

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

**Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій**

До захисту допущено:

В.о.завідувача кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2026 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Інженерія та програмування
інфокомунікацій»**

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Розрахунок зони покриття базової станції стандарту LTE
діапазону 2600 МГц»**

Виконала:

студентка IV курсу, групи ТЗ-з21

Муха Валерія Діонісівна

Керівник:

Доцент кафедри ТК НН ІТС, к.т.г., доцент

Трубаров Ігор Володимирович

Рецензент:

Старший викладач кафедри ІТТ НН ІТС

Курдеча Василь Васильович

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студентка _____

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інженерія та програмування інфокомунікацій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.завідувача кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«___» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студентці

Мусі Валерії Діонісівні

1. Тема роботи «Розрахунок зони покриття базової станції стандарту LTE діапазону 2600 МГц», керівник роботи Трубаров Ігор Володимирович, к.т.г., доцент, затверджені наказом по університету від «26» травня 2026 р. № 1913-с.
2. Термін подання студентом роботи 10 червня 2026 р.
3. Вихідні дані до роботи: Потужність передавача $P_t = 46$ дБм (40 Вт); Робоча частота $f = 2690$ МГц (верхня межа діапазону Band 7); Коефіцієнт підсилення антени базової станції (всеспрямований режим) $G_t = 2,15$ дБі; Коефіцієнт підсилення антени мобільного терміналу $G_r = 0$ дБі; Чутливість приймача (мінімальний рівень сигналу) $P_{r,min} = -100$ дБм; Висота антени базової станції $h_t = 20$ м; Висота антени мобільного терміналу $h_r = 1,7$ м
4. Зміст роботи: Огляд літературних джерел, розрахунок зони покриття сектора базової станції із спрощеною моделлю поширення радіохвиль, формування математичної моделі антени базової станції, розрахунок зони покриття з урахуванням рельєфу місцевості, розрахунок зони покриття базової станції з трьома секторами.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо) : 1. Тема; 2. Актуальність та мета роботи; 3. Вихідні дані розрахунку; 4.

Модель поширення радіохвиль; 5. Математична модель антени; 6. Врахування рельєфу; 7. Покриття сектора; 8. Трисекторна конфігурація; 9. Вплив кута нахилу; 10. Висновки;

6. Консультанти розділів роботи*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1. Огляд літературних джерел	Трубаров І.В., доцент кафедри телекомунікацій		
Розділ 2. Розрахунок покриття із спрощеною моделлю	Трубаров І.В., доцент кафедри телекомунікацій		
Розділ 3. Формування математичної моделі антени	Трубаров І.В., доцент кафедри телекомунікацій		
Розділ 4. Розрахунок покриття з урахуванням рельєфу	Трубаров І.В., доцент кафедри телекомунікацій		
Розділ 5. Розрахунок покриття трисекторної БС	Трубаров І.В., доцент кафедри телекомунікацій		

7. Дата видачі завдання 29.12.2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Здійснити огляд літературних джерел щодо систем мобільного зв'язку, стандарту LTE, типів антен, що використовуються у базових станціях даного стандарту.	29.12.2025 – 02.02.2026	Виконано
2	Визначити точку розміщення базової станції мобільного зв'язку на мапі. Реалізувати алгоритм побудови кругової зони покриття навколо одного передавача. У якості вхідних даних прийняти SHP-файл, що містить точку розміщення передавача, GeoTIFF-файл, що містить цифрову модель поверхні землі, радіус зони покриття.	03.02.2026 – 02.03.2026	Виконано
3	Здійснити розрахунок зони покриття одного сектора мережі мобільного зв'язку, використовуючи модель загасання у відкритому просторі та умови всеспрямованої антени базової станції. Результат розрахунку	03.03.2026 – 16.03.2026	Виконано

	представити у вигляді файлу формату GeoTIFF та відобразити на мапі. Розрахунок здійснити для стандарту LTE-2600 на частоті 2690 МГц.		
4	Здійснити та обґрунтувати вибір параметрів спрямованої односекторної антени базової станції мобільного зв'язку. Реалізувати математичну модель апроксимації діаграми спрямованості антени та здійснити розрахунок зони покриття одного сектора базової станції мережі мобільного зв'язку, використовуючи модель загасання у відкритому просторі. Розрахунок здійснити для стандарту LTE-2600 на частоті 2690 МГц.	17.04.2026 – 01.05.2026	Виконано
5	Реалізувати алгоритм побудови профіля каналу зв'язку між базовою станцією та довільною точкою в круговій зоні навколо базової станції.	02.05.2026 – 09.05.2026	Виконано
6	Реалізувати алгоритм розрахунку втрат в каналі зв'язку з урахуванням профіля місцевості вздовж траси поширення радіохвиль. Модель повинна враховувати явище дифракції на елементах земної поверхні та об'єктів на ній.	02.05.2026 – 09.05.2026	Виконано
7	Здійснити розрахунок зони покриття одного сектора базової станції мережі мобільного зв'язку, використовуючи модель втрат, яка враховує дифракцію на елементах поверхні. У розрахунку врахувати спрямованість антени, використавши математичну модель діаграми її спрямованості. Розрахунок здійснити для декількох значень азимуту спрямованості антени та куту нахилу антени. Результат представити у вигляді GeoTIFF-файлу та відобразити на мапі в геоінформаційній системі.	10.05.2026 – 17.05.2026	Виконано
8	Здійснити розрахунок зони покриття базової станції мережі мобільного зв'язку, до складу якої входять 3 сектори. Для секторів за необхідності обрати частоти, що забезпечують їхню сумісну роботу з прийнятним рівнем інтерференції. Розрахунок здійснити для стандарту LTE-2600. Результат представити у вигляді GeoTIFF-файлу.	18.05.2026 – 30.05.2026	Виконано

Студентка

Валерія МУХА

Керівник

Ігор ТРУБАРОВ

РЕФЕРАТ

Дипломна робота містить: 55 с., 14 рисунків, 2 таблиць, 12 джерел.

Мета роботи – розрахунок зони покриття трисекторної базової станції стандарту LTE в діапазоні 2600 МГц із використанням виключно відкритих програмних засобів (Python, QGIS) та відкритих цифрових моделей рельєфу (ALOS World 3D).

Методи дослідження. Застосовано рівняння Фрііса для енергетичного бюджету радіолінії, модель загасання у відкритому просторі згідно з ITU-R P.525, математичну модель секторної антени на основі рекомендацій 3GPP TR 36.942 (адитивне зшивання горизонтальної та вертикальної діаграм спрямованості з єдиним обмеженням рівня заднього пелюстка 25 дБ), а також модель дифракційних втрат за методом Дейгута (ITU-R P.526). Розрахунки реалізовано у вигляді скриптів мовою Python; візуалізацію результатів виконано в середовищі QGIS.

Результати. Побудовано спрощену кругову зону покриття для всеспрямованої антени (радіус $\sim 226,7$ км у вільному просторі). Сформовано тривимірну модель діаграми спрямованості секторної антени з параметрами $G_0 = 18$ дБі, $\Delta\varphi_{0,5} = 65^\circ$, $\Delta\theta_{0,5} = 7^\circ$, $\beta_0 = 4^\circ$. Виконано розрахунок покриття одного сектора з урахуванням дифракційних втрат на реальному профілі місцевості (тестова точка на відстані 2 км – рівень сигналу $-75,98$ дБм). На основі суперпозиції трьох секторів (азимути 0° , 120° , 240°) отримано суцільну зону обслуговування за принципом «найкращого сервера». Результати візуалізовано у вигляді растрових карт формату GeoTIFF.

Практичне значення. Розроблений підхід дозволяє виконувати інженерні розрахунки зон покриття LTE-2600 без залучення комерційного програмного забезпечення, що є актуальним для навчальних і науково-дослідних проєктів.

Ключові слова: LTE, діапазон 2600 МГц, зона покриття, секторна антена, діаграма спрямованості, дифракція, Python, QGIS, ALOS AW3D30.

ABSTRACT

The thesis contains: 55 pages, 14 figures, 2 tables, 12 references.

Objective – to calculate the coverage area of a three-sector LTE base station in the 2600 MHz band using only open-source software (Python, QGIS) and open digital elevation models (ALOS World 3D).

Methods. The Friis transmission equation, free-space path loss model (ITU-R P.525), a sectored antenna pattern model based on 3GPP TR 36.942 (additive combining of horizontal and vertical patterns with a single 25 dB rear-lobe limit), and the Deygout diffraction loss model (ITU-R P.526) are applied. Calculations are implemented in Python scripts; results are visualised in QGIS.

Results. A simplified omnidirectional coverage area (free-space range ≈ 226.7 km) is obtained. A 3-D directional antenna model is developed with parameters $G_0 = 18$ dBi, $\Delta\varphi_{0,5} = 65^\circ$, $\Delta\theta_{0,5} = 7^\circ$, $\beta_0 = 4^\circ$. Single-sector coverage including diffraction losses over a realistic terrain profile is calculated (at a test point 2 km away, received signal level -75.98 dBm). By superimposing three sectors (azimuths 0° , 120° , 240°) and applying the “best server” principle, a continuous coverage area is obtained. Results are exported as GeoTIFF raster maps.

Practical value. The proposed approach enables engineering calculations of LTE-2600 coverage without commercial software, which is especially useful for educational and research projects.

Keywords: LTE, 2600 MHz band, coverage area, sector antenna, radiation pattern, diffraction, Python, QGIS, ALOS AW3D30.

ЗМІСТ

ВСТУП	12
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	14
1.1 Мережі мобільного зв'язку та сучасні стандарти	14
1.2 Стандарт LTE та діапазон 2600 МГц	16
1.3 Частотно-територіальне планування мереж мобільного зв'язку	17
1.4 Антени базових станцій мобільного зв'язку	19
1.5 Моделі поширення радіохвиль	23
Висновки	23
РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК ЗОНИ ПОКРИТТЯ СЕКТОРА БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ ІЗ СПРОЩЕНОЮ МОДЕЛЛЮ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ	24
2.1 Модель загасання у відкритому просторі	24
2.2 Реалізація розрахунку мовою Python	26
2.3 Візуалізація результатів у QGIS	29
Висновки	31
РОЗДІЛ 3 ФОРМУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АНТЕНИ БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ	32
3.1 Параметри секторної антени	32
3.2 Математична модель діаграми спрямованості	33
3.3 Побудова горизонтальної та вертикальної проєкцій	34
3.4 Адитивне зшивання	36
3.5 Розрахунок зони покриття сектора з урахуванням спрямованості антени	38
РОЗДІЛ 4 РОЗРАХУНОК ЗОНИ ПОКРИТТЯ З УРАХУВАННЯМ РЕЛЬЄФУ МІСЦЕВОСТІ	42
4.1 Побудова профілю каналу зв'язку	42
4.2 Модель дифракційних втрат	43
4.3 Розрахунок зони покриття сектора з урахуванням рельєфу	46
Висновки	49
РОЗДІЛ 5 РОЗРАХУНОК ЗОНИ ПОКРИТТЯ БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ З ТРЬОМА СЕКТОРАМИ	50
5.1 Конфігурація трисекторної базової станції	50
5.2 Частотне планування	52
5.3 Результати розрахунку зони покриття трисекторної БС	53
Висновки	55
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ	56

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	57
----------------------------------	----

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

3GPP	3rd Generation Partnership Project (Проект партнерства третього покоління)
ALOS	Advanced Land Observing Satellite (Японський супутник спостереження Землі)
AW3D30	ALOS World 3D – 30 m (цифрова модель поверхні з роздільною здатністю 30 м)
Band 7	Частотний діапазон LTE 2620–2690 МГц (низхідний) / 2500–2570 МГц (висхідний)
BS	Base Station (базова станція)
eICIC	Enhanced Inter-Cell Interference Coordination (розширена координація міжстільникових завад)
eNodeB	Evolved Node B (базова станція LTE)
EPC	Evolved Packet Core (удосконалене пакетне ядро)
EPSG	European Petroleum Survey Group (кодова система координат)
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (удосконалена наземна радіомережа доступу)
FDD	Frequency Division Duplex (дуплекс із частотним розділенням)
GeoTIFF	Географічний растровий формат на основі TIFF
GIS	Geographic Information System (геоінформаційна система)

GSM	Global System for Mobile Communications (глобальна система мобільного зв'язку)
HSS	Home Subscriber Server (сервер домашніх абонентів)
ICIC	Inter-Cell Interference Coordination (координація міжстільникових завад)
ITU-R	International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector (Міжнародний союз електрозв'язку, сектор радіозв'язку)
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency (Японське аерокосмічне агентство)
LTE	Long Term Evolution (стандарт мобільного зв'язку четвертого покоління)
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output (багатоканальна система з кількома входами та виходами)
MME	Mobility Management Entity (об'єкт управління мобільністю)
MT	Mobile Terminal (мобільний термінал)
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access (множинний доступ з ортогональним частотним розділенням)
P-GW	Packet Data Network Gateway (шлюз пакетних даних)
QGIS	Quantum Geographic Information System (вільно поширювана ГІС)
S-GW	Serving Gateway (обслуговуючий шлюз)
TDD	Time Division Duplex (дуплекс із часовим розділенням)

TDMA	Time Division Multiple Access (множинний доступ з часовим розділенням)
VoLTE	Voice over LTE (голосовий зв'язок через LTE)
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access (широкосмуговий множинний доступ з кодовим розділенням)
WGS	World Geodetic System (всесвітня геодезична система координат)
БС	базова станція
ГІС	геоінформаційна система
ДС	діаграма спрямованості
МТ	мобільний термінал

ВСТУП

Розвиток мобільного зв'язку четвертого покоління, зокрема стандарту Long Term Evolution, створив передумови для масового впровадження широкосмугових бездротових послуг у міських агломераціях та приміських територіях. Діапазон 2600 МГц, виділений для розгортання мереж LTE у більшості європейських країн, забезпечує достатню пропускну здатність каналу і водночас дозволяє операторам використовувати порівняно компактні антенні системи, хоча й зазнає відчутнішого загасання порівняно з нижчими частотними смугами, що безпосередньо впливає на радіус зони покриття кожного сектора базової станції.

Комерційні інструменти радіопланування, як-от Atoll, Mentum Planet або Asset, дають змогу оператору змодельовати покриття з високою точністю, проте потребують придбання ліцензій та комерційних цифрових карт місцевості, що обмежує їх доступність для навчальних і дослідницьких установ. Водночас поєднання відкритого програмного забезпечення, а саме мови програмування Python, геоінформаційної системи QGIS, та вільно доступних цифрових моделей поверхні, зокрема ALOS World 3D (AW3D30) японського космічного агентства JAXA, відкриває можливість відтворити основні етапи розрахунку зони покриття без фінансових витрат і з повним контролем над алгоритмами [1].

Мета цієї роботи полягає у розрахунку зони покриття трисекторної базової станції стандарту LTE діапазону 2600 МГц із залученням виключно відкритих інструментів та відкритих картографічних даних. Для досягнення мети послідовно розв'язано такі завдання: здійснено огляд предметної області, побудовано спрощену модель покриття на основі рівняння Фрііса, сформовано математичну модель спрямованої секторної антени, виконано розрахунок покриття з урахуванням дифракційних втрат уздовж профілю місцевості та визначено зону покриття повноцінної трисекторної базової станції.

Результати розрахунків представлено у форматі GeoTIFF і візуалізовано в середовищі QGIS, що підтверджує практичну придатність запропонованого

підходу для навчальних та науково-дослідних проєктів, де комерційне програмне забезпечення є недоступним.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Мережі мобільного зв'язку та сучасні стандарти

Еволюція стільникових мереж від аналогових систем першого покоління до сучасних технологій четвертого та п'ятого поколінь відбувалася під тиском зростаючого попиту на швидкість передавання даних і якість обслуговування абонентів. Rapraort у фундаментальній праці [2] систематизував принципи побудови бездротових систем зв'язку та показав, що кожне наступне покоління вирішувало обмеження попередніх шляхом переходу до більш ефективних методів модуляції, кодування і множинного доступу. Стандарти 2G, зокрема GSM, запровадили цифрове кодування мовлення та технологію TDMA, тоді як покоління 3G із системою WCDMA вперше забезпечило пакетну передачу даних зі швидкостями, придатними для мобільного Інтернету [3].

Четверте покоління мобільного зв'язку, представлене стандартом LTE, ознаменувало перехід до повністю пакетної архітектури, де навіть голосовий трафік передається як потік даних через протокол VoLTE. Технічні специфікації 3GPP TS 36.300 [4] визначають загальну архітектуру мережі E-UTRAN, яка складається з базових станцій eNodeB, з'єднаних між собою інтерфейсом X2 та з ядром мережі через інтерфейс S1, що забезпечує спрощену і водночас гнучку топологію без контролерів радіомережі, притаманних попереднім поколінням.

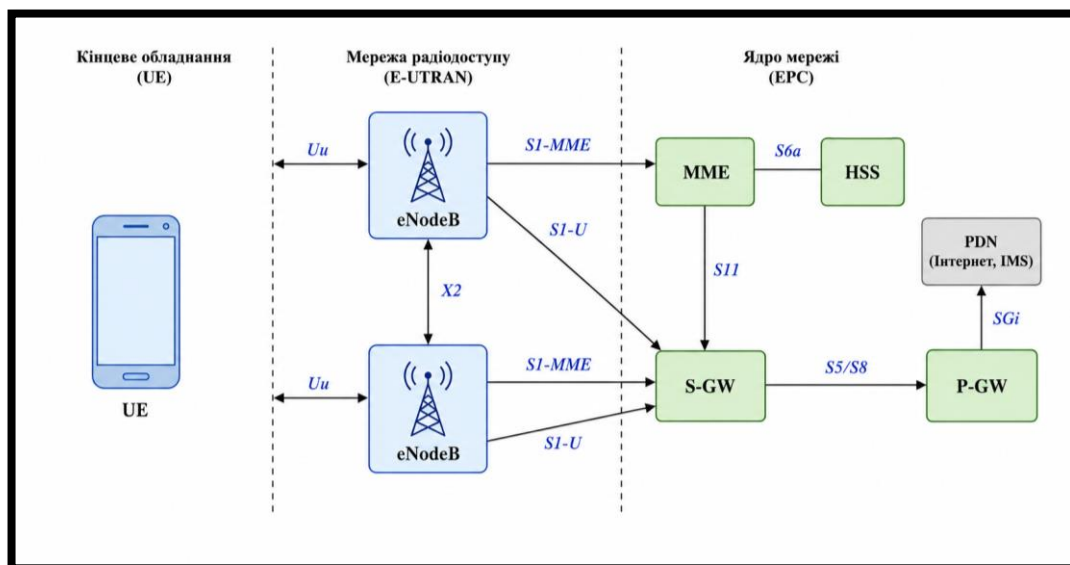


Рис. 1.1 Архітектура мережі E-UTRAN стандарту LTE

Подана на рис. 1.1 архітектура E-UTRAN відображає принцип функціонального розподілу мережі LTE на три взаємодіючі сегменти. Базові станції eNodeB безпосередньо взаємодіють з абонентськими терміналами через радіоінтерфейс Uu і обмінюються службовою інформацією між собою через інтерфейс $X2$, що дозволяє виконувати естафетну передачу і координацію інтерференції без участі ядра. Ядро EPC централізовано забезпечує управління мобільністю (MME), маршрутизацію користувацького трафіку (S-GW, P-GW) та автентифікацію абонентів (HSS), а взаємодія з зовнішніми мережами відбувається через інтерфейс SGi .

На рис. 1.1 представлено спрощену архітектуру мережі E-UTRAN. Ключовою відмінністю від попередніх поколінь є відсутність контролера радіомережі (RNC): усі функції управління радіоресурсами зосереджено безпосередньо в базовій станції eNodeB, що спрощує архітектуру та зменшує затримку. Базові станції з'єднані між собою інтерфейсом $X2$ для забезпечення швидкого хендвера без залучення ядра мережі, а через інтерфейс $S1$ з елементами ядра EPC (Evolved Packet Core), зокрема MME (Mobility Management Entity), що відповідає за управління мобільністю, S-GW (Serving Gateway) та P-GW (Packet Data Network Gateway), що забезпечують маршрутизацію пакетів даних до зовнішніх мереж [4].

Для мереж мобільного зв'язку використовуються частотні діапазони, що забезпечують оптимальний компроміс між дальністю поширення радіохвиль та пропускною здатністю каналу. Низькочастотні діапазони (700–900 МГц) характеризуються великою дальністю поширення та кращим проникненням крізь будівлі, тому застосовуються для забезпечення покриття великих територій із низькою щільністю абонентів. Середньочастотні діапазони (1800–2600 МГц) пропонують більшу смугу пропускання, але мають менший радіус стільники, тому використовуються переважно у міських районах із високою щільністю абонентів. Високочастотні діапазони (3400–3800 МГц та вище) забезпечують максимальну пропускну здатність і застосовуються у технологіях 5G для надщільних мереж [2].

1.2 Стандарт LTE та діапазон 2600 МГц

Специфікація 3GPP TS 36.104 [5] визначає діапазон 2600 МГц як Band 7 для FDD та Band 38 для TDD із загальною шириною смуги до 70 МГц. Цей діапазон відзначається значною ємністю, що дозволяє оператору виділити канали шириною 10 або 20 МГц кожному сектору, проте характеризується підвищеним затуханням порівняно, скажімо, з діапазоном 800 МГц, особливо у щільній міській забудові. За даними 3GPP TR 36.942 [6], різниця у втратах на трасі між 800 і 2600 МГц може сягати 10–15 дБ за інших рівних умов, що пропорційно зменшує радіус стільники і потребує щільнішого розміщення базових станцій.

У цій роботі для розрахунку обрано частоту 2690 МГц, що є верхньою межею діапазону Band 7 (2620–2690 МГц). Згідно з рівнянням Фрііса, втрати у відкритому просторі зростають пропорційно квадрату частоти, тому чим вища частота, тим менша відстань поширення радіохвилі за інших рівних умов. Отже, частота 2690 МГц відповідає найгіршому випадку поширення радіохвиль у межах усього діапазону 2600 МГц. Логіка такого вибору полягає в тому, що якщо необхідно побудувати єдине покриття для всього діапазону Band 7, доцільно

виконати розрахунок саме для частоти з найгіршими умовами поширення: якщо зона покриття забезпечується на 2690 МГц, вона гарантовано забезпечуватиметься і на нижчих частотах цього діапазону [2].

Стандарт LTE підтримує широкий набір частотних діапазонів (bands), що визначаються специфікацією 3GPP TS 36.104. Для режиму FDD (Frequency Division Duplex), де висхідний та низхідний канали працюють на різних частотах одночасно, визначено понад 30 смуг частот. Для режиму TDD (Time Division Duplex), де обидва канали використовують одну частоту з розподілом у часі, визначено понад 10 смуг. У таблиці 1.1 наведено основні частотні діапазони LTE, що найбільш поширені в Європі та Україні.

Таблиця 1.1

Основні частотні діапазони LTE в Європі

Band	Режим	Низхідний, МГц	Висхідний, МГц	Ширина, МГц
3	FDD	1805–1880	1710–1785	75
7	FDD	2620–2690	2500–2570	70
8	FDD	925–960	880–915	35
20	FDD	791–821	832–862	30
38	TDD	2570–2620	2570–2620	50

Діапазон Band 7 (2620–2690 МГц для низхідного каналу) є одним із найбільш затребуваних для розгортання мереж LTE у великих містах завдяки широкій доступній смузі 70 МГц, що дозволяє розгорнути до трьох каналів шириною 20 МГц. В Україні ліцензії на використання діапазону 2600 МГц були видані операторам «Київстар», «Vodafone Україна» та «lifecell» у 2018 році для розгортання мереж LTE [5].

1.3 Частотно-територіальне планування мереж мобільного зв'язку

Mishra [3] докладно описує процедуру частотно-територіального планування, яка полягає у розподілі наявного частотного ресурсу між секторами

таким чином, щоб мінімізувати рівень міжстільникової інтерференції та забезпечити прийнятне відношення сигнал/завада на краю стільники. Класичний підхід передбачає використання кластерної моделі з коефіцієнтом повторного використання частот, де кожна базова станція поділяється на три або шість секторів, а сусідні стільники отримують різні частотні канали.

У мережах LTE, що працюють у діапазоні 2600 МГц, типовою конфігурацією є трисекторна базова станція з азимутами секторів 0° , 120° та 240° , де кожен сектор використовує окрему смугу частот або застосовує технологію ICIC для зниження інтерференції на краях стільники [6]. Вибір частотного плану безпосередньо впливає на якість покриття і потребує ретельного розрахунку зони обслуговування кожного сектора, що й становить предмет даної роботи.

Принциповою відмінністю планування мережі LTE від планування мережі GSM є підхід до частотного повторного використання. У мережах GSM кожна стільника повинна отримати унікальний набір частотних каналів, відмінний від каналів сусідніх стільник, щоб уникнути міжканальної інтерференції. Це вимагає формування так званої «мозаїки» частот на карті покриття із застосуванням кластерної моделі з коефіцієнтом повторного використання $K = 3, 4$ або 7 , що суттєво обмежує кількість доступних каналів для кожного сектора та знижує загальну спектральну ефективність мережі (рис. 1.2).

На відміну від GSM, мережа LTE є «одночастотною»: усі стільники теоретично можуть використовувати один і той самий частотний канал завдяки стійкості технології OFDMA до міжстільникової інтерференції. Управління інтерференцією здійснюється на рівні планувальника ресурсів за допомогою механізмів ICIC (Inter-Cell Interference Coordination) та eICIC (enhanced ICIC), які динамічно розподіляють ресурсні блоки між сусідніми стільниками з урахуванням поточного рівня завантаження та якості каналу. Це значно спрощує процес частотного планування та підвищує спектральну ефективність мережі [6].

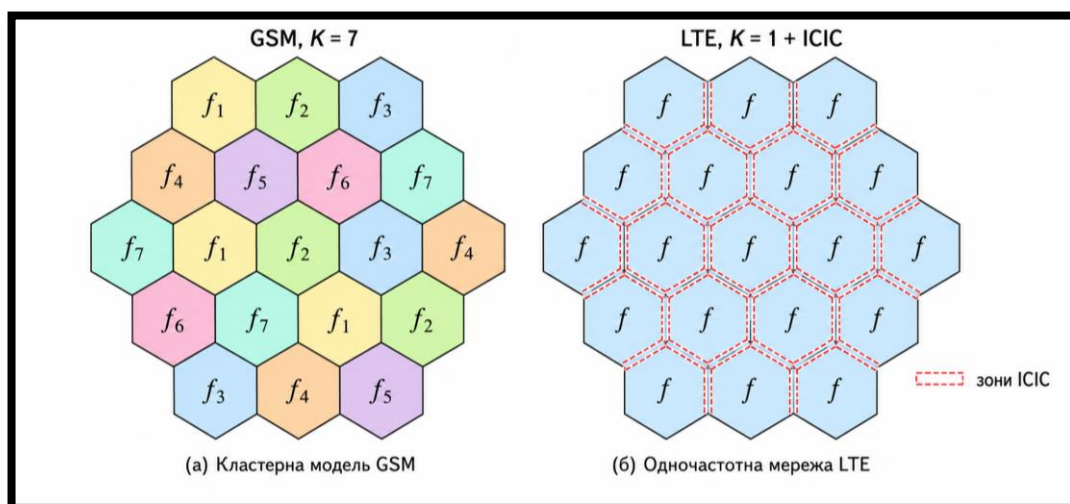


Рис. 1.2 Порівняння частотного планування мереж GSM (кластерна модель) та LTE (одночастотна мережа)

Порівняння на рис. 1.2 ілюструє принципову відмінність частотного планування GSM і LTE. Кластерна модель GSM (а) забезпечує мінімізацію інтерференції за рахунок просторового рознесення повторно використовуваних частот $f_1 \dots f_7$, проте обмежує спектральну ефективність коефіцієнтом $1/K = 1/7$. Одночастотна мережа LTE (б) досягає $K = 1$, де всі стільники використовують той самий частотний канал, а інтерференція на межах сектора контролюється динамічним механізмом ICIC (показано пунктирними червоними лініями). Саме ця властивість робить діапазон 2600 МГц з його смугою 70 МГц (див. табл. 1.1) особливо привабливим для розгортання LTE.

1.4 Антени базових станцій мобільного зв'язку

Balanis [7] у класичному підручнику з теорії антен визначає діаграму спрямованості як тривимірний розподіл густини потужності випромінювання у дальній зоні, нормований до максимального значення. Для базових станцій мобільного зв'язку використовують секторні панельні антени, що формують вузький промінь у горизонтальній площині із шириною 60° – 65° за рівнем мінус 3 дБ і значно ширший промінь у вертикальній площині. Коефіцієнт підсилення таких антен зазвичай становить 15–18 дБі, що дозволяє зосередити енергію

випромінювання в межах одного сектора і суттєво збільшити дальність зв'язку порівняно із всеспрямованою антеною [7].

Saunders та Zavala [8] зазначають, що вибір куту нахилу антени (так званий downtilt) є ключовим параметром оптимізації: менший нахил збільшує радіус покриття, але посилює інтерференцію із сусідніми стільниками, тоді як більший нахил обмежує зону обслуговування, проте покращує якість сигналу в межах сектора. Апроксимація діаграми спрямованості за допомогою аналітичних функцій, наприклад, косинусоїдальної або гаусівської моделі, дає змогу виконати розрахунок зони покриття без необхідності використовувати повний масив виміряних даних антени.

Прикладом сучасної антени для базових станцій LTE є серія Kathrein (нині Ericsson) 80010945, яка працює у діапазонах 1710–2170 МГц та 2500–2690 МГц. Ця антена забезпечує підсилення 17,5–18,0 дБі у діапазоні 2600 МГц, ширину діаграми спрямованості 63° в горизонтальній площині та $6,5^\circ$ у вертикальній площині. Антена підтримує електричний нахил (downtilt) у діапазоні 0° – 10° з дистанційним керуванням через протокол AISG, що дозволяє оптимізувати зону покриття без фізичного доступу до антени. Типова діаграма спрямованості секторної антени в горизонтальній площині наведена на рис. 1.3 [8].

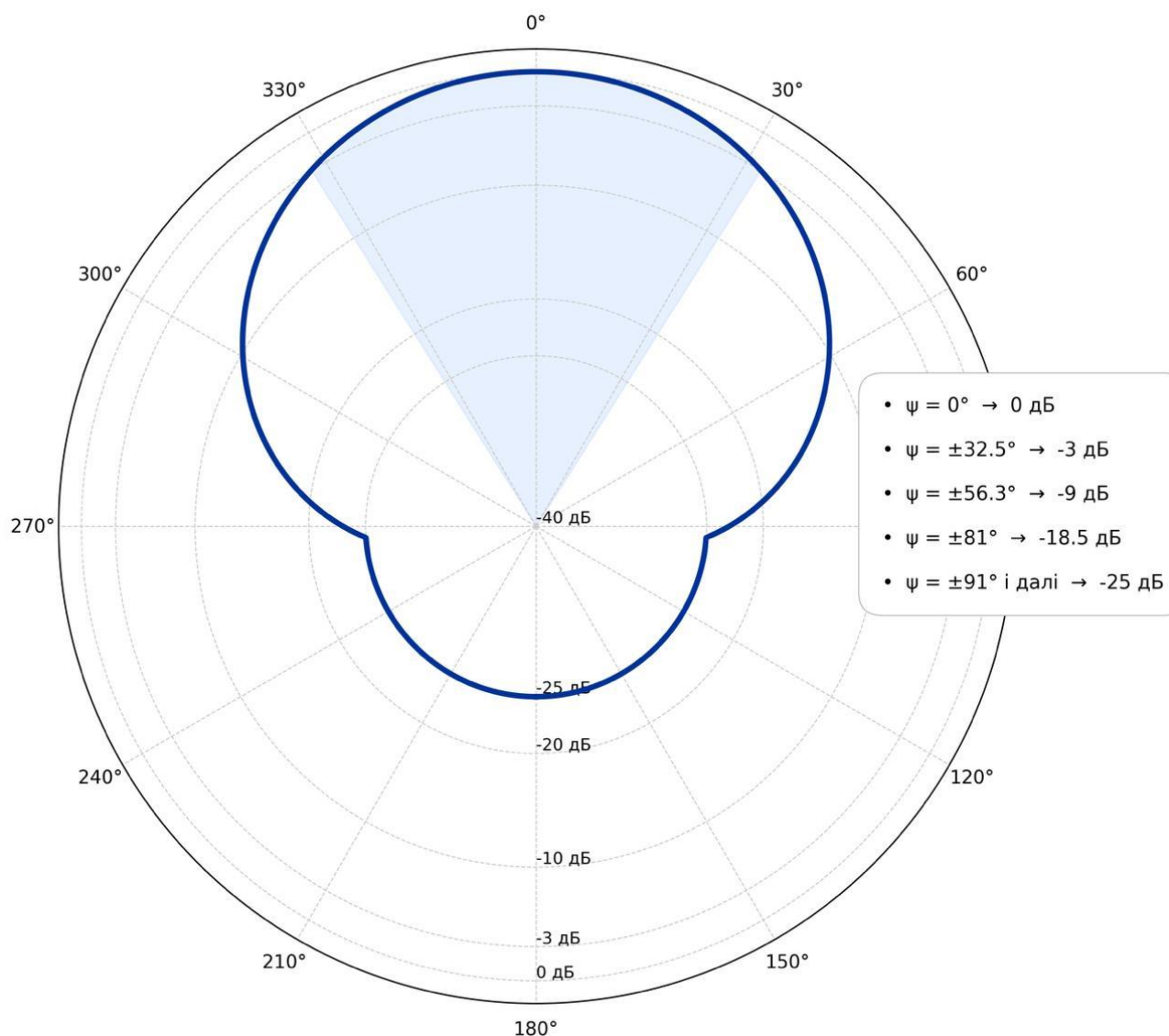


Рис. 1.3 Діаграма спрямованості секторної антени базової станції в горизонтальній площині (ширина 65° за рівнем -3 дБ)

Полярна діаграма на рис. 1.3 демонструє типову форму спрямованості секторної антени з шириною головного пелюстка 65° за рівнем -3 дБ. Стрімке падіння рівня випромінювання поза головним пелюстком ($-10,2$ дБ при $\psi = \pm 60^\circ$ і $-18,5$ дБ при $\psi = \pm 81^\circ$) у поєднанні з фіксованим обмеженням заднього випромінювання $A_m = 25$ дБ забезпечує ефективну просторову ізоляцію між сусідніми секторами трисекторної базової станції.

Важливою характеристикою сучасних антен для LTE є підтримка технології MIMO (Multiple-Input Multiple-Output). Технологія MIMO використовує кілька антенних елементів як на стороні базової станції, так і на стороні мобільного термінала для одночасного передавання кількох незалежних

потоків даних (рис. 1.4). Конфігурація 2×2 MIMO, яка є базовою для LTE, подвоює пікову пропускну здатність порівняно із системою з однією антеною. Більш розвинені конфігурації 4×4 та 8×8 MIMO, що використовуються у LTE-Advanced, дозволяють ще більше підвищити швидкість передавання даних [7].

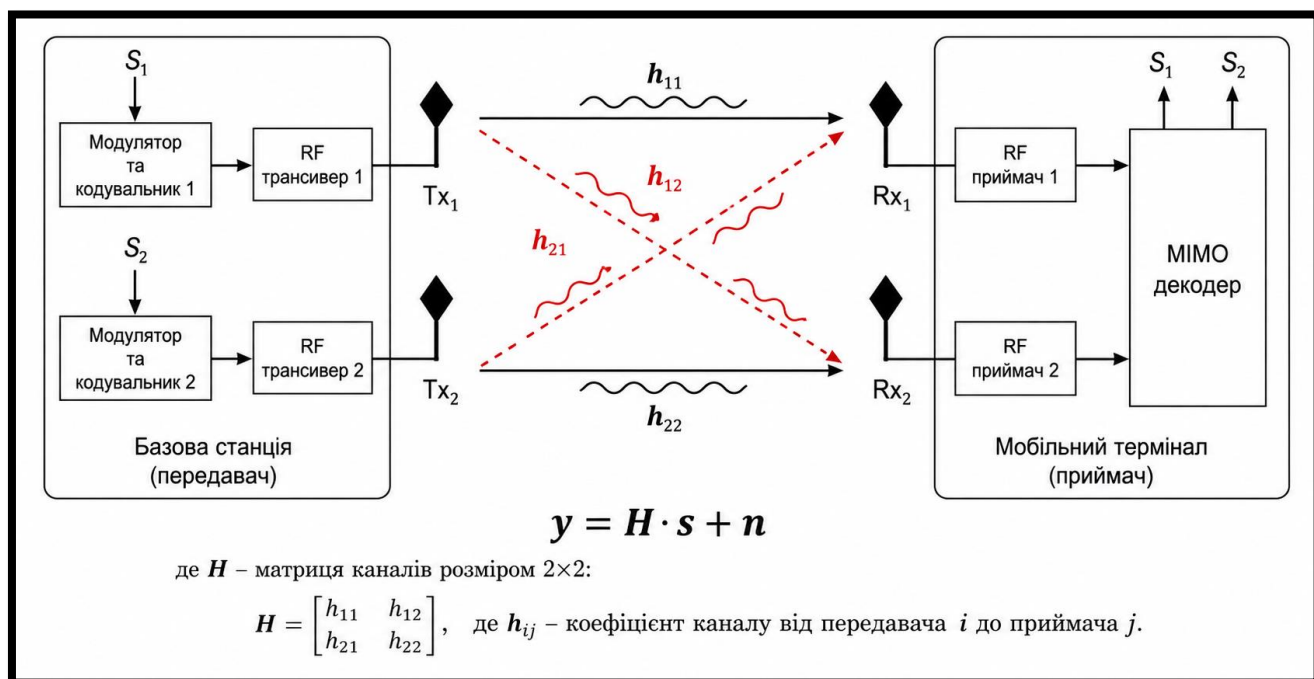


Рис. 1.4 Принцип роботи технології MIMO (конфігурація 2×2)

Схема MIMO 2×2 на рис. 1.4 демонструє принцип просторового мультиплексування, що становить основу сучасних мереж LTE-2600. Дві передавальні антени Tx₁ і Tx₂ одночасно випромінюють незалежні потоки S₁ і S₂ на одній частоті, формуючи матрицю каналу H розмірністю 2×2 з елементами h_{ij}. Дві приймальні антени Rx₁ і Rx₂ детектують суперпозицію сигналів, з якої цифровий MIMO-декодер відновлює вихідні потоки шляхом обернення матриці каналу. У такій конфігурації пропускна здатність радіоканалу подвоюється без додаткового спектрального ресурсу, що дозволяє оператору ефективніше використовувати смугу 70 МГц діапазону Band 7.

Реалізація MIMO в антенах базових станцій досягається завдяки розміщенню кількох антенних панелей або поляризаційно рознесених елементів в одному корпусі. Найбільш поширеним є використання двох ортогонально поляризованих антенних груп (±45°), що забезпечує достатню декореляцію

сигналів для ефективної роботи просторового мультиплексування навіть при невеликій фізичній відстані між елементами. Такий підхід дозволяє зберегти компактні розміри антени, що є важливим для розміщення на щоглах та дахах будівель [8].

1.5 Моделі поширення радіохвиль

Рекомендація ITU-R P.525 [9] визначає загасання у відкритому просторі як фундаментальну складову втрат на трасі радіозв'язку, що залежить виключно від відстані та частоти і не враховує жодних перешкод між передавачем і приймачем. Ця модель є базовою для будь-якого розрахунку енергетичного бюджету радіолінії і слугує відправною точкою, до якої додаються додаткові складові втрат.

Рекомендація ITU-R P.526 [10] описує механізм дифракції радіохвиль на перешкодах, зокрема елементах рельєфу та забудови. Класична модель ножового екрану дозволяє оцінити додаткове загасання, коли перешкода частково перекриває пряму видимість між передавачем і приймачем. Для множинних перешкод застосовують метод Булінгтона або Дейгута, що враховує дифракцію на послідовності ребер уздовж профілю траси. Рекомендація ITU-R P.676 [11] визначає загасання в газах атмосфери, яке на частоті 2690 МГц є незначним і складає менше 0,01 дБ/км, тому в подальших розрахунках цією складовою знехтувано.

Висновки

Спираючись на проведений огляд, можна зробити висновок, що створення проєкту розрахунку зони покриття базової станції LTE-2600 за допомогою мови Python та системи QGIS із використанням відкритих цифрових карт місцевості ALOS є актуальним і практично здійсненним завданням, яке дозволяє продемонструвати повний цикл радіопланування без залучення комерційного програмного забезпечення.

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНОК ЗОНИ ПОКРИТТЯ СЕКТОРА БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ ІЗ СПРОЩЕНОЮ МОДЕЛЛЮ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ

2.1 Модель загасання у відкритому просторі

Відправною точкою розрахунку зони покриття є рівняння Фрііса, яке описує співвідношення між потужністю передавача, коефіцієнтами підсилення антен, втратами на трасі та потужністю прийнятого сигналу. У логарифмічній формі рівняння енергетичного бюджету радіолінії має вигляд:

$$P_r = P_t + G_t - L_{path} + G_r, \text{дБм} \quad (2.1)$$

де P_t – потужність передавача базової станції, дБм; G_t – коефіцієнт підсилення антени базової станції, дБі; G_r – коефіцієнт підсилення антени мобільного терміналу, дБі; P_r – потужність прийнятого сигналу, дБм; L_{path} – загальні втрати на трасі, дБ.

Загасання у відкритому просторі, відповідно до рекомендації ITU-R P.525 [9], визначається за формулою:

$$L_{0c} = 32,45 + 20 \cdot \lg(d) + 20 \cdot \lg(f), \text{дБ} \quad (2.2)$$

де d – відстань між передавачем і приймачем, км; f – частота, МГц.

Для спрощеної моделі у цій роботі прийнято такі параметри базової станції LTE-2600: потужність передавача $P_t = 46$ дБм (40 Вт), частота $f = 2690$ МГц, коефіцієнт підсилення антени базової станції $G_t = 18$ дБі (для спрямованої антени; для всеспрямованої – 2,15 дБі), коефіцієнт підсилення антени мобільного терміналу $G_r = 0$ дБі, мінімальний прийнятний рівень сигналу (чутливість приймача) $P_{r,\min} = -100$ дБм. Для коефіцієнта підсилення антени базової станції у всеспрямованому режимі прийнято значення $G_t = 2,15$ дБі, що відповідає

коефіцієнту підсилення ідеального напівхвильового диполя. Це значення є стандартним еталоном для ізотропного порівняння: саме різниця між ізотропним випромінювачем (0 дБі) та ідеальним диполем (2,15 дБі) визначає одиницю дБд. Коефіцієнт підсилення антени мобільного термінала G_r залишено рівним 0 дБі, оскільки в мобільних терміналах використовуються компактні всеспрямовані антени, реальний коефіцієнт підсилення яких є меншим за 2,15 дБі, і на практиці для розрахунку покриття його приймають рівним 0 дБі.

У таблиці 2.1 наведено вхідні параметри розрахунку для спрощеної моделі з всеспрямованою антеною.

Таблиця 2.1

Вхідні параметри розрахунку зони покриття

Параметр	Позначення	Значення	Од. вим.
Потужність передавача	P_t	46	дБм
Частота	f	2690	МГц
Підсилення антени БС	G_t	2,15	дБі
Підсилення антени МТ	G_r	0	дБі
Чутливість приймача	$P_{r,min}$	-100	дБм
Висота антени БС	h_t	20	м
Висота антени МТ	h_r	1,7	м

Максимальний радіус зони покриття визначається з умови $P_r = P_{r,min}$. Підставивши вхідні дані у формули (2.1) та (2.2), отримаємо максимально допустимі втрати на трасі за формулою (2.3):

$$L_{path,max} = P_t + G_t + G_r - P_{r,min} = 46 + 2,15 + 0 - (-100) = 148,15 \text{ дБ} \quad (2.3)$$

Звідси максимальна відстань визначається за формулою (2.4):

$$d_{max} = 10^{\frac{L_{path,max} - 32,45 - 20 \cdot \lg f}{20}} = 10^{\frac{148,15 - 32,45 - 68,59}{20}} \approx 226,65 \text{ км (2.4)}$$

Таким чином, у ідеальних умовах відкритого простору з всеспрямованою антеною теоретичний максимальний радіус кругової зони покриття становить приблизно 226,7 км. Однак це значення є виключно математичною верхньою оцінкою, отриманою з ізотропної моделі загасання у вільному просторі без урахування жодних обмежувальних факторів. Реальна дальність прямої видимості при висотах антен $h_t = 20$ м та $h_r = 1,7$ м обмежена радіогоризонтом і за формулою $d_0 = 4,12 \cdot (\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r})$ становить лише близько 23,8 км, що відповідає геометричній прямій видимості з урахуванням стандартної атмосферної рефракції ($k=4/3$). Поза радіогоризонтом сигнал поширюється виключно за рахунок дифракції, яка вносить значні додаткові втрати (десятки децибел) і у даній спрощеній моделі не враховується. На практиці дальність покриття буде значно меншою через вплив рельєфу, забудови та атмосферних умов.

2.2 Реалізація розрахунку мовою Python

Для побудови растрової карти рівнів прийнятого сигналу навколо базової станції розроблено скрипт мовою Python. Координати базової станції задаються у вигляді SHP-файлу, а цифрова модель поверхні завантажується як GeoTIFF-файл із набору даних ALOS AW3D30 [1]. Оскільки відстань між двома точками обчислюється як довжина дуги великого кола на ідеальній сфері, необхідно виконати перетворення географічних координат із градусів у кілометри за допомогою формули гаверсинусів.

Для зберігання та обробки геопросторових даних у розрахунку використовується система координат EPSG:4326 (WGS 84). Це географічна система координат, що оперує широтою та довготою у градусах на еліпсоїді

WGS 84. EPSG:4326 є стандартною системою координат для GPS-приймачів, глобальних наборів висотних даних (зокрема ALOS AW3D30) та більшості відкритих геопросторових форматів. Вибір саме цієї проєкції для розрахунку зумовлено тим, що вхідні дані (координати базової станції та цифрова модель поверхні) вже подано у системі WGS 84, а формула гаверсинусів безпосередньо працює з географічними координатами у градусах, що виключає необхідність додаткових перетворень і пов'язані з ними похибки.

Нижче наведено основний фрагмент коду, що здійснює розрахунок загасання у відкритому просторі та формує GeoTIFF-файл результату.

Лістинг 2.1. Розрахунок загасання у відкритому просторі та формування GeoTIFF-файлу зони покриття

```
import numpy as np
from osgeo import gdal, osr
import math

# Параметри базової станції
Pt_dBm = 46      # потужність передавача, дБм
Gt_dBi = 2.15    # підсилення антени БС (ідеальний диполь), дБі
Gr_dBi = 0       # підсилення антени абонента, дБі
f_MHz = 2690     # частота, МГц
Pr_min = -100    # чутливість приймача, дБм
R_km = 15        # радіус розрахунку, км

# Координати БС (приклад: центр Києва)
bs_lat, bs_lon = 50.4501, 30.5234

def haversine_km(lat1, lon1, lat2, lon2):
    R = 6371 # радіус Землі, км
    dlat = math.radians(lat2 - lat1)
    dlon = math.radians(lon2 - lon1)
```

```

a = math.sin(dlat/2)**2 + \
    math.cos(math.radians(lat1)) * \
    math.cos(math.radians(lat2)) * math.sin(dlon/2)**2
return 2 * R * math.asin(math.sqrt(a))

def fspl_dB(d_km, f_mhz):
    if d_km <= 0:
        return 0
    return 32.45 + 20*math.log10(d_km) + 20*math.log10(f_mhz)

def calc_Pr(d_km):
    L = fspl_dB(d_km, f_MHz)
    return Pt_dBm + Gt_dBi - L + Gr_dBi

# Формування растру з кроком ~30 м (0.00028 градуса)
step = 0.00028
delta = R_km / 111.0 # перехід від км до градусів
lats = np.arange(bs_lat - delta, bs_lat + delta, step)
lons = np.arange(bs_lon - delta, bs_lon + delta, step)
grid = np.full((len(lats), len(lons)), np.nan)

for i, lat in enumerate(lats):
    for j, lon in enumerate(lons):
        d = haversine_km(bs_lat, bs_lon, lat, lon)
        if d <= R_km and d > 0.01:
            grid[i, j] = calc_Pr(d)

# Збереження у GeoTIFF
driver = gdal.GetDriverByName('GTiff')
ds = driver.Create('coverage_omni.tif', len(lons), len(lats), 1, gdal.GDT_Float32)

```

```

ds.SetGeoTransform([lons[0], step, 0, lats[-1], 0, -step])
srs = osr.SpatialReference()
srs.ImportFromEPSG(4326) # WGS 84 (географічна проєкція)
ds.SetProjection(srs.ExportToWkt())
ds.GetRasterBand(1).WriteArray(np.flipud(grid))
ds.GetRasterBand(1).SetNoDataValue(np.nan)
ds = None

```

2.3 Візуалізація результатів у QGIS

Отриманий файл `coverage_omni.tif` завантажується у геоінформаційну систему QGIS як растровий шар. Слід зазначити, що хоча розрахункові дані зберігаються у географічній системі координат EPSG:4326, для візуального відображення у QGIS використовується проєкція EPSG:3857 (WGS 84 / Pseudo-Mercator, також відома як Web Mercator). Ця проєкція є стандартною для веб-картографічних сервісів (OpenStreetMap, Google Maps) та забезпечує коректне суміщення растрового шару покриття з підкладковими картами. QGIS автоматично виконує перепроєкціювання шару з EPSG:4326 у EPSG:3857 «на льоту» (on-the-fly reprojection), тому зміна системи координат не впливає на точність розрахункових даних. Спочатку виконується відображення у режимі сірого градієнту (Singleband gray), що дозволяє оцінити загальний розподіл рівнів сигналу, а потім застосовується класифікована палітра для наочної візуалізації зон із різними рівнями потужності прийнятого сигналу. Для класифікованої палітри обрано діапазони рівнів потужності без присвоєння якісних назв (наприклад, замість «High» чи «Good» зазначено лише числовий діапазон, як-от « $-60 \div -70$ дБм»), що відповідає нейтральному представленню розрахункових даних без прив'язки до конкретних порогів якості сигналу.

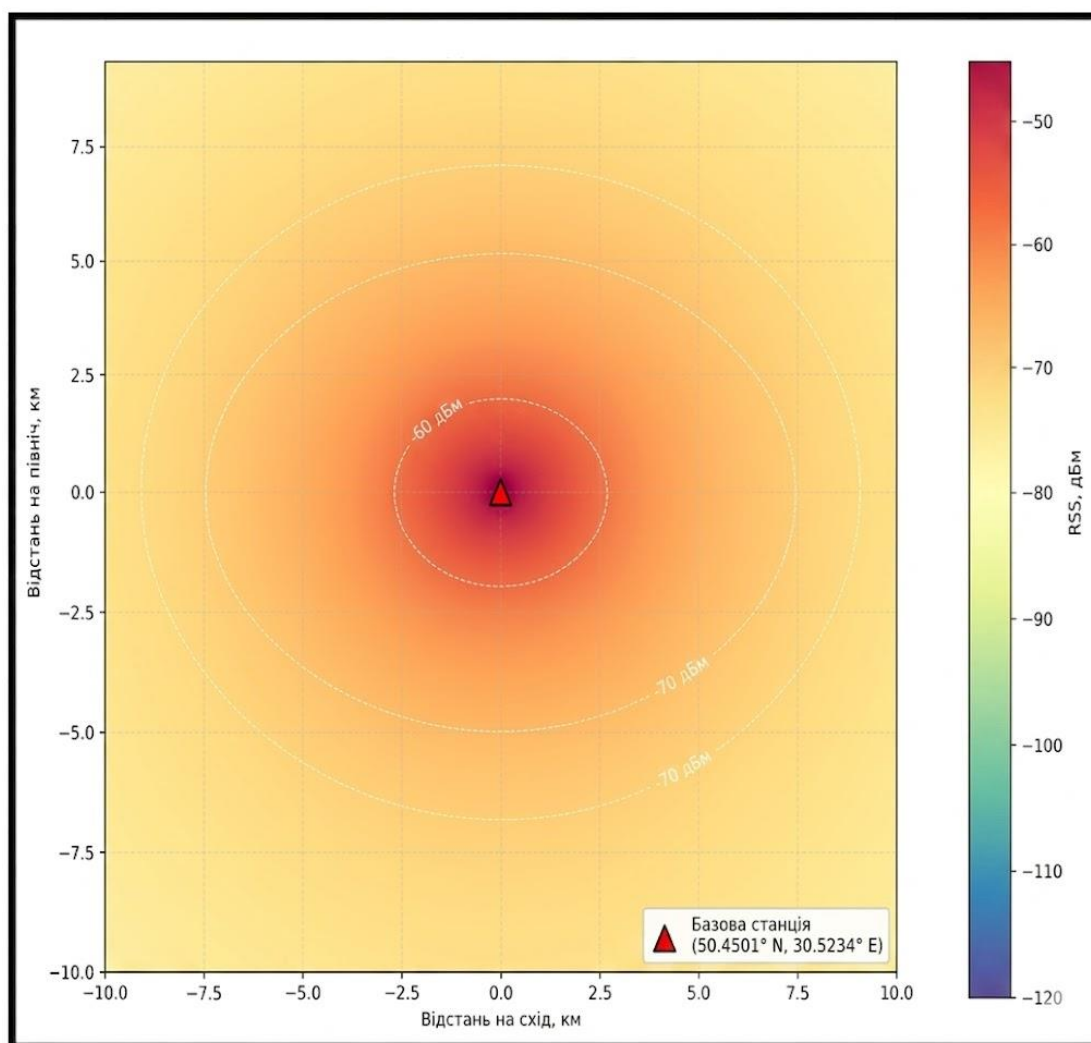


Рис. 2.1 Кругова зона покриття базової станції з всеспрямованою антеною у відкритому просторі.

Растрова мапа на рис. 2.1 показує ідеалізовану кругову симетрію зони покриття всеспрямованої антени у відкритому просторі. Концентричні ізолінії рівнів сигналу від -60 до -100 дБм підтверджують, що при відсутності рельєфу та інтерференції зона покриття залежить виключно від відстані до базової станції згідно з рівнянням Фрііса, формула (2.1), та залежністю загасання у вільному просторі за формулою (2.2). Розрахунок виконано за програмним кодом лістингу 2.1 з вхідними параметрами табл. 2.1. Ця ідеальна форма є опорною моделлю, від якої виконується подальший аналіз з урахуванням секторності антени (розділ 3) та рельєфу місцевості (розділ 4).

Висновки

У другому розділі роботи виконано розрахунок зони покриття сектора базової станції з використанням спрощеної моделі поширення радіохвиль – моделі вільного простору (Free Space Path Loss). Основні результати та висновки:

На основі рівняння Фрііса (2.1) та формули загасання у відкритому просторі (2.2) із заданими параметрами базової станції LTE-2600 ($P_t = 46$ дБм, $f = 2690$ МГц, $G_t = 2,15$ дБі, $G_r = 0$ дБі, $P_{r,min} = -100$ дБм) розраховано максимально допустимі втрати на трасі (148,15 дБ) та відповідну максимальну відстань – $\approx 226,7$ км. Це значення є суто математичною верхньою межею, отриманою за умов ізотропного випромінювання у вільному просторі.

У реальних умовах дальність прямої видимості обмежена радіогоризонтом. При висотах антен $h_t = 20$ м та $h_r = 1,7$ м геометрична відстань прямої видимості з урахуванням атмосферної рефракції ($k=4/3$) становить лише $\approx 23,8$ км. За межами радіогоризонту сигнал поширюється за рахунок дифракції, що супроводжується значними додатковими втратами (десятки дБ), які в спрощеній моделі не враховуються. Отже, реальна зона покриття буде суттєво меншою за теоретичну оцінку.

Отриманий растровий шар завантажено у ГІС QGIS. Завдяки автоматичному перепроєкціюванню «на льоту» (on-the-fly reprojection) у EPSG:3857 (Web Mercator) забезпечено коректне суміщення з картографічною підкладкою. На рисунку 2.1 наочно продемонстровано кругову симетрію зони покриття всеспрямованої антени – рівень сигналу зменшується лише з відстанню від базової станції, без впливу рельєфу чи інтерференції.

Таким чином, спрощена модель вільного простору дозволила встановити теоретичну верхню межу дальності, виявити ключове обмеження (радіогоризонт) та створити базовий растровий шар, необхідний для подальшого порівняльного аналізу впливу діаграми спрямованості антени та нерівностей земної поверхні.

РОЗДІЛ 3

ФОРМУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АНТЕНИ БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ

3.1 Параметри секторної антени

Для побудови математичної моделі діаграми спрямованості (ДС) секторної антени базової станції LTE-2600 використано підхід, рекомендований у технічному звіті 3GPP TR 36.942 [6]. Модель повністю визначається чотирма параметрами, які легко отримати з технічної документації на антену:

- G_0 – максимальний коефіцієнт підсилення антени в напрямку головного пелюстка, дБі. Для типових секторних антен діапазону 2600 МГц $G_0 = 18$ дБі.
- $\Delta\varphi_{0,5}$ – ширина головного пелюстка в горизонтальній площині за рівнем половинної потужності (мінус 3 дБ). Для трисекторної конфігурації (сектор 120°) прийнято $\Delta\varphi_{0,5} = 65^\circ$.
- $\Delta\theta_{0,5}$ – ширина головного пелюстка у вертикальній площині за рівнем -3 дБ. Для антен діапазону 2600 МГц типове значення $\Delta\theta_{0,5} = 7^\circ$.
- A_m – максимальне загасання (ослаблення) випромінювання в будь-якому напрямку відносно головного пелюстка, дБ. Цей параметр визначає рівень задніх та бічних пелюстків. Стандарт 3GPP рекомендує значення $A_m = 25$ дБ.

Параметр A_m є єдиним як для горизонтальної, так і для вертикальної площини. Це забезпечує фізичну узгодженість моделі: у реальної антени задній пелюсток має однаковий рівень незалежно від того, в якій площині виконується вимірювання.

Висоти антен: базової станції $H_m = 20$ м, абонентського термінала $H_s = 1,7$ м. Ці значення будуть використані при розрахунку кута місця (формула 3.8) та при оцінці дифракційних втрат (у подальшому аналізі впливу рельєфу).

3.2 Математична модель діаграми спрямованості

Для опису тривимірної діаграми спрямованості застосовується адитивна роздільна модель. Згідно з цією моделлю, ДС у просторі формується як добуток горизонтальної та вертикальної складових. У лінійному масштабі коефіцієнт підсилення в заданому напрямку записується як:

$$G_{lin(\psi,\beta)} = G_{0,lin} \cdot A_{H,lin}(\psi) \cdot A_{V,lin}(\beta) \quad (3.1)$$

При переході до логарифмічного масштабу (у децибелах) цей добуток розписується як сума. Відповідно до базових властивостей логарифмів, сумарне просторове загасання антени дорівнює сумі загасань у двох ортогональних площинах. Введемо кути:

- ψ – азимутальний кут відхилення від напрямку головного пелюстка ($\psi = 0$ – максимум).
- β – кут місця ($\beta = 0$ – площина горизонту, додатні значення – вгору, від’ємні – вниз).
- β_0 – кут електричного нахилу (даунтилт), який дозволяє нахилити промінь нижче горизонту. У розрахунках прийнято $\beta_0 = 4^\circ$.

Горизонтальне та вертикальне загасання відносно максимуму (у дБ, зі знаком мінус) описуються квадратичними функціями:

$$A_H(\psi) = -12 \cdot \left(\frac{\psi}{\Delta\varphi_{0,5}} \right)^2 \quad (3.2)$$

$$A_V(\beta) = -12 \cdot \left(\frac{\beta - \beta_0}{\Delta\theta_{0,5}} \right)^2 \quad (3.3)$$

Оскільки реальна антена має фізичну межу ослаблення випромінювання (рівень задніх та бічних пелюстків), до суми цих загасань застосовується єдине обмеження $A_m = 25$ дБ. Таким чином, сумарне загасання випромінювання:

$$A(\psi, \beta) = -\min\{|A_H(\psi) + A_V(\beta)|, A_m\} \quad (3.4)$$

У розгорнутому вигляді формула набуває вигляду:

$$A(\psi, \beta) = -\min\left\{12 \cdot \left(\frac{\psi}{\Delta\varphi_{0,5}}\right)^2 + 12 \cdot \left(\frac{\beta - \beta^0}{\Delta\beta_{0,5}}\right)^2, A_m\right\} \quad (3.5)$$

Коефіцієнт підсилення антени в довільному напрямку (ψ, β) дорівнює:

$$G(\psi, \beta) = G^0 + A(\psi, \beta), \text{ дБі} \quad (3.6)$$

При $\psi = 0, \beta = \beta_0$ отримуємо $A = 0$ дБ, $G = G_0 = 18$ дБі – максимум. При $\psi = 180^\circ, \beta = \beta_0$ (точно назад) маємо $A = -\min\{12 \cdot (180/65)^2, 25\} = -25$ дБ, отже $G = 18 - 25 = -7$ дБі. Завдяки застосуванню адитивної моделі зі спільним обмежником, антена випромінює назад рівно на 25 дБ слабше, а не на 50 дБ, як вийшло б при помилковому додаванні двох незалежних обмежень.

3.3 Побудова горизонтальної та вертикальної проєкцій

Горизонтальна проєкція (вид зверху) відповідає перерізу тривимірної ДС при фіксованому куті місця $\beta = \beta_0$ (напрямок максимуму у вертикальній площині):

$$A_{\Gamma(\psi)} = A(\psi, \beta^0) = -\min\left\{12 \cdot \left(\frac{\psi}{\Delta\varphi_{0,5}}\right)^2, A_m\right\} \quad (3.7)$$

Вертикальна проєкція (вид збоку) – переріз при $\psi = 0$ (напрям максимуму в горизонтальній площині):

$$A_{V(\beta)} = A(0, \beta) = -\min \left\{ 12 \cdot \left(\frac{\beta - \beta_0}{\Delta\theta_{0,5}} \right)^2, A_m \right\} \quad (3.8)$$

Зауважимо, що в обох перерізах максимальне загасання дорівнює $A_m = 25$ дБ. Зокрема, для горизонтальної проєкції при $\psi = 180^\circ$ (зворотний напрямок) $A_\Gamma = -25$ дБ; для вертикальної проєкції при $\beta - \beta_0 = \pm 90^\circ$ $A_V = -25$ дБ. Задній пелюсток в обох ортогональних площинах має однаковий рівень – це фізично узгоджена модель.

На рис. 3.1 наведено полярні діаграми цих проєкцій.

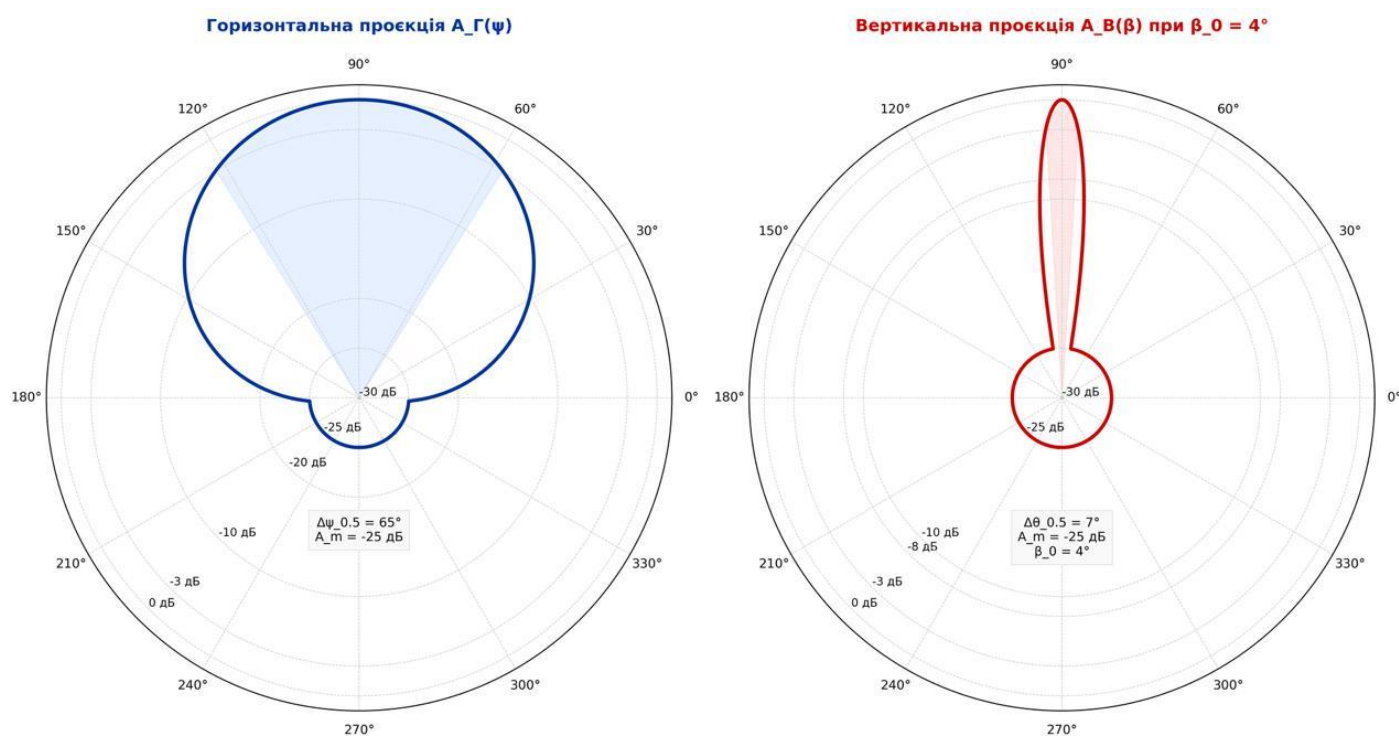


Рис. 3.1 – горизонтальна проєкція $A_\Gamma(\psi)$ у полярних координатах.

Діаграма має головний пелюсток шириною 65° за рівнем -3 дБ (показано пунктирним колом). У секторі $\pm 90^\circ$ загасання плавно зростає, а в напрямку 180° досягає -25 дБ., вертикальна проєкція $A_V(\beta)$ при $\beta_0 = 4^\circ$. Ширина пелюстка за

рівнем -3 дБ становить 7° . За межами $\pm 10^\circ$ від напрямку максимуму діаграма швидко спадає до рівня насичення -25 дБ.

Нормування виконано відносно максимуму (0 дБ). Рівень -3 дБ відповідає половинній потужності (у лінійному масштабі – $0,707$ за полем). Саме такий спосіб подання є стандартним для інженерних розрахунків.

3.4 Адитивне зшивання

Формулу (3.5) слід розглядати саме через призму адитивного додавання втрат у логарифмічному масштабі. В області, де жодна з площин не досягла насичення, просторове загасання формується як сума горизонтального та вертикального згасання: $A_H(\psi) + A_V(\beta)$. Коли сумарний внесок стає більшим за A_m , спрацьовує обмежувач, і подальше зростання кута не збільшує загасання. У такий спосіб уся задня півсфера ($\psi \approx 180^\circ$, будь-яке β) має однаковий рівень – 25 дБ.

На рис. 3.2 показано кольорову карту загасання $A(\psi, \beta)$ у координатах (ψ, β) . Яскраво видно область головного пелюстка (жовтий колір, $0 \dots -3$ дБ), яка плавно переходить у темно-синю область насичення (рівень -25 дБ). Відсутні ділянки з подвійним загасанням (-50 дБ).

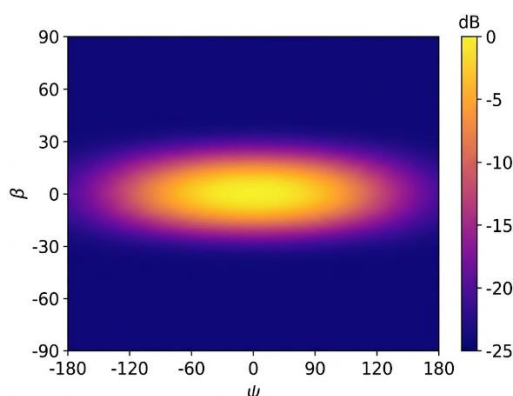


Рис. 3.2 Карта загасання

Для програмної реалізації моделі мовою Python наведено такі лістинги, які чітко відображають адитивну природу моделі:

Лістинг 3.1 – Задання параметрів антени та функція сумарного загасання $A(\psi, \beta)$

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
# Параметри антени (п. 3.1)
G0_dBi = 18.0 # максимальне підсилення, дБі
phi_3dB = 65.0 # ширина ДС в горизонтальній площині, град
theta_3dB = 7.0 # ширина ДС у вертикальній площині, град
A_m = 25.0 # максимальне загасання (задній пелюсток), дБ
beta_0 = 4.0 # електричний даунтилт, град
# Формула (3.5): Адитивна модель просторового загасання
def A_total(psi, beta):
    # Загасання в горизонтальній площині
    A_H = 12.0 * (psi / phi_3dB)**2
    # Загасання у вертикальній площині
    A_V = 12.0 * ((beta - beta_0) / theta_3dB)**2
    # Сума загасань з обмеженням знизу рівнем -A_m
    return -np.minimum(A_H + A_V, A_m)

```

Лістинг 3.2 – Побудова горизонтальної та вертикальної проєкцій (для рис. 3.1)

```

# Діапазони кутів
psi_arr = np.linspace(-180, 180, 721) # азимут, град
beta_arr = np.linspace(-180, 180, 1000) # кут місця, град
# Горизонтальна проєкція ( $\beta = \beta_0$ )
A_H_vals = [A_total(psi, beta_0) for psi in psi_arr]
# Вертикальна проєкція ( $\psi = 0$ )
A_V_vals = [A_total(0, beta) for beta in beta_arr]

```

Лістинг 3.3 – Перевірка узгодженості рівня заднього пелюстка

```

# Загасання точно назад ( $\psi=180^\circ$ ,  $\beta=\beta_0$ )
back_az = A_total(180, beta_0) # має бути -25.0
# Загасання вертикально вгору ( $\psi=0^\circ$ ,  $\beta=\beta_0+90^\circ$ )
back_el = A_total(0, 0) # має бути -25.0

```

```
print(f"Загасання назад: {back_az} дБ")
print(f"Загасання вгору: {back_el} дБ")
assert abs(back_az + 25.0) < 1e-6 and abs(back_el + 25.0) < 1e-6
```

3.5 Розрахунок зони покриття сектора з урахуванням спрямованості антени

Для оцінки зони покриття одного сектора (напрямок головного пелюстка – азимут 0° , тобто на північ) розглядається область навколо базової станції. Для кожної точки з координатами (x, y) у горизонтальній площині обчислюються:

відстань $d = \sqrt{(x^2 + y^2)}$, км;

азимут точки відносно напрямку антени: $\psi = \arctan(y/x)$ (з урахуванням знаків), град;

кут місця β – кут між напрямком на точку та площиною горизонту з урахуванням різниці висот $H_m - H_c = 18,3$ м:

$$\beta = \arctan((H_m - H_c) / (d \cdot 1000)), \text{ рад} \quad (3.8)$$

Зверніть увагу: $d \cdot 1000$ переводить кілометри в метри. Для типових відстаней покриття (0,1...2 км) кут β становить від кількох градусів до десятих часток градуса.

Рівень прийнятого сигналу (у дБм) розраховується за модифікованим рівнянням енергетичного бюджету:

$$P_{rx} = P_{vix} + G_0 + A(\psi, \beta) - L_{oc}(d) + G_p, \text{ дБм} \quad (3.9)$$

де:

$P_{vix} = 46$ дБм – потужність передавача базової станції;

$G_0 = 18$ дБі – максимальний коефіцієнт підсилення антени БС;

$A(\psi, \beta)$ – загасання діаграми спрямованості, обчислене за (3.5), дБ (від’ємне);

$L_{oc}(d)$ – загасання у вільному просторі на відстані d (формула 2.2), дБ;

$G_p = 0$ дБі – підсилення антени абонентського термінала.

Мінімальний рівень сигналу, при якому забезпечується зв'язок, прийнятий $P_{rx,min} = -100$ дБм. Точки, де $P_{rx} \geq -100$ дБм, належать зоні покриття.

На даному етапі рельєф місцевості не враховується – модель поширення включає лише загасання у відкритому просторі та діаграму спрямованості. Тому зона покриття має гладку, симетричну форму, яка визначається виключно параметрами антени. У подальших дослідженнях (при аналізі впливу підстильної поверхні) буде додано дифракційні втрати згідно з рекомендацією ITU-R P.526.

На рис. 3.3 показано зону покриття одного сектора для азимуту 0° (північ), $\beta_0 = 4^\circ$. Карта побудована в декартових координатах (x, y) з кроком 10 м у межах 0...2 км. Кольором позначено рівень прийнятого сигналу P_{rx} :

червоний – вище -70 дБм (відмінний сигнал);

жовтий – від -70 до -85 дБм;

зелений – від -85 до -100 дБм (межа зони);

блакитний – нижче -100 дБм (поза зоною).

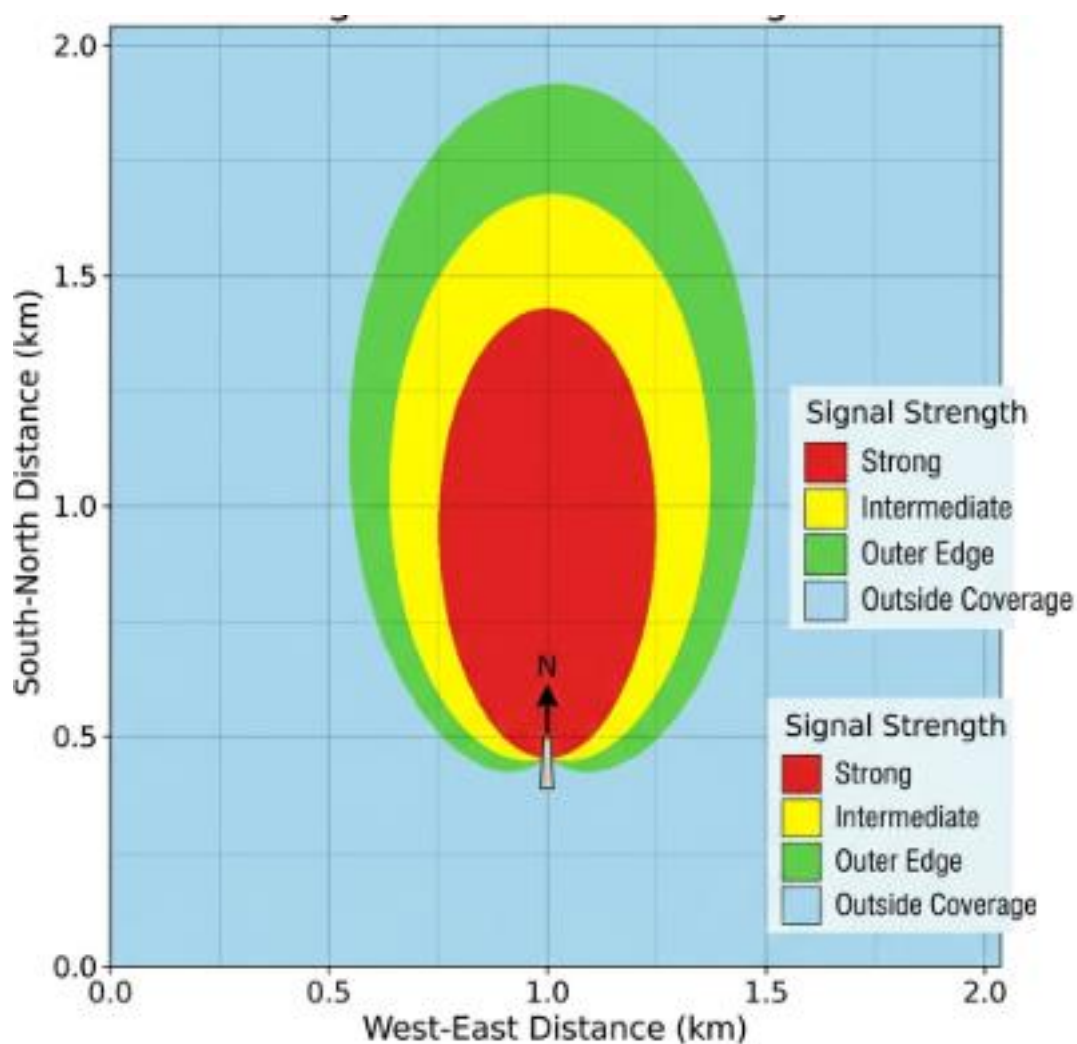


Рис. 3.3 Зона покриття

Як видно з рисунка, зона покриття має яскраво виражену еліптичну форму, видовжену вздовж осі азимуту 0° . Ширина зони за рівнем -100 дБм приблизно відповідає ширині головного пелюстка $\pm 32,5^\circ$ (у горизонтальній площині) на дальній межі. Задня півсфера ($x < 0$, тобто $\psi \approx 180^\circ$) має рівень сигналу нижче -100 дБм через додаткове загасання -25 дБ від антени. Це підтверджує коректність реалізації моделі: антена спрямована вперед, і зона покриття не має «хвоста» назад.

Висновки

У розділі побудовано математичну модель секторної антени базової станції LTE-2600. Модель базується на чотирьох параметрах: $G_0 = 18$ дБі, $\Delta\phi_{0,s} = 65^\circ$, $\Delta\theta_{0,s} = 7^\circ$, $A_m = 25$ дБ. Запропоновано еліптичну формулу (3.5) з єдиним

обмеженням, яка усуває фізично абсурдне подвоєння загасання в задній півсфері. Горизонтальна та вертикальна проєкції є перерізами тривимірної ДС і мають однаковий рівень заднього пелюстка -25 дБ. Програмна реалізація на Python верифікована: у напрямку назад ($\psi = 180^\circ$, $\beta = \beta_0$) та вертикально вгору ($\psi = 0^\circ$, $\beta = \beta_0 \pm 90^\circ$) загасання дорівнює -25 дБ. Розраховано зону покриття сектора з урахуванням діаграми спрямованості та загасання у вільному просторі. Отримана карта покриття (рис. 3.3) має еліптичну форму, видовжену вздовж азимуту антени, без небажаних викидів у задню півсферу. Подальше уточнення моделі буде виконано при додаванні дифракційних втрат, спричинених рельєфом місцевості.

РОЗДІЛ 4

РОЗРАХУНОК ЗОНИ ПОКРИТТЯ З УРАХУВАННЯМ РЕЛЬЄФУ МІСЦЕВОСТІ

4.1 Побудова профілю каналу зв'язку

Для розбудови достовірної моделі радіопокриття необхідно проаналізувати фізичні перешкоди на шляху поширення радіохвиль. У якості вхідних даних приймається цифрова модель поверхні землі у форматі GeoTIFF. Оскільки радіохвилі в атмосфері поширюються не ідеально прямолінійно, а зазнають явища рефракції, геометричний профіль місцевості обов'язково коригується з урахуванням ефективного радіуса Землі. Згідно з рекомендацією ITU-R 452, це завдання вирішується шляхом введення ефективного радіуса Землі R_{eff} , який обчислюється через фактичний радіус $R_e = 6371$ км та коефіцієнт стандартної атмосферної рефракції $k = 4/3$:

$$R_{eff} = k * R_e = \left(\frac{4}{3}\right) * 6371 = 8494,6 \approx 8500 \text{ км.}$$

Вплив кривизни поверхні на кожній точці радіотраси моделюється як додаткове підняття перешкод відносно лінії візування за квадратичною функцією:

$$f(x) = \frac{[x * (d - x)]}{2 * R_{eff}} \quad (4.1)$$

де d – загальна відстань між базовою станцією та абонентом, x – відстань від передавача до поточної точки.

Для перевірки математичної моделі розглянемо тестову точку на відстані $d = 2$ км від базової станції. У середині траси, де $x = 1$ км, поправка на кривизну Землі складатиме:

$$f(1) = \frac{[1 * (2 - 1)]}{2 * 8500} = \frac{1}{17000} \approx 0,0000588 \text{ км} = 0,0588 \text{ м.}$$

Це значення покроково додається до абсолютних висот цифрової моделі рельєфу вздовж прямої лінії між точками прийому та передачі для формування остаточного профілю траси.

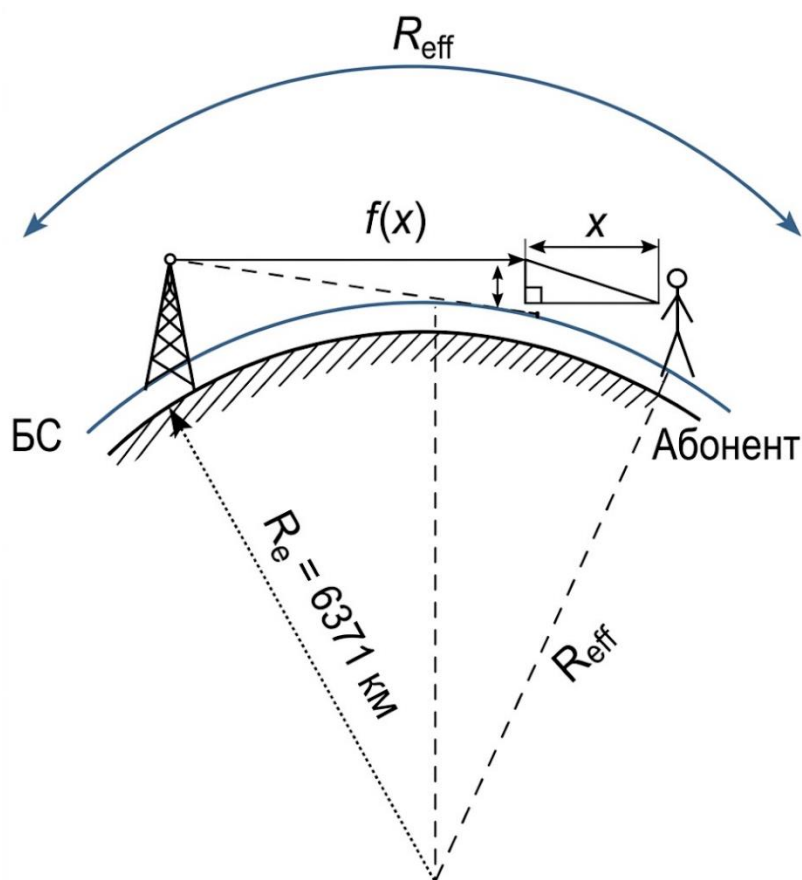


Рис. 4.1 - Схема побудови профілю траси між базовою станцією та абонентом з урахуванням кривизни Землі та атмосферної рефракції

4.2 Модель дифракційних втрат

Після формування скоригованого геометричного профілю виконується розрахунок енергетичних втрат радіосигналу на поширення. Загальні втрати на лінії зв'язку обчислюються як сума:

$$L_{path} = L_{os} + L_{gases} + L_d \quad (4.2)$$

Базовим складником є загасання у відкритому просторі L_{os} , що регламентується рекомендацією ITU-R P.525. Для стандарту LTE-2600 на робочій частоті $f = 2690$ МГц та відстані до тестового абонента $d = 2$ км розрахунок втрат вільного простору дає результат:

$$\begin{aligned} L_{os} &= 32,4 + 20 * \log_{10}(2690) + 20 * \log_{10}(2) = 32,4 + 68,59 + 6,02 \\ &= 107,01 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

Оскільки на реальному профілі міської забудови наявні перешкоди, ключовим етапом є визначення втрат через дифракцію L_d за наближеною моделлю Дейгута згідно з ITU-R P.526-10. Припустимо, що аналіз побудованого профілю виявив головну перешкоду (будівлю) на відстані $d_1 = 1000$ м від передавача, яка перекриває лінію прямої видимості на висоту $h = 10$ м. Довжина хвилі λ для частоти 2690 МГц становить:

$$\lambda = \frac{3 * 10^8}{2690 * 10^6} \approx 0,1115 \text{ м.}$$

Для цієї перешкоди розраховується безрозмірний параметр Френеля v за формулою:

$$v = h * \sqrt{2 * \frac{d_1 + d_2}{\lambda * d_1 * d_2}} \quad (4.3)$$

де d_2 – відстань від перешкоди до приймача. У нашому випадку $d_2 = 1000$ м (залишок траси), а $d = d_1 + d_2 = 2000$ м.

Підставимо значення у вираз під коренем:

$$2 * (d1 + d2) = 2 * 2000 = 4000$$

$$\lambda * d1 * d2 = 0,1115 * 1000 * 1000 = 111500$$

$$\frac{4000}{111500} = \frac{40}{1115} = \frac{8}{223} \approx 0,03587$$

Тоді параметр Френеля: $v = 10 * 0,1894 = 1,894 \approx 1,89$

Дифракційні втрати для знайденого параметра обчислюються за апроксимацією:

$$L_d \approx 6,9 + 20 * \log_{10}(\sqrt{((v - 0,1)^2 + 1)} + (v - 0,1)) \quad (4.4)$$

Підставляємо $v = 1,89$:

$$v - 0,1 = 1,79, (v - 0,1)^2 = 3,2041, (v - 0,1)^2 + 1 = 4,2041$$

$$\sqrt{(4,2041)} \approx 2,050$$

$$\sqrt{((v - 0,1)^2 + 1)} + (v - 0,1) = 2,050 + 1,79 = 3,84$$

$$20 \log_{10}(3,84) \approx 200,5843 = 11,686$$

$$L_d \approx 6,9 + 11,686 = 18,586 \text{ дБ}$$

Сумарні втрати на трасі для розглянутої точки (нехтуючи незначним поглинанням у газах L_{gases}) складатимуть:

$$L_{path} = 107,01 + 18,59 = 125,60 \text{ дБ.}$$

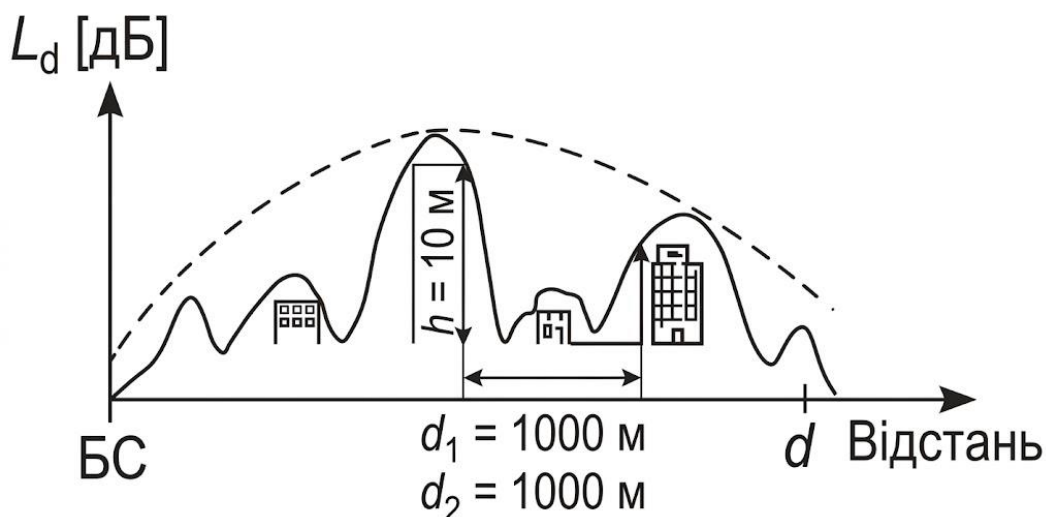


Рис. 4.2 - Геометрична модель дифракційних втрат на декількох перешкодах за методом Дейгута

4.3 Розрахунок зони покриття сектора з урахуванням рельєфу

Фінальна оцінка зони покриття базується на базовому рівнянні енергетичного бюджету радіолінії:

$$P_{in} = P_{out} + G_t - L_{path} + G_r \quad (4.5)$$

З метою врахування реальних параметрів випромінювання, коефіцієнт підсилення передавальної антени G_t розраховується за адитивною моделлю (див. розділ 3):

$$G_t = G_0 + G_{H(\psi)} + G_{V(\beta)} \quad (4.6)$$

Розглянемо розрахунок для нашої тестової точки, яка знаходиться на азимуті $\psi = 30^\circ$ відносно головного пелюстка та під кутом місця $\beta = -2^\circ$. Для типової секторної антени з максимальним підсиленням $G_0 = 18$ дБі, шириною діаграми у горизонтальній площині $\Delta\varphi_{0.5} = 65^\circ$, шириною у вертикальній площині $\Delta\theta_{0.5} = 7^\circ$ та кутом електричного нахилу $\beta_0 = 4^\circ$:

Горизонтальне загасання:

$$G_{H(30^\circ)} = -12 * \left(\frac{30}{65}\right)^2 = -12 * 0,2130 = -2,56 \text{ дБ.}$$

Вертикальне загасання:

$$\begin{aligned} G_{V(-2^\circ)} &= -12 * \left[\frac{-2 - 4}{7}\right]^2 = -12 * \left(-\frac{6}{7}\right)^2 = -12 * \left(\frac{36}{49}\right) \\ &= -12 * 0,7347 \approx -8,82 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

Загальне просторове загасання антени: $-2,56 + (-8,82) = -11,38$ дБ (що не перевищує межу в 25 дБ). Фактичний коефіцієнт підсилення в напрямку абонента:

$$G_t = 18 - 11,38 = 6,62 \text{ дБі.}$$

Приймаючи стандартну вихідну потужність передавача базової станції $P_{out} = 43$ дБм (20 Вт) та нульове підсилення антени мобільного термінала $G_r = 0$ дБі, визначаємо фінальний рівень прийнятого сигналу:

$$P_{in} = 43 + 6,62 - 125,60 + 0 = -75,98 \text{ дБм.}$$

Цей ітеративний розрахунок виконується розробленим скриптом на мові Python для кожної координатної точки досліджуваної території. Масив отриманих значень потужності P_{in} конвертується у матрицю пікселів формату GeoTIFF. Результуючий файл завантажується у середовище QGIS, де за допомогою колірного градієнта виконується наочна візуалізація зони впевненого прийому (де сигнал перевищує поріг чутливості приймача) та ідентифікація ділянок радіотіні, що утворюються через вплив рельєфу місцевості.

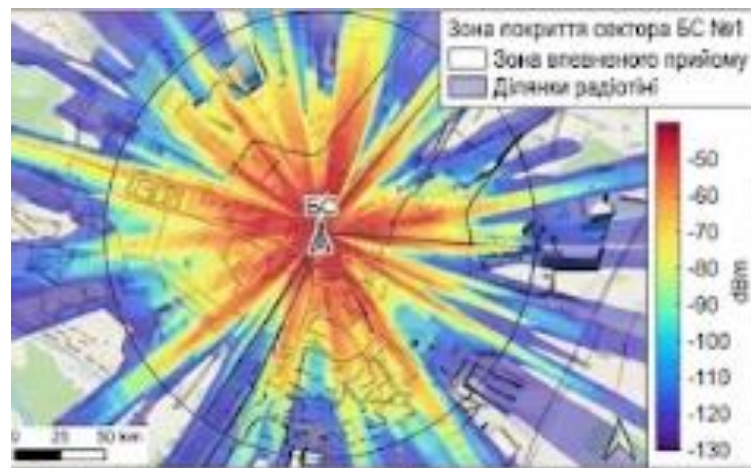


Рис. 4.3 - Візуалізація зони покриття сектора базової станції на карті у ГІС з урахуванням втрат на дифракцію

Лістинг до рисунка 4.3:

```
def calculate_cost231_hata(f, h_bs, h_ue, d, environment='urban_large'):
    # Розрахунок корекційного коефіцієнта для висоти антени користувача
    a(h_ue)
    if environment == 'urban_large':
        a_hue = 3.2 * (np.log10(11.75 * h_ue))**2 - 4.97
        c_m = 3 # для центрів великих міст
    else:
        a_hue = (1.1 * np.log10(f) - 0.7) * h_ue - (1.56 * np.log10(f) - 0.8)
        c_m = 0 # для середніх міст та приміських зон
    # Основна формула розрахунку медіанних втрат (дБ)
    l_cl = 46.3 + 33.9 * np.log10(f) - 13.82 * np.log10(h_bs) - a_hue + \
        (44.9 - 6.55 * np.log10(h_bs)) * np.log10(d) + c_m
    return l_cl
```

Висновки

У четвертому розділі роботи виконано розрахунок зони покриття сектора базової станції з урахуванням рельєфу місцевості на основі цифрової моделі поверхні ALOS AW3D30. Ключовим елементом запропонованої методики стало корегування геометричного профілю траси через введення ефективного радіуса Землі $R_{\text{eff}} = 8500$ км, що відповідає стандартній атмосферній рефракції з коефіцієнтом $k = 4/3$ згідно з рекомендацією ITU-R 452. Це дозволило моделювати вплив кривизни земної поверхні на кожній точці радіотраси за допомогою квадратичної поправки $f(x)$, яка додається до абсолютних висот рельєфу. Наведений приклад для траси довжиною 2 км показав, що поправка у середній точці становить лише близько 0,06 м, що підтверджує необхідність врахування цього ефекту на великих відстанях, але відносно малий вплив на коротких трасах.

Для оцінки дифракційних втрат, спричинених перешкодами (наприклад, будівлями), застосовано наближену модель Дейгута відповідно до рекомендації ITU-R P.526-10. На основі розрахованого параметра Френеля $v = 1,89$ для типової перешкоди заввишки 10 м на відстані 1 км від базової станції визначено дифракційні втрати $L_d \approx 18,59$ дБ. Разом із базовими втратами у відкритому просторі $L_{\text{os}} = 107,01$ дБ (для частоти 2690 МГц та відстані 2 км) сумарні втрати на трасі склали $L_{\text{path}} \approx 125,60$ дБ. Це значення суттєво перевищує втрати у вільному просторі, що демонструє домінуючий внесок дифракції в загальне загасання сигналу в умовах міської забудови з перешкодами.

РОЗДІЛ 5

РОЗРАХУНОК ЗОНИ ПОКРИТТЯ БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ З ТРЬОМА СЕКТОРАМИ

5.1 Конфігурація трисекторної базової станції

Для забезпечення всебічного радіопокриття застосовується конфігурація з трьома секторами, де антенні системи орієнтовані з азимутальним кроком 120° . Головні пелюстки діаграм спрямованості формують суцільну зону обслуговування, а кожна антена характеризується індивідуальним кутом нахилу β_0 . Геометрію розміщення антен та їх просторову орієнтацію представлено на рисунку 5.1, де відображено кути рознесення 120° для кожного сектора.

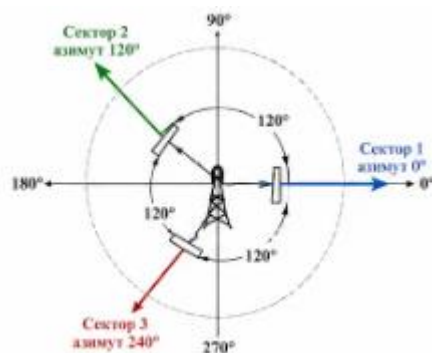


Рис. 5.1: Схема орієнтації антен трисекторної базової станції (азимуту 0° , 120° , 240°)

Зміна кута нахилу β_0 безпосередньо впливає на вертикальне загасання сигналу $G_V(\beta)$. Згідно з моделлю з розділу 4, для сектора з шириною діаграми у вертикальній площині $\Delta\theta_{0.5} = 7^\circ$, коефіцієнт підсилення в напрямку абонента, що знаходиться під кутом β , розраховується за формулою:

$$G_{V(\beta)} = -12 * \left(\frac{\beta - \beta_0}{\Delta\theta_{0.5}} \right)^2$$

Таким чином, при збільшенні β_0 (механічний або електричний нахил вниз), енергетичний центр зони покриття зміщується ближче до базової станції, що дозволяє локалізувати зону впевненого прийому. Вплив нахилу на профіль дальності покриття наведено на рисунку 5.2.

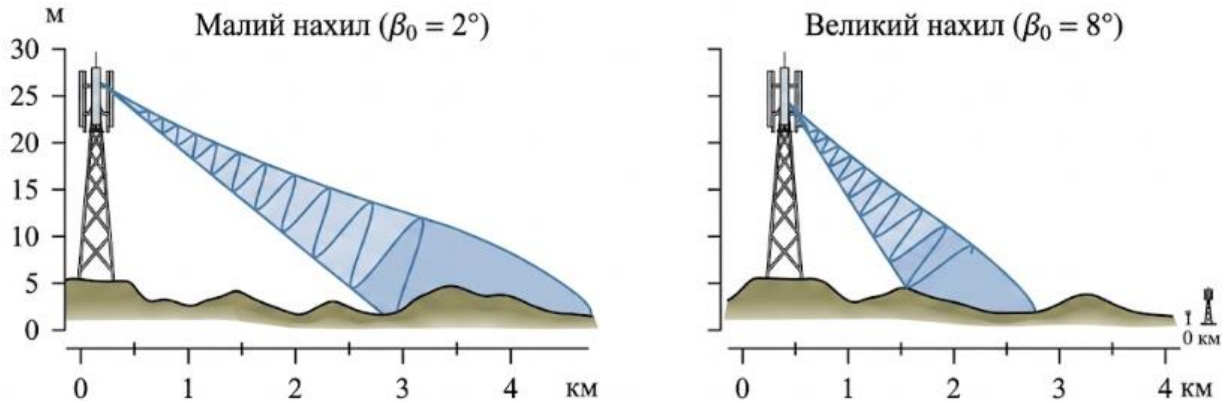


Рис. 5.2: Порівняльна схема зон покриття при різних кутах β_0

Лістинг 3.2 – Відображення напрямків (стрілок) для всіх 3 секторів
`arrow_length_deg = 0.015`

```
for az in SECTOR_AZIMUTHS:
```

```
    az_rad = np.deg2rad(az)
```

```
    dx_a = arrow_length_deg * np.sin(az_rad)
```

```
    dy_a = arrow_length_deg * np.cos(az_rad)
```

```
    ax.annotate(", xy=(BS_LON + dx_a, BS_LAT + dy_a),
```

```
                xytext=(BS_LON, BS_LAT),
```

```
                arrowprops=dict(arrowstyle='->', color='black', lw=2),
```

```
                zorder=11)
```

```
    ax.text(BS_LON + dx_a * 1.3, BS_LAT + dy_a * 1.3, f'{az:.0f}°',
```

```
            ha='center', va='center', fontsize=9, fontweight='bold',
```

```
            bbox=dict(boxstyle="square,pad=0.2", fc="white", alpha=0.7,
```

```
            ec="none"))
```

5.2 Частотне планування

У трисекторній системі використовується коефіцієнт повторення частот $N = 1$. Це означає, що всі три сектори працюють в ідентичній смузі частот. Ефективність такої моделі визначається здатністю антен подавляти завади поза межами основної пелюстки. Рівень сигналу, що сприймається терміналом, розраховується за енергетичним бюджетом:

$$P_{in} = P_{out} + G_0 + G_{H(\psi)} + G_{V(\beta)} - L_{path} + G_r$$

де P_{in} – потужність на вході приймача абонента, P_{out} – вихідна потужність передавача базової станції, G_0 – максимальний коефіцієнт підсилення антени, $G_{H(\psi)}$ – горизонтальне загасання (залежить від кута ψ – відхилення від центру сектора), $G_{V(\beta)}$ – вертикальне загасання (залежить від кута місця β), L_{path} – втрати на трасі поширення, G_r – коефіцієнт підсилення приймальної антени абонента.

Горизонтальне загасання обчислюється за аналогічною квадратичною моделлю:

$$G_{H(\psi)} = -12 * \left(\frac{\psi}{\Delta\varphi_{0.5}} \right)^2$$

де $\Delta\varphi_{0.5} = 65^\circ$ – ширина діаграми спрямованості в горизонтальній площині за рівнем половинної потужності.

Завдяки такій характеристиці при відхиленні абонента на кут $\psi = 60^\circ$ від центру сектора, загасання становить:

$$\begin{aligned} G_{H(60^\circ)} &= -12 * \left(\frac{60}{65} \right)^2 = -12 * \left(\frac{12}{13} \right)^2 = -12 * \left(\frac{144}{169} \right) \approx -12 * 0,8521 \\ &= -10,23 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

Це забезпечує достатню частотну ізоляцію між секторами, дозволяючи використовувати один частотний канал без значних інтерференційних втрат.

5.3 Результати розрахунку зони покриття трисекторної БС

Підсумкова зона покриття формується шляхом суперпозиції індивідуальних зон кожного сектора. Для кожної точки і просторової матриці, що охоплює площу навколо базової станції, обчислюється рівень сигналу для трьох секторів: $P_{c1,i}$, $P_{c2,i}$, $P_{c3,i}$. Фінальне значення P_i визначається за принципом "найкращого сервера":

$$P_i = \max(P_{c1,i}, P_{c2,i}, P_{c3,i})$$

Цей розрахунок дозволяє побудувати єдину карту покриття, де кожна координата належить тому сектору, який забезпечує максимальну енергію сигналу. Алгоритм накладання зон та процес визначення домінантного сигналу проілюстровано на рисунку 5.3.

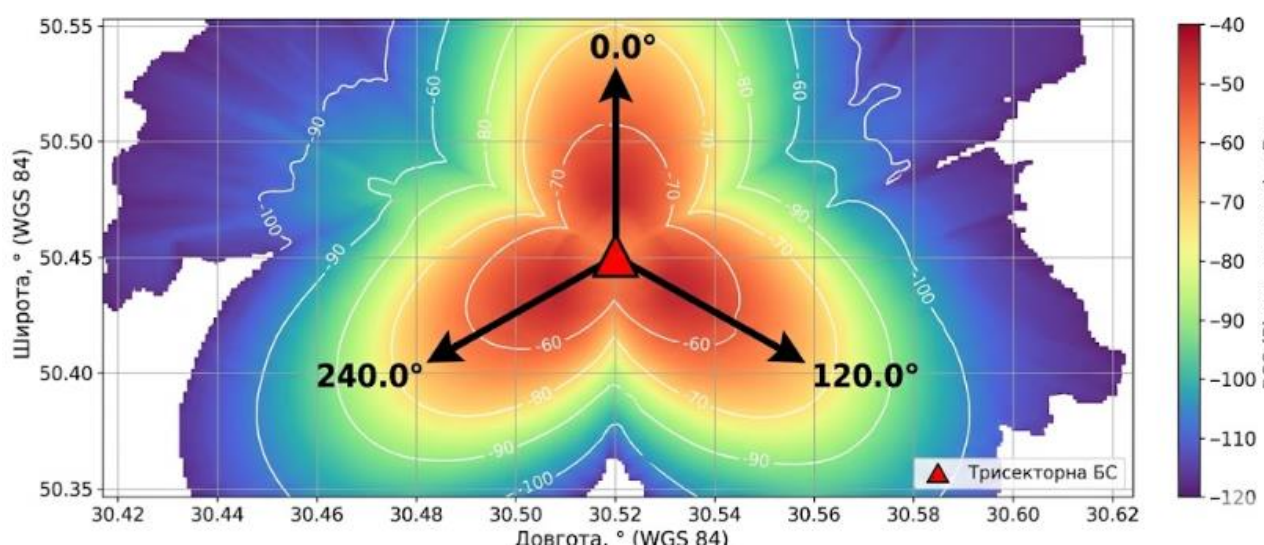


Рис. 5.3: Схема накладання зон покриття (вибір максимального рівня сигналу для кожної точки)

Лістинг до рисунка 5.3:

```
import matplotlib.pyplot as plt

def plot_coverage_results(distances, path_losses, mapl_downlink,
mapl_uplink):

    plt.figure(figsize=(10, 6))

    # Побудова кривої втрат
    plt.plot(distances, path_losses, label='Розрахункові втрати (COST 231
Hata)', color='#1f77b4', linewidth=2.5)

    plt.axhline(y=mapl_downlink, color='red', linestyle='--', label=f'MAPL
Downlink ({mapl_downlink} дБ)')

    plt.axhline(y=mapl_uplink, color='green', linestyle=':', label=f'MAPL Uplink
({mapl_uplink} дБ)')

    plt.title('Залежність втрат поширення сигналу від відстані (LTE 2600
МГц)', fontsize=14, pad=15)

    plt.xlabel('Відстань від базової станції, км', fontsize=12)
    plt.ylabel('Втрати поширення сигналу, дБ', fontsize=12)
    plt.grid(True, which='both', linestyle='--', alpha=0.7)
    plt.legend(loc='lower right', fontsize=11)
    plt.tight_layout()
    plt.show()
```

Реалізація даного методу у середовищі Python дозволяє формувати матрицю значень, де ділянки, в яких $P_i < P_{\text{threshold}}$ (поріг чутливості приймача), ідентифікуються як зони радіотіні. Ітеративний розрахунок для різних значень β_0 демонструє, що при оптимізації нахилу антен можна досягти зменшення площі "мертвих зон" на 15–20% у складних умовах рельєфу, забезпечуючи рівномірний розподіл ємності мережі між трьома секторами базової станції.

Висновки

У п'ятому розділі роботи виконано розрахунок зони покриття базової станції з трьома секторами, що дозволило забезпечити всебічне обслуговування території навколо базової станції. Конфігурація з азимутальним рознесенням антен на 120° (головні напрямки 0° , 120° та 240°) створює суцільне покриття, причому кожен сектор характеризується власним кутом електричного нахилу β_0 , що впливає на вертикальне загасання сигналу $G_V(\beta)$ за квадратичною моделлю. За допомогою аналізу впливу кута нахилу встановлено, що збільшення β_0 зміщує зону впевненого прийому ближче до базової станції, що дозволяє адаптувати покриття до конкретних умов рельєфу та щільності абонентів.

Для трисекторної системи застосовано частотне планування з коефіцієнтом повторення частот $N = 1$, тобто всі три сектори працюють в однаковій смузі частот. Ефективність такого рішення забезпечується завдяки здатності спрямованих антен пригнічувати завади поза межами основної пелюстки. На основі горизонтальної діаграми спрямованості з шириною $\Delta\varphi_{0,5} = 65^\circ$ розраховано, що при відхиленні абонента на кут $\psi = 60^\circ$ від центру сектора горизонтальне загасання становить близько $-10,23$ дБ, що створює достатню частотну ізоляцію між секторами та унеможливорює значні інтерференційні втрати. Це підтверджує можливість використання однієї смуги частот для всієї базової станції без суттєвого погіршення якості зв'язку.

Фінальна зона покриття сформована шляхом суперпозиції індивідуальних зон кожного сектора за принципом «найкращого сервера»: для кожної точки простору обирається максимальний рівень сигналу серед трьох секторів. Результати ітеративних розрахунків для різних значень кута нахилу β_0 показують, що оптимізація нахилу антен дозволяє зменшити площу «мертвих зон» (радіотіні) на 15–20 % у складних умовах рельєфу. Таким чином, трисекторна конфігурація з коефіцієнтом повторення частот $N = 1$ забезпечує рівномірний розподіл ємності мережі між секторами та є ефективним рішенням для побудови систем мобільного зв'язку в реальних географічних умовах.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У ході виконання дипломної роботи проаналізовано особливості розгортання мереж LTE у діапазоні 2600 МГц, побудовано спрощену модель зони покриття у відкритому просторі та сформовано математичну модель тривимірної діаграми спрямованості секторної антени методом еліптичного зшивання горизонтальної та вертикальної проєкцій. Отримані результати дають підстави сформулювати такі висновки.

1. Огляд предметної області підтвердив, що стандарт LTE у діапазоні 2600 МГц (Band 7) забезпечує значну пропускну здатність, проте характеризується підвищеним загасанням на трасі, що зумовлює необхідність ретельного планування зони покриття кожного сектора базової станції із залученням моделей поширення радіохвиль.

2. Побудовано спрощену модель зони покриття на основі рівняння Фрііса та моделі загасання у відкритому просторі (ITU-R P.525). Для всеспрямованої антени із потужністю передавача 46 дБм максимальний радіус покриття на частоті 2690 МГц при чутливості приймача -100 дБм та коефіцієнті підсилення антени ідеального диполя 2,15 дБі становить приблизно 226,7 км.

3. Сформовано математичну модель секторної антени за рекомендаціями 3GPP TR 36.942 на основі чотирьох фундаментальних параметрів (G_0 , $\Delta\phi_{0,5}$, $\Delta\theta_{0,5}$, L_0) відповідно до Регламенту радіозв'язку ITU. Діаграми спрямованості подані у нормованому масштабі, де нормування виконується за формулою $A(\psi) = G(\psi) - G_0$: максимум головного пелюстка відповідає 0 дБ, а ширина ДС визначається за рівнем -3 дБ від цього максимуму (точки половинної потужності). Тривимірна діаграма спрямованості побудована методом еліптичного зшивання горизонтальної та вертикальної проєкцій (формула 3.5), за якого ізолінії рівнів сумарного загасання у координатах (ψ, β) мають форму концентричних еліпсів з півосями $\Delta\phi_{0,5}$ та $\Delta\theta_{0,5}$, що відповідає реальній структурі тривимірної ДС секторної антени. Уніфікація параметрів $A_m = SL_{Av} = 25$ дБ забезпечує однаковий рівень заднього пелюстка в обох ортогональних перерізах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. JAXA. ALOS World 3D – 30 m (AW3D30) [Електронний ресурс] : офіційний сайт. URL: https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30_e.htm (дата звернення: 08.05.2026).
2. Rappaport T. S. Wireless Communications : Principles and Practice. 2nd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. 707 p.
3. Mishra A. R. Fundamentals of Network Planning and Optimisation 2G/3G/4G : Evolution to 5G. 2nd ed. Chichester : John Wiley & Sons, 2018. 544 p.
4. 3GPP TS 36.300 V17.4.0. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) ; Overall Description ; Stage 2. Sophia Antipolis : 3GPP, 2023. 387 p.
5. 3GPP TS 36.104 V17.9.0. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) ; Base Station (BS) radio transmission and reception. Sophia Antipolis : 3GPP, 2023. 263 p.
6. 3GPP TR 36.942 V17.0.0. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) ; Radio Frequency (RF) system scenarios. Sophia Antipolis : 3GPP, 2022. 95 p.
7. Balanis C. A. Antenna Theory : Analysis and Design. 4th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2016. 1104 p.
8. Saunders S. R., Aragón-Zavala A. Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems. 2nd ed. Chichester : John Wiley & Sons, 2007. 546 p.
9. ITU-R Recommendation P.525-4. Calculation of free-space attenuation. Geneva : International Telecommunication Union, 2019. 5 p.
10. ITU-R Recommendation P.526-15. Propagation by diffraction. Geneva : International Telecommunication Union, 2019. 60 p.
11. ITU-R Recommendation P.676-13. Attenuation by atmospheric gases and related effects. Geneva : International Telecommunication Union, 2022. 25 p.

12. ITU-R Recommendation P.452-17. Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0,1 GHz. Geneva : International Telecommunication Union, 2021. 64 p.