ясно, послідовно. Графічний матеріал оформлений якісно. Широко використовується сучасна науково-технічна література, включаючи англомовні видання.

Недоліки:

1. В розділі 3 представлено топологію мережі РРЛ побудовану ще на застарілому обладнані.

2. Не проведено порівняльний аналіз між поточною та оптимізованою мережами.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку кваліфікаційної роботи.

Висновок: кваліфікаційна робота заслуговує оцінку «відмінно», а здобувач Смілянець Богдан Миколайович заслуговує присвоєння кваліфікації: «Магістр з телекомунікацій та радіотехніки».

Рецензент: КТН, доцент (науковий ступінь, вчене звання) _____ (підпис) К. Лаврінець (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ 9
ВСТУП 12
1 АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ РРЛ 14
1.1 Конструкція радіорелейних станцій 14
1.2 Аналіз приросту трафіку 20
1.3 Потреба в оптимізації мережі передачі даних та постановка задачі дослідження 23
2 ПАРАМЕТРИ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИ ПЛАНУВАННІ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ПЕРСПЕКТИВНИХ РАДІОРЕЛЕЙНИХ МЕРЕЖ 29
2.1 Резервування каналів 29
2.2 Завадостійкість каналу та збільшення ємності 34
2.3 Перспективні методи оптимізації мереж РРЛ 53
3 РОЗРОБКА ТА ОПТИМІЗАЦІЯ МЕРЕЖІ РРЛ З ВИКОРИСТАННЯМ ПАК АТОЛЛ В УМОВАХ МІСЬКОЇ ЗАБУДОВИ 74
3.1 Atoll Microwave 74
3.2 Особливості планування та оптимізації радіорелейних систем у мережах мобільного зв'язку з використанням ПАК Атолл 87
ВИСНОВКИ 93
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 94
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ 97

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ACAP – Adjacent Channel Alternate Polarization;

ACCP – Adjacent Channel Co Polarization;

ACM – Adaptive Coding and Modulation;

ATPC – Automatic Transmit Power Control;

CA – Carrier Aggregation;

Cat–M – Category M;

CCDP – Co-Channel Dual Polarization;

E2E – End-to-End;

EIRP – Equivalent Isotropically Radiated Power;

EPS – Evolved Packet System;

ETU – Ethernet Interface Unit;

FAU – Fan Unit;

FCC – Federal Communications Commission;

FD – Frequency division;

FDD / TDD – Frequency Division Duplex / Time Division Duplex;

FOR – Full Outdoor Radio;

GIS – Geographic Information System;

HSB – Hot Standby;

HSM – Hitless Switch Mode;

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers;

IF – Intermediate frequency;

IMS – IP Multimedia Subsystem;

IoT – Internet of Things;

IP – Internet Protocol;

ITU – International Telecommunication Union;

LAG – Link Aggregation;

LAN – Local area network;

LOS / NLOS / BLOS – Line Of Sight / Non-Line Of Sight / Beyond-Line-of-Sight;

LTE – Long-Term Evolution;

LTU – Line Termination Unit;

MCS – Modulation and Coding Scheme;

M–IFD – Microwave In-band Full-duplex;

MIMO – Multiple-Input Multiple-Output;

MLHC – Multi-Level Header Compression;

MMU – Modem Unit;

MPLS – Multiprotocol Label Switching;

MSE – Mean Squared Error;

NB–IoT – Narrow Band Internet of Things;

NPU – Network Processor Unit;

NR – New Radio;

ODU / IDU – Outdoor unit / Indoor unit;

OMT – Orthomode Transducer;

PDH / SDH – Plesiochronous Digital Hierarchy / Synchronous Digital Hierarchy;

PFU – Power Filter Unit;

POE – Power over Ethernet;

PtP / PtMP – Point to Point / Point to Multi–Point;

QAM – Quadrature Amplitude Modulation;

QoS – Quality of Service;

QPSK – Quadrature Phase-Shift Keying;

RAU – Radio Access Unit;

RLB – Radio Link Bonding;

RSI – Received Signal Level;

RTPC – Remote Transmit Power Control;

Rx / Tx – Receiver / Transmitter;

SD – Space Diversity;

SDN – Software-defined Networking;

SFP – Small Form–factor Pluggable;

SIC – Specific Integrated Circuit;

SINR – Signal-to-Interference-plus-noise Ratio;

SISO – Single-Input Single-Output;

SLA – Service Level Agreement;

TAPS – Traffic Aware Power Save;

TSSR – Technical Site Survey Report;

UDP – User Datagram Protocol;

VoLTE – Voice over LTE;

VoNR – Voice over New Radio;

VPN – Virtual Private Network;

WAN – Wide Area Network;

WMS –Web Map Services;

WTR – Wait–to–Restore;

XPI / XPD – Cross Polar Isolation / Cross Polar Discrimination;

XPIC – Cross-polarization Interference Cancelation;

АЦП / ЦАП – Аналого-Цифровий Перетворювач / Цифро-Аналоговий Перетворювач;

РРЛ – Радіорелейний зв'язок.

ВСТУП

З розвитком інформаційних технологій і прогресом цифрової трансформації, оптичне волокно широко поширене як життєво важливий засіб передачі по мережі. Створення великої кількості сайтів, створює численні проблеми для розгортання оптоволокна, включаючи: тривалі періоди будівництва, високі витрати, труднощі з дорогами та майновими правами, а також проблеми з розгортанням на складних територіях. Ці виклики серйозно гальмують розвиток інформаційної галузі.

Microwave — це ефективна та надійна широкосмугова система бездротової передачі, яка може ефективно вирішувати проблеми, пов'язані з розгортанням оптоволокна. Близько 60% базових станцій у всьому світі використовують мікрохвильову мережу для забезпечення зворотної передачі з великою пропускною здатністю та високою надійністю, яка охоплює великі відстані.

Мікрохвильові рішення включають традиційний мікрохвильовий спектр (6-42 ГГц), спектр міліметрового діапазону E-Band/V-Band, неліцензійні мікрохвильові частоти та інтегровані рішення для сайтів.

Швидкий розвиток мобільного Інтернету, Інтернету речей та високоякісного голосового зв'язку в останні роки змусив галузь зосередитися на технології 5G та покращення каналів РРЛ.

У міру прискорення розгортання 5G і збільшення кількості мобільних базових станцій, мікрохвильовий зв'язок став важливим методом передачі послуг за відсутності оптоволокона та продовжує відігравати важливу роль в еволюції до 5G.

Щоб відповідати умовам сучасних мереж, РРЛ повинна мати ключові функції, такі як доступність на 99.999%, агрегація та об'єднання каналів, передача сигналу в повному дуплексі, використання багатодіапазонних антен високої продуктивності, MIMO, використання високочастотного спектру, модуляція вищого порядку, стиснення заголовку Ethernet, передача в умовах LOS/NLOS, усування інтерференційних перешкод та інше.

Перед комерційним розгортанням будь-якої нової технології в РРЛ існує фаза планування, яка стосується радіотехнічних аспектів, таких як визначення розташування та азимут антен, оцінка бюджету лінії, призначення частот, вивчення та моделювання розповсюдження радіохвиль і перешкод в навколишньому середовищі.

Для цього типу планування оператори використовують такі інструменти, як Atoll. Це платформа від компанії Forsk для проектування та оптимізації бездротової мережі, яка підтримує широкий спектр технологій радіодоступу.

Таким чином, магістерська робота, присвячена плануванню та визначенню методів оптимізації сучасної мережі РРЛ, шляхом використання програмного забезпечення Atoll.

Об'єкт дослідження – розроблена мережа РРЛ в умовах міської забудови в програмному комплексі Atoll.

Предмет дослідження – методи оптимізації мережі РРЛ.

Мета роботи полягає у визначені та застосуванні методів оптимізації мережі РРЛ за допомогою ПАК Atoll.

1 АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ РРЛ

1.1 Конструкція радіорелейних станцій

Опис конструкції радіорелейної мережі покажемо на прикладі обладнання Ericsson MINI-LINK 6600 серії [1] (рис. 1.1).

Порівняльні характеристики MINI-LINK 6651/6690 наведені в таблиці 1.1.

MINI-LINK 6600 забезпечує пропускну здатність до 88 Гбіт/с і може підключати до 16 розділених радіоліній з максимальною кількістю 15 радіальних напрямків завдяки модемам з двома несучими. До вузла також можна підключити інтерфейси 1 Гбіт/с, 2,5 Гбіт/с і 10 Гбіт/с, оптоволоконні лінії та лінії зв'язку E-діапазону. Вузол підтримує передачу по радіолінії з високою модуляцією 8192 QAM.

MINI-LINK 6600 має як фіксовані компактні вузли, так і вузли, що використовують модулі, що спрощує налаштування конфігурацій і оновлення в майбутньому.

Весь спектр зовнішніх блоків MINI-LINK можна легко комбінувати багатьма різними способами: традиційні частоти (6–42 ГГц), V-діапазон 60 ГГц, E-діапазон 70/80 ГГц, радіосигнали з однією та подвійною несучою, коаксіальний та Ethernet інтерфейси.

MINI-LINK 6600 підтримує різні варіанти еволюції. Для економічно ефективної міграції MINI-LINK 6600 сумісні з MINI-LINK TN R6, оснащеним MMU4 A. При оновленні сайту до MINI-LINK 6600 для з'єднання ODU-IDU кабелі можна використовувати повторно.

Внутрішній блок (IDU)

Внутрішня частина радіорелейної станції встановлюється у приміщенні у безпосередній близькості від телекомунікаційного обладнання. Внутрішній блок відповідає за живлення, мультиплексування, модулювання сигналу, комутування, передачі даних в мережу LAN.

Внутрішня частина складається з корпусу зі з'єднувальними блоками, з'єднаними між собою через задню плату, або провідниками. Один модуль займає однин слот у корпусі.

Елементи IDU:

- Корпус.

  У корпусі розміщені модулі, що підключаються для забезпечення об'єднання сигналів трафіку, живлення і управління за допомогою об'єднавчої плати. Він встановлюється в стандартні 19-дюймові шасі або шафи.

- Процесор вузла (NPU).

  NPU виконує функції керування системою. Він також надає інтерфейси трафіку та керування.

- Модемний блок (MMU).

  MMU є внутрішньою частиною радіотерміналу. Він визначає пропускну здатність трафіку та схему модуляції.

- Мережевий фільтр (PFU).

  PFU фільтрує зовнішнє живлення та розподіляє внутрішнє живлення до модулів, що підключаються, через задню плату.

- Вентиляторний блок (FAU).

  FAU забезпечує охолодження внутрішньої частини.

- Лінійний кінцевий блок (LTU).

  LTU забезпечує інтерфейси E1/DS1. LTU 1002 також забезпечує інтерфейс STM-1.

- Кінцевий пристрій Ethernet (ETU).

  ETU забезпечує інтерфейси Ethernet.

Внутрішня частина також включає кабелі та монтажні аксесуари. З'єднання між зовнішньою частиною (радіоприймачами і антенами) і внутрішньою частиною здійснюється по одному коаксіальному кабелю на інтерфейс несучої. Цей кабель передає повнодуплексний трафік, напругу живлення постійного струму та дані управління.



MINI-LINK 6651 /1, 6651/2**, 6651/3 | MINI-LINK 6651/4 | MINI-LINK 6691, MINI-LINK 6693 | MINI-LINK 6694 | MINI-LINK 6692

Рис. 1.1. MINI-LINK 6651/6690

Таблиця 1.1.

Порівняння характеристик MINI-LINK 6651/6690

MINI-LINK	MINI-LINK 6651 /1, 6651/2**, 6651/3	MINI-LINK 6651/4	MINI-LINK 6691, MINI-LINK 6693	MINI-LINK 6694	MINI-LINK 6692
Тип вузла	Компактний кінцевий сайт	Мала агрегація	Середня агрегація	Середня агрегація	Велика агрегація
Інтерфейси	1GE/2.5GE	1GE/10GE	1GE/10GE/25 GE	1GE/10GE/ 25GE	1GE/10GE/ 25GE
Ємність комутатора	14,5 Gpbs	47Gbps	45 Gbps	90 Gbps	90 Gbps
Кількість радіосигналів	1/2	2	4/8	8	16
IP MPLS, L3 VPN	Так	Так	Так	Так	Так
Модуляція і ширина каналу	4096 QAM & 112 MHz 8k QAM**	4096 QAM & 112 MHz 8k QAM	4096 QAM & 112 MHz 8k QAM	4096 QAM & 112 MHz 8k QAM	4096 QAM & 112 MHz 8k QAM
Резервація плати NPU	-	-	-	Так	Так

Зовнішній блок (ODU)

Зовнішня частина складається з антени, радіоприймача і відповідного устаткування різних частотних діапазонів, включаючи E-діапазон.

Зовнішній блок (ODU) зазвичай монтується безпосередньо до мікрохвильової антени на даху або на вежі, що забезпечує чітку лінію видимості (LOS) між обома кінцями мікрохвильової лінії (рис. 1.2).

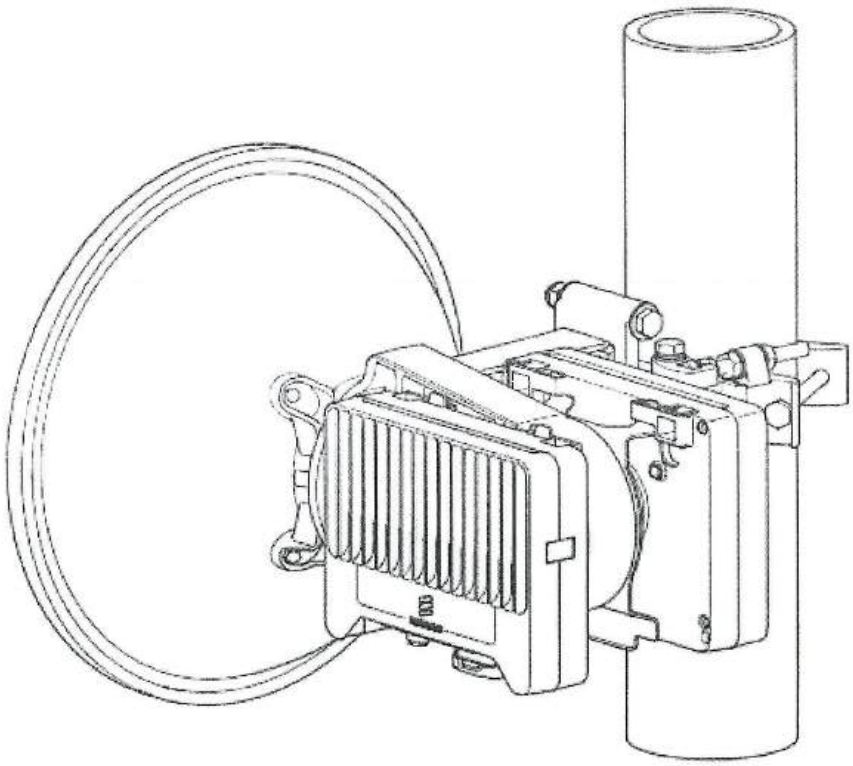


Рис. 1.2. MINI-LINK 6363, MINI-LINK 6364, чи MINI-LINK 6365 з антеною

Радіоприймач і антена легко встановлюються на широкий спектр несучих конструкцій. Радіоприймач встановлюється безпосередньо на антену в якості стандартної інтегрованої установки. Радіоприймач і антена також можуть бути встановлені окремо і з'єднані гнучким хвилеводом. В усіх випадках антена легко вирівнюється, і радіоприймач можна від'єднати і замінити, не впливаючи на вирівнювання антени.

Основними функціями радіоприймача є генерація та прийом радіочастотного сигналу та перетворення його в/з формату сигналу в радіокабелі, що з'єднують радіо та MMU.

Постійний струм до радіо подається від MMU через радіокабель. Радіоприймач має захищений від атмосферних впливів корпус, пофарбований у білий, або світло-сірий колір. Він також має додаткову ручку для спрощеного використання під час встановлення.

Робоча частота визначається тільки радіоприймачем і встановлюється заздалегідь на заводі і налаштовується на місці за допомогою графічного інтерфейсу вузла MINI-LINK.

Коаксіальний інтерфейс на радіоприймачах і модемах оснащений вбудованими газорозрядними трубками для захисту від блискавки.

Приймально-передавальні антени

Вся конструкція компактна, з низьким профілем. Антени виготовлені з алюмінію і пофарбовані в світло-сірий колір. Всі антени мають стандартизований хвилеводний інтерфейс, вбудований обтічник. Подачу хвиль можна регулювати як для вертикальної так і для горизонтальної поляризації.

Доступні два види антен: модульні та з фіксованим радіоінтерфейсом.

Модульні антени мають діаметр від 0,3м до 1,8м. Розділена на два модулі: антенний й інтерфейсний. Інтерфейсний модуль доступний з одинарною поляризацією та з подвійною (OMT - orthomode transducer), а також з інтерфейсами для ANT0 (окрема установка), ANT2 (інтегрована установка для RAU2 X) і ANT3 (інтегрована установка для MINI-LINK 6363, MINI-LINK 6364 і MINI-LINK 6365). Це дозволяє модернізувати модульну антену з одного типу радіоприймача на інший, тобто з антени що має одинарну поляризацію, зробити антену з подвійною поляризацію. Це дає можливість збільшити пропускну здатність РРЛ за будь-яких умов переналаштування антени.

Смугу частот антени неможливо змінити заміною інтерфейсу, оскільки інші частини антени також залежать від частоти.

Антени з фіксованими радіоінтерфейсами мають діаметр від 0,3 м до 3,7 м у варіантах з одинарною або подвійною поляризацією і доступні з інтерфейсом ANT0 або ANT2

Інтегровані системи радіорелейних станцій

Популярним вибором для сучасних РРЛ мереж є Full Outdoor Radio (FOR).

У FOR радіостанція включає в себе модем, мережевий інтерфейс користувача, L2 Ethernet комутатор та всі секції радіочастотної обробки в одному блоці.

З'єднання, як правило, здійснюється через мережу живлення через Ethernet (POE) і опціональне з'єднання по волоконно-оптичній мережі (SFP).

Ericsson MINI-LINK Short Haul — це продукт, який складається з трьох версій: MINI-LINK 6351, 6352 і 6366 використовується у відкритому просторі. (рис. 1.3)

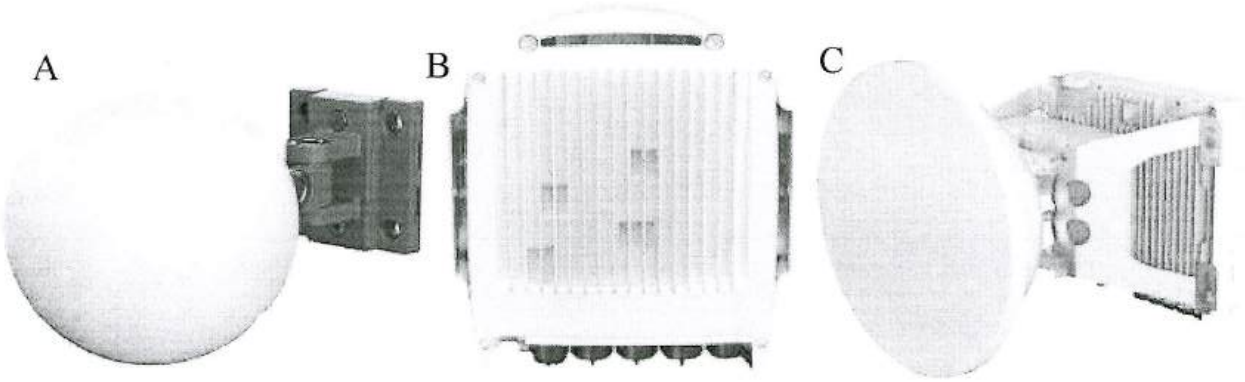


Рис. 1.3. MINI-LINK 6351 (A), MINI-LINK 6352 (B), MINI-LINK 6366 (C)

Усі продукти MINI-LINK для зовнішнього використання мають пропускну здатність 1 Гбіт/с на традиційних частотах (6–42 ГГц) і пропускну здатність до 10 Гбіт/с у E-діапазоні.

Обладнання FOR може бути легко і безпосередньо підключено до невеликого сайту, впровадженого в міську атмосферу, що є незамінним при розміщенні на вулиці, наприклад, на стовпах і стінах.

Пристрої також можуть підключатись до будь-яких інших продуктів MINI-LINK за допомогою доступних портів Ethernet, що дозволяє комбінувати застосування їх в областях, які вимагають певних функцій і потужностей агрегації. Можуть виступати ретрансляторами і підходять для каскадного підключення.

1.2 Аналіз приросту трафіку

Згідно даних звіту Ericsson [2], представлені провідні прогнози та аналіз останніх тенденцій у мобільній індустрії. Вони базуються на минулих і поточних даних, підтверджених широкими мережевими вимірюваннями.

Масштабне зростання Інтернету речей

Технології Massive IoT NB-IoT і Cat-M включають велику кількість пристроїв малої складності, низької вартості, з тривалим часом автономної роботи і низькою пропускною здатністю впроваджуються в усьому світі. З 2019 року кількість пристроїв IoT, підключених через 2G та 3G, повільно зменшується, а технології NB-IoT та Cat-M є новим поколінням. Кількість пристроїв, підключених за допомогою цих масштабних технологій Інтернету речей, зросла майже на 80 відсотків і в 2021 році наблизилася до 330 мільйонів (рис. 1.4).

Прогнозовано, що в 2023 році кількість пристроїв IoT, підключених за допомогою технологій NB-IoT і Cat-M, перевищить кількість пристроїв, підключених до 2G/3G. Зростання технологій Massive IoT підсилюється нещодавно доданою мережевою можливістю, яка забезпечує співіснування Massive IoT із мережами 4G і 5G у діапазонах FDD за допомогою спільного використання спектру.

Відомо, що близько 124 постачальників телекомунікаційних послуг уже комерційно запустили мережі NB-IoT і 55 - запустили Cat-M. Ці технології доповнюють одна одну, і близько 40 постачальників послуг запустили обидві технології.

У 2021 році широкосмуговий IoT (4G/5G) випередив 2G і 3G як технологія, яка з'єднує найбільшу частку всіх підключених до стільникового зв'язку пристроїв IoT, на які припадає 44% всіх з'єднань. Широкосмуговий IoT призначений для використання додатків, які вимагають високої пропускної здатності, низької затримки та генерують великий обсяг даних. За даними до кінця 2027 року 40% стільникових IoT-з'єднань будуть широкосмуговими IoT, більшість з яких підключатиметься до 4G. Оскільки 5G New Radio (NR) впроваджується в старому

та новому спектрах, тому швидкість передачі даних значно зросте для цього сегменту.

Розширені послуги зв'язку від VoLTE до VoNR

Останнім часом високоякісний голосовий зв'язок 4G і 5G та інші комунікаційні послуги набули масштабного розвитку.

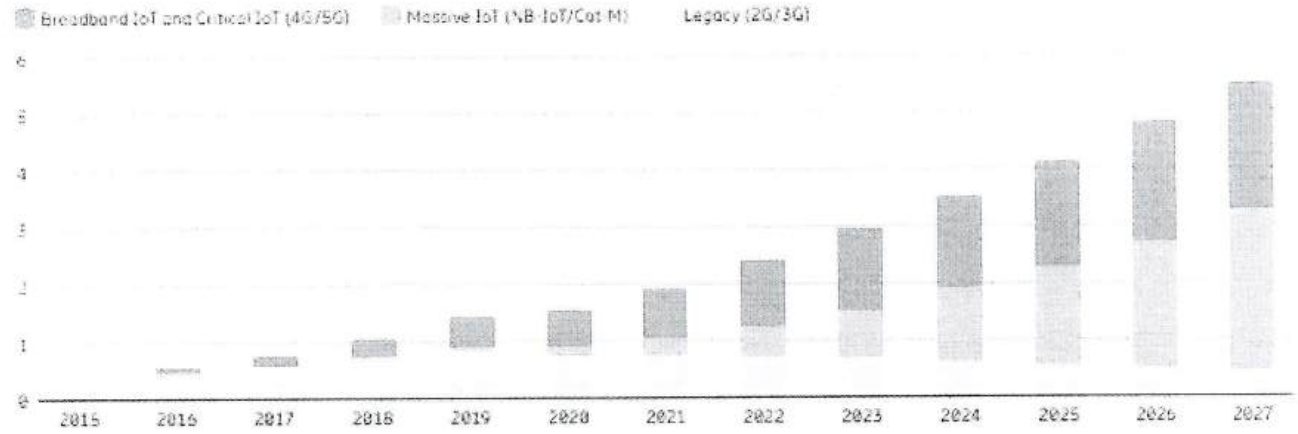


Рис. 1.4. Стільникові підключення IoT за сегментами та технологіями (млрд.)

Постачальники послуг почали частіше використовувати IP-мультимедійну підсистему (IMS) для підтримки мобільного голосового зв'язку для смартфонів 4G і 5G та інших розумних пристроїв. Voice over LTE (VoLTE) на сьогоднішній день активовано в понад 280 мережах. Зараз розпочато запуск Voice over New Radio (VoNR) – голосової програми для автономних (SA) мереж 5G. За оцінками, кількість підписок із голосовою послугою, побудованою на базі IMS, перевищує 4,6 мільярдів на сьогоднішній день та, за прогнозами, досягне майже 7 мільярдів до кінця 2027 року. Це становитиме близько 90 відсотків усіх комбінованих мереж 4G і 5G (рис. 1.5).

Перші комерційні послуги VoNR, які будуть представлені IMS — це стандартизована голосова платформа для мереж 5G SA, які не підтримують CSFB. Голосові служби 5G можна розгортати за допомогою різноманітних додатків у мережах 5G: подвійне підключення LTE New Radio, резервна система Evolved Packet System (EPS) і VoNR. Вони використовуються на різних етапах створення покриття 5G. Після запровадження загальнонаціональної мережі 5G SA використовуватиметься лише VoNR.

Доступно понад 650 моделей смартфонів 5G з голосовою підтримкою. Нові сценарії використання голосу з IMS включають мережеві можливості для кількох пристроїв: телефони, розумні годинники, розумні колонки та автомобілі, які приєднуються до одного номера телефону. Понад 100 мереж підтримують стільникові смарт-годинники із послугою одного номера VoLTE.

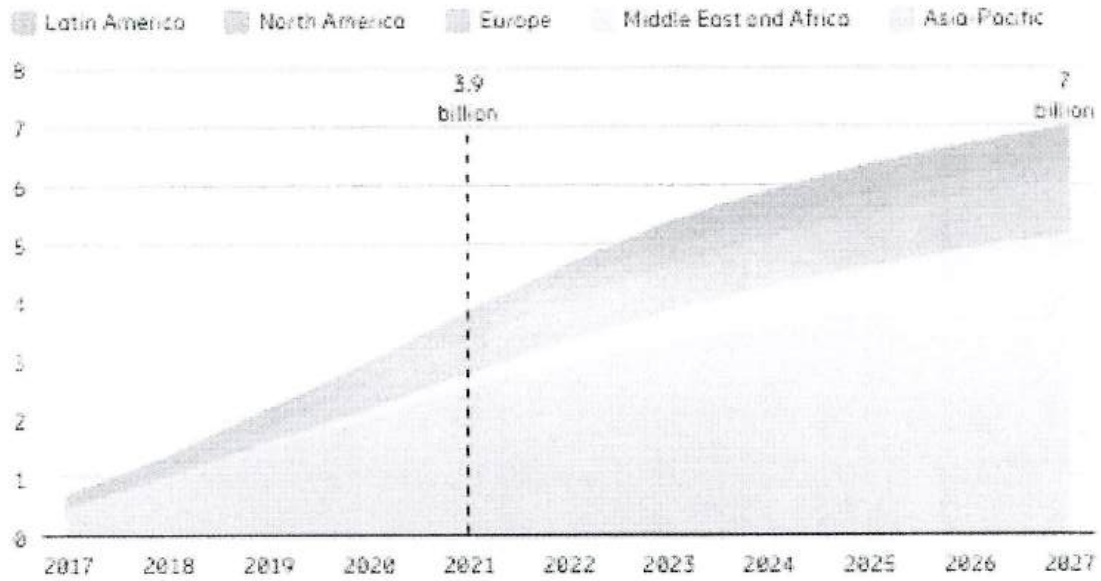


Рис. 1.5. Підписки VoLTE за регіонами (млрд.)

Програма, створена на базі IMS, надає критично важливі послуги push-to-talk для організацій громадської безпеки, комунальних служб і місцевих приватних мереж 4G. Це почало широко застосовуватися спочатку в Північній Америці, а тепер європейський ринок наслідує цей приклад.

Після того, як критично важливі комунікації для 5G будуть завершені в стандартах 3GPP, можна буде ввімкнути додаткові сценарії використання з низькою затримкою та широкосмуговим зв'язком з високою пропускною здатністю.

Трафік мобільної мережі

З першого кварталу 2021 року по перший квартал 2022 року трафік мобільної мережі зріс на 40%.

З четвертого кварталу 2021 року по перший квартал 2022 року зростання трафіку мобільних даних у порівнянні з кварталом становило близько 10%.

Загальний місячний глобальний трафік даних мобільної мережі сягнув приблизно 93 Ексабайт (EB).

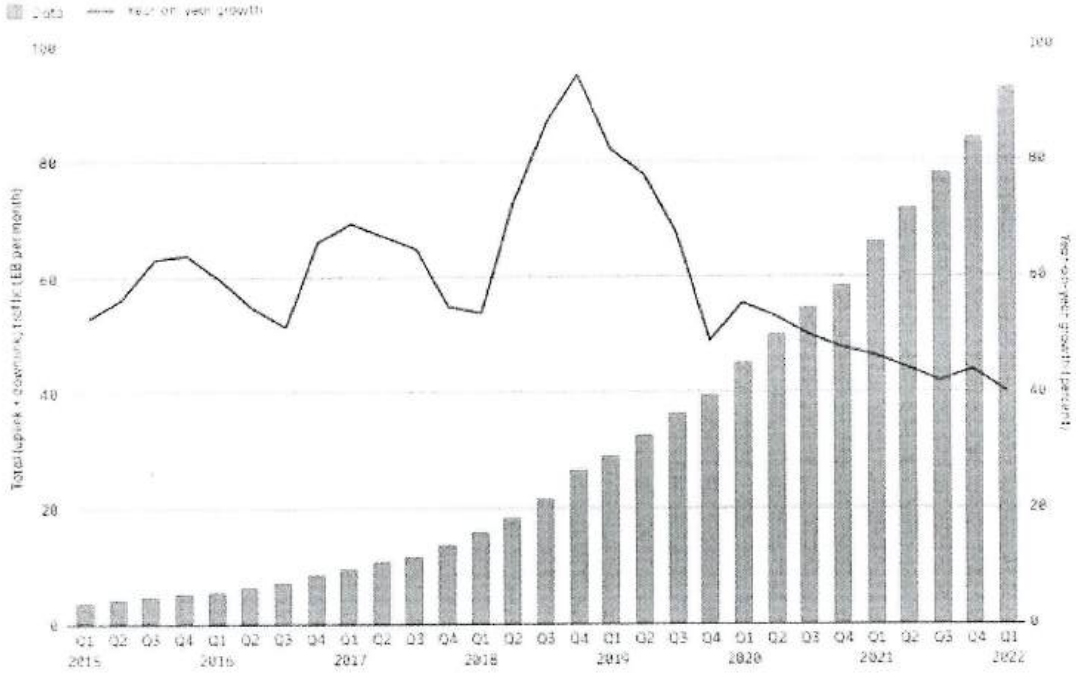


Рис. 1.6. Глобальний трафік даних мобільної мережі та річне зростання (EB на місяць)

У перспективі зростання трафіку зумовлено як збільшенням кількості підписок на смартфонах, так і зростанням середнього обсягу даних на одну підписку, головним чином завдяки збільшенню перегляду відеовмісту. На рисунку 1.6 показано збільшення трафіку та загальний місячний глобальний мережевий трафік даних з 2015 року до 2022 року разом із річним процентним зростанням трафіку даних мобільних мереж.

1.3 Потреба в оптимізації мережі передачі даних та постановка задачі дослідження

Основні вимоги до мобільної транспортної мережі майбутнього

Вимоги до РРЛ в мережах майбутнього:

- Забезпечення пропускної здатності до 10 Гбіт/с;
- Забезпечення низької затримки в 25 мкс/сайт;

- Гнучка експлуатація та технічне обслуговування;
- Підтримка розподілення пріоритетності трафіку;
- Стикування та плавна еволюція;
- Підтримка мереж PtP/PtMP;
- Доступність 99,999% на далекі відстані;
- Передача в умовах LOS/NLOS;
- Висока адаптивність до навколишнього середовища;
- Налаштування в один клік;
- Безперебійне з'єднання з оптичною мережею.

1. Забезпечення пропускної здатності до 10 Гбіт/с

Для задоволення вимог 5G (забезпечити абонентів понад 100 Мбіт/с у будь-який час і в будь-якому місці) середня і пікова пропускна здатність базової станції перевищить 10 Гбіт/с, що в десять разів перевищує середню і пікову пропускну здатність мереж 4G. З розвитком мікрохвильових технологій смуга пропускання мікрохвиль збільшилася з Мбіт/с до Гбіт/с. У міру впровадження нових технологій, зокрема MIMO, агрегації несучих (CA), E-діапазону великої ємності та комбінації загального та E-діапазону, мікрохвильова смуга пропускання підтримуватиме 10 Гбіт/с та повністю відповідатиме вимогам до пропускної здатності для мереж 5G.

2. Забезпечення низької затримки в 25 мкс/сайт

Деякі нові послуги 5G вимагають наскрізної (E2E) затримки менше 5 мс, із затримкою транспортування не більше 2 мс. Передача мікрохвиль у повітрі швидше, ніж передача світла в оптичному волокні. Завдяки новим технологіям односайтові мікрохвильові канали можуть зменшити затримку до 25 мкс/сайт, відповідаючи вимогам 5G до обслуговування з низькою затримкою.

3. Гнучка експлуатація, технічне обслуговування та єдине керування

У міру того, як масштаб мережі збільшується, вони повинні забезпечувати більш гнучку та інтелектуальну експлуатацію та обслуговування. Використовуючи технології SDN, мережа РРЛ забезпечує автоматичну конфігурацію, покращуючи ефективність розгортання послуг E2E і задовольняючи гнучкі вимоги експлуатації та обслуговування для мереж 5G. Мікрохвильова мережа також повинна

забезпечуватися керуванням споживання енергії, щоб зменшити потужність передачі в непікові години, зменшуючи витрати на енергоспоживання для операторів.

4. Підтримка розподілення та пріоритетності трафіку

Різні типи трафіку мають різні вимоги до пропускної здатності, затримки та надійності. Щоб відповідати вимогам SLA 5G, мікрохвильові мережі можна розділити на кілька логічних мереж E2E за допомогою технологій VPN і H-QoS, забезпечуючи ізоляцію мережевих ресурсів на вимогу.

5. Стикування та плавна еволюція

У всьому світі розгорнуто більше двох мільйонів мікрохвильових пристроїв. В епоху 5G мікрохвильова мережа потребуватиме використання й застарілого мікрохвильовового обладнання шляхом мінімізації компонентів (таких як плати та ODU). Це не тільки зменшить початкові інвестиції операторів, але й пришвидшить розвиток нових мереж.

6. Підтримка мереж PtP/PtMP

Для підключення кінцевих пристроїв мережа РРЛ повинна бути надійною та масштабованою. Для задоволення цієї вимоги використовують системи PtP та PtMP (рис. 1.7).

Радіосистеми PtP забезпечують мультигігабітний зв'язок між двома місцями. Радіостанції швидко розгортаються та є надійною та масштабованою альтернативою, або доповненням до кабельних з'єднань. Радіозв'язок PtP забезпечить можливість зворотного зв'язку, що дозволить розгортання для критично важливих завдань.

Канали PtP зможуть забезпечити високу пропускну здатність на великих відстанях (до 50 км).

Радіосистеми PtMP стануть економічно ефективним способом підключення до багатьох сайтів з одного центрального місця. Обладнання швидко встановлюються на віддаленому місці, щоб забезпечити підключення багатьох сайтів до центральної багатоточкової антени. Системи PtMP зазвичай використовуються на відстані до 20 км.

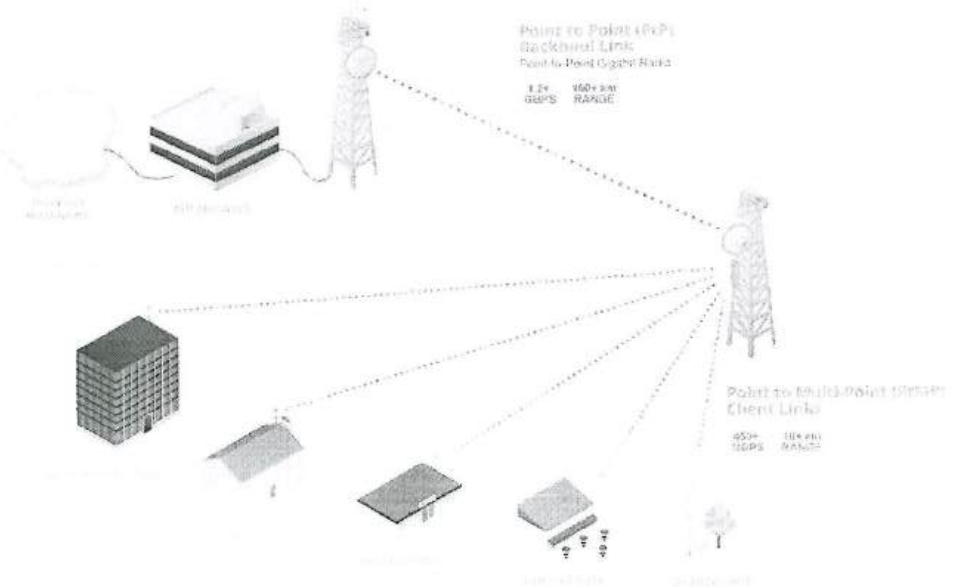


Рис. 1.7. Радіосистеми PTP/ PTMP

7. Доступність 99,999% на далекі відстані

Доступність - це відсоток часу, протягом якого мережевий компонент або послуга доступні для користувача за певний період, який зазвичай визначається як рік.

Дуже важливо, щоб послуги були високодоступними, а час простою був зведений до мінімуму. Коли ресурси недоступні, абоненти та партнери не матимуть можливості отримати доступ до необхідної інформації чи послуг.

Хоча ціллю є 100% доступність, але недоцільно очікувати, що послуга буде доступна щохвилини щодня протягом року. Технічне обслуговування, оновлення та неконтрольовані події, або стихійні лиха — не дозволяють постачальникам гарантувати 100% безвідмовну роботу. Угода про доступність (5G SLA) передбачає, що певна послуга буде недоступна не більше 5 хвилин 15 секунд на рік, що складає доступність в 99,999%.

8. Передача в умовах LOS/NLOS

Пряма видимість (LOS) — це стан, коли сигнал передається по повітрю безпосередньо від бездротового передавача до бездротового приймача, не проходячи повз перешкоди. LOS є ідеальною умовою для бездротової передачі, оскільки проблема поширення сигналу виникає лише через погодні чи атмосферні

умови та характеристику його робочої частоти. У середовищі LOS сигнал може досягати більшої відстані з кращою потужністю сигналу та вищою пропускною здатністю.

І навпаки, відсутність прямої видимості (NLOS) — це стан, коли сигнал від бездротового передавача проходить кілька перешкод, перш ніж досягти бездротового приймача. Сигнал може бути відбитий, заломлений, дифрагований, поглинений або розсіяний. Передавальні системи створюють кілька сигналів, які надходять до приймача в різний час, різними шляхами та з різною силою. Отже, бездротові системи, розроблені для середовища NLOS, повинні включати ряд методів для подолання цієї проблеми, що робить системи більш складними, ніж системи для LOS. Але системи з підтримкою NLOS спрощують мережеве планування.

Приклади LOS/nLOS/NLOS показані на рисунку 1.8.

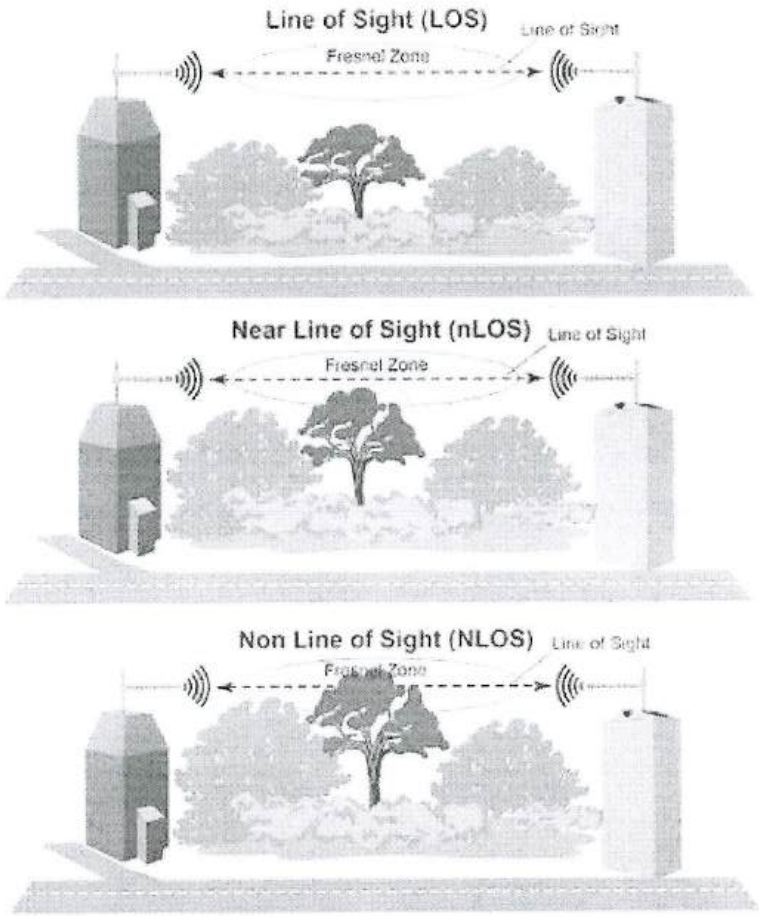


Рис. 1.8. Видимість в умовах LOS, nLOS, NLOS

Методи та вимоги, які наведені в даному підрозділі, описані в джерелах [3], [4], [5].

Постановка задачі

Голосовий та відеозв'язок, широкосмуговий Інтернет, відео та інші медіа ресурси набувають все ширшого використання. Провайдери мобільного зв'язку зацікавлені у розширенні своїх послуг. А тому в їхніх інтересах є збільшення швидкості передачі даних для абонентів.

Щоб відповідати потребам сьогодення, оператори мають забезпечити продуктивну та масштабовану мережу доступу з великою пропускною здатністю без великих фінансових витрат та часу.

В умовах міста, де працюють чимала кількість базових станцій та є відповідна чисельність абонентів, в край важливо забезпечувати якісне покриття стільникової мережі.

Вартісне обладнання, складність в прокладанні оптичного кабелю стає економічно невигідним для організації проводового зв'язку для кожної з базових станцій. Більш оптимальним є варіант використання вузлів агрегації трафіку побудованих на оптичних з'єднаннях. До цих вузлів підключаються радіорелейні станції з сучасним обладнанням, яке може бути налаштоване для досягнення відповідних цілей передачі, щоб забезпечити транспорт не тільки мереж стандарту LTE, а й 5G. Сучасний радіорелейний зв'язок, що здійснюється на частотах 70 – 90 GHz і здатний забезпечити високошвидкісне передавання даних на відстань кількох кілометрів, ідеально підходить для цього.

Щоб відповідати умовам сучасних мереж, радіорелейні системи необхідно постійно удосконалювати. Для цього і використовують методи оптимізації.

2 ПАРАМЕТРИ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИ ПЛАНУВАННІ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ПЕРСПЕКТИВНИХ РАДІОРЕЛЕЙНИХ МЕРЕЖ

2.1 Резервування каналів

1+1 HSB

1+1 HSB – режим конфігурації захисту 1+1. 1+1 HSB забезпечує захист 1+1 у гарячому режимі очікування для плат IF і ODU на обох кінцях мікрохвильового лінку. Рис. 2.2 ілюструє, як працює 1+1 HSB. Якщо NE2 виявляє, що в пристрої (яким може бути ODU або IF board) на основному каналі виникають неполадки, NE2 використовує резервний канал для отримання та передачі послуг.

Група захисту 1+1 HSB (рис. 2.1) використовує один канал і складається з:

- двох одноканальних IF плат одного типу, або однієї двоканальної IF плати;
- двох ODU однієї моделі;
- однієї антени (з одним гібридним роз'єднувачем).

1+1 HSB може працювати в реверсивному або нереверсивному режимах.

- Реверсивний режим

Коли NE перебуває в стані перемикання, NE відмовляється від перемикання та повертається до нормального стану, якщо попередній робочий канал відновлюється до нормального стану протягом певного періоду. Період часу, який проходить після відновлення робочого каналу і до того, як робочий канал очистить стан перемикання, називається часом WTR. Щоб запобігти частим перемиканням через нестабільну роботу каналу, рекомендують встановити час WTR від 5 до 12 хвилин.

- Нереверсивний режим

Робочий канал залишається в стані комутації навіть після відновлення нормального стану. Канал захисту продовжує передавати послуги, якщо перемикання не відбудеться знову.

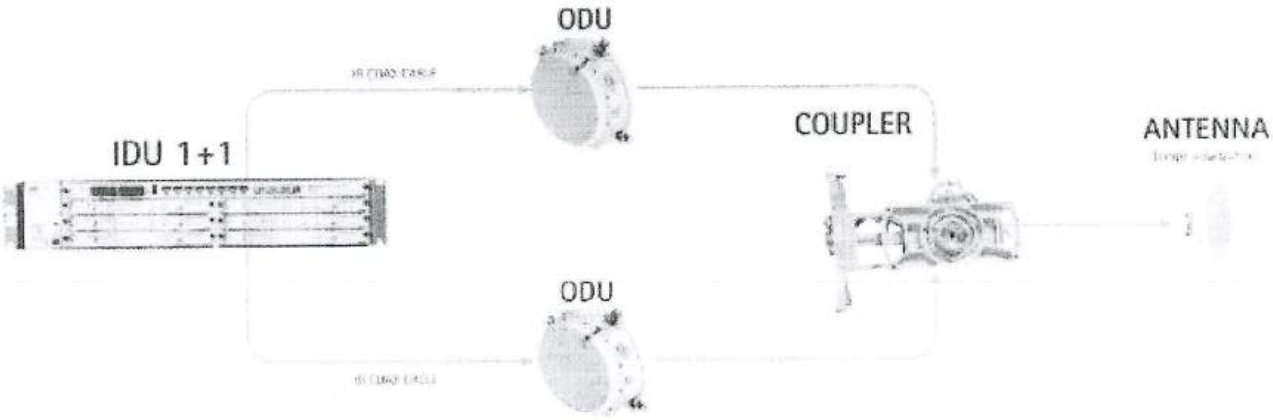


Рис. 2.1. Типова конфігурація захисту 1+1 HSB

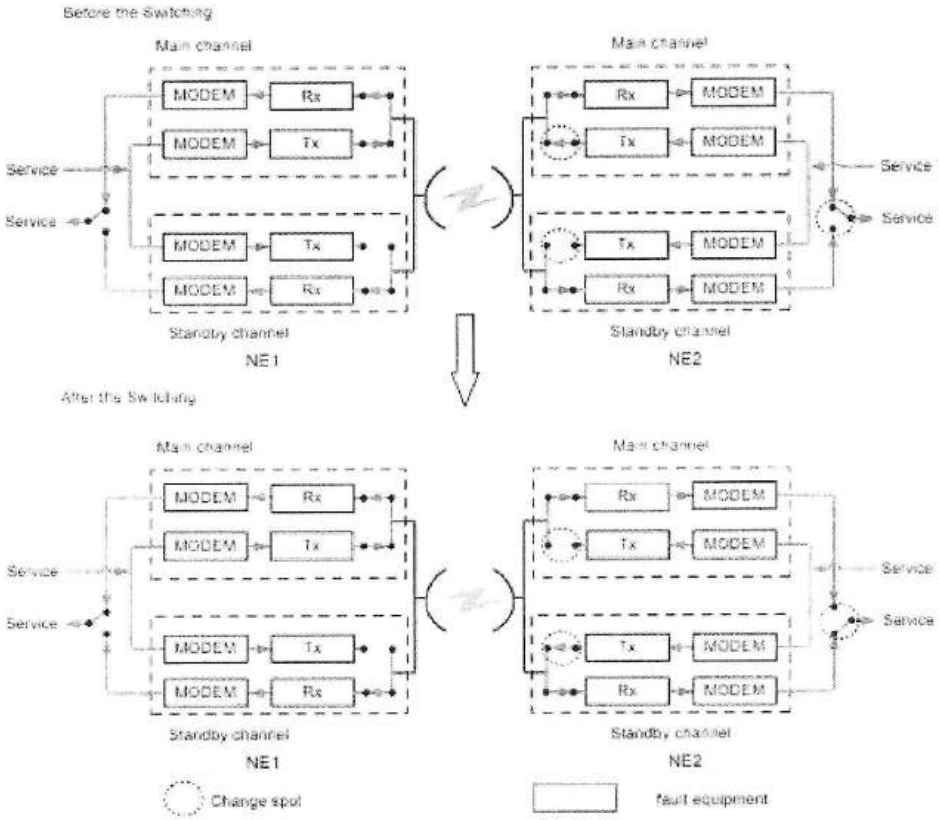


Рис. 2.2. Принцип резервації 1+1 HSB

1+1 FD

1+1 FD – режим конфігурації захисту 1+1 з частотним рознесенням. 1+1 FD використовує два канали з частотним інтервалом між ними для прийому та передачі однакових послуг. Приймальна сторона вибирає службові сигнали з кращою якістю. 1+1 FD зменшує вплив затухання трансмісії. На рисунку 2.4 показано

застосування 1+1 FD. При виявленні того, що службові сигнали, що передаються по основному каналу на частоті F1, погіршуються, NE2 отримує службові сигнали з резервного каналу на частоті F2.

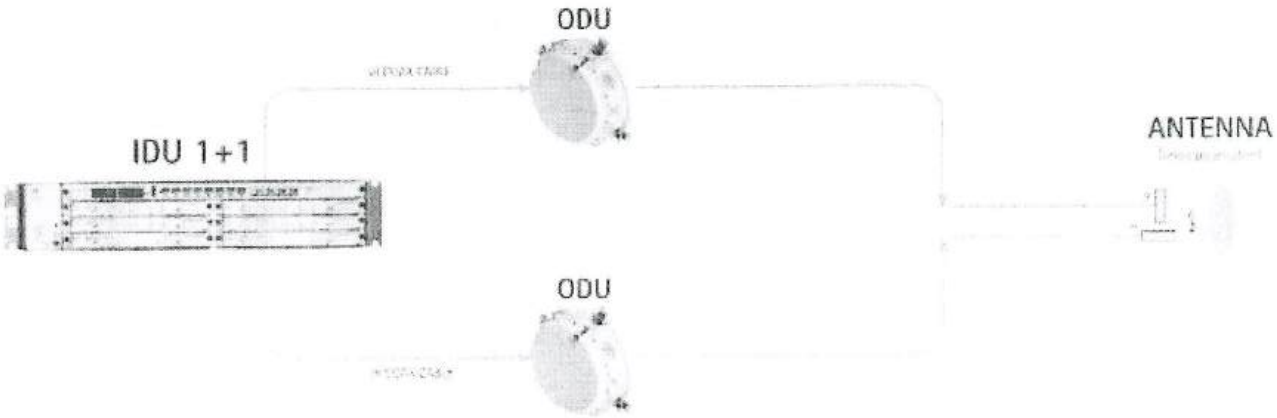


Рис. 2.3. Типова конфігурація захисту 1+1 FD

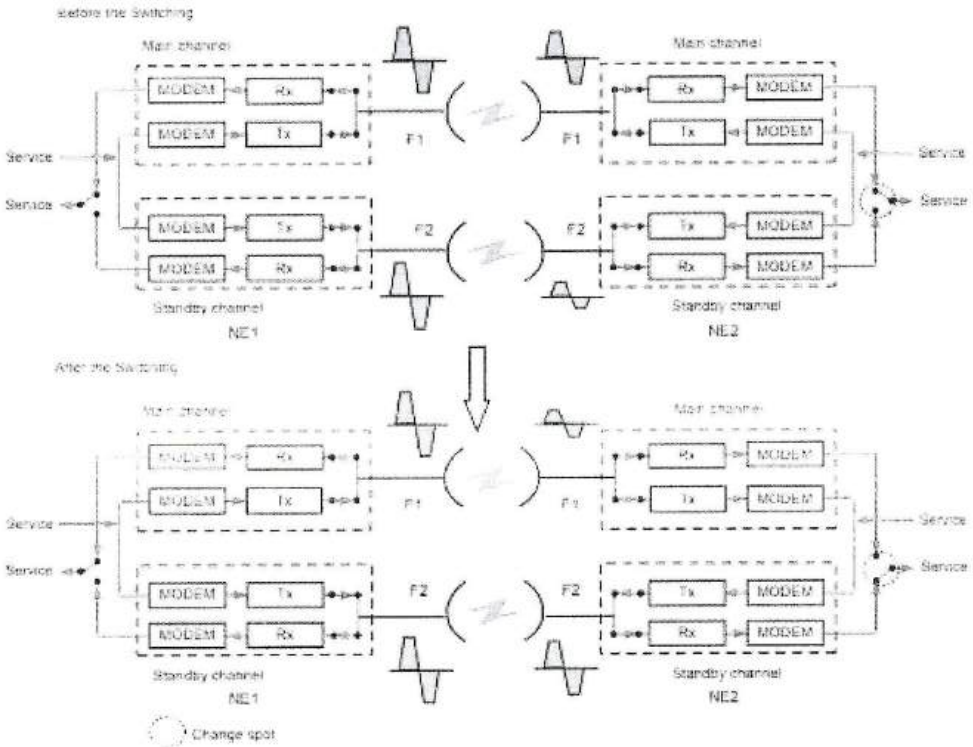


Рис. 2.4. Принцип резервації 1+1 FD

З 1+1 FD приймальна сторона приймає радіочастотні сигнали на різних частотах від основного та резервного каналів. На мікрохвильові сигнали впливає просторове завмирання. Коли службові сигнали, що передаються по основному

каналу, погіршуються, сервісний блок отримує службові сигнали з резервного каналу для захисту служби.

Порівняно з 1+0, що є без захисту, 1+1 FD покращує здатність до загасання та надійність мікрохвильових каналів.

Група захисту 1+1 FD (рис. 2.3) використовує два канали і складається з:

- двох одноканальних IF плат одного типу або однієї двоканальної IF плати;
- двох ODU;
- Однієї антени зі збалансованим гібридним роз'єднувачем, або двох окремих антен.

Так само як 1+1 HSB, 1+1 FD працює в реверсивному, або нереверсивному режимах.

Додатково 1+1 FD підтримує як перемикання HSB (на стороні обладнання) так і HSM (перемикання на стороні каналу), які викликаються різними умовами. Під час перемикання HSB послуги перериваються, перемикання HSM безперебійне та не впливає на служби.

1+1 SD

1+1 SD — це режим захисту 1+1 з апаратним рознесенням. У режимі 1+1 SD дві просторово розділені антени використовуються для прийому одного радіочастотного сигналу. Приймальна сторона вибирає сигнал кращої якості, щоб мінімізувати вплив завмирання на передачу сигналу.

На рисунку 2.6 показано резервацію 1+1 SD. Якщо NE виявляє бітові помилки в основному каналі, викликані погіршенням сигналу, NE перемикається на резервний канал для отримання послуги.

У захисті 1+1 SD дві антени на приймальній стороні отримують однакові радіочастотні сигнали від передаючої сторони. Якщо мікрохвильові сигнали, отримані основною антеною, погіршуються, мікрохвильові сигнали, отримані резервною антеною, можуть не погіршуватися, оскільки використовується просторове рознесення. У цьому випадку сервісний блок вибирає службові сигнали на резервному каналі, тим самим реалізуючи сервісний захист.

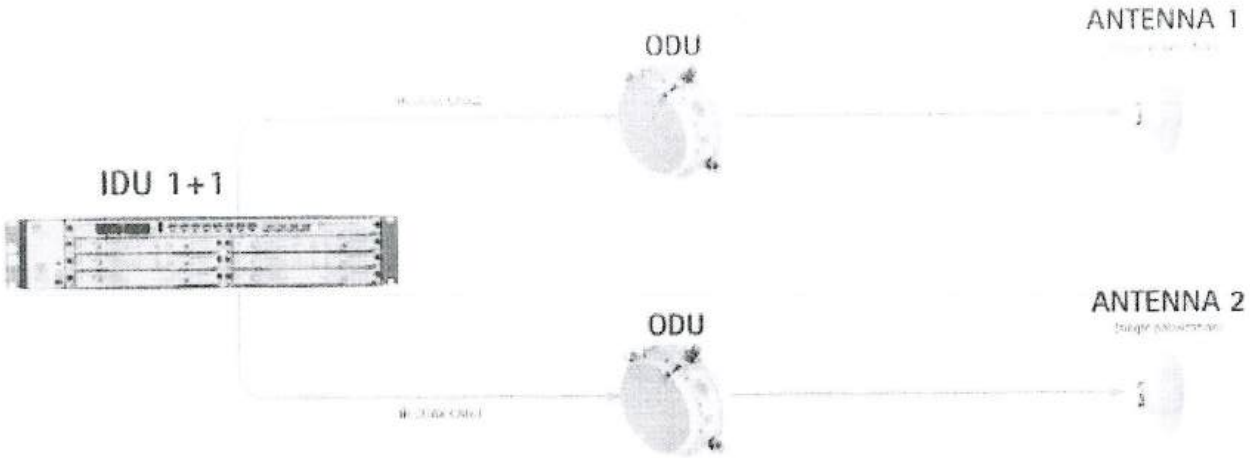


Рис. 2.5. Типова конфігурація захисту 1+1 SD

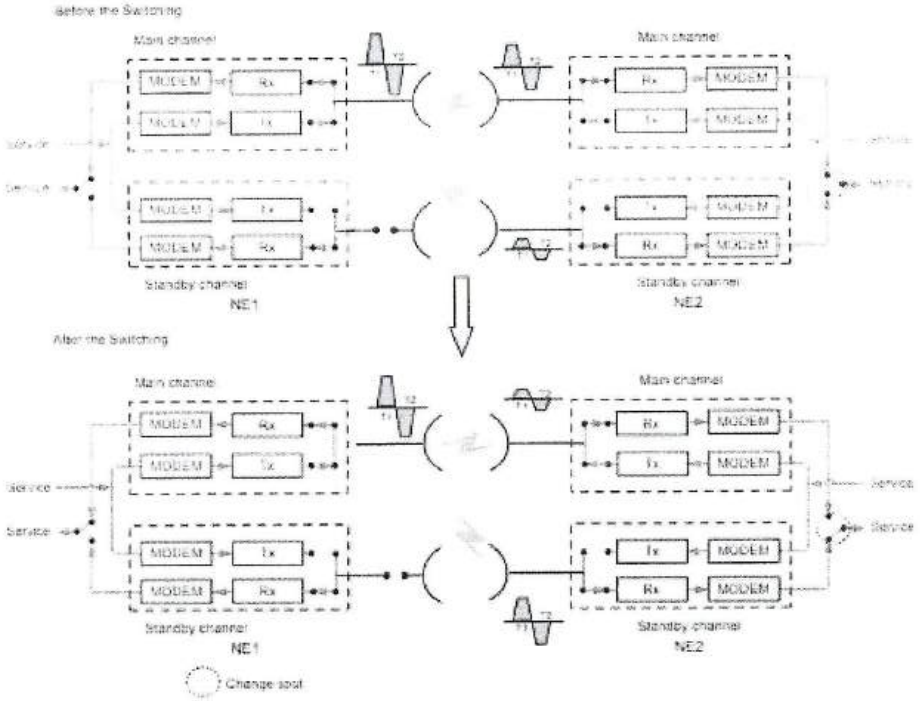


Рис. 2.6. Принцип резервації 1+1 SD

Крім того, 1+1 SD підтримує захисне перемикання 1+1 HSB.

Група захисту 1+1 SD (рис. 2.5) використовує один канал і складається з наступних елементів:

- двох одноканальних IF плат одного типу, або однієї двоканальної IF плати;
- двох ODU однієї моделі;
- двох антен.

У порівнянні з 1+0, що без захисту, 1+1 SD значно покращує надійність мікрохвильових каналів, здатність до завмирання, особливо до багатопроменевого завмирання.

Так само як конфігурація 1+1 FD, 1+1 SD також може працювати з HSB та HSM в реверсивному, або нереверсивному режимах.

2.2 Завадостійкість каналу та збільшення ємності

Автоматичне кодування та модуляція

Відомо, що бездротова передача даних значною мірою залежить від змін атмосферних умов. Такі погодні умови, як дощ, сніг можуть значно погіршити характеристики розповсюдження мікрохвиль, тим самим знижуючи рівень прийнятого сигналу (RSL) і його якість. Ще одним джерелом погіршення якості сигналу є перешкоди. Одним із широко використовуваних методів підвищення надійності зв'язку в умовах погіршення якості є адаптивне кодування та модуляція (ACM). Технологія ACM [6] дозволяє операторам досягати високої пропускної здатності передачі даних через мікрохвильові канали зв'язку та підтримувати найвищу спектральну ефективність каналу зв'язку, можливу в будь-який момент часу за будь-яких умов.

У поєднанні з QoS можна визначити, які послуги мають передаватись за будь-яких умов зв'язку (послуги з високим пріоритетом, наприклад, голосові дані), і які служби слід адаптувати (послуги низького та середнього пріоритету, наприклад, перегляд Інтернету), коли стан зв'язку погіршується.

Адаптивне кодування та модуляція або адаптація каналу зв'язку — це термін, який використовується в бездротовому зв'язку для позначення узгодження модуляції, кодування та інших параметрів сигналу та протоколу з умовами на радіолінії (наприклад, втрати на шляху, перешкоди через сигнали, що надходять від інших передавачів, чутливість приймача, доступний запас потужності передавача тощо). У цифровій мікрохвильовій лінії, ACM використовує алгоритм адаптації швидкості, який змінює схему модуляції та кодування (MCS) відповідно

до якості радіоканалу, а отже, швидкості і надійності передачі даних. Процес адаптації лінії є динамічним, і параметри сигналу та протоколу змінюються зі зміною умов радіолінії.

Метою адаптивної модуляції та кодування є підвищення ефективності роботи мікрохвильових каналів шляхом збільшення пропускної здатності мережі над існуючою інфраструктурою, одночасно зменшуючи чутливість до перешкод навколишнього середовища.

Адаптивна модуляція означає динамічну зміну модуляції безпомилково, щоб максимізувати пропускну здатність за умов миттєвого поширення. Іншими словами, система може працювати з максимальною пропускною здатністю за умов ясного неба та поступово зменшувати її під час дощу. Наприклад, модуляція може змінитися з 1024QAM на QPSK, щоб підтримувати «зв'язок» без втрати з'єднання.

Переваги використання ACM включають:

- Більшу довжину ланки (відстань);
- Використання менших антен (економить простір на щоглі, що важливо для житлових районів);
- Вищу доступність (надійність зв'язку).

Функція ACM автоматично регулює схему модуляції на основі якості каналів передачі. Після ввімкнення ACM потужність мікрохвильової служби змінюється відповідно до схеми модуляції, доки рознесення каналів залишається незмінним. Чим вище схема модуляції, тим вище пропускна здатність переданої послуги.

– Коли умови для якості каналу сприятливі (наприклад, у сонячні дні), обладнання використовує схему модуляції вищого порядку для передачі більшого обсягу даних користувача. Це покращує ефективність передачі та використання спектру системи.

– Коли умови для якості каналу є несприятливими (наприклад, у штормові або туманні дні), обладнання використовує схему модуляції нижчого порядку, щоб гарантувати, що послуги з вищим пріоритетом передаються першими. Якщо деякі черги з нижчим пріоритетом стають

перевантаженими через недостатню ємність радіоінтерфейсу, деякі або всі служби в цих чергах відхиляються. Це покращує можливості захисту від перешкод мікрохвильового з'єднання та забезпечує доступність з'єднання для послуг з вищим пріоритетом.

Якщо ACM увімкнено, передача послуг контролюється на основі смуги пропускання послуги та політики QoS, що відповідає поточній схемі модуляції.

Завдяки технології QoS пакетні послуги групуються в черги з різними пріоритетами. Послуги в різних чергах передаються на мікрохвильовий порт на основі різних алгоритмів планування черги. Коли відбувається зсув між схемами модуляції, певні черги можуть бути перевантажені через недостатню пропускну здатність радіоінтерфейсу. У цьому випадку певні послуги або всі послуги в цих чергах відхиляються.

На рисунку 2.7 показано зміну пропускної здатності служби, коли схема модуляції AM змінюється з QPSK на 256QAM (шість схем модуляції). Жовта частина позначає послуги E1. Синя частина вказує на пакетні послуги. Чим ближче до краю, тим нижчий пріоритет служби. За всіх умов каналу пропускна здатність служби змінюється відповідно до схеми модуляції.

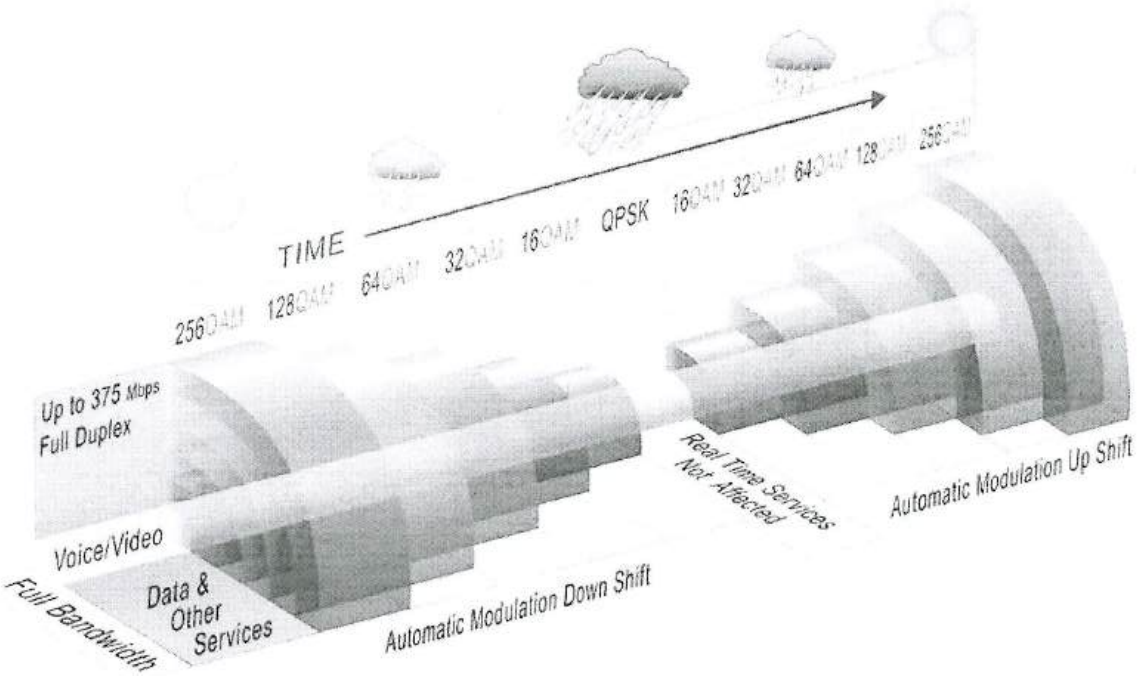


Рис. 2.7. Адаптація модуляції в різних погодних умовах

Вибір модуляції здійснюється за показником якості сигналу – середньоквадратичною помилкою (MSE). Цей параметр, у свою чергу, залежить від багатьох інших факторів, таких як RSL, перешкод та поточного стану модуляції.

Падіння/зростання RSL призводить до падіння/зростання MSE. Таким чином, зменшення RSL автоматично призводить до перемикання ACM на нижчу передачу, коли значення RSL перевищує певний поріг.

Щоб впоратися зі змінами каналу, умови каналу постійно контролюються на стороні Rx шляхом вимірювання співвідношення сигнал / шум та перешкоди (SNIR). Коли приймач, виходячи з обчислених даних, виявляє, що умови каналу передбачають перехід на наступний вищий або нижчий фізичний режим, передавачу з іншого боку надсилається повідомлення із запитом на його перехід. При отриманні такого запиту передавач починає передачу в новому фізичному режимі.

Безперебійний ACM сумісний з автоматичним управлінням потужності передачі (ATPC). Якщо модуляція знижується, наприклад, через перешкоди, то вихідна потужність не виходить на максимальний рівень.

Механізм ACM є методом покращення продуктивності зв'язку для більшості постачальників послуг Інтернету. Змінна модуляція в основному вважається прийнятною в мережах IP порівняно зі застарілими програмами PDH і SDH, які вимагають фіксованої пропускної здатності. Це дозволяє ефективно адаптувати роботу радіо до будь-яких погодних умов. Це забезпечує мінімізацію загального часу простою каналу з підтримкою високопріоритетного трафіку за рахунок погіршення чутливості конкретної модуляції.

Адаптивне керування вихідною потужністю

Більшість мікрохвильових систем використовують ACM, зберігаючи фіксовану низьку вихідну потужність передачі при зниженні модуляції. Функція адаптивної потужності [7] дозволяє радіопередавачу змінювати передану потужність відповідно до сумісної модуляції, щоб підтримувати посилення системи бездротового зв'язку відповідно умовам.

Потужністю радіопередачі можна керувати в дистанційному режимі (RTPC), де в системі керування можна вибрати налаштування відповідних параметрів та у режимі адаптивного керування (ATPC) – рис. 2.8.

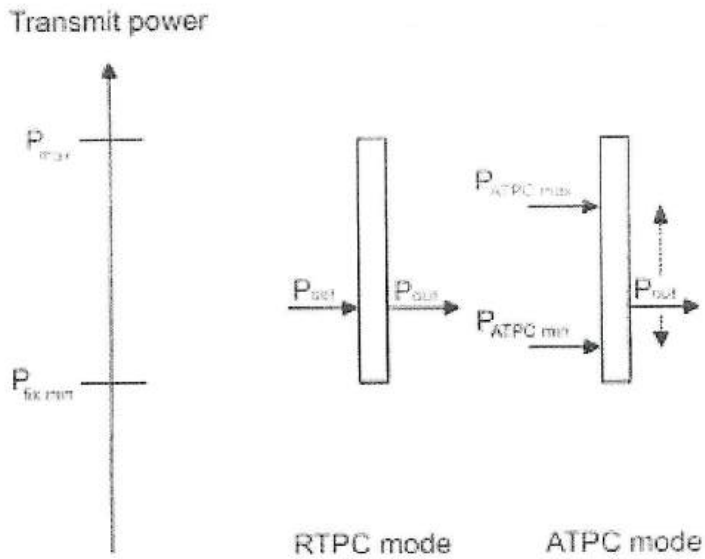


Рис. 2.8. Контроль потужності передачі

У режимі ATPC потужність передачі може бути швидко збільшена в умовах завмирання, що дозволяє передавачу працювати на потужності, нижчій за максимальну, під час звичайних умов. Зазвичай низька потужність передачі дозволяє більш ефективно використовувати доступний спектр, тоді як висока потужність передачі може бути використана для розрахунків надійності тракту, наприклад запасу затухання та відношення несучої до перешкод.

В умовах затухання, при увімкненому ATPC, потужність автоматично збільшується, щоб компенсувати втрату сигналу на дальньому кінці і гарантувати, що лінія зв'язку продовжує відповідати необхідному рівню продуктивності.

ATPC використовується: для автоматичного регулювання потужності передачі сигналу (Pout), щоб підтримувати рівень прийнятого вхідного сигналу на дальньому терміналі згідно цільового значення та для зниження вихідної потужності при сприятливих умовах навколишнього середовища з метою економії енергоспоживання. Отриманий вхідний рівень потужності порівнюється з цільовим значенням, а потім обчислюється відхилення та надсилається на ближній термінал

для використання в якості вхідних даних для можливого коригування потужності передачі. ATPC змінює потужність передачі між вибраним максимальним рівнем (PATPC max) і вибраним мінімальним рівнем (PATPC min), які задаються в налаштуваннях.

Важливо також відзначити, що кожна модуляція, має різну оптимальну вихідну потужність. Таким чином, щоб підтримувати достатню лінійність, передавач повинен працювати на рівні 20 дБм у режимі QPSK і на рівні від 14 дБм до 16 дБм у режимі 256QAM. У більшості радіостанцій з адаптивною модуляцією вихідна потужність є фіксованою та не змінюється залежно від типу модуляції.

Розглянемо систему, яка налаштована на 256QAM при 16 дБм (рис. 2.9).

За ідеальних погодних умов модуляція залишається незмінною. Якщо погода погіршиться, система зможе зменшити модуляцію, але не потужність передачі. Таким чином, навіть якщо системи працюють у QPSK, вони продовжуватимуть підтримувати низьку вихідну потужність 16 дБм.

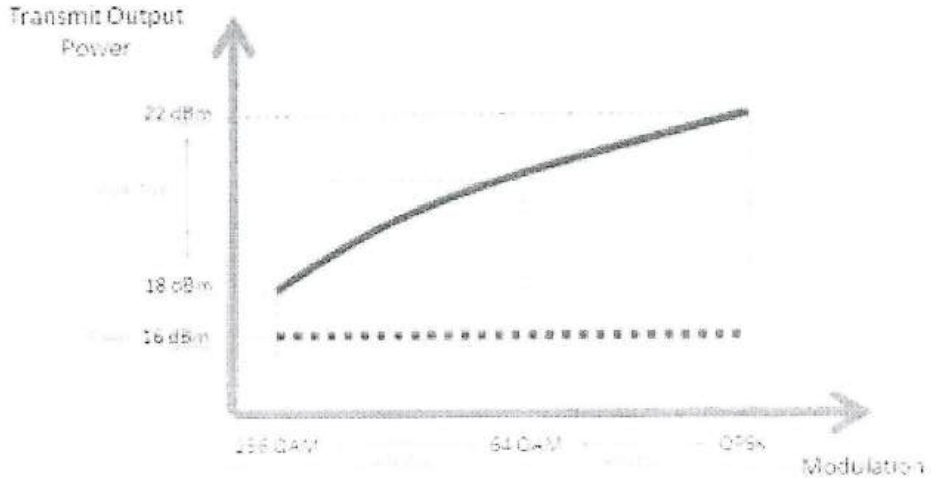


Рис. 2.9. Адаптивна модуляція з функцією адаптивної потужності та адаптивна модуляція з фіксованим рівнем потужності, на каналі 18-23 ГГц

У міру ускладнення типу модуляції коефіцієнт "зворотного відключення" потужності буде ставати все більш вираженим. Тому, щоб мати можливість дійсно порівнювати конкуруючі мікрохвильові системи, важливо знати вихідну потужність кожної системи при кожній конкретній модуляції.

Очевидно, що адаптивної модуляції – і навіть адаптивного кодування та модуляції – просто недостатньо. Щоб підтримувати оптимальне посилення системи на каналі зв'язку та заплановану доступність, оператори також застосовують режим адаптивної потужності.

Енергозбереження з урахуванням трафіку (TAPS)

Traffic Aware Power Save (TAPS) — це нова функція енергозбереження, яка має за мету підтримувати енергоспоживання системи на якомога нижчому рівні, зберігаючи при цьому фактичну швидкість передачі трафіку.

Коли TAPS увімкнено, енергоспоживання автоматично адаптується відповідно до фактичної потреби в потужності шляхом мінімізації переданої потужності. Кожні 6 мілісекунд використання каналу, система порівнює фактичну швидкість трафіку з можливою швидкістю трафіку. Якщо система працює на максимально можливій налаштованій швидкості, ATPC увімкнено, і TAPS не регулює вихідну потужність. З іншого боку, якщо система не працює на максимально можливій налаштованій швидкості, TAPS увімкнеться, а вихідна потужність регулюватиметься, щоб мінімізувати потужність передачі по відношенню до фактичної швидкості трафіку. Якщо система працює на найнижчій налаштованій швидкості, потужність повільно збільшується, щоб уникнути втрати зв'язку.

Видимість та вплив рельєфу

Одним із найважливіших факторів при проєктуванні бездротової системи є те, як радіочастотні (РЧ) сигнали поширюватимуться між передавачем і приймачем. Хоча для багатьох це може здатися очевидним, розгортання в реальному житті часто не таке просте. В дописі [8] описано приклад мікрохвильової мережі для підключення до сільської місцевості в умовах NLOS. В ідеалі бажаною метою є чітка лінія видимості між двома кінцевими точками, але це непрактично, особливо в промислових умовах, у багатолюдному міському середовищі чи навіть в офісі.

Не завжди можливо забезпечити чітку передачу LOS. Це призводить до відображень, які називаються багатопроменевим розповсюдженням, які

потребують спеціальних методів передачі та прийому. Не-LOS (NLOS) і поза-LOS (BLOS) — це інші випадки розповсюдження, з якими можна успішно боротися, щоб забезпечити надійне та безпечне з'єднання.

Пряма видимість – це коли передавач може бачити приймач або, принаймні, антени кожного можуть бачити одна одну. Це візуальна лінія видимості, що є ідеальним випадком. Це означає, що візуально чіткий LOS не обов'язково перетворюється на радіо LOS, і навпаки (рис. 2.10).

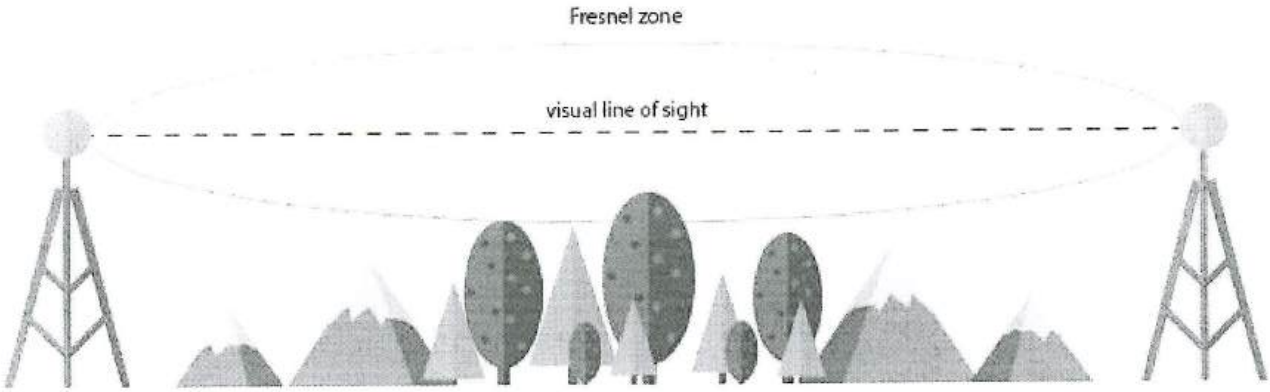


Рис. 2.10. Візуальна лінія видимості і реальні умови розповсюдження

Для досягнення надійного радіочастотного зв'язку необхідно виконати ретельне планування, включно з дослідженням радіотраси, а також обґрунтований вибір обладнання та розміщення антен. Передавач може використовувати всенаправлену антену, яка передає в усіх напрямках. Приймальна антена також може бути універсальною, але в багатьох випадках, щоб збільшити ймовірність отримання придатного сигналу, можна використовувати спрямовану антену.

Для виділеного зв'язку між двома точками — зв'язок «точка-точка» використовуватиме спрямовану антену, щоб звузити ширину променя та уникнути перешкод і збільшити ефективну силу сигналів. В статті [9] описано дану модель. Усі ці фактори необхідно враховувати до остаточного проектування системи.

Те на що першочергово слід звернути увагу є зона Френеля, яка являє собою ділянку у формі еліпса, яка оточує передавач, приймач і область між ними, яка

повинна бути поза перешкодами, що необхідно для забезпечення якісного з'єднання.

Перешкоди в межах першої зони Френеля не обов'язково знаходяться в LOS між кінцевими точками, але вони призведуть до погіршення потужності сигналу. Поведінка сигналу буде відрізнятися залежно від поляризації антени: вертикально поляризований сигнал, що зустрічається з об'єктом у першій зоні Френеля, буде інвертуватися та надходити до антени не по фазі, погіршуючи якість сигналу. З горизонтально поляризованим сигналом станеться навпаки. Відстань між кінцевими точками зв'язку та довжина хвилі переданого сигналу визначає площу зони Френеля.

Наступною завадою LOS є відбивання від поверхні землі або води на передавач. На рисунку 2.11 показаний заломлений сигнал від поверхні води, позначений синім штрихпунктиром Відбивання від будь-яких поверхонь, спричиняє багатопроменеві перешкоди та погіршує сигнал. У мікрохвильовій передачі на короткій дальності явище багатопроменевого поширення можна вирішити за допомогою рознесених антен та алгоритмів для об'єднання або відхилення сигналів залежно від того, приймаються вони по фазі чи протифазі (конструктивна та деструктивна багатопроменевість). Для каналів з більшою дальністю підвищення висоти підвісу антени є способом запобігання відбивань від поверхонь.

Ще одним параметром, що впливає на поширення LOS є вплив атмосфери На рисунку 2.11 показаний відбитий сигнал від атмосфери, позначений помаранчевим штрихпунктиром. Найбільш виражений ефект відбувається при зниженні атмосферного тиску, коли сигнал буде відбиватися від тропосфери до землі, фактично збільшуючи поширення приблизно на 15%.

В [10] описано поглинання сигналу атмосферою та його відбивання від поверхні землі та води.

Одним із методів подолання завад для створення умов LOS для каналів середньої та великої дальності є пасивні та активні повторювачі (ретранслятори), які отримують сигнал від вихідного передавача та повторюють його для

збільшення діапазону. Пасивні повторювачі не підсилюють сигнал, а перенаправляють його в потрібну область. Вони використовуються для передачі сигналів у райони, ізольовані рельєфом, такі як населений пункт в долині або западині, оточений пагорбами чи горами.

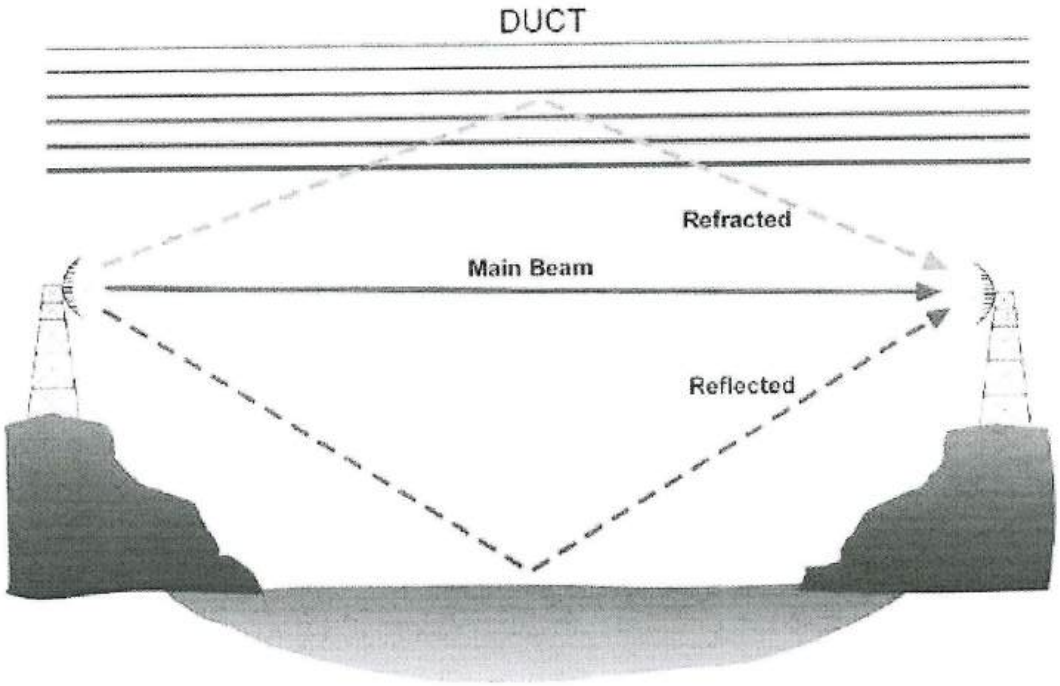


Рис. 2.11. Відбивання від атмосфери і заломлення від поверхні води

Пасивний ретранслятор корисний, якщо початковий сигнал достатньо потужний, щоб витримати втрату передачі. Потужність сигналу, що поширюється, обернено пропорційна квадрату відстані на яку він поширюється. Від передавача сигнал послаблюється в чотири рази, якщо відстань від передавача подвоюється.

Активні повторювачі приймають, підсилюють і потім повторно передають сигнал. Вони частіше використовуються для збільшення радіусу дії при збереженні якості сигналу.

Іншими методами покращення умов передачі при NLOS/BLOS є тропосферне розсіювання, яке використовує земну атмосферу як відбивач для поширення радіочастот над горизонтом. Тропосферне розсіювання може збільшити радіус дії до і більше 500 кілометрів, залежно від частоти роботи, типу обладнання, рельєфу та кліматичних факторів.

Обидва методи чутливі до змін в атмосфері особливо під час магнітних бур.

Смуги частот і атмосферне затухання

Несконденсована водяна пара та кисень поглинають радіосигнали, особливо на частотах міліметрових хвиль і вище (від десятків до сотень ГГц). Це пов'язано з існуванням ліній поглинання в елементах, що утворюють атмосферні гази, або діапазонів частот, де ці гази природно поглинають енергію фотонів. Це відбувається на резонансних частотах самих молекул.

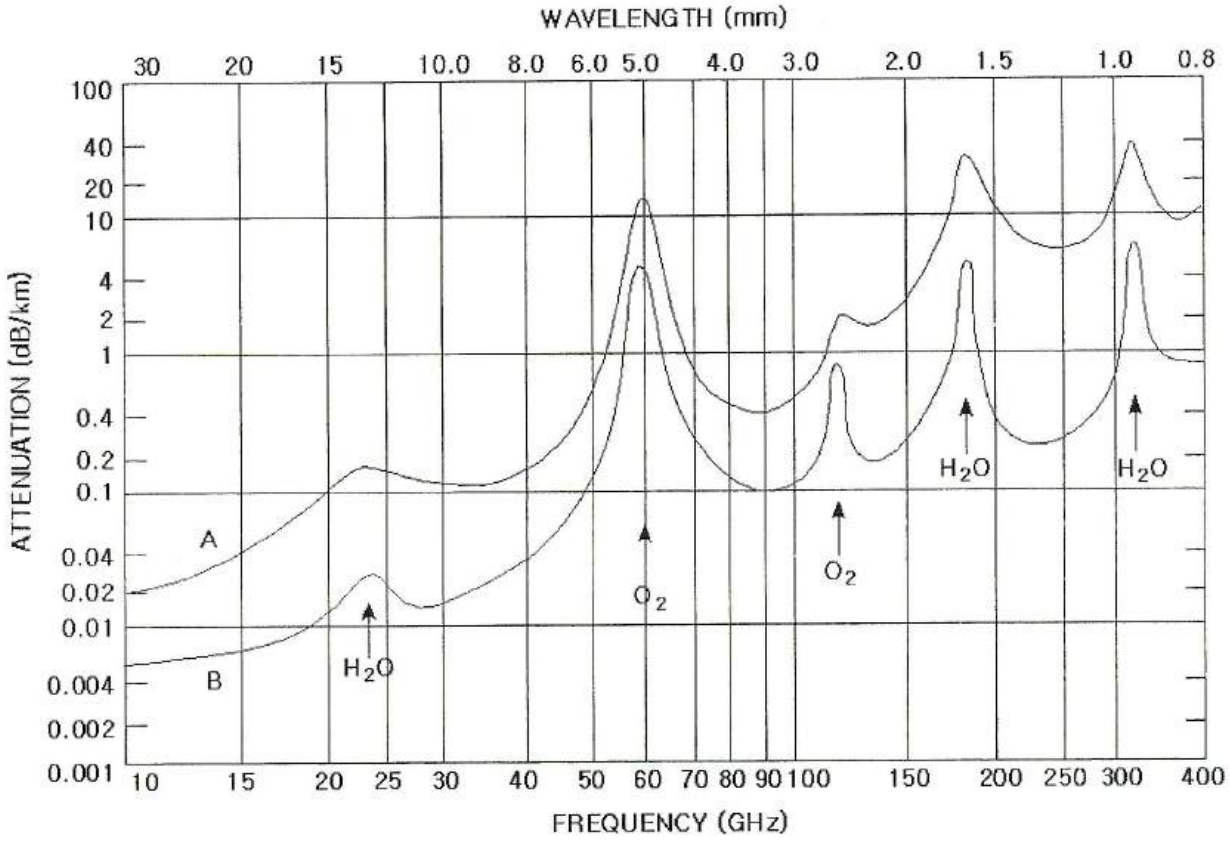


Рис. 2.12. Ослаблення сигналів хвилі відповідно частоті

Послаблюються мікрохвильові сигнали та сигнали міліметрових хвиль до точки, при якій межі зв'язку будуть розширені або розповсюдження обмежуватиметься короткими діапазонами.

На рисунку 2.12 показано залежність величини ослаблення інтенсивності хвилі від її частоти.

З підвищенням частоти атмосфера Землі впливає на поширення радіосигналів. Ефект поглинання сигналу на частоті нижче 10 ГГц досить низький

і передбачуваний, однак у міру підвищення частоти (особливо в діапазоні міліметрових хвиль, тобто від 30 до 300 ГГц) це загасання значно зростає, особливо на певних частотах. Загасання не тільки збільшується, але також стає більш залежним від характеристик поглинання H_2O, O_2 та інших газів.

Загасання через атмосферні гази та дощ зростає з частотою, і також є кілька піків поглинання, як показано на рисунку 2.12. Наприклад, загасання збільшується приблизно на 2 дБ/км від 70 ГГц до діапазону D і приблизно на 4 дБ/км від 70 ГГц до 275 ГГц. Втрати на шляху вільного простору також зростають із частотою: наприклад, приблизно на 6 дБ від 70 ГГц до діапазону D і приблизно на 11 дБ від 70 ГГц до 275 ГГц.

Дані затухання описано в рекомендаціях ITU-R [11].

Важливо, щоб регулювання спектра дозволяло впроваджувати інновації, які можуть підтримувати пропускну здатність на шляху до 100 Гбіт/с. Вони повинні охоплювати традиційні конфігурації ліній зв'язку, такі як FDD, а також додаткові майбутні інновації, які могли б краще обробляти асиметричні і частково непарні піддіапазони. Приклади таких систем розглянуто в підрозділі 2.3.

Коефіцієнт посилення антен

Антени мають особливе значення для передачі мікрохвиль. Завдяки високому коефіцієнту підсилення антени [12] можливо передавати сигнал за низької потужності мікрохвильового обладнання на великі відстані з відповідним рівнем сигналу для приймача.

Залежно від відстані зв'язку та частотного діапазону, діаметр антени коливається від 0,3 до 3,7 метрів або більше.

У випадку мікрохвильових каналів на короткій відстані антена і мікрохвильовий зовнішній блок часто об'єднуються, утворюючи єдину конструкцію. Можливо, що антена вбудована безпосередньо в корпус (наприклад, у випадку Ericsson), або антена та зовнішній блок з'єднані через монтажний кронштейн або з'єднувальний блок. Таким чином обладнання є компактним і може бути встановлено за низьких витрат. Окреме встановлення неминуче лише для більших антен (мінімум 1,2 м у діаметрі).

Зменшення розміру антени для певної лінії зв'язку призводить до підсилення потужності передавання радіосистеми.

Коефіцієнт підсилення системи дорівнює комбінації вихідної потужності передавача і порогового значення приймача за винятом будь-яких інших системних втрат від зовнішніх діплексерів, антенних посередників тощо. Щоб збільшити підсилення системи, потрібно збільшити потужність передавача, або використовувати спеціальні алгоритми кодування та передачі.

Високий коефіцієнт підсилення системи компенсує зниження продуктивності менших антен, у той час характеристики каналу зберігаються, тобто пропускна здатність, доступність і довжина шляху. Крім того, можна використовувати покращене підсилення системи з антенами того ж розміру, щоб забезпечити довші з'єднання, більшу пропускну здатність, більшу надійність (менший час простою).

Коефіцієнт посилення антени — це відношення щільності потужності в заданому напрямку до щільності потужності еталонної антени з наявним ідеальним джерелом випромінювання у тому ж напрямку. Він виражається в dBd або dBi.

Фізичне підсилення - це відношення вихідного сигналу системи до вхідного сигналу тієї ж системи. Якщо передавальна антена є ідеальним ненаправленим джерелом, вхідна потужність має становити 100 Вт. Якщо передавальна антена є спрямованою антеною з посиленням 13 дБ (20 разів), потрібна лише 5 Вт (100/20) вхідної потужності. Тобто підсилення антени є підсилювачем вхідної потужності ненаправленого ідеального джерела випромінювання.

Коефіцієнт посилення антени можна використовувати для вимірювання здатності антени приймати та надсилати сигнали в заданому напрямку, що є одним із найважливіших параметрів, які слід враховувати при виборі антени. Коефіцієнт посилення антени залежить від діаграми спрямованості антени. Якщо головна пелюстка вузька - бічна пелюстка мала, а посилення високе. Рис. 2.13 ілюструє залежність між шириною основного пелюстка та посиленням антени.

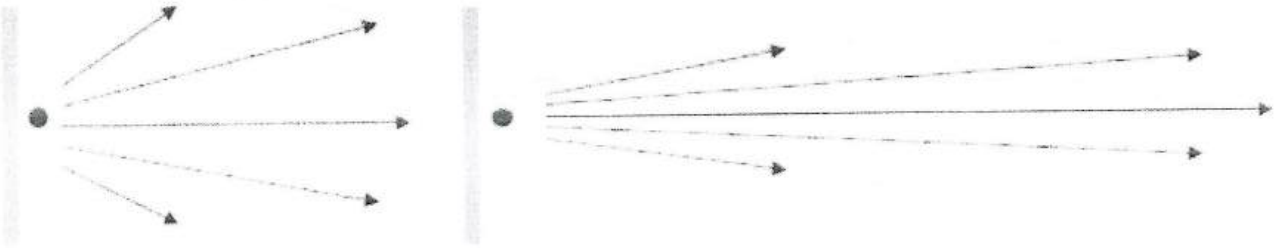


Рис. 2.13. Зв'язок між шириною головної пелюстки та посиленням антени

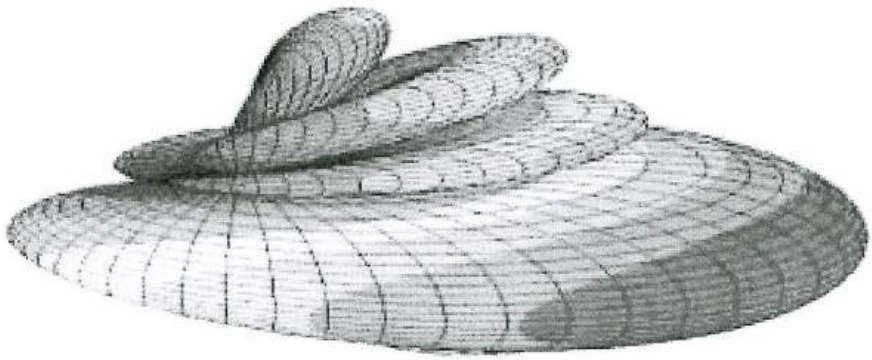


Рис. 2.14 Діаграма спрямованості антени

За тих самих умов вищий коефіцієнт посилення антени вказує на більшу відстань передачі. На практиці обирають такий коефіцієнт посилення антени, щоб ширина променя відповідала цільовій зоні покриття. Якщо зона покриття невелика, обирають антену з низьким коефіцієнтом посилення і широкими вертикальними пелюстками.

Ширина променя – це кутовий відрив між точками в головній пелюстці, які менші від максимального посилення на 3 дБ. Антена має ширину горизонтального променя та ширину вертикального променя, утворюючи кут горизонтальної пелюстки та кут вертикальної пелюстки відповідно. Ширина променя є ключовим лічильником для спрямованих антен.

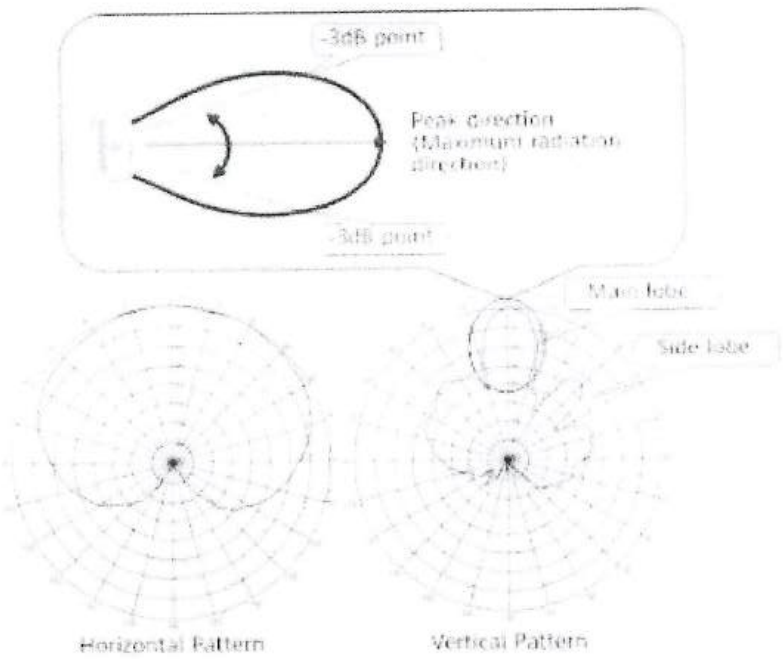


Рис. 2.15. Ширина променя

На рисунку 2.14 показана діаграма спрямованої антени. Потужність сигналу поступово зростає від синьої області до червоної. На рисунку 2.15 показано горизонтальну та вертикальну діаграми та ширину променя.

Коли ширина променя вузька, відстань випромінювання велика, а здатність запобігати перешкодам сильна.

XPIC

Перехресний поляризаційний компенсатор перешкод (XPIC) [13] використовується для передачі двох радіонесучих на одній частоті, збільшуючи використання каналу зв'язку. XPIC не є формою захисту.

У конфігурації XPIC існує ризик того, що обидва приймачі приєднаються до одного передавача. Щоб запобігти цьому, використовується спеціальний ідентифікатор Carrier-ID. Приймач може підключатися лише до передавача з таким самим ідентифікатором оператора. Таким чином, Carrier-ID має бути встановлено на різні значення горизонтальної та вертикальної поляризації та мати ідентичні налаштування для однієї поляризації з обох сторін лінії зв'язку.

Рекомендується використовувати одну подвійно-поляризовану антену замість двох монополяризованих.

Методи перехресної поляризації (рис. 2.17) використовуються в мікрохвильових мережах для збільшення пропускної здатності шляхом передачі даних з двома різними поляризаціями в одному частотному діапазоні: вертикальній і горизонтальній.

На кожній антені встановлено по два радіоприймачі з кожного боку РРЛ; окремий ODU для кожної поляризації. Два різні потоки даних від цих радіоприймачів об'єднуються та передаються від однієї загальної антени на ближньому кінці та приймаються через одну спільну антену на дальньому кінці. Отримані дані на приймальній стороні потім знову розділяються на основі двох поляризацій, так що один радіоприймач приймає вертикально поляризовані сигнали, а інший радіоприймач — горизонтально поляризовані сигнали.

Перехресна поляризаційна інтерференція використовується для зменшення XPI, яка виникає між двома поляризаціями під час передачі в РРЛ. XPI є сумою всіх можливих факторів, які можуть спричинити перехресні інтерференції і вимірюється в дБ.

Фактори що викликають перехресну поляризаційну інтерференцію:

- Умови каналу для кожної поляризації;
- Вирівнювання і поворот встановлених антен;
- Відмінності у вихідній потужності для кожної поляризації;
- XPD — здатність антен відокремлювати дві окремі поляризації. Значення XPD є характеристикою антени і не змінюється з її вирівнюванням або обертанням.

Значення XPI можна регулювати, обертаючи одну з антен. Це змінює відносний фазовий кут (ψ) між ними (рис. 2.16).

Рекомендований діапазон XPI становить 20–34 дБ. Через різні умови каналу значення XPI може мати природні коливання.

Якщо в конфігурації каналу використовується технологія подвійної поляризації спільного каналу (CCDP), технологію XPIC можна використовувати для усунення перешкод між двома електромагнітними хвилями. Передавач посилає дві ортогонально поляризовані електромагнітні хвилі до приймача по одному

каналу. Потім приймач відновлює вихідні два канали сигналів після того, як XPIC усуне перешкоди між двома хвилями.

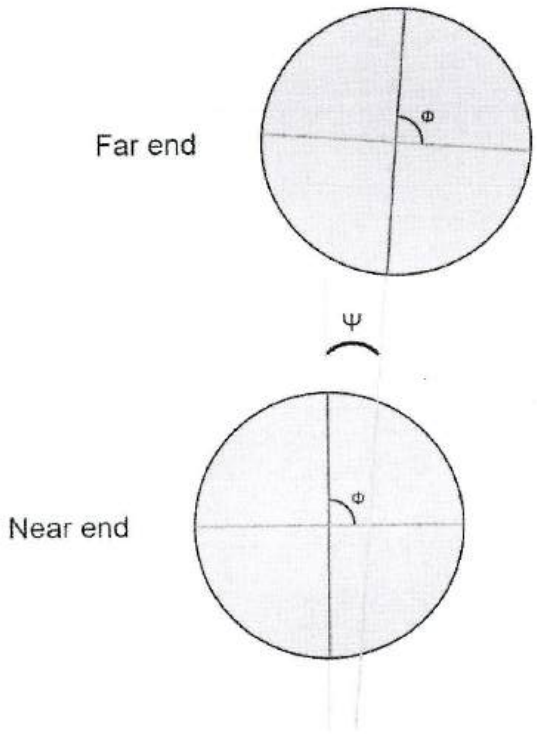


Рис. 2.16. Перехресна поляризаційна інтерференція - механічні фактори (φ) і обертання антени (ψ)

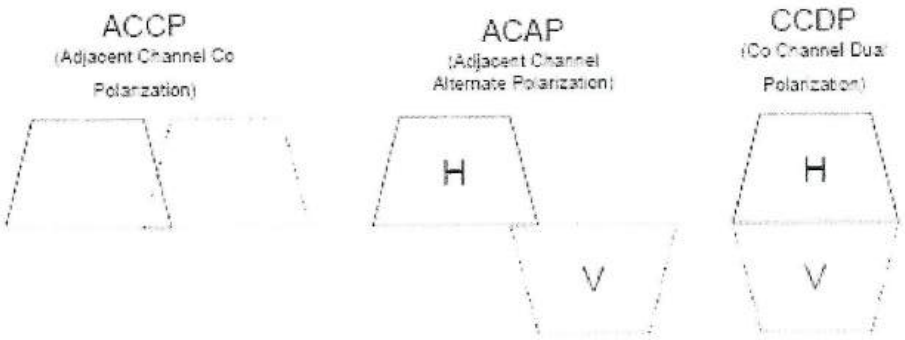


Рис. 2.17. Методи перехресної поляризації

XPIC подвоює пропускну здатність без зміни умов каналу. Наступні схеми ілюструють передачу двох каналів службових сигналів в одному мікрохвильовому напрямку.

- Якщо XPIC не використовується, у конфігурації каналу використовується ACAP, а для передачі двох службових сигналів потрібні два канали. (рис. 2.18).
- Коли використовується XPIC, у конфігурації каналу використовується CCDP, і лише один канал потрібен для передачі двох службових сигналів. (рис. 2.19).

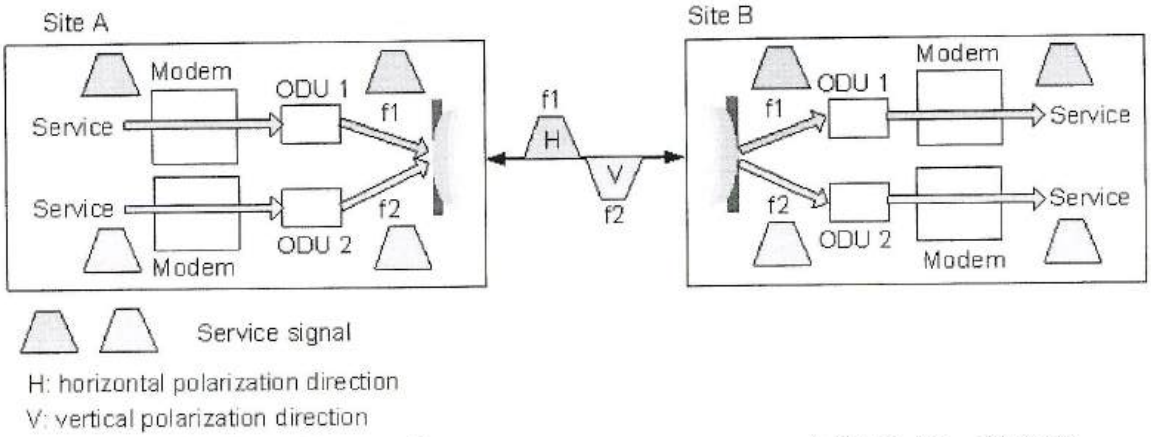


Рис. 2.18. Конфігурація каналу за допомогою ACAP (без XPIC)

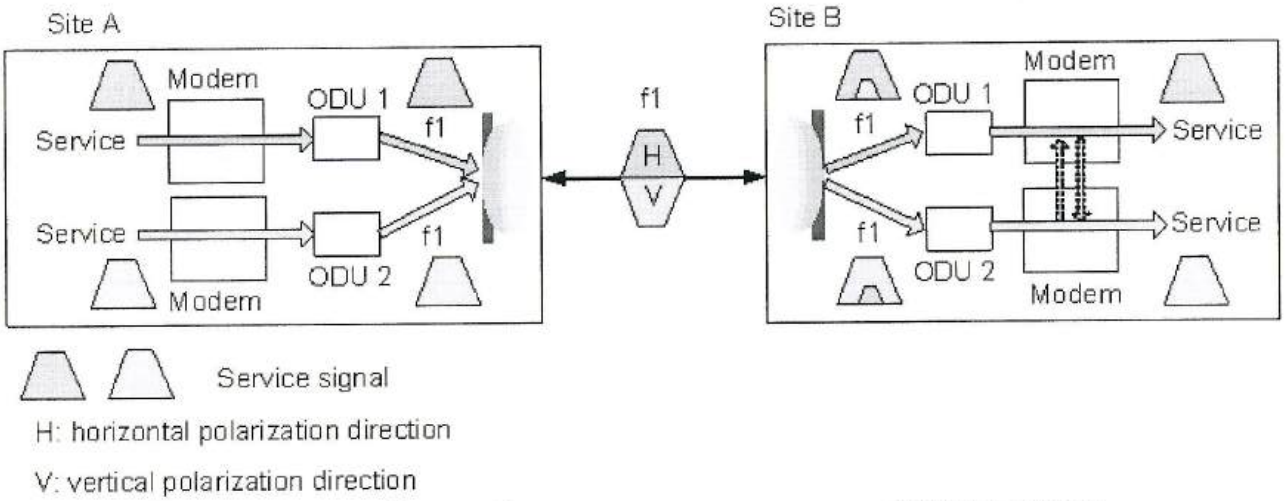


Рис. 2.19. Конфігурація каналу за допомогою CCDP і XPIC

Технології CCDP і XPIC розроблені на основі мікрохвильових поляризаційних характеристик. CCDP, у якому два сигнали передаються через дві ортогональні хвилі поляризації, що подвоює пропускну здатність. XPIC скасовує перехресну поляризаційну інтерференцію між двома хвилями поляризації.

Одна група XPIC не може сформувати групу захисту 1+1 HSB/FD/SD, але дві групи XPIC можуть утворити окремі групи захисту 1+1 HSB/FD/SD в одному напрямку.

Мікрохвильову передачу можна класифікувати на однополяризовану передачу та передачу CCDP:

- При однополяризованій передачі сигнал передається через горизонтально поляризовану хвилю або вертикально поляризовану хвилю по одному каналу, як показано на рисунку 2.20.
- У передачі CCDP два сигнали передаються через горизонтально поляризовану хвилю та вертикально поляризовану хвилю по одному каналу, як показано на рисунку 2.21.

Ємність у режимі передачі CCDP подвоює ємність у режимі однополяризованої передачі.

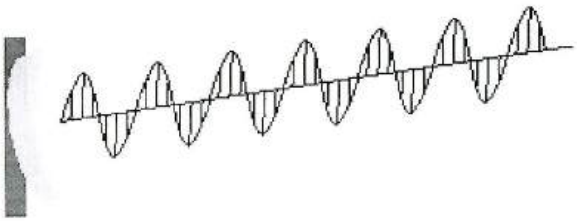


Рис. 2.20. Передача з однією поляризацією

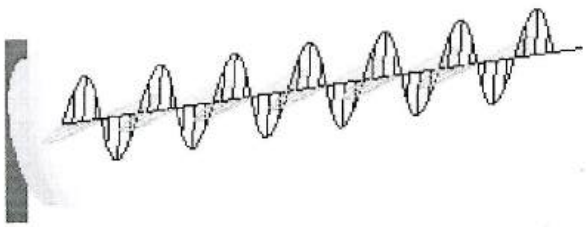


Рис. 2.21. Передача CCDP

Ідеальним при передачі CCDP вважається випадок коли між двома ортогональними сигналами, які працюють на одній частоті, немає перешкод, і тоді приймач може легко відновити ці два сигнали. Однак у реальних технічних умовах, незалежно від ортогональності двох сигналів, існує певна інтерференція між сигналами через XPD антени та погіршення якості каналу. Для усунення перешкод використовується технологія XPIC. Плати IF із XPIC обробляють вхідні сигнали в напрямках горизонтальної та вертикальної поляризації, щоб можна було їх відновити через завади.

XPIC реалізується (рис. 2.22) наступним чином:

1. Передавач передає два сигнали на одній частоті через хвилі горизонтальної та вертикальної поляризації.
2. Через погіршення XPD антени та каналу в сигналах, отриманих зовнішнім блоком, генеруються крос-поляризаційні перешкоди, що призводить до завад у сигналах IF, що передаються від зовнішнього блоку до плати IF.
3. Модуль XPIC плати IF, отримує сигнал IF від ODU та сигнал IF від іншої плати IF, і обробляє сигнали; наприклад, виконує аналогово-цифрове перетворення.
4. Модуль XPIC плати IF контролює коефіцієнт фільтрів еквалайзера прямої подачі (FFF) двох сигналів IF за допомогою еквалайзера зворотного зв'язку (DFE). У результаті, після фільтрації та об'єднання двох сигналів IF, перешкоди в обох сигналах усуваються.

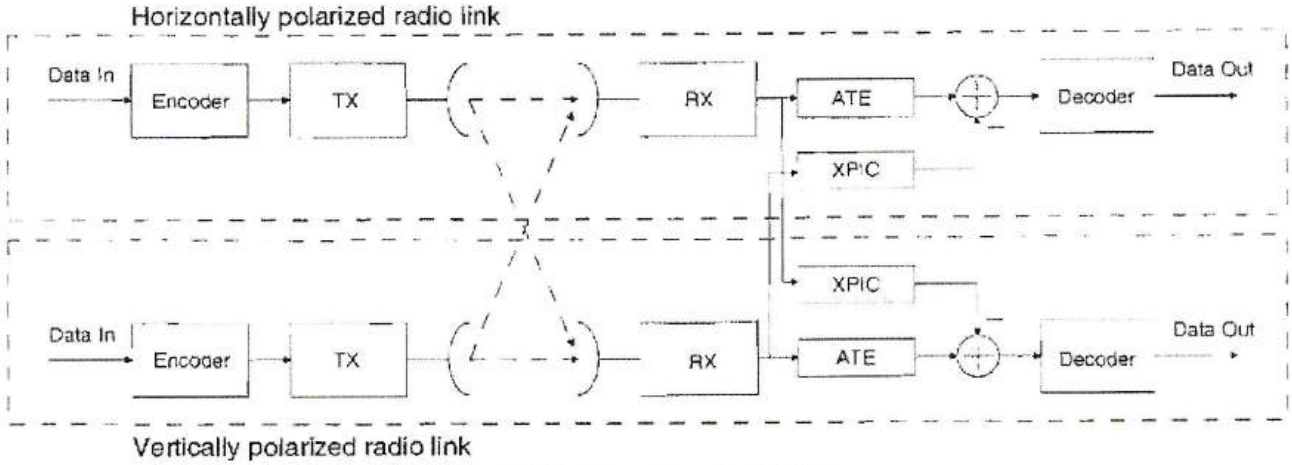


Рис. 2.22. Реалізація XPIC

2.3 Перспективні методи оптимізації мереж РРЛ

Високочастотні діапазони при передачі мікрохвильового сигналу

E-діапазон [14] представляє діапазон частот від 60 ГГц до 90 ГГц. Сигнали в цьому діапазоні частот мають дуже короткі довжини хвиль від 3,33 мм до 5 мм. Короткі довжини хвиль дають сигнали з такими ж властивостями

спрямованості частоти. Тому цей діапазон широко використовується для мікрохвильових каналів зворотного зв'язку.

Одним із недоліків цього діапазону частот є те, що атмосферні гази кисень і CO_2 поглинають сигнали на цих частотах, що призводить до значного загасання. Через це E- діапазон не можна використовувати для передачі сигналу на великі відстані.

Більшість країн заклали великий спектр від 60 ГГц до 86 ГГц для транспортних додатків із надвисокою пропускною здатністю. FCC надала діапазон від 71 до 76 ГГц і від 81 до 86 ГГц для послуг фіксованого бездротового зв'язку з високою щільністю в Сполучених Штатах. Подібним чином Міжнародний союз електрозв'язку дозволяє роботу радіоаматорських супутників в E-діапазоні від 76 до 81 ГГц.

E-Band є ліцензованим або обмежено ліцензованим діапазоном у більшості країн, який використовується для транспортних додатків надвисокої пропускної здатності з радіусом дії приблизно до 3 км. Його також можна використовувати для передачі на більші відстані (10 км у деяких випадках), однак через атмосферне поглинання хвиль на цих частотах такі системи вимагають дуже високих рівнів потужності.

Цей діапазон частот не є частиною діапазонів частот IEEE Radar (рис. 2.23) і зазвичай відомий як діапазон частот хвилеводу.

V-діапазон [15] за визначенням IEEE — це діапазон частот від 40 до 75 ГГц. V-Band не має ліцензії в багатьох країнах і найчастіше використовується для бездротового зворотного зв'язку та радіозв'язку «точка-точка/точка-багато точок». Ці системи в основному використовуються для зв'язку високої пропускної здатності прямої видимості.

Наявність ширшої смуги пропускання зробила цей діапазон хітом продаж на ринку радіорішень PtP. Лінії радіозв'язку, що працюють у діапазоні V, можуть бути щільно розгорнуті в містах із заторами без перешкод і без необхідності копати кабелі та оптоволокно, що може бути дорогим, повільним і дуже руйнівним. Сьогодні легко доступні радіостанції, що забезпечують

повнодуплексну швидкість передачі даних до 10 Гбіт/с на відстані близько однієї милі або більше.

У 2013 році IEEE представив системи бездротового доступу 802.11ad (також звані WiGig) у V-діапазоні, які дозволяють пристроям обмінюватися бездротовим зв'язком на кількох гігабітних швидкостях і передавати вміст високої чіткості на менші відстані.

У Сполучених Штатах FCC виділила смугу частот від 57 до 71 ГГц для неліцензійних бездротових систем.

Діапазон V від 57 до 66 ГГц вже використовується для високоємних наземних систем зв'язку міліметрового діапазону.

Однією з проблем, яка виникає при використанні V-діапазону, є високе поглинання сигналів через кисень на цій частоті. Це призводить до значного поглинання сигналів, тому V-діапазон зазвичай має діапазон близько 2 км.

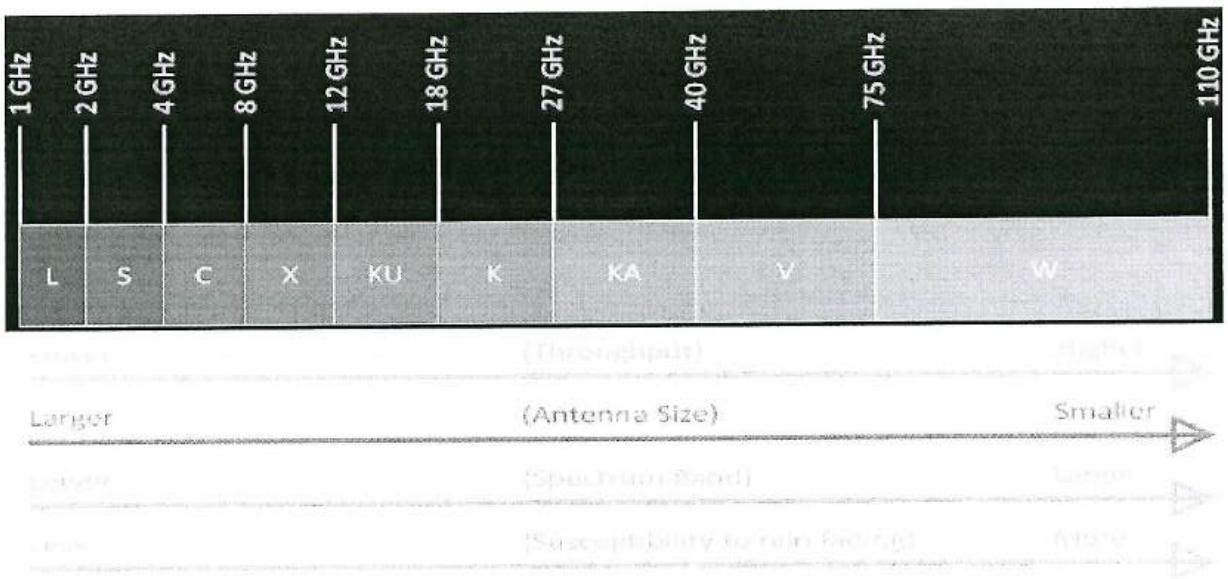


Рис. 2.23. Діапазони частот IEEE Radar

Radio Link Bonding

Новітні технології RAN забезпечують більш високу загальну швидкість передачі даних завдяки агрегації несучих [16]. Мікрохвильові канали для магістральних (далеких) мереж використовують цю можливість протягом

тривалого часу, і сьогодні вона також доступна для мікрохвильових каналів у мережі доступу. Цей метод рівномірного транспортування трафіку між двома або більше мікрохвильовими носіями називається об'єднанням радіоканалів (RLB).

Об'єднання радіоканалів також підтримує ефективну схему захисту каналів, коли обидва канали можна використовувати для передачі даних. Якщо один із пристроїв зв'язку виходить з ладу, друга радіостанція підтримуватиме зв'язок високопріоритетних послуг. Це відоме як захист 2+0, на відміну від захисту 1+1, коли одне з'єднання використовується для транспортування, а інше залишається в режимі очікування для резервних цілей. Така ж схема захисту може бути застосована до регіонів з інтенсивними дощами, де відсутні канали, стійкі до дощу. Пропускну здатність можна збільшити шляхом поєднання низькочастотного мікрохвильового каналу, стійкого до дощу та атмосферного затухання, з високочастотним каналом, який має меншу стійкість. Низькочастотне з'єднання гарантуватиме високопріоритетні послуги, тоді як високочастотне з'єднання зі зниженою доступністю підтримуватиме нижчі пріоритетні послуги.

З'єднання радіоканалів у мікрохвильовій мережі схоже на агрегацію несучих в LTE і є важливим інструментом для підтримки постійного зростання трафіку (рис. 2.24), оскільки більша частка мікрохвильових з'єднань розгортається з декількома несучими. Обидва методи об'єднують кілька несучих радіосигналів в одну віртуальну, підвищуючи пікову пропускну здатність і збільшуючи ефективну пропускну здатність за рахунок статистичного посилення при мультиплексуванні. Досягається майже 100-відсоткова ефективність, оскільки кожен пакет даних може використовувати загальну пікову пропускну здатність з незначним зниженням витрат протоколу, незалежно від структури трафіку. З'єднання по радіоканалу розроблено таким чином, щоб забезпечити високу продуктивність для конкретного рішення для передачі мікрохвиль. Наприклад, канал може підтримувати незалежну поведінку кожного носія радіосигналу за допомогою адаптивної модуляції, а також поступовий перехід у разі відмови одного або декількох носіїв.

RLB використовує кілька радіотрактів в одному напрямку для збільшення пропускної здатності. За допомогою RLB один порт комутатора Ethernet

підключається до модему. Модем має внутрішню функцію для розподілу вхідного трафіку Ethernet і PDH між доступними пакетними каналами.

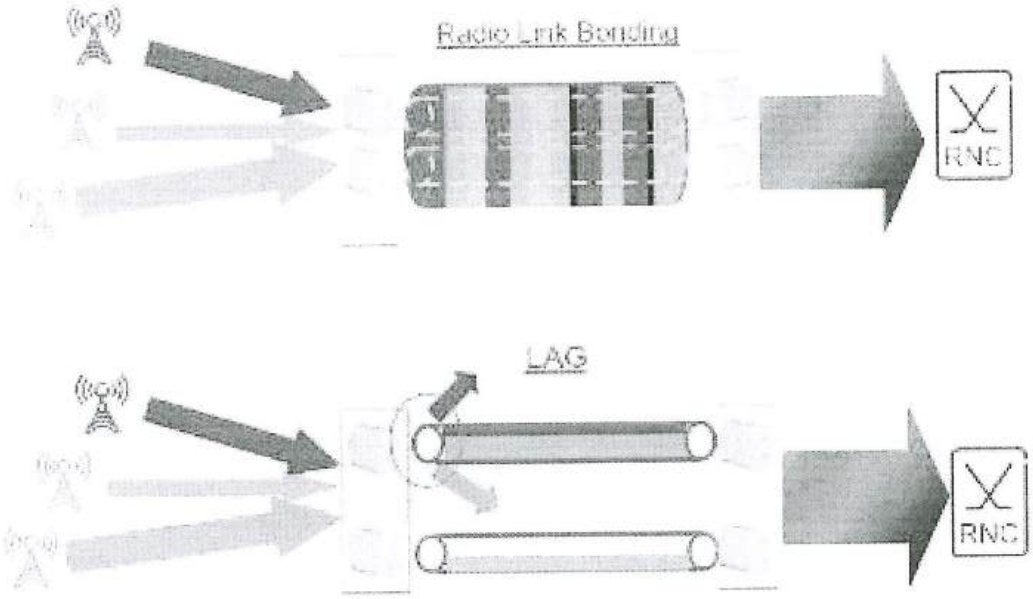


Рис. 2.24. Radio Link Bonding і LAG

Так само, як і агрегація несучих, об'єднання радіоліній продовжує розвиватися для підтримки більш високої пропускної здатності та більш гнучких комбінацій несучих, наприклад, за рахунок підтримки агрегування більшої кількості несучих, несучих з різною шириною смуги і несучих в різних частотних діапазонах.

Multi-Band

Основою для збільшення пропускної спроможності за допомогою загальних діапазонів несучих зазвичай було зосереджено на кращому та ефективнішому використанні доступного спектру. Такі речі, як ширші канали, модуляція вищого порядку, усунення перешкод із перехресною поляризацією (XPIC) і функціональні можливості оптимізації корисного навантаження, були реалізовані та значно вдосконалені.

Багатодіапазонні методи [12, 17], які використовують паралельну роботу двох мікрохвильових каналів, що працюють на різних частотах, допомагають вирішити проблеми з пропускною здатністю та експлуатацією, але супроводжуються додатковою вартістю наявності двох антен на місце. Наприклад,

методи об'єднання каналів дозволяють створити єдиний віртуальний канал пропускної спроможності двох діапазонів частот. Це може збільшити пропускну здатність і доступність зв'язку, наприклад, коли 6 ГГц поєднується з 11 ГГц. 6 ГГц допускає дуже довгі стрибки з максимальною пропускною здатністю, яка залежить від кількості каналів, інтервалу каналів і модуляції, але може бути чутливою до перешкод. Канали 11 ГГц пропонують більший спектр для збільшення пропускної спроможності, але 11 ГГц може послаблюватися від дощу.

Іншим прикладом є використання традиційного поєднання E-діапазону разом (рис. 2.25). Поєднання спектру E-діапазону із традиційним діапазоном є чудовим способом не лише покращити пропускну здатність мікрохвильових каналів, але й розширити його зону дії. Мікрохвильове з'єднання, яке використовує високу доступність традиційного діапазону разом із високою пропускною спроможністю E-діапазону, є ще одним способом вирішення вузьких місць у мережі постачальника послуг. Ці приклади доводять, що зв'язок з обома частотами може забезпечити вищу пропускну здатність і вищу доступність. Однак, навіть якщо є спектр, доступний для збільшення пропускної здатності на мікрохвильовій лінії, часто не вистачає місця на вежі, щоб додати більше ліній з більшою кількістю антен.

Без використання багатодіапазонних антен [18] часто неможливо або нерентабельно розгортати кілька діапазонів для одного каналу через потребу в кількох антенах. Продовжуючи наведений вище приклад, зв'язки на частоті 6 ГГц зазвичай потребують антен довжиною 6 футів і більше для з'єднань на великі відстані, тоді як зв'язки на частоті 11 ГГц зазвичай потребують антен довжиною до 6 футів. Існують винятки щодо розмірів антени, але загалом постачальнику знадобляться дві антени розміром 6 футів або більше, встановлені на вежі.

Багатодіапазонні антенні були розроблені, щоб полегшити не лише потребу у більшій пропускній здатності, але й зменшити витрати на встановлення, пов'язані з використанням двох антен із подальшим збільшенням оренди вежі, якщо постачальник не є власником вежі.

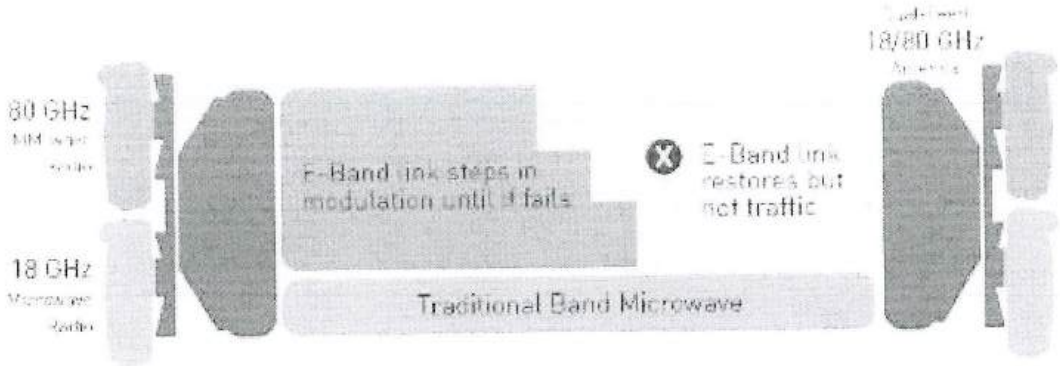


Рис. 2.25. Приклад використання дводіапазонних антен в поєднанні спектрів E-діапазону і загального діапазону

Ця інновація забезпечує більшу стійкість до складних атмосферних умов. Найважливіший трафік тепер зберігає доступність на швидкості до 2,5 Гбіт/с навіть під сильним дощем або вітром. Коли пропускна здатність 80 ГГц стає нестабільною, високонадійна сторона пристрою з частотою 18 ГГц бере на себе роботу автоматично, а потім повертається, коли умови покращуються.

Multi-Band також розширює охоплення ваших з'єднань E-Band до 6, 8 або навіть 10 кілометрів у деяких середовищах (рис. 2.26). Планування та інсталяція також спрощуються завдяки лише одному блоку для встановлення на кожному кінці та спрощеному вирівнюванню антени.

Multi-Band Booster підвищує продуктивність мікрохвильового транзиту та є інструментом, який може збільшити пропускну здатність мережі до десяти разів. Він підтримує гнучке об'єднання різних несучих і комбінацій діапазонів частот. Multi-Band Booster забезпечує більш ефективне використання різноманітних ресурсів спектру зворотного зв'язку, використовуючи вищі частоти в значно ширших географічних зонах.

Основний принцип Multi-Band Booster полягає у використанні двох радіоканалів у різних частотних областях, однієї низькочастотної області та однієї високочастотної. Зазвичай низькочастотна область передає також трафік TDM, а високочастотна область передає лише Ethernet.

На рисунку 2.27 наведено приклади можливостей багатодіапазонного режиму.

Багатодіапазонний підсилювач поєднує в собі найкращі характеристики різних частотних діапазонів для збільшення потужності, дозволяючи використовувати більш високі частоти, наприклад E-діапазон, на більших відстанях і в значно ширших географічних зонах. Багатодіапазонний підсилювач використовує низькочастотне радіо для забезпечення високого рівня доступності та поєднує його з вищим діапазоном, що забезпечує значне збільшення пропускної здатності, але з дещо нижчою доступністю. Це ідеальний спосіб збільшити охоплення E-діапазону до 3 разів або збільшити пропускну здатність традиційного діапазону в 10 разів.

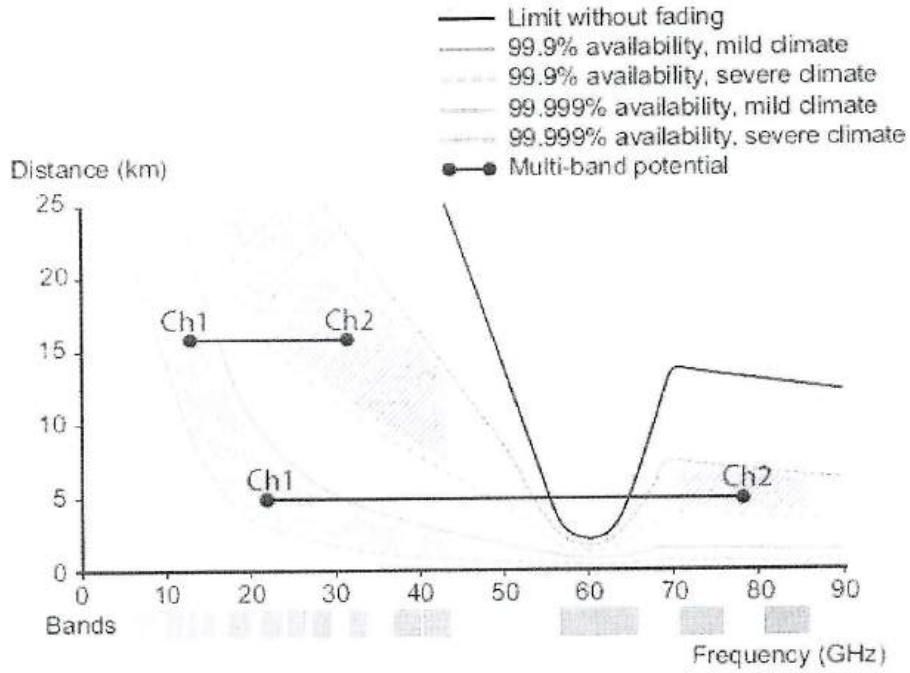


Рис. 2.26. Відповідні відстані та діапазони частот для Multi-Booster

Переваги багатодіапазонних методів, як об'єднання каналів, тепер можна реалізувати без використання кількох великих антен. Тепер є можливість збільшити пропускну здатність зв'язку вчетверо, доповнюючи нижчою вартістю встановлення однієї багатодіапазонної антени порівняно з двома однодіапазонними антенами, нижчими транспортними витратами та вдвічі скороченими витратами на оренду вежі.

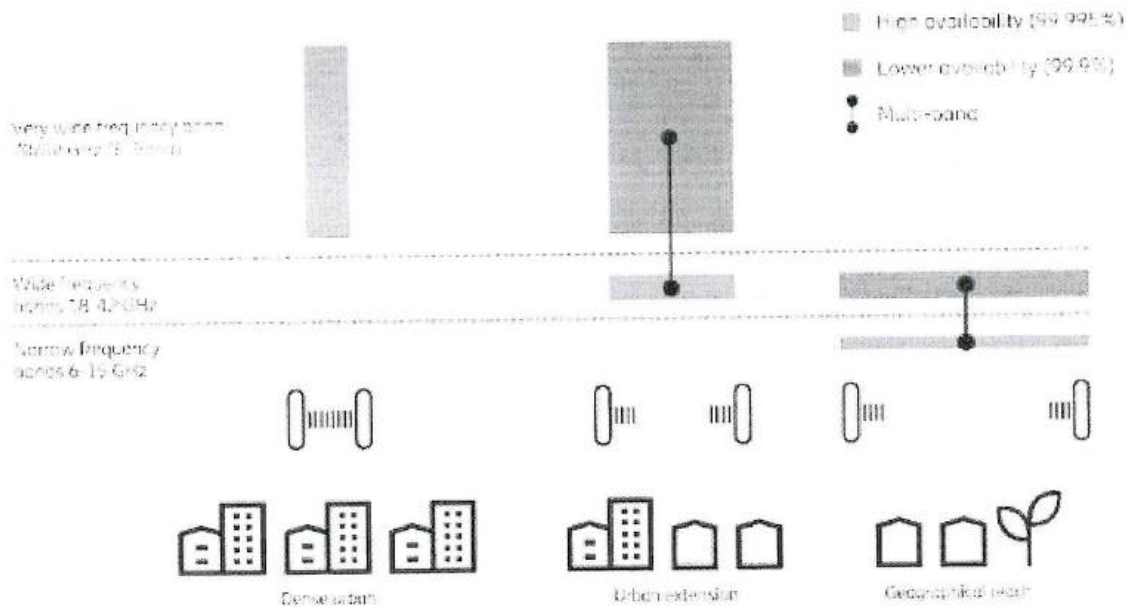


Рис. 2.27. Ефективне використання мікрохвильового зворотного спектру

Multiple-Input Multiple-Output

Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) — це добре запроваджена технологія антени для підвищення спектральної ефективності та/або надійності бездротового зв'язку, яка успішно використовується в технологіях 3GPP і Wi-Fi. В [19] описана концепція та особливості використання MIMO. У системі MIMO кілька антен розгортаються як на стороні передавача, так і на стороні приймача каналу. Кілька антен можна використовувати для:

1) підвищення спектральної ефективності (біт/с/Гц – біти на секунду та Гц) каналу шляхом передачі кількох потоків даних по каналу (також називається просторовим мультиплексуванням).

2) підвищення надійності зв'язку шляхом використання рознесеності, яка створюється використанням кількох антен (також називається просторовим рознесенням).

Канал MIMO можна розкласти на кілька каналів з одним входом і одним виходом (SISO). Ці канали іноді називаються підканалами загального каналу MIMO. Саме використання цих підканалів паралельно в одному каналі часу та частоти забезпечує просторове мультиплексування в MIMO.

Наприклад, правильно розроблена система MIMO з 8 передавальними та 8 приймальними антенами (8x8 MIMO) матиме 8 підканалів для просторового мультиплексування. Іншими словами, пропускна здатність системи 8x8 буде у 8 разів більша, ніж одна антенна система. Наприклад, якщо припустити, що 6 біт на символ даних (64 QAM) використовується в системі 8x8 MIMO через смугу пропускання сигналу E-діапазону 2,25 ГГц, загальна швидкість становитиме 6 (біт на символ) x 8 (потоки даних) x 2,25 (ГГц) = 108 Гбіт/с. Завдяки цьому MIMO діє як засіб для досягнення 100 Гбіт/с і більше.

Загалом існує компроміс між просторовим мультиплексуванням і посиленням різноманітності. Наприклад, у мікрохвильових лініях зв'язку великої відстані приймачі з просторовим рознесенням зазвичай використовуються для боротьби з багатопроменевим завмиранням, таким чином пропонуючи захист критично важливим лініям зворотного зв'язку. У системі просторового рознесення інформація про дані передається різними підканалами, що підвищує захист зв'язку, оскільки малоймовірно, що всі підканали зникнуть одночасно. Це також означає, що система з просторовим рознесенням зазвичай має підвищену доступність певної швидкості передачі даних порівняно з системою без рознесення. На відміну від просторового рознесення, система просторового мультиплексування використовує всі підканали для передачі кількох потоків даних, щоб підвищити спектральну ефективність зв'язку. Висока спектральна ефективність важлива, коли спектр є дефіцитним ресурсом, що робить MIMO привабливим рішенням.

Основний намір використання MIMO пов'язаний із передачею кількох потоків для подальшого підвищення спектральної ефективності мікрохвильових каналів зв'язку. Спектральна ефективність підвищується до N разів порівняно з системою SISO, де N — це порядок MIMO, обмежений кількістю антен, що використовуються в системі MIMO. У системах MIMO можна розгорнути будь-яку кількість передавальних і приймальних антен, але найпоширенішою є симетрична система, де кількість передавальних антен дорівнює кількості приймальних антен (система NxN MIMO). Антени з подвійною поляризацією також можуть використовуватися в системах MIMO. Наприклад, система з двома подвійними

поляризованими антенами з кожного боку каналу еквівалентна системі 4x4 MIMO. Коли справа доходить до розгортання, антени можуть мати різне розташування. Наприклад, антени в системі 4x4 MIMO можуть бути розгорнуті у вигляді квадратної сітки, уздовж лінії або навіть у L-подібній формі. Часто фізичні обмеження сайту диктують розгортання.

Рис. 2.28 ілюструє принцип системи 2x2 MIMO, де перша передавальна антена використовується для передачі першого потоку даних сигналу (синій), а друга передавальна антена (віддалена відстанню d1 від першої антени) використовується для передачі другий потік даних сигналу (помаранчевий).

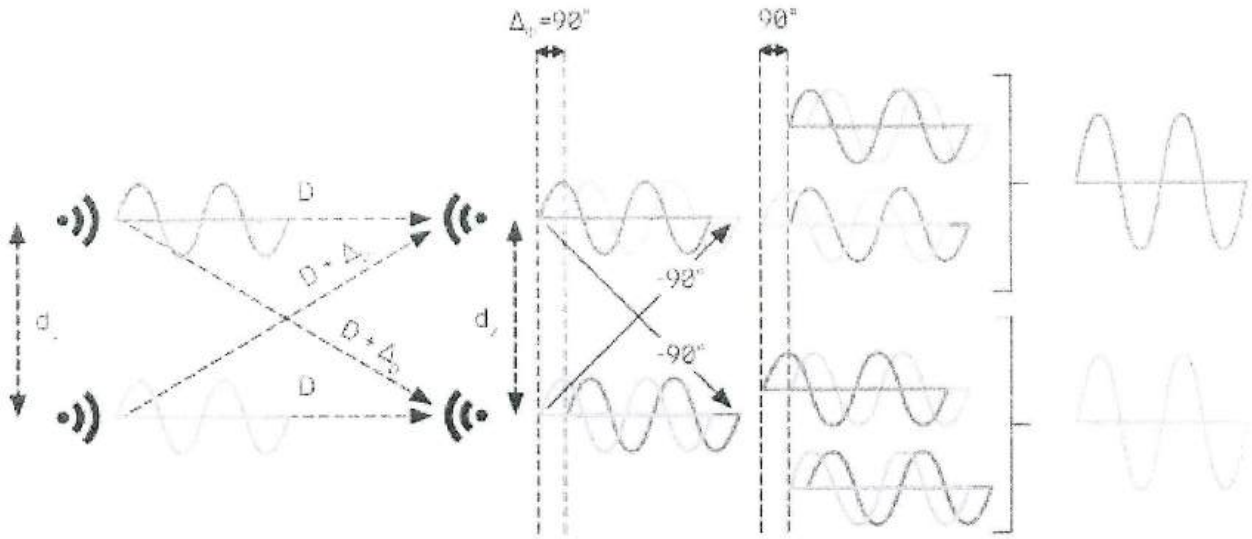


Рис. 2.28. Принцип MIMO для мікрохвильової передачі

Обидва потоки даних сигналу приймаються двома приймальними антенами (розділеними відстанню d2), які розташовані на відстані D від передавальних антен. Обидва сигнали приймаються кожною з приймальних антен, через що вони створюють перешкоди один одному. Однак можна розгорнути антени з точки зору поділу d1 і d2 таким чином, щоб був оптимальний фазовий зсув ΔФ 90 градусів між перехресними каналами відносно прямих каналів. Це означає, що за допомогою відповідної схеми усунення перешкод у приймачі сигнали, що заважають, можуть бути повністю видалені з сигналів, що цікавлять. Це можна зробити ідеально і без будь-яких втрат продуктивності, якщо ΔФ відповідає фазовому зсуву на 90 градусів і, відповідно, $\Delta\Phi=90^0$ вважається оптимальним розносом антен. Існує багато

розносів антен, які дають ΔФ 90 градусів, але оптимальним вважається найменший рознос залежно від довжини стрибка D і довжини хвилі λ (або частоти).

На рисунку 2.29 показано оптимальне рознесення антен у системі 2x2 MIMO для різних частот у залежності від довжини стрибка.

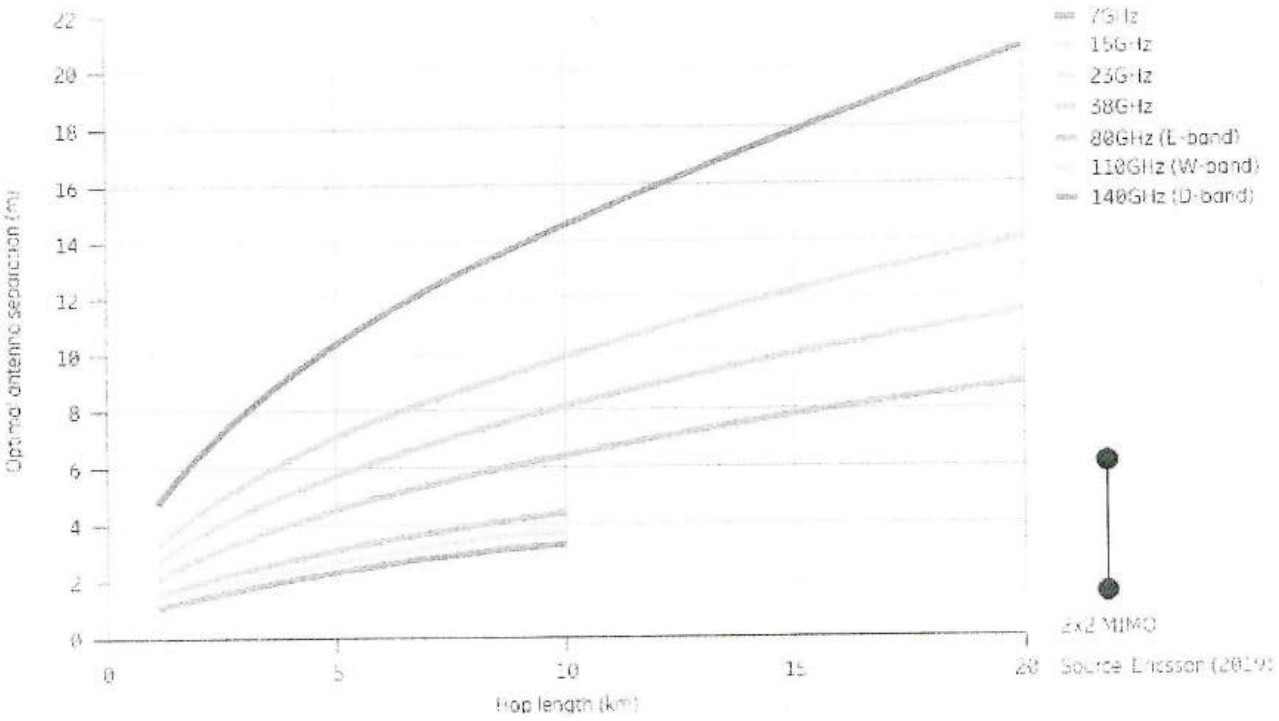


Рис. 2.29. Оптимальне рознесення антен для системи 2x2 MIMO

Більша частота або менша довжина стрибків дозволяють використовувати менші відстані між антенами, що робить установку MIMO більш компактною. Слід також зазначити, що можна використовувати неоптимальне рознесення антен, оскільки в деяких розгортаннях використання оптимального рознесення антен може бути непрактичним, оскільки воно просто занадто велике. Вплив неоптимального розносу антени показано на рисунку 2.30, де пропускна здатність MIMO (спектральна ефективність) нанесена на графік у залежності від різного ступеня неоптимального рознесення антени для різних розгортань системи MIMO. Це демонструє, як пропускна здатність падає, коли антени стають більш неоптимальними. Однак навіть при 30-50% оптимального інтервалу є величезний приріст ємності в порівнянні з системою SISO. На рисунку 2.30 також показано, що

різні розташування антен мають різні властивості, коли антени розташовані неоптимально. Квадратне розгортання MIMO 4x4 є більш надійним у порівнянні з субоптимальним інтервалом у співвідношенні сигнал/шум (SNR), яке використовується в цьому прикладі.

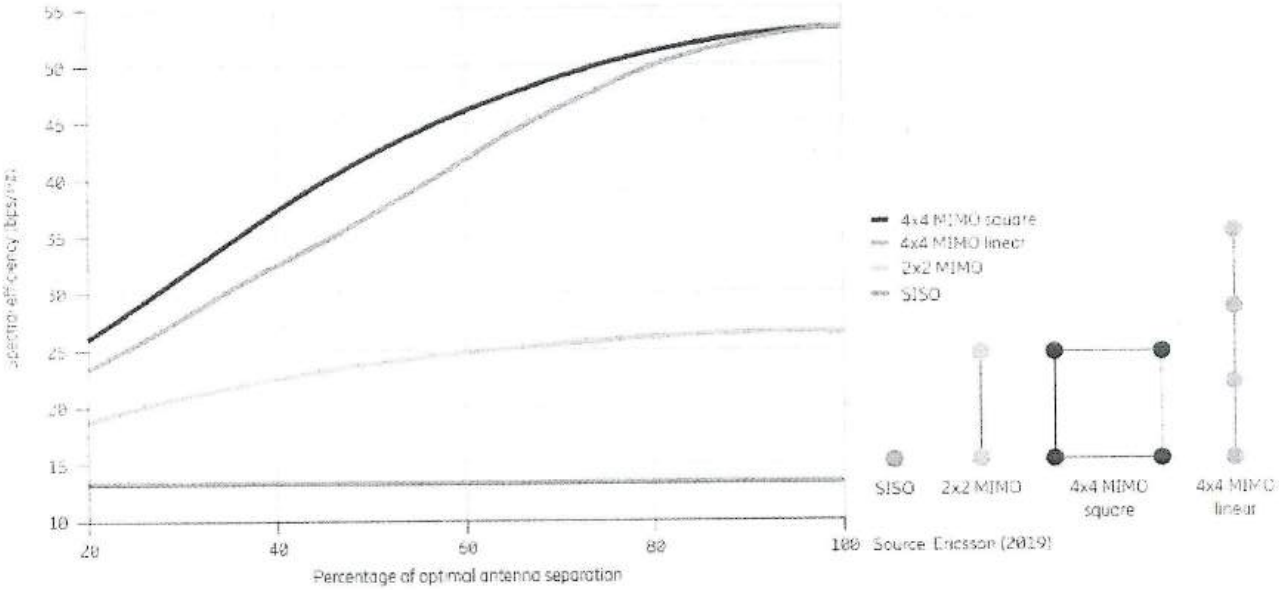


Рис. 2.30. Ємність MIMO в залежності від розташування антени

Використання неоптимального рознесення антен призведе до зниження посилення системи, що на практиці означає втрату доступності. На рисунку 2.31 показано ефект неоптимального рознесення антен у 4x4 MIMO оптимальний 99,9999 4x4 MIMO 50% оптимальний 4x4 MIMO 30% оптимальний SISO. Таким чином, попереднє кодування накладає обмеження на фазову синхронізацію радіостанцій для належної роботи. У системах MIMO без попереднього кодування кожна система MIMO 4x4 розгорнута в квадратному порядку. Слід зазначити, що пропускна здатність падає при зменшенні відстані антен в системі MIMO. Таким чином, використання неоптимального інтервалу антени є компромісом між пропускною здатністю MIMO та доступністю.

MIMO — це спектрально ефективна технологія кількох антен, яку можна використовувати, коли доступний спектр обмежений або для забезпечення >100 Гбіт/с у широкосмугових каналах. Оптимальне розташування антени залежить від бажаного порядку MIMO, частоти та довжини стрибка. Неоптимальні

розташування антен можливі, а іноді навіть необхідні через обмеження встановлення на місці, але вони призведуть до погіршення продуктивності через зменшення пропускної здатності та/або доступності. Попереднє кодування через фазово-синхронізовані передавачі може певною мірою зменшити негативний результат використання неоптимально розташованих антен.

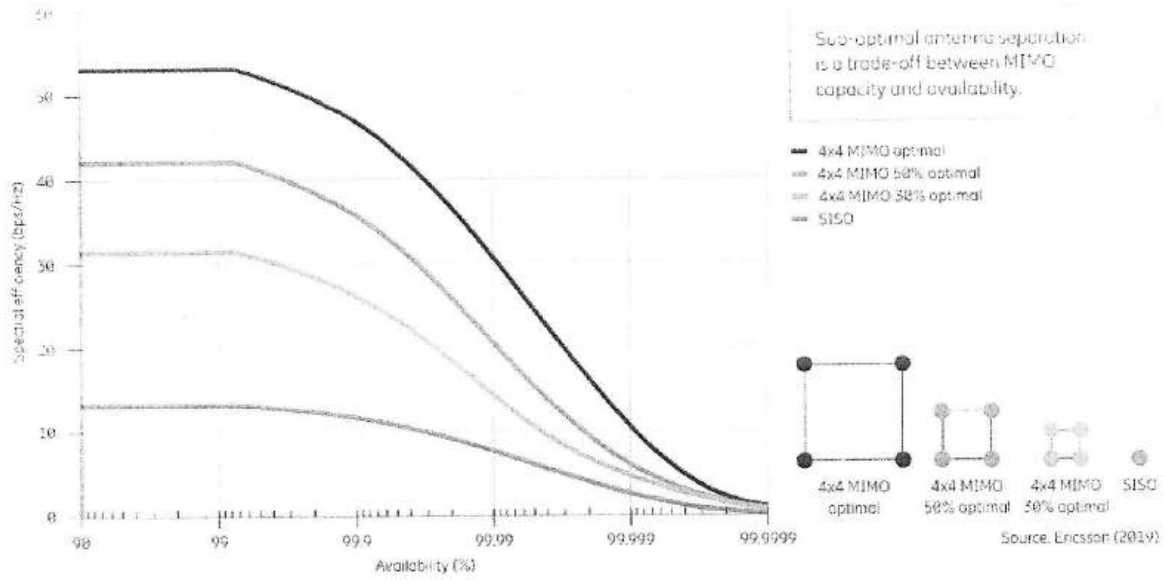


Рис. 2.31. Компроміс між ємністю та доступністю MIMO для неоптимального розташування антен

Багаторівневе стиснення заголовків

Функція стиснення заголовка кадру Ethernet покращує можливості передачі послуг Ethernet через мікрохвильову мережу Integrated IP. Після ввімкнення цієї функції сторона передачі інкапсулює індикаторні байти в мікрохвильові кадри, причому індикаторні байти замінюють байти заголовка кадру Ethernet; приймальна сторона відновлює оригінальні байти заголовка кадру Ethernet на основі отриманих байтів індикатора. Стиснення заголовка кадру Ethernet також називається прискоренням пропускної здатності через повітряні інтерфейси.

Функція стиснення заголовка кадру Ethernet значно покращує можливості передачі послуг Ethernet і дозволяє операторам надавати послуги з більшою

пропускною здатністю. Крім того, ця функція зменшує вартість будівництва мережі, економить частотні ресурси та покращує пропускну здатність.

Багаторівневе стиснення заголовків (MLHC) покращує ефективність транспортування трафіку Ethernet через радіолінії шляхом стиснення заголовків Ethernet/MPLS (рівень 2), IP (рівень 3) і UDP (рівень 4). MLHC збільшує максимальну пропускну здатність інтерфейсу WAN за рахунок зменшення розміру кадрів Ethernet під час їх передачі по радіоканалу.

На кожній стороні радіолінії є пара стиснення MLHC (один компресор і один декомпресор), що реалізує функцію стиснення заголовка. Компресор з одного боку каналу пакетної радіопередачі надсилає стислі кадри трафіку до відповідного декомпресора з іншого боку каналу.

Функція стиснення заголовка кадру Ethernet реалізує стиснення заголовка шляхом заміни байтів індикатора на байти заголовка кадру Ethernet (перших набагато менше, ніж других).

Процес стиснення заголовка L2 описано:

- у вузлі передачі:
  - Замінює байти інкапсуляції заголовка на інтервали кадрів і преамбули.
  - Відкидає такі байти, як адреса джерела, адреса призначення та поле типу, отримує таблицю зіставлення стиснення та замінює байти фіксованого індикатора на пов'язані байти заголовка.
  - Інкапсулює стислі кадри Ethernet у мікрохвильові кадри та надсилає мікрохвильові кадри на приймальну сторону.
- у вузлі прийому:
  - Декапсулює мікрохвильові кадри в кадри Ethernet.
  - Отримує таблицю відображення стиснення відповідно до байтів-індикаторів, що містяться в отриманих кадрах, і відповідно відновлює початкові байти заголовка, включаючи адресу джерела, адресу призначення та поле типу кадрів Ethernet.
  - Регенерує преамбули та інтервали кадрів відповідно до відповідного стандарту для відновлення оригінальних кадрів Ethernet.

Результат стиснення показано на рисунку 2.32.



Рис. 2.32. Стиснення заголовка кадру Ethernet

Microwave In-band Full-duplex

Мікрохвильова внутрішньосмугова повнодуплексна технологія [20] покращує пропускну здатність мікрохвильового каналу, оптимізує ресурси спектру та збільшує пропускну здатність мережі. Очікується, що це значно зменшить експлуатаційні витрати мережі, покращить можливості мережевих послуг і стане основним рішенням для розгортання мікрохвильової мережі.

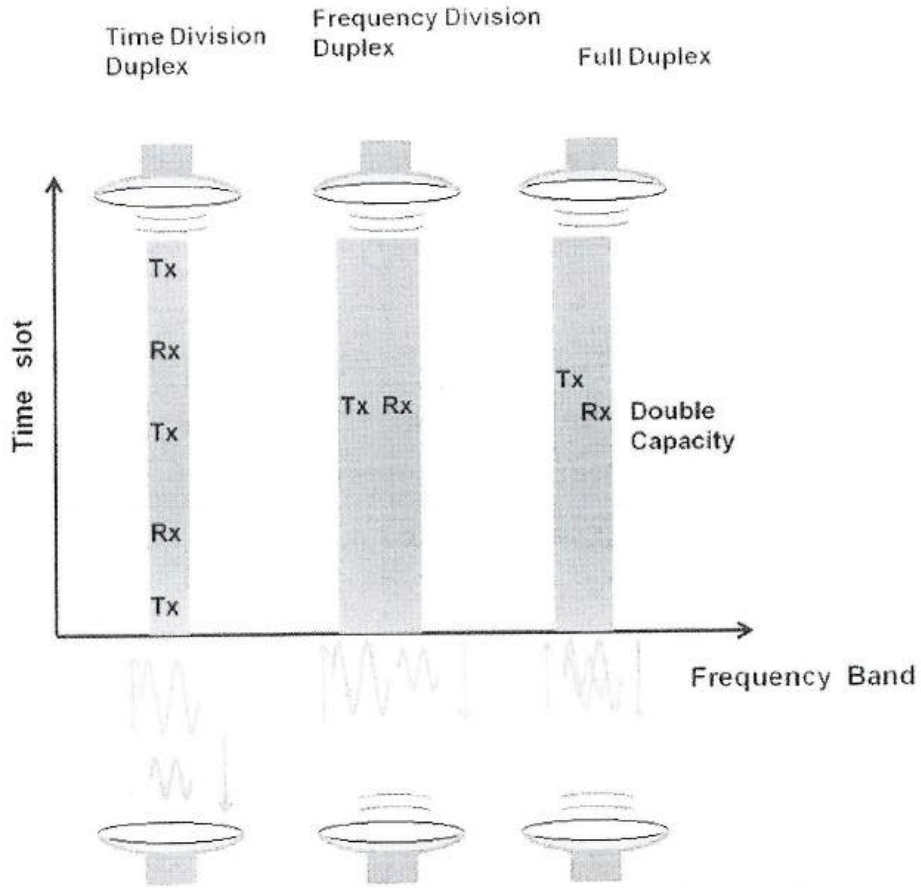


Рис. 2.33. Передача в TDD, FDD та Full Duplex

В даний час мобільні широкосмугові мережі швидко розвиваються, технологія LTE використовується в комерційних цілях, а промисловість широко досліджує технологію 5G. LTE-A Cat 6 забезпечує пікову швидкість 300 Мбіт/с, тоді як LTE-A Cat 10 забезпечить пікову швидкість 1 Гбіт/с відповідно до стандарту 3GPP, а технологія 5G забезпечить швидкість 10 Гбіт/с.

Значне зростання трафіку мобільних даних створює великий тиск на транспортні мережі. Рішення транзитного зв'язку для макробазових станцій, залишатиметься ключовим заходом для з'єднання макробазових станцій і малих стільників. Тому потужність мікрохвильової передачі повинна бути покращена, щоб задовольнити швидке зростання мобільного трафіку.

Мікрохвильовий внутрішньосмуговий повний дуплекс (M-IFD) забезпечує мікрохвильову передачу в повнодуплексному режимі на одній частоті. Його можна застосовувати до загальних частотних діапазонів (6–42 ГГц), V-діапазону (60 ГГц) і E-діапазону (80 ГГц). Порівняно з існуючими дуплексними технологіями за тих самих умов, M-IFD подвоює швидкість радіоінтерфейсу.

Якщо передавач і приймач на одному кінці передають і приймають сигнали одночасно на одній частоті під час мікрохвильового зв'язку, передавач в такому випадку створює сильні перешкоди в одному каналі. Це набагато більше, ніж потужність отриманого сигналу на приймачі, який, як наслідок, не приймає сигнали належним чином. У дуплексному режимі з розділенням часу (TDD) сигнали передаються та приймаються на одній частоті; однак передавач і приймач працюють по черзі, щоб уникнути перешкод на суміжному каналі. У дуплексному режимі з частотним поділом (FDD) сигнали передаються та приймаються одночасно, але на різних частотах (рис. 2.33). Щоб запобігти перешкодам у спільному каналі, традиційна технологія TDD або FDD повинна або передавати та приймати сигнали по черзі, або використовувати різні частоти.

M-IFD скасовує перешкоди в одному каналі та дозволяє передавачу та приймачу працювати одночасно на одній частоті. Порівняно з технологіями TDD і FDD, M-IFD подвоює швидкість радіоінтерфейсу за тієї самої смуги пропускання спектру або економить 50% ресурсів спектру, досягаючи тієї ж швидкості, що й

TDD і FDD. Щоб подвоїти потужність мікрохвильового випромінювання, M-IFD може працювати з існуючими технологіями покращення потужності мікрохвильового випромінювання, такими як модуляція вищого порядку, MIMO, стиснення заголовка кадру, усунення перешкод із перехресною поляризацією (XPIC) і агрегація каналів.

Мікрохвильове обладнання має високу потужність передачі, модуляцію високого порядку та передачу на великі відстані. Ці особливості створюють великі проблеми для M-IFD; наприклад, сигнали з високою потужністю передачі викликають сильні перешкоди на ближньому кінці приймача. У разі передачі на великі відстані самоперешкоди на дальньому кінці можуть бути спричинені перешкодами на шляху передачі, поверхневим розсіюванням і відображенням на одноранговому місці. Крім того, збільшення смуг частот і смуги пропускання може призвести до погіршення показників продуктивності, таких як фазовий шум, що додає труднощів реалізації M-IFD. M-IFD використовує такі технології для подолання цих проблем і підвищення продуктивності системи: покращення ізоляції, придушення власних перешкод на ближньому кінці (near-SIC), придушення власних перешкод на дальньому кінці (far-SIC), придушення фазового шуму.

Покращення ізоляції: на тому самому обладнанні, де передавач і приймач працюють на одній частоті, між передавачем і приймачем, а також між антенами виникають самоканальні перешкоди. У конструкції передньої схеми РЧ ізоляцію між передавачем і приймачем можна покращити шляхом додавання отворів для заземлення навколо сигнальних проводів, збільшення відстані між каналами передачі та прийому або оптимізації структури екрануючої порожнини. При необхідності ланцюги передавача і приймача також можуть бути відокремлені один від одного. У конструкції антени ізоляцію між антенами можна покращити шляхом додавання структур для придушення перешкод ближнього поля або поглинаючих матеріалів, оптимізації компонування передавальної та приймальної антен або покращення ізоляції циркулятора.

Near-SIC: Оскільки ізоляція, досягнута конструкцією антени та схеми, обмежена, ближній SIC необхідний для подальшого зменшення власних перешкод на ближньому кінці. Near-SIC забезпечує такі функції:

- Усунення радіочастотних перешкод: кілька сигналів передачі передаються від передавача до переднього кінця приймача. На основі амплітуди, фази та затримки сполучених сигналів генеруються сигнали скасування. Їх амплітуда і затримка такі ж, як і у сигналів перешкод, але фаза відрізняється на 180 градусів. Таким чином можна скасувати власний інтерфейс ближнього кінця. Як правило, багаторівневі схеми придушення перешкод можна використовувати для покращення здатності придушення. Крім того, алгоритм цілочисельної нелінійної оптимізації, який контролює налаштування амплітуди, фази та затримки, забезпечує швидке автоматичне припинення самоперешкод на ближньому кінці.
- Усунення перешкод IF: гарантує, що на точність кількісного визначення не впливають сильні перешкоди, коли аналого-цифровий перетворювач (АЦП) перетворює отримані сигнали в цифрові сигнали. Придушення IF перешкод подібне до послаблення радіочастотних перешкод, за винятком того, що сигнали послаблення та регулювання їх амплітуди, фази та затримки завершуються в базовій смузі. Сигнали придушення перешкод перетворюються в аналогові сигнали цифро-аналоговим перетворювачем (ЦАП), а сигнали придушення перешкод у прийнятих сигналах припиняються на передньому кінці АЦП.
- Скасування перешкод основної смуги частот: усуває залишкові власні перешкоди на ближньому кінці в цифрових сигналах основної смуги частот. Алгоритм цифрової смуги частот оцінює сигнали перешкод і реконструює сигнали придушення перешкод, щоб усунути залишкові перешкоди.

Far-SIC: Власні перешкоди на дальньому кінці можуть генеруватися в будь-якому місці на шляху передачі сигналу. Таким чином, самоперешкоди на дальньому кінці зазвичай містять кілька багатопроменевих сигналів з різними

затримками. Сигнали власних перешкод на дальньому кінці можна обробляти лише в цифровій смузі частот. Кілька алгоритмів паралельного усунення перешкод можна використовувати для обробки кількох багатопроменевих сигналів, покращуючи швидкість обробки та заощаджуючи логічні ресурси. Крім того, алгоритми скасування повинні підтримувати широкий діапазон затримок.

Придушення фазового шуму: мікрохвильовий фазовий шум зростає зі збільшенням частоти та впливає на ефективність алгоритмів усунення перешкод основної смуги частот і алгоритмів демодуляції. Фазовий шум у прийнятих сигналах можна зменшити за допомогою алгоритму придушення фазового шуму. Системний шум можна зменшити шляхом оптимізації схеми апаратного забезпечення, використання високопродуктивних компонентів джерела частоти, а також шляхом оптимізації конструкції контурного фільтра та конструкції передавача/приймача. Крім того, фазовий шум у сигналах власних перешкод можна ефективно зменшити, налаштувавши один і той же гетеродин для передавача та приймача.

Покращення точності синхронізації: коли мікрохвильове обладнання демодулює отримані сигнали, воно відновлює синхронізацію символів із сигналів, щоб забезпечити продуктивність дискретизації сигналів. Однак у M-IFD потужність сигналів перешкод і корисних сигналів подібна, що ускладнює ідентифікацію корисних сигналів для мікрохвильового обладнання. Адаптивне вирівнювання виконується на початку обробки цифрових сигналів для усунення перешкод перед синхронізацією, що покращує точність синхронізації та зменшує шум.

Швидке зростання пропускної здатності бездротової мережі вимагає покращення мікрохвильової пропускної спроможності та збільшення спектральних ресурсів. Деякі оператори та постачальники обладнання пропонують бездротові мережеві рішення, які використовують мікрохвильові діапазони частот, наприклад 11 ГГц, 28 ГГц або навіть міліметрові діапазони хвиль. Це додатково скорочує частотні ресурси, доступні для транзитного мікрохвильового зв'язку. M-IFD збільшує пропускну здатність мікрохвильової лінії передачі, спрощує O&M

(operation and maintenance), покращує використання частоти, забезпечує гнучку конфігурацію мережі та покращує інші аспекти продуктивності мережі.

Гнучка мікрохвильова мережа: щільно розгорнуті мікрохвильові транспортні сайти більше не потребують парних ресурсів спектру. Канали передачі висхідної та низхідної лінії зв'язку можуть бути встановлені в одній смузі частот. Таким чином, більшу допоміжну смугу пропускання можна розділити з мікрохвильової смуги частот для мереж.

Щільне розгортання на одній ділянці: якщо на одній ділянці розгорнуто кілька мікрохвильових пристроїв, перехресні перешкоди між пристроями, що працюють у сусідніх діапазонах частот, можна скасувати за допомогою технології усунення перешкод. Таким чином можна покращити щільність розміщення мікрохвильових пристроїв на одному місці.

Внутрішньочастотне реле: мікрохвильові реле можуть використовувати M-IFD для усунення перехресних перешкод, створюваних передавальною антеною на приймальній антені. Таким чином можна зменшити кількість частот, які використовуються в мережі.

Нормалізація мікрохвильового обладнання: інтегрований трансивер із технологією усунення власних перешкод має високу ізоляцію прийому та передачі та досягає того самого ефекту, що й широкосмуговий дуплексер, який використовується для зв'язку FDD. Завдяки трансиверу для обладнання, що працює в кожному піддіапазоні, не потрібен дуплексер, що спрощує постачання та обслуговування продукції.

Підсумовуючи, M-IFD покращує пропускну здатність мікрохвильового каналу, оптимізує ресурси спектру та збільшує пропускну здатність мережі. Очікується, що це значно зменшить експлуатаційні витрати мережі, покращить можливості мережевих послуг і стане основним рішенням для розгортання мікрохвильової мережі.

3 РОЗРОБКА ТА ОПТИМІЗАЦІЯ МЕРЕЖІ РРЛ З ВИКОРИСТАННЯМ ПАК АТОЛЛ В УМОВАХ МІСЬКОЇ ЗАБУДОВИ

3.1 Atoll Microwave

Atoll Microwave — це сучасне програмне забезпечення для планування та оптимізації транзитного зв'язку «точка-точка» та «точка-багато точок». Це ПЗ дозволяє проектувати великі мікрохвильові мережі відповідно до рекомендацій ITU, галузевих стандартів і вказівок оператора.

Atoll Microwave базується на провідній платформі Atoll (рис. 3.1), яка включає високопродуктивну GIS і розширені функції керування даними та користувачами. Повна інтеграція Atoll Microwave з модулями планування радіозв'язку Atoll дозволяє негайно обмінюватися даними планування та оптимізації радіозв'язку для планування транзитного зв'язку.

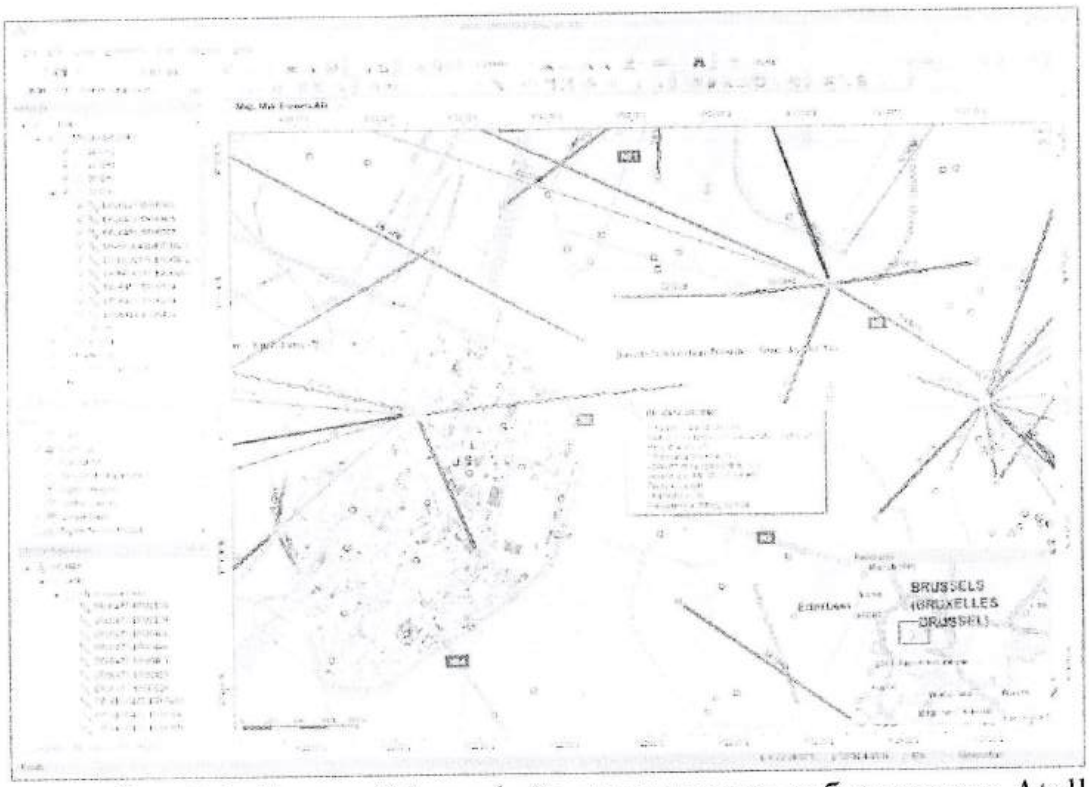


Рис. 3.1. Гнучкий інтерфейс програмного забезпечення Atoll

Atoll Microwave також включає модуль планування пропускної здатності транзитного зв'язку, який дозволяє мережевим операторам моделювати топологію транзитної мережі та визначати розміри транзитних каналів відповідно до трафіку мобільної мережі. Модуль планування пропускної спроможності дає змогу аналізувати наскрізну маршрутизацію мобільного трафіку та оптимізувати пропускну спроможність.

Atoll Microwave також підтримує транзитний зв'язок поза межами прямої видимості, що дозволяє планувати невеликі стільникові та проектувати мережу 5G.

Atoll Microwave використовується багатьма великими операторами бездротового зв'язку та постачальниками обладнання по всьому світу.

Функції GIS (рис. 3.2):

- Оптимізовані функції керування картографічними даними з підтримкою цифрових моделей рельєфу, даних про перешкоди (тип і висота), даних 3D-будівель (вектор/растр), даних про дорожній рух, сканованих карт, векторних даних, даних про населення та клімату;
- Інтегрований редактор картографії (вектор/растр);
- Інтерфейс із інструментами GIS: Mapinfo, ArcGIS, Google Earth - рис. 3.3;
- Підтримка Web Map Services (WMS) та онлайн-карт (Bing, Open Street Maps тощо).

Автоматизація завдань (рис. 3.4):

- Мова сценаріїв, що дозволяє інтегрувати визначені користувачем макроси;
- Визначений користувачем пакет розрахунків на основі макросів і сценаріїв.

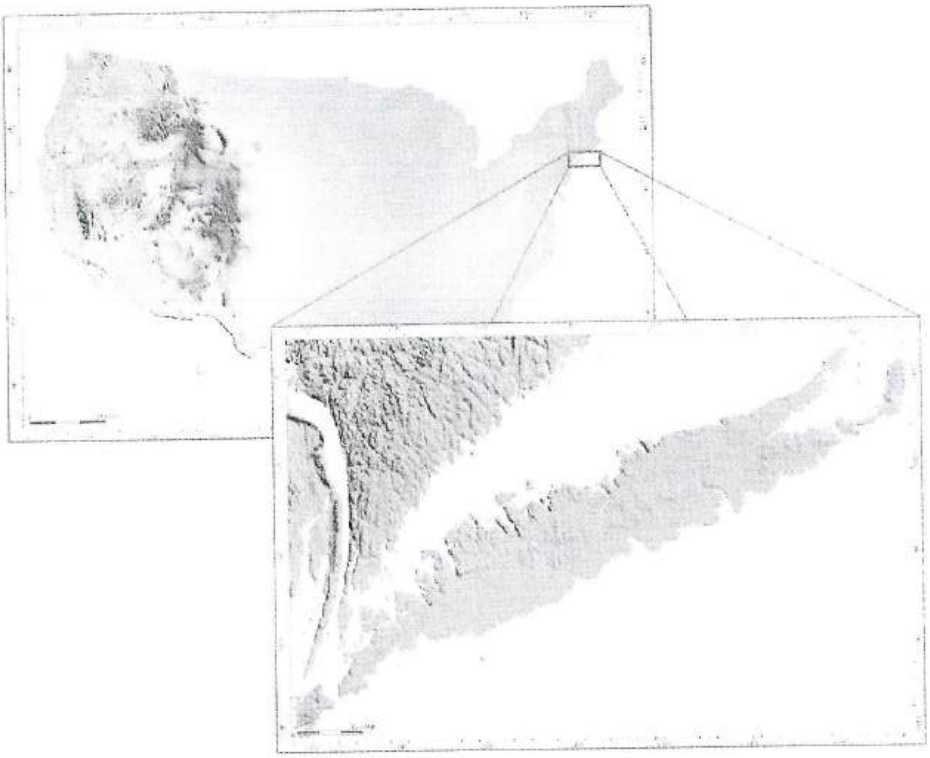


Рис. 3.2. Високопродуктивна вбудована GIS, оптимізована для планування та оптимізації радіомережі

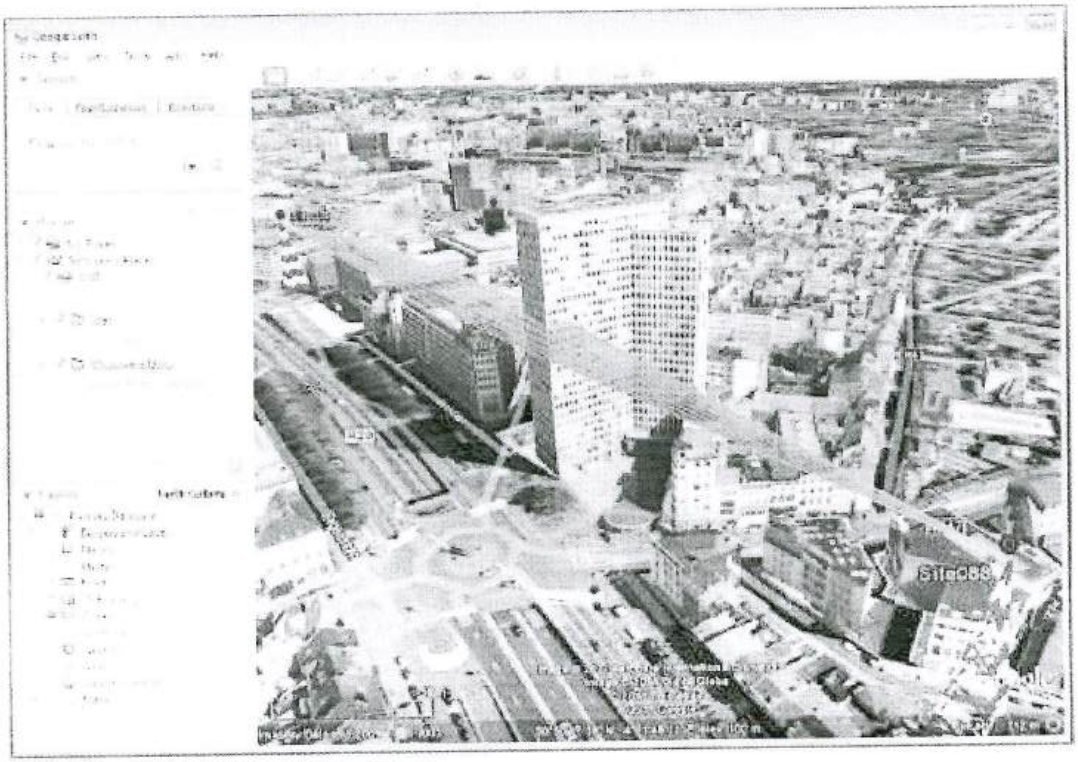


Рис. 3.3. Експорт даних із сайтів і мікрохвильового зв'язку у Google Earth

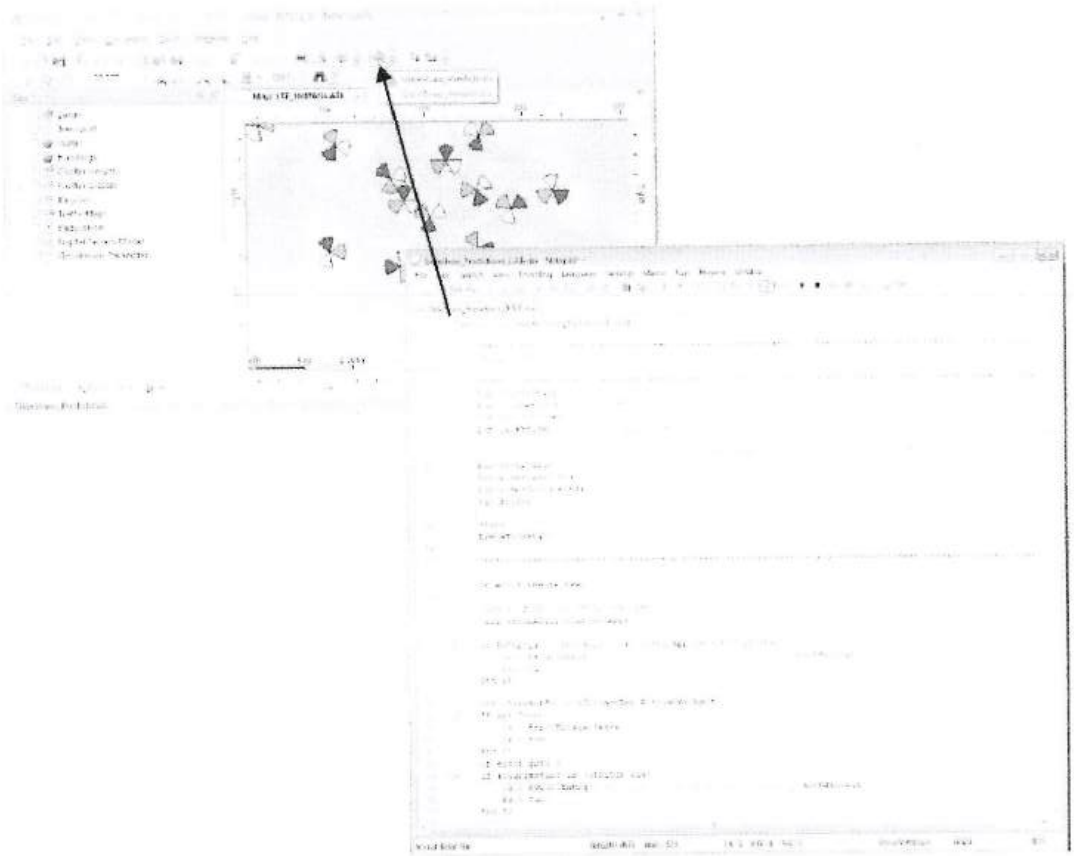


Рис. 3.4. Відкрита платформа, що надає послуги автоматизації та обміну даними

Звітність (рис. 3.5):

- Гнучкий генератор звітів;
- Визначені користувачем звіти на основі макросів;
- Експорт спеціальних звітів у стандартні формати.

Керування користувачами та базами даних:

- Розширений модуль адміністрування, що підтримує доступ до даних і керування привілеями користувачів (рис. 3.7);
- Гнучка структура бази даних, що дозволяє інтегрувати визначені користувачем параметри та спеціальні поля (рис. 3.6);
- Багатокористувацька підтримка, включаючи керування узгодженістю бази даних, синхронізацію даних і відключення/повторне підключення користувача до/від бази даних;
- Підтримка автономних, централізованих, розподілених конфігурацій;

- Розширені функції імпорту/експорту, що дозволяють швидко переміщувати дані з іншого програмного забезпечення для радіопланування.

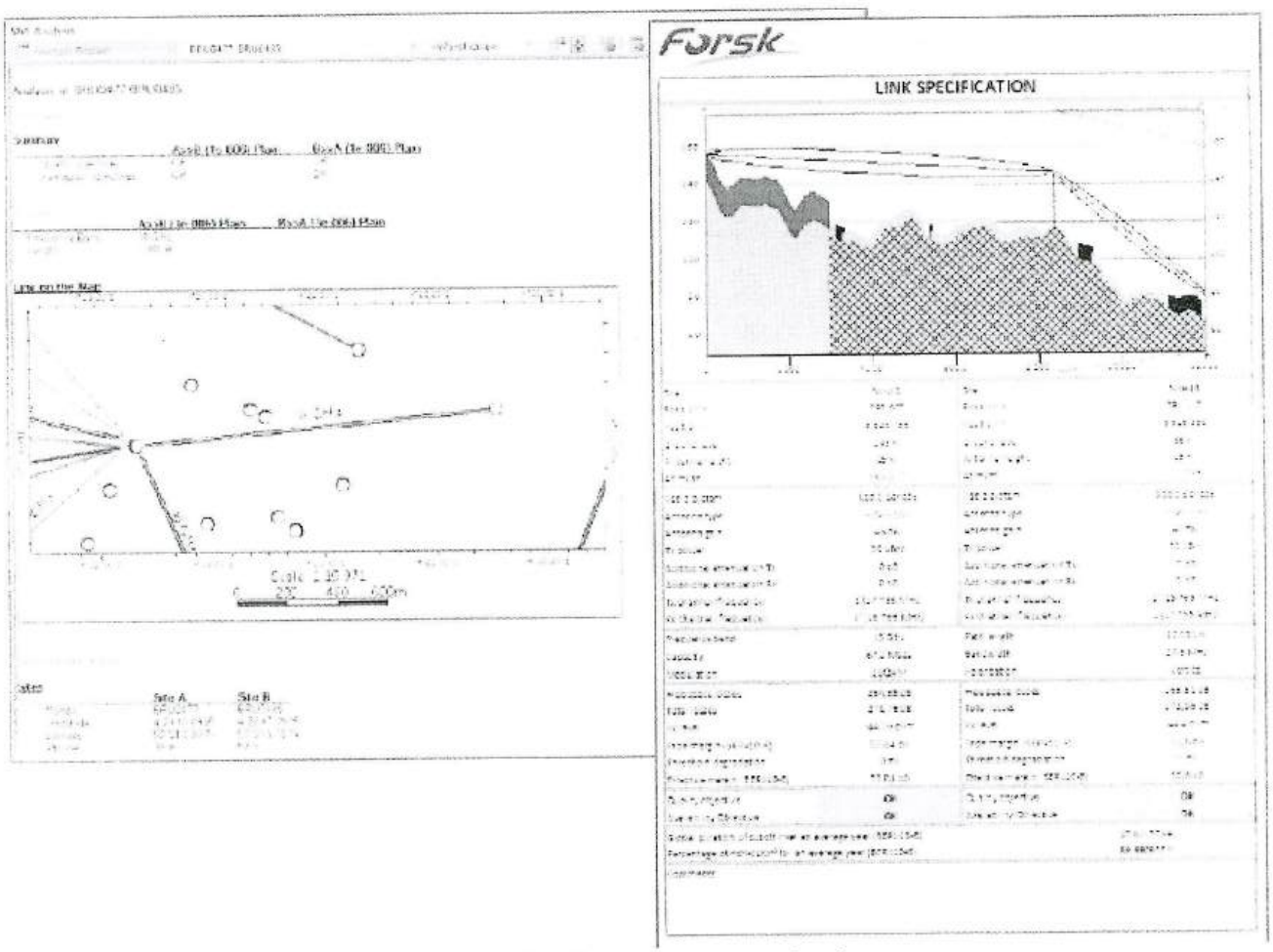


Рис. 3.5. Комплексна звітність

Моделювання зв'язку:

- Підтримка зв'язку точка-точка і точка-багато точок;
- Моделювання каналів LoS/nLoS/NLoS з використанням радіо, мікрохвильових та міліметрових частот, а також технологій дротової передачі (оптичні, мідні канали зв'язку тощо);
- Підтримка стандарту ITU та визначених користувачем діапазонів частот, конфігурацій високого та низького рівня та планів каналізації;
- Моделювання мікрохвильового радіо та обладнання: параметри постачальника, IRF, сигнатури тощо (рис. 3.8);

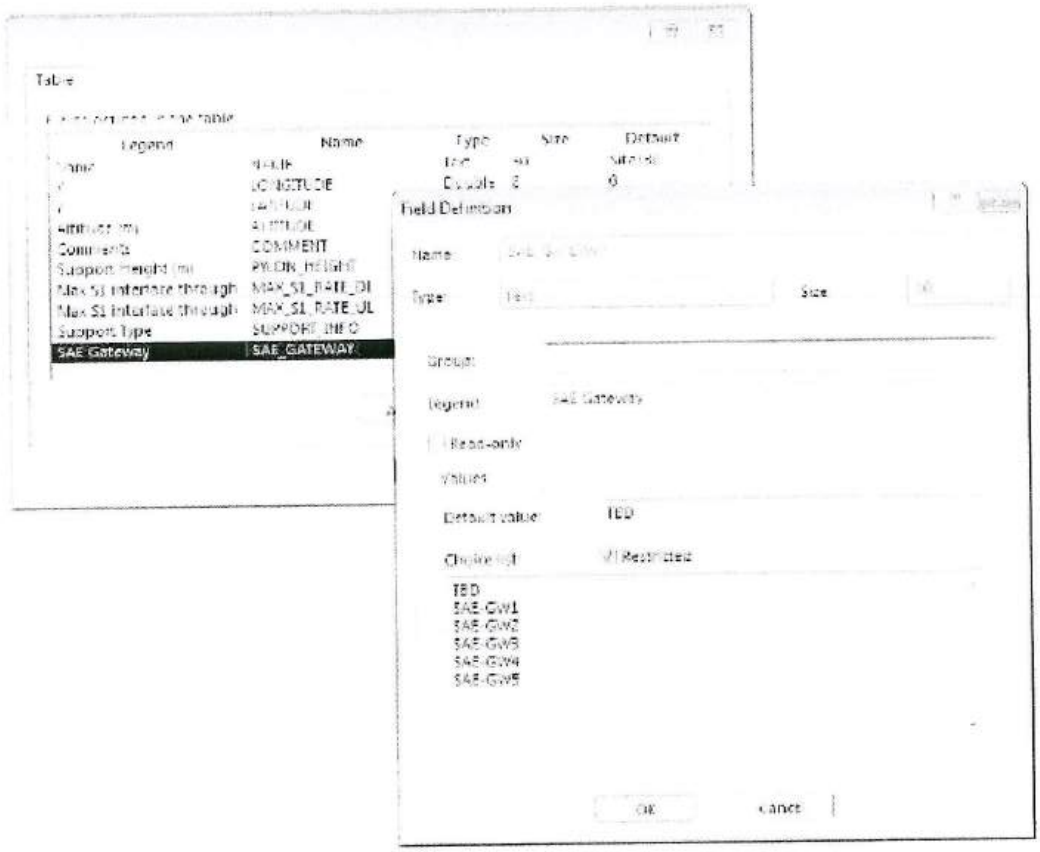


Рис. 3.6. Розширена архітектура бази даних

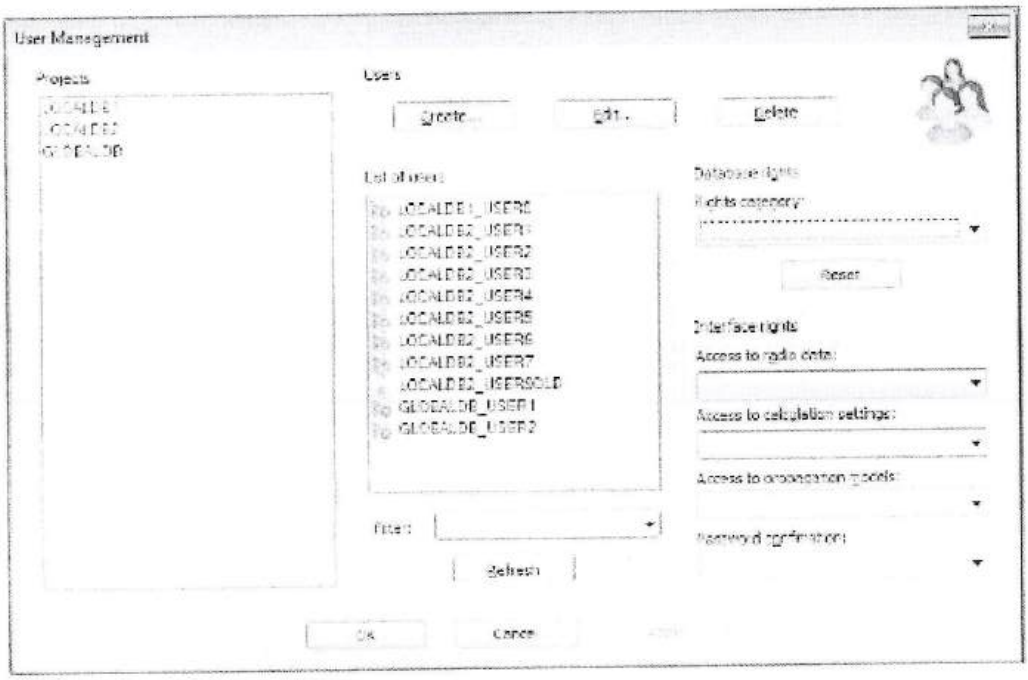


Рис. 3.7. Керування користувачами

- Моделювання антени: параметри постачальника, включаючи спільну та перехресну поляризацію, обтічники тощо;

- Підтримка ретрансляторів;
- Підтримка просторового та частотного рознесення;
- Підтримка подвійної поляризації;
- Підтримка ATPC;
- Підтримка адаптивної модуляції;
- Підтримка каналів V-Band і E-Band.

Дизайн зв'язку (рис. 3.9):

- Графіки видимості LoS;
- Графіки покриття NLoS і аналіз багатопроменевості;
- Аналіз профілю траєкторії, включаючи кліренс зони Френеля з кількома факторами K;
- Аналіз профілю зазору зони Френеля на горизонтальній площині;
- Розповсюдження та аналіз бюджету каналів;
- Автоматична оптимізація висоти антени;
- Аналіз точки відбиття та дизайн повторювача;
- Правила проектування зв'язку для найкращого призначення смуги частот;
- Посилання помічника з дизайну для вирішення питань планування.

Цілі щодо якості та доступності:

- Цільові показники на основі рекомендацій ITU G-821, G-826 і G-828;
- Цілі продуктивності для IP-каналів на основі рекомендацій ITU-T Y.1541;
- Визначені користувачем ціль і параметри продуктивності.

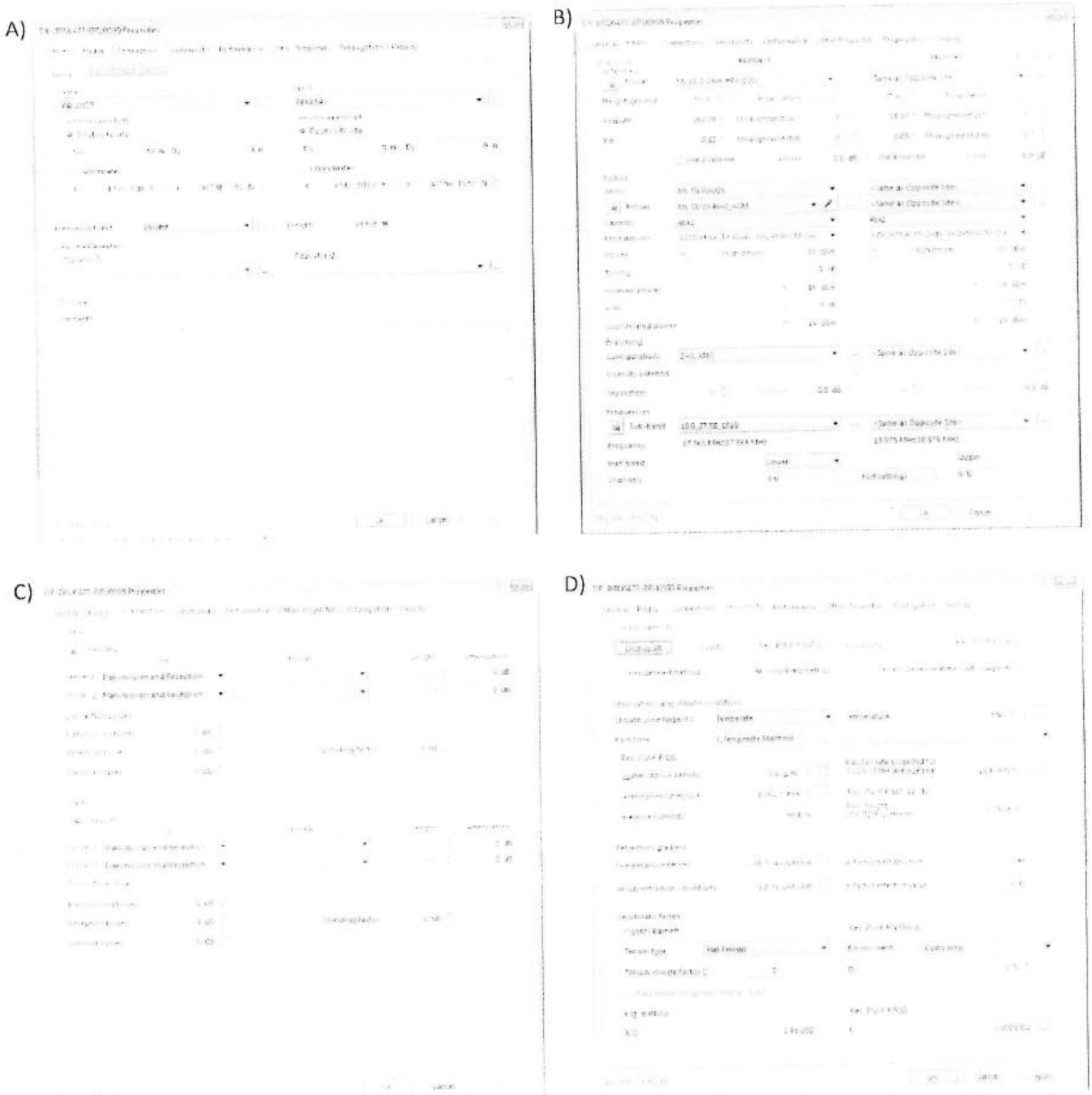


Рис. 3.8. Параметри мікрохвильової лінії: A) установчі параметри, B) радіо параметри, C) параметри фідерів, D) параметри розповсюдження

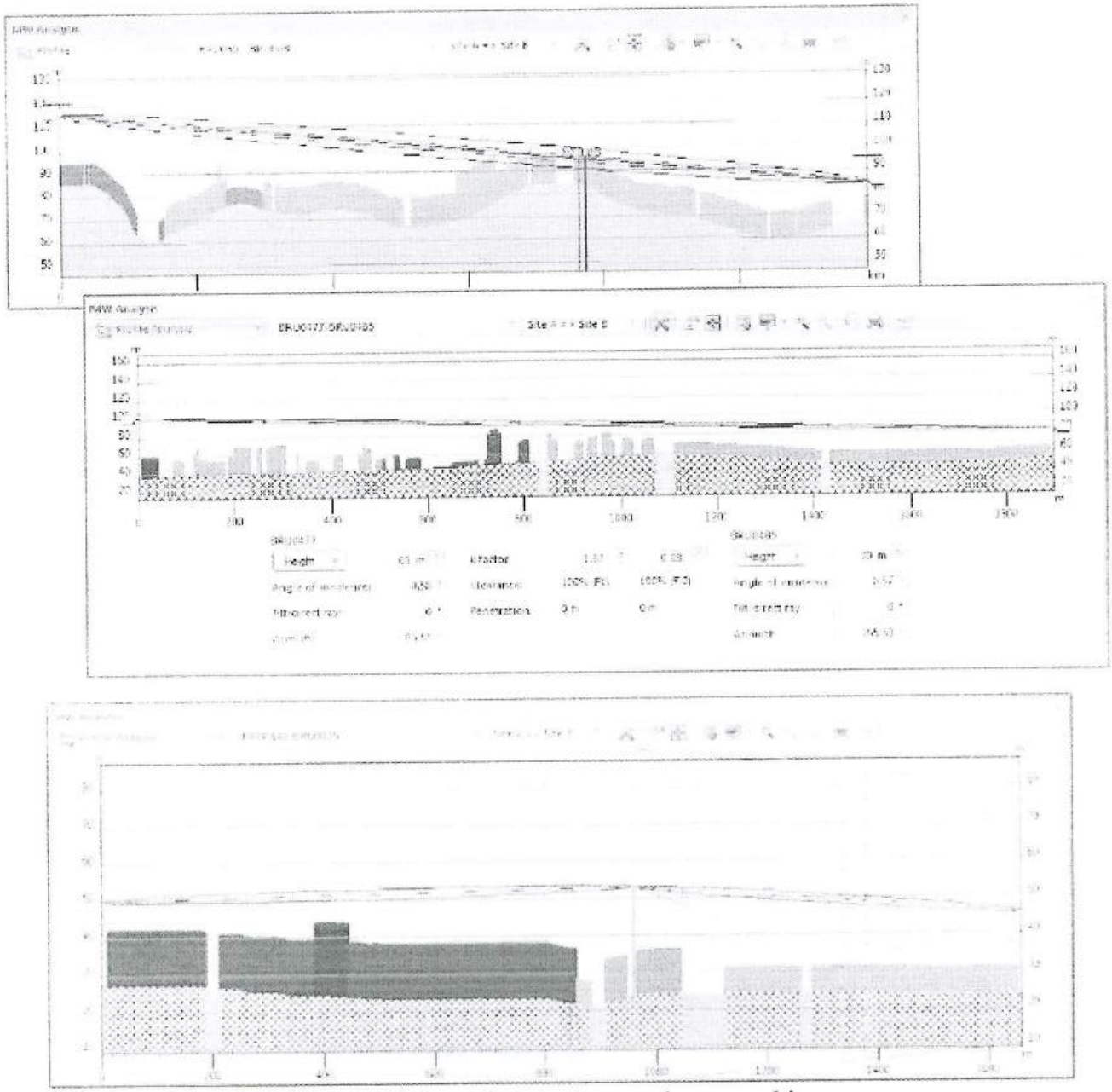


Рис. 3.9. Графіки видимості та профілю

Аналіз продуктивності зв'язку:

- Базується на рекомендаціях ITU-R P.530 до 530-16;
- Підтримка моделей Crane, Vigants і K-Q;
- Визначені користувачем і стандартні ITU геокліматичні параметри;
- Визначаються користувачем звіти, включаючи багатопроменевість, дощ і затухання перешкод;
- Модель розповсюдження, яку визначає користувач;
- Наскрізний аналіз каналу з кількома переходами.

Аналіз перешкод і частотне планування (рис. 3.10 – 3.12):

- Базується на рекомендації ITU-R 452-16 та попередніх версіях;
- Детальний аналіз перешкод, включаючи рейтинг завад;
- Інтерактивне автоматичне розподілення каналів за посиланнями;
- Аналіз конфліктів високого/низького рівня;
- Інтеграція впливу перешкод у звіт про надійність зв'язку;
- Оцінка якості зв'язку порівняно з цілями продуктивності.

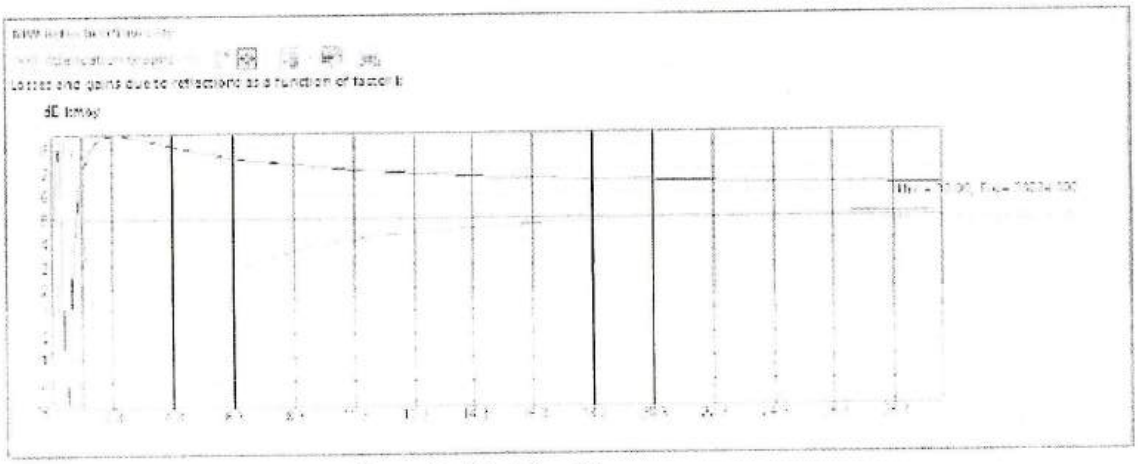


Рис. 3.10. Графік затухання

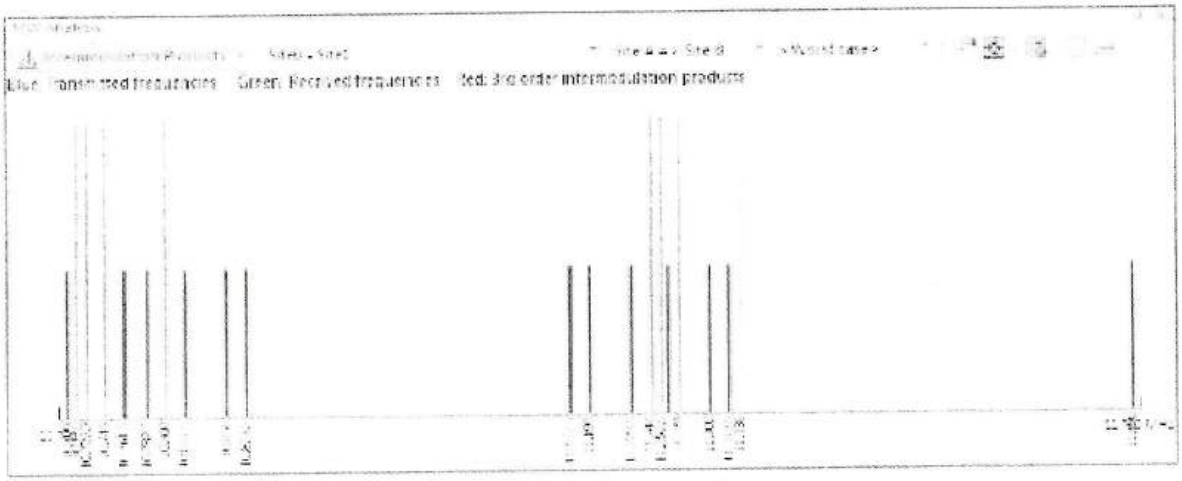


Рис. 3.11. Аналіз інтермодуляційних перешкод

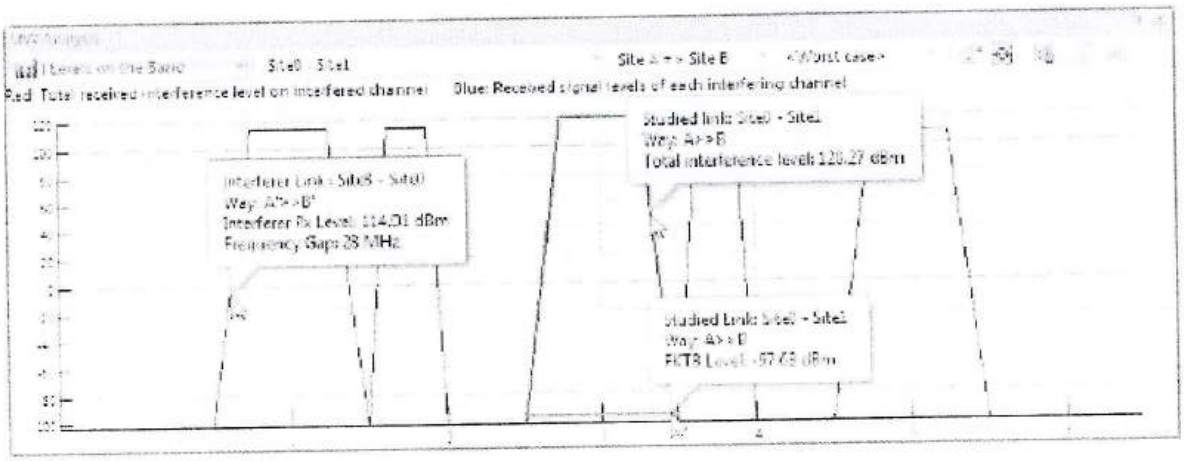


Рис. 3.12. Графік рівнів інтерференції

Планування мережі точка-багато точок (рис. 3.13 – 3.14):

- Моделювання концентраторів і терміналів PtMP;
- Прогнозування покриття хабу;
- Аналіз зв'язку концентратор-термінал.

Планування пропускної здатності транспортного зв'язку (рис. 3.15 – 3.16):

- Моделювання топологій транзитних мереж і маршрутизації трафіку;
- Планування пропускної здатності мережі зворотного зв'язку та визначення її розмірів;
- Аналіз та аудит сценаріїв відмови.

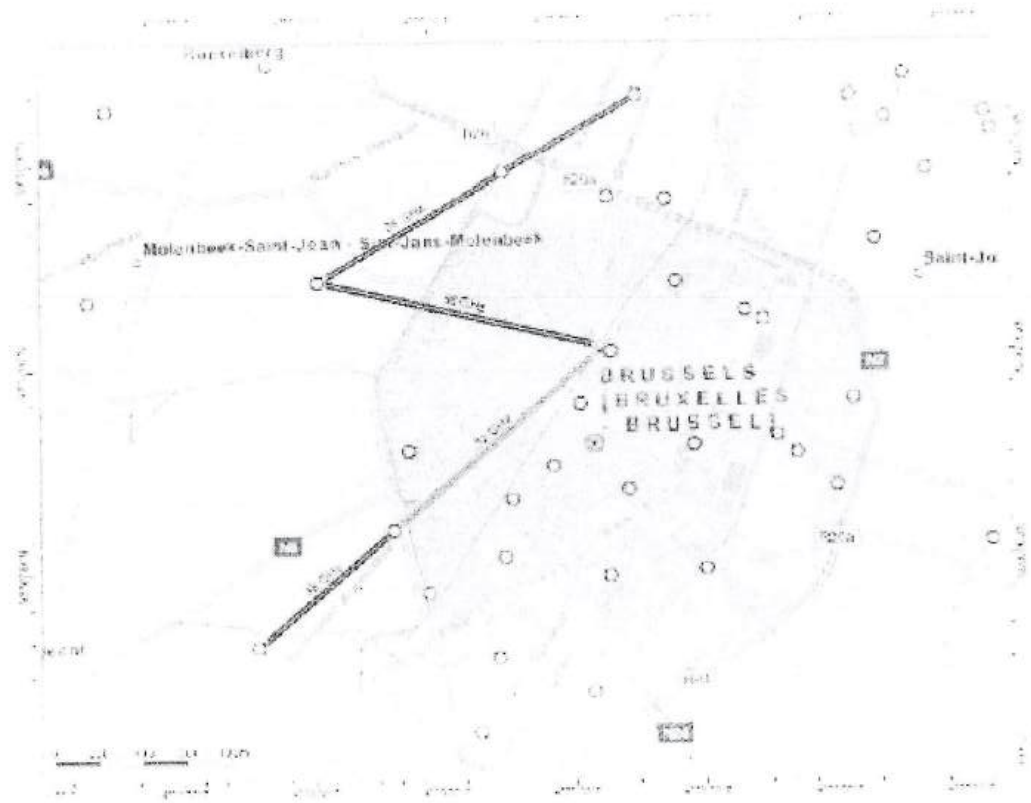


Рис. 3.13. Планування мережі точка-точка

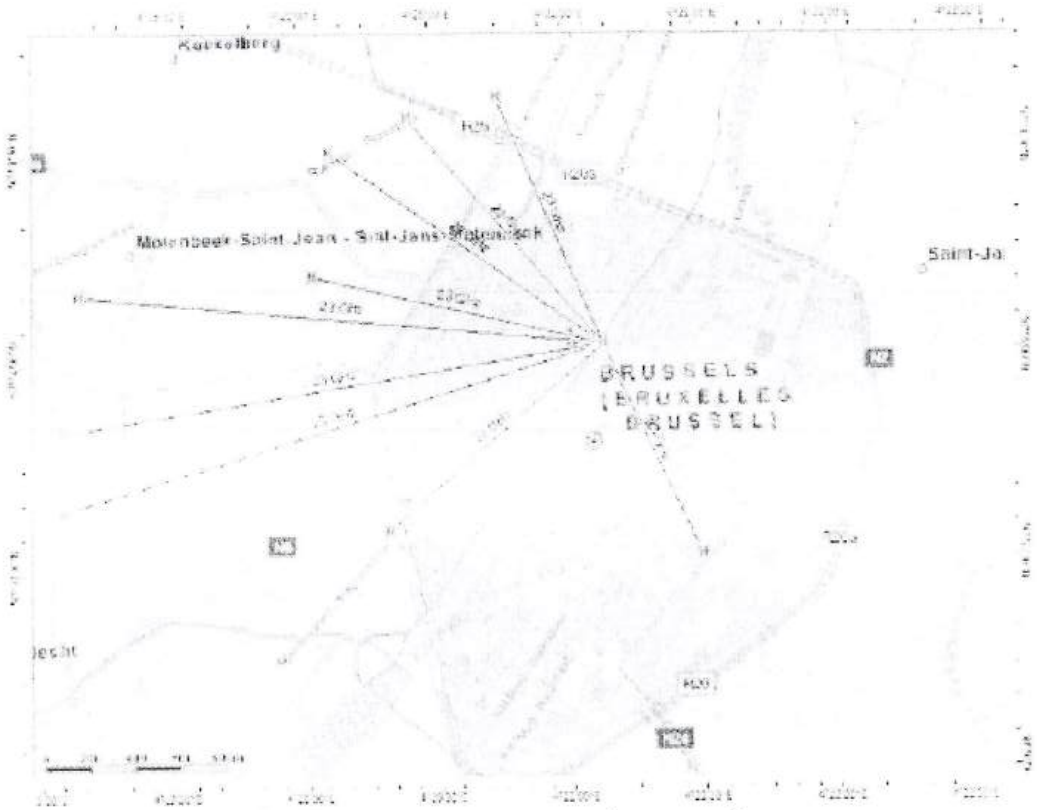


Рис. 3.14. Планування мережі точка-багато точок

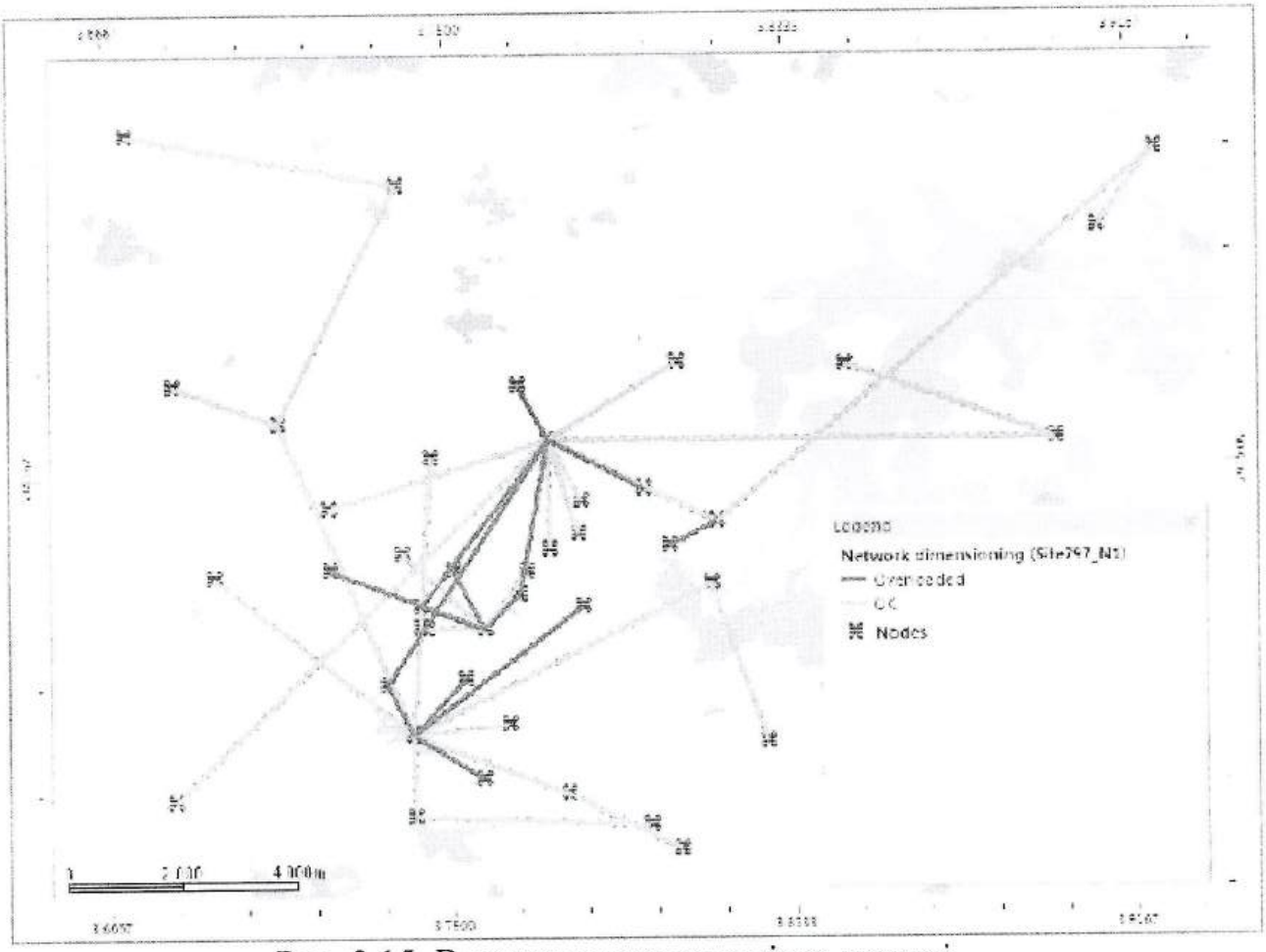


Рис. 3.15. Виявлення вузьких місць мережі

Network dimensioning

ID	Status	TDM Bandwidth (Mbps)	Ethernet Bandwidth (Mbps)	Source Node	Destination Node	Aggregate TDM Traffic (Mbps)	Aggregate UL Ethernet Traffic (Mbps)	Aggregate DL Ethernet Traffic (Mbps)	Booking Factors for UL Ethernet (%)	Booking Factors for DL Ethernet (%)	TDM Traffic Load (%)	UL Ethernet Traffic Load (%)	DL Ethernet Traffic Load (%)
1	OK	44	0	Site1372_NE	Site640_NE	4.096	20	20	100	100	9.31	10	10
2	OK	50	100	Site672_NE	Site550_NE	4.096	20	20	100	100	8.19	10	10
3	OK	50	100	Site684_NE	Site551_NE	4.096	20	20	100	100	8.19	10	10
4	OK	50	100	Site558_NE	Site557_NE	8.192	40	40	100	100	16.38	20	20
5	OK	50	100	Site556_NE	Site552_NE	4.096	20	20	100	100	8.19	10	10
6	OK	50	100	Site552_NE	Site558_NE	4.096	20	20	100	100	8.19	10	10
7	OK	50	100	Site558_NE	Site552_NE	8.192	40	40	100	100	16.38	20	20
8	OK	50	100	Site729_NE	Site552_NE	4.096	20	20	100	100	8.19	10	10
9	OK	50	100	Site788_NE	Site796_NE	4.096	20	20	100	100	8.19	10	10
10	OK	50	100	Site796_NE	Site552_NE	8.192	40	40	100	100	16.38	20	20
11	OK	50	100	Site827_NE	Site707_NE	4.096	20	20	100	100	8.19	10	10
12	OK	50	100	Site670_NE	Site740_NE	8.192	40	40	100	100	16.38	20	20
13	OK	50	100	Site684_NE	Site640_NE	4.096	20	20	100	100	8.19	10	10
14	OK	50	100	Site684_NE	Site640_NE	16.384	80	80	100	100	32.77	40	40
15	OK	44	0	Site640_NE	Site640_NE	4.096	20	20	100	100	9.31	10	10
16	OK	44	0	Site682_NE	Site552_NE	4.096	20	20	100	100	9.31	10	10
17	OK	44	0	Site3680_NE	Site552_NE	4.096	20	20	100	100	9.31	10	10

Рис. 3.16. Звіт пропускної здатності

Дані функції та інструменти зазначені в джерелах [21], [22].

3.2 Особливості планування та оптимізації радіорелейних систем у мережах мобільного зв'язку з використанням ПАК Атолл

Визначення методів оптимізації на основі показників в Atoll

1. Частотне планування радіорелейних каналів.

Одним із перших та найважливіший параметрів який вибирають при проєктуванні та розрахунку характеристик радіорелейного зв'язку, є робочий частотний діапазон. До факторів які впливають на вибір частоти є протяжність ділянки радіорелейного зв'язку, кліматичні умови та наявність ліцензії в оператора.

Для продуктивного використання спектру, частотні діапазони радіорелейних систем, розділяються на частотні канали з певною шириною

В рекомендаціях ITU-R серії F прописані правила використання частотних каналів в залежності від частотного діапазону, частотного рознесення між передавальним обладнанням на двох кінцях прольоту та ширини частотного каналу.

В Atoll заведені дані рекомендації та частотні канали (рис. 3.17), які автоматично використовуються при прорахунках мережі РРЛ.

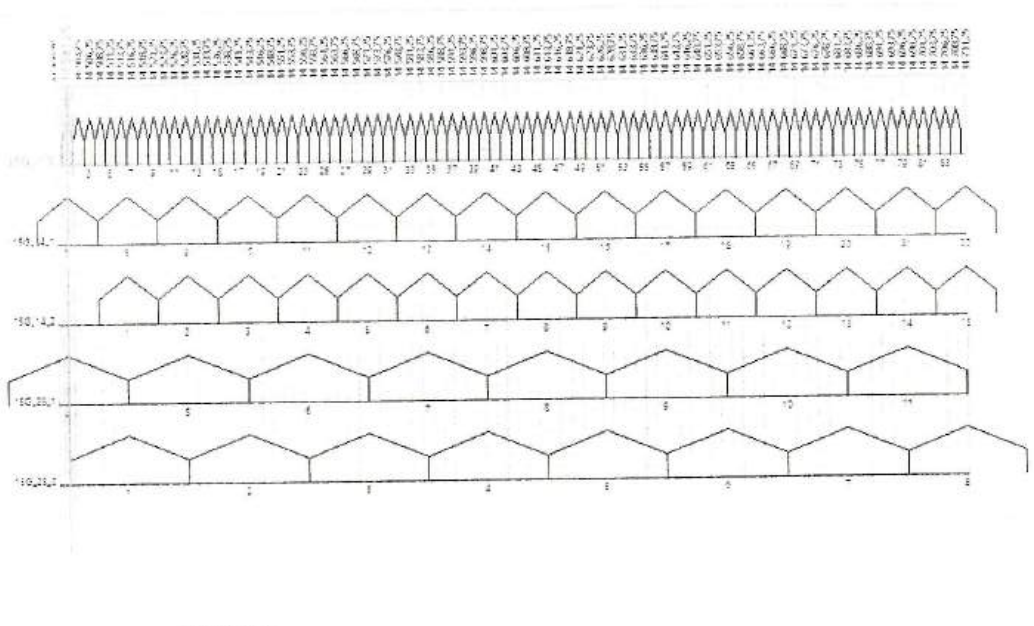


Рис. 3.17. Частотний план 15GHz діапазону в інтерфейсі Atoll

Треба зазначити, що на ділянках мережі за містом, які мають довгу відстань, доцільно використовувати низький спектр частот, а на коротких ділянках, наприклад, в міській місцевості – високий.

2. Інтерференція.

Невідкладним фактором якості мережі РРЛ, який використовується при прорахунках є інтерференція.

Про виборі частотних каналів радіорелейних прольотів потрібно враховувати такі чинники які можуть спричиняти інтерференційні перешкоди: вплив віддаленої іншої радіорелейної лінії зв'язку; сигнали від сусідніх радіорелейних прольотів, що відбиваються від атмосфери, поверхні Землі в бік приймача; відбиття переданого сигналу на власний приймач; інтерференція яка виникла в результаті деполяризації переданого сигналу; вплив передавача на віддалений приймач якщо вони знаходяться один за одним, або кут направленості є невеликим відносно іншого передавача.

У разі коректно спланованої топології та відповідних умов місцевості можна застосувати зміну поляризації антени та радіомодулів на сусідніх прольотах замість використання додаткових частотних каналів. Якщо зміна характеристик обладнання для каналів є недостатнім для зменшення рівня інтерференції до прийнятної величини, необхідно використовувати додатковий спектр частот.

Atoll дозволяє прораховувати рівні інтерференції для кожної поляризації відносно обраного прольоту та виводити дані щодо рівня завади та її джерела.

3. Профіль видимості.

Серед чинників які можуть впливати на профіль видимості та перешкод в зоні Френеля основного пелюстка є форма рельєфу, лісосмуги, нове будівництво на прольоті антен. Дані умови можуть по різному впливати на поширення сигналу, наприклад, створюючи заваду що призводить до погіршення потужності прийому, або втрати кадрів, через незбалансовані рівні RSSI та SINR. Є кілька методів покращення профілю видимості: зміна висоти підвісу антени, регулюючи висоту можна оминути завади, в основному встановити антену вище, якщо цьому дозволяє висота щогли; зміна розмірів антени, якщо встановити антену більшого діаметру

матимемо збільшення коефіцієнту посилення що компенсує втрати, якщо меншу, то матимемо більш вузький умовний еліпс основного пелюстка зони Френеля, даний метод підходить якщо цьому дозволяє відстань та затухання в атмосфері; пошук потенційних сайтів, де умови поширення є кращими, в результаті даний метод приводить до перепроєктування та додаткових витрат оператора; використання репітерів. Описані методи направлені на фізичну заміну обладнання, тому при побудові нових ліній зв'язку, потрібно враховувати профіль видимості та звіти TSSR.

Дослідження профілю видимості можна аналізувати за допомогою інструменту в Atoll – «Terrain section». Функціонал дозволяє провести пряму лінію між двома точками (сайтами), щоб впевнитися у відсутності перешкод та завад поширенню сигналу.

4. Рівень прийому.

Рівень прийнятого сигналу повинен бути таким, щоб забезпечити коректне розпізнавання даних та уникнення бітових помилок. Кращими рівнями потужності прийнятого сигналу є -40dBm. Rx рівень залежить від багатьох факторів: потужність вихідного сигналу, втрати на шляху (затухання в атмосфері, інтерференційні перешкоди), коефіцієнту посилення антени, частоти.

При зміні параметрів РРЛ зв'язку таких як розмір антени, частота або потужність вихідного сигналу потрібно повторно прораховувати рівень прийому.

Atoll дозволяє враховуючі всі фактори розрахувати Rx рівень. Даний параметр знаходиться у вкладці «Analysis report». Оскільки при проєктуванні розмір антени та обраний частотний діапазон стає фіксованим, ми можемо змінити потужність Tx на стільки одиниць, щоб приблизитись до еталонного значення. Додатково, для економії витрат на живлення, слід використовувати адаптивне регулювання потужності.

5. Доступність.

Оператор повинен забезпечувати безперервний зв'язок та надавання послуг. Оскільки ціллю трансмісії є забезпечення зв'язку з RNC та з'єднання базових станцій в єдину мережу, відмовостійкість є в пріоритеті. Наразі мережа вимагає

99,999% доступності для різних умов місцевості. Atoll дозволяє розрахувати приблизну доступність для різних умов, будь то кліматичні умови, або фізичні несправності на обладнанні. Дані можна відслідковувати у вкладці «Analysis report». Для збільшення відмовостійкості можна використовувати такі методи як: резервування каналів або використання Multi-band. При конфігурації резервування каналів оператор витрачає додаткове обладнання або частотний ресурс. Використовуючи Multi-band застосовується багатодіапазонна антена, що призводить до мінімізації витрат. Але при використання багатодіапазонної антени потрібно проводити ретельне юстування прольоту та використовувати обладнання перевірених постачальників, оскільки відхилення кута направленості, або брак антени, може призвести до небажаних наслідків. Додатково, для підвищення надійності та передачі високо-пріоритетного трафіку, слід використовувати адаптивну модуляцію та QoS.

6. Ємність та швидкість передачі даних.

Попри параметри надійності та розповсюдження сигналу, транзитний зв'язок повинен бути високошвидкісним та масштабованим. Для цього необхідно забезпечити високу ємність, модуляцію та частоту. Частотний розподіл відіграє невідкладну роль у визначенні швидкості передачі: використовуючи більший діапазон, ми можемо передавати дані з більш високою швидкістю. Також доцільно використовувати обладнання яке підтримує більшу модуляцію. Це дозволяє передавати більшу кількість бітів. Але сигнал високої модуляції піддається дії завад і шумів, що призводить до його спотворення. Тому доцільно використовувати високі частоти та модуляцію на короткі відстані, тобто в умовах міської забудови. Atoll підтримує конфігурації сучасного обладнання та частотні канали V, E діапазонів.

Додатково для збільшення ємності системи можна використовувати деякі методи, а саме: CCDP (XPIC) з двополяризаційною антеною, агрегація та об'єднання каналів, MLHC, MIMO, M-IFD. Такі методи як XPIC та MIMO інтегровані в Atoll та з легкістю проєктуються в топологію.

В роботі розглянуто ділянку транспортної мережі мобільного оператора зв'язку в умовах міської забудови. На основі показників мережі в системах моніторингу та проведеного аналізу в Atoll, було оптимізовано та підготовлено спеціальні звіти (рис. 3.19) до роботи підрядних організацій. Топологія представлена на рисунку 3.18..



Рис. 3.18. Топологія мережі РРЛ

Link	
Link ID	SITE_N1 - SITE_N2
Link Modified Date	9/27/2021 11:22:36 PM
User Modified	UBATUR
Length (m)	14,937.29 m
Main Band	7 GHz
Main Channel	A28M[-]4
Main Capacity	204 Mbps
Main Polarisation	Vertical

Linkend	End A	End B
Main Centre Frequency (GHz)	7,222.5	7,383.5
Main Frequency Designation	Lower	Upper
RAU Index	RAU2 X 7/34	RAU2 X 7/38
Property ID	SITE_N1	SITE_N2
Property Latitude	50.*****	50.*****
Property Longitude	30.*****	30.*****
Main Antenna Type	E07G0.6mHP	E07G1.2mHP
Main Antenna Size (m)	0.6 m	1.2 m
Main Antenna Height (m)	42 m	45 m
Main Antenna Ground Height (m)	187 m	180 m
Main Antenna Direction (°)	240.06 °	59.92 °
Main Antenna Tilt (°)	-0.08 °	-0.05 °
Main Radio Type	MLTN 07G/28MHz 512QAM Adaptive 204 Mbps	MLTN 07G/28MHz 512QAM Adaptive 204 Mbps
Main Max Tx Power (dBm)	24 dBm	24 dBm
Radio ID		

Performance	End A	End B
Rx Level (dBm)	-40.21 dBm	-40.41 dBm
Flat Fade Margin (dB)	24.79 dB	24.59 dB
Annual Availability (%)	99.99921 %	99.99921 %

Flag Data	
PtP Status	TD1
PtP NearEnd SiteID	SITE_N1
PtP Vendor	Ericsson
PtP Region	Region
PtP Actual State	Not Working

Рис. 3.19. Дані конфігурацій для будівництва РРЛ

При аналізі та визначення методів оптимізації в роботі керувався описом інструментів в [23] та рекомендаціями, які описані в роботах [24], [25]

ВИСНОВКИ

У ході написання атестаційної магістерської роботи було виконано поставлені задачі і досягнуто мети.

У межах першого розділу розглянуто конструкцію та обладнання сучасної мережі радіорелейного зв'язку на прикладі продуктів компанії Ericsson. Дані комплекси забезпечать високошвидкісний та якісний зв'язок завдяки високій ємності, підтримки модуляції 8192 QAM та високочастотного спектру. Також наведено статистичні прогнози приросту трафіку. Глобальний трафік мобільних даних подвоївся за останні два роки завдяки постійному зростанню використання смартфонів, мобільного широкосмугового зв'язку та цифровізації суспільств і галузей. В цьому розділі представлено задачі та основні вимоги мереж РРЛ.

У другому розділі наведено методи надійності та ефективності, які використовуються при плануванні та оптимізації мереж РРЛ. Серед таких методів є резервація каналів, ACM, ATPC, TAPS, XPIC та перспективні методи: використання E-Band, V-Band, Radio Link Bonding / Aggregation, Multi-Band, MIMO, MLHC, M-IFD. Дані методи дозволяють відповідати вимогам сучасних мереж РРЛ а саме: підвищувати доступність, забезпечувати високошвидкісний зв'язок з низькою затримкою, забезпечувати стійкість до атмосферних завмирань та інтерференційних перешкод, збільшувати ємність каналу та можливість передавати сигнали в умовах LOS/NLOS.

У третьому розділі спланована ділянку транспортної мережі оператора мобільного зв'язку та проведено аналіз радіорелейних ліній за допомогою інструментів програмного комплексу Atoll. На основі показників, реалізовані методи покращення окремих транзитних вузлів передачі даних.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ericsson MINI-LINK: Driving microwave transmission in mobile telecommunication networks. [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://www.carritech.com/news/ericsson-mini-link-transmission-networks/ (дата звернення 04.10.2023р.).

2. Ericsson Mobility Report [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://www.ericsson.com/4ae28d/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2022/ericsson-mobility-report-november-2022.pdf (дата звернення 08.10.2023р.).

3. Renato Lombardi. Microwave and Millimetrewave for 5G Transport, 2018.

4. Microwave Transport Will Continue to Play an Important Role in 5G [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://carrier.huawei.com/en/hottechnology/5g/ microwave-transport-will-continue-to-play-an-important-role-in-5g (дата звернення 08.10.2023р.).

5. Microwave backhaul evolution – reaching beyond 100GHz [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/ericsson-technology-review/articles/microwave-backhaul-evolution-reaching-beyond-100ghz (дата звернення 08.10.2023р.).

6. Adaptive Coding and Modulation (ACM) in Microwave Communications. [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://blog.saftehnika.com/en/ whitepapers/adaptive-coding-and-modulation-in-microwave-communications/ (дата звернення 08.10.2023р.).

7. Ceragon Adaptive Modulation Tx Power Optimization – technical Brief [Електронний ресурс]//–Режимдоступу: http://www.pexx.net/pdfs/techbriefs/ ceragon/ceragon_adaptive_modulation_tx_power_optimization_technical_brief.pdf (дата звернення 08.10.2023р.).

8. Julius Kusuma, Erik Boch, Philip Liddell. Diffractive NLOS Microwave Backhaul for Rural Connectivity Network as a Service Solution Group, 2021.

9. Mikael Coldrey, Havish Koorapaty, Jan-Erik Berg, Zere Ghebretensaé, Jonas Hansryd, Anders Derneryd and Sorour Falahati. Small-Cell Wireless Backhauling, A Non-Line-of-Sight Approach for Point-to-Point Microwave Links, 2013.

10. Advantages of sub 3 GHz transmission. [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://www.4rf.com/assets/documents/Aprisa%20XE%20Technical%20Paper%20-20Advantages%20of%20sub%203%20GHz%20transmission%20English.pdf (дата звернення 14.10.2023р.).

11. Attenuation by atmospheric gases // Recommendation ITU-R P.676-11. – 2016.

12. Antenna Performance Criteria (Gain and Radiated Efficiency) – Part 1. [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://www.militaryaerospace.com/directory/ blog/14059607/antenna-performance-criteria-gain-and-radiated-efficiency-part-1 (дата звернення 14.10.2023р.).

13. XPIC. [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/XPIC (дата звернення 26.10.2023р.).

14. What is the E Band? [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://www.everythingrf.com/community/e-band (дата звернення 26.10.2023р.).

15. What is the V Band? [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://www.everythingrf.com/community/v-band (дата звернення 26.10.2023р.).

16. Link aggregation in microwave links. [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://blog.saftehnika.com/en/whitepapers/link-aggregation-in-microwave-links/ (дата звернення 04.11.2023р.).

17. Microwave backhaul gets a boost with multiband. [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/ericsson-technology-review/articles/microwave-backhaul-gets-a-boost-with-multiband (дата звернення 04.11.2023р.).

18. Multi-band microwave antennas—A magic bullet for boosting microwave capacity. [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://www.ericsson.com/en/blog/ 2021/12/multi-band-microwave-antennas (дата звернення 10.11.2023р.).

19. Demystifying MIMO for microwave. [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://www.ericsson.com/4aeddb/assets/local/reports-papers/microwave-outlook/2019/demystifying-mimo-for-microwave-article-co-screen.pdf (дата звернення 10.11.2023р.).

20. Microwave In-band Full-duplex doubles microwave capacity. [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://www.huawei.com/en/technology-insights/publications/huawei-tech/76/microwave-in-band-full-duplex-doubles-microwave-capacity (дата звернення 19.11.2023р.).

21. Atoll Microwave. [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://www.forsk.com /atoll-microwave (дата звернення 19.11.2023р.).

22. ATOLL. [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://www.teleres.com.au/ products/network-planning-design/atoll/ (дата звернення 19.11.2023р.).

23. Forsk. Atoll 3.3.2 User Manual for Microwave Networks, 2016.

24. Riviel Ernesto Ríos. Title of the thesis: 5G Network Planning and Optimization Using Atoll, 2019.

25. Harvey Lehpamer. Microwave Transmission Networks: Planning, Design, and Deployment Second Edition, 2017.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Презентація по магістерській роботі на тему:

МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ РРЛ МЕРЕЖІ ОПЕРАТОРА МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ ПАК "ATOLL"

Студент Смілянець Богдан Миколайович

Мета, об'єкт, предмет роботи

- *Об'єкт дослідження* - розроблена мережа РРЛ в умовах міської забудови в програмному комплексі Atoll.
- *Предмет дослідження* - методи оптимізації мережі РРЛ.
- *Метою роботи* є визначення та застосування методів оптимізації мережі РРЛ за допомогою ПАК "Atoll".

Вимоги до РРЛ в мережах майбутнього

- Забезпечення пропускної здатності до 10 Гбіт/с;
- Забезпечення низької затримки в 25 мкс/базову станцію;
- Гнучка експлуатація та технічне обслуговування;
- Підтримка розподілення пріоритетності трафіку;
- Стикування та плавна еволюція;
- Доступність 99,999% на далекі відстані;
- Передача в умовах прямої та непрямої видимості LOS/NLOS;
- Висока адаптивність до навколишнього середовища;
- Налаштування в один клік;
- Безперебійне з'єднання з оптичною мережею.

Методи оптимізації

Модуляція високого рівня



Адаптивна модуляція



Подвійна поляризація



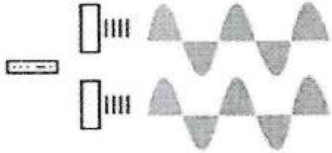
Агрегація (об'єднання) несучих



Широкосмугові канали



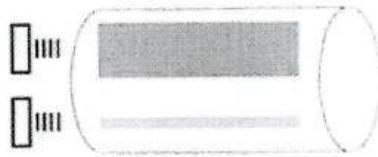
MIMO



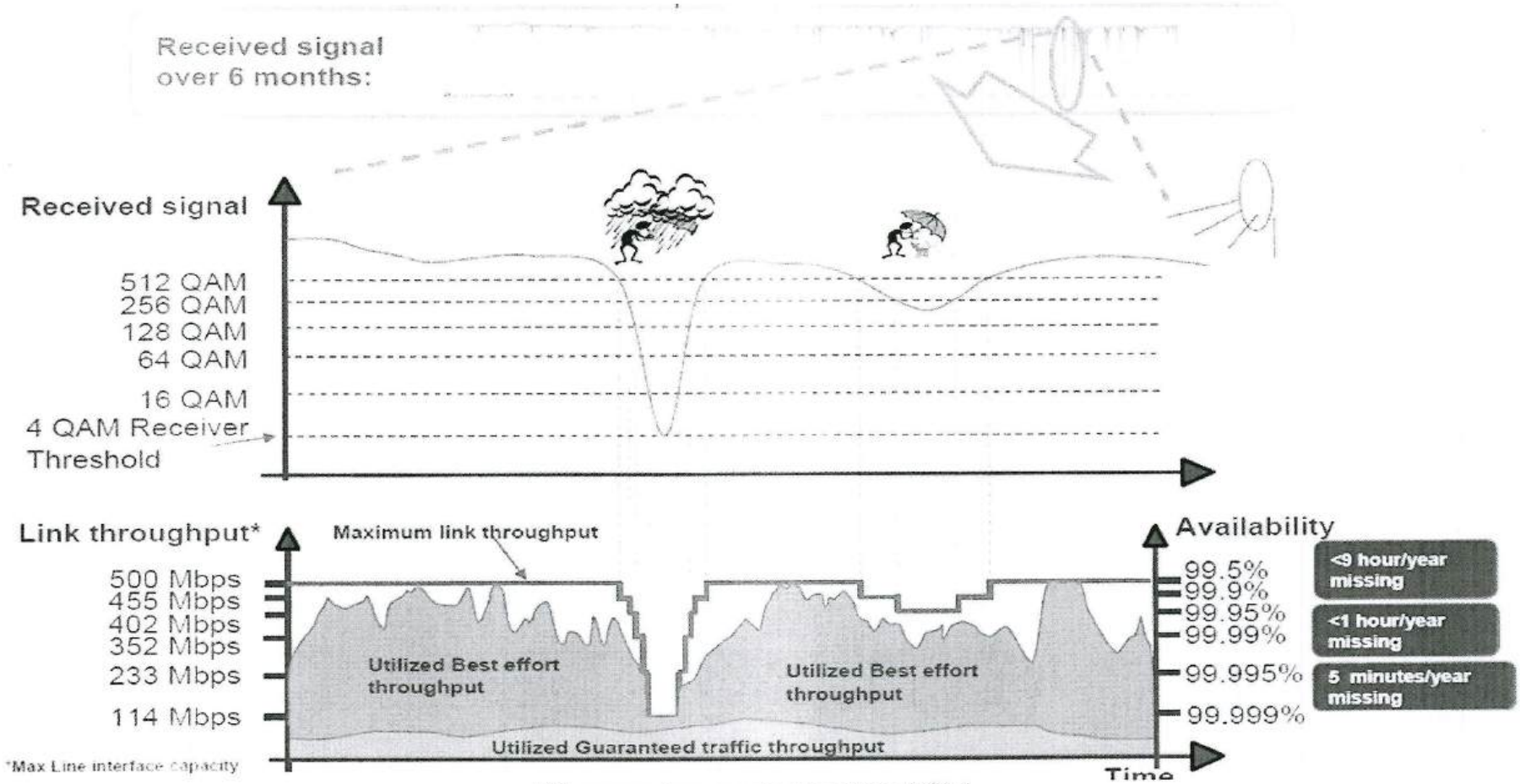
Використання надвисоких частот 60 GHz to 90 GHz



Багатоканальність

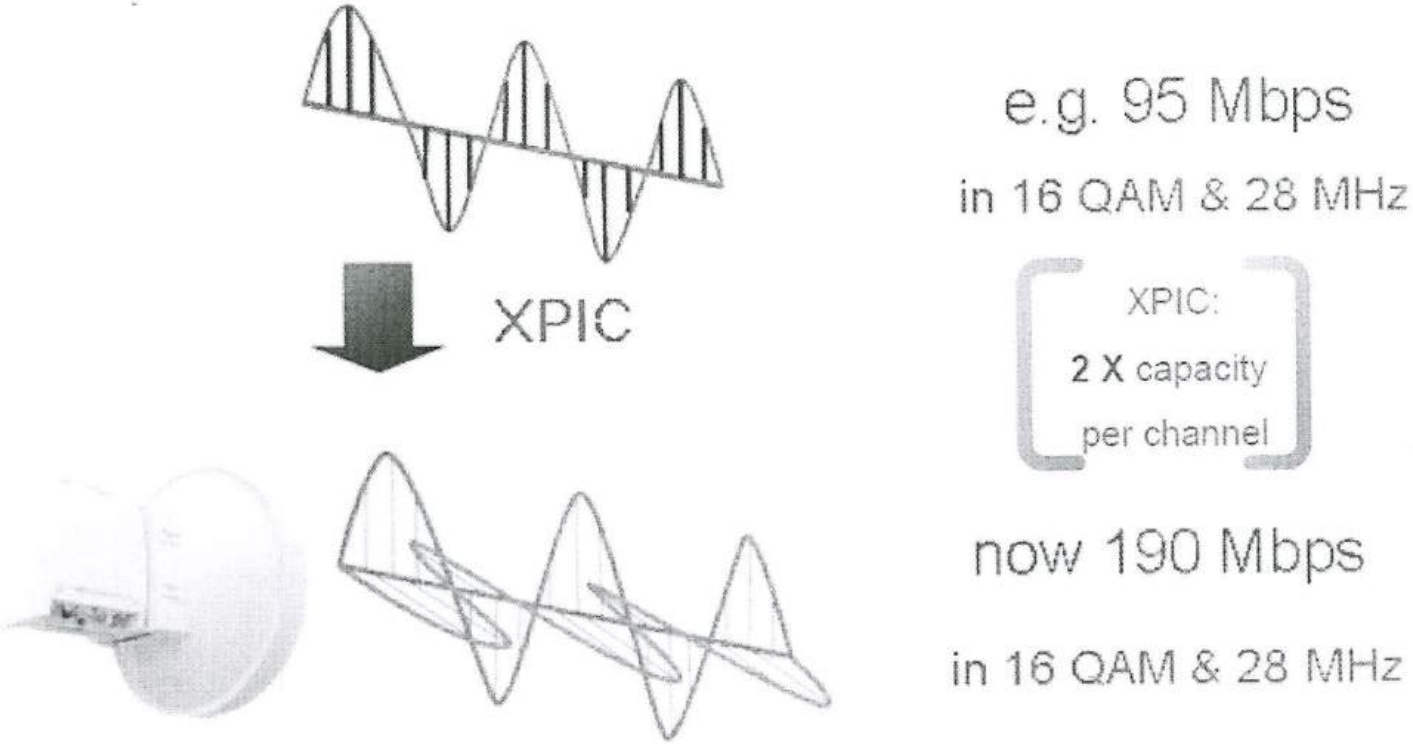


Ефективність використання ACM



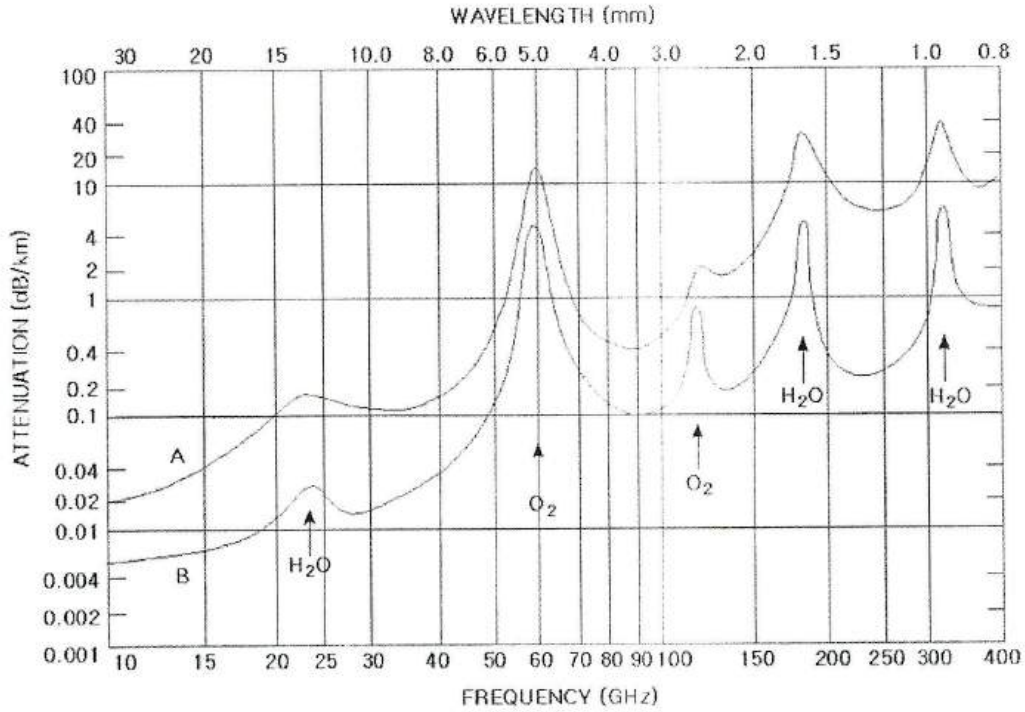
Ефективність використання ACM

Ефективність використання XPIC

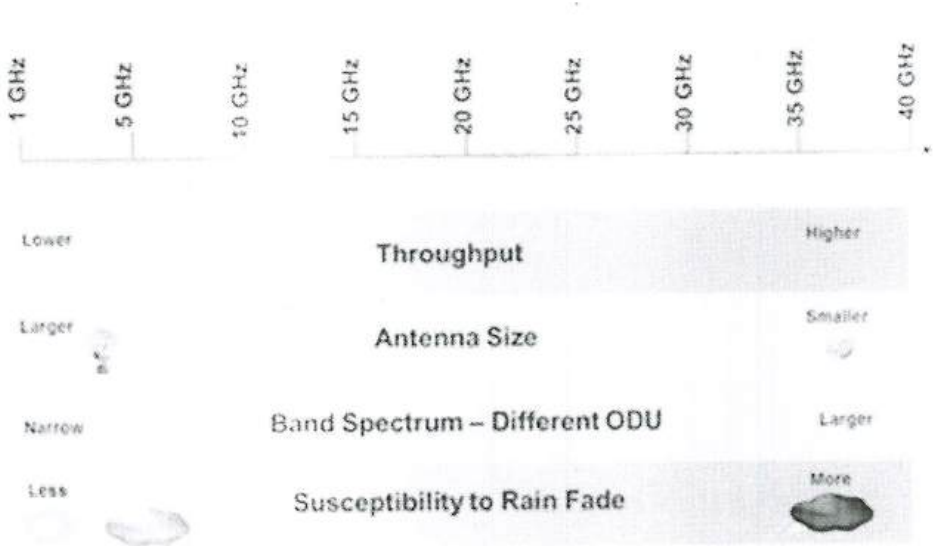


Подвоєння пропускної здатності каналу за допомогою XPIC

Ефективність використання спектру

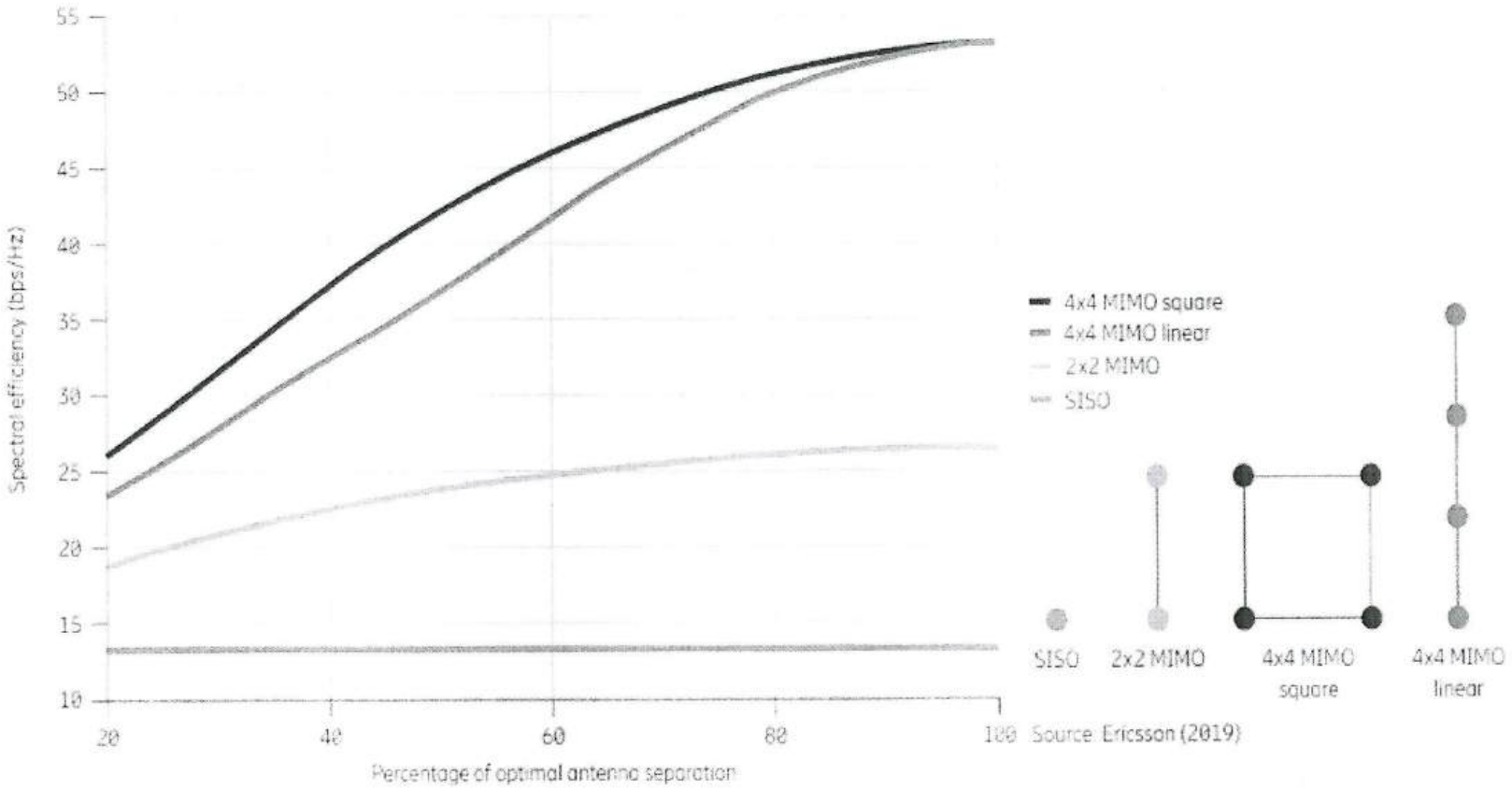


Ослаблення сигналів хвилі відповідно частоті



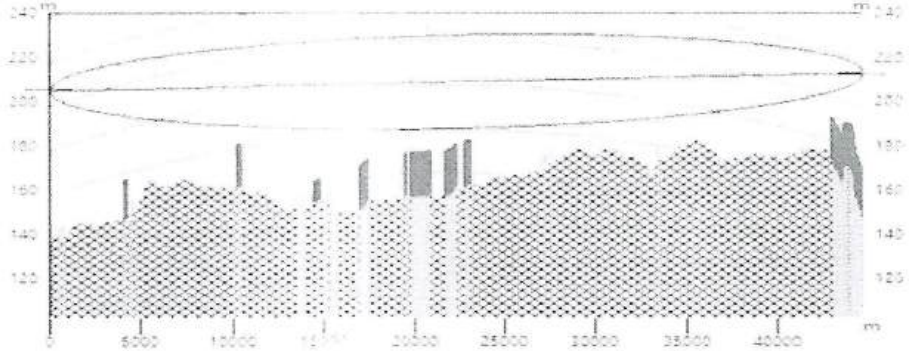
Ефективність використання спектру
в порівнянні з параметрами мережі

Ефективність використання MIMO

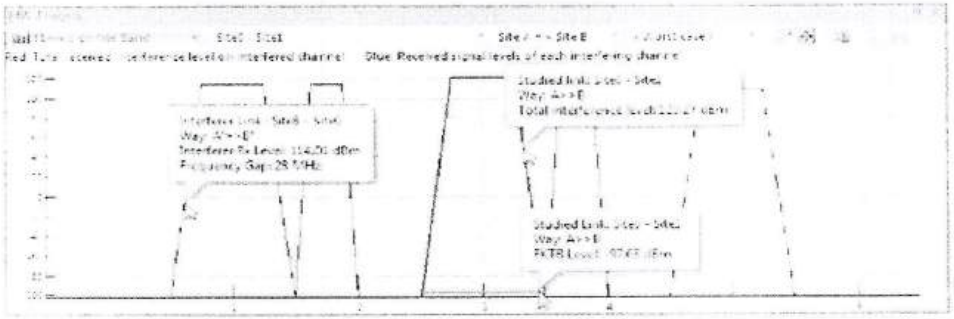


Ємність MIMO в залежності від розташування та кількості антен

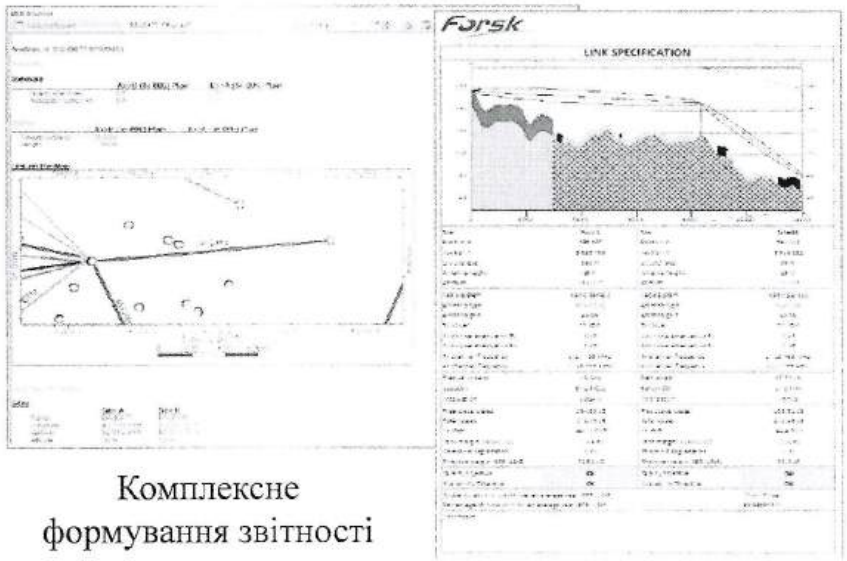
Atoll Microwave



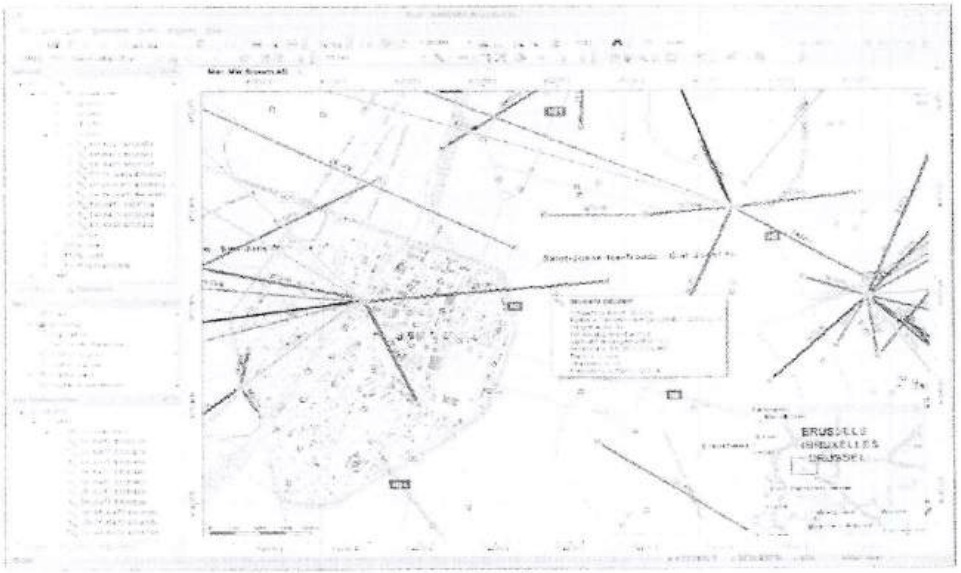
Профіль розповсюдження сигналу



Аналіз інтерференційних завад



Комплексне формування звітності



Карта з функціями геопозиціонування

Ділянка транспортної мережі мобільного оператора зв'язку в умовах міської забудови



Висновки

В магістерській роботі досягнуто наступних результатів:

- Виконано опис конструкції та особливостей сучасного радіорелейного обладнання. Визначено, що лавиноподібне зростання числа користувачів мобільного зв'язку, інтернету речей, мобільного відео та мереж призводить до постійного збільшення мобільного трафіку.
- Описано умови поширення сигналу та їх вплив. Проведено аналіз перспективних методі оптимізації мережі РРЛ.
- В роботі досліджено використання ПАК "Atoll" для створення перспективних мікрохвильових мереж, зазначено функціонал та параметри якості мережі.
- Проведено дослідження топології мережі РРЛ в умовах міської забудови мобільного оператора зв'язку. За допомогою інструментів Atoll визначено методи оптимізації. В результаті, готова мережа, яка представлена в роботі, може забезпечити надійний сервіс та послуги надані постачальником.

Апробація результатів магістерської роботи

Основні результати магістерської роботи доповідалися на Всеукраїнській науково-практичній конференції «Telecommunication: problems and innovation», Київ: ДУІКТ, 20 грудня 2023 р.

Основні наукові результати магістерської роботи опубліковано в науковому журналі “Наукові записки ДУІКТ, – 2023, – №2”.

Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Богдан СМІЛЯНЕЦЬ

Назва: Методи оптимізації роботи РРЛ в умовах міської забудови

Координатор: Андрій ЛЕМЕШКО

Підрозділ: НІІТ

Коефіцієнт подібності 1 :6.8

Коефіцієнт подібності 2 :2.4

Тривога: 9

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

☑ виявлені в роботі запозичення є сумлінними і не мають ознак плагіату. Тому робота визнається самостійною і допускається до захисту;

☐ виявлені в роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання;

☐ виявлені в роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. У зв'язку з чим, робота не допускається до захисту.

....

Дата *Підпис Наукового керівника*