

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Радіотехнічний факультет  
Кафедра радіотехнічних систем**

До захисту допущено:  
Завідувач кафедри  
СЖУ Сергій ЖУК  
«16» 06 20 5р.

**Дипломний проєкт  
на здобуття ступеня бакалавра  
за освітньо-професійною програмою «Радіотехнічні комп'ютеризовані  
системи»  
спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»  
на тему: «Лабораторна базова станція мобільного зв'язку GSM на  
основі SDR»**

Виконав:  
студент IV курсу, групи РС-11  
Прохорчук Олексій Сергійович



Керівник:  
Доцент  
Шпилька Олександр Олександрович



Рецензент:  
Старший викладач, PhD  
Єзерський Нікіта Валерійович



Засвідчую, що у цій дипломній роботі  
немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань.  
Студент (-ка) СЖУ

Київ – 2025 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Радіотехнічний факультет**  
**Кафедра радіотехнічних систем**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)  
Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»  
Освітня програма «Радіотехнічні комп'ютеризовані системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

СЖ Сергій ЖУК

« 14 » 04 \_\_\_\_\_ 2025р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на дипломний проєкт студенту**  
**Прохорчуку Олексію Сергійовичу**

1. Тема проєкту «Лабораторна базова станція мобільного зв'язку GSM на основі SDR», Шпилька Олександр Олександрович, доцент, затверджені наказом по університету від «29» травня 2025 р. №1840-с
2. Термін подання студентом проєкту 15.06.2025 р.
3. Вихідні дані до проєкту: SDR-плата LimeSDR v1.4s, монопольна антена на 1800 МГц, корпус для SDR-плати, програмний стек Osmocom та документація GSM.
4. Зміст пояснювальної записки: Перелік скорочень, Вступ, 1. Структура мобільної мережі, 2. Функціональне проєктування, 3. Інсталяція та налаштування програмного забезпечення, 4. Проєктування антени для мобільної базової станції, 5. Конструкторське проєктування, Висновки, Перелік джерел посилань.
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): Електронна презентація, Структурна схема, вигляд корпусу та антени для SDR.

## 6. Консультанти розділів проєкту\*

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

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

### Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання дипломного проєкту                       | Термін виконання етапів проєкту | Примітка |
|-------|---|---------------------------------|----------|
| 1     | Написання вступу  | до 07.05.2025                   |          |
| 2     | Розділ 1 “Структура мобільної мережі”                           | до 14.05.2025                   |          |
| 3     | Розділ 2 “Функціональне проєктування”                           | до 21.05.2025                   |          |
| 4     | Розділ 3 “Інсталяція та налаштування програмного забезпечення ” | до 28.05.2025                   |          |
| 5     | Розділ 4 “ Проєктування антени для мобільної базової станції ”  | до 04.06.2025                   |          |
| 6     | Розділ 5 “Конструкторське проєктування”                         | до 08.06.2025                   |          |
| 7     | Написання висновків   | до 10.06.2025                   |          |
| 8     | Оформлення списку джерел посилань та переліку скорочень         | до 11.06.2025                   |          |
| 9     | Оформлення пояснювальної записки (зведення всіх розділів)       | до 13.06.2025                   |          |
| 10    | Підготовка презентації  | до 14.06.2025                   |          |

Студент



Олексій ПРОХОРЧУК

Керівник



Олександр ШПИЛЬКА

## АНОТАЦІЯ

У дипломному проєкті розроблено та досліджено лабораторну модель базової станції мобільного зв'язку стандарту GSM із використанням програмно-визначуваного радіо (SDR). Метою проєкту є демонстрація принципів роботи GSM-інфраструктури, а також порівняння її з простими аналоговими системами передачі аудіосигналів.

У рамках дослідження було реалізовано базову станцію з використанням SDR-платформи, що дозволило відтворити основні функції GSM-комунікацій, включаючи передачу та прийом голосових даних.

Проєкт включає вибір і моделювання з проведенням електромагнітного аналізу в CST Microwave Studio, виготовлення прототипу та лабораторне тестування у ВЧ-камері з векторним аналізатором. Розроблено корпус для LimeSDR v1.4s у SolidWorks із використанням алюмінієвого сплаву 6063-T6, який що поєднує пасивні тепловідвідні елементи та активне охолодження. Реальний макет корпусу для прототипу виготовлено з пластика з використанням 3D-друку.

Проєкт має практичне значення для освітніх цілей, оскільки дозволяє студентам ознайомитися з різними підходами до реалізації систем бездротового зв'язку, від простих аналогових до сучасних цифрових технологій. Результати дослідження можуть бути використані в навчальному процесі для демонстрації принципів роботи телекомунікаційних систем.

Пояснювальна записка містить 92 сторінки. Дипломний проєкт включає 58 ілюстрацій, 2 таблиці, 7 додатків, а також список літератури з 46 джерел.

## ANNOTATION

In the diploma project, a laboratory model of a GSM mobile communications base station using software-defined radio (SDR) was developed and investigated. The purpose of the project is to demonstrate the principles of GSM infrastructure operation, as well as compare it with simple analog audio signal transmission systems.

As part of the research, a base station was implemented using the SDR platform, which allowed to reproduce the main functions of GSM communications, including the transmission and reception of voice data.

The project includes selection and modeling with electromagnetic analysis in CST Microwave Studio, prototype manufacturing and laboratory testing in an RF chamber with a vector analyzer. A housing for LimeSDR v1.4s was developed in SolidWorks using 6063-T6 aluminum alloy, which combines passive heat dissipation elements and active cooling. A real housing model for the prototype was made of plastic using 3D printing.

The project has practical significance for educational purposes, as it allows students to familiarize themselves with various approaches to the implementation of wireless communication systems, from simple analog to modern digital technologies. The results of the study can be used in the educational process to demonstrate the principles of telecommunication systems.

The explanatory note contains 92 pages. The diploma project includes 58 illustrations, 2 tables, 7 appendices, as well as a list of references from 46 sources.

**Пояснювальна записка  
до дипломного проєкту  
на тему: “Лабораторна базова станція мобільного  
зв’язку GSM на основі SDR”**

Київ — 2025 року

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| <b>ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ</b> .....   | 10 |
| <b>ВСТУП</b> .....   | 11 |
| <b>1. СТРУКТУРА МОБІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ</b> .....                             | 15 |
| 1.1 Структура базової станції GSM .....                                | 17 |
| 1.2 Структура базової станції LTE .....                                | 17 |
| 1.3 Програмно-визначене радіо (SDR).....                               | 18 |
| 1.4 SDR-реалізація та мережеві інтерфейси в GSM і LTE .....            | 19 |
| <b>2. ФУНКЦІОНАЛЬНЕ ПРОЄКТУВАННЯ</b> .....                             | 21 |
| 2.1 Вибір структури RF-тракта .....                                    | 21 |
| 2.1.1 Використання двох окремих антен (TX + RX).....                   | 21 |
| 2.1.2 Використання однієї антени через циркулятор .....                | 22 |
| 2.1.3 Підсумковий вибір архітектури RF-тракту .....                    | 25 |
| 2.2 Квадратурний модулятор та приймач .....                            | 25 |
| 2.3 Вибір SDR.....   | 26 |
| 2.3.1 Короткий огляд претендентів .....                                | 27 |
| 2.3.2 Детальний огляд LimeSDR .....                                    | 28 |
| 2.4 Структурна схема .....   | 30 |
| 2.4.1. Антенно-фідерна підсистема .....                                | 31 |
| 2.4.2 RF-трансивер LMS7002M .....                                      | 32 |
| 2.4.3 FPGA Cyclone IV E.....   | 33 |
| 2.4.4 PC з VM Linux Ubuntu .....                                       | 34 |
| <b>3. ІНСТАЛЯЦІЯ ТА НАЛАШТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ</b> .....    | 37 |
| 3.1 Архітектура GSM-базової станції на основі LimeSDR та Osmocom ..... | 39 |
| 3.2 Підготовка віртуального середовища .....                           | 40 |
| 3.2.1 Вибір та завантаження VirtualBox .....                           | 40 |
| 3.2.2 Завантаження образу Ubuntu .....                                 | 41 |
| 3.2.3 Створення та налаштування VM у VirtualBox .....                  | 42 |
| 3.2.4 Інсталяція Ubuntu 24.04 LTS .....                                | 44 |
| 3.3 Інсталяція LimeSuite і SoapySDR .....                              | 44 |
| 3.3.1 Встановлення LimeSuite через PPA .....                           | 45 |
| 3.3.2 Встановлення SoapySDR.....                                       | 48 |

|           |      |                |        |      |   |                  |      |        |    |
|-----------|------|----------------|--------|------|---|------------------|------|--------|----|
|           |      |                |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b>   |                  |      |        |    |
| Зм.       | Лист | № докум.       | Підпис | Дата | Лабораторна базова<br>станція мобільного зв'язку<br>GSM на основі SDR | Лім.             | Лист | Листів |    |
| Розробив  |      | Прохорчук О.С. |        |      |   |                  |      | 8      | 98 |
| Перевірів |      | Шпилька О.О.   |        |      |   | <b>PC-11 РТФ</b> |      |        |    |
| Н.Контр.  |      |                |        |      |   |                  |      |        |    |
| Н. Контр. |      | Піддубний В.О. |        |      |   |                  |      |        |    |
| Затвердив |      | Жук С.Я.       |        |      |   |                  |      |        |    |

|   |    |
|---|----|
| 3.4 Встановлення компонентів Osmocom .....                              | 50 |
| 3.4.1 Базові компоненти мережі .....                                    | 54 |
| 3.4.2 SDR-специфічні компоненти .....                                   | 54 |
| 3.4.3 Компоненти пакетних даних (GPRS/EDGE) .....                       | 54 |
| 3.4.4 Перевірка встановлення .....                                      | 55 |
| 3.4.5 Додаткові інструменти та утиліти .....                            | 57 |
| 3.5 Запуск і тестування GSM-базової станції на LimeSDR .....            | 57 |
| 3.5.1 Файл openbsc.cfg .....  | 58 |
| 3.5.2 Файл osmo-bts.cfg .....   | 59 |
| 3.5.3 Файл osmo-trx.cfg .....   | 61 |
| 3.5.4 Запуск осередків стека .....                                      | 63 |
| 3.5.5 Тестування роботи базової станції .....                           | 65 |
| 4. ПРОЄКТУВАННЯ АНТЕНИ ДЛЯ МОБІЛЬНОЇ БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ .....              | 68 |
| 4.1. Базові поняття про антену та її роль у SDR .....                   | 68 |
| 4.2. Опис обраної конструкції антени та моделювання .....               | 70 |
| 4.2.1. Аналіз КСХ та S-параметрів антени .....                          | 72 |
| 4.2.2. Аналіз 3D діаграми спрямованості та коефіцієнту підсилення ..... | 73 |
| 4.2.3. Аналіз 2D діаграми спрямованості антени .....                    | 75 |
| 4.3. Фабрикація та тестування антени .....                              | 77 |
| 5. КОНСТРУКТОРСЬКЕ ПРОЄКТУВАННЯ .....                                   | 82 |
| 5.1. Загальні параметри корпусу .....                                   | 82 |
| 5.2. Матеріал корпусу .....   | 84 |
| 5.3. Система охолодження .....  | 85 |
| 5.3.1. Щілина під витяг повітря з вентилятора .....                     | 86 |
| 5.3.2. Бічні щілини для забору (або виходу) повітря .....               | 87 |
| 5.3.3. Алгоритм потоку повітря .....                                    | 88 |
| 5.4. Порти та роз'єми .....   | 88 |
| 5.5. Кріплення корпусу та плати .....                                   | 90 |
| 5.6. Прототипування корпусу на 3D-принтері та брендове оформлення ..... | 90 |
| ВИСНОВКИ .....  | 92 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ .....   | 94 |

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

GSM - Global System for Mobile Communications

SMS - Short Message Service

FDMA - Frequency Division Multiple Access

TDMA - Time Division Multiple Access

GPRS - General Packet Radio Service

LTE - Long-Term Evolution

VoLTE - Voice over LTE

BTS - Base Transceiver Station

SIM - Subscriber Identity Module

UMTS - Universal Mobile Telecommunications System

АЦП - аналогово-цифровий перетворювач

ЦАП - цифро-аналоговий перетворювач

MIMO - Multiple Input Multiple Output

IP - Internet Protocol

SDR - Software Defined Radio

RF - Radio Frequency

KCX - Коефіцієнт стоячої хвилі

VSWR - Voltage Standing Wave Ratio

ДН - Діаграма направленості

ДС - Діаграма спрямованості

SMA - SubMiniature version A

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
|     |      |          |        |      |                           | 10   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

## ВСТУП

Мобільний зв'язок нині охоплює понад 5,6 мільярда абонентів у всьому світі, причому 4,7 мільярда з них активно користуються мобільним інтернетом, що сприяє зростанню цифрової економіки та надає доступ до медичних, освітніх і фінансових послуг у віддалених регіонах. Його соціально-економічний вплив полягає в тому, що мобільна телекомунікаційна інфраструктура сприяє зниженню бідності, розширює можливості малого бізнесу та підвищує ефективність державних послуг [1].

Мережі першого покоління (1G), запущені в Японії компанією NTT у 1979 році, працювали на аналоговій FM-модуляції та дали перший погляд на переваги «коміркової» структури, хоча страждали від низької якості зв'язку та відсутності шифрування [2]. Зі стартом 2G-стандарту GSM у 1991 році мобільні мережі перейшли на цифрову передачу голосу й SMS, поєднуючи FDMA й TDMA для оптимального використання обмеженого спектра та вводячи перші механізми шифрування дзвінків [3][4]. Уже в межах GSM з'явилися і пакетні сервіси GPRS і EDGE, що заклали основу подальших етапів еволюції мереж .

Поява 3G (UMTS/WCDMA) підвищила швидкість передачі даних до теоретичних 2 Мбіт/с і впровадила перші можливості відеодзвінків, розгортанням якого керує ETSI в рамках IMT-2000 [5]. У 2008 році розпочалося масове розгортання 4G LTE, що забезпечило десятки мегабіт за секунду та мінімальні затримки, дозволивши впровадити потокове відео й голос по LTE (VoLTE) [6]. Сьогодні 5G NR, стандартизований 3GPP у релізі 15, пропонує гігабітні швидкості та затримки менше ніж 1 мс, відкриваючи шлях для Інтернету речей і автономних систем [7].

Хоча GSM залишається широко розповсюдженим у багатьох країнах завдяки своїй надійності й простоті, оператори вже готуються до 6G, наголошуючи на необхідності виділення спектра в смузі 6 ГГц для збереження конкурентоздатності в майбутньому та уникнення технологічного відставання Європи від США і Китаю [8].

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
|     |      |          |        |      |                           | 11   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Сучасні виклики включають потребу в енергоефективності, кібербезпеці та розширенні спектра для задоволення стрімкого зростання трафіка й пристроїв IoT [8]. Такий розвиток демонструє поступове нарощування швидкості, надійності і спектральної ефективності, що дозволяє мобільним мережам задовольняти зростаючі потреби суспільства та економіки.

Мережа мобільного зв'язку складається з низки спеціалізованих елементів, кожен із яких виконує критичні функції: від бездротового з'єднання з користувачем до маршрутизації дзвінків і управління абонентами.

**Мобільна станція (MS)** – це сукупність користувацького обладнання та програмного забезпечення, необхідна для зв'язку з мобільною мережею. Вона складається з **Mobile Equipment (ME)** – апаратної частини (радіомодуль, процесор обробки сигналів, інтерфейс) – та **Subscriber Identity Module (SIM)**, що зберігає IMSI-ідентифікатор абонента й ключі автентифікації. У термінології GSM термін “мобільна станція” охоплює не тільки фізичний телефон, а й усі внутрішні функції: модуляцію/демодуляцію, кодування голосу, управління handover і доступ до SIM-карти [9].

**Підсистема базової станції (BSS)** обробляє радіотрафік та сигналізацію між мобільною станцією й ядрівними елементами мережі. До її складу входить BTS (Base Transceiver Station), що містить радіомодулі для виконання модуляції за схемою GMSK, демодуляції, реалізації частотного стрибка та передачі RF-сигналів через антени. Також до складу підсистеми входить BSC (Base Station Controller), який координує ресурси кількох BTS, керує розподілом частоти та часових слотів, організовує процедури handover і передає трафік у комутаційний центр через інтерфейс A.

**Підсистема комутації мережі (NSS)** відповідає за встановлення, маршрутизацію та завершення викликів, а також за автентифікацію та облік абонентів. До її складу входить MSC (Mobile Switching Center), який виконує функції головного вузла для комутації дзвінків між мобільними та фіксованими мережами.

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 12   |

HLR (Home Location Register) є постійною базою даних з профілем абонента, його правами та поточним місцеперебуванням. VLR (Visitor Location Register) являє собою тимчасову базу даних для швидкого обслуговування абонентів у зоні конкретного MSC. AuC (Authentication Center) забезпечує генерацію ключів автентифікації для шифрування з'єднання. EIR (Equipment Identity Register) містить реєстр довірених і заблокованих IMEI-пристроїв.

**Підсистема підтримки експлуатації (OSS)** забезпечує моніторинг, налаштування та підтримку всіх мережевих елементів. Через OMC/NMC операційні центри збирають статистику, аналізують якість обслуговування та координують технічне обслуговування й оновлення конфігурацій мережі [9].

Розробка і впровадження мобільних стандартів координується на міжнародному рівні 3rd Generation Partnership Project (3GPP), який об'єднує сім регіональних організацій-партнерів (ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TSDSI, TTA, TTC) для узгодження технічних звітів і специфікацій усіх поколінь мобільного зв'язку. Першочергово 3GPP успадкував і розвинув стандарти GSM, UMTS, LTE та NR у рамках релізів, що забезпечують еволюцію від 2G до 5G і планують 6G. Європейський інститут телекомунікаційних стандартів (ETSI) відповідає за юридичне затвердження та публікацію GSM-специфікацій у ЄС, передаючи згодом технічну координацію до 3GPP, водночас зберігаючи контроль над регуляторними вимогами для розгортання мереж у Європі [10].

Міжнародний союз електрозв'язку (ITU-R) встановлює глобальні Правила радіозв'язку (Radio Regulations), що регламентують поділ спектра між різними послугами і країнами на всіх континентах; ці правила переглядаються кожні три-чотири роки на Всесвітній радіоконференції (WRC), де, зокрема, визначають діапазони для ІМТ-технологій (2G–5G і далі) [11].

Національні регулятори, як-от в Україні — Національна комісія з регулювання у сфері зв'язку та інформатизації (НКРЗІ, тепер NCCIR) — відповідають за ліцензування операторів, контроль за дотриманням частотних планів і моніторинг якості надання послуг.

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>РС11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 13   |

При цьому Державний центр радіочастот (ДЦРЧ) здійснює технічне адміністрування й розподіл частотних присвоєнь відповідно до законодавства України [12]. Нормативно-правова база передбачає закони та підзаконні акти — у ЄС це Директива 2014/53/EU щодо радіообладнання, а в Україні — Закон «Про електронні комунікації» (2018) та відповідні постанови Кабміну, які визначають вимоги до оснащення, безпеки, екологічності та ліцензійного режиму мереж зв'язку. Таке комплексне регулювання гарантує гармонізацію стандартів, взаємодію обладнання різних виробників і захист інтересів абонентів.

Радіочастотний спектр є критичним ресурсом для мобільного зв'язку, адже від обсягу й діапазонів виділених смуг залежить потужність мережі, покриття й ємність. У GSM як базові використовуються діапазони 900 МГц (880–915 МГц uplink, 925–960 МГц downlink) та 1800 МГц (1710–1785 МГц uplink, 1805–1880 МГц downlink). Для охоплення Північної Америки додатково застосовуються смуги 850/1900 МГц, а в окремих регіонах — й інші локальні піддіапазони.

Кожна країна, керуючись ITU-R, формує власний частотний план. В Україні NCCIR за результатами WRC-19 готувала тестування 5G у діапазонах 3400–3800 МГц та 24.25–27.5 ГГц, попередньо розчищаючи ці смуги від інших користувачів [13]. Регулярні торги (аукціони) спектра для 4G/5G проводяться з участю операторів, які отримують права користування на 10–15 років із обов'язками інвестувати в розбудову інфраструктури. Співпраця з ITU-R і участь у WRC гарантують сумісність частотних планів між суміжними країнами та зменшують міжоператорські перешкоди. Крім цього, національні органи координують використання смуг для інших служб (радіорелейні лінії, авіаційний зв'язок, військові потреби) задля мінімізації взаємних перешкод і дотримання екологічних стандартів ЕМС [11].

Таким чином, грамотне поєднання міжнародних стандартів 3GPP, ETSI та ITU з національними регуляторними вимогами й чітким частотним планом створює основу для стабільної, безпечної та ефективної роботи мереж GSM і їхніх наступників.

|            |             |                 |               |             |                           |             |
|------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|---------------------------|-------------|
|            |             |                 |               |             | <b>РС11.460009.001 ПЗ</b> | <i>Лист</i> |
| <i>Зм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                           | 14          |

# 1. СТРУКТУРА МОБІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ

На Рис. 1.1 наведена схема архітектури мобільної мережі, що включає такі підсистеми: **GERAN** – 2G (BTS, BSC), **UTRAN** – 3G (NodeB, RNC), **EUTRAN** – 4G LTE (eNodeB), **CS Core** – комутація каналів (GMSC, MSC/VLR), **PS Core** – комутація пакетів (SGSN, GGSN), **EPC** – Evolved Packet Core для LTE (MME, S-GW, P-GW/PDN-GW).

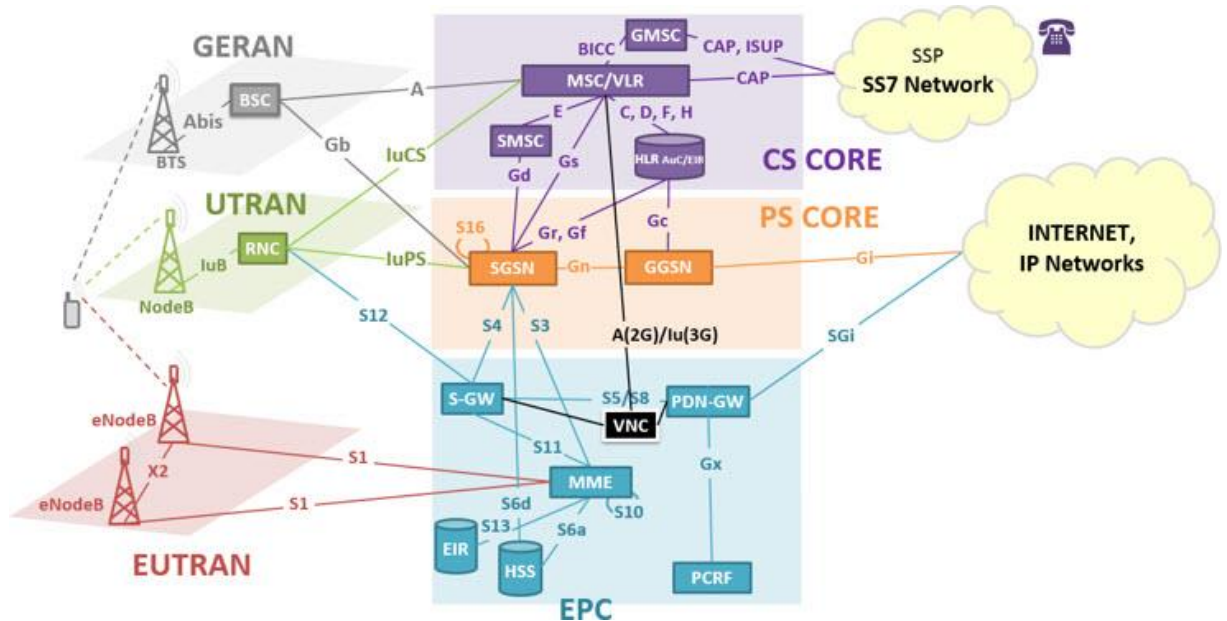


Рис. 1.1 - Схема архітектури мобільної мережі

Схематична архітектура традиційної GSM-мережі (Рис. 1.2) з виділеними підсистемами радіодоступу (BSS) і комутаційною підсистемою (NSS). GSM-мережі побудовані за ієрархічним принципом: вони містять підсистему базової станції (BSS) і комутаційну підсистему (NSS) [14]. Підсистема BSS включає базові станції (BTS) та контролери базових станцій (BSC), з'єднані інтерфейсом Abis [15]. Базова станція (BTS) містить радіотракти і антени, забезпечуючи безпосередню комунікацію з мобільними терміналами по радіоінтерфейсу (Um) [14]. Контролер базової станції (BSC) керує ресурсами радіодоступу для одного або кількох BTS (розподіляє канали, координує хендовери тощо), а також здійснює зв'язок із комутаційною підсистемою (через інтерфейс A) [14][15].

Підсистема NSS складається з MSC/VLR (для маршрутизації викликів і управління мобільністю) та інших елементів (HLR/AuC для зберігання даних абонентів, EIR тощо) [14].

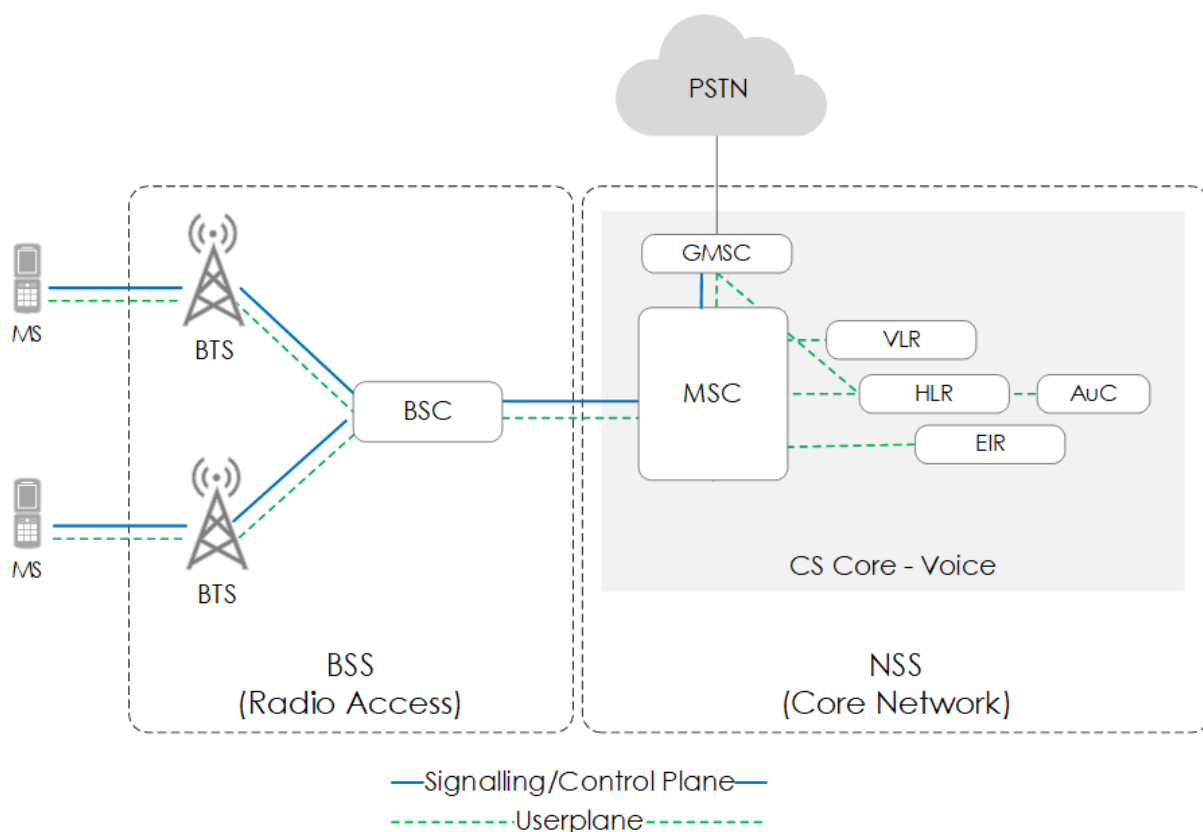


Рис. 1.2 - Схематична архітектура традиційної GSM-мережі

LTE-мережі (Long-Term Evolution) є розвитком попередніх стандартів (GSM/UMTS), оптимізованим під високошвидкісну передачу пакетних даних і спрощену архітектуру. У LTE радіодоступ (E-UTRAN) складається з елементів eNodeB, які об'єднують функції традиційних BTS і контролера, і зв'язані між собою та з ядром мережі IP-мережею. Інтерфейс між eNodeB та ядром (EPC) позначається S1 (охоплює як контрольні повідомлення, так і користувацький трафік) [16]. Ядро EPC включає такі ключові вузли: MME, S-GW, P-GW та HSS, які забезпечують управління мобільністю, автентифікацію та маршрутизацію даних [17]. Обидві технології — GSM і LTE — обрані для дослідження завдяки їхній поширеності, доступності апаратних засобів та відкритим програмним реалізаціям (OpenBTS, YateBTS, srsRAN), що спрощує реалізацію лабораторних мереж.

## 1.1 Структура базової станції GSM

У GSM-підсистемі базових станцій (BSS) виокремлюють такі складові:

**1. BTS (Base Transceiver Station)** – містить радіотракти (передавачі/приймачі) та антени, визначаючи межі однієї радіоклітини. BTS забезпечує роботу радіоінтерфейсу з мобільними терміналами по каналах TDMA/FDMA [14].

**2. BSC (Base Station Controller)** – концентрує управління ресурсами радіодоступу для групи BTS. BSC відповідає за налаштування радіоканалів, перемикання (хендовери) між BTS та інтерфейс Abis, а також за підключення до комутаційної підсистеми через інтерфейс А [14].

**3. BSS (Base Station Subsystem)** – поєднує BTS і BSC і виконує функції радіодоступу. Інтерфейс Abis, визначений стандартом, забезпечує взаємодію між BTS і BSC незалежно від виробника обладнання [15].

## 1.2 Структура базової станції LTE

У мережах LTE роль базової станції виконує елемент **eNodeB** (Evolved Node B), який об'єднує радіомодулі та функції керування в єдиному пристрої.

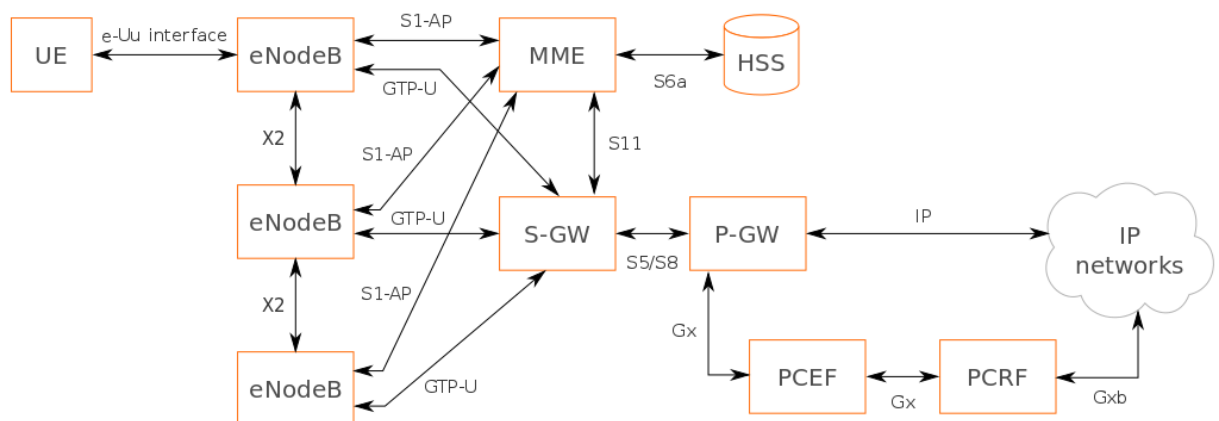


Рис. 1.3 - Архітектура LTE

На відміну від GSM, тут відсутній окремий контролер; eNodeB самостійно керує ресурсами радіоінтерфейсу і підключається до ядра EPC. Мобільні термінали (UE) взаємодіють з eNodeB через радіоінтерфейс E-UTRA (зазначається як Uu).

eNodeB з'єднується з ядром мережі EPC за допомогою інтерфейсу S1, а ядро EPC включає такі основні компоненти: MME, S-GW, P-GW і HSS. Основні функції EPC виконують:

**1. MME (Mobility Management Entity)** – сигналізація та управління мобільністю (реєстрація, хендовери, автентифікація тощо) [17].

**2. S-GW (Serving Gateway)** – обробка пакетів користувацьких даних у середині мережі оператора.

**3. P-GW (Packet Gateway)** – вихід у зовнішні IP-мережі (інтернет) і маршрутизація трафіку UE.

**4. HSS (Home Subscriber Server)** – центральна база даних абонентів LTE (аналог HLR у GSM) [17].

### 1.3 Програмно-визначене радіо (SDR)

Програмно-визначене радіо – це радіосистема, у якій більшість функцій обробки сигналу реалізується програмно на стандартних обчислювальних пристроях, а апаратна частина містить лише мінімальні RF-компоненти та АЦП/ЦАП. Вхідні RF-сигнали перетворюються АЦП у цифровий вигляд і проходять обробку за допомогою програмних алгоритмів DSP. Такий підхід надає набагато більшу гнучкість і масштабованість, ніж традиційні апаратні РЧ-приймачі; SDR-пристрої можна динамічно переналаштовувати під різні стандарти (Wi-Fi, Bluetooth, GSM, LTE тощо). В освітньому контексті SDR особливо цінні завдяки своїй адаптивності: студенти можуть вивчати реальні протоколи на рівні програмного коду без необхідності розробки дорогого спеціалізованого обладнання [18].

Основними перевагами SDR в лабораторних умовах є гнучкість і переналаштовуваність, оскільки SDR-систему можна швидко переконфігурувати для підтримки нових стандартів або алгоритмів без апаратних змін. Також важливою є масштабованість та універсальність, адже один пристрій SDR здатний працювати з різними стандартами — як пакетними, так і голосовими — завдяки програмній зміні алгоритмів.

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 18   |

Застосування SDR дозволяє знизити вартість, оскільки замість багатьох вузькоспеціалізованих приймачів використовується один універсальний пристрій. Додатковою перевагою є наявність відкритих програмних середовищ, до яких належать готові фреймворки, такі як GNU Radio, Pothos, GNURadio, srsRAN та інші, що полегшують розробку і тестування радіосистем.

#### 1.4 SDR-реалізація та мережеві інтерфейси в GSM і LTE

У сучасних лабораторних базових станціях мобільного зв'язку програмно-визначене радіо (SDR) дозволяє замінити велику кількість вузькоспеціалізованого обладнання одним універсальним рішенням. Зокрема, платформи на кшталт OpenBTS, YateBTS чи srsRAN об'єднують RF-фронтенд на базі SDR із програмною реалізацією стека GSM або LTE, включно з повітряним інтерфейсом (Um/Uu), внутрішніми шинними інтерфейсами (Abis, S1, X2) та ядром мережі (MSC/VLR або EPC). Завдяки цьому можна не лише організувати передавання й прийом радіосигналів, а й повністю емулювати службу аутентифікації, маршрутизацію викликів і обмін пакетними даними в експериментальному середовищі [18].

При побудові GSM-BTS за допомогою SDR – наприклад, з OpenBTS – RF-модуль (часто USRP або LimeSDR) реалізує радіоінтерфейс Um, модуляцію GMSK і TDMA-розбиття кадрів. Далі сигнали надходять у програмний стек, де підсистема Osmo-USRP або OpenBTS реалізує логіку Abis, перетворюючи радіоканали на SIP-з'єднання для Asterisk або Yate – таким чином мобільний телефон стає SIP-клієнтом. У ході цього м'яко емулюються функції BTS і BSC, а комутація каналів і автентифікація відбуваються в MSC/VLR, до якого OpenBTS підключається як GMSC–CAP чи через SS7 Network.

У LTE-мережах SDR-підхід представлений відкритими проєктами на кшталт srsRAN (раніше srsLTE), де eNodeB реалізовується у програмі, а сигнал трактується через LimeSDR чи USRP, працюючи з модуляцією OFDMA/SC-FDMA. Інтерфейс eNodeB ↔ EPC (S1-AP для сигналізації та GTP-U для даних) програма srsRAN реалізує всередині контейнера, передаючи аутентифікацію

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 19   |

MME, маршрутизацію S-GW/P-GW і обслуговування користувацького трафіку через SGi в зовнішній IP-мережі.

Кожен із цих сценаріїв спирається на чітко визначені інтерфейси: у GSM це Um (GMSK, TDMA), Abis (цифровий TDM-з'єднувач між BTS і BSC) і A (підключення до MSC). В LTE це Uu (OFDMA/SC-FDMA), S1 (розподілений на S1-C для сигналізації та S1-U для даних) та X2 (горизонтальні хендовери між eNodeB).

Ядро мережі в GSM (NSS) представлено MSC/VLR, HLR, AuC та EIR, що разом забезпечують виклики й SMS, автентифікацію та списки довіри IMEI-пристроїв. В LTE EPC складається з MME, S-GW, P-GW і HSS, які опрацьовують сигналізацію, маршрутизацію даних і зберігання клієнтських профілів [15].

У практиці використання LimeSDR для таких завдань демонструють наступні приклади. У проєкті srsRAN LimeSDR застосовується як RF-фронтенд, тоді як ПК із Linux виконує ядро LTE та радіо-протоколи, забезпечуючи повноцінну роботу eNodeB і UE – навіть з handover між кількома базовими станціями. Альтернативно, OpenBTS на LimeSDR дозволяє розгорнути GSM-модель «в коробці», де мобільні телефони можуть дзвонити один одному або в мережі VoIP без комерційного оператора.

Таким чином, SDR у базових станціях GSM/LTE не лише спрощує апаратну архітектуру, але й дає змогу швидко прототипувати мережі, вивчати інтерфейси, експериментувати з різними алгоритмами планування ресурсів та безпеки, що критично важливо для навчання й досліджень.

## 2. ФУНКЦІОНАЛЬНЕ ПРОЄКТУВАННЯ

### 2.1 Вибір структури RF-тракта

У цьому підрозділі обґрунтовується вибір між двома основними варіантами організації радіочастотного тракту для лабораторної GSM-базової станції на SDR: використання двох окремих антен або однієї антени через циркулятор.

#### 2.1.1 Використання двох окремих антен (TX + RX)

Суть підходу полягає в тому, що передавач і приймач використовують окремі антени, підключені до різних каналів SDR. У нашому випадку LimeSDR має можливість працювати з двома незалежними каналами передачі і двома каналами прийому.

Переваги цього підходу включають високу ізоляцію між TX і RX завдяки фізичному розділенню, що гарантує мінімальний взаємний вплив. Крім того, сигнали передачі та прийому не накладаються, що дозволяє зменшити перешкоди, самозбудження та зворотні витоки. Також є можливість окремої оптимізації антенних трактів з урахуванням узгодження, підсилення, поляризації та розміщення. Додатковою перевагою є підтримка одночасного TX і RX, що корисно під час тестових експериментів (наприклад, full-duplex або симуляції прийому під час передачі), хоча GSM зазвичай працює за принципом TDMA, а окремі тракти полегшують перевірку динаміки перемикачів [19].

Математичне обґрунтування полягає в тому, що коефіцієнт розв'язки між передавачем і приймачем можна визначити як співвідношення потужності передавача до потужності зворотних витоків сигналу.

$$I_{dual} = \frac{P_{TX \text{ в } RX}}{P_{TX}} \ll 1,$$

де  $I_{dual}$  – коефіцієнт розв'язки (ізоляції) між передавачем і приймачем, що показує, яка частина потужності передавача потрапляє на вхід приймача;  $P_{TX \text{ в } RX}$  – потужність витоку або завадного сигналу, що потрапляє з передавача в приймач;  $P_{TX}$  – загальна потужність сигналу, що передається від передавача.

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
|     |      |          |        |      |                           | 21   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Відношення має бути набагато меншим за 1, що гарантує мінімальний вплив витоку від TX на RX і забезпечує високу розв'язку каналів. Ізоляція зазвичай > 60–80 дБ для добре рознесених антен.

### 2.1.2 Використання однієї антени через циркулятор

Суть підходу полягає в тому, що одна антена обслуговує як передачу, так і прийом сигналів, а розділення сигналів здійснюється за допомогою пасивного трипортового пристрою, що називається циркулятор. Порти циркулятора позначаються як «1» для підключення до передавача (TX) «2» підключений до антени та «3» підключений до приймача (RX). Ідея полягає в тому, що сигнал від передавача надходить через порт 1 до порту 2, де використовується антена, а сигнал від антени переноситься з порту 2 до порту 3 для прийому; коли певна гілка не використовується, третій порт завершується резистором для запобігання відбиттям [20].

Циркулятор є пасивним пристроєм, який через специфічну конструкцію забезпечує односторонній потік сигналів між трьома портами, що дозволяє розділити сигнали передачі і прийому в одній антенній системі.

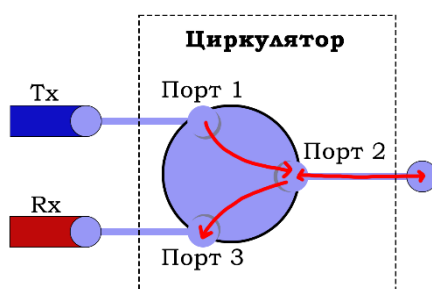


Рис. 2.1 - Блок-схема трипортового циркулятора

Циркулятор побудований на магнітних (феритових) або хвилевідних елементах із фазовими зрушеннями, що забезпечують напрямний рух сигналів по колу. На практиці для GSM1800 циркулятор підлаштовують під вузьку смугу, щоб мінімізувати втрати та підвищити ізоляцію.

Ідеальна матриця розсіювання  $S$  для трипортового циркулятора в ідеалі (без втрат) має вигляд:

$$S_{ideal} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

де індекси означають: порт 1→2, 2→3, 3→1. У реальному циркуляторі елементи S<sub>21</sub>, S<sub>32</sub>, S<sub>13</sub> менші за одиницю через втрати, а інші S-коефіцієнти прагнуть до нуля або обмежені ізоляцією.

Технічні параметри циркулятора включають вставні втрати, які типово становлять 0.2–0.5 дБ на робочій частоті, ізоляцію між портами, що зазвичай досягає 15–30 дБ у вузькосмугових реалізаціях (у широкосмугових може бути нижчою), та значення VSWR близько 1.05–1.2 на центральній частоті.

Наступна формула відображає коефіцієнт витoku в системі:

$$I_{circ} = \frac{P_{leak}}{P_{TX}} = |S_{31}|^2$$

Коефіцієнт витoku в системі визначає, яка частка потужності передавача потрапляє ненавмисно до приймача, тобто співвідношення виточної потужності до загальної потужності передачі, що дорівнює квадрату амплітудного значення параметра розсіювання S<sub>31</sub>.

За допомогою виразу для ізоляції в децибелах, який обчислюється як  $-20\log_{10}|S_{31}|$ , можна встановити, що при ізоляції 20 дБ значення  $|S_{31}|$  приблизно 0.1, що означає, що близько 1 % енергії передавача переходить до приймача; при ізоляції 30 дБ витік зменшується до приблизно 0.1 %. Цей підхід дозволяє кількісно оцінити ефективність розв'язки між каналами передачі і прийому у системах з використанням циркуляторів.

До переваг відноситься компактність апаратури, яка забезпечується використанням однієї антени, що зменшує кількість кабельних з'єднань, а простота розміщення підходить для портативних рішень або систем з обмеженим простором.

Недоліками є обмежена ізоляція (15–30 дБ), що може спричинити помітні перешкоди частина сильної TX-потужності «просочується» до RX, що знижує чутливість приймача і може викликати спотворення.

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
|     |      |          |        |      |                           | 23   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Також виникають додаткові втрати вставні втрати циркулятора зменшують ефективну потужність випромінення й чутливість. Особливо для GSM1800 та в лабораторних умовах існує необхідність точного налаштування під конкретну частоту (1.8 ГГц) через вузькосмуговість якісних циркуляторів. Крім того, варто врахувати вартість високоякісні циркулятори з великою ізоляцією на GSM-діапазон зазвичай коштують дорожче, ніж прості пасивні компоненти для двохантенної схеми.

Ізоляція між передавачем і приймачем у схемі з двома окремими антенами дуже висока (понад 60 дБ при правильному рознесенні), тоді як у варіанті з однією антеною через циркулятор вона лише середня (приблизно 15–30 дБ), що підвищує ризик взаємних впливів.

Втрати сигналу в двоантенній конфігурації мінімальні, обмежуються лише властивостями кабелів і фільтрів, а використання циркулятора додає вставні втрати на рівні 0,2–0,5 дБ. Ризик самозбудження або «просочування» сигналу передавача у приймач у двоантенній схемі дуже низький завдяки фізичному розділенню, тоді як із циркулятором цей ризик помірний через частковий витік TX-сигналу до RX.

Налаштування тракту з двома антенами простіше — кожен гілку можна регулювати незалежно, тоді як у разі циркулятора потрібна ретельна калібрування і підбір компонента під конкретну частоту. Щодо вартості, двоантенна схема зазвичай вимагає придбання двох антен і кабелів, але в підсумку це дешевше за високоякісний вузькосмуговий циркулятор. Що стосується компактності, дві антени займають більше місця, а одна антена з циркулятором виглядає компактніше, але ця економія простору досягається ціною зниження якості ізоляції.

У контексті GSM1800 конфігурація з двома антенами рекомендована для надійності і чистоти прийому та передачі, тоді як використання циркулятора менш бажане через ймовірність перешкод і погіршення чутливості.

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 24   |

### 2.1.3 Підсумковий вибір архітектури RF-тракту

Для нашої лабораторної базової станції GSM на основі SDR обрано конфігурацію з двома окремими антенами, оскільки вона гарантує найвищу ізоляцію між передавальною та приймальною гілками, мінімізує взаємні перешкоди й спотворення, а також спрощує налаштування та тестування. Використання циркулятора, хоча й дозволяє компактнішу схему, не забезпечує необхідної ізоляції в діапазоні GSM1800 і може призводити до критичного впливу ТХ-витоків на чутливий RX, що неприйнятно для експериментальної платформи.

### 2.2 Квадратурний модулятор та приймач

Квадратурний модулятор та приймач є ключовими компонентами в системах програмно визначеного радіо (SDR), які використовуються для передачі та прийому сигналів у мобільних мережах, зокрема в GSM. Ці компоненти дозволяють ефективно модулювати та демодулювати сигнали, використовуючи квадратурні сигнали (I та Q), що є фундаментальними для багатьох схем модуляції, включаючи ті, що використовуються в GSM.

Квадратурна модуляція передбачає використання двох сигналів: інфазного (I) та квадратурного (Q), які мають фазу, що відрізняється на 90 градусів. Ці сигнали дозволяють представляти інформацію в двовимірному просторі, що збільшує ефективність використання каналу [21].

Квадратурний модульований сигнал можна представити як:

$$s(t) = I(t)\cos(2\pi f_c t) - Q(t)\sin(2\pi f_c t),$$

де  $f_c$  — несуча частота,  $I(t)$  — синфазна компонента,  $Q(t)$  — квадратурна компонента.

Після множення на локальний осцилятор сигнали проходять через низькочастотні фільтри для видалення високочастотних компонентів.

У GSM використовується модуляція з частковим зсувом (Gaussian Minimum Shift Keying, GMSK), яка є формою квадратурної модуляції. GMSK використовує I та Q сигнали для передачі бітової інформації, забезпечуючи ефективне використання спектра та стійкість до шумів. GMSK є різновидом фазової модуляції, де фаза сигналу змінюється плавно, що зменшує спектральні спотворення.

Формуючий фільтр Гауса (Gaussian Pulse-Shaping Filter) використовується в цифрових системах зв'язку, зокрема в GSM, для обробки сигналів з метою мінімізації міжсимвольних перешкод та оптимізації спектральної ефективності [22]. Параметр BT (Bandwidth-Symbol Time Product) визначає компроміс між спектральною ефективністю та якістю сигналу

Формуючий фільтр Гауса має наступну формулу:

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}, \sigma = \frac{\sqrt{\ln 2}}{2\pi BT},$$

де BT=0,3 (для GSM).

У системах SDR, таких як LimeSDR, квадратурна модуляція та демодуляція реалізуються як у апаратному, так і в програмному забезпеченні. LimeSDR має два канали TX і два RX, що дозволяє обробляти I та Q сигнали окремо. У програмному забезпеченні Osmocom, наприклад, блоки OsmoTRX відповідають за обробку квадратурних сигналів.

У трансівері LMS7002M квадратурна обробка реалізована апаратно: є наявність 12-бітних ЦАП/АЦП, частота дискретизації яких до 61.44 MS/s. Також маємо ФНЧ зі змінною смугою 1.4–20 МГц, що є оптимально для GSM каналу 200 кГц.

### 2.3 Вибір SDR

Для реалізації лабораторної базової станції GSM необхідно обрати SDR-пристрій, який підтримує частоти GSM (900 та 1800 МГц), повний дуплекс, високу частоту дискретизації та сумісність із програмним забезпеченням Osmocom. Розглянемо три популярні пристрої: hackRF One, BladeRF x40 та LimeSDR.

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
|     |      |          |        |      |                           | 26   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

### 2.3.1 Короткий огляд претендентів

**BladeRF (x40 / x115 / 2.0)** спроектований як відкритий апаратно-програмний комплекс із USB-3.0, внутрішнім Cyclone-IV FPGA та радіочастотним чипом LMS6002M (у версіях x40/x115) або AD9361 (у BladeRF 2.0). Робочий діапазон 300 МГц – 3.8 ГГц, смуга оцифрування до 40 МГц, 12-бітних АЦП/ЦАП, один канал TX та один RX з повнодуплексною підтримкою<sup>2</sup>.

**HackRF One** є недорогим одноканальним SDR на MAX2837, орієнтованим передовсім на дослідницькі потреби. Діапазон 1 МГц – 6 ГГц, смуга 20 МГц, 8-бітна оцифровка, half-duplex USB-2.0; при потребі передача й прийом перемикаються послідовно<sup>3</sup>. Велика спільнота, але обмеження роздільної здатності та інтерфейсу роблять його тісним для лабораторної БС GSM.

**LimeSDR USB v1.4s** побудований на сучасному LMS7002M із двома повнодуплексними каналами TX/RX, 100 кГц – 3.8 ГГц, миттєва смуга 61.44 МГц, 12-біт, USB-3.0, вбудована можливість MIMO 2×2. Увесь стек (схеми, ПЗ, прошивки) з відкритим вихідним кодом; драйвери LimeSuite інтегруються з Osmocom-BB, gr-gsm та srsRAN, що спрощує розгортання GSM-стека [23].

Табл. 2.1 - Порівняння основних параметрів популярних SDR

| Параметр              | BladeRF x40       | hackRF One    | LimeSDR           |
|-----------------------|-------------------|---------------|-------------------|
| Частотний діапазон    | 300 МГц - 3.8 ГГц | 1 МГц - 6 ГГц | 100 кГц - 3.8 ГГц |
| Ширина RF-смуги       | 40 МГц            | 20 МГц        | 61.44 МГц         |
| Глибина вибірки       | 12 біт            | 8 біт         | 12 біт            |
| Частота дискретизації | 40 MSPS           | 20 MSPS       | 61.44 MSPS        |
| Канали передачі       | 1                 | 1             | 2                 |
| Канали прийому        | 1                 | 1             | 2                 |
| Дуплекс               | Повний            | Напівдуплекс  | Повний            |
| Інтерфейс             | USB 3.0           | USB 2.0       | USB 3.0           |
| Відкритий код         | Схема, прошивка   | Повністю      | Повністю          |
| Точність генератора   | +/- 1 ppm         | +/- 20 ppm    | +/-1 ppm          |
| Потужність передачі   | 6 dBm             | -10 dBm+      | макс. 10 dBm      |
| Ціна                  | \$420             | \$299         | \$299             |

### 2.3.2 Детальний огляд LimeSDR

Для лабораторної базової станції GSM вибір зупинився на LimeSDR завдяки його продуктивності та можливостям. Найбільша ширина смуги та висока частота дискретизації забезпечують ефективну обробку GSM-сигналів, а два канали передачі та прийому дозволяють працювати з кількома користувачами чи частотними смугами. Повний дуплекс критично важливий для синхронної передачі та прийому даних, а USB 3.0 гарантує швидку передачу інформації. Точність генератора забезпечує стабільність частоти, що є важливим параметром для якісної роботи.

LimeSDR також має вигідне співвідношення ціни та відкритості, пропонуючи кращі характеристики за \$299 порівняно з BladeRF, який, хоча і має хороші параметри, але поступається за кількістю каналів і коштує дорожче. hackRF One через напівдуплексний режим, меншу глибину вибірки та повільніший інтерфейс не відповідає вимогам для базової станції GSM.

Нижче наведена структурна блок-схема LimeSDR v1.4s, що відображає основні апаратні компоненти пристрою та взаємозв'язки між ними:

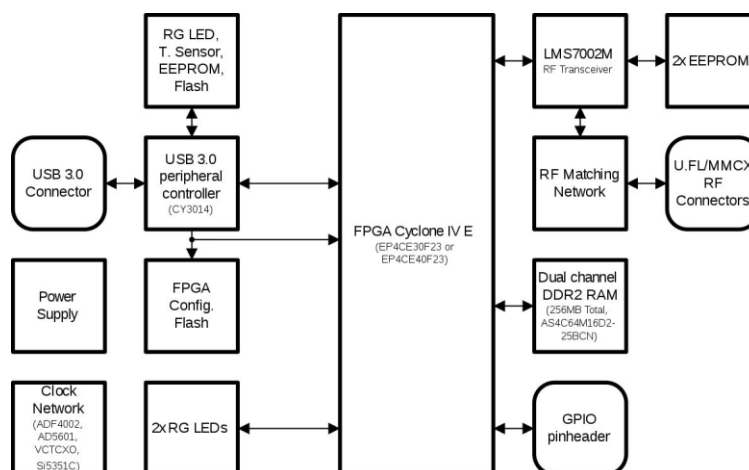


Рис. 1.4 - Структурна блок-схема LimeSDR v1.4s

LimeSDR-USB підключається до комп'ютера через роз'єм USB 3.0 Type A, що забезпечує пропускну здатність до 5 Гбіт/с для реального часу обміну IQ-даними між ПК і пристроєм. На USB-шляху встановлено контролер Cypress FX3 (CYUSB3014), який реалізовує SuperSpeed USB 3.0 протокол і перенаправляє потоки даних безпосередньо у FPGA [24].

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 28   |

Живлення плати формується від USB та зовнішнього джерела, і шумоподавлення в лінії живлення гарантується фільтрами. Також на платі розміщено генератор опорної частоти 30.72 МГц (VCTCXO/Si5351C та PLL ADF4002), що синхронізує роботу FPGA та RF-трансивера з високою точністю.

Центральним обчислювальним елементом служить FPGA Altera Cyclone IV E (серії EP4CE30F23/EP4CE40F23), яка виконує обробку цифрових сигналів, маршрутизацію потоку даних і обробку протоколів SDR. Під час завантаження FPGA ініціалізується з конфігураційної флеш-пам'яті, після чого усі логічні блоки активуються для виконання залитого образу.

Для буферизації і тимчасового зберігання потоків IQ-сигналів передбачено двоканальну DDR2 SDRAM загальним обсягом 256 МБ. Це дає змогу накопичувати великі обсяги даних та мінімізувати розриви при обміні з хост-ПК чи при обробці в FPGA.

Аналогова частина побудована на базі програмно-визначеного RF-трансивера LMS7002M, який інтегрує два незалежних передавачі та два приймачі в Zero-IF архітектурі з пропускною здатністю до 61.44 МГц. Обидві трансиверні лінії мають спільні PLL для передавачів і приймачів, що забезпечує стабільність частоти й ефективне MIMO.

Після LMS7002M сигнал проходить через RF-мережу узгодження імпедансів, яка складається з набору фільтрів та трансформаторів, що підлаштовують виходи передавачів і входи приймачів до роз'ємів U.FL/MMCX. Це гарантує мінімальні втрати й оптимальне подавлення відображень на антени.

На платі також присутні допоміжні компоненти: кілька світлодіодів (статусних і підсвічування), температурний сенсор, EEPROM для зберігання калібрувальних даних та флеш-пам'ять для прошивок контролерів USB і RF. Це дозволяє моніторити стан плати та оновлювати прошивки без заміни апаратури. У загальному контурі обробки LimeSDR реалізує архітектуру SDR: RF-фронтенд (LMS7002M) перетворює хвилю в цифровий потік через ADC.

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
|     |      |          |        |      |                           | 29   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Цей потік передається в FPGA для виконання DSP-операцій (мікшування, фільтрація, кодування) і потім надсилається по USB на хост, де програмне забезпечення (GNU Radio, Pothos, srsRAN) завершує реалізацію діапазону протоколу (GSM, LTE тощо). Реалізація подібного контуру дає потужний універсальний стенд для лабораторних експериментів із мобільного зв'язку.

## 2.4 Структурна схема

Наступна блок-схема відображає повний процес трансформації сигналу від радіочастотного рівня до мережевого пакету лабораторної базової станції GSM 1800, зібраної на LimeSDR USB v1.4s. Вона охоплює два рівні: апаратний — подвійні TX/RX антенно-фідерні тракти, чип LMS7002M, FPGA Cyclone IV E, живлення та охолодження; та програмний — стек Osmocom, керування SDR через LimeSuite й SoapySDR та віртуальну машину з Ubuntu 24.04 LTS.

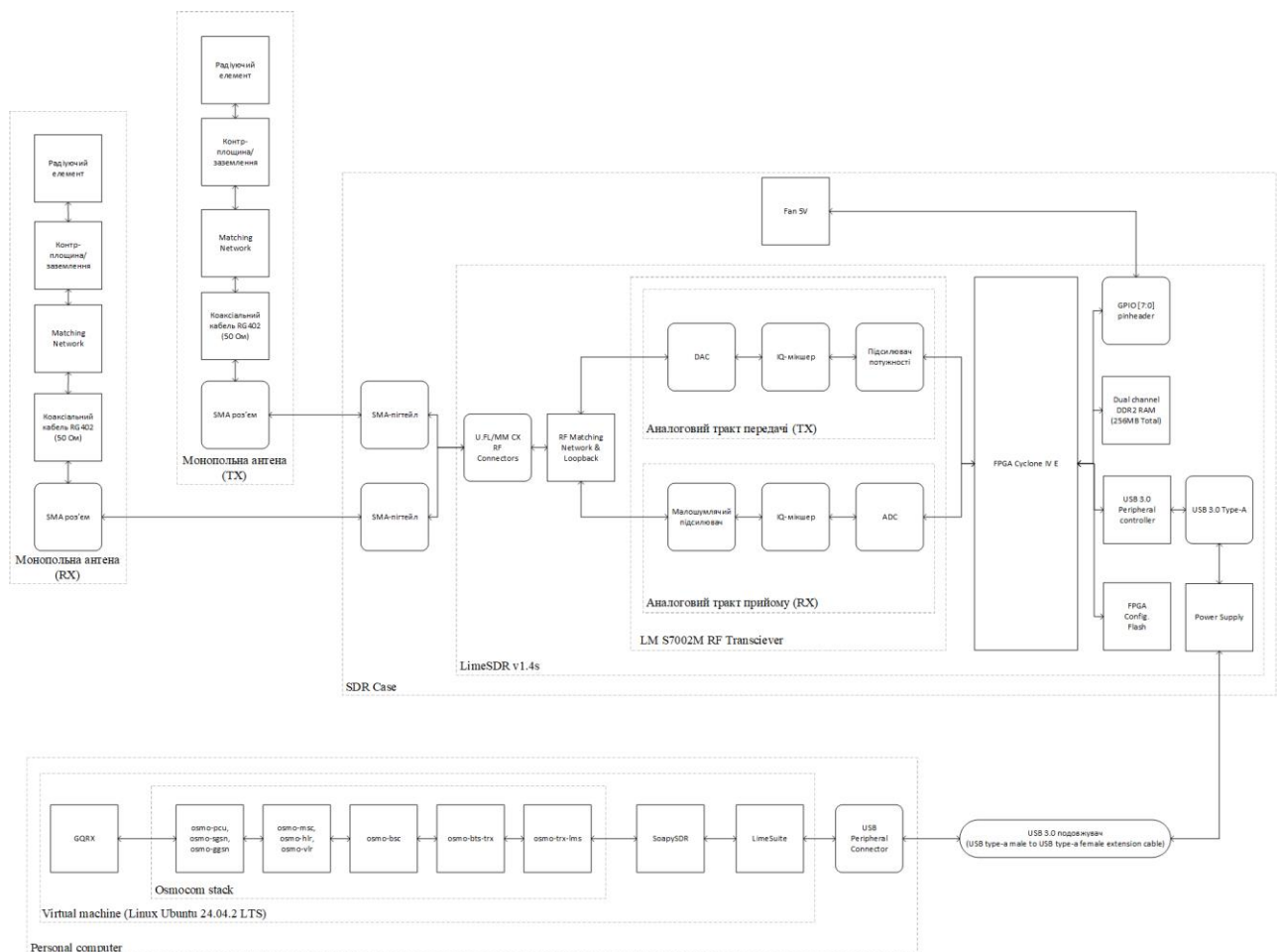


Рис. 1.5 - Структурна схема лабораторної базової станції мобільного зв'язку GSM на основі LimeSDR v1.4s

Мета схеми — показати, як від моменту формування IQ-семплів у ПК і до випромінення/приймання в ефірі GSM-сигнал проходить кожна логічна і фізична ланка, чому саме таке компонування забезпечує повнодуплексну роботу і які елементи критичні для якості та стабільності системи.

#### 2.4.1. Антенно-фідерна підсистема

Мета у GSM-1800 лабораторній станції обрати два незалежних тракти (передачі й прийому), щоб забезпечити максимальну ізоляцію (обрано варіант з двома антенами, а не одна через циркулятор) [20]. Це мінімізує самозбудження приймача від власного передавача, знижує рівень інтерференцій і покращує якість прийому слабких сигналів від мобільного терміналу (MS).

GSM1800 є FDD-системою, де TX і RX працюють одночасно на різних частотах. Використання двох антен мінімізує витік потужності від передавача до приймача, що критично для лабораторних умов, де потрібна висока якість сигналу.

Це рішення спрощує налаштування, оскільки не потребує додаткових пасивних компонентів, таких як циркулятори, які мають обмеження в ізоляції на частотах GSM1800.

Фізичне рознесення двох антен разом із контрплощинами/заземленнями дозволяє досягти ізоляції  $> 60$  дБ, що набагато перевищує можливості вузькосмугових циркуляторів ( $\sim 15\text{--}30$  дБ).

Використано монопольну, всеспрямовану, вертикально поляризовану антену під GSM-1800 (довжина близько  $\lambda/4 \approx 41.7$  мм у вільному просторі, або з урахуванням середовища близько 35 мм для резонансу). Кожна антена кріпиться над контрплощиною (заземленням), через SMA-пігтейл, далі – коаксіальний кабель RG402 ( $50 \Omega$ ) із мінімальними втратами та зручною механічною укладкою.

Між виходом/входом RF-трансивера і кабелем розміщується мережа узгодження (LC-елементи), яка компенсує невідповідність імпедансів (LMS7002M трансивер має внутрішні імпеданси, антена та кабель— $50 \Omega$ ).

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
|     |      |          |        |      |                           | 31   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Мережа узгодження налаштована так, щоб  $S_{11}$  (КСХ) у робочій смузі близько 1.8 ГГц була мінімальною ( $S_{11} < -15 \dots -20$  дБ у ідеалі модель, але практично  $-7 \dots -10$  дБ для виготовленої антени).

Монополь потребує заземлювальної площини чи екрану, щоб сформувати дзеркальне зображення радіючого елемента і забезпечити бажаний діаграму спрямованості (в горизонтальній площині—всенаправлена, у вертикальній—тороїдальна форма).

Для лабораторних експериментів із GSM важливо чисте розділення рівнів потужності: під час передачі BTS може виходити на десятки dBm, і навіть невеликий витік (через недостатню ізоляцію) може перевантажити LNA приймача.

Окремі антени дозволяють незалежно оптимізувати параметри узгодження (matching) для TX і RX елементів, а також простіше розташувати їх у просторі з мінімальним впливом одна на одну (відстань, орієнтація).

RF Matching Network між LMS7002M та кабельною лінією забезпечує коректне узгодження імпедансів, що мінімізує відбите випромінювання та запобігає сигналовим втратам ( $VSWR \approx 1.2$  або нижче). Водночас, корекція фазових зсувів допомагає оптимізувати передачу сигналу та підвищити якість зв'язку. Loopback використовується для калібрування або тестів self-test: передбачена резервна гілка повернення сигналу (loopback), що дозволяє FPGA або апаратним засобам тимчасово замикати сигнал TX назад на RX у контрольованих умовах. Це дає змогу перевірити баланс I/Q, рівень шуму та інші метричні параметри системи.

## 2.4.2 RF-трансивер LMS7002M

LMS7002M — це програмно-визначуваний радіочастотний трансивер від MugiadRF, який є серцевиною плати LimeSDR. Він відповідає за перетворення між аналоговими RF-сигналами та цифровими базбенд-сигналами, забезпечуючи зв'язок між антенами та FPGA.

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 32   |

Трансивер підтримує дві незалежні передавальні (TX) та приймальні (RX) лінії, що дозволяє одночасно працювати з uplink та downlink (2×2 MIMO: 2 TX, 2 RX канали) в архітектурі Zero-IF [25].

TX-канал реалізується наступним чином: LMS7002M приймає цифрові сигнали з FPGA, виконує апконверсію до радіочастоти (наприклад, 1805 МГц) і передає сигнал на TX-антену. Для RX-каналу LMS7002M приймає радіочастотні сигнали з RX-антени, виконує даунконверсію до базбенду та надсилає цифрові дані до FPGA для подальшої обробки. Завдяки двом незалежним RX- і TX-ланкам LMS7002M підтримує одночасну роботу з декількома каналами або MIMO-сценарії, хоча в нашому проєкті GSM-станції зазвичай використовуються по одному RX і одному TX каналу для кожної антени.

Частотний діапазон від приблизно 100 кГц до 3.8 ГГц, що охоплює GSM-діапазон 1800 МГц і надає запас для експериментів у ширших смугах. Смуга пропускання підтримує до  $\approx 61.44$  МГц базобендової смуги, що значно перевищує необхідні  $\sim 200$  кГц для одного GSM-каналу, але дає гнучкість для широкосмугових або багатоканальних досліджень. ADC/DAC розрядність 12 біт, що забезпечує достатню динаміку для роботи з GSM-сигналами у лабораторних умовах. Максимальна потужність передачі до близько 10 дБм на виході трансивера; у лабораторних застосуваннях часто знижують потужність через регуляторні й практичні міркування. Відсутність проміжної частоти спрощує схему, але вимагає ретельного калібрування DC-offset та I/Q-балансу для уникнення артефактів.

### 2.4.3 FPGA Cyclone IV E

**FPGA (Field-Programmable Gate Array, або програмована користувачем вентильна матриця)** — це напівпровідниковий пристрій, який можна перепрограмувати після виробництва для виконання різних цифрових логічних функцій.

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 33   |

FPGA є критичним компонентом LimeSDR, який виконує цифрову обробку сигналів. Вона реалізує функції фізичного рівня (Layer 1) GSM, такі як модуляція (GMSK), демодуляція, фільтрація та форматування бурстів [26].

Для TX-каналу FPGA отримує цифрові дані з Osmocom (через OsmoTRX), модулює їх за допомогою GMSK і готує для передачі. Це включає форматування бурстів відповідно до стандарту GSM, де кожен бурст триває 577 мкс і містить 148 біт. Для RX — FPGA приймає цифрові сигнали з RX-шляху, демодулює їх, виділяє бурсти та надсилає до OsmoTRX. Це включає синхронізацію з таймінгом GSM, який базується на мультiframeмах (51 фрейм для TCH, 26 для BCCH). FPGA застосовує цифрові фільтри, такі як Гільбертівський фільтр для квадратурної модуляції, для видалення шуму та інтерференцій.

LimeSDR USB v1.4s містить FPGA на базі Cyclone IV, який має достатню продуктивність для реального часу обробки сигналів GSM. FPGA програмується за допомогою інструментів LimeSuite, які надають готові конфігурації для GSM.

FPGA отримує сигнали від RX-шляху та надсилає сигнали до TX-шляху через LMS7002M та спілкується з програмним забезпеченням на PC через USB 3.0, передаючи дані до OsmoTRX.

#### 2.4.4 PC з VM Linux Ubuntu

Комп'ютер є центральним елементом лабораторної GSM-базової станції, забезпечуючи зв'язок з апаратним забезпеченням через USB 3.0 та запускаючи програмне забезпечення для керування мережею.

LimeSDR підключається до комп'ютера через USB 3.0, що забезпечує швидкість передачі даних до 5 Гбіт/с. Це критично для реального часу обробки радіосигналів у GSM, де потрібно передавати великі обсяги даних, такі як I/Q зразки для модуляції GMSK. USB 3.0 дозволяє уникнути затримок, які могли б виникнути при використанні USB 2.0, як у hackRF One, що обмежує продуктивність.

Використовується програмне забезпечення, таке як VirtualBox [30], для запуску Ubuntu (наприклад, версія 24.04.2 LTS) [31] на хост-системі Windows 10.

|            |             |                 |               |             |                           |             |
|------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|---------------------------|-------------|
|            |             |                 |               |             | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | <i>Лист</i> |
| <i>Зм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                           | 34          |

VM ізолює тестове середовище, що важливо для лабораторних досліджень, особливо якщо хост-ОС не підтримує безпосередньо Osmocom. Налаштування VM включає активацію USB 3.0 для прямого доступу LimeSDR до гостьової ОС, що забезпечує стабільну роботу.

GQRX - це програма для моніторингу та аналізу радіочастотного спектру, яка не є обов'язковою для роботи GSM-мережі, але корисна для налагодження. GQRX дозволяє візуалізувати сигнали, що передаються чи приймаються LimeSDR, перевіряти якість зв'язку та виявляти перешкоди. Наприклад, можна використовувати GQRX для перевірки, чи LimeSDR правильно передає сигнали на частотах GSM1800 (1710–1880 МГц).

LimeSuite є офіційним набором інструментів від Lime Microsystems для конфігурації та контролю LimeSDR [27]. Включає утиліти, такі як LimeUtil для оновлення прошивки, LimeQuickTest для тестування апаратного забезпечення та графічний інтерфейс для налаштування параметрів, таких як частота, потужність та смуга. LimeSuite необхідна для початкової конфігурації LimeSDR.

SoapySDR - апаратна абстракція, яка дозволяє різним SDR-пристроєм, включаючи LimeSDR, взаємодіяти через єдиний API [28]. OsmoTRX використовує SoapySDR для обміну даними з LimeSDR, що забезпечує гнучкість і можливість заміни апаратного забезпечення без значних змін у програмному коді. SoapySDR полегшує інтеграцію LimeSDR з Osmocom, забезпечуючи стандартний інтерфейс для передачі I/Q зразків.

Osmocom є відкритим програмним стеком, який реалізує всі необхідні функції GSM-мережі [29], дозволяючи створювати повноцінну лабораторну GSM-мережу.

OsmoTRX (osmo-trx-lms) - інтерфейс між LimeSDR та OsmoBTS, який обробляє фізичний шар (Layer 1) GSM-протоколу [34]. OsmoTRX використовує SoapySDR для взаємодії з LimeSDR, отримуючи цифрові сигнали від FPGA LimeSDR, обробляючи їх і передаючи до OsmoBTS через UDP.

OsmoBTS реалізує функції базової станції (BTS), керуючи повітряним інтерфейсом (Um) між базовою станцією та мобільними станціями [32]. Спілкується з OsmoTRX через UDP для обміну бурстами даних, а з OsmoBSC через інтерфейс Abis/IP.

OsmoBSC є контролером базової станції (BSC), який керує одним або кількома BTS та забезпечує зв'язок з MSC. OsmoBSC маршрутизує дані між BTS та MSC, керує рухомістю абонентів (handovers), балансує навантаження між BTS та виконує функції керування ресурсами [33]. Спілкується з OsmoBTS через Abis/IP та з OsmoMSC через A/IP.

OsmoMSC - мобільний комутаційний центр (MSC), який обробляє дзвінки, SMS та підключення до зовнішніх мереж (наприклад, PSTN). OsmoMSC маршрутизує дзвінки між абонентами, керує сеансами зв'язку та забезпечує доступ до інших мереж через інтерфейси, такі як E1/T1 або SIP.

HLR зберігає постійні дані абонентів (IMSI, MSISDN, ключі автентифікації), тоді як VLR зберігає тимчасові дані для абонентів, які перебувають у мережі. AUC генерує триплети автентифікації (RAND, SRES, Kc), які використовуються для автентифікації абонентів та шифрування зв'язку.

SGSN (Serving GPRS Support Node) керує рухомістю абонентів для пакетних даних, тоді як GGSN (Gateway GPRS Support Node) забезпечує доступ до інтернету через GPRS/EDGE.

Osmocom отримує дані від LimeSDR через OsmoTRX, який взаємодіє з FPGA через USB 3.0. Керує всією мережею, включаючи взаємодію з абонентами через повітряний інтерфейс Um.

### 3. ІНСТАЛЯЦІЯ ТА НАЛАШТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

У цьому розділі описано методичну інструкцію з розгортання лабораторної GSM-базової станції стандарту GSM із використанням програмно-визначуваного радіо LimeSDR і відкритого стека Osmocom.

Для забезпечення необхідного апаратного рівня обрано LimeSDR – універсальну SDR-платформу на базі чипа LMS7002M (2×2 MIMO), що підтримує спектр приблизно від 30 МГц до 3800 МГц [24]. LimeSDR володіє відкритим апаратним дизайном і порівняно невисокою вартістю, а також чудово інтегрується з LimeSuite (офіційний SDK від MyriadRF) і SoapySDR. Інструмент LimeSuiteGUI дає зручний графічний інтерфейс для налаштування параметрів SDR (частота, підсилення, фільтри тощо) під час роботи з LimeSDR (Рис. 3.1).

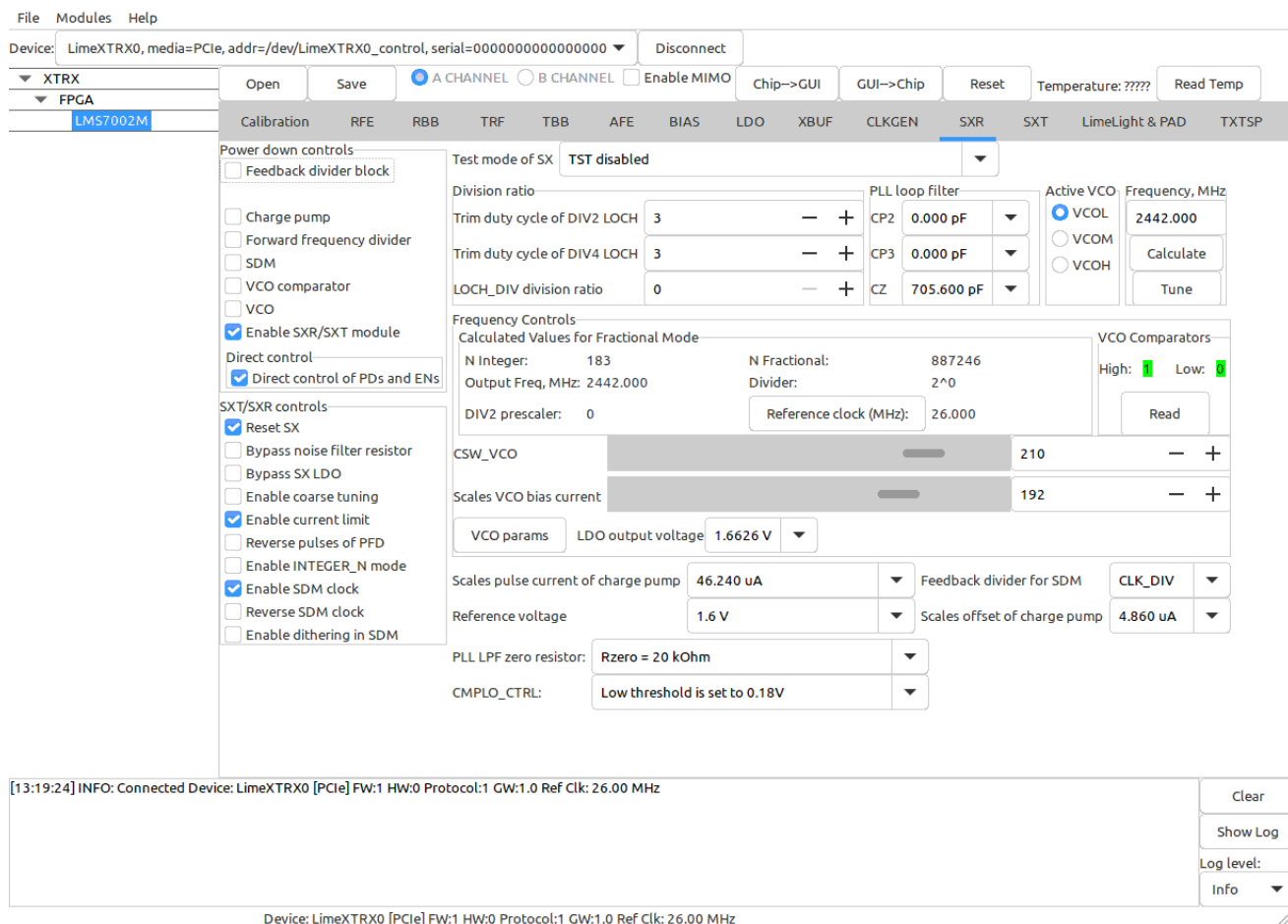


Рис. 3.1 – Вигляд інтерфейсу LimeSuiteGUI для керування LimeSDR

Фреймворк Osmocom (Open Source Mobile Communications) обрано за повний набір відкритих компонентів GSM: OsmoTRX – L1-трансивер для обробки сирих IQ-семплів від LimeSDR, OsmoBTS – обробка L2–L3 (BTS), OsmoBSC/OsmoNITB – контролер базових станцій (BSC) або «мережа в одній коробці» (NITB), OsmoMSC (з вбудованим VLR) – мобільний комутаційний центр, OsmoHLR – домашній реєстр і вузол автентифікації, OsmoPCU/OsmoSGSN/OsmoGGSN – за потреби для GPRS [29].



Рис. 3.2 - Деталізована блок-схема взаємодії компонентів Osmocom із LimeSDR

З наведеної блок схеми видно, що користувацький мобільний пристрій (MS) передає GMSK-сигнали у радіодіапазоні GSM (інтерфейс Um). LimeSDR (на схемі «SDR») приймає та надсилає сири IQ-семпли (Raw Samples) цієї радіохвилі. Ядро OsmoTRX отримує сири семпли від LimeSDR (через SoapySDR або LimeSuiteAPI), виконує GMSK-демодуляцію й упакування у GSM-кадри (TL1). Після демодуляції OsmoTRX передає “burst frames” (GSM-Tdma bursts) у вигляді UDP-пакетів до процесу OsmoBTS (на позиції «BTS»). OsmoBTS обробляє рівні L2–L3 базової станції і встановлює канал Abis (через сокети або IP-тунель) до контролера базових станцій (OsmoBSC). OsmoBSC керує розподілом радіоканалів, handover між BTS і передає дані далі до OsmoMSC (інтерфейс A). Якщо активовано GPRS, OsmoPCU (виконуючи роль мобільного GPRS-контролера) підключається до OsmoSGSN через інтерфейс Gb.

Ця архітектура дозволяє розгортати GSM-мережу в режимі “network-in-a-box” (OsmoNITB) [35] або розділено (окремі BSC, MSC, HLR) для кращого масштабування. Завдяки підтримці LimeSDR у Osmocom (компонент OsmoTRX-LMS) можна напряду використовувати SDR-плату без жодних додаткових апаратних конверторів.

### 3.1 Архітектура GSM-базової станції на основі LimeSDR та Osmocom

Завдяки підтримці LimeSDR у складі Osmocom (через osmo-trx-lms), можливо безпосередньо використовувати SDR-плату як радіоінтерфейс базової станції. Нижче на схемі показано типовий ланцюжок компонентів стека Osmocom, який використовується для розгортання BTS на базі LimeSDR:

#### Osmocom / LimeSDR BTS Architecture

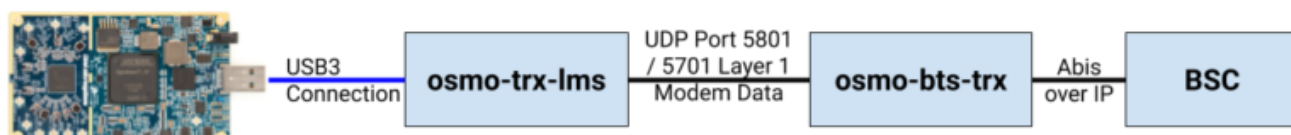


Рис. 3.3 - Спрощена блок-схема взаємодії компонентів Osmocom із LimeSDR

1. LimeSDR (LMS7002M) - це апаратна SDR-платформа, яка виконує роль фізичного інтерфейсу радіо (GSM-інтерфейс Um) [24][25]. Вона містить ADC/DAC, FPGA та RF-фронтенд, що дає змогу працювати у діапазоні GSM-800/900/1800/1900/UMTS. У нашому випадку LimeSDR посилає IQ-потік (GMSK символи) і приймає його від/до антени.

2. osmo-trx-lms - це програмний компонент Osmocom (Layer 1), який безпосередньо взаємодіє з LimeSDR через SoapySDR або LimeSuiteAPI. Він відповідає за: узгодження частоти і затримок, калібрування Q-I каналів, поділ кадрів TDMA на тимчасові слоти, формування/декодування фізичних GSM-кадрів (GMSK модуляція/демодуляція).

Іншими словами, osmo-trx-lms транслює «діджитал-радіо» (IQ) від LimeSDR у абстрактні GSM-кадри (Layer 1), доступні для вищих рівнів протоколу.

3. osmo-bts-trx - це наступний рівень (Layer 2–3), який реалізує логіку базової станції (BTS). Завданням osmo-bts-trx є: побудова LAPDm-з'єднання з мобільною станцією (MS), управління каналами радіоінтерфейсу (вибір ARFCN, timeslot), контроль рівня потужності (power control), обмін службовими повідомленнями (SDCCH, TCH) [34].

Після обробки GSM-кадрів (L1) osmo-bts-trx передає вже інкапсульовані кадри (через Abis протокол поверх IP) до контролера BTS.

4. BSC (Base Station Controller) - це контролер (Layer 3–4) для декількох BTS. Він виконує розподіл радіочастот між BTS, виконання handover між сусідніми BTS, передавання трафіку далі до MSC/VLR, координування каналів для GPRS (якщо задіяний PCU/SGSN).

У нашому випадку це може бути або окремий процес osmo-bsc, або комбайнований вузол osmo-nitb (Network-in-a-Box), який поєднує BSC та MSC/HLR в одному бінарному модулі.

### 3.2 Підготовка віртуального середовища

У цьому підпункті детально описано, як підготувати віртуальну машину (ВМ) під Ubuntu для подальшої установки SDR-стека Osmocom з LimeSDR. Буде розглянуто завантаження та інсталяцію VirtualBox, налаштування USB-контролера, вибір версії Ubuntu, встановлення ОС та перші кроки після інсталяції.

#### 3.2.1 Вибір та завантаження VirtualBox

VirtualBox від Oracle є безкоштовною, кросплатформенною віртуалізаційною системою [30], що підтримує роботу з USB-пристроями (усі версії USB), зручну інтеграцію з Windows і Linux, а також дозволяє створювати знімки (snapshots) ВМ. Саме тому VirtualBox є оптимальним вибором для лабораторних експериментів зі SDR.

Відкриємо браузер у Windows та перейдемо на сайт VirtualBox за посиланням: <https://www.virtualbox.org/wiki/Downloads>. Зі списку доступних дистрибутивів оберемо версію під нашу ОС (Windows hosts), на даний момент **VirtualBox 7.1.10 for Windows hosts** є найновішою версією, її і обираємо:



Рис. 3.4 -Фрагмент сторінки завантаження VirtualBox

Натиснемо посилання «Windows hosts» (у колонці “VirtualBox platform packages”); почнеться завантаження файла-інсталлятора формату .exe. Запустимо завантажений **файл VirtualBox-7.1.10-169112-Win.exe** подвійним кліком. У вікні «Welcome to the Oracle VM VirtualBox Setup Wizard» натиснемо **Next**. У наступному діалозі «Custom Setup» рекомендується залишити всі компоненти за замовчуванням (VirtualBox Application, USB Support, Networking, Python Support тощо) та натиснемо **Next**. У діалозі «Custom Setup – Create Shortcuts» натиснемо **Next** (можна створити ярлики на робочому столі). У діалозі «Warning: Network Interfaces» натиснемо **Yes**, підтвердивши установку мережевого адаптера VirtualBox (виробника «VirtualBox Host-Only Ethernet Adapter»). Це потрібно для зв’язку ВМ із хост-системою. У фінальному вікні натиснемо **Install** і дочекаємося завершення інсталяції.

Щоб VirtualBox міг працювати з пристроями USB 3.0 (до яких й належить LimeSDR), необхідно встановити **Extension Pack**. На тій самій сторінці завантаження VirtualBox знайдемо розділ «VirtualBox Extension Pack».

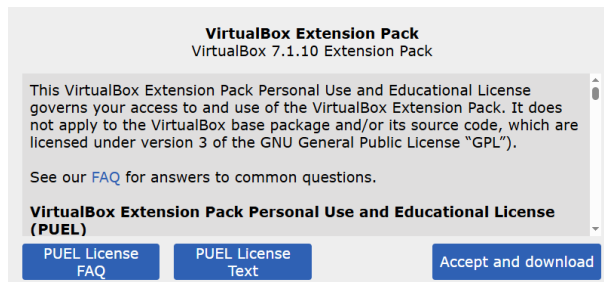


Рис. 3.5 -Фрагмент сторінки завантаження VirtualBox Extension Pack

Натиснемо посилання «All supported platforms» → завантажиться файл Oracle\_VirtualBox\_Extension\_Pack-7.1.10.vbox-extpack. Після завантаження у меню VirtualBox перейдемо у **File** → **Preferences**, далі ліворуч оберемо «Extensions». Натиснемо значок «+», вкажемо завантажений файл .vbox-extpack.

### 3.2.2 Завантаження образу Ubuntu

Для нашої ВМ обираємо Ubuntu 24.04.2 LTS через те, що це остання LTS-версія Ubuntu (підтримка до квітня 2029), яка вже включає сучасний стек бібліотек (GCC, OpenSSL, Python, тощо).

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
|     |      |          |        |      |                           | 41   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Osmocom-пакети та LimeSuite підтримують Ubuntu 24.04 у своїх офіційних PPA, що забезпечує стабільність і актуальні версії.

Для завантаження ISO-образу відкриємо браузер у Windows і перейдемо на сайт Ubuntu за посиланням <https://ubuntu.com/download/desktop>. Оберемо Ubuntu 24.04.2 LTS (натиснемо кнопку “Download”); [31] почнеться завантаження ubuntu-24.04.2-desktop-amd64.iso.

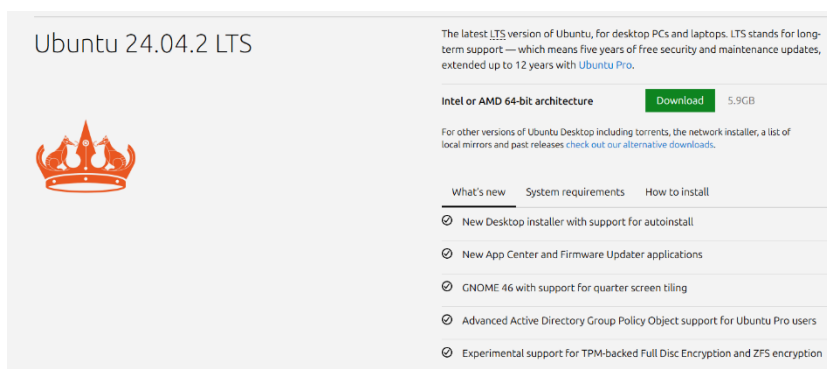


Рис. 3.6 -Фрагмент сторінки завантаження Ubuntu 24.04.2 LTS

### 3.2.3 Створення та налаштування ВМ у VirtualBox

Запустимо VirtualBox і створимо нову ВМ, в графі Name впишемо «Ubuntu-SDR». Натиснемо Next.

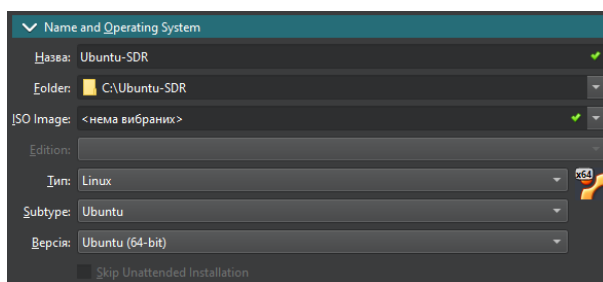


Рис. 3.7 -Розділ «Name and Operating System»

У полі «Memory size (MB)» оберіть 4096 MB (4 GB) або більше, залежно від доступного на хості. 4 GB – мінімум для плавної роботи з Osmocom. У полі «Processors» оберемо кількість потоків процесора, ставимо 8 потоків для оптимальної роботи. Натиснемо Next.

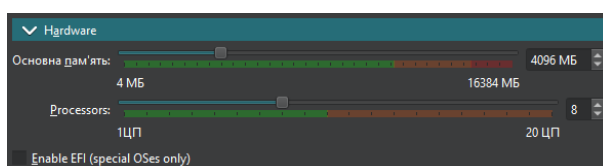


Рис. 3.8 -Розділ «Hardware»

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 42   |

У вікні «Hard Disk File Type and Variant» залиште VDI (VirtualBox Disk Image). У «File location and size» вкажемо розмір диска 30 GB (20 GB мінімум) та шлях до VDI.

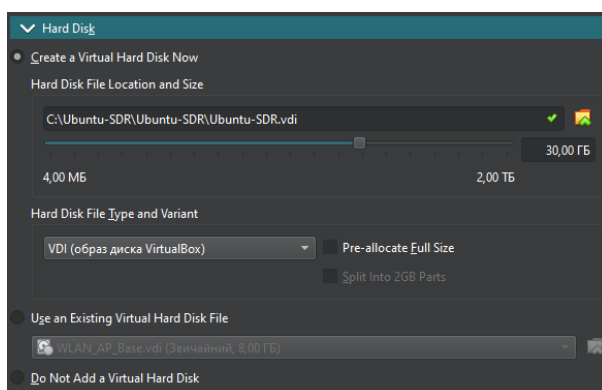


Рис. 3.9 -Розділ «Hard Disk»

Оберемо образ Ubuntu (ISO): у списку віртуальних машин ліворуч виділ «Ubuntu-SDR» натиснемо Settings (іконка шестерні). Перейдемо до розділу Storage. У блоці «Controller: IDE» натиснимо на порожній оптичний дисковод (позначку з CD-піктограмою), оберемо раніше збережений файл ubuntu-24.04.2-desktop-amd64.iso, під «Controller: IDE» мав з’явитися вибраний ISO.

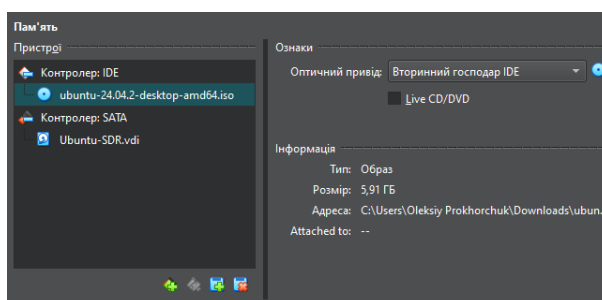


Рис. 3.10 -Обрання образу Ubuntu (ISO)

У групі «USB Device Filters» натиснемо на значок з плюсом ( «Add Filter From Device» ), зі списку оберемо LimeSDR-USB. Доданий фільтр гарантує, що VirtualBox автоматично «захоплюватиме» LimeSDR при підключенні. У групі «USB Controller» треба обрати USB 3.0 (xHCI) Controller. Цей пункт доступний лише після інсталяції відповідного Extension Pack і при правильному USB 3.0 контролері в хості.

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 43   |

### 3.2.4 Інсталяція Ubuntu 24.04 LTS

У головному вікні VirtualBox виберіть VM «Ubuntu-SDR» та натиснемо «Start». Дотримуємось інструкцій інсталлятора: вибір мови та розкладки клавіатури, тип інсталяції (Normal installation), встановлюємо оновлення та стороннє ПЗ, розмітку диска диска обираємо «Erase disk and install Ubuntu» (оскільки це віртуальний диск) та налаштувуємо обліковий запис користувача та пароля (ім'я облікового запису SDR, пароль – «sdr1234567890»).

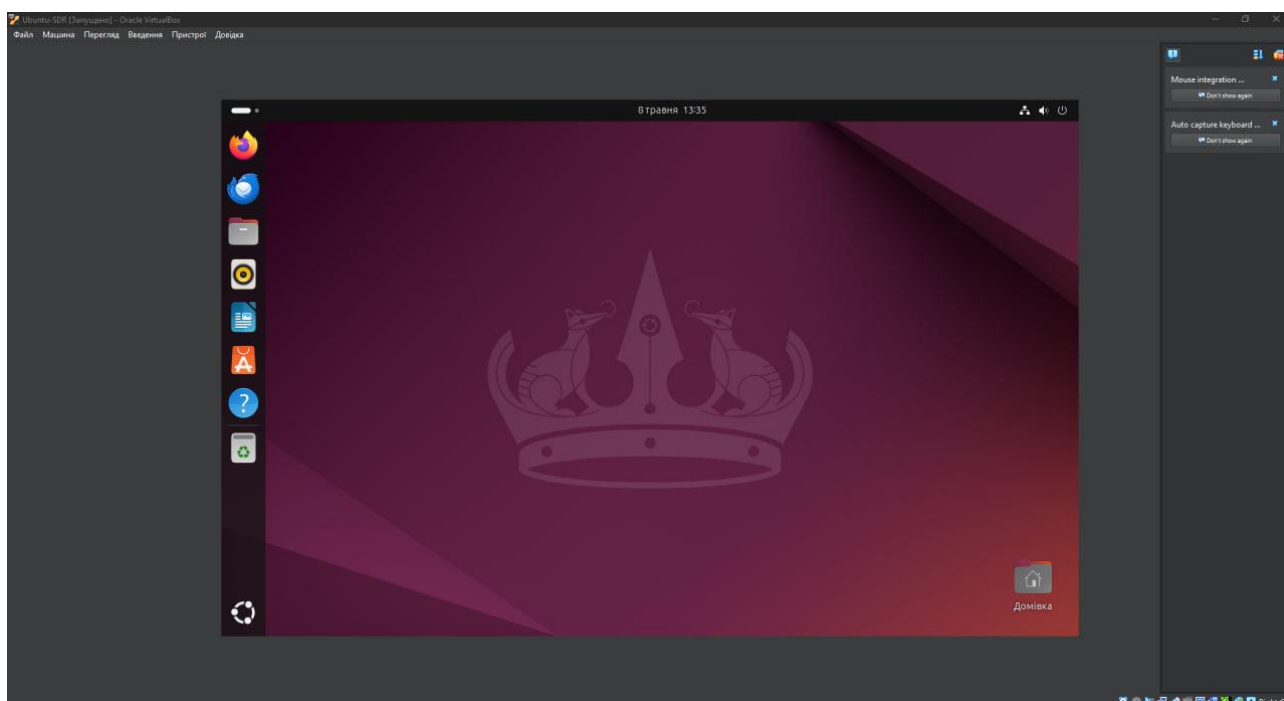


Рис. 3.11 – Вигляд віртуальної машини з встановленою Ubuntu

Після завершення інсталяції натиснемо **Restart Now**. Після перезавантаження вийміть ISO-образ з віртуального приводу: у меню VirtualBox перейдемо за шляхом **Devices > Optical Drives > Remove disk from virtual drive**. Запустимо знову нашу віртуальну машину.

### 3.3 Інсталяція LimeSuite і SoapySDR

Для налаштування та ефективної роботи з LimeSDR необхідно встановити два ключові програмні компоненти: LimeSuite та SoapySDR.

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 44   |

LimeSuite — це набір програмного забезпечення, який надає драйвери та інструменти для роботи з трансивером LMS7002M, що використовується в пристроях LimeSDR [27]. Він включає в себе графічний інтерфейс користувача (GUI) для налаштування параметрів пристрою, утиліти для оновлення прошивки та інші корисні інструменти.

SoapySDR — це абстрактний інтерфейс для роботи з різними SDR-пристроями. Він забезпечує уніфікований доступ до різних SDR через стандартний API [28], що дозволяє різним програмам взаємодіяти з різними SDR-пристроями без необхідності писати специфічний код для кожного з них.

Для встановлення цих компонентів на Ubuntu 24.04 LTS ми скористаємося PPA (Personal Package Archive) — це спеціальні репозиторії, які дозволяють розробникам поширювати свої програми та оновлення, які ще не включені в офіційні репозиторії Ubuntu. Додавши відповідний PPA, ми зможемо легко встановити та оновлювати необхідне програмне забезпечення за допомогою стандартних інструментів управління пакетами.

### 3.3.1 Встановлення LimeSuite через PPA

Для забезпечення сумісності та отримання останніх оновлень LimeSuite рекомендується використовувати офіційний PPA (Personal Package Archive) від Myriad-RF. Це дозволяє легко встановлювати та оновлювати необхідні пакети за допомогою стандартних інструментів управління пакетами Ubuntu.

```
sudo add-apt-repository ppa:myriadrf/drivers
```

```
sudo apt update
```

```
sudo apt install limesuite
```

```
sudo apt install limesuite-gui
```

```
sudo apt install limesuite-udev
```

Команда **add-apt-repository** додає PPA до списку джерел. Після цього команда **apt update** оновлює інформацію про пакети. Команда **apt install** використовується для встановлення основних компонентів LimeSuite.

Серед них є **limesuite**, що містить основну бібліотеку, **limesuite-udev**, який додає правила для USB-пристроїв, **limesuite-gui**, що забезпечує графічний інтерфейс для налаштування, та **limesuite-dev**, який містить файли, необхідні для розробки.

Після встановлення перевіримо, чи правильно встановлено LimeSuite:

**LimeUtil --info**

Ця команда виведе інформацію про встановлену версію LimeSuite та доступні пристрої.

```
sdr@SDR:~$ LimeUtil --info
#####
## LimeSuite information summary
#####

Version information:
  Library version:      v23.11.0-gb39cb61e
  Build timestamp:     2025-05-08
  Interface version:   v2023.11.0
  Binary interface:    23.11-1

System resources:
  Installation root:   /usr/local
  User home directory: /home/sdr
  App data directory:  /home/sdr/.local/share/LimeSuite
  Config directory:    /home/sdr/.limesuite
  Image search paths:
    - /home/sdr/.local/share/LimeSuite/images
    - /usr/local/share/LimeSuite/images

Supported connections:
  * FT601
  * FX3
  * PCIEXillybus

sdr@SDR:~$
```

Рис. 3.12 – Результат команди «LimeUtil –info» в терміналі Linux

У висновку видно, що LimeSuite встановлено правильно. Інформація про версію свідчить, що використовується бібліотека версії **v23.11.0**, яка є актуальною. Дата компіляції — **2025-05-08** — підтверджує, що збірка є дуже свіжою. Параметри **Interface version** та **Binary interface** збігаються, що вказує на сумісність компонентів. Щодо системних ресурсів, програма встановлена у каталог **/usr/local**, що є типовим шляхом для програм, інстальованих через PPA або зібраних із вихідних кодів. Дані **App data** та **Config directory** показують, що користувач **sdr** працює у своєму власному середовищі.

Підтримувані підключення включають інтерфейси **FT601**, **FX3** та **PCIE Xillybus**, які використовуються для роботи з різними моделями LimeSDR.

Наступна команда для перегляду всіх USB-пристроїв, підключених до системи:

```
lsusb
```

Наступна команда здійснить пошук підключених пристроїв LimeSDR.

```
LimeUtil --find
```

```
sdr@SDR:~$ lsusb
Bus 001 Device 001: ID 1d6b:0002 Linux Foundation 2.0 root hub
Bus 001 Device 002: ID 80ee:0021 VirtualBox USB Tablet
Bus 002 Device 001: ID 1d6b:0003 Linux Foundation 3.0 root hub
Bus 002 Device 002: ID 1d50:6108 OpenMoko, Inc. Myriad-RF LimeSDR
sdr@SDR:~$ LimeUtil --find
* [LimeSDR-USB, media=USB 3.0, module=FX3, addr=1d50:6108, serial=00090726074D2F32]

sdr@SDR:~$ █
```

Рис. 3.13 – Результати команд «lsusb» та «LimeUtil --find» в терміналі Linux

#### Пояснення результатів команди:

- ID 1d50:6108 — це USB-ідентифікатор пристрою LimeSDR.
- OpenMoko, Inc. Myriad-RF LimeSDR — система правильно розпізнала виробника та назву пристрою.
- Це означає, що віртуальна машина успішно бачить LimeSDR через USB (тобто USB forwarding у VirtualBox налаштовано правильно).
- LimeSDR-USB — знайдено пристрій типу LimeSDR-USB.
- media=USB 3.0 — підключено до USB 3.0, що добре (дає високу пропускну здатність).
- module=FX3 — це контролер Cypress FX3, який керує передачею даних.
- addr=1d50:6108 — той самий USB-ідентифікатор, що й у lsusb.
- serial=00090726074D2F32 — унікальний серійний номер пристрою.

Пристрій LimeSDR виявлений та відображений у списку. Плата підключена і розпізнана системою правильно. Підтверджено роботу USB-переадресації у VirtualBox.

Після встановлення можна запусити графічний інтерфейс командою:

**LimeSuiteGUI**

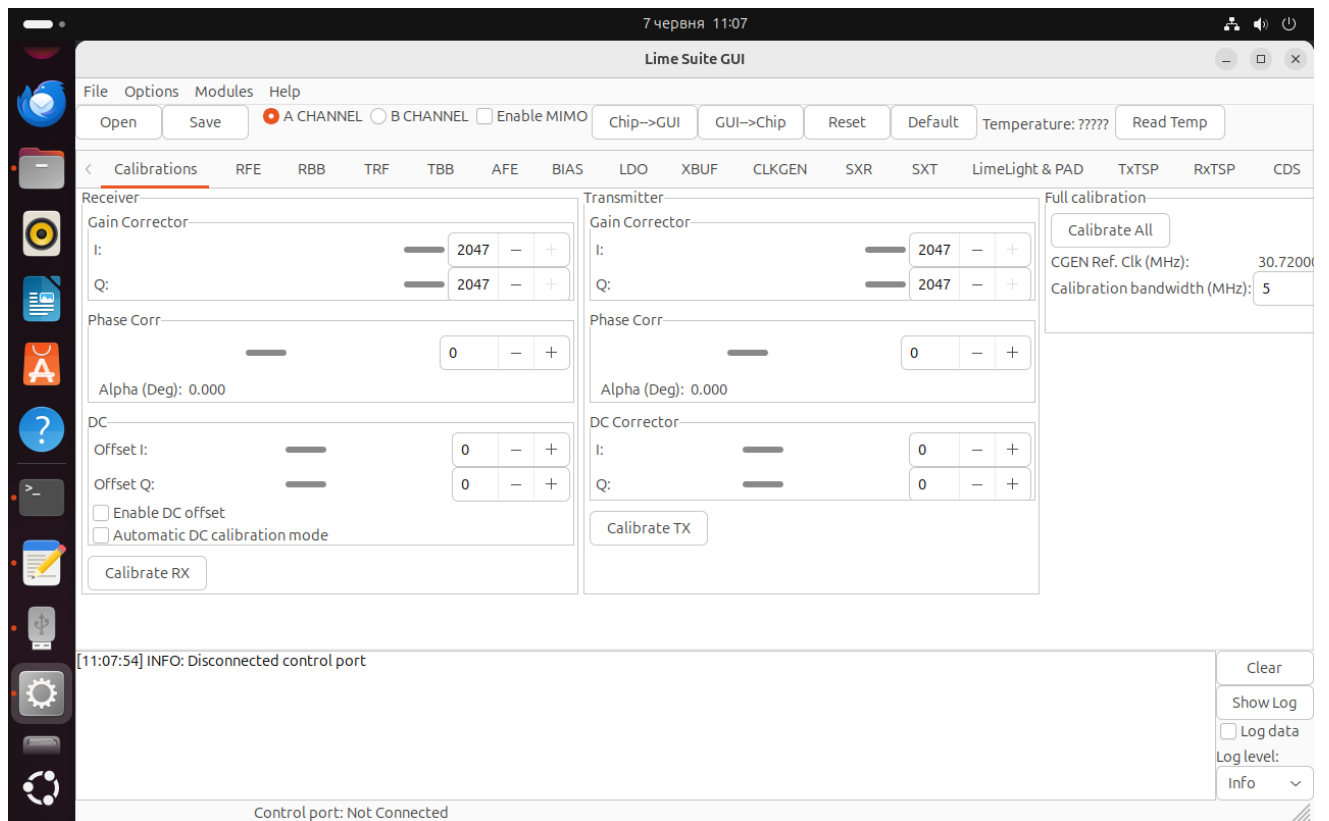


Рис. 3.14 – Результат команди «LimeSuiteGUI» в терміналі Linux

### 3.3.2 Встановлення SoapysDR

SoapysDR — це абстрактний інтерфейс для роботи з SDR-пристроями, який забезпечує сумісність між різними програмами та обладнанням [28].

Встановлення через APT:

```
sudo apt install soapysdr-tools libsoapysdr-dev python3-soapysdr
```

Команда **soapysdr-tools** включає утиліти для роботи з SoapysDR. Пакет **libsoapysdr-dev** містить файли, необхідні для розробки, а **python3-soapysdr** забезпечує обгортку для роботи з SoapysDR у середовищі Python 3.

Після встановлення цих компонентів можна перевірити наявність доступних SDR-пристроїв.

```
SoapySDRUtil --find
```

```
#####  
##      Soapy SDR -- the SDR abstraction library      ##  
#####  
  
[INFO] [UHD] linux; GNU C++ version 13.2.0; Boost_108300; UHD_4.6.0.0+ds1-5.1ubuntu0.24.04.1  
Found device 0  
  default_input = True  
  default_output = True  
  device_id = 0  
  driver = audio  
  label = Built-in Audio  
  
Found device 1  
  addr = 1d50:6108  
  driver = lime  
  label = LimeSDR-USB [USB 3.0] 90726074D2F32  
  media = USB 3.0  
  module = FX3  
  name = LimeSDR-USB  
  serial = 00090726074D2F32
```

Рис. 3.15 – Результат команди «SoapySDRUtil --find» в терміналі Linux

Рис. 3.15 демонструє вивід з консолі бібліотеки **Soapy SDR**, яка забезпечує універсальний інтерфейс для роботи з пристроями програмно визначеного радіо (SDR). Подано, що Soapy SDR сканує систему та знаходить підключені пристрої. У цьому виводі можна розрізнити два знайдених пристрої:

**1. Пристрій 0: Built-in Audio.** Цей запис вказує на вбудований аудіоінтерфейс вашої системи. Він показує, що Soapy SDR виявив аудіо-пристрій з параметрами за замовчуванням для вхідного та вихідного сигналу. Це типово для систем, де аудіоадаптери також "розглядаються" як пристрої звуку, хоча для налаштування GSM базової станції він не буде використовуватися.

**2. Пристрій 1: LimeSDR-USB.** Тут вивід підтверджує, що LimeSDR правильно підключено через USB 3.0.

Адреса **addr = 1d50:6108** є USB-ідентифікатором пристрою. Драйвер **driver = lime** вказує, що використовується спеціалізований драйвер для LimeSDR. Мітка **label = LimeSDR-USB [USB 3.0]** чітко ідентифікує пристрій. Модуль **module = FX3** означає, що для передачі даних використовується контролер FX3, що відповідає за високошвидкісний зв'язок через USB. Серійний номер **serial = 00090726074D2F32** дає унікальне підтвердження підключення пристрою.

У контексті налаштування базової станції мобільного зв'язку GSM цей вивід є дуже важливим, оскільки він засвідчує, що LimeSDR виявлено системою та готовий до роботи.

Наявність правильного драйвера та детальної інформації про електричні та програмні параметри пристрою дозволяє вам бути впевненим, що апаратна частина (тобто LimeSDR) налаштована належним чином для наступних кроків конфігурації GSM-системи.

### 3.4 Встановлення компонентів Osmocom

У цьому розділі детально розглянемо встановлення необхідних компонентів Osmocom для розгортання лабораторної GSM-базової станції з використанням LimeSDR.

Osmocom (Open Source Mobile Communications) — це проект з відкритим вихідним кодом, який надає повний стек протоколів для мобільної комунікації. Для побудови лабораторної GSM базової станції необхідно встановити ключові компоненти Osmocom: OsmoBSC (Base Station Controller), OsmoBTS (Base Transceiver Station), OsmoMSC (Mobile Switching Center) та інші [29].

Нижче наведена структурна схема, яка ілюструє ланцюг обробки даних від мобільного телефону до зовнішньої мережі:

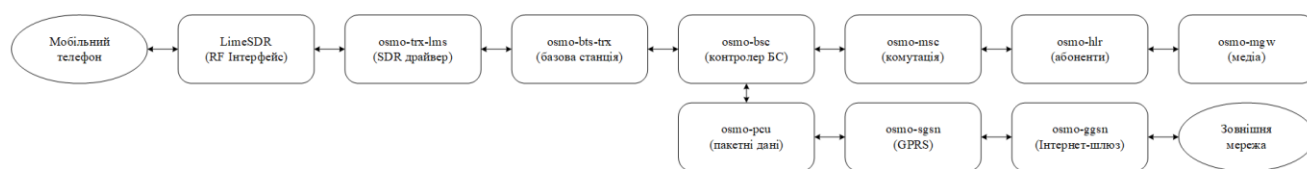


Рис. 3.16 - Структурна схема обробки даних від мобільного телефону до зовнішньої мережі

#### 1. Роль SDR у ланцюгу:

1) **LimeSDR (RF Інтерфейс)** виступає як апаратна частина, яка отримує аналогові сигнали від мобільного телефону та перетворює їх у цифровий формат. Саме завдяки SDR-підходу можна програмно змінювати діапазони частот, параметри модуляції та інші характеристики без потреби в спеціалізованому апаратному забезпеченні.

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 50   |

2) **osmo-trx-lms (SDR драйвер)** – модуль, який є прошарком між апаратурою LimeSDR та програмною частиною. Він відповідає за управління SDR-пристроєм, забезпечує ініціалізацію, налаштування частот, керування передачею і прийомом сигналів, а також перетворення їх у формат, придатний для подальшої обробки в системі Osmocom.

## 2. Обробка сигналів та базові функції GSM:

3) **osmo-bts-trx (Базова станція)** бере на себе реалізацію функцій базової станції, після отримання цифрових даних від драйвера. **Фізичний рівень (Layer 1)** виконує обробку сигналів, модулювання/демодуляція, формування/розбиття GSM-блоків. **Канальний рівень (Layer 2)** виконує забезпечення управління зв'язком між мобільним пристроєм і системою, контроль над передачею даних та синхронізація.

Таким чином, цей компонент перетворює цифрові дані у протокольні блоки GSM, що дозволяє встановити зв'язок з мобільними телефонами.

4) **osmo-bsc (Контролер базової станції)** виконує централізоване управління базовою станцією(ами). Він налаштовує параметри каналів, розподіляє радіресурси та координує процеси, пов'язані з викликами, хендоверами та іншими аспектами управління мережею. Він устальює зв'язок із базовою станцією через інтерфейс, забезпечуючи контроль як за фізичними, так і за логічними процесами обміну сигналами.

## 3. Інтеграція з ядром мережі:

5) **Інші мережеві компоненти** - після первинної обробки сигналів у компоненті osmo-bts-trx, інформація передається до інших елементів Osmocom, які реалізують функції повноцінної GSM мережі: **osmo-pcu** виконує обробку пакетних даних для мобільного зв'язку, **osmo-msc** забезпечує реалізація комутації дзвінків і організація передачі голосу, **osmo-hlr** виконує управління інформацією про абонентів (база даних абонентів), **osmo-ggsn / osmo-mgw** забезпечує доступ до зовнішніх мереж (наприклад, інтернет, мультимедіа), що дозволяє організувати обмін даними між мобільною мережею та зовнішнім світом.

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 51   |

Це дозволяє сформувати повноцінну екосистему, де дані від мобільного абонента (через LimeSDR та osmo-bts-trx) правильно маршрутизуються, обробляються і направляються до зовнішньої мережі через інтегровану систему управління.

Таким чином, Osmocom використовує SDR-технологію (через LimeSDR), що керується спеціалізованим драйвером (osmo-trx-lms), для реалізації функціоналу базової станції GSM.

Програмна частина (osmo-bts-trx, osmo-bsc тощо) відповідає за обробку сигналів за стандартами GSM, організовує керування радіоканалом, а решта мережних компонентів забезпечує повний спектр мережних функцій — від комутації дзвінків до управління абонентськими даними. Такий підхід дає змогу використовувати універсальне та гнучке SDR-обладнання для експериментальної та комерційної реалізації GSM мереж на основі відкритого програмного забезпечення.

Але перед встановленням компонентів Osmocom для розгортання лабораторної GSM-базової станції на основі LimeSDR необхідно підготувати систему. Це включає встановлення необхідних бібліотек та інструментів, які забезпечують коректну роботу та компіляцію компонентів.

```
sudo apt install -y libusb-1.0-0-dev libuhd-dev uhd-host cmake autoconf make  
libtool libtalloc-dev libgnutls28-dev libmnl-dev libsqlite3-dev libortp-dev libconfig++-  
dev libconfig-dev libmbedtls-dev
```

#### Пояснення кожного пакета:

- **libusb-1.0-0-dev** - Бібліотека для роботи з USB-пристроями в просторі користувача. Необхідна для взаємодії з LimeSDR через USB.
- **libuhd-dev** та **uhd-host** - Бібліотеки та утиліти для роботи з Universal Hardware Driver (UHD), який використовується для взаємодії з SDR-пристроями, такими як LimeSDR.
- **cmake, autoconf, make, libtool** - Інструменти для автоматизації процесу компіляції та встановлення програмного забезпечення з вихідного коду.

- **libtalloc-dev** - Бібліотека для управління пам'яттю, яка використовується в багатьох проектах, включаючи Osmocom.
- **libgnutls28-dev** - Бібліотека для реалізації криптографічних протоколів, таких як TLS.
- **libmnl-dev** - Бібліотека для роботи з Netlink-сокетами в Linux, які використовуються для комунікації між ядром та користувацьким простором.
- **libsqlite3-dev** - Бібліотека для роботи з базою даних SQLite, яка може використовуватися для зберігання конфігурацій та інших даних.
- **libortp-dev** - Бібліотека для реалізації протоколу RTP (Real-time Transport Protocol), який використовується для передачі аудіо та відео в реальному часі.
- **libconfig++-dev, libconfig-dev** - Бібліотеки для роботи з конфігураційними файлами у форматі libconfig.
- **libmbedtls-dev** - Легка криптографічна бібліотека, яка забезпечує реалізацію протоколів безпеки.

Ці пакети забезпечують всі необхідні залежності для компіляції та роботи компонентів Osmocom. Після їх встановлення система буде готова до подальшого налаштування та встановлення Osmocom-компонентів.

Також треба переконатися, що система має доступ до репозиторію Universe, який містить додаткові пакети програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом для Ubuntu.

```
sudo add-apt-repository universe
```

```
sudo apt update
```

Перша команда додає репозиторій Universe до списку джерел пакетів системи. Друга команда оновлює локальний кеш пакетів, завантажуючи інформацію про доступні пакети з усіх налаштованих репозиторіїв.

Основні компоненти Osmocom доступні в стандартних репозиторіях Ubuntu та можуть бути встановлені за допомогою стандартного менеджера пакетів APT.

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
|     |      |          |        |      |                           | 53   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

### 3.4.1 Базові компоненти мережі

Встановимо фундаментальні компоненти GSM інфраструктури:

```
sudo apt install osmo-bsc osmo-bts osmo-msc osmo-mgw osmo-hlr osmo-stp
```

Пояснення команди:

- **osmo-bsc** (Base Station Controller) — контролер базових станцій, який керує одним або кількома BTS та координує їх роботу
- **osmo-bts** (Base Transceiver Station) — базова станція, яка забезпечує радіоінтерфейс між мобільними телефонами та мережею
- **osmo-msc** (Mobile Switching Center) — мобільний комутаційний центр, який обробляє виклики та SMS
- **osmo-mgw** (Media Gateway) — медіа-шлюз для обробки голосових потоків між різними частинами мережі
- **osmo-hlr** (Home Location Register) — реєстр домашнього розташування, база даних абонентської інформації
- **osmo-stp** (Signaling Transfer Point) — точка передачі сигналізації для маршрутизації SS7 повідомлень

### 3.4.2 SDR-специфічні компоненти

Для роботи з программно-визначеними радіосистемами, зокрема LimeSDR, необхідні спеціалізовані компоненти:

```
sudo apt install osmo-trx-lms osmo-bts-trx
```

- **osmo-trx-lms** — драйвер для LimeSDR, який забезпечує пряме підключення до SDR обладнання та перетворює радіосигнали в UDP пакети
- **osmo-bts-trx** — версія базової станції, оптимізована для роботи з TRX інтерфейсом SDR пристроїв

### 3.4.3 Компоненти пакетних даних (GPRS/EDGE)

Для підтримки сучасних мобільних пристроїв та забезпечення передачі даних необхідні компоненти пакетної комутації:

```
sudo apt install osmo-pcu osmo-ggsn osmo-sgsn
```

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 54   |

- **osmo-pcu** (Packet Control Unit) — блок керування пакетами, забезпечує функціональність GPRS та EDGE.
- **osmo-ggsn** (Gateway GPRS Support Node) — шлюзовий вузол підтримки GPRS для підключення до зовнішніх мереж.
- **osmo-sgsn** (Serving GPRS Support Node) — обслуговуючий вузол GPRS для керування пакетними сесіями.

### 3.4.4 Перевірка встановлення

Після встановлення необхідно переконатися в коректності інсталяції всіх компонентів стеку Osmocom. Для цього виконаємо перевірку через CLI — кожна команда поверне версію, що вказує на успішну інсталяцію.

#### 1. Перевірка основних компонентів:

`osmo-bsc --version`

`osmo-bts-trx --version`

`osmo-msc --version`

`osmo-trx-lms --version`

#### 2. Перевірка додаткових компонентів:

`osmo-pcu --version`

`osmo-ggsn --version`

`osmo-hlr --version`

#### 3. Аналіз встановлених версій:

Перш ніж перейти до конкретних даних, варто зазначити, що актуальні версії компонентів – це не просто індикатор успішної інсталяції. Вони визначають сумісність між різними модулями мережі, гарантують підтримку сучасних протоколів (наприклад, GPRS, SS7/SIGTRAN), а також визначають наявність важливих виправлень безпеки та стабільності. Також позначення версій допомагає при подальшій розробці, масштабуванні та верифікації роботи системи.

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
|     |      |          |        |      |                           | 55   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

У таблиці (Табл. 3.1) нижче наведено зібрані результати команд `--version` для кожного компонента, це дозволяє порівняти їх зі схваленими версіями для Ubuntu 22.04.2 і зробити висновок щодо відповідності критеріям лабораторного середовища.

Табл. 3.1 – Аналіз встановлених версій

| Компонент   | Версія | Примітка   |
|-------------|--------|--|
| OsmoBSC     | 1.9.0  | Стабільна версія контролера GSM, містить сучасні Abis/SCCP-клієнти |
| OsmoBTS-TRX | 1.5.0  | Повна підтримка SDR, працює через osmo-trx-lms                     |
| OsmoMSC     | 1.9.0  | Також оброблює SMS та SS7  |
| OsmoTRX-LMS | 1.4.0  | Драйвер, оптимізований для LimeSDR                                 |
| OsmoPCU     | 1.1.0  | Забезпечує підтримку передачі даних GSM                            |
| OsmoGGSN    | 1.9.0  | Інтернет-шлюз для GPRS   |
| OsmoHLR     | 1.5.0  | Зберігає профілі абонентів та автентифікацію                       |

Ці версії достатньо актуальні для лабораторної роботи.

#### 4. Пріоритет компонентів:

1) **Критично необхідні (високий пріоритет)** - osmo-trx-lms, osmo-bts-trx, osmo-bsc, osmo-msc, osmo-hlr — фундамент роботи базової станції GSM з LimeSDR.

2) **Середній пріоритет** - osmo-pcu, osmo-ggsn — для передачі даних через GPRS; wireshark — інструмент для аналізу сигналів.

3) **Низький пріоритет** - kalibrate-rtl, osmo-python-tests, osmo-nitb — для додаткового тестування та швидкого налагодження.

Успішна перевірка версій підтверджує, що стек Osmocom було коректно встановлено. Система готова до подальших етапів, а саме до: налаштування конфігурацій, інтеграції з LimeSDR, запуску тестів реєстрації SIM, дзвінків, SMS і GPRS [29]. Це забезпечує реалістичну платформу для лабораторної GSM-базової станції.

### 3.4.5 Додаткові інструменти та утиліти

Для налагодження, тестування та моніторингу роботи системи:

```
sudo apt install osmo-python-tests python3-osmopy wireshark gqrx-sdr kalibrate-rtl
```

Пакети `osmo-python-tests` та `python3-osmopy` (версія 0.7.2) використовуються для автоматизованого тестування та інтеграції компонентів Osmocom, особливо в контексті GSM-стека. Програма `wireshark` (версія 3.4.6) - дозволяє проводити детальний аналіз мережевого трафіку, у тому числі сигналізації GSM. Програмне забезпечення `gqrx-sdr` (версія 2.12.0) - версія, яка забезпечує сучасний спектральний аналіз для роботи з SDR, зручний інтерфейс користувача і підтримку широкого діапазону пристроїв. Утиліта `kalibrate-rtl` (версія 0.5) використовується для калібрування RTL-SDR, що дозволяє визначити і компенсувати частотне зсування.

### 3.5 Запуск і тестування GSM-базової станції на LimeSDR

Для коректної роботи лабораторної GSM-базової станції на LimeSDR необхідно сформувати три основних файли конфігурації: `openbsc.cfg` (ядро мережі OsmoNITB), `osmo-bts.cfg` (BTS), `osmo-trx.cfg` (OsmoTRX-LMS).

Ці файли містять налаштування для GSM1800 (діапазон 1.8 ГГц) — обраний через менші інтерференції й кращу сумісність з антеною.

Для коректної роботи із GSM1800 необхідно точно вибрати ARFCN (канал) та обчислити відповідні частоти **uplink** і **downlink**. Для визначення частот Uplink і Downlink використовуються формули:

1. Формула для **Uplink (UL)** — передача від мобільного до базової станції:

$$f_{UL} = 1710.2 + 0.2 * (n - 512) \text{ МГц}$$

**1710.2 МГц** є нижньою межею Uplink для GSM1800, значення **0.2 МГц** є кроком між каналами, **(n - 512)** — відлік з початку діапазону (ARFCN починається з 512), діапазон ARFCN для GSM1800: **512–885**

2. Формула для **Downlink (DL)** — передача від базової станції до мобільного:

$$f_{DL} = f_{UL} + 95 \text{ МГц}$$

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 57   |

ARFCN (Absolute Radio Frequency Channel Number) — це унікальний індекс GSM-каналу, який відповідає конкретному частотному діапазону як для Uplink, так і для Downlink. Для ARFCN=600 (оптимальне рішення для лабораторної GSM1800-станції: центральна частота, стандартизована сумісність та ефективна робота з LimeSDR у дослідних умовах) :

$$f_{UL} = 1710.2 + 0.2 * 88 = 1727,8 \text{ МГц}$$

$$f_{DL} = 1727,8 + 95 = 1822,8 \text{ МГц}$$

Це чітко відповідає стандартним межам GSM1800: **1710–1785 МГц** для Uplink та **1805–1880 МГц** для Downlink [39].

### 3.5.1 Файл openbsc.cfg

У конфігураційному файлі openbsc.cfg описані базові мережеві параметри, ідентифікація абонентів, налаштування радіозв'язку та обмеження потужності [38]. Нижче наведено детальне пояснення кожного розділу і параметра:

```
network
network country code 901          # MCC - код країни (тестовий варіант, щоб не перетинатися з реальними мережами)
mobile network code 70           # MNC - ідентифікатор мережі (довільний)
short name TEST-DCS1800          # коротка назва мережі
long name TestNetwork1800        # повна назва мережі
auth policy accept-all           # дозволяє підключення будь-яких SIM (без аутентифікації)
encryption a5 0                  # виключає шифрування (для простоти налаштування)
bts 0
band GSM1800                      # частотний діапазон DCS 1800 (1.8 ГГц)
cell_identity 0                   # унікальний ідентифікатор клітини
location_area_code 1              # LAC - код області локації
base_station_id_code 63           # BSIC - ідентифікатор базової станції
ms max power 15                   # максимальна потужність мобільного пристрою (dBm)
ms power level 5                  # початковий рівень потужності MS
ip.access unit_id 1801 0          # ID для Abis/IP з'єднання з BTS
ip.access port 2900              # порт Abis/IP
trx 0
arfcn 600                          # ARFCN для GSM1800
nominal power 23                  # номінальна потужність передачі (dBm)
max_power_red 20                  # обмеження потужності (20 dB)
```

Рис. 3.17 - Файл openbsc.cfg

Розділ network задає загальні атрибути PLMN і політику безпеки. Тестовий MCC/MNC не конфліктує з операторами, авторизація та шифрування вимкнені для лабораторних умов.

Розділи **bts 0** та **trx 0** містять інформацію, де параметр **band** вказує на GSM1800. Значення **arfcn**, яке дорівнює 600, відповідає приблизно 1727.8 МГц для uplink та 1822.8 МГц для downlink згідно з наведеними формулами.

Показник **nominal power – max\_power\_red** дорівнює 3 dBm, що означає фактичну доступну потужність, достатню для короткого радіусу дії. Параметр **ms max power** обмежує потужність мобільного пристрою, щоб уникнути надмірного випромінювання.

### 3.5.2 Файл osmo-bts.cfg

Файл `osmo-bts.cfg` визначає ключові параметри роботи компоненту OsmoBTS, відповідального за функціонування базової станції GSM. Він містить як налаштування апаратного рівня (фізичного інтерфейсу SDR) [37], так і параметри зв'язку для забезпечення правильного обміну сигналами між пристроями і мережею. Нижче наведено детальне пояснення кожного розділу і параметра:

```

phy 0                # phy – фізичний інтерфейс SDR (0 – перший)
  instance 0         # instance – інстанція трансівера для цього phy
bts 0                # bts – основна секція базової станції
  band GSM1800       # встановлює діапазон DCS1800 (1.8 ГГц)
  ipa unit-id 1801 0 # унікальний ідентифікатор BTS (має збігатися з BSC)
  om1 remote-ip 127.0.0.1 # IP контролера OsmoNITB для Abis через UDP
trx 0                # блок trx для ARFCN-каналу
  phy 0 instance 0   # зв'язок з обраним фізичним інтерфейсом
osmotrx ip local 127.0.0.1 # локальна IP-адреса для OsmoTRX-LMS
osmotrx ip remote 127.0.0.1 # віддалена IP-адреса (localhost у тестовій VM)
osmotrx rx-gain 40    # rx-gain – коефіцієнт підсилення прийому у dB
osmotrx tx-attenuation 50 # tx-attenuation – зменшення потужності передачі, dB

```

Рис. 3.18 - Файл `osmo-bts.cfg`

**1. phy 0** вказує, що базова станція використовуватиме фізичний інтерфейс SDR із індексом 0. Якщо в системі підключено кілька SDR-пристроїв, нумерація (0, 1, 2, ...) дозволяє вибрати потрібний.

**2. instance 0** вказує на першу інстанцію трансівера, що працює на цьому фізичному інтерфейсі. У деяких пристроях SDR може бути кілька трансіверів, і ця команда вибирає потрібну логічну частину (інстанцію).

**3. bts 0** створює секцію конфігурації для першої базової станції (BTS із індексом 0). Це дає можливість у системі розгорнути кілька BTS, проте в даному прикладі використовується лише один.

4. **band GSM1800** встановлює частотний діапазон, який буде використовуватись. GSM1800 (DCS1800) відповідає діапазону приблизно 1710–1880 МГц (часто центральне значення ~1.8 ГГц).

5. **ipa unit-id 1801 0** встановлює унікальний ідентифікатор BTS: 1801 — основне значення, яке ідентифікує конкретну базову станцію, 0 — може вказувати на тип або додаткову інстанцію. Значення має відповідати налаштуванням мережевого контролера (BSC), щоб забезпечити коректну маршрутизацію сигналізації між BTS та іншими елементами мережі.

6. **oml remote-ip 127.0.0.1** вказує IP-адресу віддаленого контролера (наприклад, OsmoNITB), через який здійснюється зв'язок по протоколу Abis (з використанням UDP). Значення 127.0.0.1 свідчить про локальну (loopback) адресу, що часто використовується в тестових або віртуалізованих середовищах.

7. **trx 0** створює секцію конфігурації для першого трансівера (каналу передачі ARFCN). ARFCN (Absolute Radio Frequency Channel Number) визначає конкретний канал у GSM-системі.

8. **phy 0 instance 0** вказує, що трансівер повинен працювати через фізичний інтерфейс, заданий раніше як phy 0 із інстанцією 0. Це забезпечує узгодження між логічним каналом (trx) і апаратною частиною (SDR).

9. **osmotrx ip local 127.0.0.1** встановлює локальну IP-адресу для взаємодії з OsmoTRX-LMS, компонентом, що управляє SDR-пристроєм (наприклад, LimeSDR).

10. **osmotrx ip remote 127.0.0.1** аналогічно, задає віддалену IP-адресу для зв'язку з OsmoTRX-LMS. Використання адреси 127.0.0.1 вказує на тестове середовище або роботу в межах одного комп'ютера (наприклад, у віртуальній машині).

11. **osmotrx rx-gain 40** визначає коефіцієнт підсилення прийому. Значення 40 dB означає, що сигнал, отриманий SDR, підсилюється за формулою:

$$G(dB) = 10 * \log_{10}\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)$$

У цьому випадку, 40 dB відповідає співвідношенню потужностей:

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
|     |      |          |        |      |                           | 60   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = 10^{\frac{40}{10}} = 10000$$

Тобто вихідна потужність сигналу в 10 000 разів перевищує вхідну, що є важливим параметром при роботі зі слабкими RF-сигналами.

**12. osmotrx tx-attenuation 50** встановлює ступінь ослаблення потужності передачі. Значення 50 dB застосовується для зменшення вихідної потужності, що допомагає запобігти перешкодам та забезпечити відповідність регуляторним вимогам.

Розрахунок ослаблення задається формулою:

$$A(dB) = 10 * \log_{10}\left(\frac{P_{in}}{P_{out}}\right)$$

Якщо вхідна потужність дорівнює  $P_{in}$ , то вихідна буде:

$$P_{out} = \frac{P_{in}}{10^5} \text{ (оскільки } 50 \text{ dB} = 10 * \log_{10}(10^5))$$

Значення 50 dB означає, що вихідна потужність знижується у 100 000 разів, що є критичним для контролю вихідної потужності в тестових умовах [40].

### 3.5.3 Файл osmo-trx.cfg

Зробимо детальний розбір файлу конфігурації **osmo-trx.cfg** для підсистеми **OsmoTRX-LMS**. Цей файл відповідає за встановлення мережевих, часових та апаратних параметрів, які дозволяють управляти SDR-пристроєм для реалізації функцій базової станції.

```

trx                # Початок секції налаштувань TRX-модуля (управління SDR-пристроєм)
bind-ip 127.0.0.1  # Локальна IP-адреса для прослуховування вхідних мережевих з'єднань (loopback для тестування)
remote-ip 127.0.0.1 # IP-адреса віддаленого вузла для обміну даними (також loopback)
base-port 5700     # Базовий порт для мережевої взаємодії; для багатьох каналів нумерація може додаватись до базового значення

tx-sps 4           # Кількість вибірок на символ для передачі (Oversampling: 4 вибірки на GSM символ)
rx-sps 4           # Кількість вибірок на символ для прийому (Oversampling: 4 вибірки на GSM символ)
rt-prio 18         # Пріоритет потоків реального часу (чим вищий пріоритет, тим швидше обробляються часові завдання)

chan 0             # Початок конфігурації першого (0-го) ARFCN-каналу
tx-path BAND1     # Шлях передачі: використання режиму BAND1 (оптимізований фільтр/ланцюг для передачі)
rx-path LNAW      # Шлях прийому: використання LNAW (низькошумовий підсилювач для забезпечення високої чутливості)

```

Рис. 3.19 - Файл osmo-trx.cfg

**1.** Рядок **trx** починає секцію конфігурації для TRX-модуля, який у рамках OsmoTRX-LMS забезпечує управління роботою SDR-пристрою. Усі наступні параметри (мережеві, часові та для каналів) групуються всередині цього блоку.

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
|     |      |          |        |      |                           | 61   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

**2. bind-ip 127.0.0.1** встановлює локальну IP-адресу, на якій OsmoTRX-LMS «слухає» вхідні мережеві з'єднання. Використання 127.0.0.1 означає роботу у режимі loopback, що зручно для тестування або роботи у віртуальному середовищі.

**3. remote-ip 127.0.0.1** вказує IP-адресу пірингового (віддаленого) вузла, з яким здійснюється обмін даними.

**4. base-port 5700** задає базовий номер порту для мережевої взаємодії. У разі наявності декількох каналів або різних потоків даних до базового значення додається індексація. Наприклад, для каналу 0 порт може використовуватися як 5700, а для іншого — 5701 і т.д.

**5. tx-sps 4** визначає кількість вибірок (samples per symbol) для передавального ланцюга. Якщо стандартна швидкість символів GSM  $f_{symbol}$  приблизно 270833 символів/с, тоді:

$$f_{rx} = 4 * f_{symbol} = 4 * 270833 \approx 1,083 \text{ МГц},$$

де  $f_{rx}$  — це частота дискретизації приймального ланцюга, тобто кількість вибірок, яку приймач обробляє за секунду,  $f_{symbol}$  — швидкість символів GSM.

Це забезпечує овердоплінг, що допомагає цифровій обробці сигналу здійснювати фільтрацію та модуляцію з більшою точністю.

**6. rx-sps 4** аналогічно до **tx-sps**, визначає кількість вибірок на символ для приймального ланцюга. Під час прийому система також отримує 4 вибірки на кожен символ, що дає аналогічний коефіцієнт овердоплінгу, формула така ж як і при розборі «**tx-sps 4**».

**7. rt-prio 18** встановлює пріоритет виконання потоків реального часу. Значення **18** означає, що даний процес отримає досить високий пріоритет у планувальнику ОС (наприклад, у політиках SCHED\_FIFO або SCHED\_RR в Linux, де значення пріоритету може варіюватися від 1 до 99). Це критично для своєчасної обробки сигналів, де затримки можуть призвести до втрати даних або зниження якості зв'язку.

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 62   |

**8. chan 0** починає секцію, що налаштовує конкретний канал (у цьому випадку канал з індексом 0). У системі може бути декілька каналів, кожен з яких має свої параметри для передачі та прийому.

**9. tx-path BAND1** вказує маршрут для передачі сигналу. Параметр **BAND1** означає, що для передачі використовується певна апаратна або програмна схема обробки, оптимізована для роботи у відповідному частотному діапазоні. Це може стосуватися як вибору фільтра, так і режиму роботи підсилювачів.

**10. rx-path LNAW** вказує маршрут для прийому сигналу. **LNAW** вказує на використання широкосмугового варіанту низькошумового підсилювача (Low Noise Amplifier), що дозволяє забезпечити високий коефіцієнт підсилення при збереженні низького рівня шуму.

### 3.5.4 Запуск осередків стека

Після налаштування конфігураційних файлів:

- `/etc/osmocom/openbsc.cfg` — для ядра GSM (BSC, MSC, HLR),
  - `/etc/osmocom/osmo-bts.cfg` — для базової станції,
  - `/etc/osmocom/osmo-trx.cfg` — для трансивера (LimeSDR через `osmo-trx-lms`),
- необхідно послідовно запустити три процеси, що складають стек GSM-системи: `osmo-trx-lms`, `osmo-bts-trx`, `osmo-nitb`.

#### 1. Ініціалізація трансивера (OsmoTRX-LMS):

```
osmo-trx-lms -c /etc/osmocom/osmo-trx.cfg
```

Маємо наступний вивід в консолі:

```
DLGLOBAL telnet_interface.c: telnet at 127.0.0.1 4237
DLCTRL ctrl_if.c: CTRL at 127.0.0.1 4236
DMAIN trx_main.c: setting SCHED_RR priority 18
DDEV lms.cpp: Opening LMS device...
Devices found: 1 (serial = 00090726074D2F32)
```

Рис. 3.20 – Лог запуску OsmoTRX для LimeSDR

Відбулося успішне відкриття інтерфейсів керування через `telnet_interface` та `CTRL`. Використання `SCHED_RR priority 18` означає, що процесу призначено `real-time` пріоритет, що важливо для стабільної обробки сигналів у реальному часі.

Відбулося підключення до SDR, що свідчить про готовність системи до обробки Uu-пакетів, а також правильне налаштування частоти дискретизації з параметрами tx-sps 4 та rx-sps 4. В результаті відкриття керівних інтерфейсів і узгодження параметрів забезпечується коректне функціонування базової станції GSM.

## 2. Запуск програмної базової станції (OsmoBTS-TRX):

```
osmo-bts-trx -c /etc/osmocom/osmo-bts.cfg
```

Отримаємо наступні результати:

```
BTS/TRX 0: Opened transceiver  
pcu_sock: connected to BSC at 127.0.0.1:2900  
abis_ip: starting Abis/IP link to BSC
```

Рис. 3.21 – Лог ініціалізації OsmoBTS-TRX та з'єднання з BSC

Маємо підтвердження зв'язку між TRX і BTS, бачимо встановлення UDP-каналу до BSC. Це сигналізує, що BTS з'єдналася з ядром GSM через інтерфейс Abis/IP.

## 3. Активація ядра мережі (OsmoNITB):

```
osmo-nitb -c /etc/osmocom/openbsc.cfg
```

Отримаємо наступний вивід:

```
Input/ipa.c: accepted new link from BTS/TRX on ARFCN 600  
osmo_bsc_main.c: bootstrapping RSL for BTS/TRX (1/0) on ARFCN=600 ...
```

Рис. 3.22 – Лог запуску OsmoNITB та реєстрації BTS

Маємо підтвердження прийняття BTS-зв'язку по Abis та ініціалізацію каналів обміну RSL (Radio Signalling Link).

## 4. Висновки запуску стека:

У цьому підрозділі було здійснено послідовний запуск трьох ключових компонентів лабораторної GSM-мережі на базі LimeSDR — **osmo-trx-lms**, **osmo-bts-trx** та **osmo-nitb**, із використанням конфігураційних файлів **osmo-trx.cfg**, **osmo-bts.cfg** та **openbsc.cfg**. Метою було забезпечити працездатність стеку GSM у середовищі Ubuntu VM.

**1. Ініціалізація SDR-трансивера** шляхом запуску osmo-trx-lms підтвердила успішне підключення до пристрою, встановлення параметрів частоти дискретизації та відкриття каналів керування. Логічні індикатори («telnet\_interface», «SCHED\_RR priority» та «Opening LMS device») свідчать, що фізичний рівень (Layer 1) готовий до подальшої обробки GSM-сигналів.

**2. Запуск програмної BTS (osmo-bts-trx)** зчитав і відкрив трансивер, встановив зв'язок з ядром BSC по Abis/IP. Це підтверджується рядками «Opened transceiver», «connected to BSC», «starting Abis/IP link», що демонструють коректну взаємодію між радіоінтерфейсом і контролером.

**3. Активізація ядра мережі (osmo-nitb)** забезпечила заведення BSC, MSC, HLR одночасно. Логові повідомлення «accepted new link from BTS/TRX» і «bootstrapping RSL ... on ARFCN=600» підтвердили прийняття BTS-з'єднання та готовність смуги 1800 МГц (ARFCN 600) до обслуговування абонентів.

### 3.5.5 Тестування роботи базової станції

Проведемо тестування лабораторної базової станції GSM, побудованої на основі LimeSDR з використанням програмного забезпечення Osmocom, зокрема компонентів osmo-trx-lms, osmo-bts-trx та osmo-nitb.

Тестування проводилося в середовищі віртуальної машини Ubuntu з метою підтвердження працездатності стеку GSM. У цьому пункті описано методологію тестування, використані інструменти, результати та висновки.

Метою тестування є перевірка ключових функцій базової станції GSM, зокрема коректність трансляції радіосигналу на заданій частоті, можливість реєстрації мобільних пристроїв у мережі та успішне встановлення голосових викликів між зареєстрованими абонентами.

До апаратного забезпечення, яке ми використовували, належить: SDR-пристрій для трансляції та прийому GSM-сигналів, віртуальна машина з операційною системою Ubuntu для запуску програмного забезпечення Osmocom, два тестових телефони з підтримкою 2G і SIM-картами, налаштованими для лабораторної мережі та антени підключені до LimeSDR.

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 65   |

До програмного забезпечення відносяться Osmocom компоненти (osmo-trx-lms, osmo-bts-trx, osmo-nitb, налаштовані через конфігураційні файли osmo-trx.cfg, osmo-bts.cfg та openbsc.cfg) та програма GQRX.

Для перевірки трансляції сигналу базової станції використовувалася SDR-програма для сканування частотного діапазону GSM. Запустимо GQRX, налаштуємо частоту, на якій працює базова станція, відповідно до конфігурації osmo-trx.cfg, перевіримо наявність сигналу з відповідною амплітудою.

Сигнал було виявлено на частоті 1800 МГц, що підтверджує правильну роботу LimeSDR і osmo-trx-lms. Знімок екрана SDR-програми GQRX представлено на Рис. 3.23:

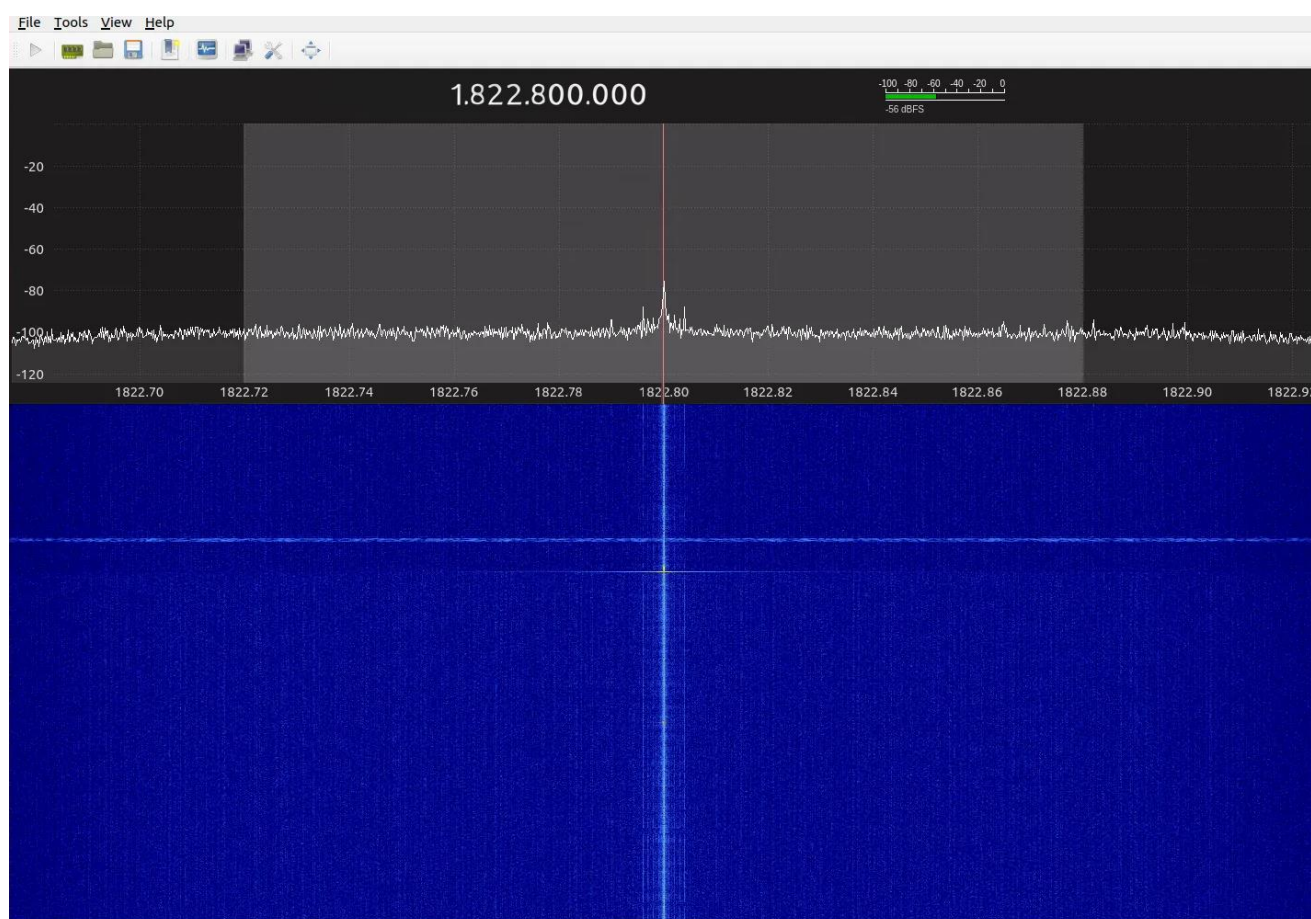


Рис. 3.23 - Сигнал базової станції на частоті 1800 МГц

Перевірка здатності мобільних пристроїв виявляти та реєструватися на базовій станції. Налаштуємо SIM-карти для роботи з лабораторною мережею через osmo-nitb. Увімкнемо два GSM-телефони та перевірмо, чи вони виявляють мережу.

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 66   |

Зареєструємо телефони в мережі та перевіримо статус через лог-файли osmonitb. Обидва телефони успішно зареєструвалися (Телефон 2 на 3 хвилини пізніше за Телефон 1).

Перевірка можливості здійснення голосових викликів через базову станцію. Використаємо два зареєстрованих телефони. Здійснимо виклик з Телефону 1 на Телефон 2. Оцінимо якість звуку та стабільність з'єднання. Виклик тривав 7 хвилин, звук був чітким, з'єднання стабільним.

|            |             |                 |               |             |                           |      |
|------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|---------------------------|------|
|            |             |                 |               |             | <b>РС11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
|            |             |                 |               |             |                           | 67   |
| <i>Зм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                           |      |

## 4. ПРОЄКТУВАННЯ АНТЕНИ ДЛЯ МОБІЛЬНОЇ БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ

### 4.1. Базові поняття про антену та її роль у SDR

Антенa – радіотехнічний пристрій для приймання і передавання електромагнітних хвиль. Передавальна антенa перетворює електричний струм РЧ-сигналу на відповідну електромагнітну хвилю, а приймальна – навпаки, перетворює прийняту хвилю на електричні коливання. У SDR (Software-Defined Radio) системах антенa є кінцевим елементом радіочастотного тракту: вона отримує сигнал від ЦАП/усилювача і випромінює його у простір, або приймає зовнішній сигнал і подає його на АЦП/підсилювач. Основні характеристики антени включають резонансну частоту, робочу смугу, вхідний імпеданс і коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ) в лінії живлення [41].

Головна розрахункова залежність для резонансної довжини моноядерної антени (монополя) – чвертьхвильова:

$$L_{рез} \approx \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f},$$

де  $c$  – швидкість світла у вакуумі,  $f$  – робоча частота. На цій довжині виникають стоячі хвилі струму й напруги, забезпечуючи максимум випромінювальної потужності. Фактично, довжина  $L$  антени перебуває в межах декількох десятків міліметрів для ГГц-діапазонів.

Наприклад, у ситуації проектування для GSM1800 (DCS-1800: 1710–1785 МГц uplink, 1805–1880 МГц downlink) теоретична довжина чверть хвилі при  $f \approx 1,8$  ГГц складає:

$$L_{рез} = \frac{c}{4 * 1.8 * 10^9} \approx 41.7 \text{ мм}$$

На практиці з урахуванням паразитних ефектів (коаксіального фідера, власної довжини елемента) та для деякого узгодження довжину вибрали 35 мм (ідеальний розрахунок дав 35,25 мм).

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>РС11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 68   |

Поляризація простору, спрямованість та кут розкриття антени формуються її конструкцією. Зокрема, вертикальний монополь має циліндричну (всенаправлену) ДН уздовж горизонтальної площини і нульові випромінювані над і під антеною. На ілюстраціях наведено типовий вигляд ДН: горизонтальний переріз є майже колом (ізотропна у горизонтальній площині), а вертикальний переріз – «вісімкаю» з нулями у напрямі осі антени.

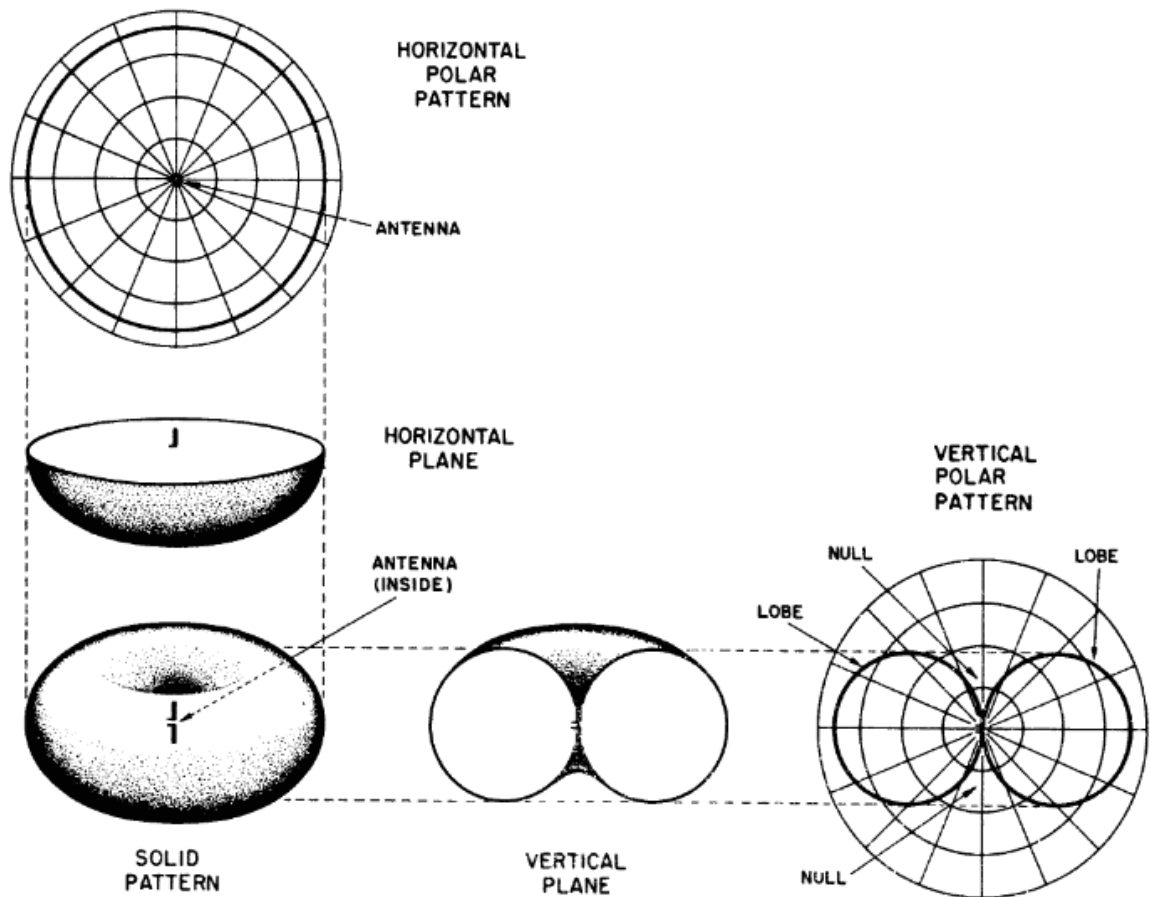


Рис. 4.1 - Горизонтальна та вертикальна полярні діаграми спрямованості всенаправленої антени вільного простору

Загалом об'ємну 3D-діаграму ДН такі антени мають у вигляді «бублика» (тороїда) з нульовою інтенсивністю вздовж осі диполя. На прикладній діаграмі зображено об'ємну ДН монополя довжиною  $0.6\lambda$  над ідеальною землею: максимум випромінювання розташований горизонтально, у той час як у напрямі вгору та вниз є провали.

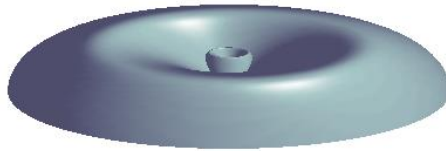


Рис. 4.2 - Тривимірний ДН вертикального монополя ( $0.6\lambda$ ) над ідеальною землею

Коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ) пов'язаний із відображенням сигналу на вході антени. Нехай  $Z_L$  – вхідний імпеданс антени,  $Z_0$  – хвильовий опір лінії (зазвичай 50 Ом). Модуль коефіцієнта відбиття

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0},$$

і тоді КСХ визначається як:

$$КСХ = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}.$$

При ідеальному узгодженні  $\Gamma=0$ ,  $КСХ=1$  [41]. Зі зростанням розбіжності імпедансів  $|\Gamma|$  зростає й КСХ, що означає більші відбиті хвилі і втрати у передачі потужності.

#### 4.2. Опис обраної конструкції антени та моделювання

Для дипломного проекту обрано вертикальний **монопольний всенаправлений** тип антени (аналог штиря антени Wi-Fi-роутера) з робочим діапазоном GSM-1800 (~1.71–1.88 ГГц). Це простий за будовою одноелементний вібратор, орієнтований вертикально над заземлювачем (площиною або радіалами). Вхідна площина (на місці нижньої точки антени) під'єднана через фідер 50 Ом. Важливо зауважити: типово місячні (радіальні) провідники під кутом  $\sim 45^\circ$  можуть збільшити вхідний опір приблизно із 36  $\Omega$  до  $\sim 50 \Omega$ , що дозволяє краще узгодити монополь з кабелем. У моделі CST передбачена заземлювальна площина чи радіали для відображення ефекту землі.

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
|     |      |          |        |      |                           | 70   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

CST Microwave Studio використано для чисельного моделювання поля і параметрів антени. У програмі була побудована 3D-модель: вертикальний провідник діаметром кілька міліметрів (довжина 35 мм) над круглою заземлювальною поверхнею (достатнього радіусу ~50–100 мм). Подача здійснювалася коаксіальним кабелем RG-402 з хвильовим опором 50 Ом [42]. Кабель RG-402 (гнучкий або напівжорсткий) обрано за його високу стабільність параметрів і низькі втрати у діапазоні до 18 ГГц. Завдяки точній геометрії та діелектрику з PTFE такий кабель має «жорсткий» хвильовий опір 50 Ом і часто використовується для підключення антен у вимірювальній техніці, SDR-модулях тощо. Його гнучкість спрощує монтаж, а висока стабільність забезпечує повторювані результати вимірювань. Таким чином, у моделі використовувався RG-402, що надавало узгодження 50 Ом та мінімальні загасання сигналу.

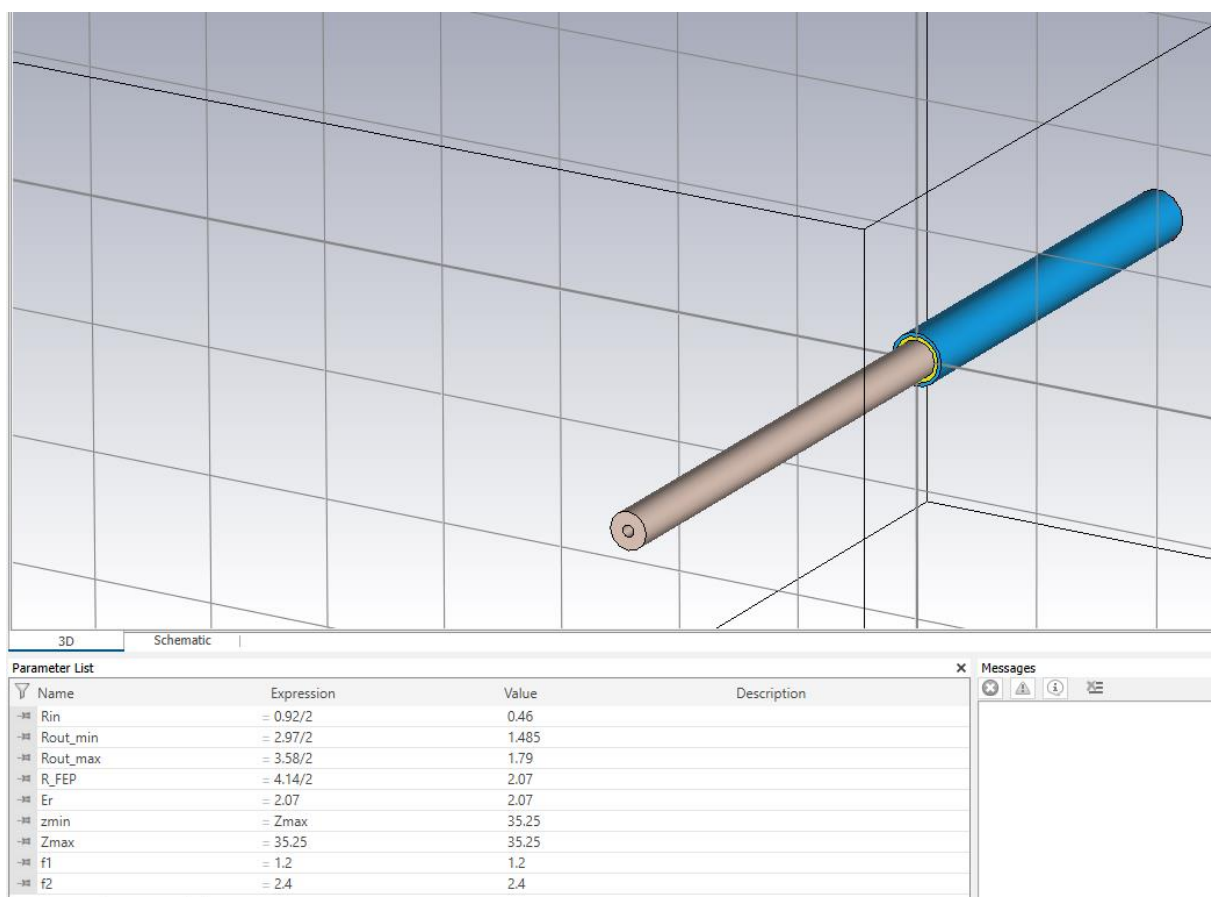


Рис. 4.3 - Вигляд нашої монопольної антени в середовищі CST Microwave Studio

На ілюстрації видно, що антенний елемент (сірий циліндр) довжиною 35 мм і діаметром  $\sim 2$  мм розташований над заземлювальною поверхнею, а коаксіальний фідер RG-402 (синій циліндр) підключається через ігольчастий порт (жовта обводка). У таблиці параметрів праворуч зазначено:

- $R_{in} \approx 0.46$  мм – внутрішній радіус фідера,
- $R_{out\_min} \approx 1.485$  мм,  $R_{out\_max} \approx 1.79$  мм – зовнішні радіуси коаксіального кабелю,
- $R_{FER} \approx 2.07$  мм – радіус ізолятора FER,
- $\epsilon_r \approx 2.07$  – діелектрична стала FER,
- $z_{min} = 35.25$  мм,  $z_{max} = 35.25$  мм – ідеальна довжина антени ( $0.25\lambda$  при 1.8 ГГц),
- $f_1 = 1.2$  ГГц,  $f_2 = 2.4$  ГГц – межі досліджуваної смуги.

#### 4.2.1. Аналіз КСХ та S-параметрів антени

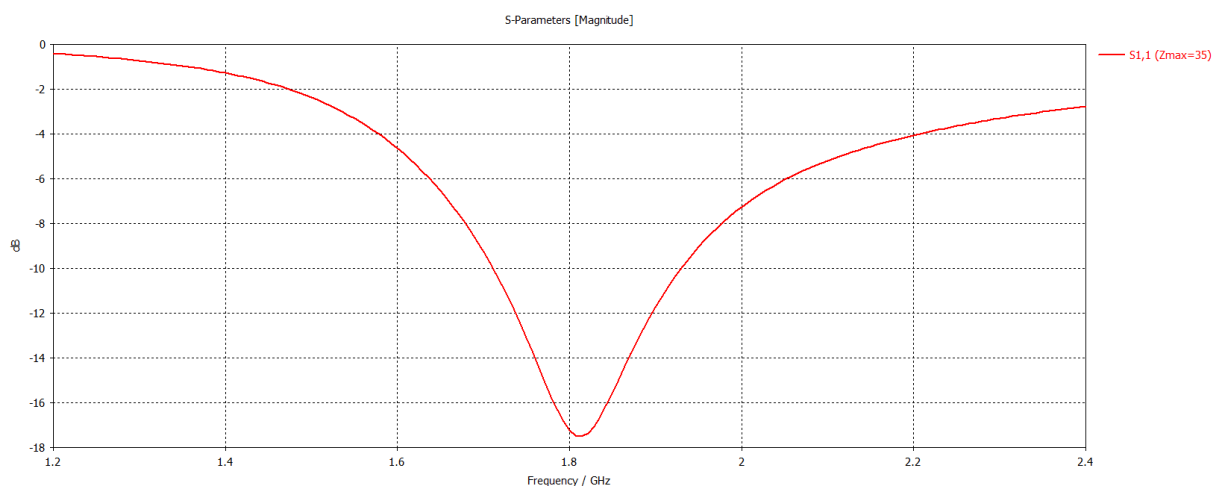


Рис. 4.4 - Графік S-параметрів антени

На наступному графіку показано амплітуду параметра відбиття  $S_{11}$  антени в діапазоні 1.2–2.4 ГГц. Мінімум  $S_{11} \approx -17.22$  дБ спостерігається в точці 1.80 ГГц, що підтверджує резонанс антени в діапазоні GSM1800.

Коефіцієнт відбиття розраховується як:

$$|\Gamma| = 10^{\frac{-17.22}{20}} \approx 0.136$$

Тобто близько **1.85 % потужності** відбивається назад. S11 пов'язаний з КСХ (VSWR) за наступною формулою:

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} = \frac{1 + 0.136}{1 - 0.136} \approx \frac{1.136}{0.864} \approx 1.315$$

Значення  $\approx 1.32$  — відмінне (для  $VSWR \leq 1.5$ ).

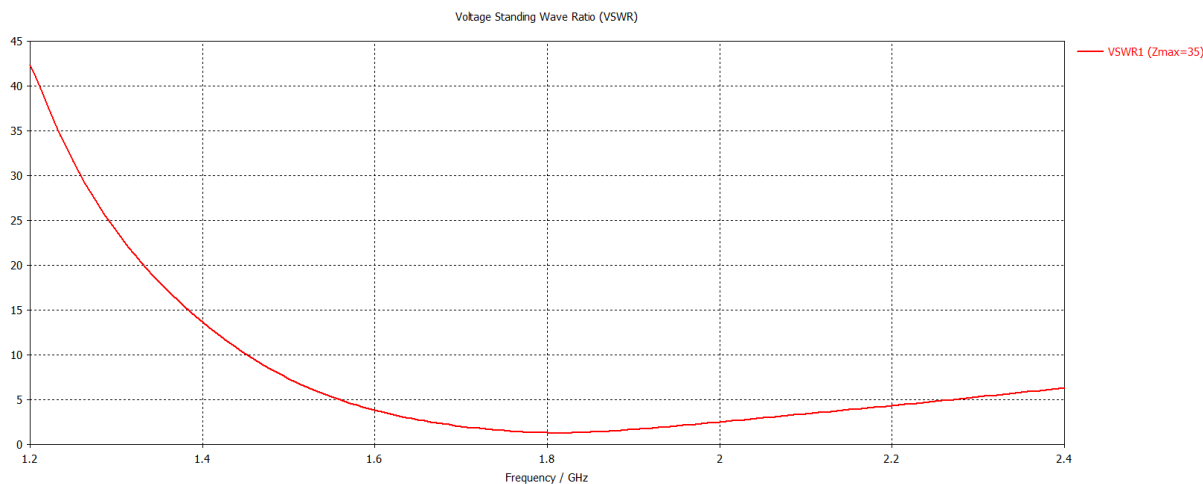


Рис. 4.5 - Графік КСХ антени

Графік VSWR відображає узгодження антени із 50-Ом лінією. У точці 1.80 ГГц  $VSWR \approx 1.315$ , що відповідає високоякісному узгодженню та низьким відбиткам, що і підтверджуються розрахунками вище.

Розрахунки в CST демонструють, що обрана довжина 35 мм з урахуванням діелектричного впливу та ефекту фідера забезпечує глибокий мінімум S11 і  $VSWR < 2$  у межах 1.7–1.9 ГГц. Це дозволяє використовувати антену для обох каналів GSM1800 (uplink 1710–1785 МГц, downlink 1805–1880 МГц) без значних втрат потужності та деградації якості зв'язку.

#### 4.2.2. Аналіз 3D діаграми спрямованості та коефіцієнту підсилення

При моделюванні 3D діаграми використано farfield-підхід за умови  $kR \gg 1$ , що забезпечує достовірність розрахунків в зоні далекого випромінювання.

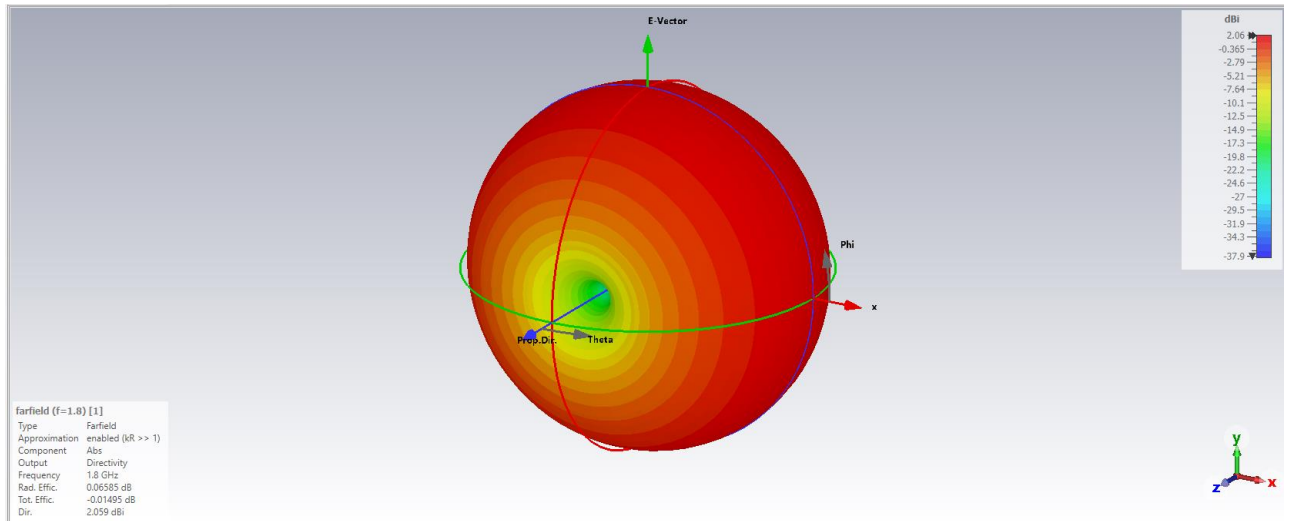


Рис. 4.6 - Графік 3D діаграми спрямованості (ДН) антени

Отриманий графік представлений у вигляді сферичного зображення з кольоровими градієнтами, які відображають значення діаграми спрямованості в одиницях dBi. Колірна шкала праворуч охоплює діапазон від  $-37.9$  dBi до  $2.06$  dBi: червоні ділянки позначають високі значення, тоді як сині — низькі, що дозволяє візуально визначити області з максимальною концентрацією випромінювання.

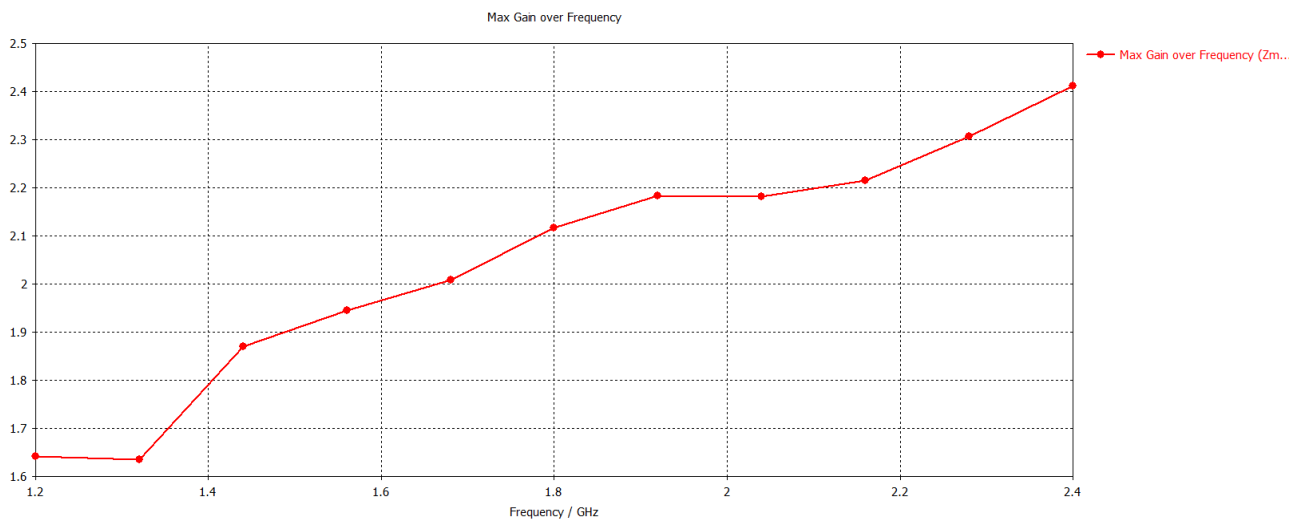


Рис. 4.7 - Графік коефіцієнту підсилення антени

Таким чином, отримане значення коефіцієнту підсилення у  $2.06$  dBi демонструє, що конструкція ефективно концентрує електромагнітну енергію у заданому напрямку, що є важливим для реальних експлуатаційних характеристик антени.

### 4.2.3. Аналіз 2D діаграми спрямованості антени

Окрім об'ємного 3D аналізу, CST Microwave Studio дозволяє отримати 2D зріз діаграми спрямованості, який надає ще більш детальне уявлення про кутові характеристики випромінювання в окремій площині (наприклад, в Е-площині або Н-площині).

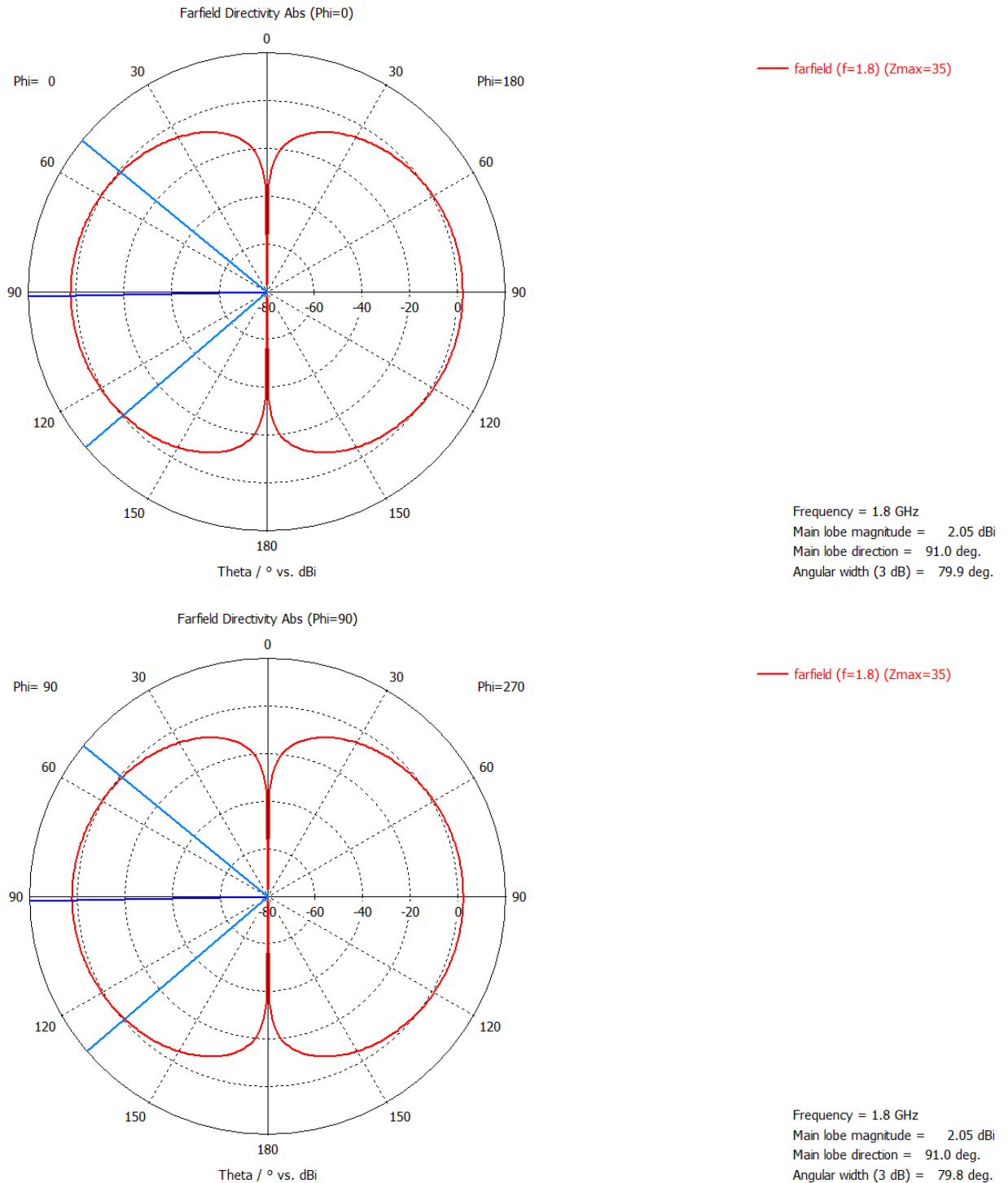


Рис. 4.8(а,б) - Графік ДН антени при  $\phi=0^\circ$  та  $\phi=90^\circ$

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 75   |

Отримані 2D-зрізи ДН у площинах  $\varphi=0^\circ$  та  $\varphi=90^\circ$  демонструють однакову форму та числові характеристики: чітко виокремлений основний лоб із максимальним значенням спрямованості близько 2,06 dBi та бокові лобі з помітно меншими рівнями. У текстовому блоці зображень зазначено умови симуляції: Farfield-моделювання за наближення  $kR \gg 1$ , аналіз Abs із вихідною метрикою Directivity при частоті 1,8 GHz, радіаційною ефективністю 0,06585 dB і загальною ефективністю  $-0,01495$  dB.

Такі 2D-зрізи дозволяють детально оцінити симетрію та кути розподілу випромінювання в обраних площинах, що спрощує ідентифікацію небажаних бокових ефектів і сприяє подальшій оптимізації антени. Поєднання цих даних із 3D-діаграмою забезпечує всебічний аналіз просторового розподілу поля й кутових характеристик для остаточного підтвердження ефективності конструктивного рішення.

Таким чином, моделювання в CST Microwave Studio підтвердило коректність обраних розмірів і конфігурації антени, а також ефективність використання коаксіального кабелю RG-402 для підключення та узгодження з SDR-стеком.

У процесі моделювання розраховувалися діаграми спрямованості, графіки КСХ, коефіцієнта підсилення антени, а також відгук по частоті (S11). На виході CST було отримано діаграми в полі однієї частоти (1.8 ГГц). Для аналізу було перевірено, що КСХ мінімальна (близько 1) поблизу 1.8 ГГц, а коефіцієнт підсилення у горизонтальній площині становить кілька dBi (монополь має невисоку спрямованість  $\sim 2-5$  dBi).

У процесі проектування антени для SDR-базової станції стандарту GSM-1800 було використано програму CST Microwave Studio для чисельного моделювання електромагнітних характеристик. За результатами аналізу діаграми спрямованості, коефіцієнта відбиття та узгодження на робочій частоті було обрано оптимальну конструкцію всенаправленої монопольної антени.

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 76   |

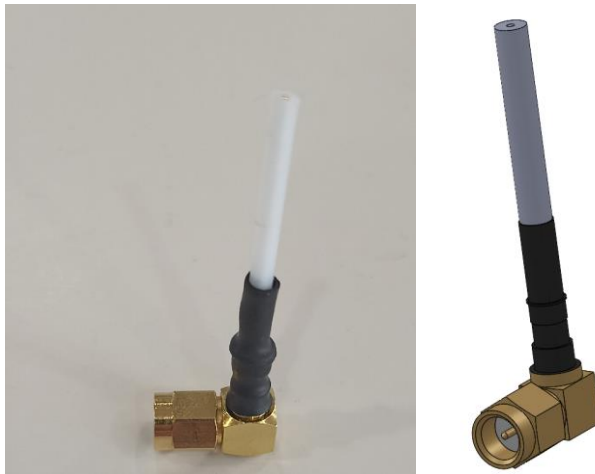


Рис. 4.9(а,б) - Фізичний зразок антени та 3D-модель антени в середовищі SolidWorks

На основі результатів моделювання факультетом було виготовлено фізичний зразок антени, який відображає реальні параметри роботи конструкції.

Для подальшого виготовлення креслень та оформлення технічної документації мною було створено 3D-модель антени в середовищі SolidWorks, з урахуванням конструктивних елементів та типового SMA-роз'єму.

### 4.3. Фабрикація та тестування антени

На основі розрахунків і моделювання в CST Microwave Studio було виготовлено фізичний прототип монопольної антени: металевий стрижень довжиною 35 мм закріплено над еквівалентною заземлювальною пластиною, а коаксіальний кабель RG-402 запаяно в базі антени.

Для валідації характеристик під час виробничої практики в ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ» було проведено комплексні вимірювання в екранованій камері (анехогенній кімнаті) за допомогою векторного аналізатора Keysight P5020A (9 kHz–4.5 GHz) [43].

Першим етапом була калібрування порту VNA: застосовано модуль калібрування Keysight ECal N443XD, що дозволяє автоматично встановити еталонну площину вимірювання без похибок від кабелів та адаптерів до роз'єму антени. Після підключення ECal-модуля до роз'єму VNA виконується ECal-калібрування в діапазоні до 4.5 GHz, що гарантує точність вимірювань S-параметрів у зоні GSM1800 [44].

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
|     |      |          |        |      |                           | 77   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |



Рис. 4.10 – Фото лабораторного стенда для вимірювання параметрів антени з використанням Keysight P5020A та ECAL-модуля N443XD

Далі було виконано вимір  $S_{11}$  прототипу антени. На графіку (Рис. 4.12) відзначено мінімум відгуку  $S_{11} = -7,16$  дБ біля 1.800 ГГц.



Рис. 4.11 - Графік S-параметрів фізичного макета антени

Це відповідає коефіцієнту відбиття  $|\Gamma| \approx 0.42$  і  $VSWR \approx 2.56$ . Хоча мінімум менший, ніж у ідеальній моделі ( $< -10$  дБ), проте цих параметрів достатньо для лабораторної GSM1800. Підвищений VSWR пояснюється неточностями виготовлення та впливом коаксіального переходника.

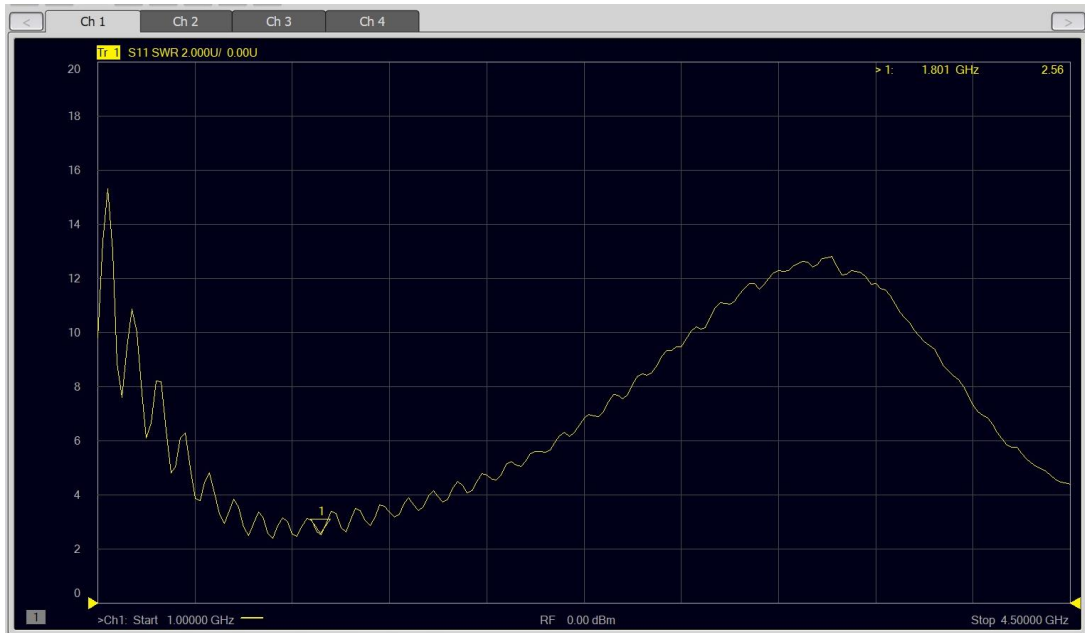


Рис. 4.12 - Графік КСХ фізичного макета антени

У екранірованій камері було також проведено вимір діаграм спрямованості в 2D та 3D. Використано обертальний стенд із референтною антеною: передавач VNA (або сигнал-генератор) подавалось на тестову антену, а приймальна антена змінювала кут.

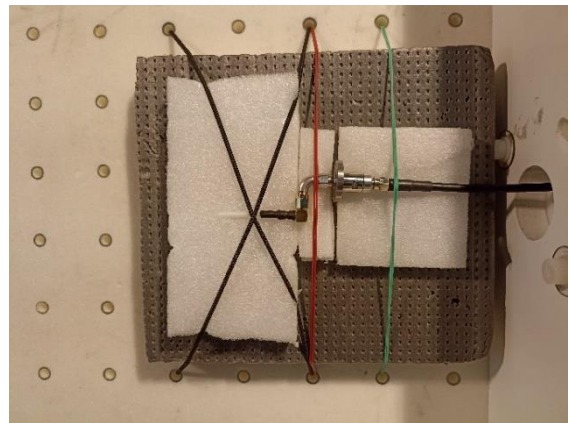


Рис. 4.13(а,б) – Видяд екранованої камери та прототип антени, встановлений у камері для вимірювання ДН

Діаграми, зняті у площинах  $\varphi=0^\circ$  та  $\varphi=90^\circ$ , підтвердили приблизно тороїдальну форму: в горизонтальній площині практично рівномірне випромінювання навколо, у вертикальній – характерні провали вздовж осі. Через обмеження часу вимірювання в лабораторії та властиву симетрію всенаправленого монополя, було знято лише половини діаграм спрямованості, що цілком достатньо для оцінки ефективності антени.

Повна форма діаграми передбачається дзеркальною щодо осей вимірювання. Однак була помітна асиметрія в зоні монтажного роз'єму, що призводить до нерівномірності поля. 3D-візуалізація утворює витягнутий тороїд із локальним «гарячим» вузлом біля бази антени.

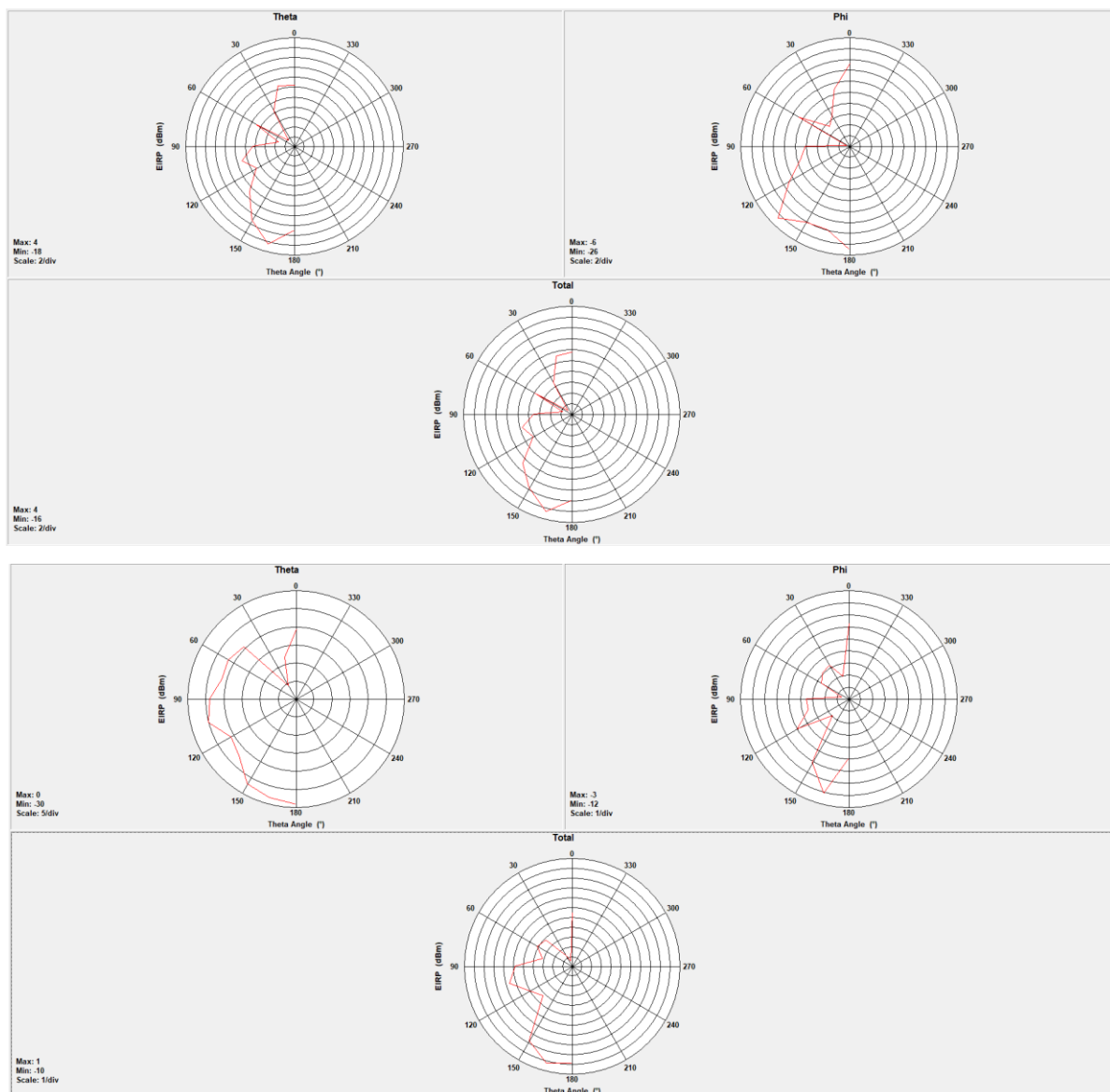


Рис. 4.14 (а,б) – ДН фізичного макета антени у площинах  $\varphi=0^\circ$  та  $\varphi=90^\circ$

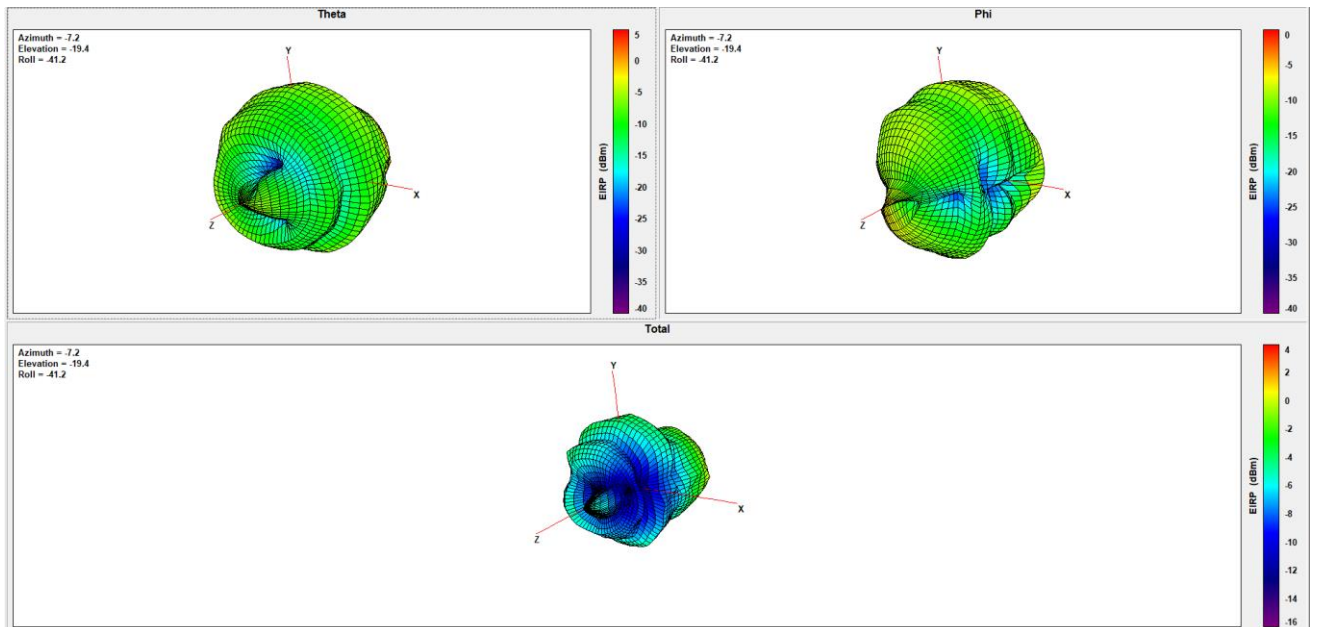


Рисунок 4.15 – ДН фізичного макета антени у 3D просторі

Отримані  $S_{11}$  і VSWR демонструють прийнятну, але не ідеальну адаптацію. Форма діаграм підтверджує модельні передбачення, проте асиметричні спотворення вказують на необхідність тонкої корекції зони коаксіального переходу.

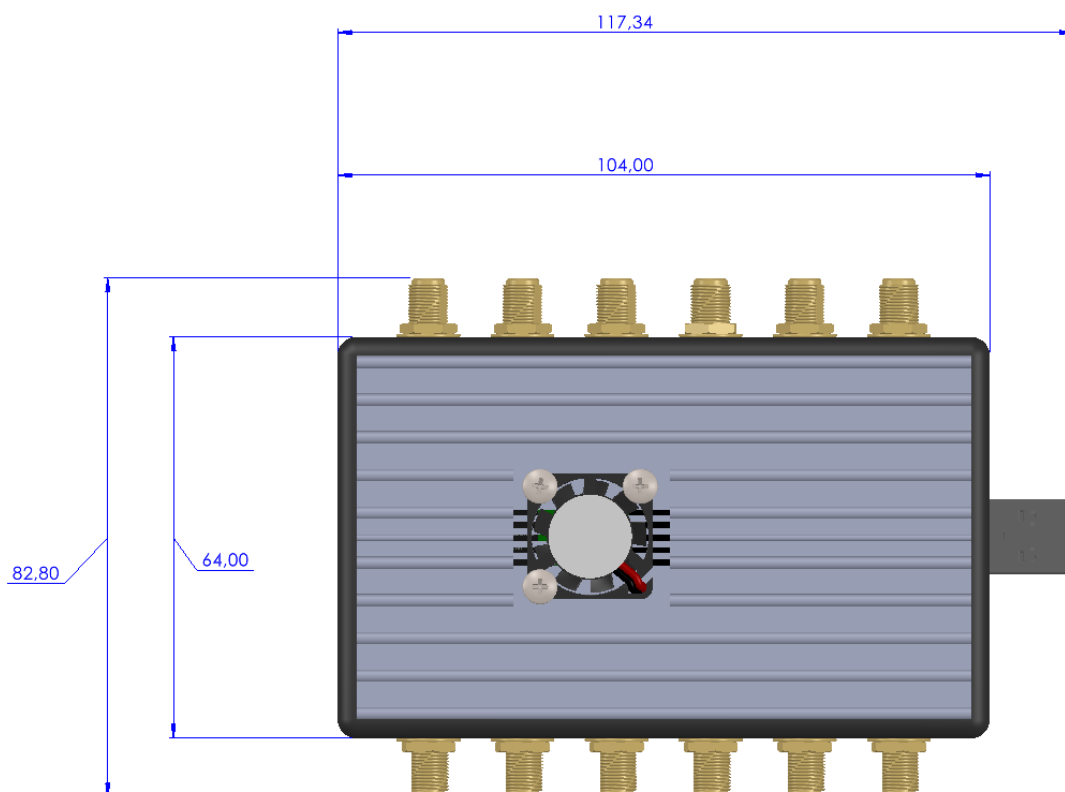
## 5. КОНСТРУКТОРСЬКЕ ПРОЄКТУВАННЯ

### 5.1. Загальні параметри корпусу

Корпус розроблено для забезпечення надійного захисту, ефективного охолодження та зручної експлуатації SDR-плати LimeSDR v1.4s.

#### Основні характеристики:

- Матеріал: алюмінієвий сплав, забезпечує легкість, міцність та високу теплопровідність (див. п.5.2 «Матеріал корпусу»).
- Зовнішні габарити:
  - Довжина (D) з USB-роз'ємом: 117,34 мм.
  - Довжина (d) без USB роз'єма: 104 мм.
  - Ширина (W) з SMA роз'ємами з двох сторін: 82,80 мм.
  - Висота (H) з ніжками: 43,95 мм.
  - Висота без ніжок (h): 39,10 мм.



|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 82   |



Рис. 5.1 (а, б) - Зовнішні габарити, вигляд згори та збоку

- **Внутрішні габарити:**
  - Довжина (L1): 101,0 мм.
  - Ширина (W1): 61,0 мм.
  - Висота (H1): 10,0 мм.
- Вага: 450 г (без компонентів).
- **Гумові ніжки (6 шт.)** виконані у вигляді двоступеневого абсорбера вібрацій. Кожна ніжка складається з нижнього паралелепіпеда та верхнього усіченого чотиригранного пірамідального сегменту:

**а) Нижній блок** — прямокутний паралелепіпед розміром **10,3 × 10,3 × 0,57 мм** (довжина × ширина × висота). Він піднімає корпус на 0,57 мм над поверхнею, створюючи початковий зазор для вентиляції.

**б) Верхній блок** — усічений чотиригранний тетраїдер (усічена піраміда), що кріпиться на верхній грані паралелепіпеда:

- Розміри більшої основи: **9,09 × 9,09 мм**
- Розміри меншої основи (усічений зріз на верхній площині): **6,08 × 6,08 мм**
- Висота між площинами основ: **3,23 мм**

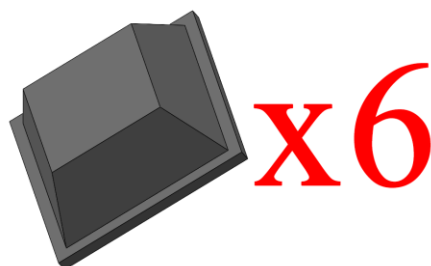


Рис. 5.2 - Вигляд гумової ніжки

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 83   |

Ця конструкція поєднує високу стійкість (за рахунок широкої більшої основи), ефективну демпфіруючу здатність чотиригранного верхнього сегменту та достатній повітряний зазор під корпусом для нижньої вентиляції.

## 5.2. Матеріал корпусу

Найбільш оптимальним рішенням для корпусу SDR стає алюмінієвий сплав серії 6000, котрий поєднує добру теплопровідність, міцність і зручність обробки. З-поміж них виділяються 6061-Т6 і 6063-Т6: перший має вищу міцність (до 290...310 МПа при розриві), тоді як другий демонструє найкращу теплопровідність (200...218 Вт/м·К) та відмінну корозійну стійкість.

Для виготовлення корпусу SDR було обрано **сплав 6063-Т6**: він поєднує теплопровідність до 218 Вт/м·К для швидкого відведення тепла від радіаторних ребер, достатню міцність (145–186 МПа при розриві, 18–33 % подовження), легку обробку та екструзійні властивості для точної реалізації складної геометрії вентиляційних щілин [45].

Сплав 6063 містить близько 0,2–0,6 % Si і 0,45–0,9 % Mg, що створює тверді розчини та дрібнокристалічну структуру, стійку до корозії та сприятливу для точного формування профілів. Максимальний вміст заліза (<0,35 %) та марганцю (<0,10 %) запобігає утворенню грубозернистих фаз, які знижують теплопровідність.

У стані Т6 (штучно загартований) 6063-Т6 демонструє теплопровідність 201–218 Вт/м·К при 25 °С. Це забезпечує високу ефективність відведення тепла від плати через ребра радіатора. Для порівняння, 6061-Т6 має теплопровідність близько 167 Вт/м·К, а високоміцний 7075-Т6 — лише 130–150 Вт/м·К.

Співвідношення міцності й пластичності 6063-Т6 ( $\sigma_t = 145\text{--}186$  МПа,  $\varepsilon = 18\text{--}33$  %) дозволяє створювати тонкостінні деталі без ризику крихкого руйнування. Його модуль пружності  $\sim 69$  ГПа гарантує достатню жорсткість для захисту плати від механічних навантажень. Алюміній 6063 характеризується високою здатністю до екструзії та гарною зварюваністю без значної втрати корозійної стійкості.

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 84   |

Легкість фрезерування й обробки різальними інструментами дозволяє точно виконати вентиляційні пази 5–10 мм та різьблення під гвинти М3 без тріщин і задирок. 6063-Т6 має кращу корозійну стійкість, ніж 6061, завдяки одноріднішому розподілу легуючих елементів і меншому вмісту міді; це особливо важливо в середовищі з можливими перепадами температур і вологості.

З огляду на сукупність характеристик — від високої теплопровідності та корозійної стійкості до зручності обробки — сплав 6063-Т6 є ідеальним матеріалом для корпусу LimeSDR v1.4s. Він дозволить зменшити температурні пік-показники до безпечних 60–65 °С під навантаженням, забезпечить механічний захист і привабливий зовнішній вигляд готового корпусу.

Конструкція виконана з **алюмінієвого сплаву 6063-Т6**, обраного за його високу теплопровідність (200...218 Вт/м·К) і добрі екструзійні властивості.

**Чорний матовий корпус** — поверхня після анодування в чорний колір, що захищає метал від корозії й додає строгого індустріального вигляду.

**Радіаторні ребра** на верхній кришці (усі з того ж 6063-Т6) залишені **натурального світло-сріблястого** анодування — для контрасту в дизайні та кращого відбиття теплового випромінювання.

### 5.3. Система охолодження

Згори корпусу між ребрами радіатора знаходиться вентилятор розміром **20×20×6,5 мм**, живлення відбувається від **5 V**. У корпусі він закріплений трьома гвинтами М3 довжиною 13 мм (позначено “1” на Рис. 5.3) — четвертий гвинт не використовується саме через те, що в цьому куті виходять дроти живлення: червоний провід — +5 V, чорний провід — GND (позначено “2” на Рис. 5.3).

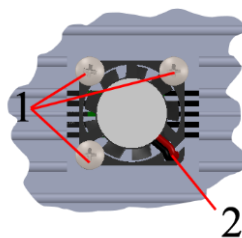


Рис. 5.3 - Розташування кріплення та живлення вентилятора

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 85   |

На LimeSDR v1.4s виводи 5 V та GND доступні на спеціальному роз'ємі живлення поруч із USB-контролером або через один зі шпильок 40-контактного GPIO-роз'єму.

В моделі передбачені й пасивні тепловідвідні елементи – спеціальні теплопровідні прокладки або «термоджелі», які з одного боку контактують з гарячими компонентами на платі (FPGA, LMS7002M), а з іншого – передають тепло на верхню кришку з радіаторними ребрами. Це значно підвищує ефективність тепловідводу та стабільність роботи системи.

### 5.3.1. Щілина під витяг повітря з вентилятора

У верхній кришці корпусу LimeSDR v1.4s передбачено систему вентиляційних щілин, які забезпечують ефективне відведення нагрітого повітря, що створюється під час роботи пристрою.

Ці щілини мають прямокутну форму, кожна з яких має довжину 25 мм і ширину 1 мм. Вони розташовані паралельно одна одній з інтервалом у 1 мм, утворюючи суцільну вентиляційну смугу над вентилятором. Таке розташування дозволяє гарячому повітрю, яке піднімається від радіатора, ефективно виходити назовні, забезпечуючи стабільний температурний режим всередині корпусу.

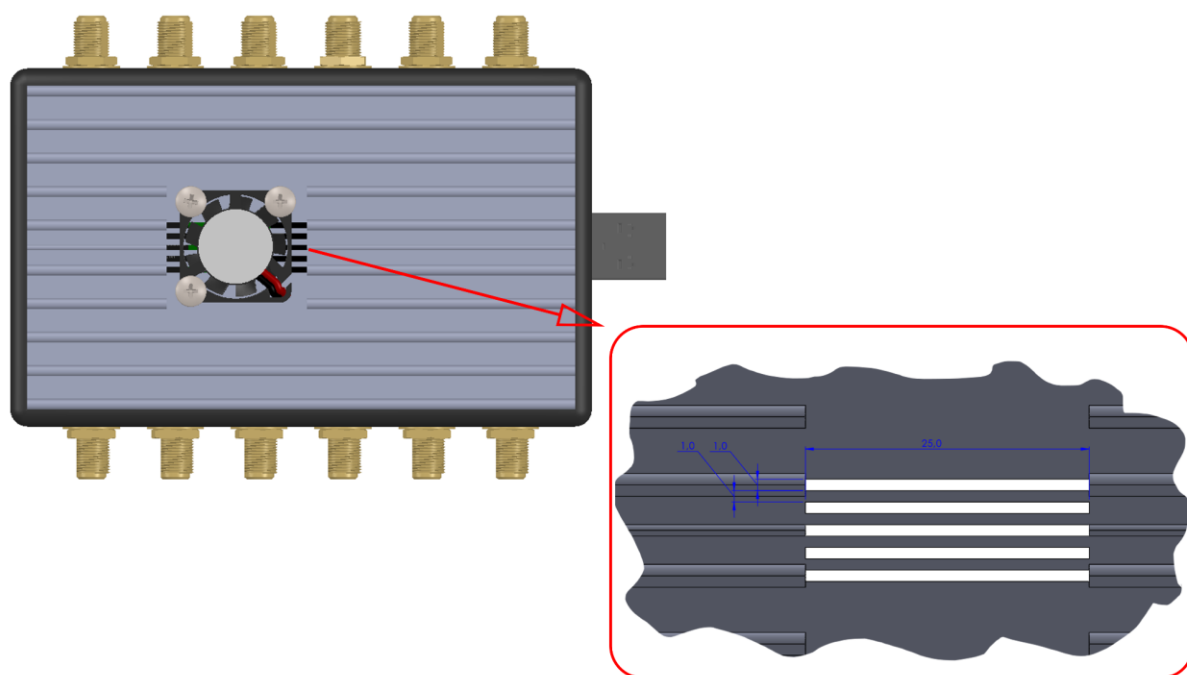


Рис. 5.4 - Розташування та розміри вентиляційних отворів на верхній кришці корпусу

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 86   |

Ця щілина спроектована так, щоб мінімізувати акустичний опір і шум, а також запобігати утворенню турбулентних завихрень, які можуть зменшити продуктивність охолодження.

### 5.3.2. Бічні щілини для забору (або виходу) повітря

По обидві довгі сторони корпусу LimeSDR v1.4s розташовані симетричні вентиляційні прорізи, які забезпечують циркуляцію повітря для охолодження внутрішніх компонентів. Кожна бічна стінка має по шість горизонтальних щілин, розміщених з рівномірним інтервалом. Кожна щілина має довжину 50 мм і ширину 5 мм, з відстанню між центрами сусідніх прорізів 8 мм. Ці отвори сприяють ефективному забору прохолодного повітря або додатковому виходу теплого повітря, залежно від напрямку обертання вентилятора, розташованого на верхній панелі корпусу. Таким чином, забезпечується стабільний температурний режим роботи пристрою.

На передній та задній стороні корпусу LimeSDR v1.4s розташовані вентиляційні отвори, призначені для ефективного охолодження внутрішніх компонентів пристрою. З одного боку (позначено "1" на Рис. 5.5), розміщено дві групи отворів, кожна з яких складається з трьох прорізів.

На задній панелі виконано дві великі групи вертикальних щілин по шість прорізів у кожній (позначено "2" на Рис. 5.5); кожна група складається з двох блоків по три щілини з коротким проміжком між ними, що дозволяє створити потужний потік повітря для виведення нагрітого повітря назовні.

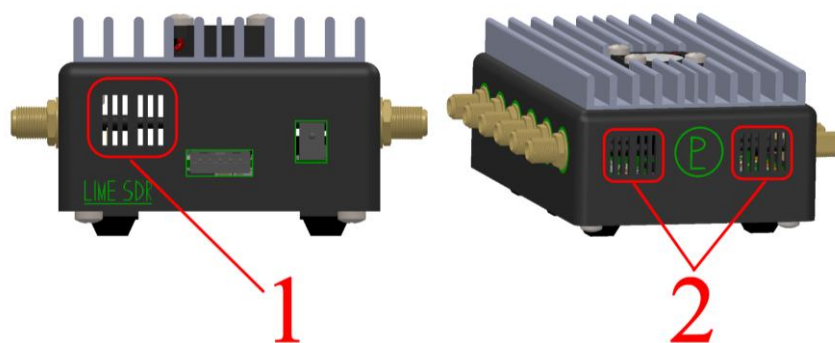


Рис. 5.5 - Конфігурація вертикальних вентиляційних отворів на передній та задній стороні корпусу

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 87   |

Різна конфігурація отворів на протилежній стороні зумовлена розташуванням внутрішніх елементів та необхідністю оптимізації повітряного потоку. Горизонтальні щілини та вертикальні прорізи забезпечують надходження прохолодного повітря та відведення тепла, що генерується електронними компонентами LimeSDR. Така система вентиляції сприяє стабільній роботі пристрою навіть при тривалих навантаженнях.

При використанні гумових ніжок сумарний зазор від столу до нижнього краю щілин становить близько **5 мм**, що дозволяє вільно втягувати повітря з-під корпусу.

### 5.3.3. Алгоритм потоку повітря

**Забір прохолодного повітря** відбувається через бічні щілини і — частково — через зазор під корпусом, створений гумовими ніжками. **Швидке прискорення** повітря лопастями вентилятора та направлення його вгору. **Викид нагрітого повітря** через центральну щілину на кришці — мінімізація гарячих зон над радіатором.

Таким чином, поєднання вентилятора, щілин на боках і центрального отвору створює ефективний тунельний потік повітря, що гарантує оптимальні умови для охолодження LimeSDR v1.4s без “стоячої” теплої контури й з низьким рівнем акустичних шумів.

### 5.4. Порти та роз’єми

В передній (або верхній) панелі корпусу, зверненої до користувача, розташовані такі інтерфейси:

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 88   |

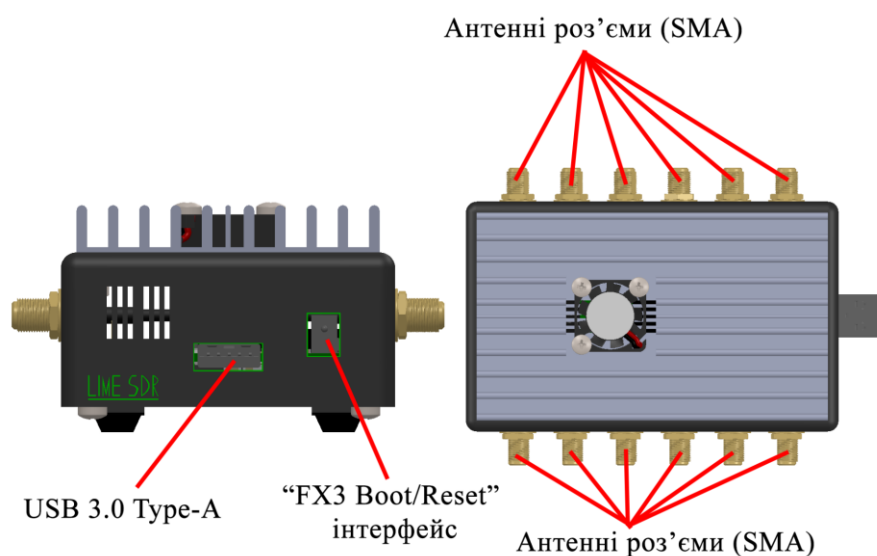


Рис. 5.6 - Розташування основних портів корпусу

**USB 3.0 Type-A** для передачі даних і живлення (5 V, до 3 A). Отвір у панелі вирізано під стандартні розміри: 12 × 16 мм. Навколо нього зроблено контурну окантовку яскраво-зеленого кольору (кольору LimeSDR), щоб акцентувати порт.

Неподалік від USB розташовано невеликий круглий отвір діаметром 4 мм, який використовується як кнопка Reset або програмований користувачський інтерфейс (за потреби може бути замінений на джойстик чи інший тактильний елемент).

Цей інтерфейс складається з двох частин: **Boot-mode header (FX3\_BOOT jumper)** — двох контактів, які за допомогою перемички дозволяють мікроконтролеру Cypress EZ-USB FX3 увійти в режим завантаження (DFU) для оновлення прошивки, та **Reset pad (RST\_N button)** — тактильна кнопка або металізована площадка, що скидає (ресетить) FX3 без необхідності від’єднувати живлення чи USB. Обрамлення цього отвору також виконане зеленим контуром.

По двох довгих бічних гранях корпусу розташовано дві групи по шість SMA конекторів (усього 12 портів).

Кожен отвір під SMA має діаметр 6,5 мм із фаскою для гайки. Центр–центр відстань між сусідніми роз’ємами витримана  $\geq 20$  мм — достатньо для затягування гайковим ключем AF8 або пальцями. Окантовка навколо кожного SMA теж пофарбована в характерний зелений колір.

## 5.5. Кріплення корпусу та плати

Корпус і плата фіксуються чотирма гвинтами М3 довжиною 25 мм, які проходять наскрізь через товщу нижньої основи, кріплять верхню кришку корпусу і фіксують саму SDR-плату.

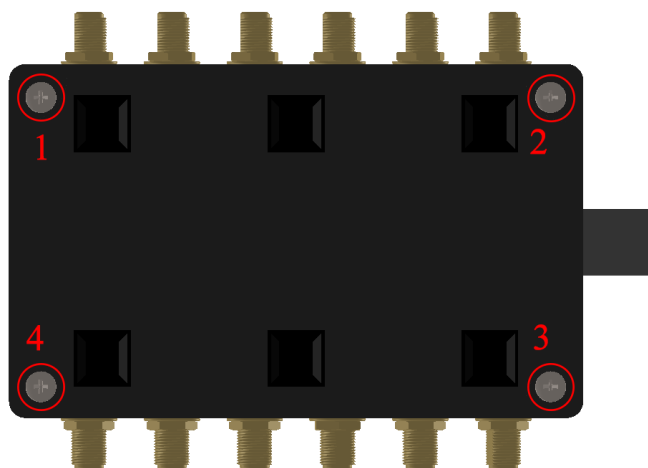


Рис. 5.7 - Розташування чотирьох гвинтів М3 для корпусу

Гвинти вкручуються в різбові стояки на нижній частині корпусу, утворюючи єдину конструкцію «основа–плата–кришка». Момент затягування — 0,6...0,8 Н·м, щоб не деформувати алюміній і не зім'яти плату.

## 5.6. Прототипування корпусу на 3D-принтері та брендове оформлення

На фронтальній частині, трохи вище низу корпусу, тягнеться тонка лаймова смуга, над якою виконано напис **Lime SDR** літерами лаймового кольору.

На задній панелі, між групами SMA-роз'ємів, є логотип LexPro SDR — круг з двома перекресленими літерами **L** і **P** всередині. Його теж зроблено методом лазерного гравіювання з прозорою зеленою підкладкою всередині.

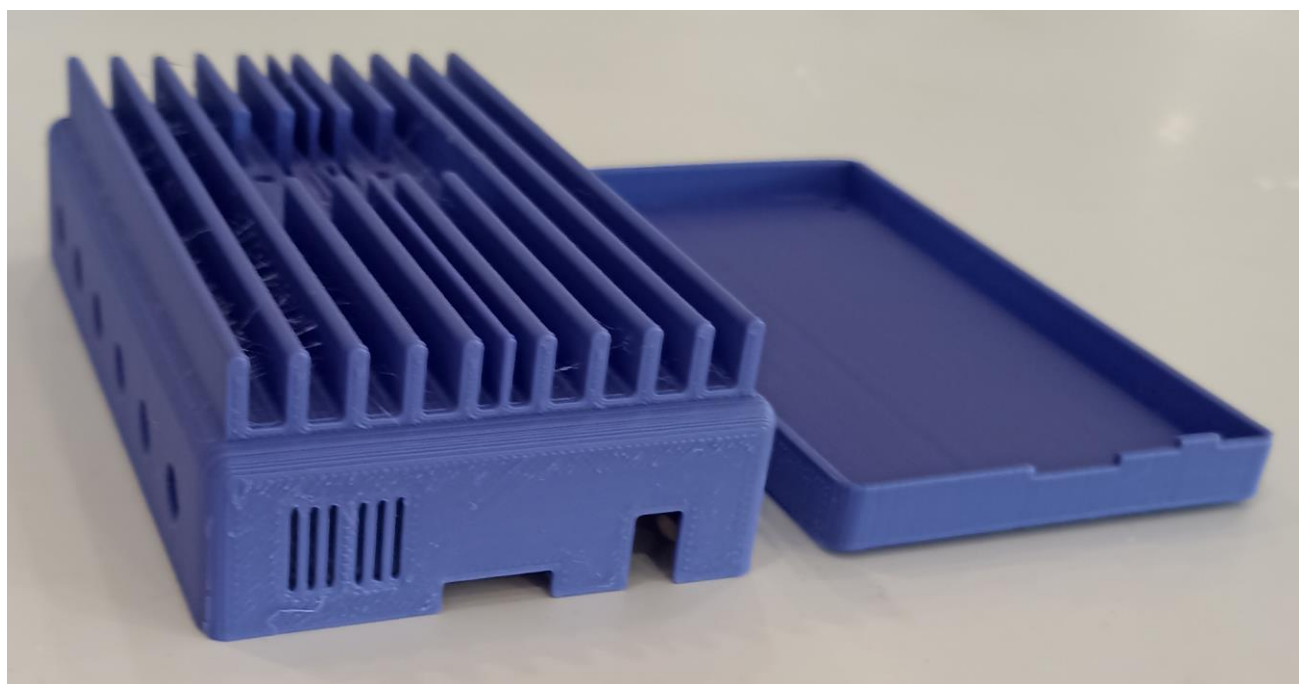


Рис. 5.8 - Зовнішній вигляд гравіювання на корпусі

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
|     |      |          |        |      |                           | 90   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Таким чином, ваш корпус поєднує функціональність — зручний доступ до всіх інтерфейсів, надійне кріплення та ефективне охолодження — з продуманим брендовим дизайном: чорний фон, зелені акценти LimeSDR і світлий алюміній радіатора зверху.

Висловлюю щире подяку компанії Artline за технічну підтримку та сприяння у виготовленні фізичного макета корпусу для SDR-пристрою [46]. На основі створеної мною 3D-моделі в середовищі SolidWorks фахівці компанії безкоштовно надрукували прототип корпусу на 3D-принтері, що дозволило провести практичне тестування компоновання та системи охолодження.



*Рис. 5.9 - Прототип корпусу для SDR*

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
|     |      |          |        |      |                           | 91   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

## ВИСНОВКИ

Дипломний проєкт був присвячений розробці лабораторної базової станції мобільного зв'язку GSM на основі програмно визначеного радіо (SDR). У процесі дослідження було детально розглянуто архітектуру GSM, включаючи її стандарти, компоненти мережі та принципи їх взаємодії. Було проаналізовано основні елементи системи, такі як базові станції, контролери та абонентські пристрої, а також стандарти, що визначають їх функціонування.

Була розроблена блок-схема лабораторної базової станції мобільного зв'язку GSM на основі SDR, яка включає SDR-пристрій LimeSDR v1.4s, дві антени, комп'ютер з віртуальною машиною Linux та програмний стек Osmocom. Прийнято рішення використовувати конфігурацію з двома антенами замість однієї антени з циркулятором. Це рішення було обґрунтовано необхідністю забезпечення високої ізоляції між передавачем і приймачем, що є критично важливим у лабораторних умовах для уникнення перешкод і забезпечення стабільної роботи системи.

Особливу увагу було приділено виготовленню й моделюванню антени для роботи в діапазонах мобільного зв'язку. Вибір конструкції монопольної (штирьової) антени обґрунтований її простотою, надійністю та прийнятним коефіцієнтом підсилення для частот GSM-діапазонів. Антену було змодельовано в середовищі електромагнітного моделювання з урахуванням геометрії провідника та властивостей матеріалів. Після виготовлення прототипу виконано лабораторні випробування: виміряно коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ) та побудовано діаграми спрямованості антени. Отримані результати підтвердили ефективність обраної конструкції та забезпечили стабільний зв'язок на розробленій базовій станції.

Для розміщення та захисту SDR-модуля LimeSDR v1.4s було спроектовано і виготовлено спеціалізований корпус з алюмінієвого сплаву 6063-T6, який поєднує достатню жорсткість конструкції та високу теплопровідність матеріалу.

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
|     |      |          |        |      |                           | 92   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Конструкція корпусу передбачає місце для встановлення вентилятора, що забезпечує примусове охолодження внутрішніх компонентів, а також містить внутрішні тепловідвідні елементи, які передають тепло від компонентів до верхньої кришки з радіаторними ребрами, що підвищує ефективність охолодження. Гумові ніжки сприяють стійкості корпусу і зменшенню вібрацій при роботі. Для оцінки конструкції на 3D-принтері було виготовлено макет корпусу, який підтвердив відповідність розмірів і форми технічним кресленням та дозволив уникнути помилок при виготовленні кінцевого виробу.

Розроблена лабораторна базова станція GSM на основі SDR є універсальним інструментом для освіти, досліджень та розробок. Вона дозволяє студентам і науковцям вивчати архітектуру GSM, аналізувати сигнали, тестувати нові технології та протоколи у контрольованому середовищі. Компанії можуть використовувати її для раннього тестування мобільних пристроїв та ПЗ, знижуючи витрати на розробку. Експерти з кібербезпеки отримують платформу для виявлення вразливостей у мобільних мережах. У випадках надзвичайних ситуацій станція здатна забезпечити тимчасовий зв'язок у ізольованих районах. Завдяки гнучкості SDR, система може адаптуватися для досліджень IoT, 5G та інших нових стандартів, залишаючись економічно доцільною та функціонально розширюваною.

Підсумовуючи, можна констатувати, що усі поставлені цілі дипломного проекту виконано повністю. Розроблена лабораторна базова станція GSM на основі SDR працює стабільно та повністю відповідає вимогам технічного завдання. Досягнуті результати демонструють необхідну якість і надійність зв'язку: абоненти успішно реєструються у мережі, здійснюються надійні голосові дзвінки і передача даних без помітних втрат сигналу. Запропоновані конструкційні рішення (антена та корпус) підтвердили свою ефективність в експлуатації. Таким чином, завершений проект повністю виправдав очікування і доводить науково-технічну цінність проведеної роботи.

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
|     |      |          |        |      |                           | 93   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Mireia F.-A. Mobile Communication and Socio-Economic Development: A Latin American Perspective. *UN Chronicle*. 2011. Т. 48, вип. 3 : The Digital Dividend. URL: <https://www.un.org/en/chronicle/article/mobile-communication-and-socio-economic-development-latin-american-perspective> (дата звернення: 12.06.2025).

2. Chan A. S. A brief history of 1G mobile communication technology. *Xoxzo Official Blog*. 24.07.2018. URL: <https://blog.xoxzo.com/en/2018/07/24/history-of-1g/> (дата звернення: 12.06.2025).

3. GSM in Wireless Communication. *GeeksforGeeks*. 24.04.2025. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/gsm-in-wireless-communication/> (дата звернення: 12.06.2025).

4. ETSI EN 301 908-18 V17.1.0 (2024-11). IMT cellular networks; Harmonised Standard for access to radio spectrum; Part 18: NR, E-UTRA, UTRA and GSM/EDGE Multi-Standard Radio (MSR) Base Station (BS) Release 17. На заміну ETSI EN 301 908-18 V16.1.0 ; чинний від 08.11.2024. Ніцца, Франція : ETSI (European Telecommunications Standards Institute), 2024. 93 с. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/301900\\_301999/30190818/17.01.00\\_20/en\\_30190818v170100ev.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301900_301999/30190818/17.01.00_20/en_30190818v170100ev.pdf) (дата звернення: 12.06.2025).

5. *ETSI - 3G - 3rd Generation Mobile Technology - UMTS, CDMA Bands. 3rd Generation (UMTS)*. URL: <https://www.etsi.org/technologies/mobile/3g> (дата звернення: 12.06.2025).

6. 4G LTE explained (Long Term Evolution) - Updated. *Thales Group*. 28.12.2023. URL: <https://www.thalesgroup.com/en/markets/digital-identity-and-security/technology/lte> (дата звернення: 12.06.2025).

7. Sultan A. *5G System Overview*. 08.08.2022. URL: <https://www.3gpp.org/technologies/5g-system-overview> (дата звернення: 12.06.2025).

8. Lo Nostro G. Mobile operators warn Europe may fall behind US on 6G without more spectrum. *Reuters*. 2025. 7 трав. URL: <https://www.reuters.com/business/media->

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 94   |

[telecom/mobile-operators-warn-europe-may-fall-behind-us-6g-without-more-spectrum-2025-05-07/](#) (дата звернення: 12.06.2025).

9. *GSM Concepts - What does GSM mean (Global System for Mobile)*. URL: <https://yatebts.com/documentation/concepts/gsm-concepts/> (дата звернення: 12.06.2025).

10. 2nd Generation (GERAN). *ETSI - 2g - Global System for Mobile Communication (GSM)*. URL: <https://www.etsi.org/technologies/mobile/2g> (дата звернення: 12.06.2025).

11. *ITU — International Telecommunication Union. ITU-R: Managing the radio-frequency spectrum for the world*. URL: <https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/itu-r-managing-the-radio-frequency-spectrum-for-the-world.aspx> (дата звернення: 12.06.2025).

12. *UCRF — Ukrainian State Centre of Radio Frequencies. Main activity*. URL: <https://www.ucrf.gov.ua/en/osnovni-napryamki-diyalnosti> (дата звернення: 12.06.2025).

13. *ITU World Radiocommunication Conference 2023 (WRC-23). NTT Technical Review*. 2024. Т. 22, вип. 7. С. 8. URL: [https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr202407gls\\_s.html](https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr202407gls_s.html) (дата звернення: 12.06.2025).

14. Donato R. *A Beginner's Guide to Mobile Communication Infrastructure*. *PacketCoders*. 23.03.2019. URL: <https://www.packetcoders.io/a-beginners-guide-to-mobile-wireless-communication-infrastructure/> (дата звернення: 12.06.2025).

15. *GSM - The Base Station Subsystem (BSS). GSM Base Station Subsystem*. URL: [https://www.tutorialspoint.com/gsm/gsm\\_base\\_station\\_subsystem.htm](https://www.tutorialspoint.com/gsm/gsm_base_station_subsystem.htm) (дата звернення: 12.06.2025).

16. *LTE Architecture Concepts. Full LTE architecture and components*. URL: <https://yatebts.com/documentation/concepts/lte-concepts/> (дата звернення: 12.06.2025).

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 95   |

17. Evolved Packet Core (LTE EPC). *LTE EPC is the Core Network of LTE networks.* URL: [https://yatebts.com/solutions\\_and\\_technology/lte-epc/](https://yatebts.com/solutions_and_technology/lte-epc/) (дата звернення: 12.06.2025).

18. Trick C. *Software-Defined Radios (SDRs) vs. Cognitive Software Defined Radios (CSDRs): Key Differences and Use Cases.* 16.05.2023. URL: <https://www.trentonsystems.com/en-us/resource-hub/blog/software-defined-radios-cognitive-software-defined-radios> (дата звернення: 12.06.2025).

19. Budroweit J. RF Systems on Chip and Mixed-Signal Front-End Devices: Game-Changing RF Technologies for Space Applications. *IEEE Microwave Magazine.* 2023. Т. 24, вип. 2. URL: [https://read.nxtbook.com/ieee/microwave/microwave\\_february\\_2023/rf\\_systems\\_on\\_chip\\_and\\_mixed.html](https://read.nxtbook.com/ieee/microwave/microwave_february_2023/rf_systems_on_chip_and_mixed.html) (дата звернення: 13.06.2025).

20. Poole I. RF / Microwave Circulator / Isolator Basics. *Electronics-Notes.* URL: <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/rf-microwave-circulator-isolator/what-is-an-rf-circulator-isolator.php> (дата звернення: 13.06.2025).

21. Konr B. Quadrature Modulation. *Ham Radio School.* URL: <https://www.hamradioschool.com/post/quadrature-modulation> (дата звернення: 13.06.2025).

22. Kumar R. GMSK – WORLD’S MOST WIDELY USED MODULATION TECHNIQUE. *Cosmos Journal.* 2015. Т. 5, вип. 2. URL: <https://www.cosmosjournal.in/wp-content/uploads/2020/03/CET-JD15-Rajeev.pdf> (дата звернення: 13.06.2025).

23. Samarasekara D. Comparison Between popular SDRs. *Radio Society of Sri Lanka (RSSL).* 18.07.2023. URL: <https://rssl.lk/2023/07/18/popular-sdrs/> (дата звернення: 13.06.2025).

24. *Myriad-RF Wiki. LimeSDR-USB hardware description.* URL: [https://wiki.myriadrfr.org/LimeSDR-USB\\_hardware\\_description](https://wiki.myriadrfr.org/LimeSDR-USB_hardware_description) (дата звернення: 13.06.2025).

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 96   |

25. *Lime Microsystems. LMS7002M.* URL: <https://limemicro.com/silicon/lms7002m/> (дата звернення: 13.06.2025).
26. *Cyclone IV FPGA Device Family Overview.* URL: <https://cdrdv2-public.intel.com/654630/cyiv-51001.pdf> (дата звернення: 13.06.2025).
27. *Myriad-RF Wiki. Lime Suite.* URL: [https://wiki.myriardf.org/Lime\\_Suite](https://wiki.myriardf.org/Lime_Suite) (дата звернення: 13.06.2025).
28. *GNU Radio. Soapy.* URL: <https://wiki.gnuradio.org/index.php/Soapy> (дата звернення: 13.06.2025).
29. *Osmocom. Cellular Network Infrastructure.* URL: <https://osmocom.org/projects/cellular-infrastructure/wiki> (дата звернення: 13.06.2025).
30. *Oracle VirtualBox. Downloads VirtualBox.* URL: <https://www.virtualbox.org/wiki/Downloads> (дата звернення: 13.06.2025).
31. *Canonical Ubuntu. Download Ubuntu Desktop.* URL: <https://ubuntu.com/download/desktop> (дата звернення: 13.06.2025).
32. *Osmocom. OsmoBTS User Manual.* URL: <https://ftp.osmocom.org/docs/osmo-bts/master/osmobts-usermanual.pdf> (дата звернення: 13.06.2025).
33. *Osmocom. OsmoBSC User Manual.* URL: <https://ftp.osmocom.org/docs/osmo-bsc/master/osmobsc-usermanual.pdf> (дата звернення: 13.06.2025).
34. *Osmocom. OsmoTRX User Manual.* URL: <https://downloads.osmocom.org/docs/osmo-trx/master/osmotrx-usermanual.pdf> (дата звернення: 13.06.2025).
35. *Osmocom. OBSOLETE OsmoNITB User Manual.* URL: <https://ftp.osmocom.org/docs/openbsc/master/osmonitb-usermanual.pdf> (дата звернення: 13.06.2025).
36. *Osmocom. OsmoPCU User Manual.* URL: <https://ftp.osmocom.org/docs/osmo-pcu/master/osmopcu-usermanual.pdf> (дата звернення: 13.06.2025).

37. *Nick vs Networking. GSM with Osmocom Part 5: Software BTS with LimeSDR & osmo-bts-trx.* 05.02.2020. URL: <https://nickvsnetworking.com/gsm-with-osmocom-part-3-bts-in-practice-with-limesdr-osmo-bts-trx/> (дата звернення: 13.06.2025).

38. *Nick vs Networking. GSM with Osmocom: NanoBTS.* 31.05.2020. URL: <https://nickvsnetworking.com/2020/05/> (дата звернення: 13.06.2025).

39. *Fairwaves. Software Configuration Manual.* URL: [https://fairwaves.co/products/docs/soft\\_conf.html](https://fairwaves.co/products/docs/soft_conf.html) (дата звернення: 13.06.2025).

40. ETSI GSM 05.05 V5.1.0. Digital cellular telecommunications system; Radio transmission and reception. 1996. 48 с. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_gts/05/0505/05.01.00\\_60/gsmts\\_0505v050100p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_gts/05/0505/05.01.00_60/gsmts_0505v050100p.pdf) (дата звернення: 13.06.2025).

41. *Microwaves101. Voltage standing wave ratio (VSWR).* URL: <https://www.microwaves101.com/encyclopedias/voltage-standing-wave-ratio-vswr> (дата звернення: 13.06.2025).

42. *RG402 Coax Cable with Copper Outer Conductor Specifications.* URL: <https://www.pasternack.com/images/ProductPDF/RG402-U.pdf> (дата звернення: 13.06.2025).

43. *Streamline Series Vector Network Analyzer (A-models). Data Sheet 5992-3606EN.* URL: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-06469/data-sheets/5992-3606.pdf> (дата звернення: 13.06.2025).

44. *Electronic Calibration (ECal) Modules for Vector Network Analyzers.* URL: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-06783/technical-overviews/5963-3743.pdf> (дата звернення: 13.06.2025).

45. *ASM Material Data Sheet. Aluminum 6063-T6.* URL: <https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA6063T6> (дата звернення: 13.06.2025).

46. *Artline.* URL: <https://artline.ua/uk/catalog/3d-printery> (дата звернення: 13.06.2025).

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>PC11.460009.001 ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 98   |

## Додаток А

ПОГОДЖЕНО

Керівник дипломного проекту  
доцент, Шпилька О. О.

\_\_\_\_\_

(дата)

\_\_\_\_\_

(підпис)

ЗАТВЕРДЖЕНО

Завідувач кафедри радіотехнічних пристроїв  
та систем, д.т.н., проф. Жук С. Я

\_\_\_\_\_

(дата)

\_\_\_\_\_

(підпис)

## ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ

«Лабораторна базова станція мобільного  
зв'язку GSM на основі SDR»

## **1. НАЗВА І ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ**

Назва дипломного проєкту «Лабораторна базова станція мобільного зв'язку GSM на основі SDR». Підставою для виконання є завдання, видане кафедрою радіотехнічних пристроїв та систем від \_\_\_\_\_ 2025 р.

## **2. ВИКОНАВЕЦЬ**

Виконавець студент групи РС-11 Прохорчук Олексій Сергійович.

## **3. МЕТА ВИКОНАННЯ ДП І ПРИЗНАЧЕННЯ ПРОДУКЦІЇ**

Мета дипломного проєкту — розробити комплекс апаратно-програмних рішень для створення лабораторної GSM-базової станції на платформі SDR (LimeSDR), що дозволяє у контрольованому середовищі досліджувати й демонструвати принципи роботи мобільної мережі GSM, забезпечувати реєстрацію тестових абонентів, голосові дзвінки та обмін SMS.

Розроблена станція призначена для використання в освітньому процесі та наукових експериментах, з можливістю подальшого розширення функцій (дослідження GPRS/EDGE, тестування нових алгоритмів радіо обробки тощо).

Станція працює у низькопотужному режимі в лабораторних умовах (ізолювана кімната або екранований стенд) з дотриманням вимог радіочастотної безпеки та без зовнішнього виходу в комерційну мережу.

## **4. ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ**

### **4.1. Призначення та функції**

Частотний діапазон: GSM1800 (UL  $\approx 1710 \div 1785$  МГц, DL  $\approx 1805 \div 1880$  МГц).

Рівень вихідної потужності передавача: налаштовуваний у межах, достатніх для роботи в ізолюваному лабораторному стенді з використанням атенюаторів (наприклад, від  $-30$  до  $0$  дБм), з можливістю зниження для уникнення завад.

Підтримка реєстрації принаймні одного-трьох тестових абонентів (SIM-карт із записаними тестовими даними в локальному HLR/AuC).

Забезпечення голосових викликів між ними та передача SMS у тестовому режимі.

Можливість моніторингу сигналів (спектр, IQ-потіки) через інструменти на ПК (GQRX, Wireshark, Osmocom CLI).

Інтерфейс керування: конфігураційні файли Osmocom, командний рядок у VM; графічний моніторинг спектра за потреби.

Живлення SDR від USB та/або зовнішнього джерела відповідно до рекомендацій виробника (LimeSDR).

Система має працювати в екранованому середовищі або з атенюаторами, щоб не створювати завад навколишнім мережам.

Врахування охолодження SDR-модуля під час інтенсивної роботи.

## **4.2. Конструкція апаратної частини**

Платформа SDR: LimeSDR v1.4s із під'єднанням до ПК через USB 3.0.

Віртуальна машина на ПК: Ubuntu (рекомендовано LTS-версію, наприклад 24.04.2) у VirtualBox із налаштованим доступом USB 3.0 до LimeSDR.

Дві незалежні антени (TX та RX) для GSM1800. Монопольна конструкція з довжиною випромінювача  $\approx 35$  мм та відповідною заземлювальною пластиною. Роз'єм SMA та коаксіал RG402. Забезпечити достатню ізоляцію між TX і RX трактами.

Корпус SDR з алюмінієвого сплаву 6063-T6 із ребристою верхньою кришкою для пасивного охолодження, місцем для вентилятора 5В і внутрішніми тепловідвідними елементами (термопрокладки) між гарячими компонентами плати та кришкою, гумовими ніжками для стійкості та зменшення вібрацій. Забезпечити доступ до USB-порту, живлення вентилятору й портів SMA.

Екранування стенда передбачає використання ізольованої (анехогенної) камери або екрана та атенюаторів на шляху від антени, щоб уникнути небажаного випромінення.

Вимірювальна апаратура: VNA (Keysight P5020A) із калібруванням ECAL (N443XD) для перевірки антени (S11, KCX), стенд для вимірювання ДН у двох площинах ( $\varphi=0^\circ$ ,  $\varphi=90^\circ$ ) та 3D.

Корпус антени: основа-земляна пластина (мідь) з отворами для кріплення, монопольний штир, SMA роз'єм, термоусадкова оболонка для кабелю, ізоляція.

Живлення та кабелі: USB-кабель високої якості, кабелі для живлення вентилятора, атенюатори 20–40 дБ для безпечної роботи в лабораторії.

### **4.3. Уніфікація і стандартизація**

Використовувати стандартні модулі LimeSDR, антени з узгодженими параметрами, роз'єми SMA-RP або SMA згідно з 50  $\Omega$  системою.

Програмні компоненти: пакети Osmocom, LimeSuite та SoapySDR з офіційних репозиторіїв (PPA), версії згідно з LTS ОС.

Використовувати стандартизовану елементну базу (термопрокладки, вентилятори 5 В тощо) з метричною різьбою М3 для кріплень.

Документація оформлюється згідно з ДСТУ (наприклад, ДСТУ 3008:2015 для пояснювальної записки, ДСТУ ЕСКД для креслень).

### **4.4. Дизайн, ергономіка та технічна естетика**

Корпус SDR та антена повинні мати акуратний вигляд, без гострих виступів, з урахуванням комфортного монтажу в лабораторному середовищі.

На корпусі SDR передбачити маркування (логотип, позначення версії), але без надлишкового декору.

Розміщення вентилятора, індикаторів (LED) та портів USB/SMA повинно бути зручним для доступу під час налагодження.

Кабельні з'єднання повинні бути акуратно організовані, без зайвої напруги на роз'ємах.

#### **4.5 Експлуатація, технічне обслуговування та ремонт**

Система лабораторної GSM-станції на основі SDR повинна забезпечувати простоту відновлення працездатності при виході з ладу окремих модулів (LimeSDR, антена, вузол живлення тощо). Конструкція передбачає модульну заміну ключових елементів без необхідності повного розбирання всієї системи: заміна SDR-модуля, поновлення прошивки, заміна кабелю чи антени виконується оперативно.

Технічне обслуговування включає перевірку стану антени (імпеданс, КСХ), коректність підключення SDR і живлення, а також оновлення програмного забезпечення (LimeSuite, Osmocom) за стандартним алгоритмом. Ремонт передбачає легку вузлову заміну — наприклад, встановлення нового модуля LimeSDR, заміну термопрокладок чи вентилятора, заміну коаксіального кабелю та роз'єму SMA. Усі обслуговчі операції мають бути доступні в лабораторних умовах без додаткових складних інструментів.

#### **4.6 Безпека життя, здоров'я і довкілля**

При проектуванні та експлуатації слід керуватися сучасними нормами електробезпеки (наприклад, ДСТУ або відповідними стандартами щодо низьковольтного обладнання), вимогами з безпеки роботи з радіочастотними пристроями (обмеження на рівні випромінювання, особливо в навчальному середовищі), пожежної безпеки (використання сертифікованих кабелів, роз'ємів, елементів охолодження). При утилізації відпрацьованих компонентів (блоки живлення, кабелі) дотримуватись вимог щодо електронних відходів згідно з чинними регламентами (наприклад, національні норми з утилізації e-waste). Забезпечити заземлення корпусу, екранування кабелів і дотримання вентиляційних зазорів у корпусі, щоб уникнути перегріву та потенційних ризиків.

## **4.7 Транспортування і зберігання**

Лабораторний комплект (SDR-модуль у корпусі, антена з кабелем та тестовим обладнанням) підлягає транспортуванню в умовах захищеного контейнера з амортизацією, що запобігає пошкодженню друкованої плати і механічних частин. Температурний діапазон при зберіганні: від +5 °С до +40 °С, відносна вологість не вище 80% без конденсації. Транспортувати у закритому футлярі, уникати значних вібрацій і ударів. Зберігати у сухому, провітрюваному приміщенні, захищеному від пилу та агресивних середовищ.

## **4.8 Якість і технічний рівень**

Обладнання та програмні рішення повинні відповідати сучасному рівню лабораторних стендів для SDR-експериментів. Використовувати перевірені компоненти (LimeSDR, сертифіковані коаксіали, роз'єми SMA тощо), офіційні версії прошивок і програмного забезпечення (LimeSuite, Osmocom). Забезпечити надійність роботи під навантаженням (тривала передача GSM-бурстів), точність вимірювань антени та коректність калібрувань. Результати тестувань мають задовольняти очікувані характеристики: належний КСХ антени, усталена реєстрація абонентів і дзвінки GSM.

## **5. ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЮВАНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ**

Оформлення пояснювальної записки та креслень слід виконати відповідно до чинних стандартів (ДСТУ 3008:2015 для текстової документації, норм з креслення механічних частин, структурних і принципівих схем). Документація повинна містити всі необхідні розділи і додатки, що відображають етапи розробки SDR-станції та її елементів (антена, корпус, конфігураційні файли).

Склад конструкторської документації:

1. Текстова частина (пояснювальна записка) із розділами: вступ, огляд GSM-архітектури, функціональне проектування, інсталяція й налаштування ПЗ, проектування антени, конструкторське проектування корпусу, висновки.

2. Графічна документація: антена монопольна (складальний кресленик), структурна схема лабораторної GSM-станції, креслення корпусу SDR (основа та кришка), ілюстрація з макетом корпусу та антени.

3. Перелік джерел літератури та інтернет-ресурсів.

### **5.1 Орієнтовний зміст дипломного проєкту:**

Завдання на дипломний проєкт, Анотація, Зміст, Перелік скорочень, Вступ, Структура мобільної мережі, Функціональне проєктування, Інсталяція та налаштування програмного забезпечення, Проєктування антени для мобільної базової, Конструкторське проєктування, Висновки, Перелік джерел посилань, Додаток А Технічне завдання, Додаток Б Відомість дипломного проєкту, Додаток В Антена монопольна, Додаток Г Специфікація, Додаток Д Випромінювач, Додаток Е Основа корпусу SDR, Додаток Є Кришка корпусу SDR, Додаток Ж Схема структурна.

## **6. СТАДІЇ І ЕТАПИ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУВАННЯ**

Робота виконується в 10 етапів:

| № з/п | Назва етапів виконання дипломного проєкту                        | Термін виконання етапів проєкту | Примітка |
|-------|--|---------------------------------|----------|
| 1     | Написання вступу   | до 07.05.2025                   |          |
| 2     | Розділ 1 “Структура мобільної мережі”                            | до 14.05.2025                   |          |
| 3     | Розділ 2 “Функціональне проєктування”                            | до 21.05.2025                   |          |
| 4     | Розділ 3 “ Інсталяція та налаштування програмного забезпечення ” | до 28.05.2025                   |          |
| 5     | Розділ 4 “ Проєктування антени для мобільної базової станції ”   | до 04.06.2025                   |          |
| 6     | Розділ 5 “Конструкторське проєктування”                          | до 08.06.2025                   |          |
| 7     | Написання висновків  | до 10.06.2025                   |          |
| 8     | Оформлення списку джерел посилань та переліку скорочень          | до 11.06.2025                   |          |
| 9     | Оформлення пояснювальної записки (зведення всіх розділів)        | до 13.06.2025                   |          |
| 10    | Підготовка презентації   | до 14.06.2025                   |          |

## 7. ПОРЯДОК ПРИЙНЯТТЯ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ


1. Представлення проміжних результатів керівнику в узгоджені терміни, зокрема звіту про налаштування SDR, запуск Osmocom-стеку, моделювання та тестування антени, проєкт корпусу.

2. Надання керівнику завершених розділів пояснювальної записки та демонстрація готових блок-схем, конфігураційних файлів і макетів (антена, корпус).

3. Перевірка остаточної версії роботи на наявність плагіату та відповідність стандартам оформлення.

4. Передача готового дипломного проєкту (пояснювальної записки з усіма додатками) на кафедру не пізніше ніж за 3 дні до дати захисту.

5. Захист дипломного проєкту перед екзаменаційною комісією: демонстрація лабораторної GSM-станції на основі SDR, опис отриманих результатів, відповідь на питання комісії.

Виконавець 

Керівник 

Прохорчук О.С. \_\_\_\_\_

Шпилька О.О. \_\_\_\_\_

## Додаток Б

### ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

| № з/п | Формат | Позначення         | Найменування                 | Кількість листів | Примітка |
|-------|--------|--------------------|------------------------------|------------------|----------|
| 1     | A4     |                    | Завдання на дипломний проєкт | 2                |          |
| 2     | A4     | PC11.460009.001 ПЗ | Пояснювальна записка         | 92               |          |
| 3     |        |                    | Технічне завдання            | 8                |          |
| 4     | A4     | PC11.464641.001 СК | Антенна монопольна           | 1                |          |
| 5     | A4     | PC11.460009.002    | Специфікація                 | 1                |          |
| 6     | A4     | PC11.757451.001    | Випромінювач                 | 1                |          |
| 7     | A3     | PC11.469339.001    | Основа корпусу SDR           | 1                |          |
| 8     | A3     | PC11.469339.002    | Кришка корпусу SDR           | 1                |          |
| 9     | A3     | PC11.460009.001 E1 | Схема структурна             | 1                |          |
|       |        |                    |                              |                  |          |
|       |        |                    |                              |                  |          |
|       |        |                    |                              |                  |          |
|       |        |                    |                              |                  |          |
|       |        |                    |                              |                  |          |
|       |        |                    |                              |                  |          |
|       |        |                    |                              |                  |          |
|       |        |                    |                              |                  |          |
|       |        |                    |                              |                  |          |
|       |        |                    |                              |                  |          |
|       |        |                    |                              |                  |          |

|           |           |       |      | PC11.460009.003                                    |        |
|-----------|-----------|-------|------|--|--------|
|           | ПІБ       | Підп. | Дата |  |        |
| Розробн.  | Прохорчук |       |      | Лист   | Листів |
| Керівн.   | Шпилька   |       |      | 1  | 1      |
| Консульт. |           |       |      | КПШ ім. Ігоря Сікорського<br>Каф. РТС<br>Гр. РС-11 |        |
| Н/контр.  | Піддубний |       |      |  |        |
| Зав.каф.  | Жук       |       |      |  |        |