

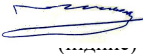
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра акустичних та мультимедійних електронних систем
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК 621.396.1

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

 - С.А. Найда
(ініціали, прізвище)

“7” грудня 2020 р.


Магістерська дисертація

зі спеціальності 171 «Електроніка»
(код і назва)

на тему: «Перспективи впровадження технології 5G в Україні»

Виконав: студент II курсу, групи ДВ-92мп
(шифр групи)

Єфіменко Софія Валеріївна
(прізвище, ім'я, по батькові)


(підпис)

Керівник доцент, к.т.н. Попович П.В.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)


(підпис)


Консультант _____
(науковий ступінь, вчене звання, , прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент доцент кафедри ЕІ, к.т.н., доц. Попов А.О.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)


(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент 
(підпис)

Київ – 2020 року

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу 12-14 слайдів презентації: характеристика роботи, формулювання завдання роботи, загальні характеристики технології 5G NR, безпроводові технології для розгортання мережі 5G, принципи планування мереж 5G NR та порівняння з мережами LTE, розрахунок основних параметрів мережі та моделювання в програмному середовищі Atoll мережі LTE з використанням технологій, що використовуються в мережах 5G, висновки.

7. Орієнтовний перелік публікацій:

8. Консультанти розділів дисертації

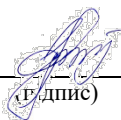
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання 2 жовтня 2019 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Написання першого розділу	20.03.2020	виконано
2	Написання другого розділу	12.06.2020	виконано
3	Написання третього розділу	22.10.2020	виконано
4	Написання четвертого розділу	06.11.2020	виконано
5	Написання п'ятого розділу	20.11.2020	виконано
6	Підготовка матеріалів до друку та оформлення пояснювальної записки	01.12.2020	виконано
7	Підготовка та оформлення презентації для доповіді	04.12.2020	виконано

Студент



(підпис)

С. В. Єфіменко

(ініціали, прізвище)

Керівник роботи



(підпис)

П. В. Попович

(ініціали, прізвище)

УДК 621.396.1

РЕФЕРАТ

Єфіменко С.В. Перспективи впровадження технології 5G в Україні: магістерська дис.: 171 Електроніка. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020, 123 с.

Ключові слова: безпроводова мережа, 5G, New Radio, Massive MIMO, AAS, формування променів, ємність, покриття, планування мереж.

Актуальність роботи. Безпроводові технології стрімко розвиваються і змінюються з кожним роком. Насправді, лише кілька років тому навантаження на мережу були зовсім іншими - без «тонни» відеофайлів, повідомлень і гігантських онлайн-світів. Змінилися не тільки обсяги інформації, але і кількість користувачів – і все це вимагає оновлення мобільних мереж.

Адаптувати можливості мережі під нинішні потреби повинні нові стандарти телекомунікаційних технологій – зараз під них підпадає п'яте покоління мобільних мереж. Саме до нового п'ятого покоління і відноситься технологія 5G NR, здатна зробити інтернет більш доступним, швидким і надійним.

Говорити про швидке впровадження в Україні 5G почали відразу ж після запуску 4G в 2018 році. Пророкували появу наступного покоління зв'язку вже через 2 роки, синхронно з його поширенням в ЄС. Навіть був підписаний відповідний президентський указ з графіком запуску зв'язку п'ятого покоління. Але реалізація планів затягується.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є дослідження технологій 5G та аналіз доцільності впровадження даної технології в Україні. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі *завдання*:

– проаналізувати варіанти використання технологій 5G і особливості їх розгортання;

- дослідити можливості та перешкоди на шляху впровадження технологій п'ятого покоління в Україні;
- порівняти різні типи рішень для різних сценаріїв розгортання 5G;
- дослідити вимоги до планування мережі доступу 5G NR;
- розрахувати основні параметри мережі (кількість базових станцій та радіус стільника) та змоделювати в програмному середовищі Atoll мережу LTE з використанням технологій, що використовуються в мережах 5G.

Об'єкт дослідження – мережі 5G NR, безпроводові технології 5G та їх застосування в існуючих LTE мережах.

Предмет дослідження – модернізація існуючих мереж LTE з використанням технології Massive MIMO.

Методи дослідження – аналіз технологій 5G та різних варіантів їх застосування, порівняльний аналіз підходів до впровадження технологій 5G в різних сценаріях розгортання, порівняльний аналіз існуючих рішень для мереж 5G NR, застосування положень теорії поширень радіохвиль, використання програмного забезпечення Atoll для моделювання мережі.

Наукова новизна одержаних результатів. Удосконалено застосування активних багатопроменевих антенних решіток в існуючих стільникових мережах LTE для розширення ємності та поступового переходу до мереж 5G.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновано сценарії використання багатопроменевих антенних решіток та технології Massive MIMO для розширення абонентської ємності у великих містах та мегаполісах України на основі вже існуючих стільникових мереж LTE та встановленого обладнання на частоті 1800 МГц, що вже використовується операторами мобільного зв'язку. Розраховано параметри мережі та проведено її моделювання в програмному середовищі Atoll для 1000 активних користувачів, що знаходяться в межах території площею 2 км².

SUMMARY

Graduate work: 123 pages, 62 figures, 32 tables, 1 application, 18 literature sources.

Wireless technology are evolving and changing every year. In fact, only a few years ago, the load on the network was completely different - without a "ton" of video files, messages and giant online worlds. Not only the amount of information has changed, but also the number of users - and all this requires updating mobile networks.

New telecommunication technology standards must adapt the network's capabilities to current needs - they now cover the fifth generation of mobile networks. It is the new fifth generation that includes 5G NR technology, which can make the Internet more accessible, fast and reliable.

Talk about the rapid introduction of 5G in Ukraine began immediately after the launch of 4G in 2018. The next generation of communications was predicted in 2 years, synchronously with its spread in the EU. An appropriate presidential decree was even signed with a schedule for launching the fifth generation of communications. But the implementation of plans is delayed..

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .	9
ВСТУП	10
1. ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЇ 5G NEW RADIO.....	11
1.1 Стандартизація та розгортання.....	11
1.2 Варіанти використання 5G NR	13
1.2.1 Масова комунікація машинного типу.....	16
1.2.2 Ультранадійна комунікація машинного типу	16
1.3 Частотний спектр	17
1.3.1 Діапазони частот FR1 для 5G New Radio	18
1.3.2 Діапазони частот FR2 для 5G New Radio	19
1.3.3 Неліцензійний спектр	20
1.3.4 Частотний ресурс в Україні	20
1.4 Повітряний інтерфейс.....	21
1.4.1 Кадрова структура для 3.5 ГГц.....	21
1.4.2 Референсні сигнали NR.....	28
1.4.3 Критерії проектування форми сигналу 5G.....	32
1.4.4 Технології багаторазового доступу 5G.....	32
1.4.5 Концепція спільного використання спектра	34
2. ТЕХНОЛОГІЇ РАДІОДОСТУПУ 5G	38
2.1 Огляд ключових технологій.....	38
2.1.1 Передавання даних у міліметровому діапазоні (mmWave).....	38
2.1.2 Розгортання надщільної та гетерогенної мережі (HetNet)	40
2.1.3 Massive MIMO.....	42
2.1.4 Beamforming	43
2.2 Рішення RAN	46
2.2.1 Еволюція архітектури мережі.....	46
2.2.2 Удосконалені антенні системи для мереж 5G	58

2.2.3	Вибір рішення M-MIMO для типових сценаріїв розгортання 5G	63
2.2.4	5G AAU – Порівняння	67
3.	ВИМОГИ ДО ПЛАНУВАННЯ МЕРЕЖІ ДОСТУПУ 5G NR	69
3.1	Моделювання середовища 5G NR.....	69
3.1.1	Геоінформаційна система (ГІС)	69
3.1.2	3D-моделі забудови	70
3.1.3	Інтеграція зовнішніх ГІС та внутрішніх 3D будівельних моделей	72
3.2	Моделювання розповсюдження радіохвиль	73
3.3	Моделювання системи 5G NR	75
3.4	Планування Massive MIMO та імітаційне моделювання формування променів	77
3.5	Процес планування параметрів стільника.....	79
4	РОЗРАХУНОК І МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖІ LTE З ВИКОРИСТАННЯМ ОБЛАДНАННЯ AAS	85
4.1	Розрахунок параметрів LTE.....	85
4.1.1	Початкові дані для розрахунку.....	85
4.1.2	Розрахунок основних параметрів мережі	86
4.2	Моделювання мережі LTE	88
4.2.1	Проектування мережі	88
4.2.2	Вибір обладнання базової приймально-передавальної станції та антени	89
4.2.3	Результати моделювання.....	94
4.2.4	Вибір обладнання AAS (AAU)	96
4.2.5	Результати моделювання мережі LTE з використанням обладнання AAS.....	98
	ВИСНОВКИ.....	110
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	112
	Додаток А.....	114

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

5G	–	fifth generation (п'яте покоління мобільного зв'язку);
AAS	–	Active Antenna System або Advanced antenna systems;
AAU	–	Active Antenna Unit;
BBU	–	BaseBand Unit;
BS	–	Base Station (базова станція);
CAPEX	–	CAPital Expenditure (Капітальні вкладення);
DL	–	Downlink (лінія "вниз");
DSS	–	Dynamic Spectrum Sharing (динамічний розподіл спектру);
EPC	–	Evolved Packet Core;
FDD	–	Frequency Division Duplex (частотне рознесення);
ITU	–	International Telecommunication Union (Міжнародний союз електрозв'язку);
LTE	–	Long-Term Evolution;
MIMO	–	Multiple Input Multiple Output;
NR	–	New Radio;
OFDM	–	Orthogonal frequency-division multiplexing (мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів);
OPEX	–	Operating Expenditure (Операційні витрати)
RAN	–	Radio Access Network;
RAT	–	Radio Access Technology (технологія радіодоступу);
RF	–	Radio Frequency (радіочастотний);
RSRP	–	Reference Signal Received Power;
UE	–	User Equipment (абонентське обладнання);
UL	–	Uplink (лінія "вгору").

ВСТУП

За попередніми оцінками, наступне покоління стільникового зв'язку прийде в Україну в 2022-2023 рр. Вже зараз йдуть суперечки про те, як швидко і в якій мірі 5G замінить фіксовані мережі. Прораховуються кейси для міських IoT-проектів, переходу на новий тип транспорту, автоматизації промисловості.

Якщо мобільні мережі першого покоління уже давно забуті, то мережі 2G, 3G і 4G досі активно експлуатують. Більше того, певна кількість успадкованої від мереж 3G і 4G інфраструктури органічно увійде до складу мобільних мереж п'ятого покоління 5G.

П'яте покоління (5G) мобільних мереж обіцяє збільшення швидкості передавання даних до 10 Гбіт/с та зменшення затримки сигналу до 1 мс для забезпечення повсюдного доступу до широкого спектру програм та послуг. Підключених пристроїв може бути до мільйона на квадратний кілометр.

5G підтримуватиме як мобільну індустрію, так і такі галузі як автомобільна промисловість, автоматизація галузі та громадська безпека. Передбачається, що 5G буде співіснувати з іншими технологіями радіодоступу (RAT), такими як LTE-A/Pro, NB-IoT і Wi-Fi ще протягом тривалого часу.

1. ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЇ 5G NEW RADIO

У розділі 1 надано короткий вступ до стандартизації та впровадження 5G NR.

1.1 Стандартизація та розгортання

Стандартизація 5G NR ділиться на два етапи (рис 1.1).

Перший етап в основному зосереджений на наданні eMBB послуги, оскільки оператори на eMBB мають більш нагальну потребу, ніж служби URLLC та mMTC. Частина URLLC з низькою затримкою також стандартизована на цьому етапі. Буде розглянуто другий етап mMTC та частина URLLC.

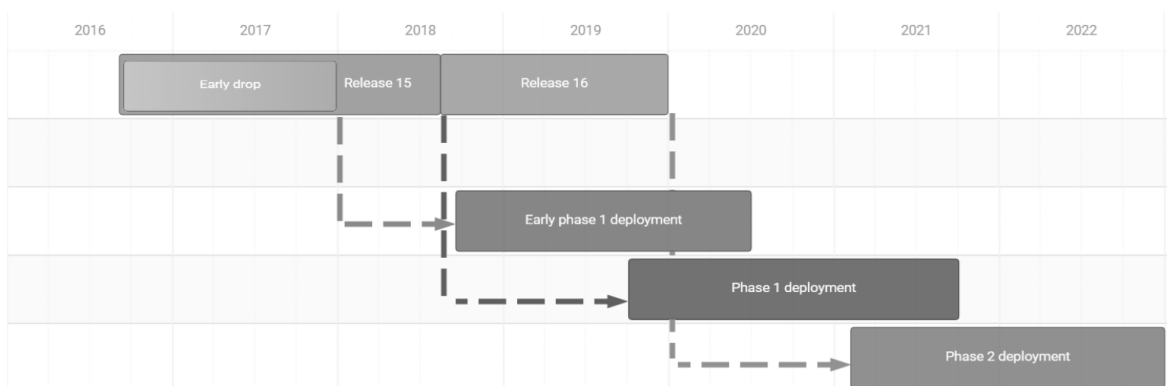


Рисунок 1.1 – Стандартизація 5G NR

З метою забезпечення першого етапу розгортання 5G NR у 2020 році, у вихідному випуску 3GPP (він же фаза 1) було визначено набір початкових функцій 5G NR. Складність 5G NR, необхідність економічно ефективного розгортання та взаємодії з існуючими мережами, що базуються на мульти-RAT, призведе до складності планування мережі 5G NR до безпрецедентного рівня, небаченого в попередніх поколіннях мобільних мереж. На рис. 1.2

проілюстровано широкий діапазон вимог до мереж 5G порівняно з попередніми поколіннями стільникового зв'язку, як IMT-Advanced.

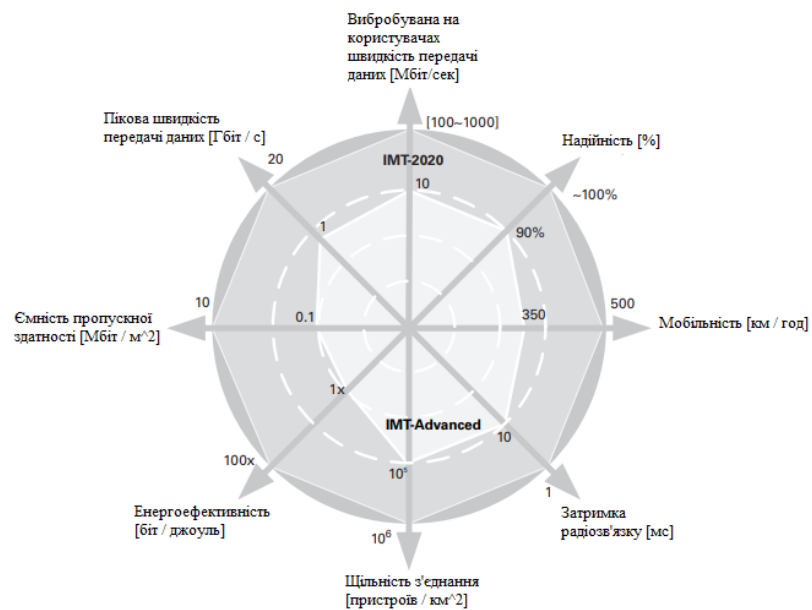


Рисунок 1.2 – Візуалізація вимог IMT-2020 (5G) і IMT- Advanced

Щоб виконати те, що обіцяє 5G, 5G NR, який лежить в основі мережі 5G, повинен мати наступні ключові технології:

- Передавання даних радіохвилями у міліметровому діапазоні (mmWave);
- Massive MIMO та 3D beamforming;
- Розгортання надщільної гетерогенної мережі (HetNet);
- Масштабована нумерологія OFDM.

Мережі 5G NR можуть бути розгорнуті у двох режимах: не автономному (NSA) або автономному (SA) режимах (рис. 1.3).

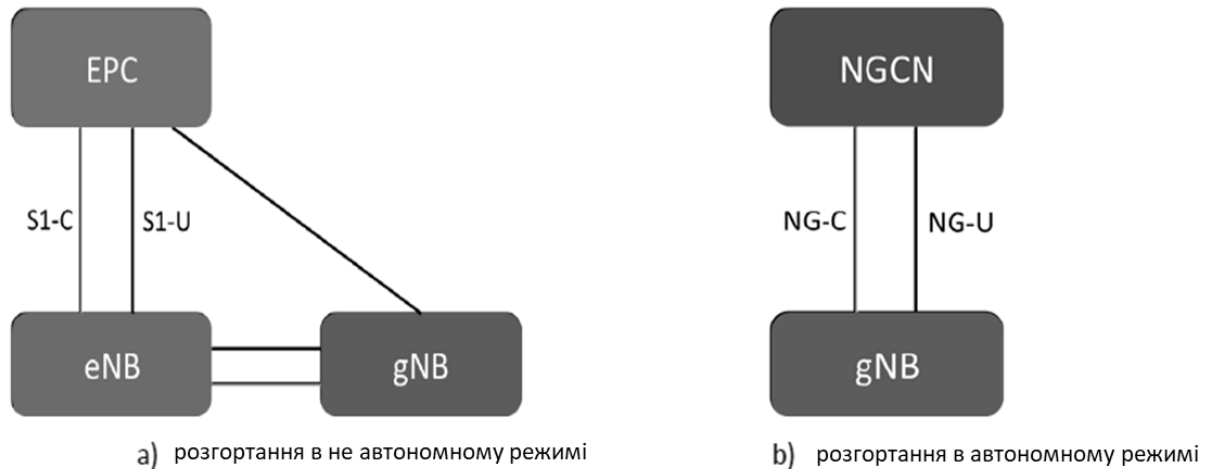


Рисунок 1.3 – Режими розгортання 5G NR

Як показано на рис. 1.3, у режимі розгортання NSA 5G NR буде використовувати той самий Evolved Packet Core (EPC) з LTE. Перевагами цього режиму розгортання є: скорочення часу та CAPEX, пов'язаних із розгортанням мережі 5G NR за рахунок використання існуючого ядра. Режим NSA більше підходить для початкового розгортання, наприклад, для охоплення «гарячих» точок. У режимі розгортання SA 5G NR буде використовувати нове ядро - Next Generation Corporate Network (NGCN). Перевага SA полягає в його ефективності та гнучкості, яку забезпечує розподіл мережі на основі технологій NFV та SDN, економія OPEX, затримка (що є критично важливою для URLLC) та вбудована підтримка mMTC. Отже, далі, 5G NR буде розгортатися в режимі SA. Це особливо корисно для нових учасників ринку.

1.2 Варіанти використання 5G NR

На додаток до підтримки традиційних послуг, що надаються існуючими мобільними мережами, для 5G передбачені три нові категорії послуг:

- розширений мобільний широкосмуговий доступ (eMBB – Extreme Mobile BroadBand);
- ультра надійна комунікація машинного типу (URLLC – Ultra-Reliable and Low-Latency Communication);
- масова комунікація машинного типу (mMTC – massive Machine-Type Communication).

Категорія eMBB включає такі послуги, як HD-відео, віртуальна/доповнена реальність; категорія URLLC включає такі послуги, як автомобільний зв'язок та автоматизація галузі; а категорія mMTC включає такі послуги, як IoT для розумного міста [1].

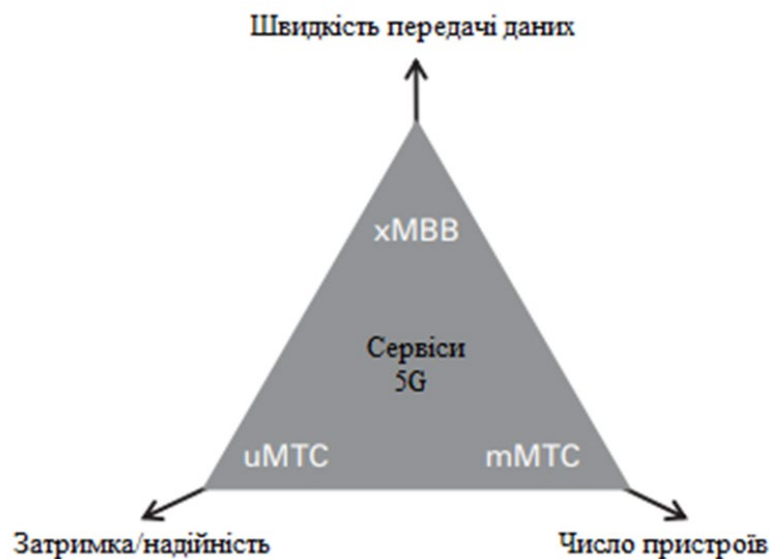


Рисунок 1.4 – Нові категорії в 5G

Ці три нові категорії послуг мають різні вимоги щодо пропускну здатності, затримки, мобільності, щільності з'єднання та швидкості передавання даних, як показано на рис 1.4. Наприклад, послуги eMBB пред'являють високі вимоги до спектральної ефективності, швидкості передавання даних, пікової швидкості

передавання даних, пропускну́ї спроможності та енергоефективності мережі. Детальні вимоги до послуг eMBB, URLLC та mMTC можна знайти в табл. 1.1:

Таблиця 1.1 – Вимоги 3GPP NR

Використання	Ключовий показник ефективності	Специфікація
Розширений мобільний широкопasmовий доступ (eMBB)	Швидкість передавання даних	10-20 Гбіт/с пік 100 Мбіт/с за потреби в 10000 разів більше трафіку
	Швидкість мобільності	500 км/год
	Сценарії використання	Макро і малі стільники
	Енергоефективність мережі	Енергозбереження мережі 100x
Масова комунікація машинного типу (mMTC)	Щільність з'єднання	$2 \times 10^5 - 10^6 \text{ km}^2$
	Покриття	Великий радіус
	Швидкість передавання даних	1-100 кбіт/с
	Термін служби батареї	10 років
	Вартість	M2M ультра низька вартість (менше 5\$)
	Метод доступу	Асинхронний доступ
Ультра надійна комунікація машинного типу (URLLC)	Затримка	Затримка повітряного інтерфейсу <1 мс
		5 мс затримки E2E
	Надійність і доступність	99,9999%
	Швидкість передавання даних	50 кбіт/с - 10 Мбіт/с
	Мобільність	Високошвидкісна мобільність

Для того, щоб врахувати більшу різноманітність послуг, які будуть підтримуватися 5G, а також бути спектрально- та енергоефективним, 5G New Radio (NR) повинен мати набагато вищий ступінь гнучкості та масштабованості, небачений у попередніх поколіннях мобільних мереж. Це призводить до ускладнення радіосистеми, що тягне за собою збільшення витрат на її розгортання та експлуатацію.

1.2.1 Масова комунікація машинного типу

Зв'язок для інтенсивного міжмашинного обміну даними (mMTC) має задовольнити потребу в подальшому розвитку цифрового суспільства і фокусується на послугах, які включають високі вимоги до щільності і кількості з'єднань, такі як «розумне» місто і «розумне» сільське господарство.

Мережа стандарту 5G призначена для підтримки до 1 млн. підключень на квадратний кілометр. Крім того, нові технології відстеження і технології, пов'язані з охороною здоров'я, також будуть удосконалені завдяки можливостям mMTC 5G.

При збільшенні кількості IoT-підключень на кожному сайті вкрай важливо, щоб був правильно задіяний відповідний спектр і розподіл ресурсів мережі для уникнення перевантаження трафіку. Обмеження кількості підключень і витрат на побудову бездротової інфраструктури було однією з головних перешкод в перетворенні так званої «Індустрії 4.0». Введення mMTC в 5G має допомогти прибрати цей бар'єр.

1.2.2 Ультра надійна комунікація машинного типу

Ультра-надійний зв'язок з малою затримкою (uRLLC) націлений на задоволення очікувань щодо вимог до нової цифрової індустрії і фокусується на чутливих до затримок сервісах, таких як допомога в управлінні і автоматичне керування транспортом, дистанційне керування (при максимальній затримці 5 мс або навіть менше), дистанційне проведення операцій та інших медичних процедур і так далі.

Вимога до затримки 5 мс і менше в мережах стандарту 5G призвела до теоретичного створення нового класу додатків «Тактильний Інтернет». При такій низькій затримці відповідь мережі буде настільки швидкою, що уми користувачів

можуть бути обмануті, думаючи, що вони «торкаються» об'єктів на іншому кінці мережі з використанням «гаптики» (від грец. слова *hapto* - торкаюся, хапаю, сенсорна система, що включає всі види шкірної рецепції). Кінестетичний зв'язок відтворює відчуття дотику, застосовуючи до користувача сили вібрації або руху. Це знаходить широке застосування на ряді вертикальних ринків, таких як віддалена хірургія, автономна навігація та виробництво.

Тим не менше, більшість аналітиків відзначили, що реалізація uRLLC буде найскладнішою для мереж 5G, так як знадобиться перебудова архітектури існуючих мереж для можливості використання функції «слайсінга» (можливість ізолювати і захищати шари з різними віртуальними мережами один від іншого.), без якого неможлива реалізація uRLLC [\[2\]](#).

1.3 Частотний спектр

5G призначений для роботи в набагато ширшому діапазоні частот, ніж раніше, від 1 ГГц до 100 ГГц. Низькосмуговий спектр (нижче 2,5 ГГц) забезпечує краще покриття, середньосмуговий спектр (2,5–10 ГГц) забезпечує поєднання хорошого покриття і високої пропускної здатності, а високий діапазон (10–100 ГГц) забезпечує пропускну здатність, необхідну для максимального бітрейту (до 20 Гбіт/с) і найнижчої затримки, передбачені для 5G. Відповідно, при збільшенні частоти передавання даних, зменшується радіус стільника, який зможе обслуговувати базова станція. Таким чином, мережі п'ятого покоління будуть розгортати на основі малих стільників (Small Cells).

Однією з ключових особливостей NR є значне розширення з точки зору діапазону спектру, в якому можна розгортати технологію радіодоступу, від 1 ГГц до 52,6 ГГц, розділеного на два діапазони частот:

- діапазон частот 1 (FR1): 450 МГц - 7,125 ГГц, який зазвичай називають "суб-6 ГГц";
- діапазон частот 2 (FR2): 24,25 ГГц - 52,6 ГГц, зазвичай називається "міліметровою хвилею".

1.3.1 Діапазони частот FR1 для 5G New Radio

У 5G-NR максимальна допустима ширина смуги частот одного радіоканалу в порівнянні з мережами 4G-LTE збільшилася з 20МГц до 100МГц для блоку радіочастот FR1 (табл 1.2). Так ширина одного радіоканалу для блоку FR1 (в залежності від варіанту розносу між підносійними) може бути 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 70, 80, 90 і 100 МГц [3].

Таблиця 1.2 – Діапазони частот FR1

Діапазон New Radio	Лінія вгору	Лінія вниз	Тип дуплексу
n1	1920 МГц – 1980 МГц	2110 МГц – 2170 МГц	FDD
n2	1850 МГц – 1910 МГц	1930 МГц – 1990 МГц	FDD
n3	1710 МГц – 1785 МГц	1805 МГц – 1880 МГц	FDD
n5	824 МГц – 849 МГц	869 МГц – 894 МГц	FDD
n7	2500 МГц – 2570 МГц	2620 МГц – 2690 МГц	FDD
n8	880 МГц – 915 МГц	925 МГц – 960 МГц	FDD
n12	699 МГц – 716 МГц	729 МГц – 746 МГц	FDD
n20	832 МГц – 862 МГц	791 МГц – 821 МГц	FDD
n25	1850 МГц – 1915 МГц	1930 МГц – 1995 МГц	FDD
n28	703 МГц – 748 МГц	758 МГц – 803 МГц	FDD
n34	2010 МГц – 2025 МГц	2010 МГц – 2025 МГц	TDD
n38	2570 МГц – 2620 МГц	2570 МГц – 2620 МГц	TDD
n39	1880 МГц – 1920 МГц	1880 МГц – 1920 МГц	TDD
n40	2300 МГц – 2400 МГц	2300 МГц – 2400 МГц	TDD
n41	2496 МГц – 2690 МГц	2496 МГц – 2690 МГц	TDD
n50	1432 МГц – 1517 МГц	1432 МГц – 1517 МГц	TDD
n51	1427 МГц – 1432 МГц	1427 МГц – 1432 МГц	TDD
n66	1710 МГц – 1780 МГц	2110 МГц – 2200 МГц	FDD
n70	1695 МГц – 1710 МГц	1995 МГц – 2020 МГц	FDD

Діапазон New Radio	Лінія вгору	Лінія вниз	Тип дуплексу
n71	663 МГц – 698 МГц	617 МГц – 652 МГц	FDD
n74	1427 МГц – 1470 МГц	1475 МГц – 1518 МГц	FDD
n75	N/A	1432 МГц – 1517 МГц	SDL
n76	N/A	1427 МГц – 1432 МГц	SDL
n77	3300 МГц – 4200 МГц	3300 МГц – 4200 МГц	TDD
n78	3300 МГц – 3800 МГц	3300 МГц – 3800 МГц	TDD
n79	4400 МГц – 5000 МГц	4400 МГц – 5000 МГц	TDD
n80	1710 МГц – 1785 МГц	N/A	SUL
n81	880 МГц – 915 МГц	N/A	SUL
n82	832 МГц – 862 МГц	N/A	SUL
n83	703 МГц – 748 МГц	N/A	SUL
n84	1920 МГц – 1980 МГц	N/A	SUL
n86	1710 МГц – 1780 МГц	N/A	SUL

1.3.2 Діапазони частот FR2 для 5G New Radio

Ширина одного радіоканалу для блоку FR2 (в залежності від варіанту рознесення між підносійними): 50, 100, 200 і 400 МГц. В табл. 1.3 наведено діапазони частот FR2 для 5G.

Для порівняння в LTE: 1,4; 3; 5; 10; 15; 20 МГц [3].

Таблиця 1.3 – Діапазони частот FR2

Діапазон New Radio	Смуга частот	Тип дуплексу
n257	26500 – 29500 МГц	TDD
n258	24250 – 27500 МГц	TDD
n260	37000 – 40000 МГц	TDD
n261	27500 – 28350 МГц	TDD

1.3.3 Неліцензійний спектр

В рамках розгортання мереж 5G планується також активно використовувати і неліцензійні смуги частот, особливо смуги частот в діапазоні 5 ГГц.

Робота технологій 3GPP в неліцензійному спектрі вперше була представлена у випуску LTE 13 з ліцензованим допоміжним доступом (LAA). У LAA пристрій підключається до мережі за допомогою ліцензованого оператора і, необов'язково, може використовувати одного або декількох неліцензованих носіїв для збільшення швидкості передавання даних. NR підтримуватиме подібну установку, але, на відміну від LTE, також підтримуватиме автономну роботу без підтримки оператора з ліцензованим спектром. Це значно додає гнучкості розгортання NR у неліцензійному спектрі порівняно з LTE, забезпечуючи єдиний глобальний фреймворк у випуску 16, де операції можливі не тільки в існуючих неліцензованих діапазонах 5 ГГц (5150 - 5925 МГц), але і в нових діапазонах, коли вони стають доступними. Найважливішим новим діапазоном є 6 ГГц, де потенційно доступні сотні МГц. Наприклад, для неліцензійної роботи в різних регулюючих органах обговорюються такі діапазони частот: 5925–7125 МГц у США та нижня частина діапазону 6 ГГц (5925–6425 МГц) у Європі. Хоча як NR, так і Wi-Fi будуть новими для діапазону 6 ГГц, передбачається, що нормативні акти забезпечуватимуть основу для захисту діючих служб (наприклад, фіксованих служб), поки неліцензійні технології працюють у цій смузі [\[4\]](#).

1.3.4 Частотний ресурс в Україні

На засіданні 11 листопада 2020 року уряд прийняв кілька рішень для поліпшення якості зв'язку та посилення захисту інформації. Серед них - план по

впровадженню в Україні зв'язку п'ятого покоління. Деталі плану розкрив заступник міністра цифрової трансформації Олександр Шелест на спеціальному онлайн-брифінгу.

Згідно з цим планом, вже в цьому місяці буде сформована спеціальна робоча група, яка проведе необхідну технічну експертизу для визначення доступного обсягу і звільнення зайнятих частот для впровадження технології 5G в Україні. У Мінцифрі ще раз підкреслили, що націлюються на частоти двох груп: низькі в діапазоні 700 МГц і високі в діапазоні 3,4-3,8 ГГц - ці ж діапазони для розгортання мереж 5G використовуються в Європі. Угода про асоціацію з ЄС зобов'язує Україну привести своє законодавство у відповідність з європейським у частині використання радіочастотного спектру, тому це стало одним з ключових пунктів плану.

Згідно із затвердженим планом, тендер на частоти для розвитку 5G буде оголошений в жовтні 2021 року (за умови виконання необхідних завдань відповідно до плану, включаючи звільнення частот, які зараз займають військові і провайдери супутникового ТБ). Сам тендер планується провести в грудні 2021 року і видати операторам відповідні ліцензії, щоб вони з 2022 року розпочали розгортання мереж 5G [\[5\]](#).

1.4 Повітряний інтерфейс

1.4.1 Кадрова структура для 3.5 ГГц

Нумерології (Numerology).

У 5G NR використовуються OFDM підносійні з різною шириною спектра - 15кГц, 30кГц, 60кГц, 120кГц і 240кГц (Табл. 1) на відміну від мереж LTE, де використовується стандартна ширина спектра підносійної, дорівнює 15кГц. Використання різних нумерології (табл 1.4) відкриває широкі можливості для

гнучкого налаштування поведінки мережі при наданні тих чи інших послуг, наприклад, для додатків критичних до рівня затримок (URLCC), доречно використовувати підносійні з широким спектром при меншій тривалості символу, і навпаки, при передаванні трафіку широкосмугового доступу в Інтернет і низького трафіку Інтернету речей - використовувати "вузькі" підносійні.

Таблиця 1.4 – Нумерології 5G NR

u (нумерологія)	$\Delta F=2^u \cdot 15$ [кГц]	Циклічний префікс
0	15 (відповідає LTE)	Нормальний
1	30	Нормальний
2	60	Нормальний, Розширений
3	120	Нормальний
4	240	Нормальний

Фреймова структура (Frame / Subframe / Slot):

- в 5G NR передавання даних у висхідному (Uplink - UL) і низхідному (Downlink - DL) напрямках організовується на основі фреймів, тривалістю $T_f = 10\text{мс}$;
- кожен фрейм ділиться на 10 субфреймов, тривалістю $T_{sf} = 1\text{мс}$ кожен;
- також кожен субфрейм ділиться на два напівфрейма (half-frame 0 і half-frame 1);
- кожен субфрейм ділиться на слоти (slot); кількість слотів визначається шириною спектра підносійної (або нумерологією) і становить 1, 2, 4, 8 або 16 слотів (на відміну від мереж LTE-FDD, де використовується єдина структура з двома слотами на кожен субфрейм).

Таблиця 1.5 – Параметри фреймової структури для різних нумерологій

Нумерології (u)	0	1	2	3	4
Ширина підносійної, кГц	15	30	60	120	240
Кількість слотів у субфреймі	1	2	4	8	16
Кількість слотів у фреймі	10	20	40	80	160
Тривалість слота, мс	1,0	0,5	0,25	0,125	0,0625
Тривалість символу, мкс	66,7	33,3	16,6	8,33	4,17
Тривалість звичайного CP, мкс	4,7	2,41	1,205	0,6	0,3
Тривалість розширеного CP, мкс	-	-	4,2	-	-

На рис. 1.5 наведено структуру кадру 5G NR.

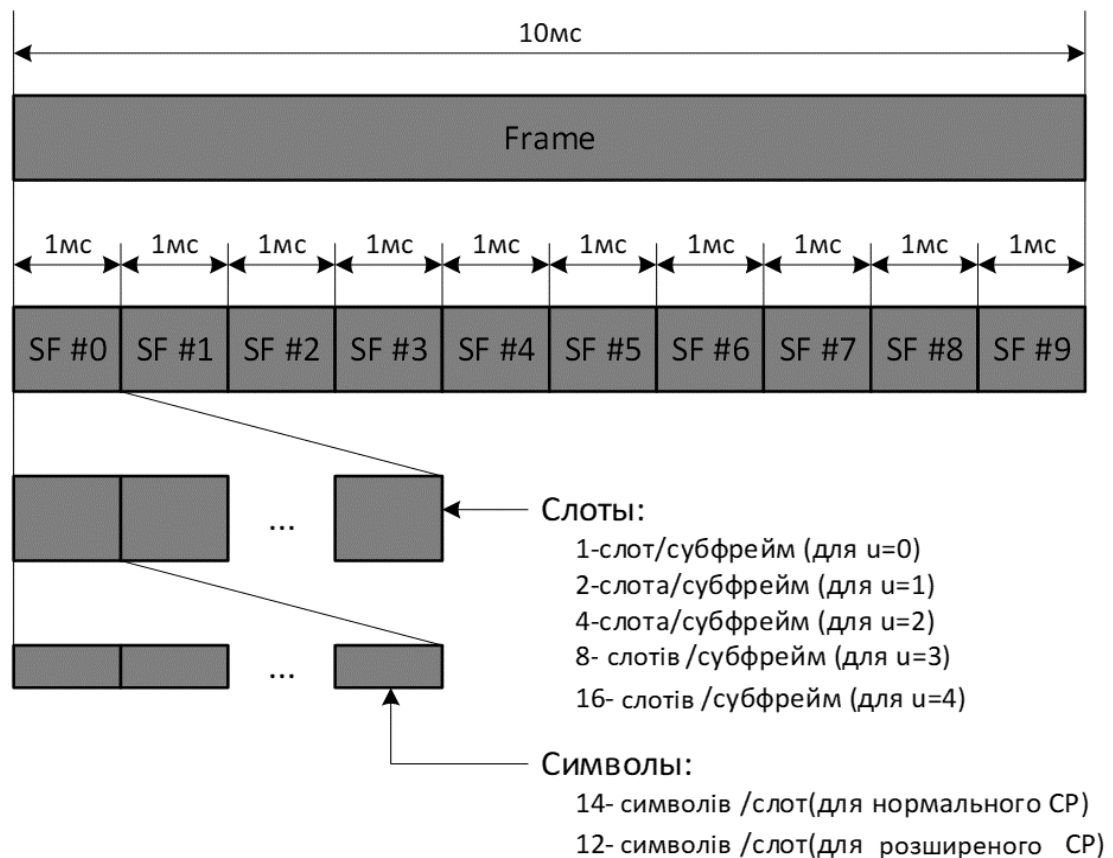


Рисунок 1.4 – Структура кадру 5G NR

OFDM символи.

У 5G NR кількість OFDM символів, що припадають на один слот (N_{slot}^{symb}), не залежить від нумерології i , за аналогією з мережами 4G LTE, визначається тільки типом циклічного префікса: 14 символів для нормального (Normal) і 12 - для розширеного (Extended) префікса. Для наочності на рис. 1.5 приведена діаграма OFDM-символів на сітці координат "частота" - "час".

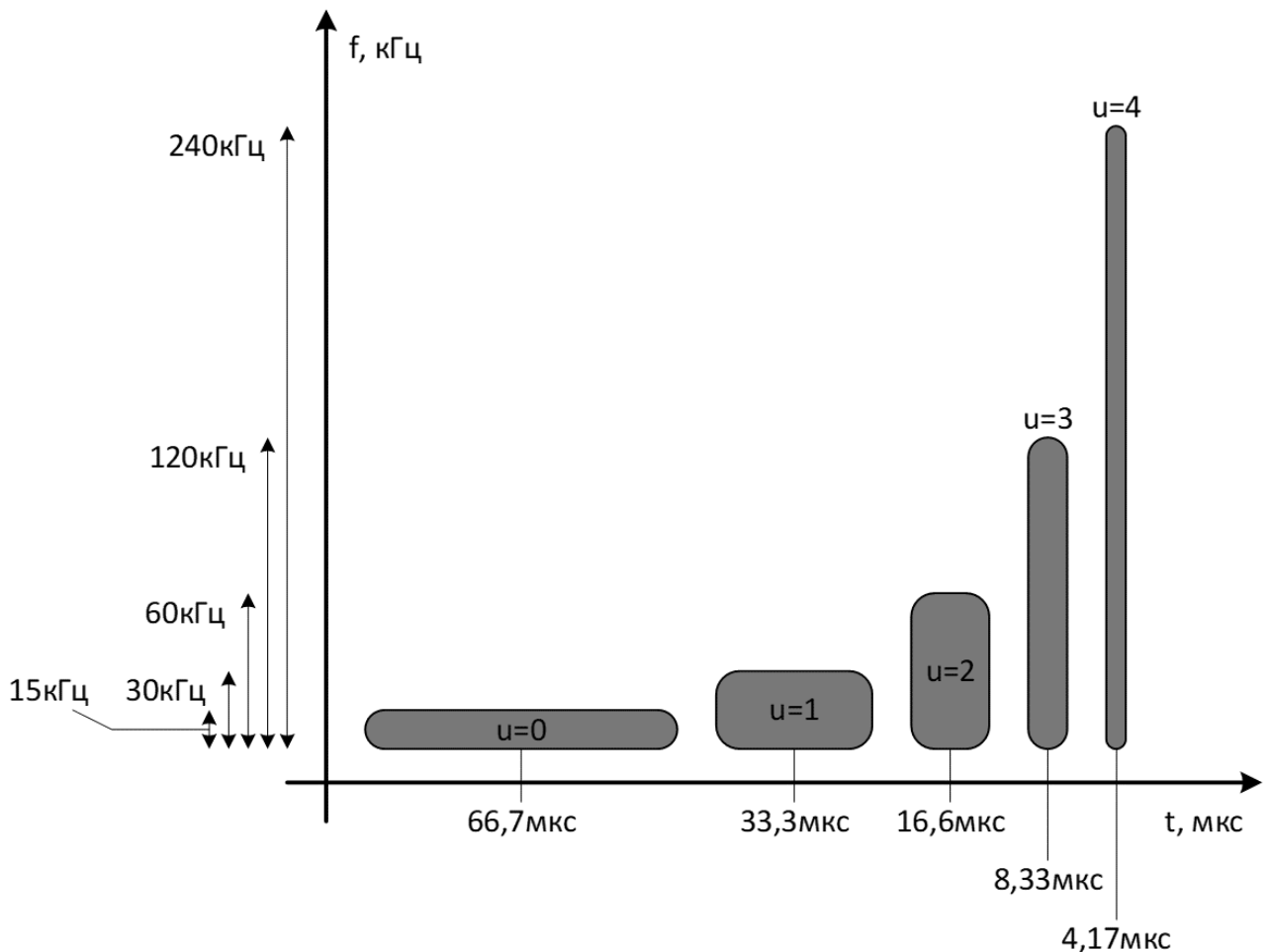


Рисунок 1.5 – Діаграма OFDM-символів 5G NR в частотно-часовій області

У 5G-NR розподіл між напрямками передавання (висхідний - UL / нисхідний DL канали) здійснюється на символному рівні (на відміну від мереж TD-LTE, де даний розподіл здійснювався на рівні субфреймів), тобто в рамках

одного слота частина символів можуть використовуватися для організації UL, а частина -для DL.

Кожен OFDM символ слота може мати тип "downlink" або "D" (нисхідний канал), "uplink" або "U" (висхідний канал) і "flexible" або "X" (гнучка конфігурація). У Табл. 3 наведені доступні формати розподілу OFDM символів між висхідним і нисхідним напрямками для нормального циклічного префікса (Таблиця 11.1.1-1 3GPP TS 38.213). Процедура конфігурації слотів описана в специфікації 3GPP TS 38.213 (пункт 11.1).

Ресурсна сітка.

За аналогією з 4G LTE одиницею частотно-часового ресурсу в мережах 5G-NR є ресурсний блок - RB (Resource Block). Кожному абонентському терміналу на певний період часу для прийому/передавання даних виділяється певна, визначена планувальником системи, кількість ресурсних блоків. Кожен ресурсний блок в частотній області містить $N_{sc}^{RB} = 12$ суміжних підносійних частот. Ширина смуги частот одного ресурсного блоку залежить від використовуваної нумерології (див. табл. 1.6).

Таблиця 1.6 – Параметри ресурсних блоків для різних нумерологій

u (нумерологія)	Підносійна, ΔF [кГц]	N_{sc}^{RB}	Ресурсний блок W_{RB}^u [кГц]
0	15	12	180
1	30	12	360
2	60	12	720
3	120	12	1 440
4	240	12	2 880

В 5G NR максимальна допустима ширина смуги частот одного радіоканалу в порівнянні з мережами 4G LTE збільшилася з 20МГц до 100МГц для блока радіочастот FR1 і до 400МГц для FR2. Також було зменшено захисний інтервал між двома сусідніми радіоканалами, що призвело до збільшення доступних ресурсних блоків. При цьому ширина захисного інтервалу визначається не тільки шириною частот радіоканалу, але і шириною смуги підносійної, що може привести до несиметричності захисних інтервалів якщо в рамках одного радіоканалу використовуються кілька нумерологій (рис 1.6).

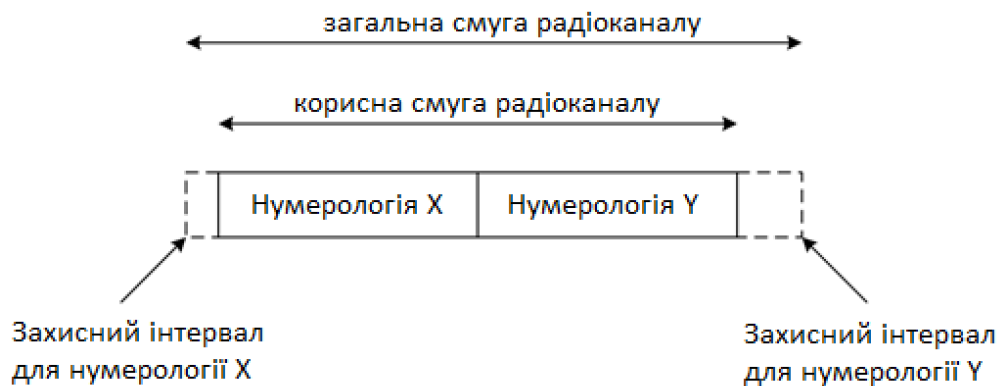


Рисунок 1.6 – Визначення ширини захисних інтервалів

Можливі варіанти ширини смуги радіочастот одного радіоканалу і відповідну кількість ресурсних блоків для різних блоків і нумерологій наведені в табл. 1.7-1.9.

Таблиця 1.7 – Параметри ресурсної сітки 5G NR FR1

SCS, кГц	5МГц	10МГц	15МГц	20МГц	25МГц	30МГц	40МГц
	FR1						
	N_{RB}						
15	25	52	79	106	133	160	216
30	11	24	38	51	65	78	106
60	-	11	18	24	31	38	51

Таблиця 1.8 – Параметри ресурсної сітки 5G NR FR1

SCS, кГц	50МГц	60МГц	70МГц	80МГц	90МГц	100МГц
	FR1					
	N_{RB}					
15	270	-	-	-	-	-
30	133	162	189	217	245	273
60	65	79	93	107	121	135

Таблиця 1.9 – Параметри ресурсної сітки 5G NR FR2

SCS, кГц	50МГц	100МГц	200МГц	400МГц
	FR2			
	N_{RB}			
60	66	132	264	-
120	32	66	132	264

На рис. 1.7 зображена ресурсна сітка 5G NR. Тут:

- ресурсний елемент (RE) - мінімальна одиниця для перенесення інформації в мережі радіодоступу 5G-NR, яка формується однією підносійною на тривалості одного символу;
- $N_{sc}^{RB} = 12$ – кількість суміжних частот, у одному ресурсному блоці;
- W_{RB}^u – ширина ресурсного блоку (від 180кГц до 2880кГц в залежності від нумерології);
- N_{symb}^{slot} – кількість символів в одному слоті (12 - для нормального префікса і 14 - для розширеного);

- $N_{slot}^{subframe}$ – кількість слотів в одному субфреймі (від 1 до 16 в залежності від нумерології);
- N_{slot}^{frame} – кількість слотів в одному фреймі (від 10 до 160 в залежності від нумерології).

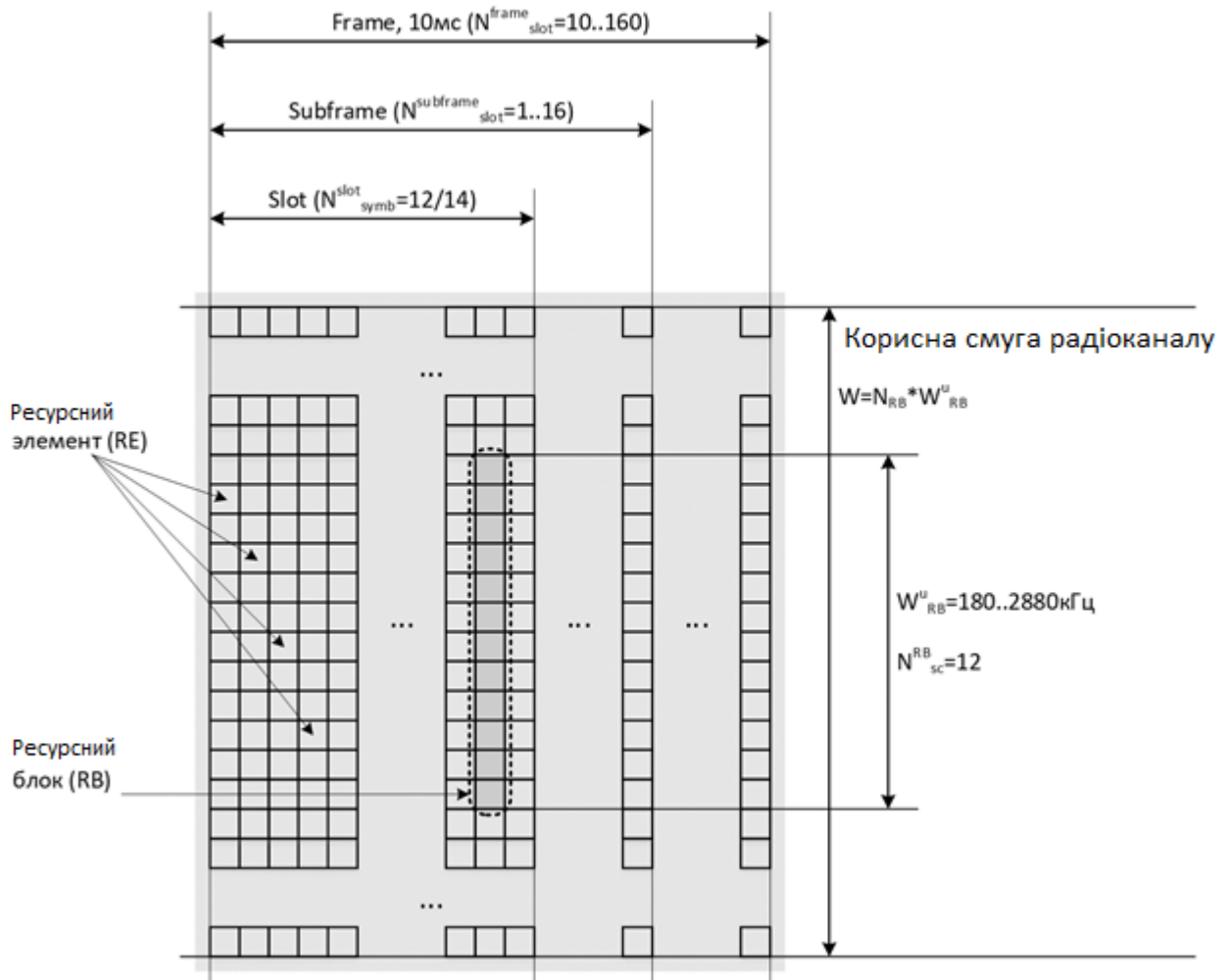


Рисунок 1.7 – Ресурсна сітка 5G NR

1.4.2 Референсні сигнали NR

1.4.2.1 Нисхідний канал (Downlink – DL)

В Downlink 5G-NR визначені наступні канали і сигнали:

- Physical Broadcast Channel (PBCH) - фізичний канал передавання ширококомовної інформації. Використовується для трансляції блоку головної інформації (MIB - Master Information Block). Для передавання PBCH використовуються підносійні 0-239 символів 1 і 3, а також підносійні 0-47, 192-239 символу 2 (Рис. 6), на відміну від мереж 4G-LTE, де для передавання PBCH використовуються 72 центральні підносійні символів 0,1,2,3 другого слота першого субфрейма;
- Physical Downlink Control Channel (PDCCH) - фізичний канал управління "вниз". Використовується для передавання інформації про призначення ресурсів для користувача терміналів;
- Physical Downlink Shared Channel (PDSCH) - фізичний канал для передавання інформації "вниз" з поділом користувачів. Використовується для передавання призначених для користувача даних, повідомлень пейджінга, відповідей на запити доступу до мережі з боку призначених для користувача терміналів (UE) і блоків системної інформації SIB (System Information Blocks);
- Primary synchronization signal (PSS) - сигнал первинної синхронізації. Дозволяє призначеному для користувача терміналу здійснити частотну і тимчасову синхронізацію з сигналом активного стільника, а також обчислити компонент $N_{ID}^{(2)} \in \{0,1,2\}$ фізичного ідентифікатора стільникової мережі (Physical Layer Cell Identity, PCI). Зазначу, що в 5G-NR для формування PSS використовується m-послідовність, на відміну від мереж 4G-LTE, де PSS формується на підставі послідовності Задова-Чу. LTE-PSS мапується на 72 центральні підносійні радіоканалу, NR-PSS - на 127 (див. рис. 1.8);
- Secondary synchronization signal (SSS) - сигнал вторинної синхронізації. Дозволяє призначеному для користувача терміналу обчислити

компонент $N_{ID}^{(1)} \in \{0,1,\dots,335\}$ фізичного ідентифікатора стільникової мережі (PCI). У 5G-NR визначено 1008 унікальних PCI, тобто в два рази більше, ніж в 4G-LTE. LTE-SSS мапується на 72 центральні підносійні радіоканалу, NR-SSS - на 127 (див. Рис. 6);

- Channel-state information reference signal (CSI-RS) - референсний сигнал, який використовується для користувача терміналом (UE) для оцінки параметрів середовища поширення радіосигналу і обчислення CSI-RSRP, CSI-RSRQ, CSI-SINR з подальшим формуванням індикатора якості радіоканалу (Channel Quality Indicator - CQI) і індикатора матриці передкодування (Precoding Matrix Indicator - PMI). Є специфічним для кожного стільника і кожного антенного порту;
- Phase-tracking reference signals (PT-RS) - референсний сигнал, який використовується для компенсації фазових шумів опорних генераторів. Актуальність введення даного типу референсних сигналів обумовлена задіянням в 5G-NR високих діапазонів радіочастот (FR2) Є специфічним для кожного UE;
- Demodulation reference signals (DM-RS) - референсний сигнал, який використовується UE для настройки еквалайзера приймального ланцюга і демодуляції сигналів, що переносять інформацію "вниз". Є специфічним для кожного UE і кожного просторового потоку. Присутній тільки в ресурсних елементах, що переносять призначену для користувача інформацію;
- Зауважу, що в 5G-NR відсутній пілотний сигнал CRS (Cell specific Reference Signals), визначений ще в Release 8 3GPP і використовуваний в т.ч. для обчислення терміналом користувача таких ключових параметрів визначення якості каналу, як RSSI і RSRQ.

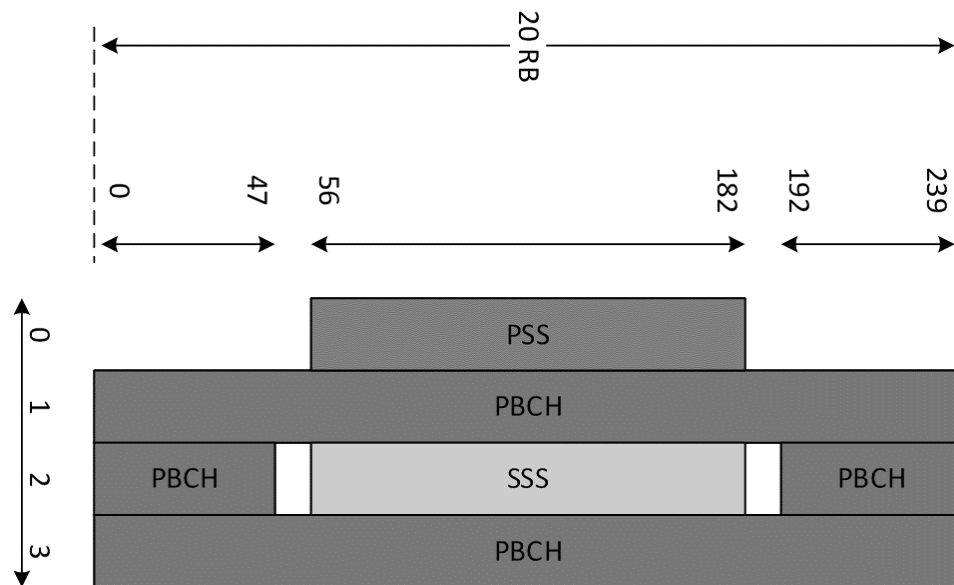


Рисунок 1.8 – SS/PBCH блоки

1.4.2.1 Висхідний канал (UL)

В Uplink 5G-NR визначені наступні канали і сигнали:

- Physical Random Access Channel (PRACH) - фізичний канал передавання запитів випадкового доступу;
- Physical Uplink Control Channel (PUCCH) - фізичний канал передавання сигналізації у відсутності каналу PUSCH;
- Physical Uplink Shared Channel (PUSCH) - фізичний канал передавання користувацького трафіку і сигналізації;
- Phase-tracking reference signals (PT-RS) - за аналогією з відповідним референсним сигналом нисхідного каналу використовується для компенсації фазових шумів опорних генераторів;
- Demodulation reference signals (DM-RS) - за аналогією з відповідним референсним сигналом нисхідного каналу, використовується базовою станцією для налаштування еквалайзера приймального ланцюга і демодуляції сигналів, що переносять інформацію "вгору";

- Sounding reference signal (SRS) - використовуються для оцінки стану радіоканалу для того, щоб підібрати оптимальні параметри передавання [3].

1.4.3 Критерії проектування форми сигналу 5G

Базова форма сигналу повинна відповідати гнучким вимогам для різних сценаріїв, наведеним у табл. 1.10.

Таблиця 1.10 – Критерії проектування форми сигналу 5G

Ключова мета	Детальний опис
Висока спектральна ефективність	Підтримка MIMO та протидія затуханню багатопроменевого шляху розповсюдження радіохвиль
Невисока складність обладнання	Прийнятні вимоги до складності приймально-передавального обладнання
Оптимальний баланс покриття та ємності мережі	Балансування ємності та покриття базуючись на різних сценаріях розгортання та UE
Низькі накладні витрати	Мінімізація накладних витрат на протокол, зменшення споживання енергії та збільшення ємності

1.4.4 Технології багаторазового доступу 5G

дові телекомунікаційні системи стрімко еволюціонували від покоління до покоління. Супроводжує цю еволюцію розвиток технологій багаторазового

доступу (MA). Наприклад, від першого покоління (1G) до 4G-LTE, звичайні системи зв'язку ортогонально призначають радіоресурси мультикористувачам у часовій, частотній та кодовій областях. Експерти вважали, що до 2020 року (5G) мобільний трафік передавання даних виросте у тисячу разів (в 1000 разів). Вибухоне зростання обсягу передавання даних буде спричинене Інтернетом речей (IoT) та масовими машинними комунікаціями (mMTC). На засіданні ITUR WP 5D було визначено, що цільовою кількістю максимальних з'єднань є мільйон на квадратний кілометр. Однак система ортогонального багаторазового доступу (OMA) має обмежені можливості для підтримки масивних пристроїв. Щодо сумарної ємності, добре відомо, що система OMA не може наблизитися до межі Шеннона. Велика кількість промислових та наукових дослідників перевели фокус своїх досліджень від ортогональності до неортогональності.

Фактично, у проекті партнерства третього покоління (3GPP), NTT DOCOMO представив неортогональний багаторазовий доступ до домену потужності (NOMA). NOMA дозволяє декільком користувачам спільно використовувати однакові радіоресурси [6].

Таблиця 1.11 – Технології неортогонального багаторазового доступу

Технологія	Повна назва	Рекомендатор
MUSA	Multi User Shared Access	ZTE
SCMA	Sparse Code Multiple Access	Huawei
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access NTT	DOCOMO
RSMA	Resource Spread Multiple Access	Qualcomm
PDMA	Pattern Defined Multiple Access	DT

1.4.5 Концепція спільного використання спектра

Щоб забезпечити економічне, широкосмугове покриття 5G, необхідно, щоб 5G також працював у нижчих частотних діапазонах, де більшість операторів в даний час застосовують технологію LTE. Повністю переробляти мережі неможливо через високий рівень проникнення існуючих користувачів LTE та великий обсяг трафіку, який вони генерують. Отже, Spectrum Sharing (SS) дозволить поступово вводити 5G в існуючих діапазонах 4G з мінімальним впливом на поточне надання послуг кінцевим користувачам.

Для впровадження 5G SA SS може швидко забезпечити необхідне постійне покриття, використовуючи всі переваги «розрізання» мережі та меншу затримку, щоб забезпечити нові можливості для бізнесу в багатьох галузях промисловості в містах, на заводських поверхах та дорогах у всьому світі. Координація пристроїв на 1 мс є ключовою функцією SS, яка підтримуватиме ці випадки використання з низькою затримкою [7].

Передумови для впровадження технології Spectrum Sharing:

- відновлення існуючого 4G-спектру для прискорення розгортання 5G із зменшенням інвестицій у мережу;
- оптимізація використання спектру в початковій фазі розгортання 5G, де низьке проникнення 5G-пристроїв призводить до недостатнього використання спектру 5G.

Є два сценарії розподілу спектру між технологіями: з повним або частковим перекриттям спектрів.

Повне перекриття:

- LTE та NR співіснують і мають спільний спектр;
- LTE і NR повинні уникати конфліктів на всьому спектрі напівстатичним способом або в режимі реального часу.

Типова ширина смуги пропускання спектру: 10, 15, 20 МГц.

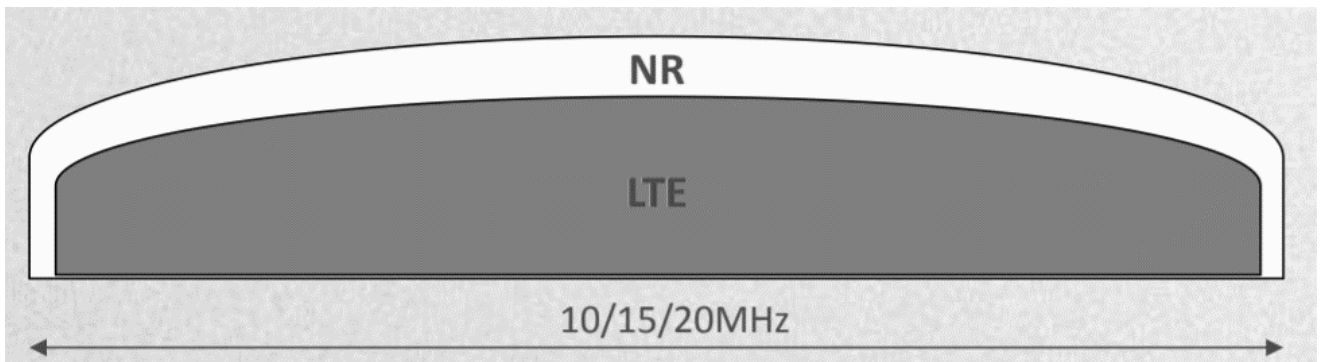


Рисунок 1.9 – Сценарій розподілу спектру між технологіями з повним перекриттям

Часткове перекриття:

- LTE та NR співіснують і мають частковий спектр;
- NR виділив спектр для налаштування свого звичайного загального каналу, щоб частково зменшити конфлікт з LTE;
- Для накладеного спектру LTE та NR повинні уникати конфліктів у режимі реального часу.

Типова ширина смуги пропускання спектру: 20 ~ 100 МГц.

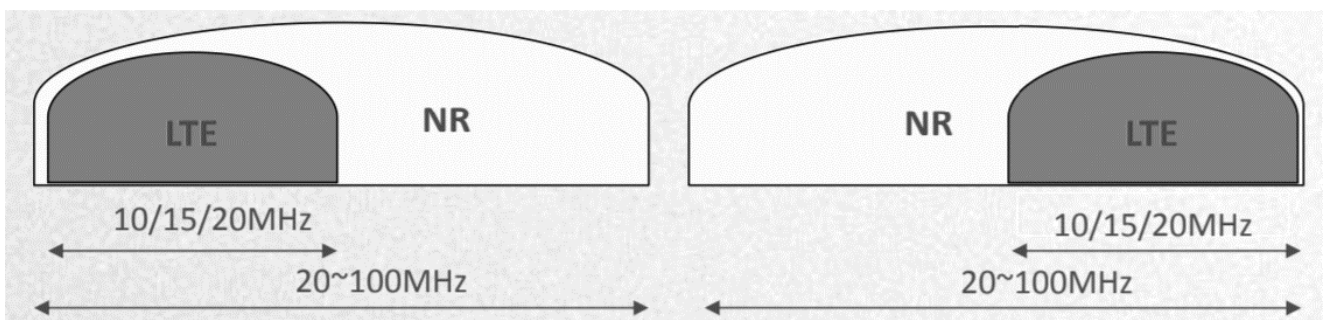


Рисунок 1.10 – Сценарій розподілу спектру між технологіями з частковим перекриттям

Методи розподілу спектра:

- статичний;

- динамічний;
- миттєве спільне використання спектра.

Статичний розподіл смуги пропускання спектру для NR і LTE можливий при обмеженому проникненні 5G-пристроїв (UE).

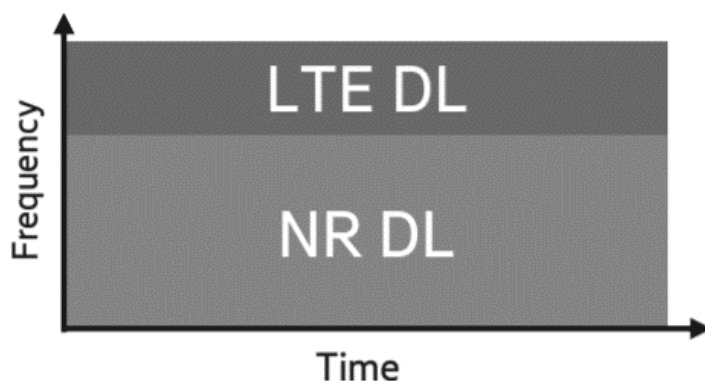


Рисунок 1.11 – Статичний розподіл смуги пропускання

Динамічне спільне використання спектра забезпечує кращий досвід для користувачів LTE та NR (обидва користувачі мають доступ до всієї смуги пропускання).

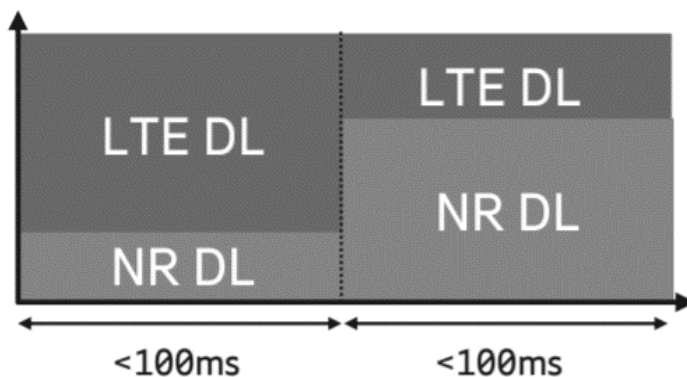


Рисунок 1.12 – Динамічний розподіл смуги пропускання

Миттєве спільне використання спектра потрібне щоб забезпечити розгортання NR у застарілому середньому FDD діапазоні, де необхідна висока ємність мережі (B2/B66). Підтримується на AIR 32 / RRUS 32 та AIR 3246/1641.

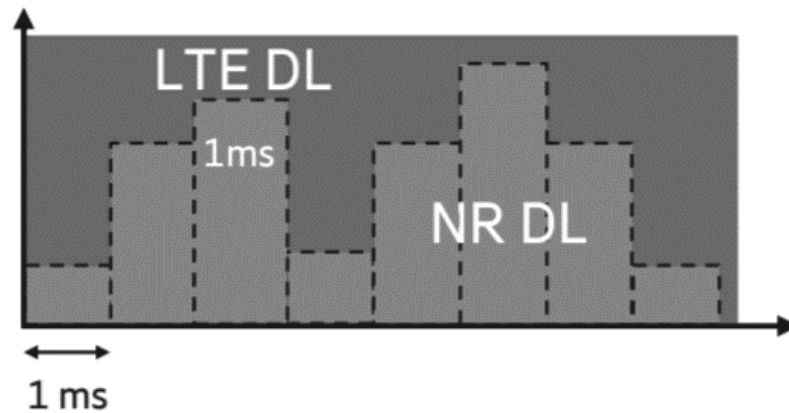


Рисунок 1.13 – Миттєве спільне використання спектра

Висновки до розділу

1. Однією з основних перешкод на шляху впровадження 5G в Україні є проблема розподілу частотного ресурсу і отримання відповідних ліцензій операторами мобільного зв'язку. Зокрема, гальмівним фактором є процес звільнення частот, які зараз займають військові і провайдери супутникового ТБ.
2. Найбільш перспективними діапазонами для розгортання 5G в Україні є низькі в діапазоні 700 МГц і високі в діапазоні 3,4-3,8 ГГц. До кінця 2022 р. планують провести тендер та видати операторам ліцензії.
3. Забезпеченню поступового розгортання мережі 5G в Україні сприятиме використання методу динамічного розподілу спектру (DSS), особливо разом з впровадженням технологічної нейтральності на використання частотного ресурсу.

2. ТЕХНОЛОГІЇ РАДІОДОСТУПУ 5G

Коротко опишемо ключові технології, що сприяють розвитку 5G NR.

2.1 Огляд ключових технологій

2.1.1 Передавання даних у міліметровому діапазоні (mmWave)

Як зазначено у відомій формулі пропускної здатності каналу Шеннона-Хартлі (1), ємність каналу C лінійно збільшується з пропускною здатністю каналу B .

$$C = B * \log_2 (1 + \text{SNR}) \quad (1)$$

Традиційно, стільникові мережі використовують частоти від 300 МГц до 3 ГГц для забезпечення широкосмугових послуг мобільного зв'язку, як показано на рис. 2.3. Передавання сигналу в цій смузі забезпечує стійкий рівень прийнятого сигналу на відстані до кількох кілометрів. Зокрема, також може бути забезпечено indoor покриття, оскільки втрати на проникнення в смузі sub-mmWave низькі. Однак зі сплеском трафіку, якщо, покладатися лише на спектр нижче 3 ГГц, то стає неможливо надавати послуги eMBB, які вимагають швидкості передавання даних 1-10 Гбіт/с. З одного боку, вся смуга пропускання в діапазоні радіочастот (РЧ) менше 3 ГГц нижча 3 ГГц, що, очевидно, недостатньо для реалізації бачення 5G. З іншого боку, є велика кількість спектру вище 3 ГГц, зокрема діапазону mmWave (30 ГГц-300 ГГц), для вивчення для мобільних пристроїв спілкування. Завдяки своїй пропускній здатності, що перевищує 200 ГГц, і її потенціалу забезпечити набагато більшу ємність, ніж традиційні стільникові мережі, комунікація mmWave вибрана як одна з ключових технологій для 5G NR. Крім того, mmWave добре поєднується з масивними MIMO та надщільним розгортанням дрібних стільників, дві інші ключові технології, що сприяють 5G NR.

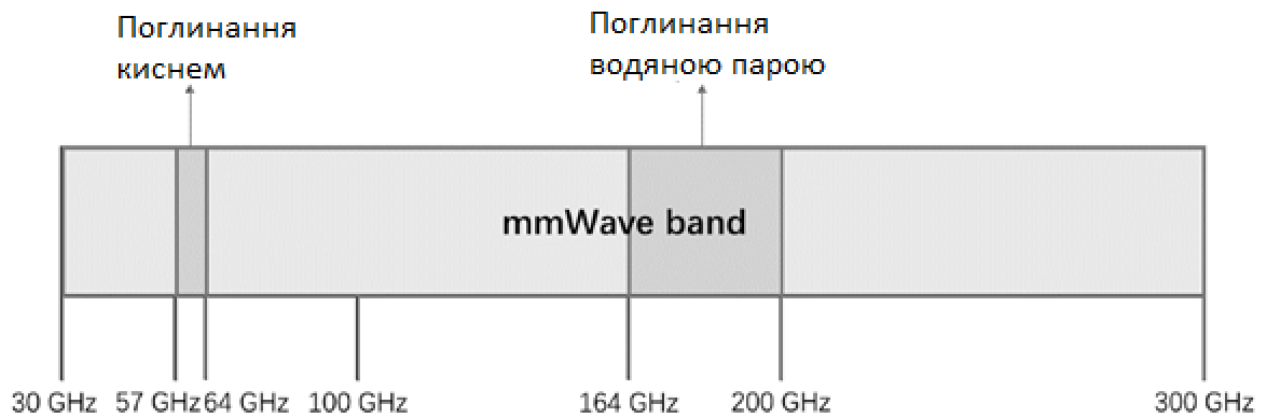


Рисунок 2.1 – Вплив кисню та води на смугу частот

У порівнянні з більш низькочастотними діапазонами, радіохвилі у цьому спектрі швидко згасають, поглинаючись атмосферними газами та водяною парою. Внаслідок цього вони мають малу дальність поширення та можуть бути використані тільки для наземного зв'язку на відстані не більше 1 км. Зокрема, випромінювання на частотах 57-64 ГГц сильно послаблюється молекулами кисню і поглинанням водяної пари в діапазоні 164-200 ГГц (рис 2.1), отже, потенційна пропускна здатність становить 225 ГГц доступні для використання для зв'язку в частотному діапазоні mmWave.

Через коротку довжину хвиль на поширення сигналу mmWave більше впливатимуть погодні умови та дрібні предмети. Також, навіть на відносно коротких відстанях, дощ є серйозною перешкодою для поширення сигналу. Дощ та сніг можуть суттєво вплинути на зв'язки mmWave. Маленькі об'єкти, такі як транспортні засоби, дерева, листя, меблі та людські тіла, впливатимуть на сигнал mmWave і можуть навіть повністю заблокувати радіозв'язок. Отже, засоби радіопланування, які підтримують mmWave, потрібні для вивчення багатьох сценаріїв "що - якщо" для розгортання дрібних стільників mmWave та їх взаємодії зі стільниками, що працюють на частоті нижче 6 ГГц.

2.1.2 Розгортання надщільної та гетерогенної мережі (HetNet)

Ємність C_M на квадратний кілометр покриття в стільникових мережах можна визначити за формулою:

$$C_M = D * S * B,$$

де D – щільність стільників на квадратний кілометр, S – спектральна ефективність на стільник, а B – доступний спектр в кожному стільнику. Збільшуючи щільність стільників, ресурси спектру повторно використовуються багато разів. Відповідно, розгортання надщільних малих стільників (SC) вважається найбільш перспективним способом збільшити пропускну спроможність мережі, із розрахунковим коефіцієнтом 50, що сприяє 1000-кратному збільшенню пропускну спроможності, залишаючи коефіцієнт підвищення спектральної ефективності та розширення смуги пропускання в 20 разів. Історично склалося, що ущільнення збільшило пропускну здатність стільникових мереж приблизно в 2700 разів з 1950 по 2000 рр. [8].

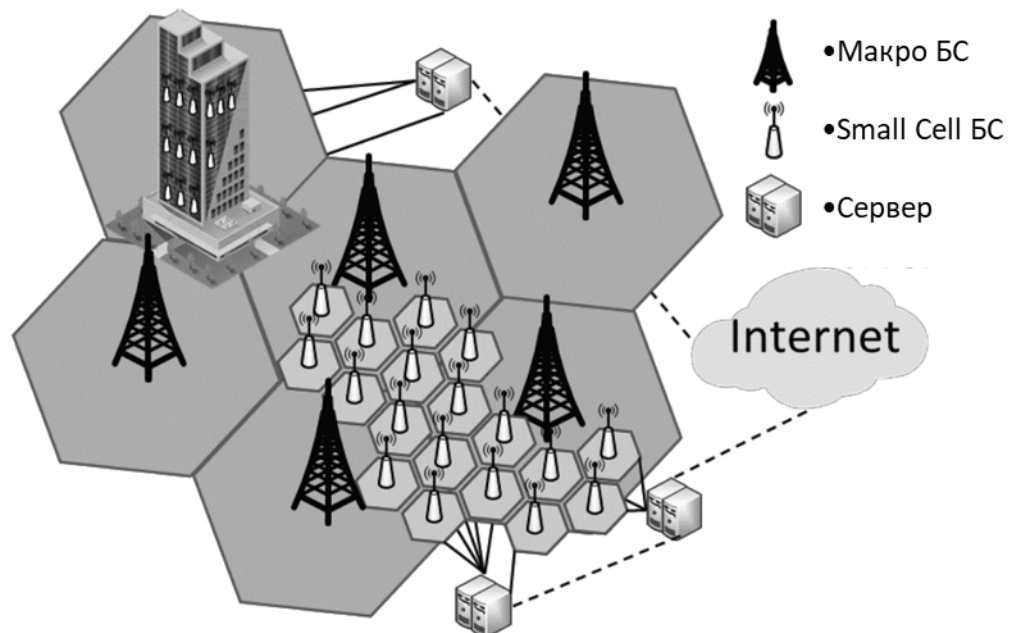


Рисунок 2.2 – Надзвичайно щільне розгортання дрібних стільників

Ілюстрація надщільного розгортання SC, що лежить в основі традиційних макроелементів, показана на рис 2.2. Надзвичайно щільне розгортання SC породжує такі складні проблеми, як контроль завад, управління мобільністю та економічний зворотний зв'язок [9-10]. Отже, необхідне ретельне радіопланування SC.

Варто зазначити, що ущільнення мережі має межу. Коли середня кількість активних UE в години пік менше, ніж кількість розгорнутих SC BS, будь-яке подальше ущільнення мережі стає неекономічним, оскільки сума пропускну здатності UE не збільшується лінійно ущільненню.

У щільній мережі HetNet з декількома рівнями і безліччю RAT, таких як мобільні технології різних поколінь, Wi-Fi і глобальна працездатність для мікрохвильового доступу (WiMaX), кожне UE може мати кілька варіантів асоціації стільникового зв'язку протягом життя своїх активних сеансів. Стільниковий зв'язок повинен бути розроблений для ефективного використання мережевих ресурсів і забезпечення прийняттого QoS для UE. Загалом, невеликі осередки, такі як пікосоти, фемтосоти і Wi-Fi, краще обслуговувати UE з низькою мобільністю, тоді як мобільне ПЗ з високою мобільністю має обслуговуватися макро-BS, щоб уникнути частого передавання обслуговування. Крім того, макро-BS повинні також заповнювати отвори для покриття мережі, щоб зменшити ймовірність переадресовувати дзвінки. Наприклад, в мережі HetNet типовий піко-BS має максимальний радіус комірки близько 200 м, і якщо хтось намагається зв'язати UE з високошвидкісним поїздом, що рухається зі швидкістю 250 км/год до цієї BS, може знадобитися передавання обслуговування, що відбувається через кілька секунд, що абсолютно небажано [11].

2.1.3 Massive MIMO

Massive MIMO — це система, в якій кількість терміналів користувачів набагато менша, чим кількість антен базової станції. Особливістю Massive MIMO є використання багатоелементних цифрових антенних решіток з кількістю антенних елементів 128, 256 і більше.

Технологія MIMO уже застосовується у мережах четвертого покоління 4G і є ключовою в мережах п'ятого покоління 5G. Слід зазначити, якщо на сьогоднішній день в існуючих мережах LTE використовують MIMO 2x2 і 4x4, та очікується, що у майбутньому кількість антен значно збільшиться. Технологія MIMO має одразу 2 вагомих аргументи щодо застосування у майбутньому: 1) швидкість передавання даних зростає майже пропорційно кількості антен; 2) при прийомі сигналу одразу невеликою кількістю антен поліпшується його якість за рахунок рознесеного прийому (Receive Diversity).

Масивний MIMO, показаний на рис 2.3, це антенна система з сотнями антенних елементів, обладнаних на кожній БС одночасно для обслуговування десятків UE, що використовують однакові частотно-часові ресурси. У 5G масивний MIMO розширює число антенних елементів в BS LTE до сотень, наприклад, 100 і до 256, для подальшого вдосконалення надійності зв'язку, пропускної здатності, спектральної ефективності та енергоефективності порівняно з традиційним багатокористувацьким MIMO (MU-MIMO). У стільнику з підтримкою Massive MIMO кількість елементів антени базової станції зазвичай перевищує кількість одночасних користувачів у стільнику на порядок величини.

У режимі TDD пропускна спроможність Massive MIMO в кожному стільнику визначається формулою:

$$C_{dl} = \max_p \log_2 \det (I_M + \rho_{dl} G P G^H),$$

де M – кількість антен, ρ_{dl} – SNR низхідної лінії зв'язку, P – позитивна діагональна матриця з розподілом потужності $\{p_1, p_2, \dots, p_K\}$ як його діагональні елементи і $\sum_{k=1}^K p_k = 1$, K – кількість користувачів, G – це матриця каналів від антен BS до UE, з розміром $M \times K$. Режим TDD завжди використовується в Massive MIMO для зменшення ресурсів споживання інформації про стан каналу (CSI).

Масивний MIMO може забезпечити просторове мультиплексування. Найголовніша перевага, яку масивний MIMO може надати для 5G – це його спектральна ефективність (порівняно в 10 разів більше з LTE-A).

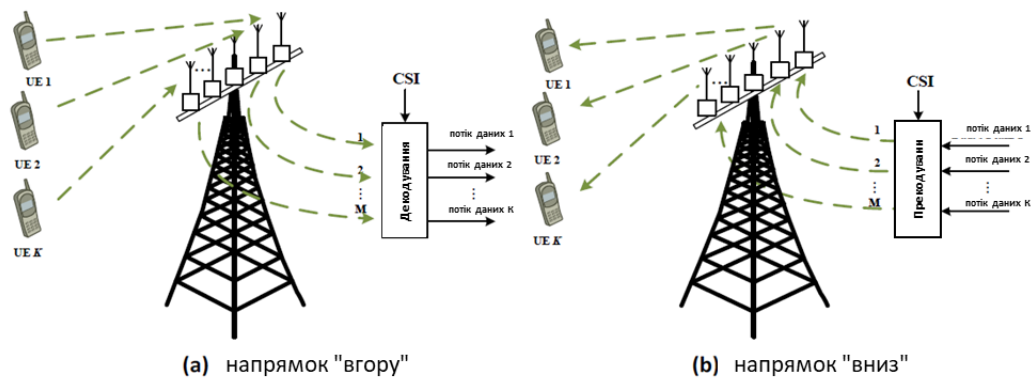


Рисунок 2.3 – Massive MIMO

2.1.4 Beamforming

Beamforming (формування променів) - це просторова техніка обробки сигналу з антенною решіткою для спрямованого передавання та прийому сигналу, що показано на рис 2.4. Це досягається навмисним контролем фази та відносна амплітуда одного і того ж сигналу на кожній антені формувачем променів.

Beamforming є ключовим інструментом для використання потенціалу систем MIMO, що зазвичай вимагає наявності CSI в передавачі і / або приймачі.

Для майбутньої мережі 5G, яка використовує масивний MIMO в смугах частот мікрохвиль і / або міліметрових хвиль, оцінка CSI і формування променів є ключовими проблемами проектування і сильно впливають на продуктивність мережі. Існуючі системи MIMO (наприклад, LTE) оснащені невеликою кількістю антен N (від 1 до 10). У цьому випадку кількість радіочастотних (RF) ланцюгів, цифроаналогових перетворювачів (ЦАП) і аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), які є найдорожчими частинами бездротового приймача, можуть бути такими ж, як число антен. Однак в масивній системі MIMO з 100-1000 антенами розгортання N RF-ланцюгів практично неможливо. З іншого боку, енергоспоживання MIMO приймача збільшується з кількістю активних RF-ланцюгів [11].

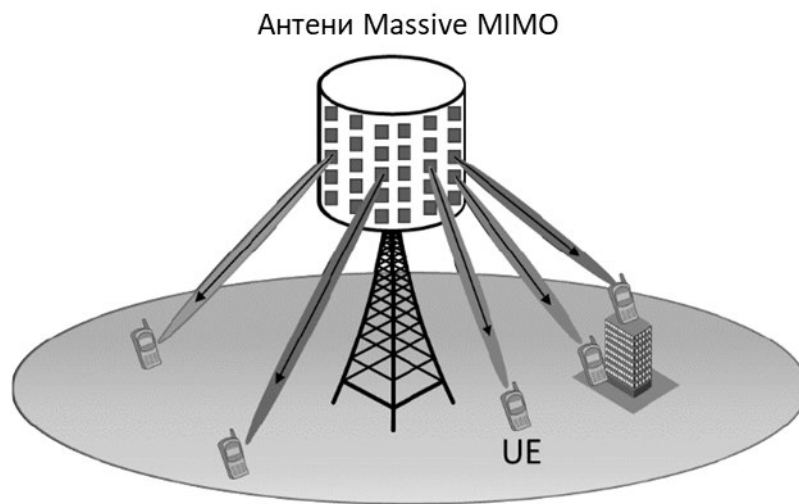


Рисунок 2.4 – Діаграма для BF, щоб показати рульове управління променів

Порівняння між цифровим та аналоговим формуванням променів наведено на рис. 2.5. Є дві основні відмінності. Одна з них полягає в тому, що для цифрового формування променів необхідна цифрова обробка базової смуги, що може дуже ускладнитися в масивній системі MIMO. Інша - кожна антена

потребує власний ВЧ ланцюг у цифровому формуванні променів, що буде дорого і складно, якщо застосовується діапазон mmWave. Таким чином, для масивної системи MIMO пропонується гібридне формування променів.

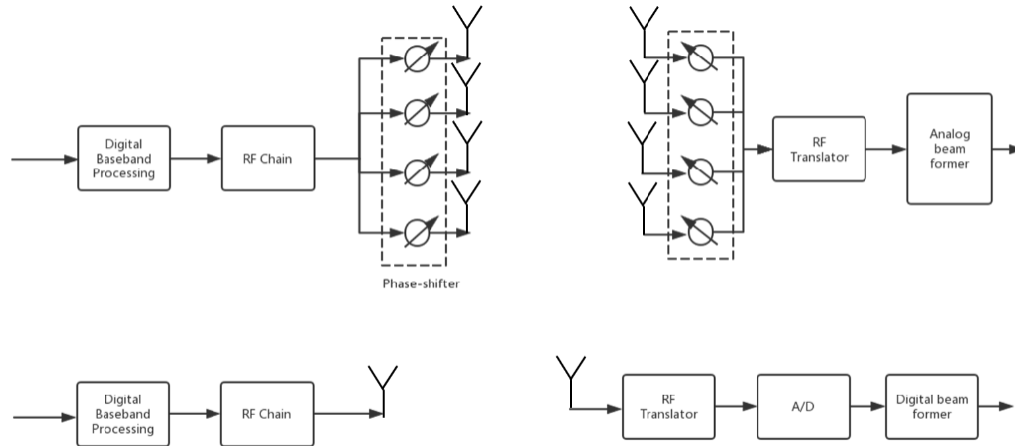


Рисунок 2.5 – Порівняння аналогових та цифрових формувачів променів

Найбільшою перевагою формування променів є обмеження переданого сигналу під потрібним кутом на використання просторових властивостей антен. Отже, розгортання BS може бути набагато щільнішим в порівнянні з одинарною антенною системою, оскільки завади каналу можуть бути придушені. Крім того, формування променів збільшує діапазон передавання сигналу, можливість проникнення в приміщення і можливість експлуатації модуляцій високого порядку. У 3GPP, випуск 15, 3D формування променів дозволяє кожній BS регулювати напрямок променів як за горизонтальним, так і за вертикальним напрямом, підтримуючи до 256 антен. Більше того, мобільний mmWave, що підтримується адаптивним 3D-формуванням променів та променем відстеження, є важливим у 5G NR для забезпечення безперебійної мобільності та надзвичайної пропускної здатності одночасно. Проблема полягає в тому, як дозволити кожній BS швидко керувати своїми променями [12].

2.2 Рішення RAN

2.2.1 Еволюція архітектури мережі

Сценарії міграції від LTE до 5G.

Найбільш затребувана операторами зв'язку стратегія розгортання 5G найімовірніше буде полягати в тривалому спільному існуванні мереж 4-го і 5-го поколінь при максимальному перевикористанні інфраструктури, вузлів і мережевих елементів. Це дозволить операторам модернізувати свої мережі не революційно, а поступово (еволюційно), з одного боку зберігаючи інвестиції в будівництво мереж LTE і широку зону радіопокриття мереж LTE, з іншого - надавати клієнтам нові, що базуються на 5G, послуги в тих зонах, де ці послуги користуються попитом .

З метою реалізації даної стратегії 3GPP запропонував кілька можливих сценаріїв (або опцій) впровадження 4G (LTE) і 5G (NR). Всі опції розділені на дві групи:

Standalone (SA) - передбачають використання тільки однієї технології радіодоступу (LTE або NR - New Radio);

Non-Standalone (NSA) - використання і LTE і NR, що спрощує розгортання мереж 5G на початковому етапі.

Для розгортання 5G за сценарієм Non-Standalone необхідна модернізація базових станцій мережі 4G-LTE до рівня eLTE (або enhanced LTE) з метою підтримки розширеного функціоналу взаємодії з базовими станціями 5G (gNb). Стандартизація даного сценарію (в рамках релізу 15 3GPP) була завершена в січні 2018 р.

Важливим аспектом для реалізації Non-Standalone опцій є концепція подвійного підключення (Dual Connectivity), специфіковані 3GPP в релізі 12, і має на увазі підключення користувачьких терміналів (UE) в стані RRC_CONNECTED одночасно до двох базових станцій (Master eNb і Secondary

eNb). Ключова відмінність Dual Connectivity від агрегації частот полягає саме в підключенні до двох різних базових станцій, пов'язаних за допомогою X2 інтерфейсу, що знаходяться в загальному випадку на різних сайтах.

При цьому можливі дві схеми реалізації:

split bearer - в цій схемі на PDCP рівні потік призначених для користувача даних (user plane) віртуального каналу розщеплюється на два підпотоки в напрямку Master eNb і Secondary eNb відповідно;

switch bearer - в цій схемі потік призначених для користувача даних (user plane) може комутуватися або в напрямку Master eNb, або в напрямку Secondary eNb (без агрегації).

Реалізація Non-Standalone накладає додаткові вимоги до складності користувацьких терміналів (UE), включаючи забезпечення одночасної роботи двох модемів, збільшений розмір буфера прийому і додаткове навантаження на процесорні ресурси рівня PDCP для відновлення порядку проходження пакетів (в разі режиму MCG split bearer). Також потрібно відзначити, що для опцій 3, 4, 7, 8 вноситься додаткова затримка в передаванні пакетів для користувача трафіку за рахунок використання інтерфейсу Xx.

Коротко розглянемо всі визначені 3GPP опції (рис. 2.6) [13].

	Опції											
	1	5	2	6	3	3a	8	8a	4	4a	7	7a
Тип радіодоступу	SA				NSA							
	E-UTRAN		NR		E-UTRAN, NR							
Тип ядра мережі	EPC	NGCN	NGCN	EPC	EPC				NGCN			
Інтерфейс RAN – CN	S1	NG	NG	S1	S1				NG			
eNb → ng-eNb	Нет	Да	-	-	Нет				Да			
Обробка Control Plane	E-UTRA		NR		E-UTRA		NR		NR		E-UTRA	
Розщеплення трафіку	-	-	-	-	eNb	EPC	gNb	EPC	gNb	EPC	eNb	EPC

Рисунок 2.6 – Усі визначені 3GPP опції

Опція 1 - являє собою реалізацію класичної виділеної мережі LTE на базі ядра EPC і базових станцій eNb (відповідно до 14-го або більш ранніх релізів 3GPP). Використовується в географічних зонах, де 5G сервіси не затребувані.

Опція 5 - актуальна при новому будівництві виділеної мережі LTE (greenfield) з можливістю подальшої модернізації до комбінованої мережі 5G/LTE (Опція 4/4a). Використовується ядро NGCN і модернізовані базові станції мережі радіодоступу E-UTRAN ng-eNb.

Опція 2 - являє собою цільову фінальну архітектуру виділеної 5G мережі на базі ядра мережі NGCN і базових станцій gNb. Використовується в географічних зонах, де мережі LTE відсутні і їх будівництво недоцільно.

Опція 6 - може використовуватися при будівництві виділеної мережі 5G, але на базі існуючого ядра мережі LTE (EPC), наприклад, при розгортанні тестових зон, або як проміжний етап на шляху до цільової архітектури 5G в географічних зонах, де мережі LTE відсутні і їх будівництво недоцільно (Опція 2).

Опція 3/3a - актуальна на ранніх етапах будівництва 5G (у вигляді точкового радіопокриття) в географічних зонах, де вже розгорнуті мережі 4G-LTE. Не потребує впровадження ядра NGCN (використовується ядро мережі LTE - EPC). Базується на технології подвійного підключення. Як інтерфейс, що зв'язує мережі радіодоступу E-UTRA/NR і EPC, і переносить трафік користувача (User Plane) і сигнальний (Control Plane) трафік використовується S1. Якірною точкою для термінації S1-MME є базові станції мережі радіодоступу E-UTRAN (eNb).

Опція 8/8a - може використовуватися як проміжний етап на шляху до цільової архітектури 5G/LTE від Опції 3/3a до Опції 4/4a. На відміну від Опції 3/3a якірною точкою для термінації S1-MME є базові станції мережі радіодоступу NR (gNb).

Опція 4/4a - являє собою цільову фінальну архітектуру комбінованої мережі 5G/LTE. Використовується технологія подвійного підключення. Вимагає впровадження ядра NGCN і модернізації базових станцій мережі LTE до ng-eNb. Базується на технології подвійного підключення. Як інтерфейс, що зв'язує мережі радіодоступу E-UTRA/NR і NGCN, і переносить трафік користувача (User Plane)

і сигнальний (Control Plane) трафік використовується NG. Якірною точкою для термінації NG-C є базові станції мережі радіодоступу NR (gNb).

Опція 7/7a - може використовуватися як проміжний етап на шляху до цільової архітектури 5G/LTE Опція 4/4a, на відміну від якої якірною точкою для термінації NG-C є базові станції мережі радіодоступу E-UTRAN (eNb).

Можливі сценарії впровадження мереж 5G показані на рис. 2.7.

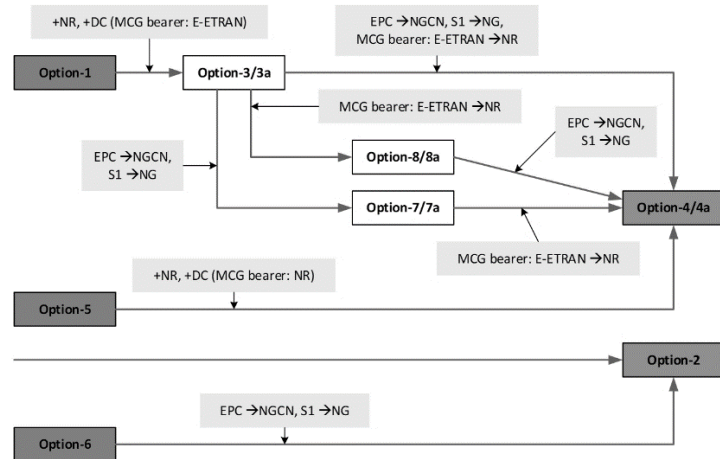


Рисунок 2.7 – Можливі сценарії впровадження мереж 5G

Опція 1:

- використовується ядро мережі LTE (EPC);
- термінал (UE) має підключення тільки до мережі радіодоступу E-UTRA.

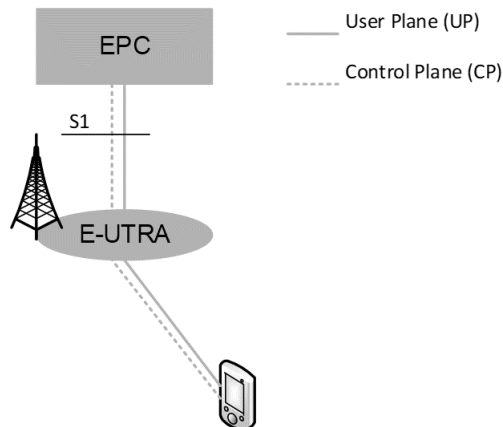


Рис. 2.8 – Опція 1

Опція 2:

- використовується ядро мережі 5G (NGCN - NextGenCore);
- термінал (UE) має підключення тільки до мережі радіодоступу 5G NR.

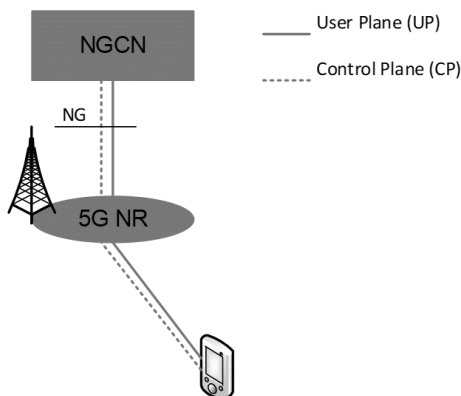


Рис. 2.9 – Опція 2

Опція 3:

- використовується ядро мережі LTE (EPC);
- термінал (UE) має подвійне підключення до 5G NR і E-UTRA;
- сигнальний трафік (Control Plane - CP) обробляється виключно на eNb;
- точкою розщеплення призначеного для користувача трафіку (User Plane - UP split bearer) є eNb;
- призначений для користувача трафік передається по двох маршрутах: EPC<-->eNb<-->UE і EPC<-->eNb<-->gNb<-->UE;
- інтерфейс Xx використовується для перенесення трафіку Control Plane і 5G User Plane.

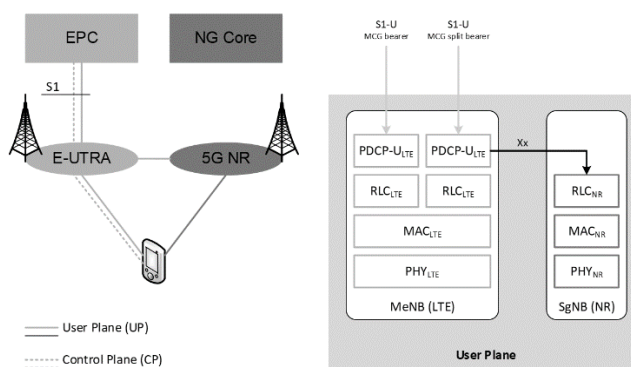


Рис. 2.10 – Опція 3

Опція 3а:

- використовується ядро мережі LTE (EPC);
- термінал (UE) має подвійне підключення до 5G NR і E-UTRA;
- сигнальний трафік (Control Plane - CP) обробляється виключно на eNb;
- точкою розщеплення призначеного для користувача трафіку (User Plane - UP split bearer) є EPC;
- призначений для користувача трафік передається по двох маршрутах: EPC<-->eNb<-->UE і EPC<-->gNb<-->UE;
- інтерфейс Xx використовується для перенесення трафіку тільки Control Plane.

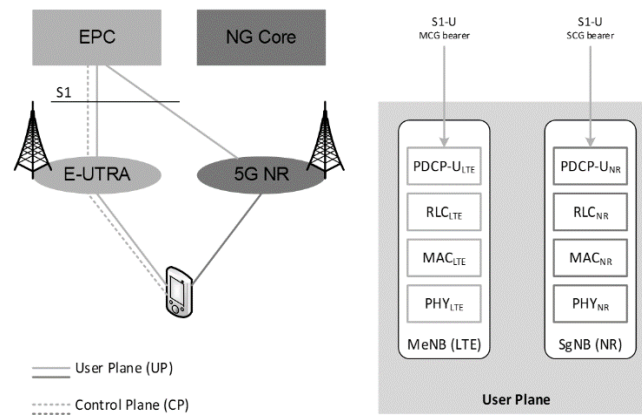


Рис. 2.11 – Опція 3а

Опція 4:

- використовується ядро мережі 5G (NGCN);
- термінал (UE) має подвійне підключення до 5G NR і E-UTRA;
- сигнальний трафік (Control Plane - CP) обробляється виключно на gNb;
- точкою розщеплення призначеного для користувача трафіку (User Plane - UP split bearer) є gNb;
- призначений для користувача трафік передається по двох маршрутах: NGCN<-->gNb<-->UE і NGCN<-->gNb<-->eNb<-->UE;

- інтерфейс Xx використовується для перенесення трафіку Control Plane і LTE User Plane.

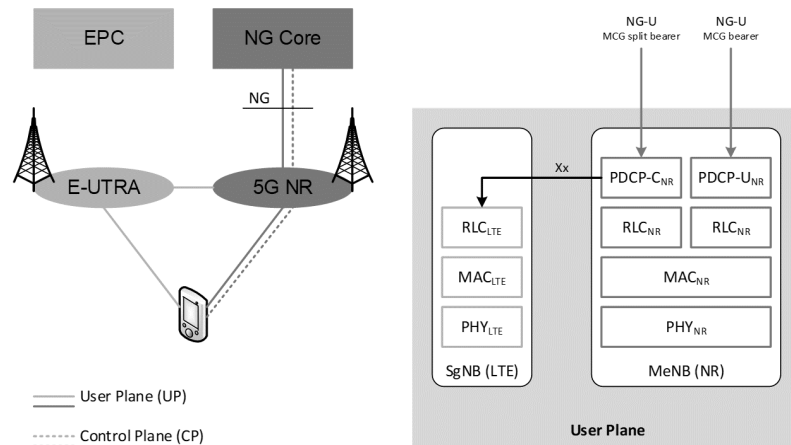


Рис. 2.12 – Опція 4

Опція 4а:

- використовується ядро мережі 5G (NGCN);
- термінал (UE) має подвійне підключення до 5G NR і E-UTRA;
- сигнальний трафік (Control Plane - CP) обробляється виключно на gNb;
- точкою розщеплення призначеного для користувача трафіку (User Plane - UP split bearer) є NGCN;
- призначений для користувача трафік передається по двох маршрутах: NGCN □ gNb □ UE і NGCN □ eNb □ UE;
- інтерфейс Xx використовується для перенесення трафіку тільки Control Plane.

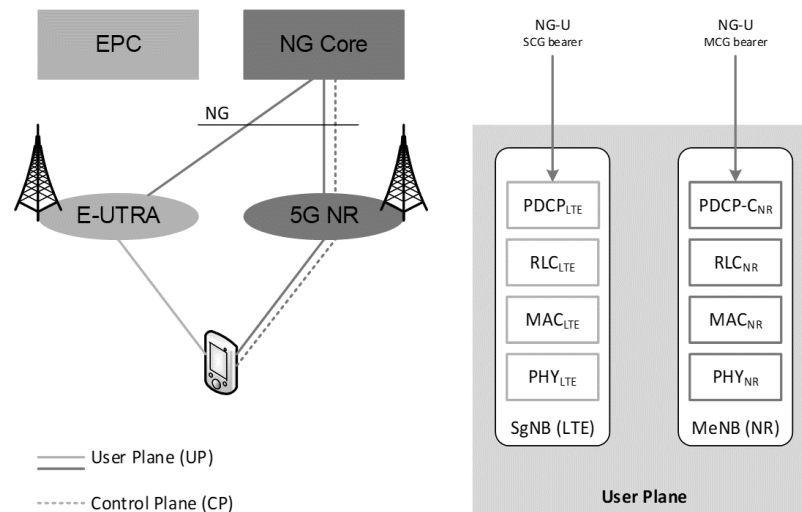


Рис. 2.13 – Опція 4а

Опція 5:

- використовується ядро мережі 5G (NGCN - NextGenCore);
- термінал (UE) має підключення тільки до мережі радіодоступу E-UTRA.

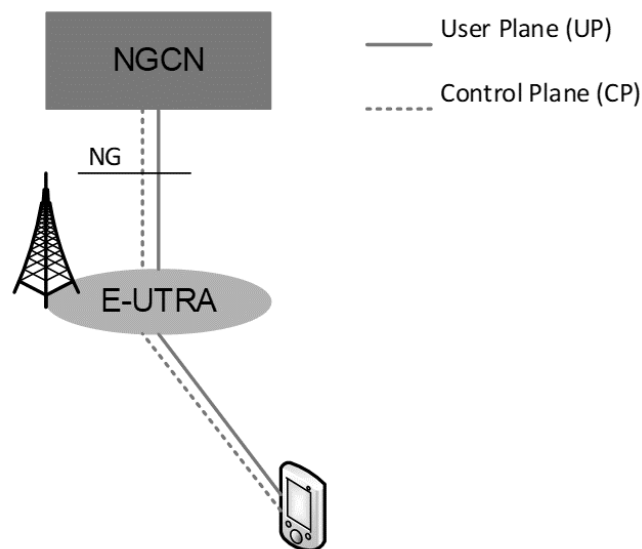


Рис. 2.14 – Опція 5

Опція 6:

- використовується ядро мережі LTE (EPC);
- термінал (UE) має підключення тільки до мережі радіодоступу 5G NR.

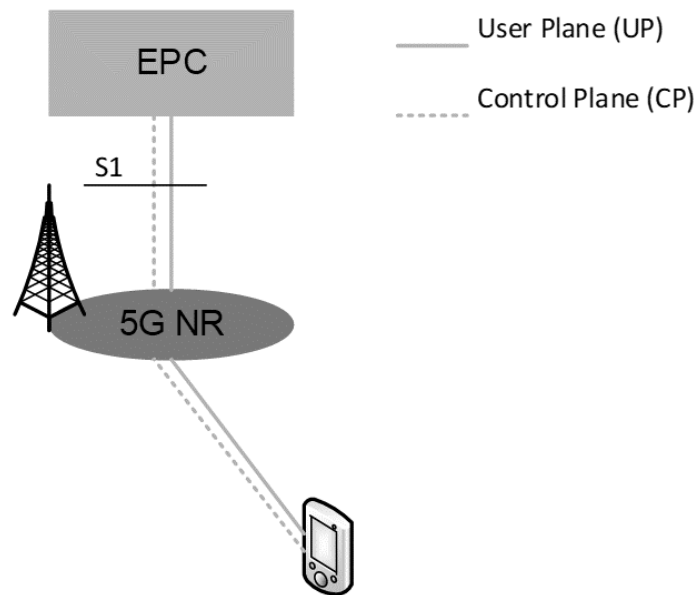


Рис. 2.15 – Опція 6

Опція 7:

- використовується ядро мережі 5G (NGCN - NextGenCore);
- термінал (UE) має подвійне підключення до 5G NR і E-UTRA;
- сигнальний трафік (Control Plane - CP) обробляється виключно на eNb;
- точкою розщеплення призначеного для користувача трафіку (User Plane - UP split bearer) є eNb;
- призначений для користувача трафік передається по двох маршрутах: NGCN<-->eNb<-->UE і NGCN<-->eNb<-->gNb<-->UE;
- інтерфейс Xx використовується для перенесення трафіку Control Plane і 5G User Plane.

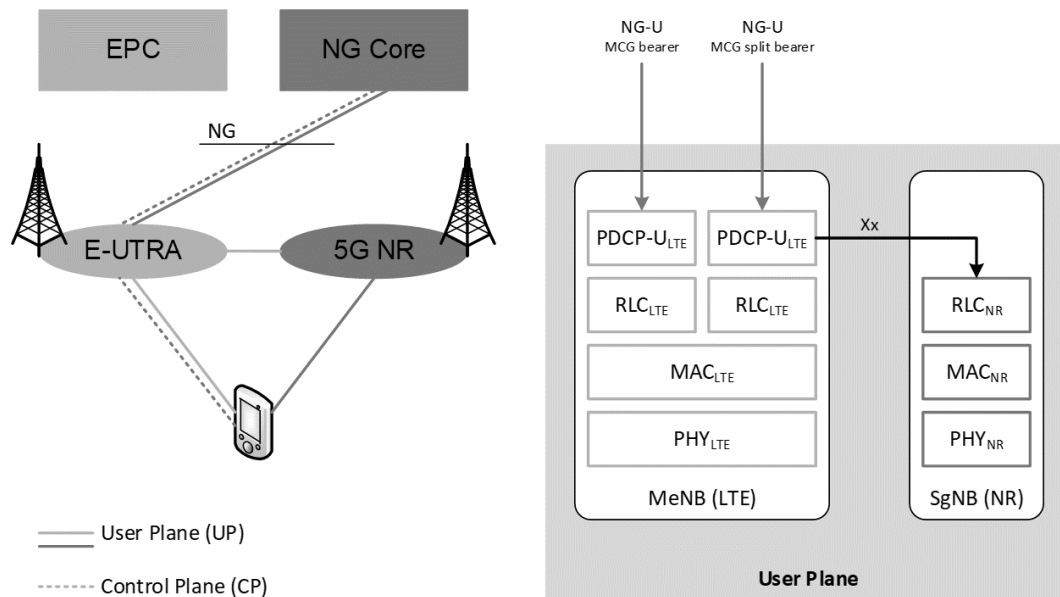


Рис. 2.16 – Опція 7

Опція 7а:

- використовується ядро мережі 5G (NGCN - NextGenCore);
- термінал (UE) має подвійне підключення до 5G NR і E-UTRA;
- сигнальний трафік (Control Plane - CP) обробляється виключно на eNb;
- точкою розщеплення призначеного для користувача трафіку (User Plane - UP split bearer) є EPC;
- призначений для користувача трафік передається по двох маршрутах: NGCN<->eNb<->UE і NGCN<->gNb<->UE;
- інтерфейс Xx використовується для перенесення трафіку тільки Control Plane.

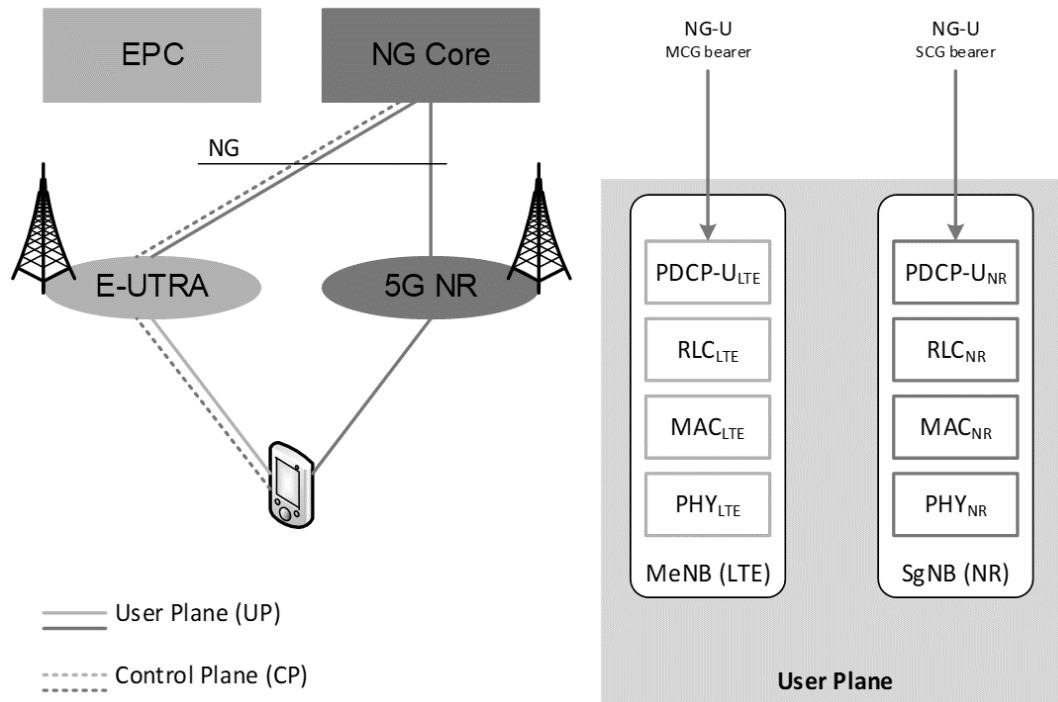


Рис. 2.17 – Опція 7а

Опція 8:

- використовується ядро мережі LTE (EPC);
- термінал (UE) має подвійне підключення до 5G NR і E-UTRA;
- сигнальний трафік (Control Plane - CP) обробляється виключно на gNb;
- точкою розщеплення призначеного для користувача трафіку (User Plane - UP split bearer) є gNb;
- призначений для користувача трафік передається по двох маршрутах: EPC<-->gNb<-->UE і EPC<-->gNb<-->eNb<-->UE;
- інтерфейс Xx використовується для перенесення трафіку Control Plane і LTE User Plane.

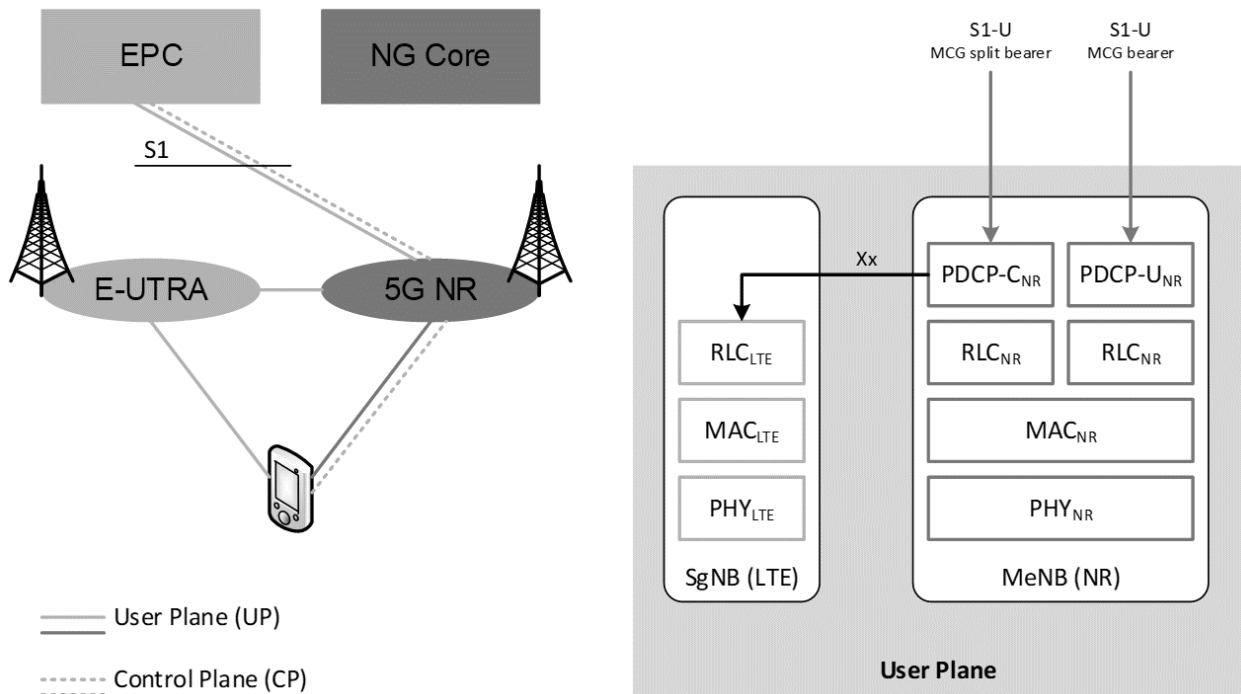


Рис. 2.18 – Опція 8

Опція 8а:

- використовується ядро мережі LTE (EPC);
- термінал (UE) має подвійне підключення до 5G NR і E-UTRA;
- сигнальний трафік (Control Plane - CP) обробляється виключно на gNb;
- точкою розщеплення призначеного для користувача трафіку (User Plane - UP split bearer) є EPC;
- призначений для користувача трафік передається по двох маршрутах: EPC ↔ gNb ↔ UE і EPC ↔ eNb ↔ UE;
- інтерфейс Xx використовується для перенесення трафіку тільки Control Plane [13].

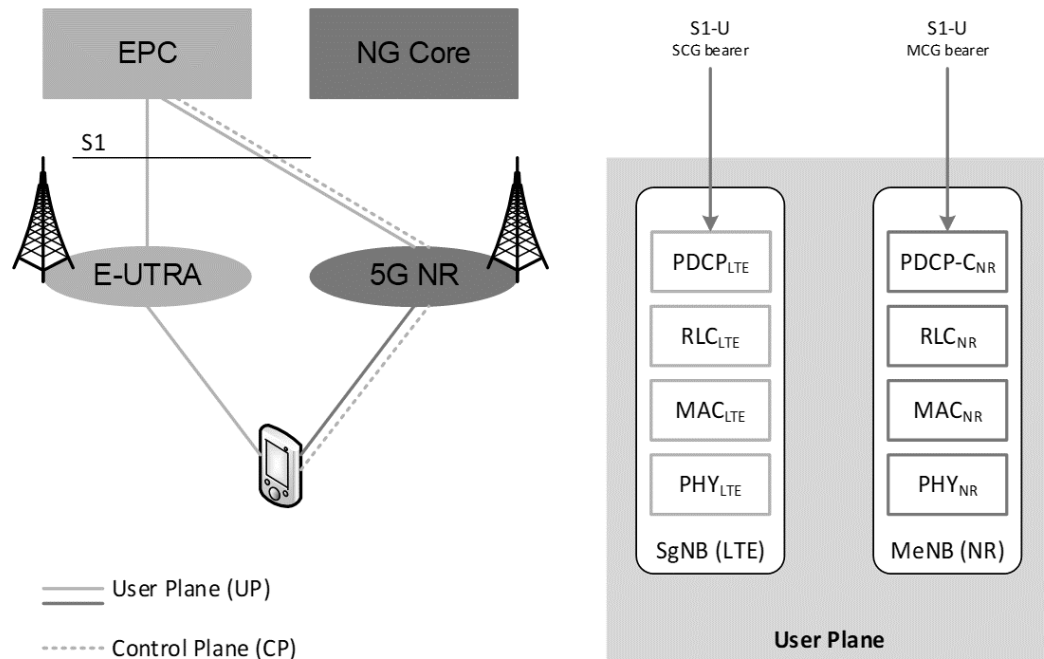


Рис. 2.19 – Опція 8a

2.2.2 Удосконалені антенні системи для мереж 5G

Нещодавні технологічні розробки зробили вдосконалені антенні системи (AAS) життєздатним варіантом для широкомасштабного розгортання в існуючих 4G та майбутніх 5G мережах. AAS забезпечує найсучасніші технології формування променів та MIMO, які є потужними інструментами для поліпшення досвіду кінцевих користувачів, ємності та покриття. Як результат, AAS значно покращує продуктивність мережі як в висхідній, так і в нисхідній лінії зв'язку. Пошук найбільш підходящих варіантів AAS для досягнення приросту продуктивності та економічної ефективності в конкретному розгортанні мережі вимагає розуміння характеристик як AAS, так і функцій багатоантенних систем.

Багатоантенні методи. Багатоантенні методи, які тут називають функціями AAS, включають формування променів (Beamforming) та MIMO. Такі функції вже використовуються у звичайних системах сучасних мереж LTE. Застосування функцій AAS до радіостанції AAS призводить до значного

збільшення продуктивності завдяки вищим ступеням свободи, що забезпечуються більшою кількістю RF-ланцюгів, які також називають Massive MIMO.

Beamforming. Під час передавання сигналу, формування променів - це здатність направляти радіоенергію через радіоканал до конкретного приймача, як показано у верхньому лівому квадранті рис 2.20. Регулюючи фазу та амплітуду переданих сигналів, може бути досягнуто конструктивне додавання відповідних сигналів на приймачі UE, що збільшує силу прийнятого сигналу і, отже, пропускну здатність для кінцевого користувача. Таким чином, при отриманні, формування променів - це здатність збирати енергію сигналу від конкретного передавача. Промені, сформовані AAS, постійно пристосовуються до оточення, щоб забезпечити високі показники як UL, так і DL. На рис. 2.20 представлено принцип формування променів та MIMO (різними кольорами позначено промені, що передають різні потоки).

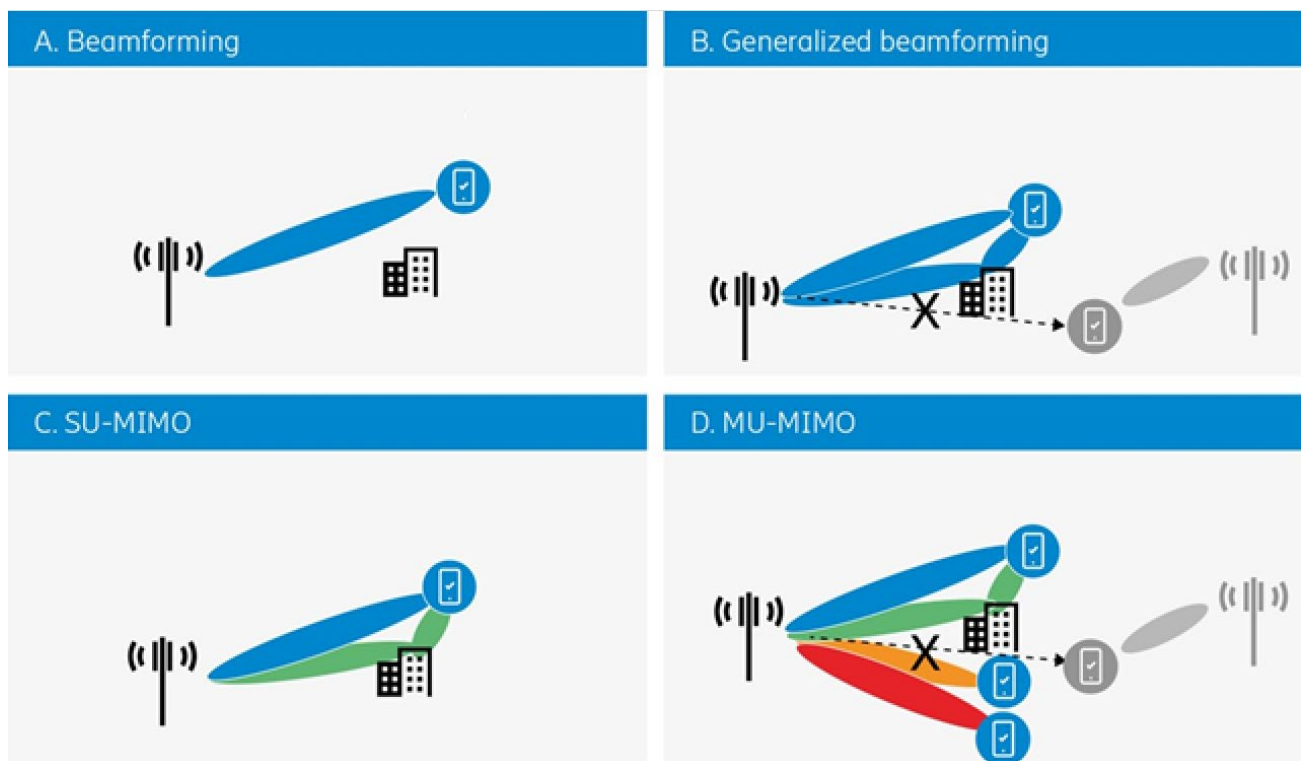


Рисунок 2.20 – Формування променів та MIMO

Хоча часто це дуже ефективно, але передавання енергії лише в одному напрямку не завжди забезпечує оптимальне рішення. У сценаріях багатопроменевого передавання, коли радіоканал містить безліч шляхів розповсюдження від передавача до приймача через дифракцію навколо кутів та відбиття від будівель чи інших об'єктів, корисно надсилати один і той же потік даних кількома різними шляхами (напрям та/або поляризація) з фазами та амплітудами, керованими таким чином, щоб вони конструктивно додавались у приймачі [5]. Це називають загальним формуванням променів, як показано у верхньому правому квадранті на рис 2.20. Зокрема загальне формування променів, також може зменшити завади для інших UE, відоме як нульове формування. Це досягається контролем переданих сигналів таким чином, що вони відмінюють один одного на заважаючих UE. [14].

Структура масиву антени.

Методом використання прямокутної антенної решітки, як показано на рис. 2.21 А посилення досягається як в UL, так і в DL, завдяки конструктивному поєднанню сигналів від ряду елементів антени. Чим більше елементів антени, тим вищий коефіцієнт підсилення. Керованість досягається шляхом індивідуального контролю амплітуди та фази менших частин антенної решітки. Зазвичай це робиться шляхом розділення антенної решітки на так звані підрешітки (групи елементів, що не перекриваються), як показано на рис. 2.21 С та увімкнувши управління, як показано на рис. 2.21 D. Таким чином можна керувати напрямком та іншими властивостями створених антенних променів.

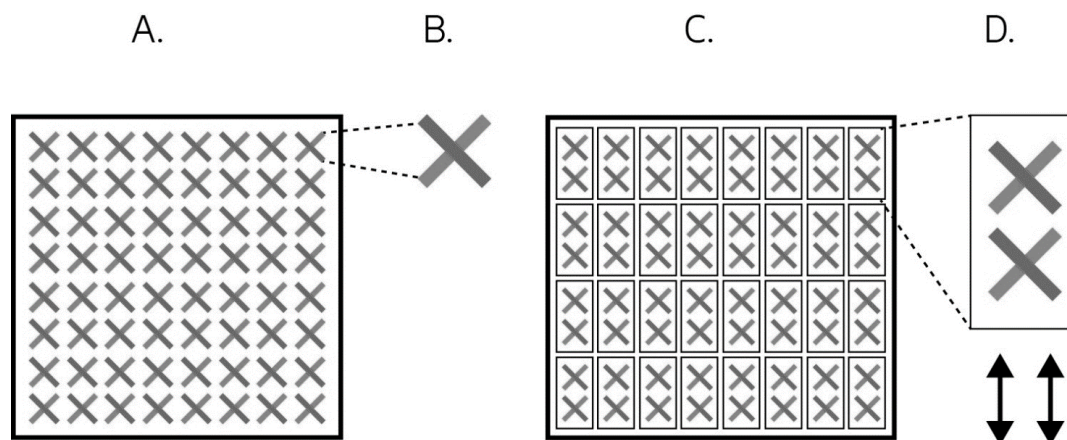


Рисунок 2.21 – Типова антенна решітка (A) складається з рядків і стовпців окремих X-поляризованих антенних елементів (B). Антенні решітки можна розділити на підмасиви (C), причому кожен підмасив (D) підключений до двох RF-ланцюгів, як правило, по одному на поляризацію.

Щоб зрозуміти, як антенна решітка створює керовані промені з високим коефіцієнтом посилення, почнемо з антенної решітки певного розміру, яка потім ділиться на підматриці різних розмірів. Для ілюстративних цілей опишемо лише один вимір. Однак, як до вертикальних, так і до горизонтальних розмірів застосовуються однакові принципи.

Підсилення масиву називається підсиленням, досягнутим, коли всі сигнали підмасиву додаються конструктивно (по фазі). Розмір підсилення масиву щодо підсилення одного підмасиву залежить від кількості підмасивів - наприклад, два підмасиви дають коефіцієнт підсилення масиву 2 (тобто 3 дБ). Змінюючи певним чином фази сигналів підмасиву, цього коефіцієнта підсилення можна досягти в будь-якому напрямку, як показано на рис. 2.22 А.

Кожен підмасив має певну діаграму направленості, що описує коефіцієнт підсилення в різних напрямках. Коефіцієнт підсилення та ширина променів

залежать від розміру підматриці та властивостей окремих елементів антени. Існує компроміс між коефіцієнтом підсилення підмасиву і шириною променів - чим більший підмасив, тим вищий коефіцієнт підсилення і вужча ширина променів, як показано на рис. 2.22 В.

Сумарний коефіцієнт підсилення антени є добутком коефіцієнта підсилення масиву та коефіцієнта підсилення підматриці, як показано на рис. 2.22 С. Загальна кількість елементів визначає максимальний коефіцієнт підсилення, а розподіл підматриці дозволяє спрямовувати пучки високого коефіцієнта підсилення. Більше того, схема випромінювання підматриці визначає оболонку вузьких променів (пунктирна форма в розрізі на рис. 2.22 С). Це впливає на вибір структури антенної решітки в реальному сценарії розгортання з конкретними вимогами до покриття. Оскільки кожен підмасив, як правило, підключений до двох RF-ланцюгів, і кожен RF-ланцюг пов'язаний із втратами додаткових компонентів, важливо враховувати переваги продуктивності додаткової керованості при виборі економічно ефективної структури масиву.

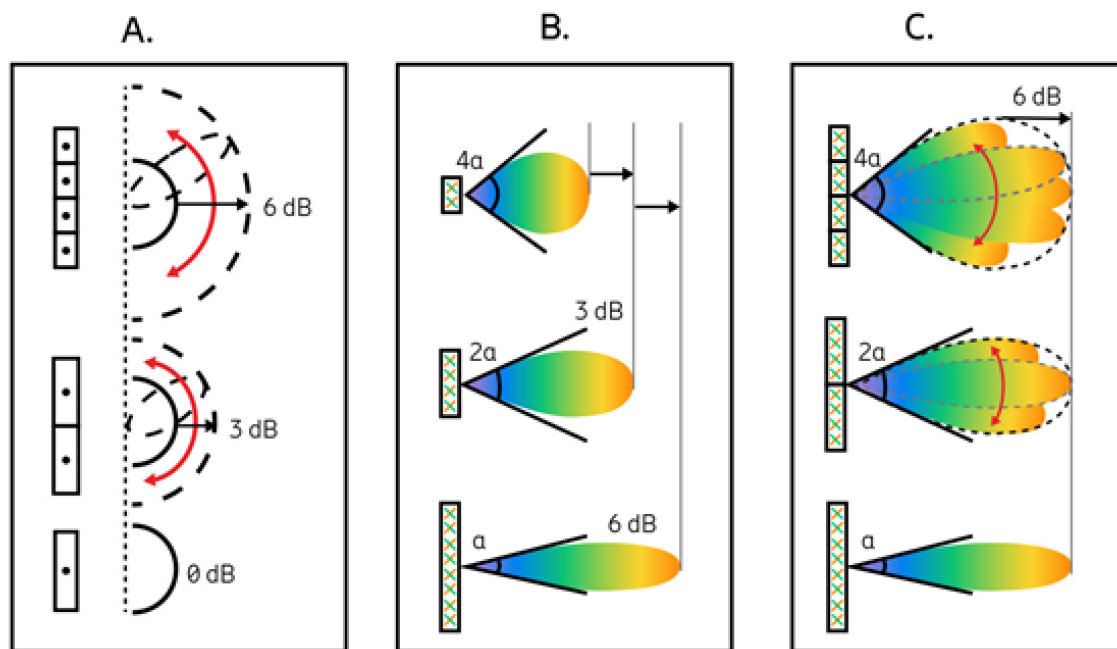


Рисунок 2.22 – Масив підрешіток, що підтримують високий загальний коефіцієнт підсилення та керованості антени

Для визначення найбільш оптимальної та економічно ефективної конфігурації AAS для конкретного сценарію розгортання, необхідно поєднання знань про сценарій, можливих обмежень майданчика та доступних функцій AAS, зокрема необхідності вертикальної керованості променів, застосовності формування променів на основі взаємності і виграш від MU-MIMO.

2.2.3 Вибір рішення M-MIMO для типових сценаріїв розгортання 5G

Розглянемо три типові випадки використання, які ілюструють різні аспекти розгортання AAS: сільська/приміська місцевість, міська малоповерхова забудова та щільна міська висотна забудова. Сценарії, включаючи відповідні характеристики, відповідні конфігурації AAS та потенціал продуктивності, зображені на рисунку 2.23.

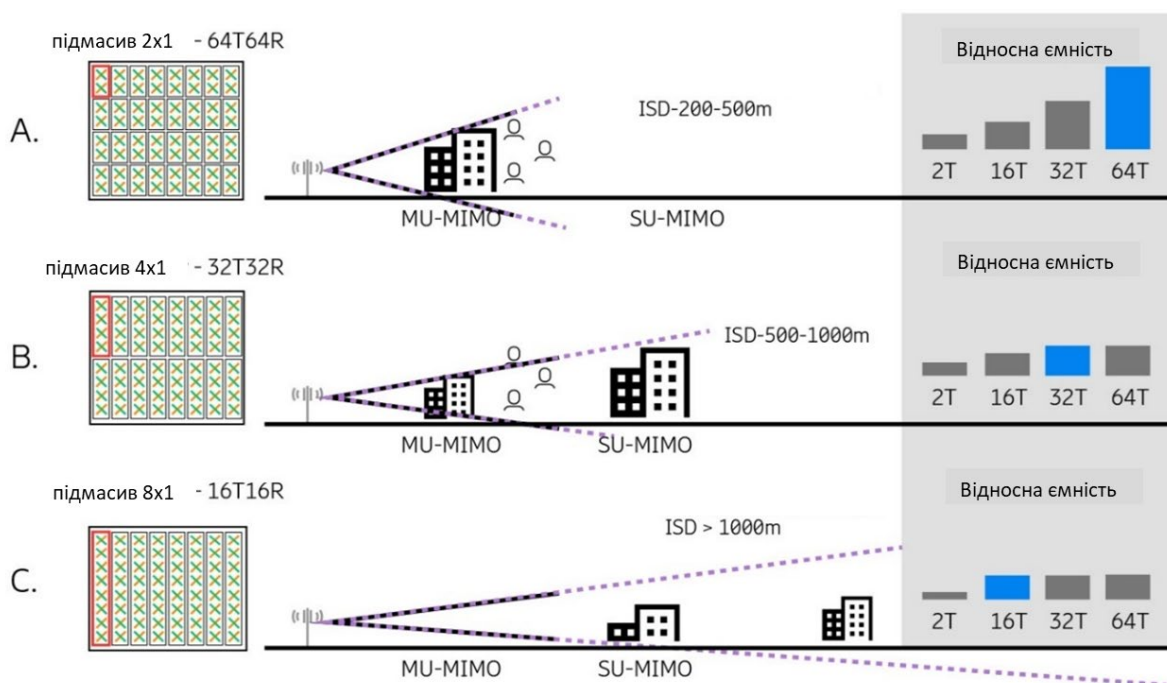


Рисунок 2.23 – Відповідні конфігурації AAS, схематичні діапазони використання MU-MIMO та SU-MIMO, а також типовий приріст потужності в різних сценаріях розгортання

Сценарій розгортання №1: щільна міська багатоповерхова забудова.

Як показано на рис. 2.23 А, сценарій щільної міської багатоповерхової забудови характеризується висотними будинками, короткими відстанями між об'єктами (ISD) 200 500 м, великим обсягом трафіку та високою щільністю абонентів при значному розподілі користувачів у вертикальній площині. Основним драйвером розвитку мережі є збільшена пропускна здатність або еквівалентно висока пропускна здатність кінцевого користувача для даного навантаження.

Для звичайних систем без можливості формування променів, таких як 2T2R, вертикальний розподіл користувачів у поєднанні з малим ISD створює ситуацію, коли багато користувачів перебувають за межами головного променя діаграми направленості сектора найближчого базової станції. Разом із високою щільністю ділянки це призводить до ситуації, коли сигнали від інших базових станцій, є досить сильними, що призводить до значного зменшення співвідношення сигнал-шум.

Бажані характеристики AAS у сценарії щільної міської багатоповерхової забудови включають зону обслуговування антени, достатньо велику, щоб забезпечити достатнє покриття (швидкість передавання даних UL на краю стільника). Крім того, діапазон вертикального покриття повинен бути достатньо великим, щоб охопити вертикальний розподіл користувачів. Для цього потрібні невеликі підмасиви, які мають широку діаграму направленості у вертикальній площині. Розподіл антени на невеликі підрешітки призводить до отримання променів із високим коефіцієнтом підсилення, які можна спрямовувати під великим діапазоном кутів, і ефективно вирішує проблеми завад, які спостерігаються у звичайних системах. AAS повинна мати достатню кількість RF-ланцюгів для підтримки відносно великої кількості підмасивів. Хороше покриття та великий розподіл користувачів означають, що потенціал формування променів на основі взаємності та MU-MIMO з відносно великою кількістю

мультиплексованих користувачів є високим, і AAS повинна підтримувати ці методи. Компроміс між складністю та продуктивністю можна досягти за допомогою 64 RF-ланцюгів, що контролюють малі підмасиви. Наприклад, Huawei AAU5613 (рис. 2.24).



Рисунок 2.24 – Зовнішній вигляд і параметри AAU5613

Сценарій розгортання №2: Міська малоповерхова забудова.

Сценарій міської малоповерхової забудови, проілюстрований на рис. 4 В, найбільш поширений у світі, включаючи околиці багатьох великих міст. Базові станції, як правило, розміщені на дахах, відстань між ними становить кілька сотень метрів. Порівняно із сценарієм щільної міської багатоповерхової забудови, об'єм трафіку на одиницю площі нижче. Як правило, існує сукупність типів будівель, що створює багатопрорізне поширення між AAS та UE. Максимізація площі покриття є важливою для поліпшення швидкості передавання даних в UL на краю стільника, особливо для більш високочастотних смуг, що використовують TDD. Через більші ISD та зменшення вертикального розподілу користувачів (нижчі будівлі) діапазон вертикального покриття може бути зменшений порівняно з щільною міською забудовою; отже, можна використовувати більші вертикальні підмасиви, і менше підсилення для вертикального формування променів. Використання більших підрешіток антени для даної області означає, що потрібно менше RF-ланцюгів. Горизонтальне формування променів є дуже ефективною функцією, що забезпечує велике

підсилення. Схеми формування променів, що базуються на взаємності, будуть працювати для більшості користувачів, але будуть користувачі з поганим покриттям, яким потрібно покластися на такі методи, як формування променів на основі зворотного зв'язку. MU MIMO також підходить при великих навантаженнях завдяки багатопробному середовищу поширення, хорошій якості зв'язку та можливостям сполучення UE. Компромісом між складністю та продуктивністю є AAS з кількістю RF-ланцюгів 16 до 32. Наприклад, Huawei AAU5313 (рис. 2.25).

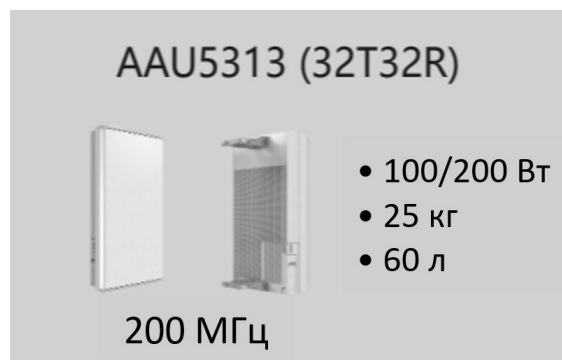


Рисунок 2.25 – Зовнішній вигляд і параметри AAU5313

Сценарій розгортання №3: Сільський/приміський.

Сільські та заміські макросценарії, які зображено на рис. 4 С, характеризуються базовими станціями на дахах або баштах з відстанню між ними від одного до декількох кілометрів, низькою або середньою щільністю населення та дуже малим вертикальним розподілом користувачів. Цей сценарій вимагає AAS з великою площею покриття і можливістю підтримувати горизонтальне формування променів. Однак вертикальне формування променів не дає значних переваг, оскільки вертикальний розподіл користувачів низький. Тому доречні великі вертикальні підмасиви з малими зонами вертикального покриття. Формування променів на основі взаємності підтримується для меншої частки користувачів, ніж в інших сценаріях, і приріст MU MIMO є більш обмеженим.

Компромiсом мiж складнiстю та продуктивнiстю є ААS з кiлькiстю RF-ланцюгiв вiд 8 до 16. Наприклад, Huawei AAU5258 (рис. 2.26).



Рисунок 2.26 – Зовнiшнiй вигляд i параметри AAU5258

2.2.4 5G AAU – Порiвняння

Детальнiше порiвняємо обладнання AAU ранiше розглянутих типiв (табл. 2.1)

Таблиця 2.1 – Порiвняння обладнання AAU Huawei

Параметр	AAU5613 (64T64)	AAU5313 (32T32R)	AAU5310 (32T32R)
Дiапазон частот, ГГц	3.4 - 3.8	3.4 - 3.8	3.4 - 3.8
TRX	64T64R	32T32R	32T32R
IBW, МГц	200	200	100
Вихiдна потужнiсть, Вт	200	200	100
EIRP, дБм	77	77	77
Вага, кг	45	32	27
Розмiри, мм	795 x 395 x 220	699 x 395 x 220	699 x 395 x 130
Споживана потужнiсть, Вт	1200	1000	650
Розсiювання тепла	Пасивне охолодження	Пасивне охолодження	Пасивне охолодження

Висновки до розділу

1. Найімовірніше, первинним сценарієм розгортання мережі 5G NR на ранній стадії в Україні буде сценарій щільної міської багатоповерхової забудови, оскільки доцільно починати встановлювати базові станції gNb в місцях, де LTE мережа перевантажена, тобто в центрах великих міст.

2. Для підтримки балансу покриття та ємності в умовах щільної міської забудови оптимальним рішенням RAN є використання удосконалених антенних систем з можливістю формування променів та MIMO 64T64R.

3. ВИМОГИ ДО ПЛАНУВАННЯ МЕРЕЖІ ДОСТУПУ 5G NR

У Розділі 2 ми аналізуємо вимоги до планування мережі доступу 5G NR з точки зору середовища моделювання, моделювання поширення радіохвиль та моделювання системи 5G NR.

3.1 Моделювання середовища 5G NR

З метою зменшення вартості та часу впровадження мереж 5G NR, міського середовища де буде розгорнуто 5G NR, потрібно точно моделювати. Це головним чином тому, що на mmWave сигнали впливатимуть дрібні предмети, такі як дерева, рослинність, вуличні меблі, транспортні засоби, натовп та ін. Крім того, 5G NR буде більше інтегрований з їх робочим середовищем, наприклад, SC BS будуть встановлені під вершинами даху та на вуличних меблях, антени інтегровані в будівельні конструкції та вузли IoT вбудовані в стіни, дороги тощо.

Точне моделювання робочих середовищ 5G NR включає: 3D векторні дані міських вулиць ГІС з високою роздільною здатністю; 3D будівельна структура та властивості електромагнітних матеріалів (EM) для indoor та безперебійна інтеграція зовнішніх ГІС та внутрішніх 3D-будівельних моделей.

3.1.1 Геоінформаційна система (ГІС)

ГІС широко використовується для інструментів планування зовнішніх радіомереж з 1990-х років. ГІС забезпечує декілька шарів інформації для планування радіомереж, включаючи місцевість, шум і векторні дані (наприклад, для будівель). Необхідна роздільна здатність ГІС зросла з 20м до 5м для 2G - 4G планування радіомережі.

Для планування мережі 5G NR для виявлення таких об'єктів, як дерева, рослинність, вуличні меблі (наприклад, ліхтарних стовпів), будинків, потрібні 3D-дані з роздільною здатністю 1м або вище (наприклад, 0,1м або 0,4м) для планування 5G NR. Це проілюстровано на рис 3.1.

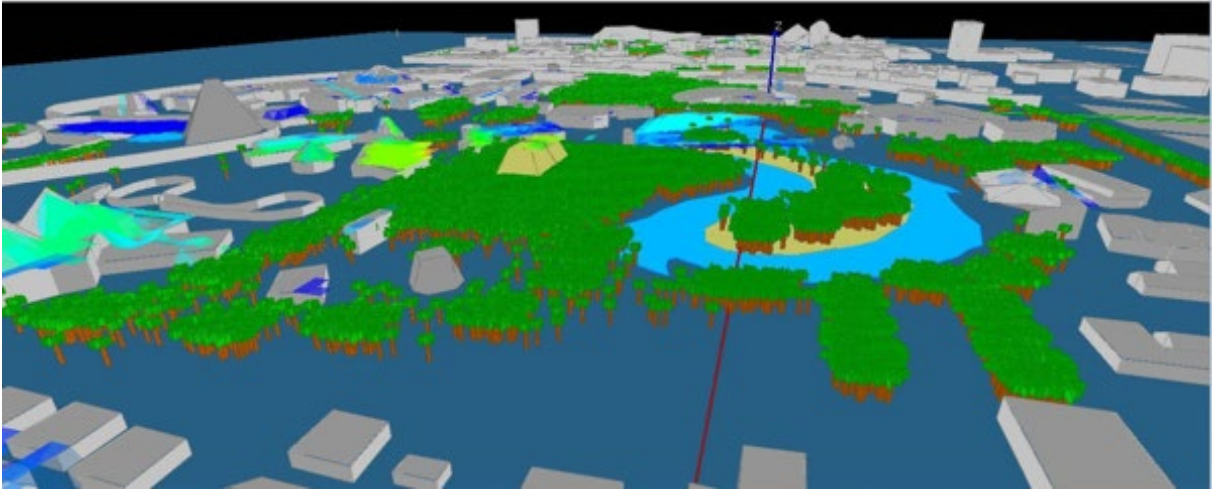


Рисунок 3.1 – Відкритий ГІС з рослинністю (знімок екрану Ranplan Professional)

3.1.2 3D-моделі забудови

На сьогоднішній день понад 80% мобільного трафіку знаходиться в приміщенні. Прогнозоване експоненціальне зростання мобільного трафіку в 1000 разів у наступному десятилітті не є рівномірним для усіх географічних районів і в основному спостерігається в «гарячих» точках, які зазвичай знаходяться у забудованих приміщеннях, таких як Центральний діловий район(CBD), станції, аеропорти, торгові центри тощо.

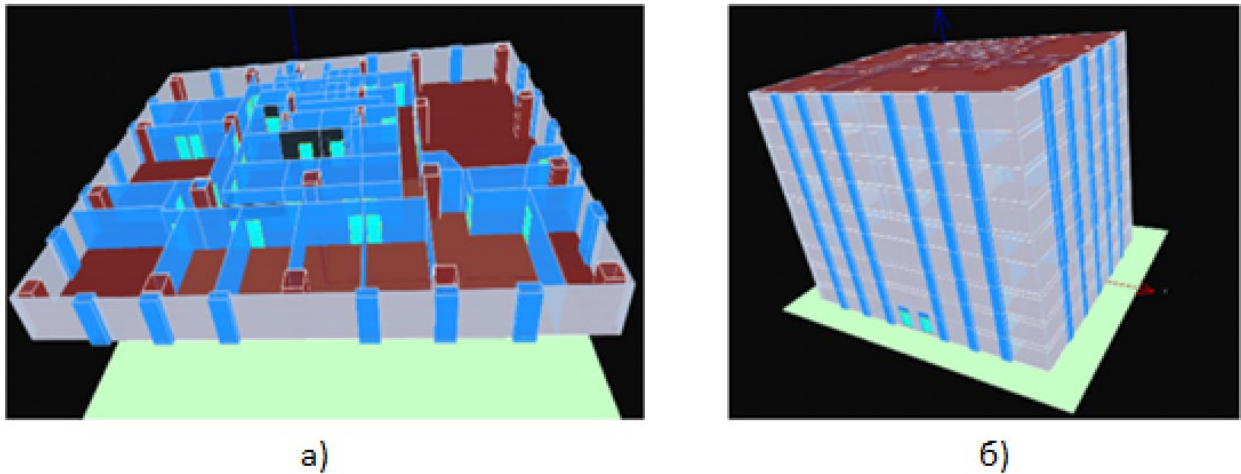


Рисунок 3.2 – 3D модель приміщень

У мобільних мережах 2G/3G/4G більша частина внутрішнього мобільного трафіку обслуговується зовнішніми макроелементами. Однак це стане неможливим в епоху 5G, оскільки 5G використовуватиме більш високі частоти, які погано проникають в будівлі. За оцінками, понад 80% внутрішнього трафіку (тобто, приблизно $2/3$ від загального трафіку) буде обслуговуватися мобільними мережами, встановленими в будинках. Для того, щоб ефективно розгортати SC, DAS в приміщенні, потрібні точні 3D-моделі забудови. 3D моделі будуть мати: 1) будівельні конструкції з елементами стін, дверей, вікон, колон; та 2) цілі 3D-моделі будівель як показано на рис. 3.2.

Оскільки властивості ЕМ будівельного матеріалу різні для різних частот, їх потрібно вимірювати для діапазону частот, в якому буде працювати 5G NR. Вимірювання властивостей ЕМ будівельного матеріалу для mmWave смуги особливо складні через ефект дифузного відбиття, так як шорсткість поверхні матеріалу порівнянна з довжиною хвилі носія. Властивості ЕМ будівельного матеріалу повинні зберігатись в базі даних, як показано на рис 3.3.

The screenshot shows the 'Material DB Management' application window. On the left is a tree view with categories like Concrete, Glass, Metal, Plaster, Plastic, Stone, and Wood. The main area displays a table with columns: Name, Direction, Min, Max, Units, and Properties. Below the table is a 'Property' section with columns: Category, Name, Value, Unit, and Mode. Buttons for 'Reset' and 'Apply' are at the bottom right, and a 'Count: 24' indicator is at the bottom right corner.

Name	Direction	Min	Max	Units	Properties
Band-43	Both	25000	30000	MHz	(4 Properties)
Band-44	Both	30000	35000	MHz	(4 Properties)
Band-45	Both	35000	40000	MHz	(4 Properties)
Band-46	Both	40000	45000	MHz	(4 Properties)
Band-47	Both	45000	50000	MHz	(4 Properties)
Band-48	Both	50000	55000	MHz	(4 Properties)
Band-49	Both	55000	60000	MHz	(4 Properties)
Band-50	Both	60000	65000	MHz	(4 Properties)
Band-51	Both	65000	70000	MHz	(4 Properties)

Category	Name	Value	Unit	Mode
Calculate	Frequency	67500	MHz	ReadWrite
Calculate	Transmission	462.6	dB	ReadWrite
Calculate	Reflection	6.00	dB	ReadWrite
Calculate	Diffraction	44	dB	ReadWrite

Рисунок 3.3 – База даних матеріалів має охоплювати всі діапазони частот 5G

3.1.3 Інтеграція зовнішніх ГІС та внутрішніх 3D будівельних моделей

У міру збільшення внутрішніх мереж важливим стає взаємодія між внутрішнім і зовнішнім просторами. В порядку для досягнення безперервного обслуговування та мінімізації перешкод між внутрішніми та зовнішніми мережами, внутрішні та зовнішні мережі слід планувати / оптимізувати в координації. Інтегруючу модель показано на рис. 3.4.

Для узгодженого та ефективного планування внутрішнього та зовнішнього використання інструменти планування радіомереж повинні інтегруватися як outdoor, так і indoor моделі.

По-перше, РЧ інженерам потрібно безперешкодно моделювати як зовнішнє, так і внутрішнє середовище. Це означає інструмент планування повинен мати можливість вводити зовнішні ГІС для outdoor. Інструмент планування також повинен вміти моделювати будівлі, які потребують виділених внутрішніх бездротових мереж.

По-друге, інструмент також повинен завантажувати як зовнішню, так і внутрішню конфігурації мережі. Це означає, що інструмент повинен мати

можливість розміщувати зовнішні мережі на ГІС та внутрішні мережі на будівництві конструкцій.

По-третє, інструмент повинен мати можливість швидко завантажувати обидві мережі. Сумісність з форматами операторів і основний зовнішній формат інструменту планування РЧ також не менш важливий [12].

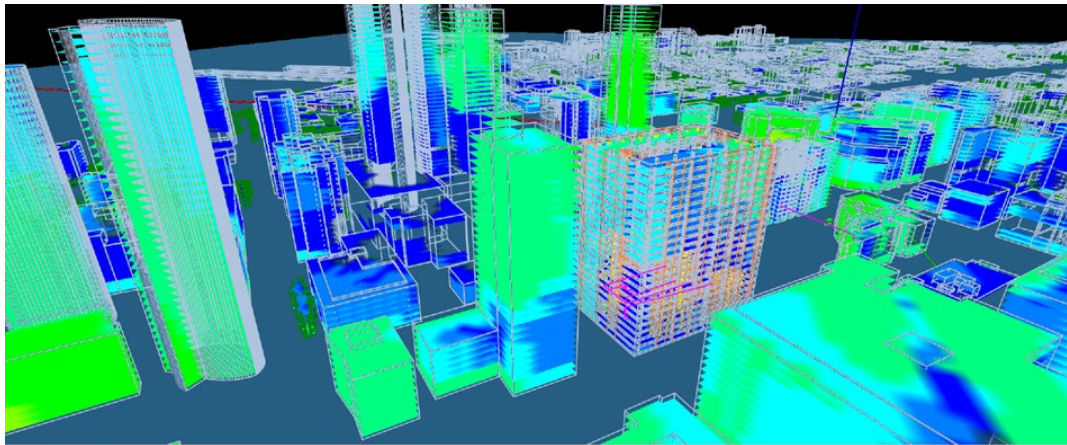


Рисунок 3.4 – Безшовна інтеграція ГІС та 3D будівельної моделі із зовнішнім та внутрішнім радіосигналом у Ranplan Professional

3.2 Моделювання розповсюдження радіохвиль

Покриття та ємність - дві основні вимоги до стільникових мереж. Зокрема, покриття - це мінімальна вимога для стільникової мережі. Важливою є модель поширення радіохвиль для планування покриття стільникових мереж.

Модель Hata та її розширена версія COST231-Hata, що є своєрідною емпіричною моделлю та широко використовується при плануванні макроелементів на вулиці 2G/3G/4G у міських умовах. Перевага емпіричної моделі - це її висока швидкість; однак, це не є точним для конкретного сайту. У міру збільшення ємності, що важливіше за останнє десятиліття, стали дедалі ширше використовуватися більш точні детерміновані моделі поширення радіохвиль, що базуються на відстеженні запуску променів.

Хоча детерміновані моделі поширення радіохвиль на основі променів є більш точними, ніж емпіричні моделі, вони набагато більш трудомісткі. З метою скорочення часу найбільш комерційне трасування променів моделює просто розрахунок за кількістю розглянутих променів, наприклад, лише враховуючи основний напрямок. Однак такий тип моделі не може надати достатньо інформації для оцінки продуктивності Massive MIMO.

Для 5G NR справжня інформація про багатопроменевий шлях (наприклад, AoA, AoD, EoA, EoD, інформація про затримку та фазу) є необхідною для формування матриці каналів MIMO, що є важливим для оцінки продуктивності Massive MIMO. На основі матриці каналу та алгоритмів попереднього кодування (наприклад, або стандартних алгоритмів такі як ZF, MRT та MMSE або спеціальні для постачальників), може бути визначена продуктивність MIMO; отже, потрібна справжня тривимірна багатопроменева траєкторія просування / запуску моделі радіопоширення для масивного MIMO 5G NR [12]. Див. рис. 3.5.

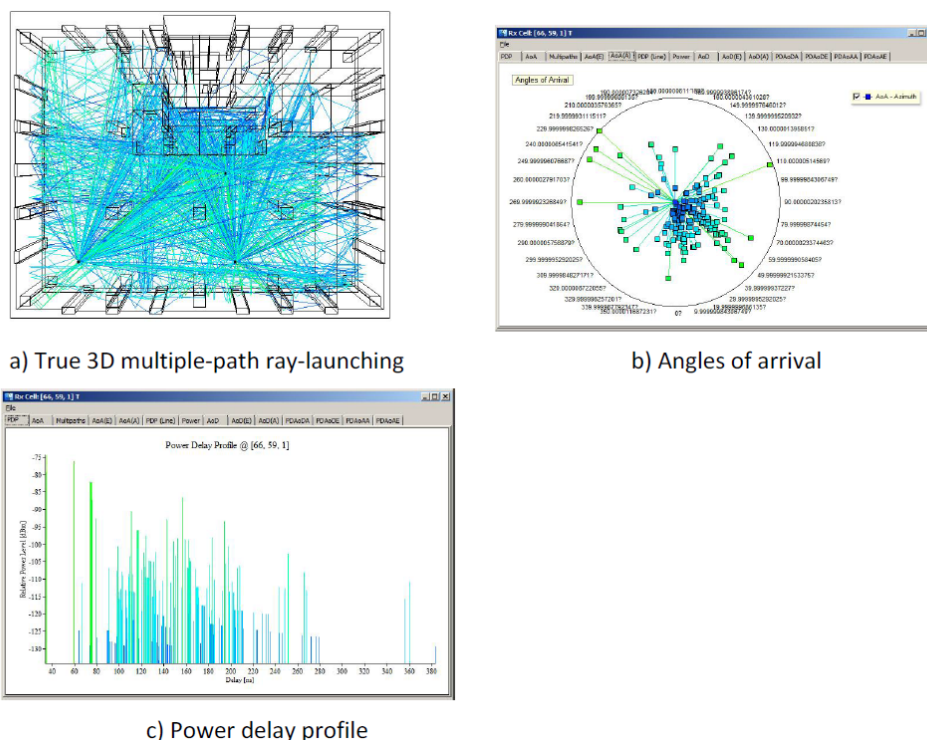


Рисунок 3.5 – Істинна 3D модель багаторазового трасування променів / запуску радіопоширення

3.3 Моделювання системи 5G NR

Для планування мережі 5G NR, нумерології 5G NR спочатку повинні бути змодельовані в інструменті планування. У таблиці 3.1 ми підсумовуємо ці нумерології 5G NR:

Таблиця 3.1 – Нумерології 5G NR

Параметри OFDM	Конфігурація					
Інтервал піднесучої (кГц)	15	30	60	120	240	480
Тривалість символу (мкс)	66.7	33.3	16.6	8.33	4.17	2.08
Номінальний CP (мкс)	4.7	2.41	1.205	0.6	0.3	0.15
Номінальна максимальна BW (МГц)	49.5	99	198	396	397.4	397.4
Максимальний розмір FFT	4096	4096	4096	4096	2048	1024
Мінімальний інтервал планування (мс)	1	0.5	0.25	0.125	0.0625	0.0312

По-друге, відповідні структури кадрів також потрібно змоделювати. Наприклад, для інтервалу піднесучої 120 кГц, 8 слотів/підкадр (1 мс), 80 слотів/кадр (10 мс), 14 символів OFDM/слот. Це показано на рис. 3.6.

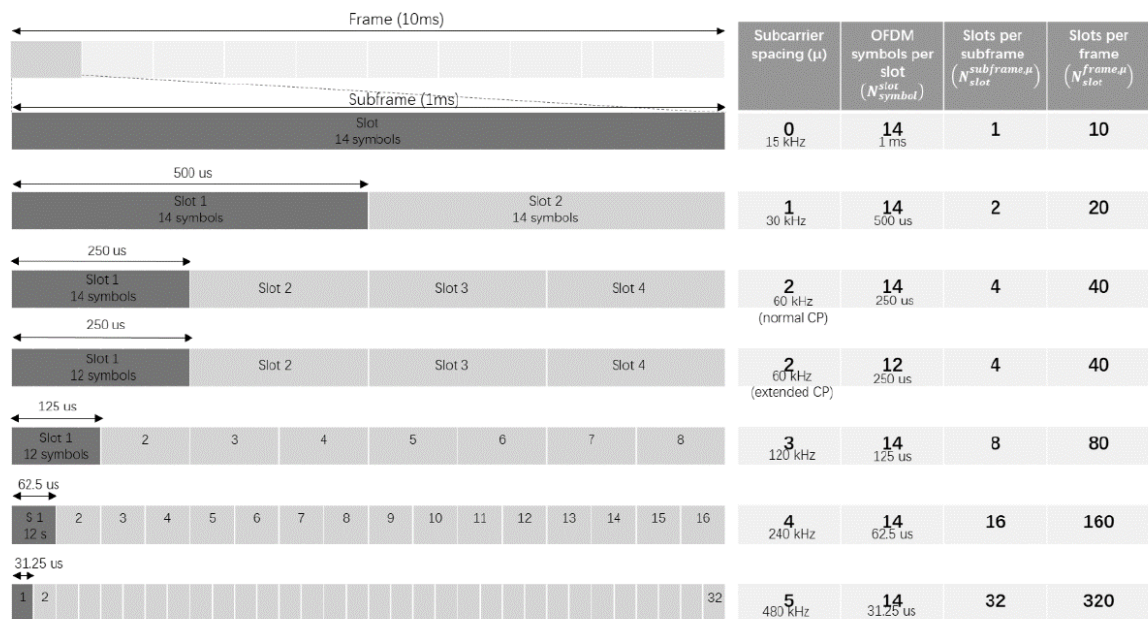


Рисунок 3.6 – Нумерології 5G

По-третє, нові схеми модуляції, такі як 256QAM, повинні бути змодельовані. У таблиці 3.2 ми узагальнили всі схеми модуляції, які підтримуються в 5G NR.

Таблиця 3.2. Схеми модуляції 5G NR

Схема модуляції	UL/DL
QPSK	UL/DL
16QAM	UL/DL
64QAM	UL/DL
256QAM	UL/DL

По-четверте, 5G NR управління та канали даних, такі як PDSCH, PDCCH та PUSCH, потребують моделювання. Детально показано в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3. Канал висхідної та низхідної лінії зв'язку

	PDSCH	PDCCH	PUSCH
Призначення	Передавання даних DL	Передавання контролю DL	Передавання контролю і даних UL
Форма сигналу	CP-OFDM	CP-OFDM	CP-OFDM і DFT-s-OFDM
Пропускна здатність	Залежить від нумерології	Гнучка, залежить від нумерології	Залежить від нумерології
Опорні сигнали	Специфічні для UE	Специфічні для UE	Специфічні для UE
Компенсація фазового шуму	Так	Ні	Так
Модуляція	До 256QAM	QPSK	До 256QAM
Схема кодування	LDPC	Полярна	LDPC

3.4 Планування Massive MIMO та імітаційне моделювання формування променів

1) Формування променю широкомовного каналу

5G NR підтримує формування променів широкомовного каналу на основі так званої техніки "підмітання" (рис. 3.7), тобто трансляцію кількох вузьких променів в обертанні для симулювання формування променів. 5G підтримує різні конфігурації Massive MIMO, що дозволяють використовувати різні промені для різних сценаріїв покриття [15].

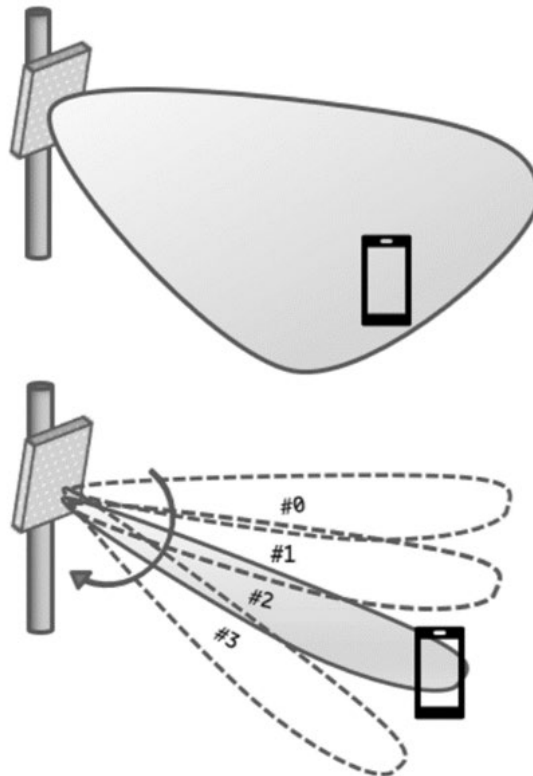


Рисунок 3.7 – Формування променя широкомовного каналу

2) Формування променів сервісного каналу

Точне динамічне формування променів

Програмне забезпечення для моделювання автоматично відстежує користувача та призначає модель відповідно до вбудованого алгоритму призначення.

Карта руху створюється шляхом диспетчеризації руху, а моделювання проводиться на основі карти руху.

3D GOB статичне формування променів

Налаштування антени GOB, і програмне забезпечення для моделювання визначає покрити відповідно до інтенсивності сигналу, який отримує користувач. Без карти руху, моделювання пропускної здатності отримується за допомогою статичного моделювання.

3.5 Процес планування параметрів стільника

1) Оптимізація RF параметрів.

Оптимізацію можна поділити на такі етапи (рис. 3.):

- визначення області оптимізації;
- визначення мети оптимізації;
- визначення базових станцій для коригування;
- розрахунки.

2) Вибір оптимальної діаграми спрямованості для широкоповного каналу:

- використовуючи діаграми спрямованості антен з різними діаграмами спрямованості для широкоповного каналу та 3D-карти, АСР автоматично обирає оптимальні;
- оптимальний вибір діаграми спрямованості для широкоповного каналу пов'язаний з відстанню між базовими станціями, цільовим покриттям, висотою будівель, що покривають, висотою базових станцій та іншими факторами;
- сканування променем у вертикальній площині може значно покращити ефект покриття висотних будівель.

3) Планування фізичних ідентифікаторів стільника (PCI – Physical Layer Cell Identity).

Система NR загалом має 1008 значень PCI (0-1007).

Вимоги до планування PCI:

- не має бути конфліктів ідентифікаторів, тобто ідентифікатори сусідніх стільників не можуть бути однаковими;

- значення PCI по модулю 3 (тобто значення PSS) на сусідніх стільниках мають відрізнятися;
- стільники з однаковими PCI мають бути розташовані якнайдалі одне від одного;
- стільники з однаковими PSS мають бути розташовані якнайдалі одне від одного;
- зарезервована певна група PCI.

Приклад планування PCI проілюстровано на рис. 3.8.

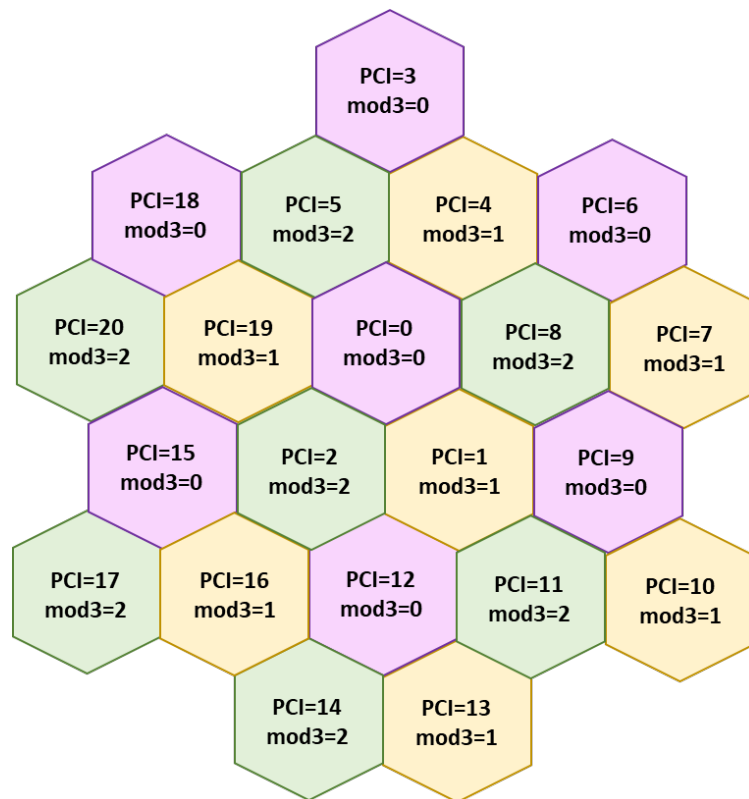


Рисунок 3.8 – Приклад розподілу фізичних ідентифікаторів стільника

4) Планування каналу випадкового доступу (PRACH – Physical Random Access Channel)

Концепції планування RACH в 5G та 4G дуже схожі, але змінилися таблиці Ncs, і були введені деякі нові формати преамбули.

Всього в 5G підтримується 13 типів формату преамбули, які діляться дві групи:

- формати довгих преамбул: це формати 0, 1, 2 та 3 довжиною 839;
- формати коротких преамбул: це формати A1, A2, A3, B1, B2, B3, B4, C0, C2 довжиною 139.

Формати довгих преамбул мають більше накладних витрат, але вони мають більший радіус стільника, тоді як короткі формати мають менший накладний рівень, але радіус стільника також менший. Значення N_{cs} можна знайти в 3GPP-38.211 п. 6.3.3, де описується PRACH. Як приклад, розглянемо коротку преамбулу (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Відповідність кількості кореневих послідовностей N_{cs} до zeroCorrelationZoneConfig

zeroCorrelationZoneConfig	Значення N_{cs}
0	0
1	2
2	4
3	6
4	8
5	10
6	12
7	13
8	15
9	17
10	19
11	23
12	27
13	34
14	46
15	69

Отже, якщо обрати радіус стільника 3 км, то, використовуючи розподіл затримки багатопроменевого шляху в 2 мікросекунди, відповідне значення N_{cs} 2 буде дорівнювати близько 45, що відповідає значенню N_{cs} 46 у таблиці 3. . Це означає, що ця коренева послідовність (root sequence) матиме циклічний зсув 46 для формування наступної преамбули. Довжина короткої преамбули становить 139, тому кількість преамбул, які можуть бути сформовані кожною кореневою послідовністю, буде дорівнювати:

$$N = 139/46 = 3.$$

Оскільки нам потрібно 64 преамбули на стільник, то кількість корневих послідовностей, необхідна для створення 64 преамбул, буде дорівнювати:

$$N_{rs} = 64/3 = 22.$$

Це означає, що план RACH буде зроблений таким чином, що перший стільник використовує кореневі послідовності від 0 до 21, тоді як другий стільник буде використовувати 22 до 43, тощо.

Вищезазначений метод можна використовувати для створення планів RACH для різних сценаріїв [\[16\]](#).

Узагальнена послідовність дій при плануванні PRACH:

- визначення формату преамбули: формат A3/B4 ...;
- визначення N_{cs} на основі радіуса покриття (zeroCorrelationZoneConfig);
- визначення розташування у часовій області (Prach-configIndex);
- визначення кількості N_{cs} і корневих послідовностей у кожній преамбулі відповідно до N_{cs} PRACH та сценарію швидкості.

Приклад планування PRACH проілюстровано на рис. 3.9.

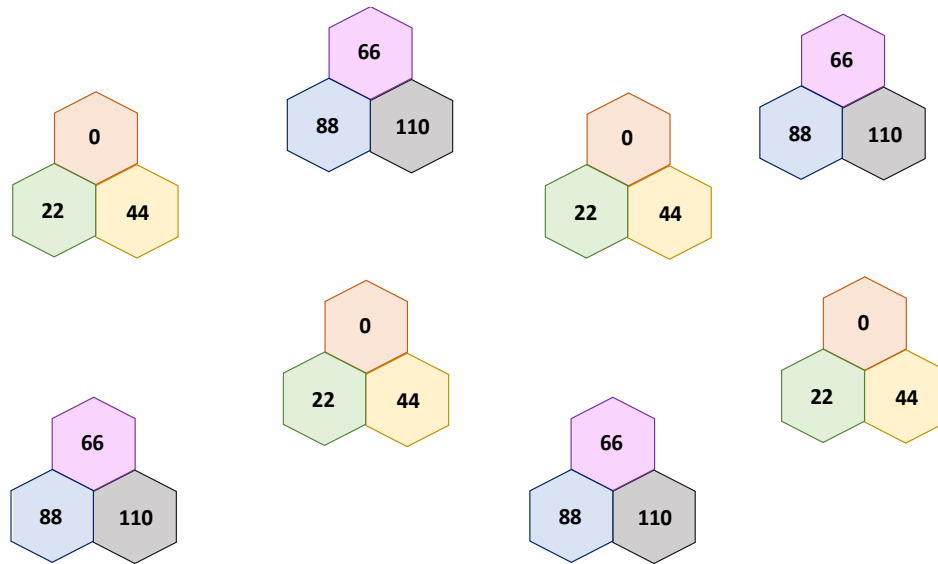


Рисунок 3.9 – Приклад розподілу PRACH Root sequence

5) Планування сусідніх стільників.

Відомо, що для 5G NR можливі два типи розгортання мережі: автономний (SA) та не автономний (NSA). Тож можна класифікувати відношення сусідів на основі вищезазначених режимів розгортання.

Для мереж, розгорнутих в автономному (SA) режимі:

- міжсистемне сусідство 5G – 4G: якщо оператор розгорнув мережі 4G та 5G, то стільник LTE може бути використаний як inter-RAT сусід;
- внутрішньо системне сусідство 5G – 5G: включає внутрішнє та міжчастотне сусідство.

Кількість сусідів – приблизно 20 (включаючи внутрішньочастотні та міжчастотні для всіх доступних частот).

Для мереж, розгорнутих в не автономному (NSA) режимі:

- внутрішньо системне сусідство 4G – 4G: включає внутрішнє та міжчастотне сусідство;
- міжсистемне сусідство 4G – 5G: планувати NR сусідів слід лише за частотою;

- внутрішньо системне сусідство 5G – 5G: включає внутрішнє та міжчастотне сусідство.

Вважається, що кількість початкових сусідів повинна дорівнювати 20 [17].

Висновки до розділу

1. Покриття - це мінімальна вимога для стільникової мережі. Моделювання розповсюдження радіохвиль в мережах 5G і 2G/3G/4G має певні відмінності, зокрема, для 5G NR справжня інформація про багатопроменевий шлях (наприклад, AoA, AoD, EoA, EoD, інформація про затримку та фазу) є необхідною для формування матриці каналів MIMO, що є важливим для оцінки продуктивності Massive MIMO.

2. Процес планування базових параметрів стільника 5G NR подібний до планування параметрів 4G.

3. Принцип планування сусідніх стільників 5G NR залежить від режиму розгортання мережі (автономний чи не автономний). В обох випадках має бути передбачене внутрішньо системне сусідство стільників, включаючи внутрішнє та міжчастотне.

4. Отже, для планування і моделювання мереж 5G NR потрібні більш продуктивні пристрої для моделювання розповсюдження радіохвиль складними методами, зокрема за допомогою трасування променів.

4 РОЗРАХУНОК І МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖІ LTE З ВИКОРИСТАННЯМ ОБЛАДНАННЯ AAS

Використання удосконалених антенних решіток та технології Massive MIMO операторами мобільного зв'язку в існуючих мережах, з метою розширення ємності, можна вважати проміжним етапом у переході до мереж п'ятого покоління.

Для дослідження доцільності використання удосконалених антенних решіток в існуючих мережах LTE проведено моделювання мережі LTE на території міста Києва. Взято карту з відкритих джерел, яка охоплює територію площею 2 км². Необхідно обрати обладнання та розрахувати базові параметри для мережі LTE, на основі цих розрахунків створити модель мережі та проаналізувати результати моделювання.

4.1 Розрахунок параметрів LTE

4.1.1 Початкові дані для розрахунку

Оскільки основною метою переходу до мереж 5G є збільшення абонентської ємності, то і відштовхуватись при плануванні мережі необхідно насамперед від ємності, а не від покриття. Розрахуємо пропускну спроможність для мережі, що зможе обслуговувати студентів факультету електроніки – 1000 чол., з гарантованою швидкістю на абонента достатньою для комфортного користування мобільним інтернетом – 4 Мбіт/с

Базові дані, що необхідні для моделювання, а також вимоги до ємності мережі наведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Початкові дані для розрахунку

Параметр	Значення
Частотний діапазон	3, 1710-1880 МГц
Виділена смуга частот	15 МГц
Ширина радіоканалу	15 МГц
Модуляція	256QAM
Схема MIMO	4x4
Кількість абонентів	1000
Гарантована швидкість для одного абонента	4 Мбіт/с

4.1.2 Розрахунок основних параметрів мережі

Визначаємо пропускну здатність БС в одному секторі за даними з табл. 4.1 (з врахуванням каналного кодування і наявності циклічного префіксу) R , Мбіт/с:

$$R = \frac{n_{\text{чк}_c} \cdot N_{\text{рб}} \cdot n_{\text{пн}} \cdot N_{\text{сим}}^{\text{рб}} \cdot V_{\text{сс}} \cdot m}{T_{\text{рб}}},$$

де $N_{\text{рб}}$ – кількість ресурсних блоків у виділеній смузі частот, $N_{\text{рб}} = 75$ для 15 МГц;

$n_{\text{пн}}$ – кількість носійних частот в ресурсному блоці, $n_{\text{пн}} = 12$;

$N_{\text{сим}}^{\text{рб}}$ – кількість символів OFDM в часовому слоті, що утворює ресурсний блок ,

$$N_{\text{сим}}^{\text{рб}} = 7;$$

$V_{\text{сс}}$ – швидкість каналного коду, $V_{\text{сс}} = 1/3$;

m – кількість рівнів модуляції, біт/символ;

$T_{\text{рб}}$ – тривалість часового слоту, що утворює ресурсний блок, $T_{\text{рб}} = 0,5$ мс.

Кількість каналів визначаємо за формулою:

$$n_{\text{чк}_c} = \text{int}\left(\frac{F}{\Delta f_k}\right),$$

де F – ширина смуги частот, виділена оператору за умовами ліцензії для розгортання системи, МГц;

Δf_k – ширина смуги частот одного радіоканалу, МГц.

Кількість рівнів модуляції m визначимо з виразу:

$$m = k \cdot \log_2 M',$$

де M' – кількість можливих станів модуляції (для забезпечення максимальної пропускної здатності задано модуляцію типу 256QAM, отже $M' = 256$);

k – коефіцієнт, що враховує порядок MIMO (для схеми MIMO 4x4 $k = 4$, за відсутності технології MIMO $k = 1$).

$$m = 4 \cdot \log_2 256.$$

Маємо:

$$R = 134,4 \text{ Мбіт/с.}$$

Визначаємо необхідну загальну пропускну здатність мережі:

$$R_3 = N_{\text{аб}} \cdot R_{\text{аб}},$$

де $N_{\text{аб}}$ – загальна кількість абонентів;

$R_{\text{аб}}$ – гарантована швидкість для одного абонента, Мбіт/с.

$$R_3 = 4000 \text{ Мбіт/с.}$$

Тоді необхідна кількість стільників:

$$N_{\text{ст}} = \frac{R_3}{R}.$$

Отже, для забезпечення необхідної пропускної спроможності мережі необхідно близько 30 стільників, тобто 10 базових станцій [18].

4.2 Моделювання мережі LTE

4.2.1 Проектування мережі

За результатами розрахунків, отриманих у попередньому пункті, для моделювання мережі необхідно 10 базових станцій.

При плануванні взаємного розташування базових станцій, а також азимутів випромінювання, було враховано наступні критерії:

- загальна топологія мережі;
- забудова;
- покриття;
- рельєф.

Висоти підвісу антен встановлено відповідно до висоти будівель, на дахах яких вони встановлені (табл. 4.2). Підібрано оптимальні кути нахилу, враховуючи висоти ф.ц.а. та відстань між базовими станціями.

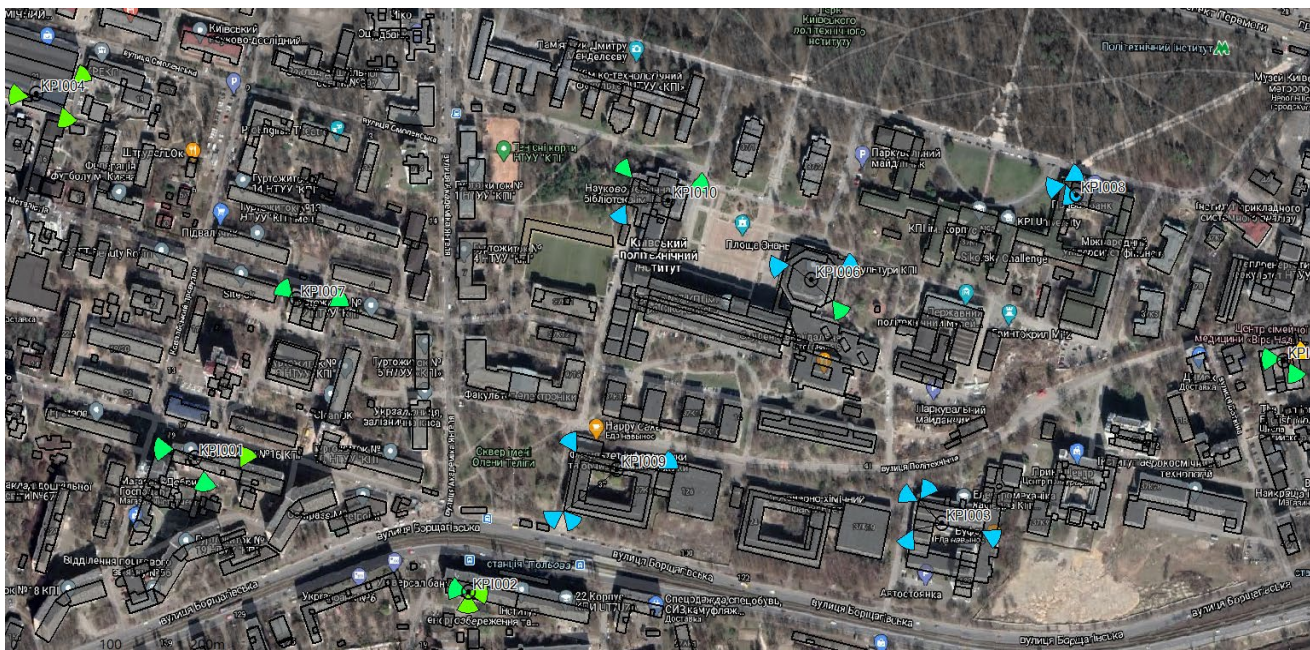


Рисунок 4.1 – Проект мережі в програмному середовищі Atoll

Таблиця 4.2 – Висоти фазового центру антен базових станцій.

Базова станція	Висота фазового центру антен, м
KPI001	32
KPI001	34
KPI002	43
KPI003	26
KPI003	28
KPI003	25
KPI004	25,5
KPI004	30
KPI005	30,5
KPI005	32,5
KPI006	24,5
KPI007	38
KPI008	22
KPI009	23
KPI010	22

4.2.2 Вибір обладнання базової приймально-передавальної станції та антени

На сьогоднішній день постачальники пропонують широкий вибір обладнання під різноманітні потреби операторів. Найбільш поширений тип архітектури базової станції має такі складові:

- блок обробки базових частот (BBU);
- виносний радіоблок (RRU);
- антени.

Було обрано обладнання від компанії Huawei.

В якості блоку обробки базових частот обрано VBU3910 (рис.4.3).
Характеристики VBU3910 наведено у табл. 4.2.



Рисунок 4.3 – Зовнішній вигляд VBU3910

Таблиця 4.2 – Основні характеристики VBU3910.

Параметр	Значення
Діапазон частот, МГц	700,800,850,900,1800,1900,1700/2100,2100, 2300 і 2600
Смуга частот радіоканалу, МГц	1.4 - 20
Розмір FFT	512
Кількість приймачів	6
Кількість секторів	9
Потужність випромінювання, dBm	40
Розміри, мм	485×300 × 170

BBU має містити плату розширення UBBP - Universal Baseband Processing unit. Задані потреби задовольняє UBBPе4. Характеристики UBBPе4 наведено у табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Основні характеристики UBBPе4.

Параметр	Значення
Технології радіодоступу	UMTS, LTE FDD, LTE NB-IoT, UL, UM та LM
Кількість стільників LTE FDD	6x20 МГц 4T4R
Смуга пропускання, МГц	5/10/15/20
Максимальна кількість UE в режимі RRC Connected	3600
Максимальна кількість синхронізованих UE (UL)	3600
Максимальна пропускна здатність, Мбіт/с	DL: 1200; UL: 600

В якості виносного радіоблоку обрано RRU3971 4*40 Вт (рис.4.4). 4 PA необхідно для забезпечення роботи MIMO 4x4. Характеристики RRU3971 наведено у табл. 4.4.

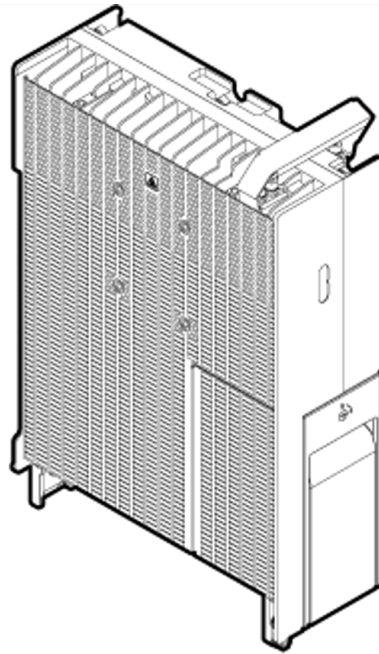


Рисунок 4.4 – Зовнішній вигляд RRU3971

Таблиця 4.4 – Основні характеристики RRU3971.

Параметр	Значення
Смуга пропускання, МГц	1710-1880
Режими роботи	LTE FDD, GL, LM, GLM, LN (SUL), GLN (SUL)
IBW, МГц	45
TX/RX порти	4T4R
Максимальна вихідна потужність, Вт	4x40
Розміри, мм	400x300x100
Вага, кг	15

Переходимо до вибору антени. Для забезпечення роботи MIMO 4T4R необхідна кількість портів антени – 4. Також важливо звернути увагу на наступні характеристики: ширина діаграми спрямованості, підсилення та діапазон регулювання електричного кута нахилу.

Типовий варіант – TDQ-172718DEI від компанії Tongyu (рис. 4.5-4.6).
Характеристики TDQ-172718DEI наведено у табл. 4.5.



Рисунок 4.5 – Зовнішній вигляд антени TDQ-172718DEI

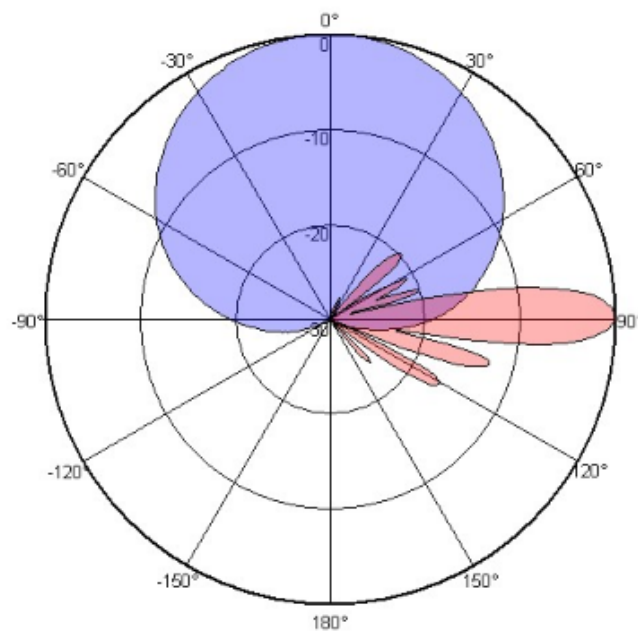


Рисунок 4.6 – Діаграма спрямованості антени TDQ-172718DEI

Таблиця 4.5 – Характеристики TDQ-172718DEI

Параметр	Значення
Частотний діапазон, МГц	1710-2690
Поляризація	$\pm 45^\circ$
Підсилення, dBi	17,2
Ширина діаграми спрямованості (горизонт.), $^\circ$	65
Ширина діаграми спрямованості (вертик.), $^\circ$	7,5
Електричний кут нахилу, $^\circ$	0-10
RCU	вбудований
Розміри, мм	1360×320×80
Вага, кг	14,1

4.2.3 Результати моделювання

Для оцінки результатів моделювання розрахуємо покриття LTE за середнім рівнем потужності прийнятих пілотних сигналів (Reference Signal Received Power – RSRP).

Розрахунки зроблено на основі моделі поширення радіохвиль COST Nata, яка являє собою комбінацію емпіричної та детермінованої моделей для оцінки втрат в містах в діапазоні частот від 800 МГц до 2000 МГц. Втрати на фідерному тракті обчислено в програмному середовищі Atoll, відповідно до обраних типів антенно-фідерного обладнання. На рис. 4.7 зображено графічне представлення результатів розрахунку покриття.

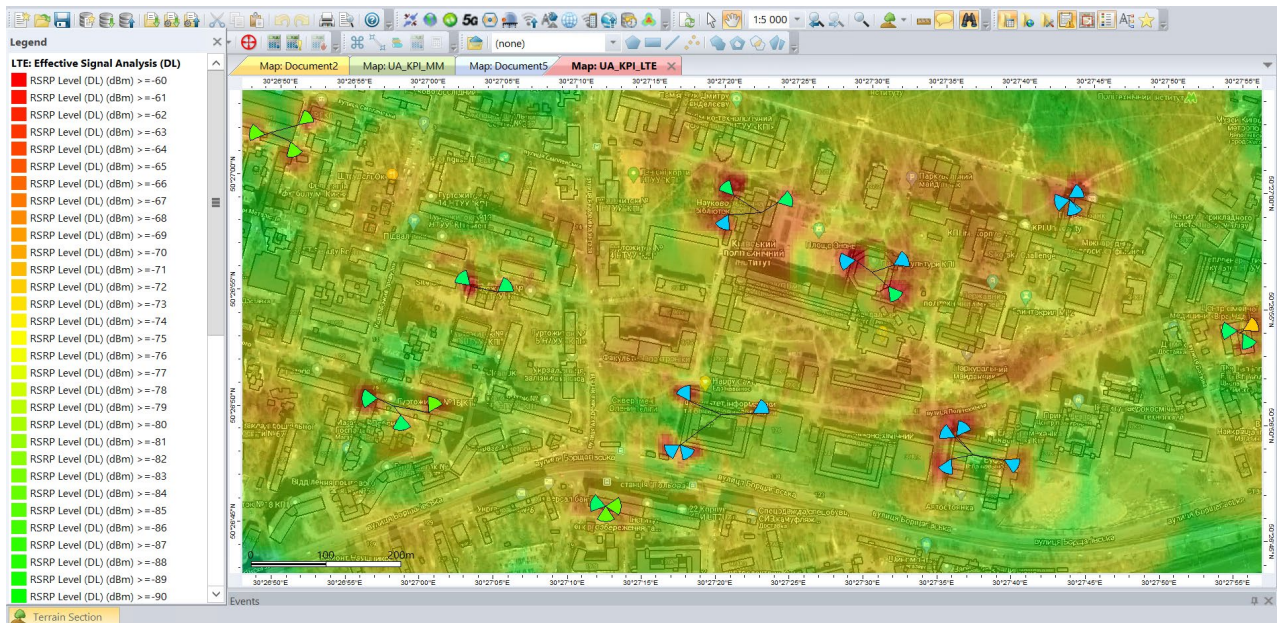


Рисунок 4.7 – Результати розрахунку покриття LTE

Розглянемо результати розрахунку детальніше (рис. 4.8-4.9).

Моделювання радіопокриття можна вважати завершеним, а покриття стійким, якщо відсоток території з рівнем сигналу менше -100 дБм не перевищує 10%.

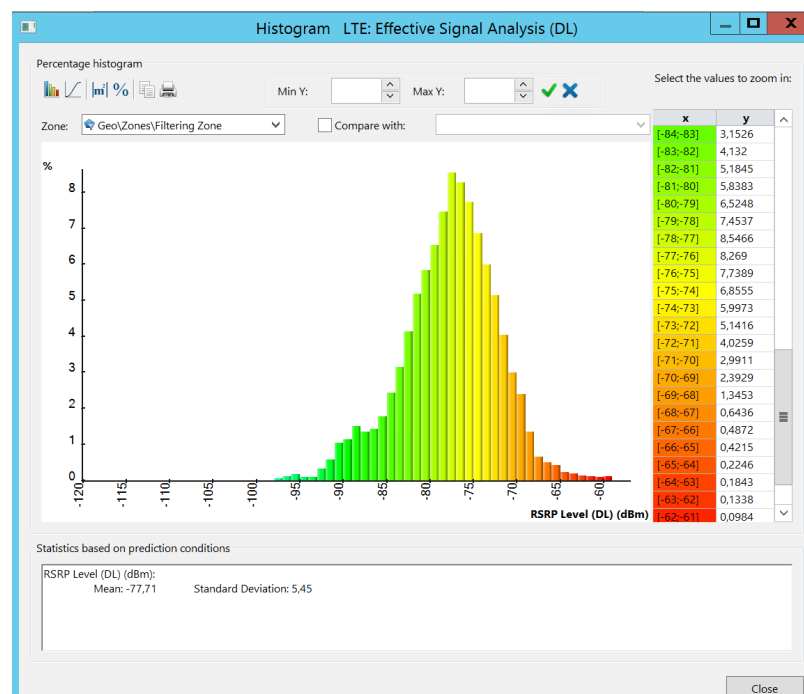


Рисунок 4.8 – Гістограма візуалізація результатів розрахунку покриття LTE



Рисунок 4.9 – Результати проведення точкового аналізу покриття LTE

За результатами моделювання, 99% території покрито з рівнем сигналу більше -100 дБм. Середнє значення RSRP – -77,71 дБм.

Отже, створена модель мережі повністю відповідає вимогам до покриття та ємності.

4.2.4 Вибір обладнання AAS (AAU)

Для дослідження доцільності використання удосконалених антенних решіток в існуючих мережах LTE зробимо аналогічні розрахунки, але з використанням обладнання типу AAS.

AAU (Active Antenna Unit) – обладнання, що поєднує радіоблок та антену в одному корпусі. Для проектування мережі обрано AAU5726 (рис. 4.10), що може працювати в двох режимах: Multibeam або Massive MIMO. На рис 4.11 показано діаграму спрямованості AAU5726 в горизонтальній та вертикальній площинах.

Характеристики AAU5726 наведено у табл. 4.6.



Рисунок 4.10 – Зовнішній вигляд AAU5726

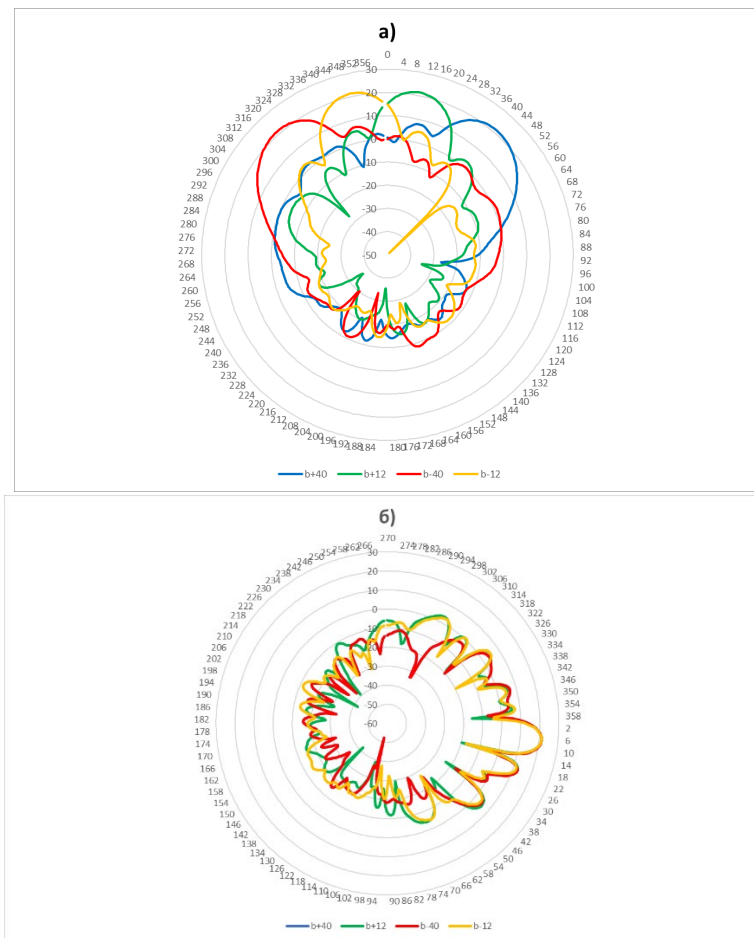


Рисунок 4.11 – Діаграма спрямованості AAU5726 в а) горизонтальній та б) вертикальній площині

Таблиця 4.6 – Характеристики ААU5726

Параметр		Значення
Радіотехнології		LTE FDD, UMTS
Частотний діапазон, МГц		1710-1880
Поляризація		$\pm 45^\circ$
Трансляційний промінь	Підсилення, dBi	15,7
	Ширина діаграми спрямованості (горизонт.), $^\circ$	65 ± 5
	Ширина діаграми спрямованості (вертик.), $^\circ$	8 ± 1
	Електричний кут нахилу, $^\circ$	5-9
Трафіковий промінь	Підсилення, dBi	22,5
	Ширина діаграми спрямованості (горизонт.), $^\circ$	13 ± 2
	Ширина діаграми спрямованості (вертик.), $^\circ$	8 ± 1
Максимальна вихідна потужність, Вт		200
TX/RX порти		32T32R
Розміри, мм		1080x670x220
Вага, кг		50

4.2.5 Результати моделювання мережі LTE з використанням обладнання AAS

Для оцінки результатів моделювання розрахуємо покриття LTE за середнім рівнем потужності прийнятих пілотних сигналів (Reference Signal Received Power – RSRP), аналогічно п. 4.2.3.

На рис. 4.12 зображено графічне представлення результатів розрахунку покриття.

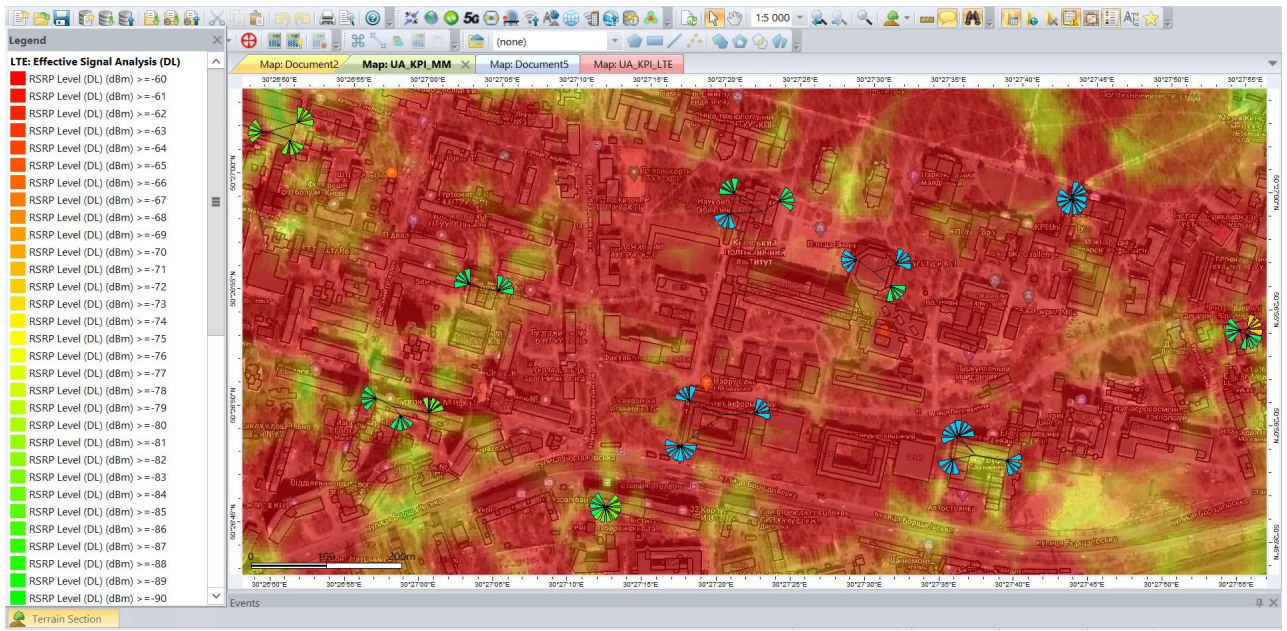


Рисунок 4.12 – Результати розрахунку покриття LTE на обладнанні AAS

Розглянемо результати розрахунку детальніше (рис. 4.13).

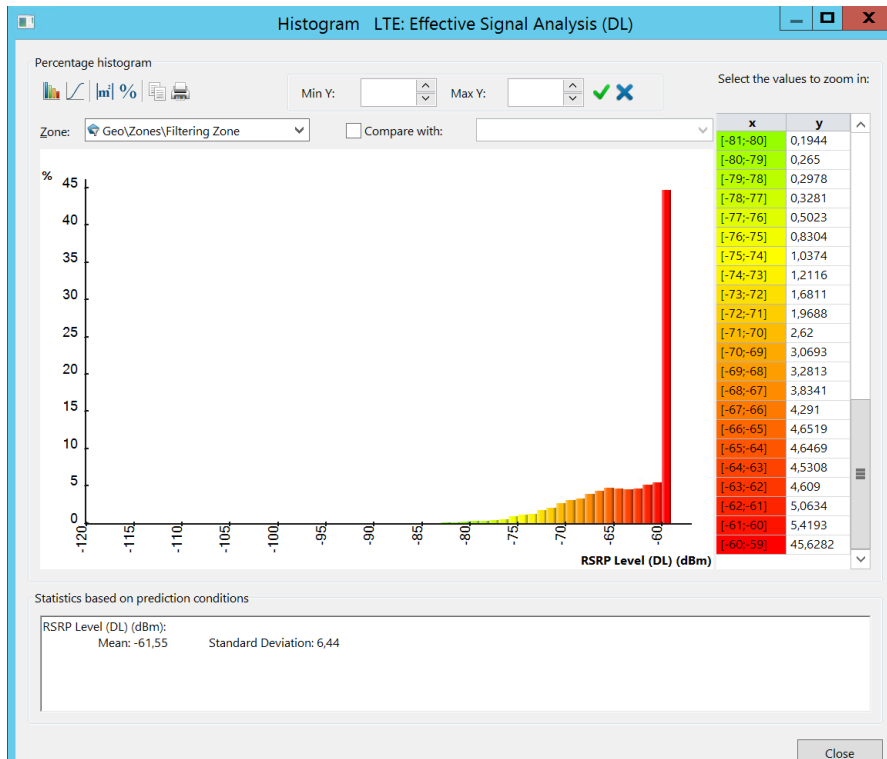


Рисунок 4.13 – Гістограмна візуалізація результатів розрахунку покриття LTE на обладнанні AAS

За результатами моделювання, 100% території покрито з рівнем сигналу більше -83 дБм. Середнє значення RSRP – -61,55 дБм, що на 16,16 дБм більше ніж в базовому розрахунку, тобто приблизно в 40 разів.

Однак, так само значно зростає і загальний рівень шуму (рис 4.14).

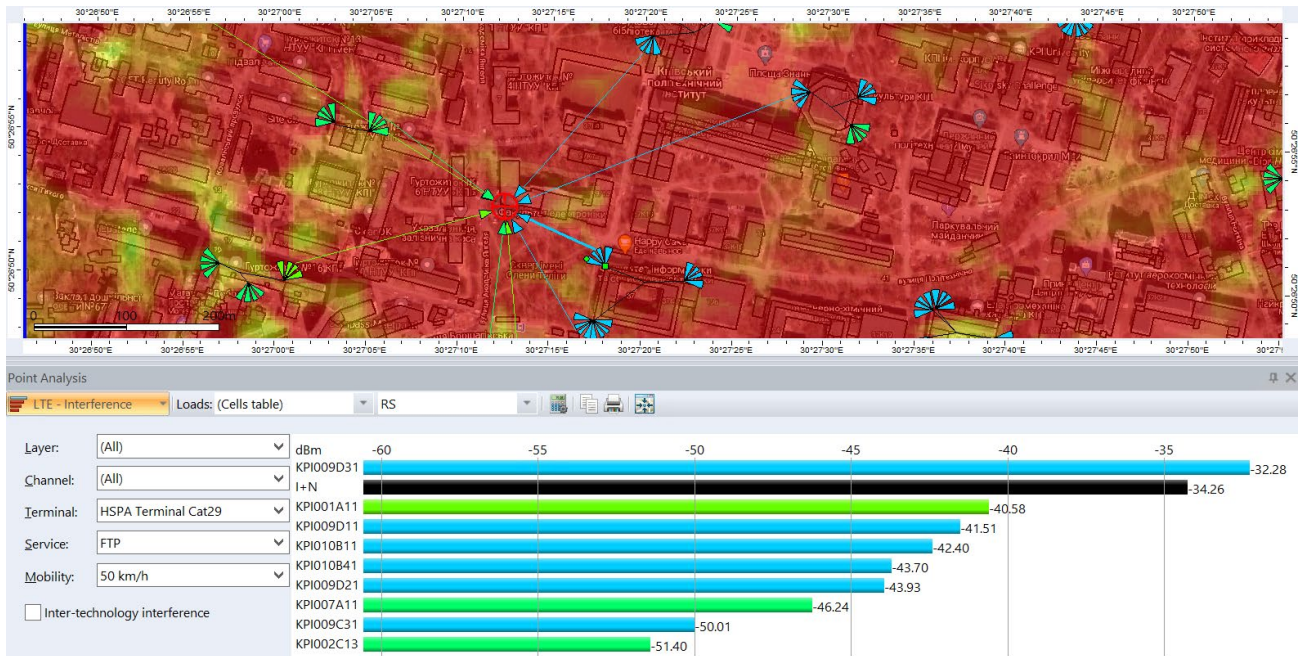


Рисунок 4.14 – Результати проведення точкового аналізу покриття LTE на обладнанні AAS

Тобто, головним обмежуючим чинником при плануванні мереж високої ємності є інтерференція.

Висновки до розділу

1. Завдяки формуванню окремих променів з меншою шириною діаграми спрямованості та більшим коефіцієнтом підсилення, досягається значне покращення покриття (в середньому до 16 дБм).

2. Використання AAU в режимі Multibeam негативно впливає на показник відношення сигнал/шум, тому використовувати таке рішення в існуючих мережах LTE, слід точково, в місцях з найбільшим трафіковим навантаженням.

3. При щільному розгортанні мережі варто використовувати AAS в режимі Massive MIMO, завдяки чому реалізують так званий просторовий метод множинного доступу (SDMA - Space Division Multiple Access) абонентів, що є одним з основних методів боротьби із завадами.

4. На сьогоднішній день оператори мобільного зв'язку в Україні технологічно готові до поступового, точкового розгортання 5G NR.

5 СТАРТАП-ПРОЕКТ

5.1 Основні відомості про проект

Сутність стартап-проекту. Досліджуючи ринок безпроводових мережевих технологій було виявлено можливість впровадження IoT рішень з використанням технологій п'ятого покоління, що є особливо актуальними зараз, в період карантину.

Онлайн трансляція відео 360 градусів. За допомогою технології зйомки сферичного відео 360 градусів, можна знімати і показувати захід з усіх боків. VR онлайн трансляція, дозволяє глядачам взаємодіяти з подіями і оглядаючись на всі боки, стати безпосереднім учасниками того, що відбувається, як якщо б вони перебували прямо в центрі події. Технологія дає користувачам можливість спільно отримувати доступ до контенту і забезпечує соціальну взаємодію в складному багаторівневому віртуальному просторі. Щоб надати користувачам доступ до VR-контенту в режимі реального часу необхідне застосування технологій 5G NR, що забезпечую велику пропускну здатність та найменші затримки, що дуже критично для даного типу надання послуг.

Зміст ідеї стартапу та визначення її характер бізнес-моделі стартапу наведено в табл. 5.1 та табл. 5.2.

Таблиця 5.1 – Зміст ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
VR-проект, що дозволяє проводити онлайн-трансляції у форматі 360°/ 4К, використовуючи технології 5G NR.	1. Дистанційне навчання	Покращення надання освітніх послуг в умовах карантину
	2. Дистанційна робота	Організація командної роботи «в офісі» з будь-якої точки планети
	3. Розваги	Можливість миттєво опинитися в будь-якому місці (концерт, екскурсія і т.д.),

Таблиця 5.2 – Визначення бізнес-моделі стартапу

№ п/п	Варіанти бізнес-моделі стартапу	(потенційні) товари/концепції конкурентів		W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Запропонований метод	Загальноживаний метод			
1.	Продаж ліцензій на виготовлення продукту	Дає змогу	Дає змогу	-	Підтримка користувачів, оновлення ПЗ	Дозволяє отримувати прибуток на основі інтелектуальної власності без необхідності виробляти продукт
2.	Співпраця з операторами мобільного зв'язку (B2B)	Дає змогу	Не дає змогу	-	Потребує детального опрацювання усіх аспектів співпраці	Зменшення ризиків споживачів, пов'язаних з купівлею продукту/послуги
3.	Продаж ідеї стартапу	Дає змогу	Дає змогу	Відсутність подальшого розвитку	-	Відсутність будь-яких ризиків
4.	Створення повноцінного бізнесу	Не дає змогу	Не дає змогу	Потребує великих капіталовкладень	Цінова політика може не задовільнити потенційного споживача	Можливість комерційної та дотаційної реалізації

Обрана бізнес-модель стартапу: B2B співпраця з іншими компаніями (операторами мобільного зв'язку) з використанням існуючих мереж та обладнання.

5.2 Технологічний аудит ідеї стартап-проекту

У таблиці 5.3 оцінено можливість технологічної реалізації ідеї стартапу та показано технології, які можна застосувати для реалізації проекту.

Таблиця 5.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Створення апаратного та програмного рішення для проведення онлайн-трансляцій у форматі 360°/4К	Спеціалізоване обладнання для організації потокового мовлення	Наявне	Доступне
2		Використання існуючих стільникових мереж операторів мобільного зв'язку	Наявні	Доступні
3		Використання технології 5G NR	Наявні	Відсутні на ринку в Україні

5.3 Аналіз можливостей ринку для запуску проекту

У таблиці 5.4 показано попередню характеристику потенційного ринку стартап-проекту.

Таблиця 5.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартапу

№ п/п	Показники ринку (найменування)	Характеристика
1	Якісна оцінка тенденцій ринку	Зростаюча
2	Кількість основних гравців, од	4
3	Обсяг продажів, грн/ум.од	310000
4	Середня норма рентабельності в цій галузі, %	$310000/210000 = 148\%$ висока
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Ліцензія
6	Обмежень для входу (характер обмежень)	Немає

У таблиці 5.5 показано характеристику потенційних клієнтів стартап-проекту.

Таблиця 5.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у потребах потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Стабільний зв'язок при підключенні великої кількості користувачів	Бізнес	Необхідний високий рівень якості передавання даних, в першу чергу голосових	Стабільність, результат повинен відповідати усім стандартам якості
2	Можливість взаємодії в режимі віддаленого навчання	Сфера освіти	Важливою вимогою до продукту є його інтерактивність	Забезпечення передавання різних типів даних в залежності від потреб споживачів

У табл. 5.6 наведено основні загрози реалізації стартап-проекту.

Таблиця 5.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Опис загрози	Планове реагування компанії
1	Низька зацікавленість потенційних клієнтів	В випадку не ефективного маркетингу запропоновані послуги можуть не зацікавити клієнта	Забезпечення додаткових послуг, застосування агресивної маркетингової стратегії
2	Втрата позицій на ринку	Втрата статусу постачальника надійних послуг	Корекція цінової політики, перегляд вимог до якості готового продукту та підвищення КРІ

У табл.5.7 наведено основні можливості під час реалізації стартап-проекту.

Таблиця 5.7 – Основні можливості

№ п/п	Фактор	Опис можливості	Планове реагування компанії
1	Лідерські позиції на ринку	Зростання попиту на товари та послуги	Збільшення обсягів виробництва продукту, якісна підтримка користувачів, регулярне оновлення ПЗ
2	Впровадження запропонованих технологій на існуючих стільникових мережах	Збільшення об'ємів закупівель	Якісне та кількісне збільшення обсягів виробництва продукту

Таблиця 5.8 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Якість	Повна відповідність очікуванням споживача, регулярне оновлення і підтримка
2	Ціна	Оптимальна цінова політика, значно нижче від конкурентів на старті проекту
3	Затребуваність	Особливо актуально в умовах віддаленої роботи/навчання під час карантину

У табл. 5.9 представлено сильні та слабкі сторони проекту.

Таблиця 5.9 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Порівняння рейтингу товарів-конкурентів						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Якість	12				+			
2	Ціна	15	+						
3	Затребуваність	19							+

У табл. 5.10 представлено SWOT-аналіз стартап-проекту [19].

Таблиця 5.10 – SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони	Слабкі сторони
Актуальність	Якість
Можливості	Загрози
Зростання попиту на продукт на ринку	Неможливість реалізації несертифікованого товару

Висновки до розділу

1. В результаті проведених досліджень встановлено, що реалізацію даного стартап-проекту можна вважати доцільною. Сильною стороною продукту є його актуальність. На сьогоднішній день особливо актуальні будь-які продукти, що сприяють спрощенню взаємодії між людьми в режимі віддаленого доступу.

2. Оптимальний варіант для виходу на ринок – співпраця з великими компаніями, що надають телекомунікаційні послуги. Це вигідно існуючим операторам та значно зменшує обсяг необхідних капіталовкладень через можливість використання обладнання існуючих мереж.

ВИСНОВКИ

Під час виконання дипломної роботи було визначено основні можливості і характеристики мереж п'ятого покоління 5G, а також перспективи їх впровадження в Україні.

Однією з основних перешкод на шляху впровадження 5G в Україні є проблема розподілу частотного ресурсу і отримання відповідних ліцензій операторами мобільного зв'язку. Зокрема, гальмівним фактором є процес звільнення частот, які зараз займають військові і провайдери супутникового ТБ.

Найбільш перспективними діапазонами для розгортання 5G в Україні є низькі в діапазоні 700 МГц і високі в діапазоні 3,4-3,8 ГГц. До кінця 2022 р. планують провести тендер та видати операторам ліцензії.

Забезпеченню поступового розгортання мережі 5G в Україні сприятиме використання методу динамічного розподілу спектру (DSS), особливо разом з впровадженням технологічної нейтральності на використання частотного ресурсу.

Найімовірніше, первинним сценарієм розгортання мережі 5G NR на ранній стадії в Україні буде сценарій щільної міської багатоповерхової забудови, оскільки доцільно починати встановлювати базові станції gNb в місцях, де LTE мережа перевантажена, тобто в центрах великих міст.

Для підтримки балансу покриття та ємності в умовах щільної міської забудови оптимальним рішенням RAN є використання удосконалених антенних систем з можливістю формування променів та MIMO 64T64R.

Покриття - це мінімальна вимога для стільникової мережі. Моделювання розповсюдження радіохвиль в мережах 5G і 2G/3G/4G має певні відмінності, зокрема, для 5G NR справжня інформація про багатопрореневий шлях (наприклад, AoA, AoD, EoA, EoD, інформація про затримку та фазу) є необхідною для формування матриці каналів MIMO, що є важливим для оцінки продуктивності Massive MIMO.

Процес планування базових параметрів стільника 5G NR подібний до планування параметрів 4G.

Принцип планування сусідніх стільників 5G NR залежить від режиму розгортання мережі (автономний чи не автономний). В обох випадках має бути передбачене внутрішньо системне сусідство стільників, включаючи внутрішнє та міжчастотне.

Отже, для планування і моделювання мереж 5G NR потрібні більш продуктивні пристрої для моделювання розповсюдження радіохвиль складними методами, зокрема за допомогою трасування променів.

Завдяки формуванню окремих променів з меншою шириною діаграми спрямованості та більшим коефіцієнтом підсилення, досягається значне покращення покриття (в середньому до 16 дБм).

Використання AAU в режимі Multibeam негативно впливає на показник відношення сигнал/шум, тому використовувати таке рішення в існуючих мережах LTE, слід точково, в місцях з найбільшим трафіковим навантаженням.

При щільному розгортанні мережі варто використовувати AAS в режимі Massive MIMO, завдяки чому реалізують так званий просторовий метод множинного доступу (SDMA - Space Division Multiple Access) абонентів, що є одним з основних методів боротьби із завадами.

На сьогоднішній день оператори мобільного зв'язку в Україні технологічно готові до поступового, точкового розгортання 5G NR. Властивостей та технічних переваг вищезазначених технологій достатньо для оптимізації мережі та для її впровадження у життя операторами зв'язку.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Series, M. IMT Vision—Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond; Recommendation ITU-R: Geneva, Switzerland, 2015.
2. Huawei Blog | Межмашинный обмен данными в сотовых сетях. URL: <https://blog.huawei.ru/technology/межмашинный-обмен-данными-в-сотовых-с>.
3. Диапазоны частот 5G. URL: <http://1234g.ru/5g/diapazonny-chastot-5g>.
4. Get an overview for the 5G wireless access|Whitepaper - Ericsson. URL: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/5g-wireless-access-an-overview>.
5. 5G в Україні буде вже у 2022 році. Кабмін узгодив впровадження технологій п'ятого покоління. URL: https://ukrain.com/5g_v_ukraini_bude_vzhe_u_2022_roci_kabmin_uzgodiv_vprova_dzhennya_tehnologij_pyatogo_pokolinnya.html.
6. Multiple Access for 5G New Radio: Categorization, Evaluation, and Challenges. URL: <https://arxiv.org/pdf/1703.09042.pdf>.
7. Spectrum sharing for fast & smooth 5G deployment - Ericsson. URL: <https://www.ericsson.com/en/networks/offerings/5g/sharing-spectrum-with-ericsson-spectrum-sharing>.
8. C. Martin, C. Doyle, and W. Webb. Essentials of modern spectrum management, Cambridge University Press, 2007.
9. D. Lopez-Perez, I. Guvenc, G. de la Roche, M. Kountouris, T. Q. S. Quek and J. Zhang, "Enhanced intercell interference coordination challenges in heterogeneous networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 22-30, June 2011.
10. A. H. Jafari, D. López-Pérez, H. Song, H. Claussen, L. Ho, and J. Zhang, "Small cell backhaul: challenges and prospective solutions," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2015, no. 1, pp. 1–18, 2015.

11. Раціональний вибір розміру антенної решітки MIMO для підвищення ефективності системи 5G. Магістерська дисертація / В. М. Гер. – Київ, 2018. URL: http://tk-its.kpi.ua/sites/default/files/2019-03/Her_magistr.pdf.
12. 5G NR Planning White Paper by Ranplan Wireless. URL: <https://ranplanwireless.com/wp-content/uploads/5G-NR-Planning-White-Paper-by-Ranplan-Wireless.pdf>.
13. Сеть радиодоступа 5G, часть 1 | Технологии связи. URL: <https://itechinfo.ru/content/сеть-радиодоступа-5g-часть-1#5gnr-04>.
14. Advanced antenna system for 5G Network|Whitepaper - Ericsson. URL: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/advanced-antenna-systems-for-5g-networks>.
15. Measurements in 5G networks. URL: <https://www.ericsson.com/4a0aa7/assets/content/22645e8e919f4fd38c4b28dd8daa661c/measurements-in-5g-networks.pdf>.
16. 5G RF Design & Planning Fundamentals - Our Technology Planet. URL: <https://ourtechplanet.com/5g-rf-design-planning-fundamentals/>.
17. 5G NR Network Relationship - Neighbor Planning - Techplayon. URL: <http://www.techplayon.com/5g-nr-network-relationship-neighbor-planning/>.
18. Проектування довгих стільникових мереж зв'язку [Електронний ресурс] : навчальний посібник для виконання курсової роботи з дисципліни «Телекомунікаційні довгі системи» для студентів усіх форм навчання за напрямом підготовки 6.050903 «Телекомунікації» / НТУУ «КПІ» ; уклад.: В. В. Пілінський, П. В. Попович, С. М. Веретюк. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,52 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2014. – 69 с. – URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/21177>.
19. Заходи щодо поліпшення умов праці в науково-дослідній лабораторії. URL: <https://netref.ru/referat-obsyag-poyasnyuvalenoyi-zapiski-magistersekoyi-diserta>.

Додаток А

РЕФЕРАТ

АНГЛІЙСЬКОЮ МОВОЮ ЗА ТЕМОЮ ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

ABSTRACT

Cellular networks of the fourth generation can be built on the basis of two technologies - LTE (Long Term Evolution) and WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access). Both of these technologies are similar, but have different developers and time of appearance. WiMAX, based on the IEEE 802.16 standard (developed by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, the Institute of Electrical and Electronics Engineers) uses OFDM technology to transfer data in both directions (for upload and download), which leads to high crest factors, that is, large coefficients load on the power supplies of the terminal equipment (to put it simply, the phone battery will wear out and discharge faster when using OFDM for outgoing speed). Unlike WiMAX, Long Term Evolution uses SC-FDMA for uplink speed, which avoids high crest factors as it is a single carrier technology.

LTE technology was developed by the 3GPP (The 3rd Generation Partnership Project) forum, which aims to solve the problems of using GSM and CDMA2000 (UMTS) technologies, which are, respectively, technologies of the second and third generations of cellular communications. Accordingly, the fifth generation networks in Kazakhstan should be deployed based on LTE Advanced networks.

The fifth generation (5th Generation) of cellular communication should solve the issues related not to improving the quality of voice transmission, but to the problem of accessing the Internet and increasing data transmission speed. Since the technologies of all previous generations of communication were based on the previous ones, that is, to use the services of the 3G network, it was not required to buy a new device, and to use LTE Advanced, it was only necessary to replace the SIM card in the outdated phone, the author suggests that the first release of the IMT standard 2020 will be based on LTE Advanced technology with non-orthogonal frequency diversity, Non-OFDM.

Despite the architecture similar to LTE Advanced, 5G networks must use a wider frequency spectrum to increase speed, and since fourth-generation networks occupy the decimeter or centimeter frequency range (LTE Advanced operates in the range from

2500 to 2690 MHz when loading, for example, a domestic operator “ Altel uses the 1800 MHz frequency band.), Then fifth generation networks are likely to be allocated frequencies in the millimeter range (60-100 GHz). Accordingly, to use the millimeter wave, it will be necessary not only to increase the number of base stations in our country, but also to increase the power of the power supplies of these base stations.

Another hallmark of 5G networks will be the adoption of cloud technologies. The use of "clouds" is necessary to relieve the load on base stations, it is assumed that they will only transmit a signal without processing, as it happens in 4G networks (in LTE networks, signal processing occurs on the side of the end device and base station, mobility control unit, MME , transmits only service information, not user traffic, it is the base station that is engaged in its transmission, therefore, with an increase in the number of connected devices, they will not be able to cope with the load).

Since the fifth generation networks will operate on the basis of the fourth generation, it is first necessary to explain how the LTE Advanced network functions, then to deduce assumptions about the architectural differences of the fifth generation networks.

The LTE network consists of two systems - a core network, System Architecture Evolution or Evolved Packet Core, consisting of Mobility Management Entities, User Plane Entities, Service and Packet Gateways, and an evolved UMTS Terrestrial radio access network, E-UTRAN), consisting only of base stations. In the previous generation of communication, the radio access network architecture included a radio network controller, the Radio Network Controller, whose functions included the process of establishing and interrupting subscriber connections, the handover process (transferring a subscriber from one base station to another), encrypting user data, and determining the level of quality control. In LTE networks, all these functions are assigned to base stations.

All elements of LTE networks are interconnected using interfaces (an interface is a set of standardized connections that connect various equipment, for example,

interfaces are called connecting cables of a computer motherboard and peripheral devices - RS-232, USB, HDMI). The interface connecting the base stations is called X2 and is responsible for keeping the subscriber in the network while moving from one base station to another. The base stations are connected to the mobility control unit via the S1 interface; the interface itself is divided into two types: S1-C, which transmits service information for the base station through the Serving GW; S1-U transmitting user information through the Packet Data Network GW. Also, in addition to S1, there are other interfaces, such as: S2 (for connecting to networks for which the 3GPP forum was not a developer), S3 (connects a packet network node for subscribers of second and third generation networks and MME, is responsible for transferring service data between LTE and legacy networks), S4 (connects the SAE core network and the previous generation SGSN, Serving GPRS Support Node), S5 (connects the core network and the Packet Data Network GW), S6 (connects the Mobility Management Unit and subscriber data server, responsible for authentication in the LTE network). The set of network equipment of the core network, radio access network and connecting interfaces is the physical structure of LTE, LTE Advanced networks.

Logically, the structure of the LTE network is divided into two parts: the radio access layer, Access Stratum and the non-access layer, Non-Access Stratum. The radio access layer includes all equipment of the radio access network and the core packet network, the non-access layer includes methods of monitoring (or managing) mobility, EMM, EPC Mobility Management.

Networks based on LTE Advanced provide access to high-quality network services - calls, high speed downloading of multimedia data, free use (without traffic) of some applications (mainly messengers). Unfortunately, due to the large number of devices and the improvement in the quality (and therefore the size) of multimedia information, LTE networks will soon be unable to cope with the heavy load. In particular, the decimeter frequency spectrum used by LTE will not be able to provide

access to resources with the required quality level (Qos), and then the device may simply disconnect from the network (refusal of the base station to serve the cell phone).

It is in order to prevent bandwidth saturation and in the future to free the decimeter spectrum for devices that consume few resources, by 2025 in Europe they plan to move to the introduction of fifth generation (5G) networks. Each generation of cellular communication should be different from the other: the first from the second - the transition from analog types of modulation to digital; second from third - the emergence of additional services, such as high-speed Internet access; the fourth from the third is the transition from channel switching (distribution of incoming data) to packet switching and the introduction of IP addressing, as in wired networks. The fifth generation should differ from the fourth in two parameters: the used spectrum frequency, that is, the transition to ultrashort waves, as well as removing the load from base stations by transferring their functions to virtual machines. The inclusion of virtualization and cloud technologies in 5G architecture means more flexible and faster setup, as well as cheaper deployment, as there can be many virtual machines on a single physical machine. By flexible setting, the author understands the creation of individual conditions for using communication services: personal tariff plans that adapt to the needs of each subscriber; control the amount of data consumed by all applications.

So, according to the 3GPP TS 38.300 version 15.3 specification. 1 Release 15, the general arrangement of fifth-generation networks is built on the basis of New Radio technology and will be divided into two parts, like the previous generation: 5GC (Core Network), that is, the core network and NG-RAN (Next Generation Radio Access Network), then there is a next generation radio access network. The core network should be composed of two main devices, separating service and user functions. These devices are called "functions": AMF (Access and Mobility Management Function), a function responsible for providing access and maintaining the network signal while the subscriber moves; UPF (User Plane Function), which is responsible for the transmission of user traffic.

The radio access network consists of two types of base stations: gNB operating in the fifth generation network and ng-eNB operating in the fourth (E-UTRAN) or previous generation network. Both types of base stations must be connected with the Xn interface, and the connection between base stations and functional blocks must be connected with the NG interface. Also, as in LTE networks, the NG interface is different for devices that communicate with each other. In total, the 3GPP TR 23.799 specification, released in December 2016, defines 15 types of NG interfaces, numbered from 1 to 15. It is not possible to describe all 15 types of communication complexes in the article, so the author will give only five of them. So, NG1 is a "reference point" between the user device and the AMF, NG2 - connects the base station with the AMF; the base station is also connected via the NG3 interface with the user plane function, which, in turn, is connected via the NG4 interface with the session management function, and access to the Internet and operator services is provided via the NG6 interface. The AF applications function connects to the session control function through the NG5 interface.

From LTE networks in the 5G network, concepts such as user and control planes have passed, therefore, the NG interfaces associated with the user, just like in LTE, denote NG-U and, accordingly, NG-C for the control plane, therefore the protocol layers (stacks) of interfaces are also divided only into user and service ones. The user plane interfaces connect the base station to the UPF and the control plane (NG-C) interfaces to the AMF. It should be noted here that NG-U provides non-guaranteed delivery (when the user device sends a protocol data unit (PDU) and does not wait for a delivery report in response; guaranteed delivery is a confirmation in the form of a report that the data item has been received), which significantly saves time data transmission.

The Xn and NG interfaces must have open specifications available to all manufacturers for interfacing with different base stations. It should be noted here that some groups of scientists working on the development of 5G requirements and

standards, in particular, the NGMN (Next Generation Mobile Networks) forum, in their reports adhere to the opinion that all technologies are completely open, that is, the entire network device, starting with the physical and ending with the application layer must be available to all users. NGMN also believes that the design and construction of a 5G network should not be carried out by each operator separately, but jointly by all regional operators.

The process of working in a fifth generation network is approximately the following: the user device detects the network using the built-in antenna (this stage remains unchanged since the second generation and GSM technology), the network, that is, AMF, through the base station, requests the service data of the phone.

The user device sends its credentials through the base station to the access and mobility management function (AMF), this function matches the credentials of the device with a server that contains the data of all subscribers and if the provided data matches, access to the network is allowed. After registration, the user device gets access to the UPF, and through it - to the network services.

Another difference between the fifth generation network - virtualization of services and data processing in cloud operating systems - added another concept to the definition of architecture: in addition to "Plane" - "plane", the concept of "Slicing" - "slice" appeared, meaning different settings (or characteristics networks) for individual users and groups, as well as for equipment. It is assumed that the 5G network provider will create special templates - virtual machines (NST, Network Slice Template), and users will be able to optimize these templates for themselves, that is, connect the required services, rent software. The architecture of slices should not be open, since virtual machines working remotely (in the "cloud", that is, in the Data Center of a 5G provider) can be from different manufacturers.

In 2016, the NGMN forum released the Description of Network Slicing Concept document, in which the logical structure of slicing consists of three parts (from bottom

to top): the resource level, the network segment instance level and the service instance level.

The resource tier includes all physical and logical resources. Physical resources are all the components that make up a network: base stations, storage systems, servers, routers, switches, even crossover (connecting equipment such as copper or fiber optic cable is a physical resource). Logical resources are physical resources grouped by a specific criterion or for some purpose, for example, logical resources intended for virtual hosting (a service that provides space for storing data on a constantly working, that is, networked, server computer) include : actually, a server computer with an operating system, a data storage system - a complex consisting of several hard drives connected to each other, switches, routers and connecting cables, as well as software at the request of the customer. Network functions are not resources, they are part of the network segment slice. At the same time, a network segment plan, which is a description of the structure and required network functions, refers to logical resources.

An instance of a network segment is a "Slice" - a slice, which is a set of characteristics, settings, allocated resources for the deployment of services and services provided by the network operator. For example, a slice intended for the exchange of data between machines (sensors, counters) does not require a data storage system, only a server, a switch and a router, as well as connecting cables, because sometimes one data bit is enough to transfer a signal from device to device - 0 or 1. If you recall the handover procedure (transition of a user device from one base station to another), then it can be immediately seen from it that the base stations and the user device exchange text messages with each other, consisting of one or two words (for example: HO REQUEST, HO RESPONSE and so on). At the same time, the cut for M2M (car and car) connections must be extremely reliable, that is, the message must be delivered and ultra-low latency, that is, the message must be delivered very quickly, for example, if the car remote control program sends a message to the car sensor. Another example of a cut - to provide an Internet TV service, on the contrary, needs a data storage system,

several servers, routers and connecting equipment to provide constant access to a multimedia service, which also requires ultra-low latency, but at the same time it does not need ultra-reliability, since the loss multiple data packets may not be noticed by the user.

A network segment can use various resources, consist of several logically complete subnets, while networks can use the resources of not only their own slice, but also another. The network segment must be deployed on a virtual machine, because, thanks to hypervisors (special programs that divide the physical resources of server computers into several logical components), scalability, that is, increasing the number of slices (for example, one slice - one virtual machine) will be a very simple procedure.

The service instance layer is the final service or program provided to the user. Service instances have long been part of the global network. A classic example of such a service is email services, such as Gmail, which is loaded through a browser and is indistinguishable in appearance from any other site, but it uses the same network protocols as Microsoft Outlook or another stand-alone program installed on a computer and, when launched, communicates with the mail mailbox through postal protocols.

Fifth generation networks must physically have the same simple structure as LTE networks, that is, consist only of a core network and a radio access network. But logically, 5G is much more complex in structure: the horizontal division into user and service planes has been preserved, vertical division into slices has been added, the role of computer control has expanded, new logical elements have been added, such as the session control function or the application function.

The author believes that the physical structure of the fifth generation network will be similar to the previous generation for several years, because manufacturers of user equipment (phones, tablets, and so on) need to ensure the continuity of technologies that guarantees operation in different networks, especially since on the general scheme of the network device the fifth generation indicated two types of base stations. Also, a smooth transition from one communication generation to another is

evidenced by the fact that the 3GPP specifications use Non-OFDM as a modulation method, which has already been implemented in LTE Advanced networks.

The fifth generation of communication will provide manufacturers and private users with services that were not provided for in LTE networks or did not function properly, such as communication between machines, that is, the use of all kinds of sensors.

In conclusion, it should be said that, according to the author, Kazakhtelecom JSC, which owns 100% of the shares of the cellular operator Altel, which provides services of the cellular LTE network and 75% of the shares of the cellular operator, is best suited for the deployment of fifth generation networks in Kazakhstan, according to the author. Kcell ". The company offers its clients virtual hosting, has several data centers in different cities of the Republic. If the International Telecommunication Union presents the approved 5G specifications (IMT-2020) to the international community in December 2019, then Kazakhtelecom JSC will be able to put into operation the fifth generation networks by 2025.