

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

Інститут/факультет: Інститут Телекомунікаційних Систем
(повна назва)

Кафедра Телекомунікацій
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація) 172 — Телекомунікації та радіотехніка
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Валерій ЯВІСЯ
(підпис) (ініціали, прізвище)

«22» січня 2020 р.

**ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Шрамку Даниїлу Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)**

1. Тема роботи: **ПОБУДОВА МОБІЛЬНОЇ ПРОМІЖНОЇ СТАНЦІЇ ЗВ'ЯЗКУ
ДЛЯ ВАЖКОДОСТУПНОЇ МІСЦЕВОСТІ НА БАЗІ SDR,**

керівник роботи: Кайденко Микола Миколайович ст. викладач,

затверджені наказом по університету від «30» березня 2020 р. № 924-с

2. Строк подання студентом роботи: 4-те червня 2020

3. Вихідні дані до роботи: концепція SDR, відомості про умови забезпечення зв'язку, розрахунок з використанням модуля PlutoSDR.

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити)

- 1) Відомості про теорію та технологію SDR;
- 2) Наявні програмно-апаратні рішення для завдання побудови БС;
- 3) Теоретична перевірка готовності проміжної станції забезпечувати зв'язок в обраних умовах;
- 4) Програмно-апаратна реалізація БС.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо)

Слайд_1: Вступ, мета та наслідки результатів дослідження;

Слайд_2: Фізичний зміст задачі побудови проміжної станції, її математична складова;

Слайд_3: Розрахунки параметрів БС;

Слайд_4: Пояснення отриманих результатів;

Слайд_5: Висновки та практична значимість роботи.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-3	Кайденко М.М, ст. викладач	22.01.2020	3.06.2020

7. Дата видачі завдання 22 січня 2020 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Обрання теми та отримання завдання	22.01.2020 — 23.03.2020	
2	Аналіз існуючих рішень	26.03.2020 — 05.05.2020	
3	Дослідження теоретичних засад	10.05.2020 — 14.05.2020	
4	Дослідження існуючих моделей та програмних продуктів для розрахунків	15.05.2020 — 24.05.2020	
5	Розрахунок дальності зв'язку	27.05.2020 — 02.06.2020	
6	Розробка та опис варіантів побудови БС	02.06.2020 — 04.06.2020	

Студент

(підпис)

Шрамко Д. І.

(ініціали, прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

Кайденко М. М.

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Обсяг пояснювальної записки становить 68 сторінок, наявні 25 ілюстрацій, 1 таблиця та 23 джерела за переліком посилань.

Метою роботи є ознайомлення з концепцією SDR, аналіз її роботи в критичних умовах забезпечення радіозв'язку та розробка рішень по побудові мобільної проміжної станції зв'язку для важкодоступних регіонів.

Розглянуто розвиток концепції, її вплив на сучасний стан телекомунікацій та можливості налаштування системи на її основі.

В ході даної роботи було систематизовано дані про SDR та можливі способи реалізації концепції, детально описано її недоліки та переваги в порівнянні з традиційними способами вирішення задач забезпечення радіочастотним зв'язком.

Головним досягненням роботи можна вважати обраний алгоритм реалізації, як проміжної базової станції, так і власної мережі з низькими додатковими витратами на лабораторне, програмне та апаратне устаткування. Результатом роботи є систематизоване рішення по побудові базової станції.

Завдання:

- 1) Ретро-та перспективний аналіз доступної інформації про концепцію SDR;
- 2) Визначення доступних способів побудови базової станції;
- 3) Пошук оптимальних умов розгортання проміжної станції.

Ключові слова: SDR, проміжна станція, базова станція, ліс, гори

ABSTRACT

The aim of the work is to get acquainted with the concept of SDR, analyze its work in critical conditions of radio communication and develop solutions for the construction of a mobile intermediate communication station for hard-to-reach regions.

The development of the concept, its influence on the current state of telecommunications and the possibility of setting up the system are considered.

In the course of this work the data were systematized about SDR and possible ways to implement the concept. In general, its disadvantages and advantages over traditional methods of solving radio frequency communication problems have been described.

The main achievement of the work can be considered the chosen algorithm for the implementation of the intermediate base station with low additional costs for laboratory equipment, software and hardware. The result is a systematic decision to build a base station.

Tasks:

- 1) Retro and prospective analysis of available information about the concept of SDR;
- 2) Identify available ways to build a base station;
- 3) Search for optimal conditions for the deployment of the intermediate station.

Key words: SDR, intermediate station, base station, forest, mountains

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ.....	8
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО SDR.....	12
1.1. Історія розробки відносно Джозефа Мітоли.....	12
1.1.1. Втілення концепції.....	13
1.1.2. Наступні етапи підтримки та розвитку концепції.....	15
1.2. Поняття SDR та відповідність йому.....	16
1.2.1. Основні параметри для визначення SDR-пристрою.....	17
1.3. Відмінність і перевага SDR над традиційним радіо.....	19
1.4. Вплив концепції SDR на мережі.....	23
1.5. Сучасний стан розвитку концепції SDR.....	27
Висновок до першого розділу.....	29
РОЗДІЛ 2 ПРОГРАМНО-АПАРАТНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ПОБУДОВИ SDR ПРИСТРОЇВ.....	30
2.1. Принцип побудови пристроїв «System-On-Chip».....	30
2.2. Розгляд реалізації пристрою в рамках концепції SDR.....	31
2.3. Варіанти програмно-апаратних рішень для розгортання БС.....	32
2.3.1. Технічні характеристики пристрою Adalm Pluto.....	34
2.3.2. Опис проекту OsmocomBB.....	37
2.3.3. Законодавчі обмеження.....	39
Висновок до другого розділу.....	40
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ МІСЦЕВОСТІ ТА РОЗРАХУНКИ ПРЯМОЇ ВИДИМОСТІ.....	41
3.1. Аналіз важкодоступної місцевості на території України.....	41
3.1.1. Проблема низького трафіку.....	46
3.2. Розрахунок можливостей SDR.....	47
Висновок до третього розділу.....	53
РОЗДІЛ 4 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ СТАНЦІЇ.....	54
4.1. Інструкції для реалізації.....	54
4.2. Альтернативні SDR рішення.....	59
Висновок до четвертого розділу.....	61
ВИСНОВОК.....	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	63
Додаток А.....	65
Додаток Б.....	66

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

«р.» : рік/році/року

«к-ть» : кількість;

«телеком.» : телекомунікації/телекомунікаційні/телекомунікаційних;

«МГц» : мегагерц;

«МС» : Мобільна Станція;

«АЗ» : апаратне забезпечення;

«ПЗ» : програмне забезпечення;

«ПЧ» : проміжна частота;

«ПС США» : повітряні сили Сполучених Штатів Америки;

«РЧ» : радіочастота (часто вхідна);

«API» : Application programming interface (програмний інтерфес додатку)

«ISM» : Industrial, Scientific, Medical (радіочастотний діапазон загального призначення, не потребує ліцензаювання);

«IEEE» : Institute of Electrical and Electronics Engineers (інститут інженерів з електротехніки та електроніки);

«LOS» : Line-of-sight (пряма видимість);

«Osmocom» : Open source mobile communications

«SDR» : Software Define Radio;

«S/N» : Signal-to-noise (відношення сигнал/шум);

- *Дані* — відомості, показники, необхідні для ознайомлення з ким-небудь, або чим-небудь, також для характеристики когось/чогось або для певних висновків, чи рішень. Форма представлення знань, інформації.
- *Радіочастотне кінцеве обладнання (RF front)* — загальний термін для всіх компонентів у приймачі, які обробляють сигнал на початковій вхідній радіочастоті (РЧ), перш ніж він переноситься на нижчу проміжну частоту (ПЧ). Включаючи антену та змішувач.
 - *Радіо*:
 1. Технологія бездротового передавання або отримання електромагнітного випромінювання для полегшення передачі інформації;
 2. Система або пристрій, що включає технологію, визначену в першому пункті;
 3. Загальний термін, що застосовується до використання радіохвиль.
 - *Радіовузел* — комплекс апаратури для здійснення радіозв'язку та передавання радіомовних програм по радіотрансляційній мережі.
 - *Програмне забезпечення* — інструкції для виконання програмованим пристроєм обробки, з можливістю їх модифікації.
 - *Фізичний рівень* — рівень всередині бездротового протоколу, в якому відбувається обробка радіочастотних, проміжних частот, або смуг частотних смуг, включаючи кодування каналів. Це найнижчий рівень 7-шарової моделі ISO, адаптований для бездротової передачі та прийому.
 - *Канальний рівень* — це протокольний рівень в програмі, який обробляє переміщення даних між фізичним рівнем та власною мережею.
 - *Програмне забезпечення з управлінням* — програмне забезпечення в радіосистемі або пристрої з можливістю вибору параметрів роботи.
 - *Програмно-визначення* — термін позначає використання програмного забезпечення для обробки в радіосистемі або пристрої для здійснення операційних функцій (про управління мова не йде).

- *Програмно-кероване радіо* — радіо, в якому деякі або всі функції фізичного рівня управляються програмним забезпеченням.
- *Програмно-визначене радіо (SDR)* — радіо, в якому деякі або всі функції фізичного рівня визначені програмно. (by IEEE P1900.1 group)
- *Передавач* — апарат, що виробляє радіочастотну енергію з метою радіозв'язку.
- *Приймач* — пристрій, який приймає радіосигнал і доставляє інформацію, витягнуту з нього.
- *Повітряний інтерфейс* — підмножина сигнальних функцій, призначених для встановлення зв'язку між двома радіотерміналами. Це еквівалент сигналу фізичного рівня бездротового зв'язку та каналного рівня.
- *Форма хвилі (waveform)*:
 1. Набір перетворень, застосованих до інформації, що передається, та відповідний набір змін для повернення отриманих сигналів назад у їхній інформаційний зміст.
 2. Представлення сигналу в просторі.
 3. Представлення переданого радіочастотного сигналу плюс необов'язкові додаткові радіофункції зі всіх мережевих рівнів.
- *Радіогоризонт* — геометричне місце точок, що враховують викривлення радіохвиль в наслідок рефракції, в котрих промені від антени є дотичними до поверхні Землі.
- *Репозиторій* — місце, де зберігаються будь-які дані, з можливістю підтримувати актуальну їх версію.

ВСТУП

Ця робота покликана розробити наукові та технічні засади для створення базової станції для забезпечення зв'язком важкодоступних регіонів. Приводиться основний концепт доступної можливості побудови станції з урахуванням умов важкодоступної місцевості, аналізується умістність такого рішення. Більший акцент ставиться на досліді самих умов у їхньому сучасному стані.

Тут SDR приймає роль апаратної основи для побудови проміжної станції між терміналом та БС. Існує велике різноманіття можливої підтримки різних стандартів прийому та мовлення (завдяки обраній апаратній платформі), проте, обмеження в часі та одноосібність введення роботи спонукає накласти умови та обмеження для концентрації уваги на одному, кращому (на думку автора) напрямку рішення проблеми важкодоступності. Проблема важкодоступності в Україні обумовлена особливостями рельєфу та флори — природними перешкодами на шляху радіохвиль. За рішення вбачається використання проміжної станції, що має більшу спроможність до налаштування. Або на базі пристроїв, організувати власну мережу для задоволення наявних потреб.

Головне питання цієї роботи виглядає так: “Чи здатен модуль SDR забезпечити зв'язок в умовах де, його втрачає мобільний термінал?”.

РОЗДІЛ 1

ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО SDR

1.1. Історія розробки відносно Джозефа Мітоли

Відомо, що Джозеф Мітола у 1991-ому переосмислив термін програмного радіо для плану базової станції GSM, в якому реалізував прототип цифрового приймача базової смуги, що мав в собі масив процесорів, які виконували адаптивну фільтрацію для нівелювання ефектів, котрих зазнавав сигнал після подолання завад, та демодуляцію широкосмугових сигналів [1]. Одні з перших згадок подібного до SDR терміну були зроблені компанією “E-Systems” (з 1995-го “Raytheon Intelligence and Information Systems”, а з 2013-го — “Raytheon Intelligence, Information and Services”). Перед початком 90-их р. ПС США купили ідею у компанії. Тому існувала заборона Мітолі у своїй статті публікувати технічні деталі його прототипу, над котрим він працював у 90-91 роках, бо тоді це вважалося “конкурентною перевагою США”.

Отже, Мітола опублікував доповідь на тему: «Програмне радіо: опитування, критичний аналіз та майбутні напрямки» на національній конференції телекомунікаційних систем (IEEE) у 1992 р., в якій описав принципи архітектури без деталей щодо впровадження. Одразу ж за ним виступав Боб Прилл, який розпочав свою доповідь зі слів: “Джо абсолютно правий у теорії програмного радіо, і ми будемо її”. Попри це, через два місяці було заперечно використання цього терміну. У відповідь віце-прем’єр-міністру маркетингу Алану Джексонну на запитання про наявність передавачів в пристроях, чи в лабораторії, віце-президент Гарленду сказав: “Ні, звичайно, ні — наш пристрій це програмний радіоприймач”. Тому справедливо визнати, що для того аби називати об’єкт статті “радіо” не вистачає трансмітеру. Через те публікація була зупинена, згідно з рішенням корпоративного керівництва.

У цілому, Мітола передбачав ідеальне радіо, фізичними компонентами якого на приймальній стороні були б лише антена та АЦП, а на приймальній — ЦАП і передавальна антена. Усіма іншими функціями можна було б забезпечитись через процесор і керувати ними, перепрограмовуючи останній. [2] За цю утопічну концепцію радіотехнічна спільнота і вважає Мітолу “хрещеним батьком” SDR. А ще він відкрив дану концепцію технології для широкого використання в публічних інтересах.

Стівен Блюст був тим, хто ввів термін програмно-визначеного радіо у своєму патенті 1995 р. Хоча Мітола заперечував цей термін, згодом він погодився на нього із прагматичних міркувань. Зі роботою Стівена пов’язана одна із перших програм, що намагалась втілювати концепцію Мітоли.

1.1.1. Втілення концепції

Всі початкові використання ідеї SDR так чи інакше пов’язані з ПС США. Раніше згадувалось, що “E-systems” продали ідею цьому державному органу, через що описи Мітоли, в свій час, були звужені. У 1996-ому на першому засіданні форуму Модульних Багатофункціональних Систем Передачі Інформації (MMITS) була опублікована відповідь від Bell South Wireless на запит Блюста, бо саме тут працювали над концепцією “хрещеного”. У 1998 р. форум отримає назву “Форум SDR”, а з 2010-го і по сьогодні буде носити найменування “Форум бездротових інновацій”. Він був організований компанією DARPA та ПС США. Вони ж ініціювали один з перших публічних радіо-програмований проект під назвою Speakeasy ще у 1991-ому р.

Перед першою фазою цього проекту було поставлено завдання емулювати десять військових радіосистем, що функціонували в діапазоні від 2-ох до 20-ти [МГц]. Різність цих систем вимагала достатньо швидкого переналаштування (наприклад, між різними видами модуляції: для радіо морських та повітряних сил — амплітудна модуляція, для наземних сил — фазова, для супутникового зв’язку — квадратурна АМ.) Під час випробувань, у

раннього програмно-керованого радіо були помічені проблеми з фільтруванням діапазону випромінення, часті перебої зв'язку та несподіваний вихід з ладу. Та й переналаштування криптографічного процесору було недостатньо швидким, щоб одразу вести кілька радіопередач. Архітектура хоча і була досить практичною, проте її унікальність стала перепоною та підлягала переосмисленню. Ці та інші недоліки відправили на доопрацювання в наступній, другій фазі проекту.

Вона тривала з 96-го по 99-ий р.. За цей час архітектура “SpeakEasy” була вдосконалена на вищезгаданому форумі “MMITS” та надихнула команду інтегрованих процесів (IPT) на програмовану модульну систему зв'язку (PMCS), що мало продовження в розробці “Об'єднаної Тактичної Радіосистеми” (JTRS). Хоча історія проекту JTRS і обірвана у 2011-ому заступником міністра оборони США через неможливість проекту гарантувати досягнення поставлених вимог (а вони були дуже амбіційними та затратними), ми можемо стверджувати, що їх архітектура програмних комунікацій (SCA) значно вплинула на десятиліття розвитку SDR. Так нам відомі приймачі, сумісні з SCA, від таких брендів: Rohde & Schwarz, Thales та Harris, а також сама архітектура не покинута і підтримується програмою «Європейське безпечне програмно-визначене радіо» (ESSOR), створену європейським оборонним агентством.

Повертаючись до проекту SpeakEasyII, пошук більш швидкої та гнучкої до конфігурацій архітектури, а також досягнення більшої компактності, легкості та зменшення вартості — цілі, що стояли перед другою фазою. Демонстраційна модель була готова опісля 15-ти місяців розробки в рамках трьох річного дослідницького проекту. Тоді ж процес розробки було завершено, а модель була направлена на виготовлення з розширеним діапазоном частот від 4-ох до 400-от [МГц].

В цій архітектурі було досягнуто розбиття стандартних інтерфейсів на наступні модулі радіосистеми:

- модуль "радіочастотний контроль" — для управління аналоговими частинами радіо;
- модуль "управління модемом" — керував ресурсами для схем модуляції та демодуляції (FM, AM, SSB, QAM тощо);
- модулі "обробки сигналів" фактично виконували функції модему;
- модулі "обробка ключів" та "криптографічна обробка" керували криптографічними функціями;
- модуль "мультимедіа" здійснював обробку голосу;
- модуль "людський інтерфейс" — для локального або віддаленого управління;
- модуль "маршрутизації" — для мережевих служб;
- модуль "управління" — для безпосередньої взаємодії.

Вартий уваги і спосіб “спілкування” модулів між собою. Центральна операційна система замінювалась протоколом спілкування по PCI шині комп’ютера. Також відомо, що проект вперше застосував FPGA для цифрової обробки радіоданих.

1.1.2. Наступні етапи підтримки та розвитку концепції

Надалі будуть коротко перераховані визначні події в подальшій історії SDR. У 1998-ому р. Nutaq (тоді Lyrtech) об’єднався з MathWorks для створення автоматизованої генерація коду для вбудованої SDR, вирішивши проблему по написанню коду для вбудованих процесорів. На платі під назвою SignalMaster були розміщені DSP та FPGA. Вона поєднувалась з модулями A/D та D/A перетворень і була однією з перших платформ SDR, доступних для лабораторій та університетів.

З 2001-го р. існує GNU Radio — програма з відкритим виконуваним кодом і зараз найпопулярніша і доступна серед розробки SDR.

2004-го р. FCC вперше затвердив комерційну базову станцію на основі SDR. Вона називалась “Anywave” і могла одночасно забезпечувати роботу GSM

і CDMA-носіїв. Того ж року компанією Picochip (зараз Mindspeed Technologies) був представлений PC102 — процесор спеціально розроблений для обробки РНУ, що відкрив шлях для таких компаній як Octasic, Coherent Logix та інших, з їх спеціалізованими процесорами (OCT2224W) та навіть серіями таких (наприклад, HyperX).

Через два роки TI та Xilinx об'єднали зусилля з Nutaq для створення самостійної платформи SDR. Розміри отриманої не перевищували коробку для взуття, що відкрило поле для рухомих експериментів.

Перше комерційне однокипове радіочастотне кінцеве обладнання було представлений компанією Lime Microsystems у 2009-ому. Особливостями таких радіочастотних інтегральних схем (RFIC) можна вважати спроможність налаштування в будь-якому місці серед діапазону від 400 [МГц] і 4 [ГГц] та підтримку смуги пропускання до 28 [МГц], а також забезпечення вибору 16-позиційного банку фільтрів базової смуги.

1.2. Поняття SDR та відповідність йому

Термін *SDR*, згідно з “Форумом Бездротових Інновацій” розуміється як *“...радіо, всі або деякі функції фізичного рівня якого є програмно-визначеними”* [3]. З цього випливає, що радіоприймач позбавляється елементної бази, що раніше відповідала за модуляцію, фільтрацію та іншу обробку, адже тепер її роль виконують математичні алгоритми. Але варто відзначити, що таке визначення фокусується на фізичному рівні обробки сигналу і не сильно пов'язане з радіочастотним кінцевим обладнанням. Налаштувати правильний “фокус” більш точно можна наступним формулюванням:

“SDR — це система, яка використовує набір апаратних і програмних технологій, при цьому деякі (чи усі) функції роботи радіосистеми на фізичному рівні реалізуються за допомогою програмного забезпечення”.

Але в даній роботі під поняттям “програмно-визначене радіо” буде розумітися концепція, згідно з якою радіочастотний зв'язок здійснюється за

допомогою програмного забезпечення (або мікропрограмного забезпечення) задля виконання завдань по обробці сигналів, які зазвичай виконуються АЗ.

Важливим доповненням для розуміння є різниця між програмно-керованою і програмно-визначеною радіосистемою. Основною ідеєю SDR можна вважати незмінність апаратної платформи існуючої радіосистеми, попри можливість зміни бездротових функцій і їх можливостей, або додавання нових таких. Тобто гнучкість і переналаштування в цілому спектрі функціональних можливостей обробки базової смуги, завдяки їх реалізації в ПЗ. Для розуміння в протиположності ставиться поняття “програмно-керована радіосистема” — це типові апаратні системи зв'язку на основі АЗ, які можна певним чином модифікувати за допомогою ПЗ. Прикладом опису такої системи може слугувати наступний опис з сайту allaboutcircuits.com: “...радіо має апаратне забезпечення як для ЧМ, так і для АМ і дозволяє користувачеві вибирати між цими двома за допомогою програмного (або мікропрограмного) налаштування...” [4]. За тим же посиланням можна знайти твердження, що наявність терміну “ПЗ” в терміні “Програмно-визначена радіосистема” не обов'язково значить, що система оперує виключно цифровою формою представлення даних. Цифрова плата може бути використана і для здійснення чисто аналогового радіочастотного зв'язку, наприклад, для передачі аналогових аудіосигналів. З цього слідує, що цифровий канальний рівень на виключно апаратній основі не є SDR. Але, як було сказано вище, це просто доповнення для кращого розуміння.

1.2.1. Основні параметри для визначення SDR-пристрою

Між спорідненими поняттями різниця проведена, але з яких пір звичайне радіо “перетворюється” на програмно-визначене? Як згадувалось вище, мають бути завдання для обробки сигналу, що можна покласти на АЗ, а у цій системі буде забезпечуватись програмно. На шляху передачі існують такі задачі: генерування сигналу основної смуги, генерування сигналу проміжної частоти, генерування сигналу радіочастотного випромінювання (тут розуміється

високочастотний сигнал, який надсилається антені). А на шляху прийому: дискретизації та демодуляції прийнятого сигналу проміжної частоти, дискретизації та декодування сигналу базової смуги (під «декодуванням» розуміється аналіз сигналу базової смуги задля визначення бінарної інформації, представлені кожним символом). В обох напрямках можна вказати фільтрацію, що, звісно, є важливою частиною формування чи обробки сигналу. Проте, якщо у радіосистемі лише фільтрація виконується програмно, то вона не є SDR.

Також SDR може не виконувати функцію повноцінної радіосистеми, але, на думку автора, на це варто бути спроможним, щоб уникнути нарікань на рівні термінології як в випадку “хрещеного батька”. Такому SDR достатньо мати можливість створювати потрібний шлях (для Rx в програмному , а Tx — АЗ), що впливатиме на ціну.

Варте уваги і питання наявності достатнього по потужності процесора. У ролі таких можуть виступати цифрові сигнальні процесори (DSP), програмовані користувачем логічні матриці (FPGA), процесори загального призначення (GPP), програмовані системи на кристалі (SoC — System on chip), інші спеціалізовані програмовані процесори. Здебільшого, питання полягає лише в складності математичних алгоритмів, а від цього залежатиме чи необхідна більш висока частота ядер або потребуються інші апаратні рішення. Якщо перетворення сигналу виконується апаратно, а процесор займається виключно модуляцією/демодуляцією, то таке завдання можуть виконати і менш потужніші (середні) мікроконтролери.

Останнім важливим питанням у визначенні будуть перетворювачі даних. Оскільки радіосигнали це сигнали високої частоти (а з останніми поколіннями стандартів зв'язку це і міліметровий діапазон довжин хвиль), то відповідно і АЦП та ЦАП необхідні з достатньою для завдання швидкістю дискретизації для забезпечення адекватного рівня сигналу у відношенні S/N. Детальний

принцип роботи та його відмінність від традиційного розглянуто у наступному підрозділі.

1.3. Відмінність і перевага SDR над традиційним радіо

Переваги SDR слід перерахувати у відповідності до таких груп призначення:

- виробники радіотехнічного обладнання;
- постачальники радіослужб;
- кінцеві користувачі.

Для виробників радіотехнічного обладнання та системних інтеграторів SDR відкриває шлях до сімейства радіопродуктів з загальною архітектурою платформи (прискорює впровадження нових продуктів), зменшення витрат на розробку ПЗ, через закладену можливість повторного його використання, а також до дебагінгу та/або перепрограмування системи навіть під час її роботи через дистанційний доступ.

Для постачальників радіослужб SDR дозволяє модифікацію існуючої інфраструктури, додаючи нові функції та можливості без великих витрат, зменшити кількісний масштаб логістичної підтримки та операційні витрати за рахунок використання загальної радіо платформи для багатьох ринків. Як і для розробників, існує можливість дистанційного керування для оновлень, доповнень функціональності та оптимізації систем.

Для широкого кола кінцевих користувачів технологія SDR має на меті зменшити витрати на надання кінцевим споживачам доступу до бездротового зв'язку.

Мають місце і негативні сторони цієї концепції. Є неоднозначність, оскільки спрощення мережі та її устаткування може лише посилити централізацію телекому. Вихідний код таких проектів часто розповсюджується під відкритою ліцензією, що надає доступ до суті процесу роботи мережі людям, що мотивуються роботою не тільки в дослідних цілях, але й

зловмисних. Технічно порушувати закон може будь-який володар подібного пристрою, також його можна вичислити. Для цього в Україні працює “Український центр радіочастот”, проте, з наявних даних, неможливо стверджувати, що їх діяльність запобігає злочинній діяльності, бо це орган контролю за ефіром.

А проте, варто глибше поглянути на відмінності, які SDR технологія вносить у традиційну радіосистему [5]. Так традиційний приймач побудований на схемі супергетеродину та виконує демодуляцію, підналаштування несної частоти, виокремлення потрібного фільтрацією і підсилення сигналу (останнє може додатково здійснюватись перед демодуляцією в декілька етапів). Спрощена схема такого приймача розташована на рис. 1.1. Там зображено наступний процес обробки: опісля надходження на антену, аналоговий сигнал зазнає підсилення в обраній області радіочастот. Наступним етапом він змішується з сигналом від локального генератора для переведення сигналу на проміжну частоту. Використовуючи метод “Конверсія вниз”, обирається така частота генератора, щоб її відмінність від частоти отриманого сигналу дорівнювала проміжній частоті (різниця значень частоти прийому і проміжної частоти сигналу).

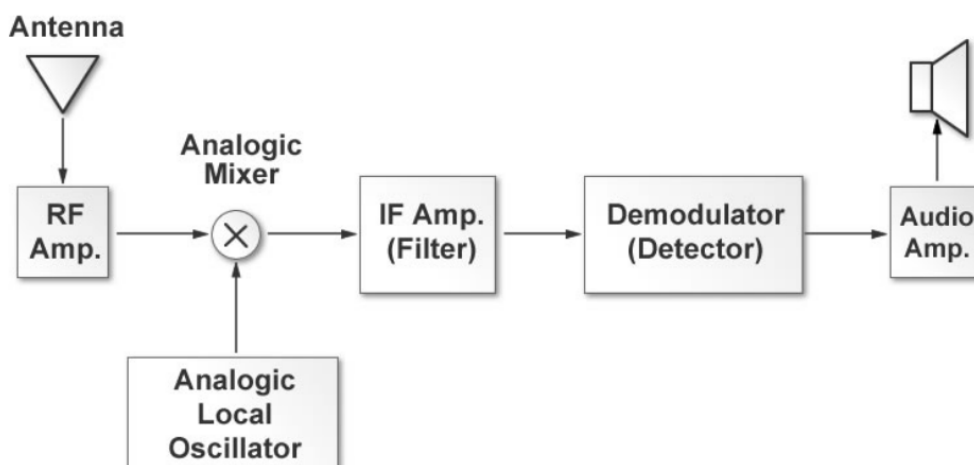


Рис. 1.1 Блок-схема традиційного приймача.

Далі, з допомогою смугового фільтра, обмежується ширина смуги, послаблюючи увесь спектр отриманого, окрім певної його частини (наприклад, для АМ ширина смуги сягає 5 [кГц], а для ФМ — 100 [кГц]). Покидаючи підсилювач проміжної частоти, сигнал потрапляє до демодулятора, де відбувається відновлення модульованого сигналу в залежності від типу модуляції. Останнім етапом обробки на схемі є підсилення гучності і вивід сигналу для відтворення динаміком.

Приймач SDR слідує цій схемі лише в першому своєму елементі (див. рис. 1.2) після антени — радіочастотному тюнеру, котрий виконує функції традиційного приймача до етапу демодуляції, переносячи сигнал на проміжну частоту.

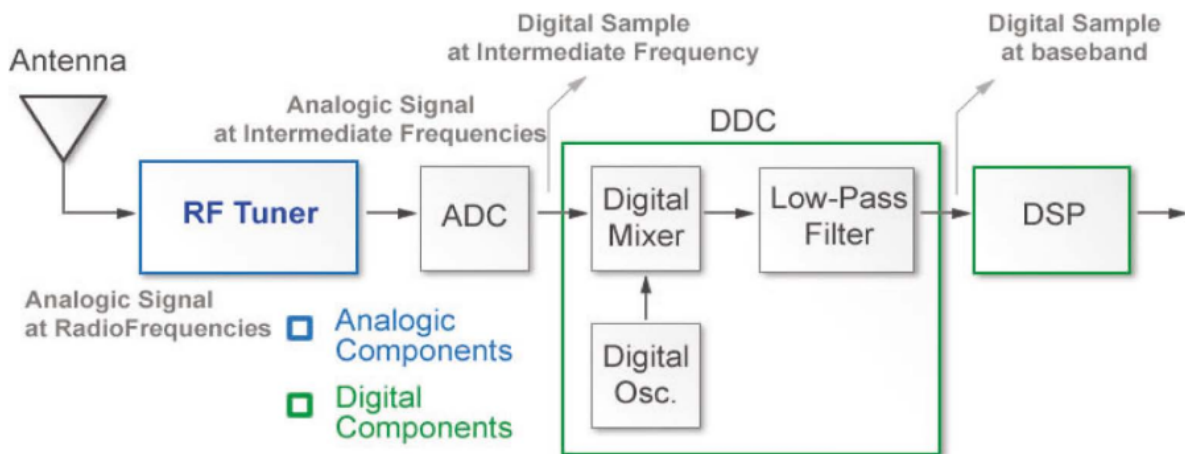


Рис. 1.2 Блок-схема SDR приймача.

Далі змінюється вид сигналу: він перетворюється на цифровий, проходячи через блок АЦП, після чого потрапляє у систему блоків під назвою “Цифровий перетворювач з пониженням частоти” (DDC). До складу входять: цифровий мікшер, локальний цифровий генератор та фільтр нижніх частот з кінцевою імпульсною характеристикою. Перші два змішують цифрові зразки сигналу проміжної частоти, а фільтр обмежує, виділяючи потрібну ширину слуги частот. Як можна зрозуміти, функціонування аналогічне традиційному

мікшеру та фільтру, але реалізація на великій к-ті суматорів, регістрів зсуву та помножувачів, котрі чудово реалізуються на транзисторах. На виході змішувача ми маємо сигнали, що передаються на еквівалент базової смуги через дезінтеграцію в цифрові компоненти лічильника фази (I і Q). Є можливість визначити, яка частина з прийнятого сигналу приймається за корисний. Для цього локальним генератором можна налаштувати зсув в бік або до точки в 0 Гц (при умові наявності такої можливості у генератора). Також можна зменшити частоту (швидкість) дискретизації шляхом поділу цієї частоти на деякий коефіцієнт, слідуючи процедурі децимації. Існує рівняння з якого випливає, що зменшення частоти до 20-ти відсотків не впливатиме на параметр результату “якість” (див. р-ня. 1.1). Опісля, сигнал потрапляє до блоку обробки цифрових сигналів (DSP), котрим частіше за все виступає окреме ПО, проте можна реалізувати його функції в FPGA, втрачаючи трохи універсальності пристрою. Цей блок реалізує функції демодуляції, декодування та інші. На виході маємо готовий до відтворення сигнал.

$$f_{b2} = 0,8 f_b = \frac{f_s}{N} \quad (1.1)$$

де f_{b2} — частота базової смуги після застосування децимації, f_b — частота сигналу до обробки, f_s — частота дискретизації, а N — коефіцієнт.

Уваги заслуговує й передавач, що в значній мірі дорожчий від реалізації суто приймача. Структура зображена на рис. 1.3. Після етапу генерації дискретний сигнал виходить з блоку DSP і потрапляє до “Цифрового перетворювача з підвищенням частоти” (DUC). До його складу входить “Інтерполяційний фільтр”, що підвищує частоту дискретизації оберненою операцією до описаної вище “децимації”. Це робиться задля частотних вимог наступних компонентів. Завдяки “Цифровому змішувачу” та локальному генератору, сигнал зміщується на проміжну частоту і надходить до наступного блоку “Цифро-аналогового перетворювача”. Наступні два компоненти внесуть

таку зміну: аналоговий сигнал буде зміщений у більш високочастотний діапазон, підсилений та розповсюджений через антену.

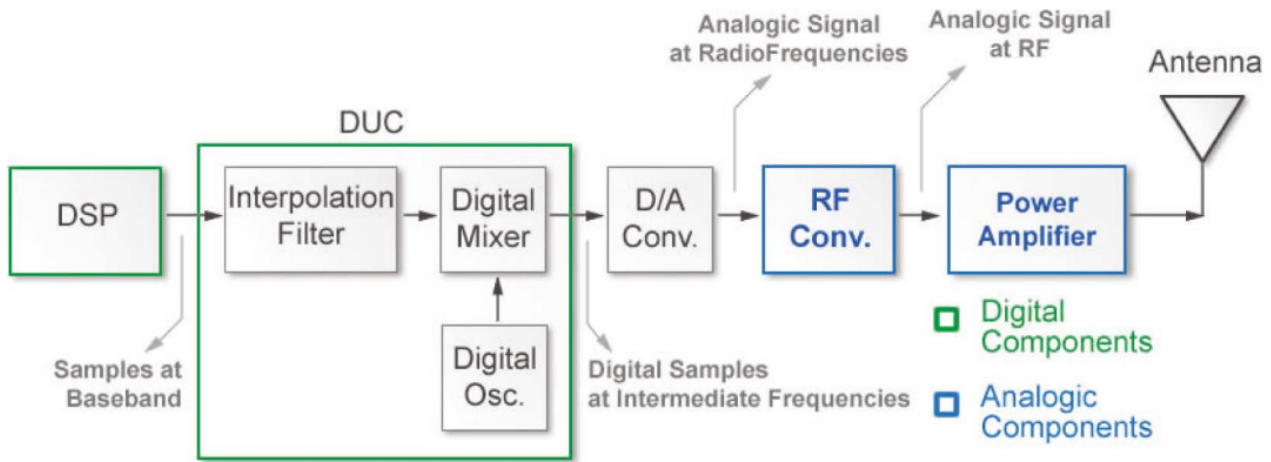


Рис. 1.3 Блок-схема SDR передавача.

1.4. Вплив концепції SDR на мережі

Історично, аби втілити цифрові системи зв'язку та вдало займатися їх налаштуванням, було прийнято стратегію «розділяй і володарюй». Так ця система стала сукупністю рівнів (шарів), де кожен має набір власних функцій, будучи частиною єдиного процесу прийому-передачі інформації. Розбиття останнього на рівні, дало певним спільнотам зосередитись у своїх дослідках на певному з них, приймаючи обмеження, в вигляді поступаючого від них та надходячого до них типів інформації, як належне [6]. Високомобільні платформи — цим стали системи зв'язку з цією стратегією, а з її наслідком студентів знаомлять з перших курсів спеціальностей, пов'язаних з телеком. мережами. Це семи- та п'ятирівневі моделі «Відкритої системи взаємозв'язку» (OSI) та «Протоколу управління передачею/Інтернет протоколу» (TCP/IP) — відповідно. Вони схожі з єдиною відмінністю: у TCP/IP відбувається об'єднання останніх трьох шарів моделі OSI в єдиний. Їх ілюстрація зображена на рис. 1.4.

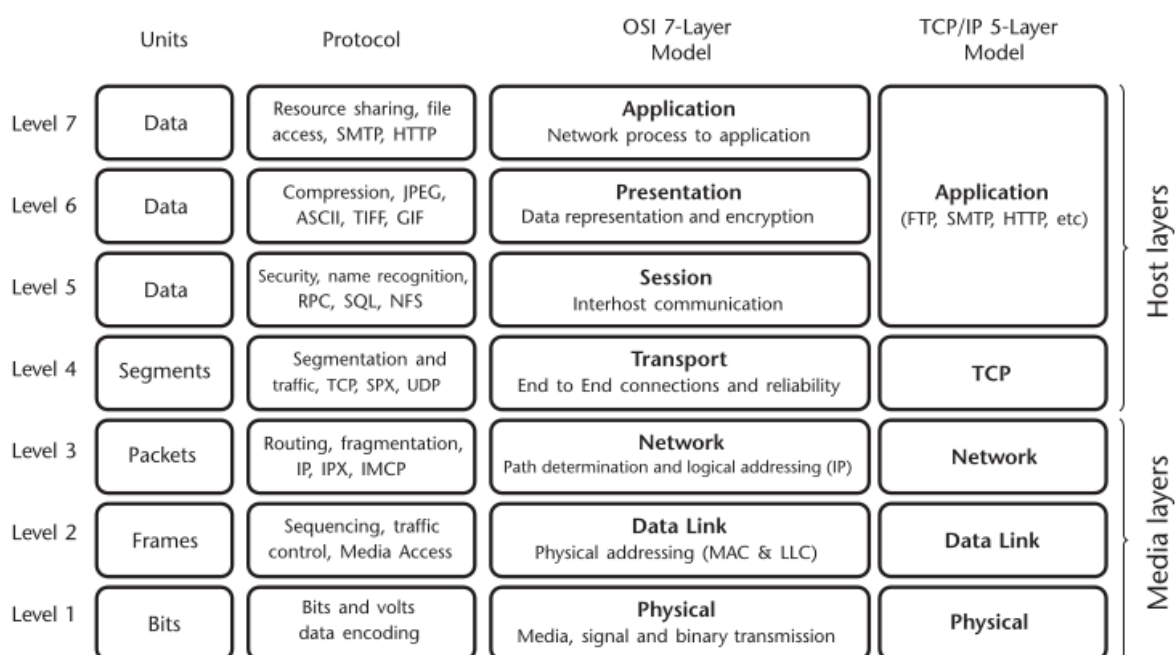


Рис. 1.4. Співставленні блок-схеми моделей OSI та TCP/IP.

Коротко про кожен з п'яти:

- **Фізичний рівень:** оперує окремими бітами, та їх безпосередньо з однієї системи зв'язку в іншу (обраним способом з'єднання). До нього також належить фізичний інтерфейс між пристроєм передачі та середвищем поширення.
- **Канальний рівень:** регулює обмін даними між підключеними пристроями, адресацією між різними системами зв'язку. Також, тут відбувається виявлення помилок та їх виправлення.
- **Мережевий рівень:** відповідає за пакетні переміщення мережевого рівня між різними хостами. Визначає формат дейтаграм, їх маршрути від джерела до призначеної адреси, а також, як маршрутизатори та кінцеві системи діють на дейтаграму.
- **Транспортний рівень:** забезпечує надійність передачі даних, відповідаючи за транспортування повідомлень від додатків у клієнт-серверних шляхах

- Прикладний рівень: сполучує систему комунікацій та інтерфейс користувача для обміну даними. Зазвичай призначається певний сокет, через який програми адресуються між собою.

Дивлячись на дану мадель з точки зору теми цієї роботи, варто не забувати, що хоч ми і зосереджені на фізичному рівні (для БС, в першу чергу, потрібне «залізо»), але вплив каналного — суттєвий. Канальний впливатиме на фізичний таким чином, як показано на рис. 1.5. Наприклад, у 802.11 (Wi-Fi) фізичний рівень фактично розбивається на протокол конвергенції фізичного рівня (PLCP) та підшар фізичної середньої залежності (PMD). Підшар PMD забезпечує передачу та прийом одиниць даних фізичного рівня між двома станціями через бездротовий носій і передає це до PLCP, який інтерфейсує до верхніх шарів MAC, різних об'єктів рівня управління та загальних примітивів управління для максимізації швидкості передачі даних.

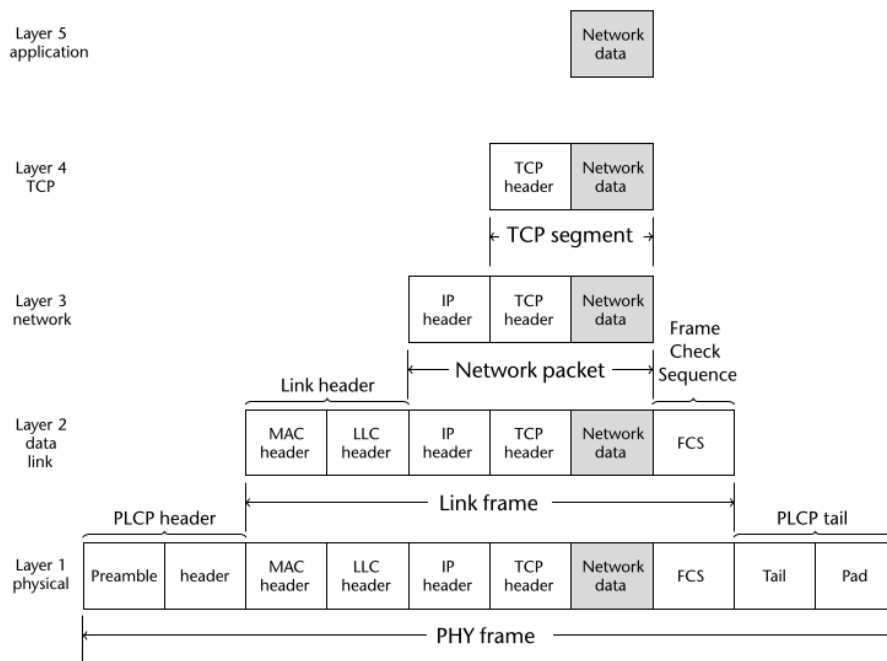


Рис. 1.5 Вплив пакетів SDR у структурі мережі.

В цілому, вплив шарів тим актуальнішим стає, чим більше рівні стають програмно-визначеними. Наприклад, традиційно, мережевий пристрій містить

площини управління та даних, де перша визначає маршрут прямування трафіку, а друга — переносить сам трафік, слідуючи результатам роботи першої.

Програмно-визначенність підтримує розділення цих площин. Це дозволить налаштувати систему управління зовні, не торкаючись особливостей переносимого трафіку, тобто система зможе бути налаштовною через ПЗ, що зможе бути незалежним від її постачальника. Як наслідок, втрачається закритість частини системи та підвищується можливість централізації управління різними об'єктами в межах однієї мережі.

Вище було зазначено, що SDR займає позицію на фізичному рівні, також описано бачення втілювати його концепцію у систему вцілому, тобто мова йде про мережі, що визначені ПЗ (SDN). За цим поняттям стоїть розробка більш гнучкої до динамічних змін архітектури самої мережі (частково, було показано в попередньому прикладі). Зміни зосереджуються на адаптації вищих комунікаційних шарів до переважаючого операційного середовища. Це дає можливість втілювати такі функції, як модифікація маршрутизації та прив'язка до рішення (що є достатнім, але не вичерпним) задач, наданих фізичними рівнями. SDN розділяє мережу на три рівні [7]:

- Прикладний рівень: Цей рівень розміщує програми SDN та спілкується з контролером через стандартизований інтерфейс програмування додатків (API). Існує узгодженість між програмами для налаштування мереж та основною мережею, що звільняє розробників перших від необхідності турбуватися про деталі останньої.

- Керуючий рівень: SDN розділяє площину управління з площиною даних. Спеціальний контролер розташовується на рівні управління за-для того, аби перекладати вимоги рівня додатків і управляти шляхами даних SDN. Підвищується ефективність прийняття рішень додатками завдяки створенній та представленій контролером логічній карті.

- Інфраструктурний рівень: мережеве обладнання (основна мережа, БС, комутатори, маршрутизатори та інші), що реалізують фізичні шляхи передачі даних та передають по ним трафік.

Отже, відносно мережі SDN видно спрощений погляд на взаємодію між частинами моделі, де із знайомих нам від моделі TCP/IP окремими залишилися лише «фізичний» та «прикладний» рівні, інші об'єднані в «керуючий» і забезпечуються комутатором

Сітчасті мережі з „самолікуванням“ — це приклад реалізації концепції SDR в просторі мереж.

Варто зазначити, що зараз подібні мережі будують частіше за новими стандартами або з такими завданнями, де можна поступитися швидкістю як параметром, за для того, аби концепція розвивалась. Утопічна же кінцева реалізація концепції звучить так: «Перейти до наступного стандарту мережевого зв'язку просто натиснувши кнопку „Оновити“».

1.5. Сучасний стан розвитку концепції SDR

За дослідницькими звітами по оцінці впровадження технології SDR 2006-го р. було визначено, що на певних ринках технологія буде обрана через успішне подолання проблеми, що на ньому існує, а не лише через її інноваційність чи новизну. А на даному етапі розвитку, SDR знаходить собі місце або є джерелом ідей для певних концепцій серед тисяч програм воєнного-оборонного спрямування. Стільникові інфраструктури спрямовані на створення “загальної платформи” або специфічних базових станцій, які підтримували б одночасно декілька стандартів інфраструктури, що є частиною концепції SDR.

Кінцеві пристрої згаданої інфраструктури частіше використовують System-on-Chip(про це детальніше у другому розділі), частина з яких реалізується на ядрах цифрової обробки сигналів. Також супутникові модеми вирішують задачі обробки проміжних частот та базової смуги завдяки

програмованим пристроям обробки. В цих системах ідеї концепції SDR призводять до зменшення собівартості, вартості розробки, модернізації та обслуговування, рішення проблем сумісності довільних неоднорідних, розподілених компонентів і підтримки нових стандартів. Дослідження ринку підтвердили готовність технології до роботи як частини систем з динамічним спектром доступу з функціоналом когнітивного чи розумного радіо (дослідження проводились “Форумом Бездротових Інновацій”).

Виглядає так, наче, SDR позитивно впливає на ціну в цілому; на цілі ланцюги розробки та використання. Наприклад, можна зустріти відповідні лабораторні роботи в КПІ та навіть цілий предмет по ознайомленню та вивченню технології, що вимагають мінімум нового лабораторного устаткування та сумісні із наявним. Вважається, що навчальні заклади та інші зовнішні організації (на кшталт, органів стандартизації, урядових, науково-дослідницьких та інвестиційних) підтримують просування технології до кінцевого споживача, дозволяючи здешевлювати вартість навчання, окремого тесту, експерименту чи стартового капіталу (в першу чергу для їх керівництва).

Висновок до першого розділу

Разом з плином часу на ринку збільшується конкуренція, що, як вважається, сприяє розвитку, а представлена вище історія ілюструє стрімкий розвиток наслідку з закону Мура у сфері телекомунікацій. Радіо відтоді стало доступніше, а пристрої отримали не лише кишеньковий розмір, а й дешевший зв'язок. Технології вивели прибори зв'язку на дороги, звідки їм прокладають шлях до повсюдності доступу до мережі одного з операторів.

То є складний шлях аби радіосистемі потрапити у категорію програмно-визначеної. Чого вартує сама розробка відповідного ПЗ, проектування складної друкованої плати, а через те присутній програш в ціні та простоті одночиповим апаратним рішенням. Проте, все це виправдовується гнучкістю системи, що понижує поріг для тих, хто має обмежений досвід розробки радіочастотних систем, даючи вільний простір аматорським системам зв'язку. Багаторежимні, багатодіапазонні та/або багатофункціональні бездротові пристрої, які можна вдосконалити за допомогою оновлення ПЗ, втілюють в собі принцип “декілька в одному”, що, здебільшого, спонукає і слугує в підтримку тенденції довготривалого розвитку концепції за рахунок уваги та праці ентузіастів-власників.

РОЗДІЛ 2

ПРОГРАМНО-АПАРАТНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ПОБУДОВИ SDR ПРИСТРОЇВ

2.1. Принцип побудови пристроїв «System-On-Chip»

У свій час мобільні пристрої перевернули ринок техніки, програмного забезпечення, ігор та інших сфер, пов'язаних з ними. Розібравши більшість з них сьогодні ми знайдемо інтегральну схему [8], у котру інтегровано більшість компонентів пристрою. Це і є прикладом системи на одному чипі (SoC).

На одній платі можна реалізувати увесь електронно-обчислювальний пристрій або більшу його частину, тому їх використання зручне для вбудованих систем та концепції “Інтернету речей”, де вже існуючий пристрій треба доповнити з, часто, мінімальними змінами розміру. Окрім очевидних частин на кшталт CPU, GPU, RAM, Wi-fi, набору портів він повинен оперувати цифровими, аналоговими та змішаними сигналами, виконувати функції обробки частоти, бо інакше це лише “Прикладний процесор”. Такі системи, здебільшого, виготовляють з використанням технологій метало-оксидного-напівпровідника.

Наслідком відмінності від дискретних схем (наприклад від материнських плат комп'ютера) полягає в покращенні продуктивності та зменшені енергоспоживання, поступаючись можливістю для компонентів бути замінені, а отже і модульністю системи, що зменшує ще один параметр — займану платою площу. При цьому така плата, може бути модулем більш складної системи, але на місцях з'єднань збільшуються витрати енергії, площа пристрою та і продуктивність залежатиме від узгодженості модулів між собою.

Такий варіант реалізації схеми підтримує ідею з концепції SDR, тому реалізація пристроїв на них привносить вище перераховані переваги.

Здебільшого варіанти реалізації моночипові, усі компоненти — інтегровані, проте можливість змінювати фізичні параметри антен потребує дискретність даної групи елементів.

2.2. Розгляд реалізації пристрою в рамках концепції SDR

Як було вказано у першому розділі, аби називатись “SDR” пристрій має програмно вирішувати певні завдання. Існують як повноцінні SDR, так і такі, що наслідують лише деяким принципам або критеріям.

Один із варіантів системи з SDR-основою можна побачити у роботі Віндри Сингх Томар і Вімала Бхатія [9], де приймач це RTL-SDR, з’єднаний по USB з платою Raspberry Pi (model B), що є носієм ARM процесору з тактовою частотою 700 [МГц] (за словами авторів, його потужність рівна 300-ам [МГц] процесору Pentium II від Intel). Відповідна схема на рис. 2.1.

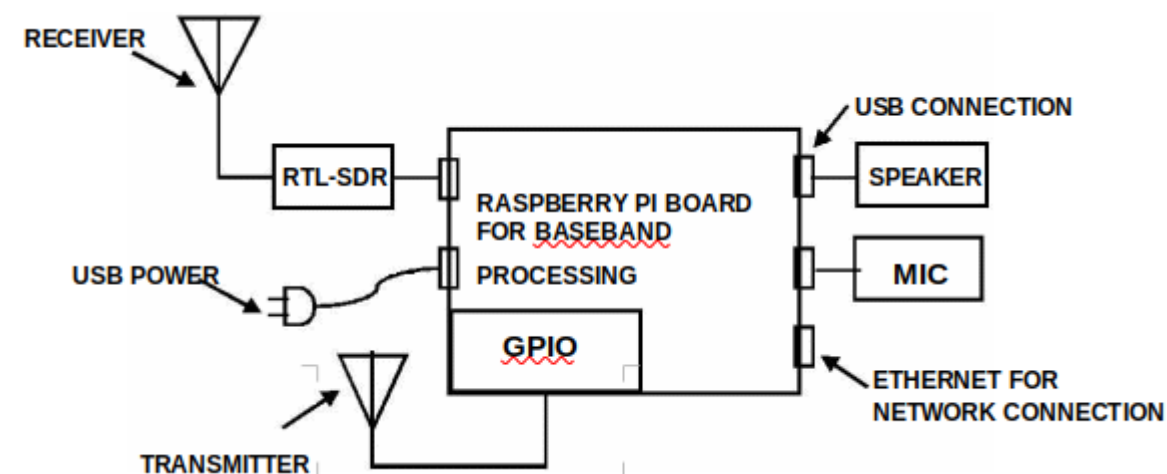


Рис. 2.1 Апаратне рішення з використанням SDR концепції.

Процес взаємодії наступний. I / Q семпли, отримані від RTL-SDR, обробляються на Raspberry Pi з використанням програмної демодуляції (написана на мові C). Драйвер з відкритим вихідним кодом для RTL-SDR дозволяє керувати частотою, пропускну здатністю, підсилювати прийнятий сигнал. На платі реалізовані різні види модуляції сигналу (AM, FM, вузько- та

широкосмугова FM). Приймач реалізований за допомогою штифтів GPIO на платі. Зусиллями A3 Raspberry Pi генеруються FM-сигнали. Модуляція ширини вихідних імпульсів реалізується A3 блока модуляції ширини імпульсів (PWM), що є частиною плати. Набором окремих апаратних частин досягається пропорційність амплітуд вхідного та вихідного сигналів, а частота передачі програмно-налаштовна для гнучкості під службові приймачі.

2.3. Варіанти програмно-апаратних рішень для розгортання БС

На даний момент розвитку мобільних телекомунікацій в Україні виділяються представники трьох поколінь розвитку технології стільникових систем для побудови мережі зв'язку. Серед 2-го покоління на даний момент використовується стандарт GSM, 3-го — стандарт UMTS (в деяких операторів наявні технології стандарту CDMA), 4-го — OFDMA. Поруч з ними розвиваються стандарти сім-карт. Так наявний перехід від стандарту SIM до USIM.

У відповідності до стандартів зв'язку висуваються вимоги до БС, реалізував котрі ми можемо отримати відповідний функціонал у власній. Існують проекти та цілі програмні рішення, метою яких є вищеописане твердження і не тільки. Кожен проект може використовувати реалізацію одного або декількох стандартів. Нижче перелік таких [10].

Проекти для 2-го покоління стандартів:

- OpenBTS: реалізація GSM та GPRS стандартів;
- YateBTS: реалізація доступу до GSM/GPRS мережі;
- evilBTS: спеціальна версія Yate та YateBTS розроблена спеціально для пристрою BladeRF;
- FakeBTS: проект, ціллю котрого є пошук псевдо БС, тобто підвищення безпеки.

- OsmocomBB: проект, що охоплює стандарти 2-го та 3-го покоління і не тільки.

Проекти для 3-го покоління стандартів:

- OpenUMTS: своєрідна версія стандарту 3GPP UMTS, але з відкритим вихідним кодом.

Проекти для 4-го покоління стандартів:

- OpenLTE: аналогія стандарту 3GPP LTE, але знов-таки з відкритим вихідним кодом.

- OpenAirInterface: ціла юридична особа, на меті котрої впровадження екосистеми ПЗ та АЗ з відкритим кодом для основної мережі (EPC), мереж доступу та користувацького обладнання (EUTRAN) стільникових мереж 3GPP. Цікава особливість: хоча системи з відкритим вихідним кодом, проте реалізована взаємодія з будь-якою частиною обладнання мережі з закритим кодом;

- srsLTE: набір програмного забезпечення, точніше бібліотека LTE для SDR UE та eNodeB, розроблені компанією SRS;

- IMDEA-OWL (Online Watcher of LTE): це вільний декодер каналу управління LTE з відкритим кодом, розроблений Інститутом мереж IMDEA. Заснований на srsLTE.

Надамо короткий перелік пристроїв, що можуть слугувати в ролі радіочастотної частини БС:

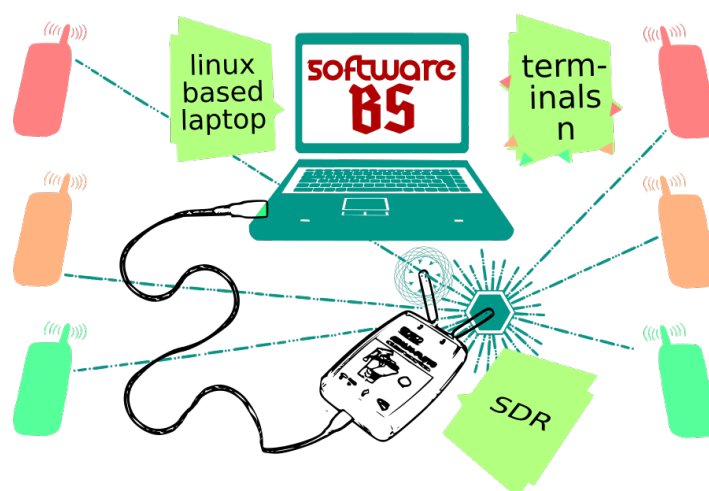
- ◆ BladeRF;
- ◆ PlutoSDR;
- ◆ RTL-SDR;
- ◆ HackRF;
- ◆ LimeSDR;
- ◆ USRP.

Отже, схема БС буде виглядати приблизно так, як показано на рис. 2.2.

Ця конфігурація є простою, опирається, здебільшого, на наявне технічне

устаткування, підтримує гнучкість під доступний радіочастотний модуль, як апаратно, так і програмно. Усе перелічене вище ПЗ можна знайти у відкритому доступі, більшість з якого розповсюджується під відкритими ліцензіями, що дає свободу модифікувати та виправляти помилки власноруч.

Рис. 2.2. Схематичне зображення БС в даній роботі



2.3.1. Технічні характеристики пристрою Adalm Pluto

Компанія-розробник *Analog Devices* (AD) повідомляє, що дана серія пристроїв створена для розширення практичних навичок під час здобуття освіти у сфері телекомунікацій: ролі допоміжної платформи для викладачів і основної для самостійного навчання. Для студентів вартість цього пристрою в

діапазоні 99-150\$, що значно доступніше за аналогічні по якості та можливостям продукти.

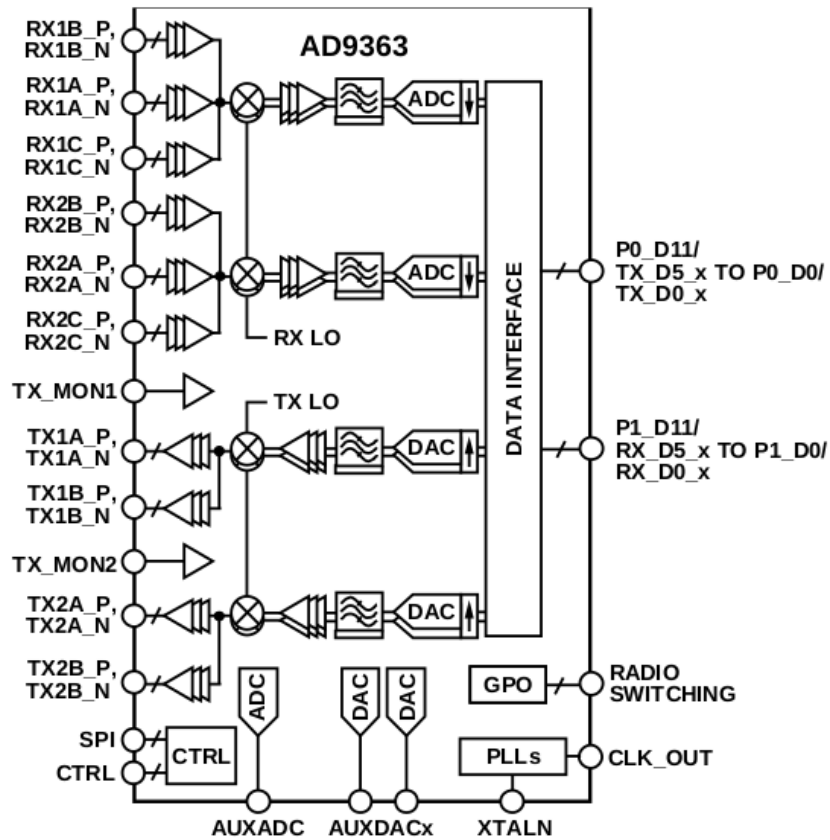


Рис. 2.3
Фізичне втілення PlutoSDR

PlutoSDR реалізований на спритному передавачі моделі **AD9363** [11], що створенна для програм зв'язку 3G та 4G в ролі фемто-БС. За описом AD, це простий пристрій, що працює як лабораторія. Має інтуїтивний інтерфейс. Його габарити дозволяють стверджувати про портативність пристрою, бо пластикový корпус не перебільшує розмірів вже звичних сучасним людям PowerBank (об'ємом в 20 000 mAh) чи переносних твердотільних накопичувачів. Діапазон його роботи охоплює сигнали від 325 [МГц] до 3,8 [ГГц] зі швидкістю до 61,44 мегапроб в секунду (MSPS). Пропускна здатність до 20 [МГц]. Присутні незалежні канали прийому/передачі (жіночий SMA, 50 Ом), що дозволяють використовувати дуплексний або напівдуплексний режими мовлення. Робота через драйвер libiio дозволяє пристрою взаємодіяти з ОС Windows та Linux через наявний порт USB версії 2.0 (він же слугує для живлення пристрою). А відкритий вихідний код прошивки, що побудована з завантажувача операційної системи Das U-Boot, ядра Linux та Buildroot (набору патчів та «make-файлів») дозволяє вільно запускати, копіювати, вивчати, вдосконалювати та змінювати мікропрограмне забезпечення.

Підтримує наступні мови програмування: API C, C ++, C # і Python. Взаємодіє за такими інструментами та програмами як MATLAB, Simulink, GNU Radio, Osciliskope. З ним у комплекті йдуть дві антени (з діапазонами 824 - 894 [МГц] та 1710 - 2170 [МГц]), USB та SMA (15 [см]) кабелі. Відомі навчальні матеріали, що охоплюють наступні теми: положення літака ADS-B, аналіз GSM, отримання знімків (коли супутник Meteor-M2 був цілим), прослуховування сигналів TETRA і так далі.

Рис. 2.4 Функціональна блочна діаграма передовача AD9363



Даний пристрій буде використовуватись для проведення оціночних розрахунків можливостей SDR, проте для розділу з побудовою БС він не підійде.

2.3.2. Опис проекту OsmocomBB

Парасольковий проект [12], до складу котрого входить програмне забезпечення та інструменти, що реалізують різні стандарти мобільного зв'язку, включаючи GSM, DECT, TETRA та інші. В рамках цього проекту вони можуть працювати, як окремо, так і утворювати цілісну інфраструктуру. Він спрямований на створення відкритого ПЗ під ліцензією GPL для стеків протоколів GSM / 3GPP та мережевих елементів, бажано, в чисто програмних реалізаціях, що працюватимуть на комп'ютерах загального призначення. Все ПЗ доступне у формі вихідного коду для будь-кого. Даний напрямок суперечить класичним постачальникам телекомунікаційних послуг. Там, переважно, кожен мережевий елемент реалізований як обладнання чи ПЗ “за замовчуванням”; без можливості їх розуміння чи зміни, а кожна функція потребує сплати ліцензійної вартості.

Впровадження інфраструктури почалося з реалізації A-bis інтерфейсу для експериментальних і дослідницьких цілей (зараз це стало підпроектом OpenBSC), але з тих пір рамки проекту були розширені і багато інших інтерфейсів та мережевих елементів стандартів GSM, GPRS, EDGE та Мережі UMTS / HSPA були реалізовані на тих самих засадах.

OsmoNITB — це версія (модель/режим) проекту OpenBSC, в котрій розуміється, що рознесення сервісів системи мобільного зв'язку не потребується, бо моделювання БС буде виконуватися на одному комп'ютері загального призначення. В даній роботі буде використовуватись ця частинна проекту “Інфраструктура стільникової мережі Osmocom” як програмна платформа БС.

Рис. 2.5 Діаграма загальних можливих конфігурацій програмного забезпечення Osmocom.

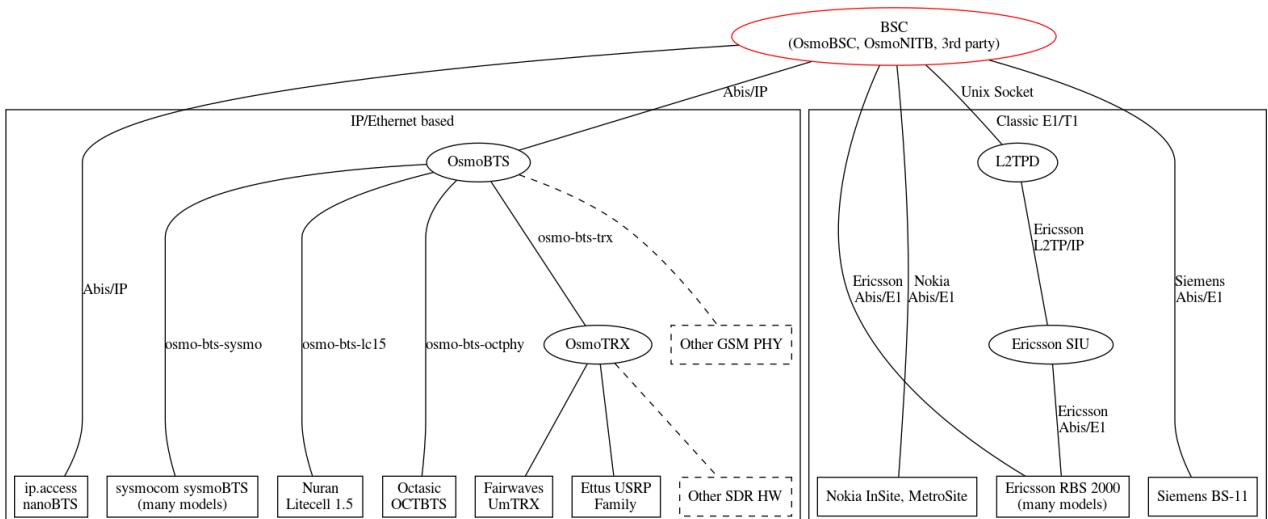


Рис. 2.6 Діаграма взаємодії контролеру БС з іншими програмно-апаратними частинами проекту побудови.

2.3.3. Законодавчі обмеження

Існують умови, де будь-хто може вільно користуватись усім спектром радіочастот. Наприклад, це тестова лабораторія, ізольована від зовнішнього середовища, клітка Фарадея, що виконує подібну функцію, чи достатньо віддалений, важкодоступний регіон. Тобто, такі умови зводяться до заборони використання радіочастотного спектру у більшості випадків. Проте, кожна країна обирає вільні діапазони, що відводяться для загального, вільного користування. Україна не виключення [13]. Тому серед доступних маємо такі діапазони:

- LPD (Low Power Device).. 433,05 – 434,79 [МГц] < 10 [мВт]
- PMR (Private Mobile Radio).. 446,0 – 446,1 [МГц] < 0,5 [Вт]
- VHF .. 144-146 [МГц]
- UHF .. 430-440 [МГц]
- СВ .. 27 [МГц], < 4 [Вт]

Висновок до другого розділу

Даний розділ вміщує в собі інформацію про загальний підхід в побудові високоінтегральних схем, які все регулярніше стають основою цифрових пристроїв або таких, що пов'язанні з обробкою інформації. Було розглянуто принцип роботи пристрою, котрий побудований на інтегральній схемі Raspberry Pi. Пояснено взаємодію елементів, що дозволяють виконувати функцію ретрансляції сигналу.

Описана схема проміжної БС в лабораторних умовах дозволяє зрозуміти спосіб реалізації та використання такої на практиці. Її загальна гнучкість та достатність доведена наявністю відповідних програмних та апаратних рішень, котрі були перераховані.

Перелічені деталі одного апаратного рішення, на основі котрого будуть проведені розрахунки в третьому розділі. Обрано програмний пакет для прикладу реалізації БС та надано схеми взаємодії його компонентів між собою.

Надана стисла інформація про вільні від ліцензування діапазони частот, мовлення на яких є єдиним рішенням при реалізації власної БС.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ МІСЦЕВОСТІ ТА РОЗРАХУНКИ ПРЯМОЇ ВИДИМОСТІ

3.1. Аналіз важкодоступної місцевості на території України

Сам термін “важкодоступна місцевість” у телекомунікації прийшов з оборонної справи. В деякому розумінні це місцевість, де без спеціальних заходів не може пройти сільськогосподарські та/або інші види транспорту, а прокладання кабелю (чи інший спосіб забезпечення зв’язку) потребує більш складних підготовчих заходів. Розрізняють такі причини формування важкодоступності:

- особливості рельєфу;
- кліматичні особливості;
- постійність природних явищ;
- природо-захисні заходи;
- антропогенні катастрофи.

В Україні наявні території, що постраждали в наслідок людського впливу. Найболючішим з них є так звана “Зона відчуження” — радіусом в 30-ть км. від Чорнобильської АС і наслідок подій 1986-го р. Зв’язок там присутній його забезпечують оператори “lifecell” та “Vodafone”. За картою покриття (рис. 3.1 та 3.2) бачимо, що територія покрита як 3G зв’язком, так і 4G для більшої частини території “зони”, проте не всієї (навіть в діапазоні GSM передавачів).

Рис. 3.1 Мапа покриття зв'язком території “Зона відчуження” операторами Vodafone та lifecell стандартами 3-го та 4-го покоління.

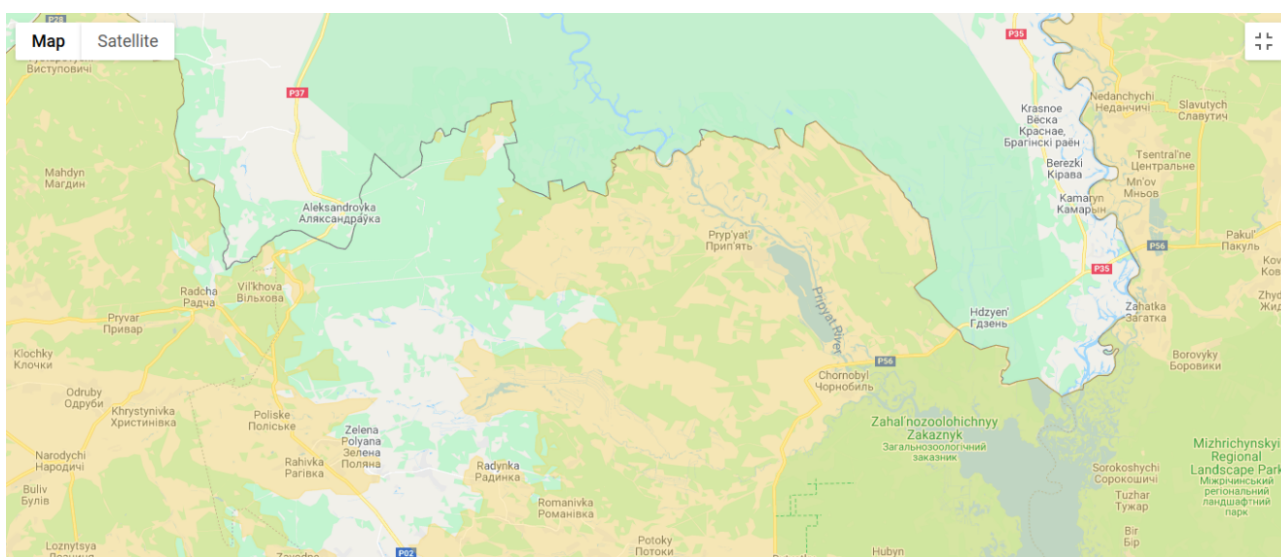


Рис. 3.2 Мапа покриття зв'язком території “Зона відчуження” оператором lifecell стандартом 2-го покоління.

З ціллю збереження представників дикої природи та недоторканих територій в Україні присутні заповідники, національні парки та інші види територій, що не збирають довкола себе одночасно великої кількості людей. Недоторканість природи дозволяє місцевості зберігати свої природні та рельєфні особливості, що часто є завадою для забезпечення зв'язку, через неможливість встановлення

на території будь-яких споруд інфраструктурного типу та, насамперед, БС. До того ж, територія країни на 16-ть відсотків зайнята лісами [14], діелектричні властивості яких підтверджуються виходячи з властивостей цього виду середовища. Тут варто зупинитись детальніше.

З теорії електродинаміки [15] відомо, що електричні властивості будь-якого середовища оцінюються відносними діелектричною і магнітною проникностями, а також питомою електропровідністю ($\epsilon_{гзм}$, $\mu_{гзм}$, $\sigma_{зм}$). При цьому, більшість видів середовищ на Землі вважають немагнітними, тобто величину $\mu_{гзм}$ прирівнюють до значення "1". А дві величини, що залишилися, не дають повної характеристики умовам поширення радіохвиль, як в Землі, так і уздовж її поверхні, тому середовища розрізняють по співвідношенню щільності струму зміщення ($J_{зм}$) та струму провідності ($I_{пр}$):

$$\begin{aligned} \left| \frac{J_{зм}}{I_{пр}} \right| &= \frac{\omega \epsilon_a}{1 * \sigma} = \frac{2 \pi f \epsilon_0 \epsilon_r}{1 * \sigma} = \frac{2 \pi c \epsilon_0 \epsilon_r}{\lambda \sigma} = \\ &= \frac{2 \pi \times 3 \times 10^8 \times 10^{-9} \epsilon_r}{36 \times \pi \lambda \sigma} = \frac{\epsilon_{гзм}}{60 \lambda \sigma_{зм}} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Серед основних типів середовищ виділяють:

- Ґрунти;

На електричні властивості, здебільшого, впливає здатність поглинати вологу і утримувати її. Хімічний склад в свою чергу не настільки впливовий. Нижче одного метра глибини вологість вважається постійною, а вище — змінюється протягом року.

- Покрови ґрунтів;

Рослинність, лід та сніг можуть розглядатися як напівпровідні шари, якщо знаходяться на поверхні ґрунту.

- Вода.

Електричні властивості залежать від солоності. Чим більше, тим вище питома провідність.

У табл. А.1 (у додатках) наведено орієнтовані значення $\epsilon_{гзм}$, $\sigma_{зм}$ для різних земних покривів дециметрового, сантиметрового та міліметрового діапазонів.

При умові, що $\frac{\epsilon_{гзм}}{60 \lambda \sigma_{зм}} \gg 1$, ділянка земної поверхні — діелектрик,

при $\epsilon_{гзм} \approx 60 \lambda \sigma_{зм}$, вона — напівпровідник, а за $\frac{\epsilon_{гзм}}{60 \lambda \sigma_{зм}} \ll 1$, ми оцінюємо її як провідник.

Приблизний розрахунок по формулі (2.1) з значеннями табл. А.1 показує, що ліс, як середовище, має діелектричні властивості для діапазону частот від 890 до 2200 [МГц]:

$$\frac{\epsilon_{гзм}}{60 \lambda \sigma_{зм}} = \frac{1,009}{60 \times 0,3371 \times 10^{-6}} = 49886.285, \text{ що значно більше від } 1 \quad (2.1.1)$$

$$\frac{\epsilon_{гзм}}{60 \lambda \sigma_{зм}} = \frac{1,02}{60 \times 0,1364 \times 10^{-5}} = 12463.3431, \text{ що також значно більше від } 1 \quad (2.1.2)$$

Варто поглянути на властивість вологих ґрунтів для цього діапазону:

$$\frac{\epsilon_{гзм}}{60 \lambda \sigma_{зм}} = \frac{27}{60 \times 0,3371 \times 3 \times 10^{-1}} = 4.4497, \text{ що більше від } 1 \quad (2.1.3)$$

$$\frac{\epsilon_{гзм}}{60 \lambda \sigma_{зм}} = \frac{23}{60 \times 0,1364 \times 4 \times 10^{-1}} = 7.0259, \text{ що більше від } 1 \quad (2.1.4)$$

Як відомо, діелектрики не проводять струм, а радіохвилі, подібно до світлових хвиль зазнають заломлення та розсіювання від переходу до межі іншого середовища через його неоднорідність, що негативно виражається на можливостях радіозв'язку. Зі знайдених значень ми бачимо, що вільна від лісистого покриву місцевість є більш придатною для забезпечення радіозв'язку. Тому за для покращення якості сигналу іноді достатньо просто вийти на галявину посеред лісу.

Повертаючи думку до важкодоступних місцевостей, на заході та на півдні розташовані Карпати та кримські гори — відповідно. Насамперед, довжина хвиль дециметрового діапазону, що використовується для мобільного зв'язку, знаходиться в межах від 3-ох до семи дециметрів. Для довгих хвиль ліс виконує роль хорошого провідника, але не для коротких, бо там тандем іоносфери і земної поверхні не відповідає моделі діелектрика. Ліс не здатен спрямовано відбити сигнал, тож він швидко втрачає потрібний напрямок. Щодо

ультракоротких хвиль, то тут і іоносфера виходить за межі моделі діелектрика, бо для цього діапазону вона “прозора”. Так лісиста місцевість Карпат є чудовим фільтром усіх високих частот на певній відстані, через що, потрібно вибирати найвищі точки. Та бажано, щоб останні були по-одинокі, бо будь-яка сусідня гора затинить область за собою. Більша к-ть БС необхідна для нівелювання цього ефекту в місцях, де неможливий інакший шлях, а складність доступу зумовлена ерозією ґрунтів, крутизною гірських поверхонь, лісистістю та іншими чинниками впливає на ціну однієї БС, а отже на кінцеві тарифи оператора. В цілях балансу між ціною та якістю оператори закономірно вибирають ті вершини та регіони, що мають найбільшу потребу, населені достатньо аби покрити витрати в найкоротший термін, покриваючи доступну більшість території.

Усі перераховані вище причини можуть групуватися, як в випадку Карпат, що поєднують в собі чотири основних, з перелічених на початку підрозділу. Це пояснює факт того, що даний регіон є одним з найбільш “чистим” від штучного високочастотного і надвисокочастотного випромінювання. На рис. 3.3 зображені схематичні карти рельєфу Карпат в розрізі за для більш точної ілюстрації особливостей, ніж на супутникових знімках. А в додатку Б можна спостерігати карти покриття регіону гір трьома операторами зв’язку технологіями 3G та 4G.

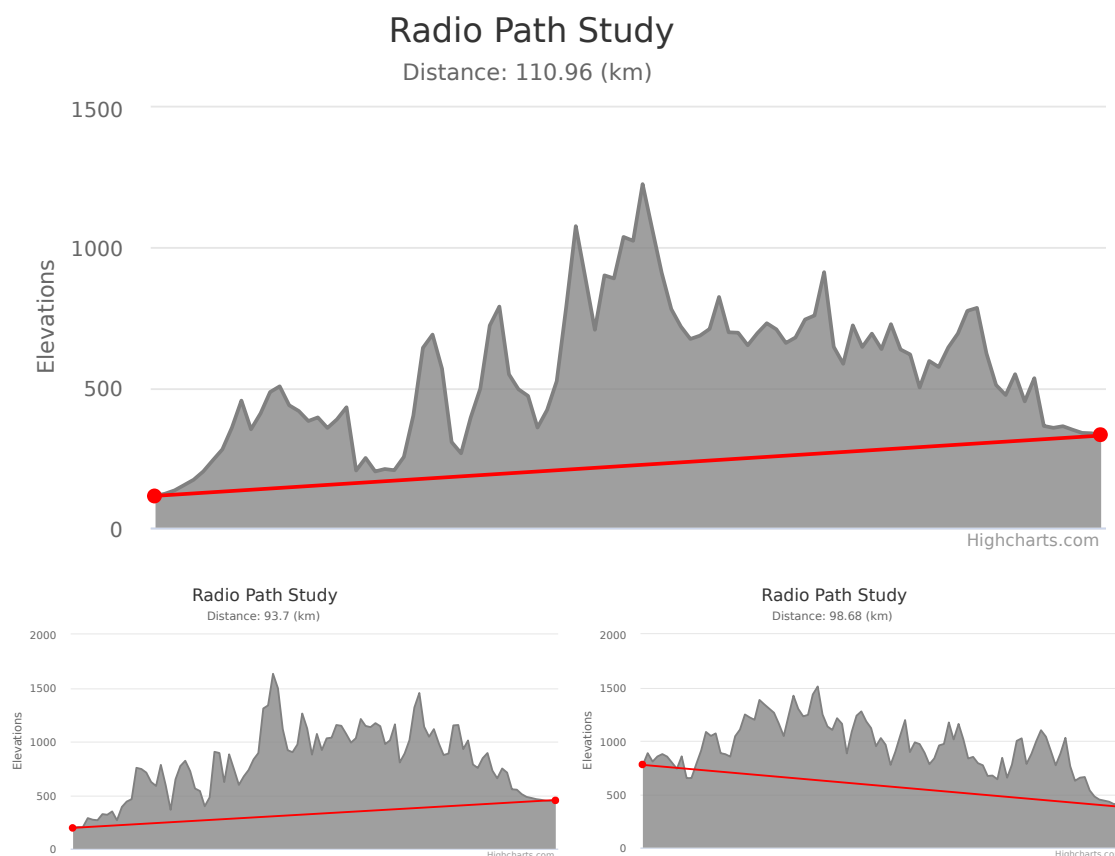


Рис. 3.3 Зображення рельєфу Карпат у розрізі.

3.1.1. Проблема низького трафіку

Трохи вище було згадано, що чинником, котрий впливає як на формування місцевості, так і на стан телекомунікацій там, є численність поселення та його віддаленість від адміністративних центрів. Закономірно, що існує залежність між кількістю людей та площею, на якій вони перебувають. Умовно можемо виділити таку характеристику як “середній достаток на кілометр”. За цим показником приблизно можна помітити, що деяка територія не виправдає певних вкладень в ту чи іншу інфраструктуру. Наприклад, жителі пустелі не будуть зацікавлені в паливній інфраструктурі більше ніж необхідно витратити на дизельний генератор, тому будувати мережу колонок буде вигідніше ближче до міст, де зростає потреба в паливі. Теж саме стосується і телекому. Якщо в умовному карпатському селі в межах чорногірського хребта ще п’ять років проживатиме лише 15 сімей, то дешевше буде прокласти кабель

або організувати одну точку з'єднання із мережею, а ніж будувати ускладнену систему БС (через рельєфні особливості місцевості), наймати або навчати додаткових співробітників для їх обслуговування та інші вкладення. На виході маємо проблему — низький трафік. Ця проблема не є надважливою для більшості обставин, бо де потребується терміновість, там можна обійтись і короткими повідомленнями. До того ж, ще зі стандарту GSM йде розподілення, за яким виділяється певний діапазон трафіку на абонента, котрий не буде переданий іншому допоки сеанс зв'язку не буде односторонньо завершений. Виділяється можливість вирішити її, організував власну мережу на необхідній території, і це лише один з можливих способів рішення.

3.2. Розрахунок можливостей SDR

Ми маємо справу з дециметровими хвилями, що диктують першу вимогу: лише пряма видимість. Тобто, для забезпечення стабільного зв'язку, між антенами передавача та приймача не має бути жодної критичної перешкоди аж до радіогоризонту. Вкрай впливовими параметрами для забезпечення максимально можливої дальності є енергетичний бюджет каналу, позиціонування антен, а також їх висота відносно поверхні Землі. Їх супроводжуватимуть: вибір оптимальної частоти серед діапазону 0,169 - 2,4 [ГГц] (ISM), робоча частота, законодавчі обмеження по максимальній вихідній потужності, характеристики антен, конфігурація радіо, загасання в середовищі поширення.

Визначимо впливові числові значення для розрахунку:

- Швидкість світла у вакуумі.

$$c = 299,972458 \times 10^6 [м/с] \quad (2.2)$$

- Довжина хвилі.

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{c}{f} = \frac{299,9725 \times 10^6}{0,169 \times 10^9} \dots \frac{299,9725 \times 10^6}{2,4 \times 10^9} = \\ &= \frac{299,9725 \times 10^{-3}}{0,169} \dots \frac{299,9725 \times 10^{-3}}{2,4} = 1,7750 \dots 0,1250 [м] \end{aligned} \quad (2.3)$$

- Радіус Землі ($R_0^{[км]}$).

Розрізняють такі[16]: екваторіальний(6378,1370 [км]), полярний (6356,7523 [км]), середній розраховується за формулою:

$$R_{cp} = \frac{2e+p}{3} = \frac{2 \times 6378,1370 + 6356,7523}{3} = 6371,0088[км] \quad (2.4)$$

- Висота над землею передавальної та приймальної антен ($h_1^{[м]}$, $h_2^{[м]}$).

Будемо вважати оптимальними висотами для гірської місцевості значення 150 та 3 [м] — відповідно.

- Максимальна пряма видимість ($LOS_{max}^{[км]}$)[17].

$$\begin{aligned} LOS_{max} &= \frac{\sqrt{(2 \times h_1^{[м]} \times R_{cp}^{[км]})} + \sqrt{(2 \times h_2^{[м]} \times R_{cp}^{[км]})}}{1000} = \\ &= \frac{\sqrt{2 \times 150 \times 6371008,8} + \sqrt{2 \times 3 \times 6371008,8}}{1000} = \quad (2.5) \\ &= \frac{43718,4474 + 6182,7221}{1000} = 49,9012[км] \end{aligned}$$

- Максимальна вихідна потужність ($P_T^{[dBm]}$).

Береться з технічних характеристик пристрою.

В даному випадку (без додаткового підсилення) це 7 [dBm]

- Бюджет радіоканалу ($B_{Link}^{[dB]}$).

То є сума вихідної потужності передавача та порогу чутливості приймача ($P_R^{[-dbm]}$). Додатково враховує коефіцієнти підсилення обох антен або їх систем ($G_T^{[dbi]}$, $G_R^{[dbi]}$), а також втрати ($L^{[dB]}$). Розраховується по формулі нижче, а сам розрахунок буде виконаний в спеціальному програмному рішенні нижче.

$$B_{Link} = P_T - P_R + G_T + G_R - L \quad (2.6)$$

- Основні втрати ($L_{осн.}^{[dB]}$)

За такі вважаються втрати при поширенні радіохвилі, найвпливовіша серед котрих загасання з відстанню.

- Додаткові втрати ($L_{дод.}^{[dB]}$).

Додаткові затухання, котрі може накладати лісовий тип місцевості можемо приблизно визначити за додатковими коефіцієнтами послаблення [15]. Якщо

перешкода це густий листовий покрив, то має місце формула, а в випадку рідкого листового покриву, скористаємось формулою (частота в [МГц]).

$$L_{ц.л.п.}^{[\partial Б]} = 65 * [0,244 * \lg(f) - 0,422] \quad (2.7)$$

$$L_{р.л.п.}^{[\partial Б]} = 65 * [0,244 * \lg(f) - 0,422] - 6 \quad (2.8)$$

В випадку використання технології мовлення GSM на частотах 824 - 894 [МГц] знайдемо діапазон додаткового згасання:

$$L_{ц.л.п.} = 65 * [0,244 * \lg(824) - 0,422] = 18,8166 [\partial Б] \quad (2.7.1)$$

$$L_{ц.л.п.} = 65 * [0,244 * \lg(894) - 0,422] = 19,3782 [\partial Б]$$

$$L_{р.л.п.} = 65 * [0,244 * \lg(824) - 0,422] - 6 = 12,8166 [\partial Б] \quad (2.8.1)$$

$$L_{р.л.п.} = 65 * [0,244 * \lg(894) - 0,422] - 6 = 13,3782 [\partial Б]$$

Для LTE:

$$L_{ц.л.п.} = 65 * [0,244 * \lg(1710) - 0,422] = 23,8453 [\partial Б] \quad (2.7.2)$$

$$L_{ц.л.п.} = 65 * [0,244 * \lg(2170) - 0,422] = 25,4863 [\partial Б]$$

$$L_{р.л.п.} = 65 * [0,244 * \lg(1710) - 0,422] - 6 = 17,8453 [\partial Б] \quad (2.8.2)$$

$$L_{р.л.п.} = 65 * [0,244 * \lg(2170) - 0,422] - 6 = 19,4863 [\partial Б]$$

Проведемо моделювання згідно з отриманими даними з розрахунків та технічних документацій по досліджуваному пристрою. Як інструмент моделювання будемо використовувати розробку техаського інституту [18], що для обчислень використовує рівняння Фрііса та двопробеневу модель розповсюдження радіохвиль. В кожному з випадків розрахунку будемо вважати, що використовується лише вертикальна поляризація, поверхня над якою ми працюємо — ґрунт, антени прийому/передачі однакові, швидкість передачі даних близько 5 [кбіт/с], інтерференція відсутня та умови прямої видимості виконуються досконало.

Згідно з цими даними складається результат (див. рис. 3.4.1 та 3.4.2) для роботи на частоті 868 [МГц]. Його ми будемо порівнювати з роботою на частоті 2,4 [ГГц] (рис. 3.5.1 та 3.5.2). Бюджет каналу становить ~100 [dB] (від отриманого значення віднімаємо середнє арифметичне втрат від листового покриву), що є відмінним результатом. І згідно з розрахунками, можемо стверджувати, що дальність зв'язку підвищується зі зменшенням частоти. Так

для нижчої частоти ми маємо близько 5 [км] відстані, у той час як для вищої лише досягаємо 1,5 [км] можливих за, певною мірою, ідеальних умов. Тому в прикладі наступного розділу буде ставитись акцент на частоті близької до восьмої сотні мегагерцового діапазону.

Цікавим є спостереження за роботою цієї програми в питаннях підвищення швидкості передачі інформації: чим більше бажана величина, тим менша відстань зв'язку.

Рис. 3.4.1 Результат моделювання поведінки радіохвиль на частоті 868 [МГц].

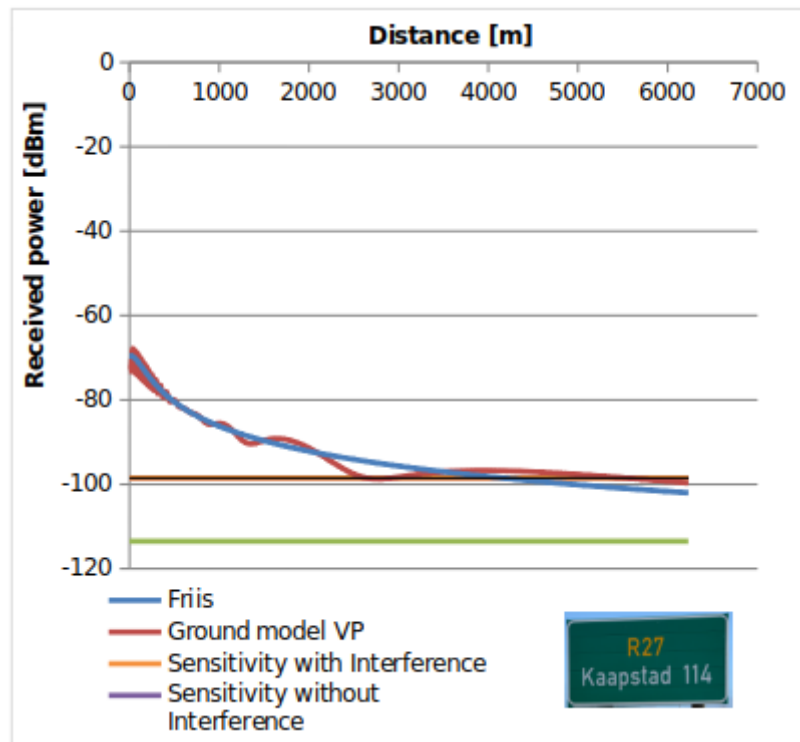


Рис. 3.4.2 Графік поведінки радіохвиль на частоті 868 [МГц]

Рис. 3.5.1 Результат моделювання поведінки радіохвиль на частоті 2,4 [ГГц]

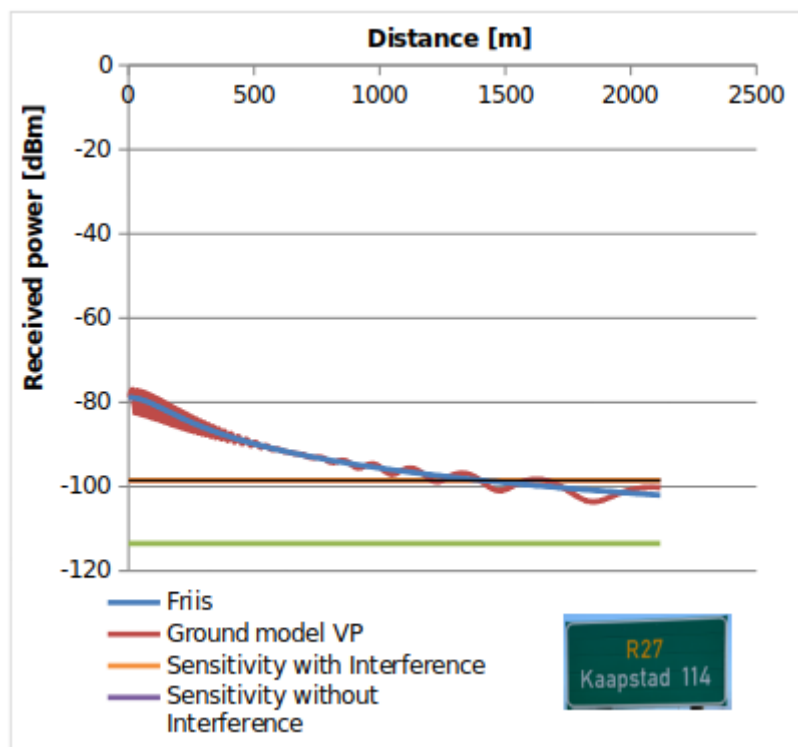


Рис. 3.5.2 Графік поведінки радіохвиль на частоті 2,4 [ГГц]

Висновок до третього розділу

Цей розділ наповнений аналізом сучасної території України, стану її покриття мережами операторів зв'язку та проведено детальне пояснення причин виникнення проблеми важкодоступності. Дані отримані з офіційного сайту оператора lifecell та низки проектів, що об'єднали дані усіх мобільних операторів.

Аналізу були піддані типи місцевості та поверхонь, їхній вплив на радіочастотне випромінювання згідно з теорією електродинаміки. Було згадано про проблему низького трафіку та очевидне її рішення — розгортання власної мережі на вільних від ліцензування частотах.

Розрахунки параметрів системи зв'язку проведені у відповідності до останніх знань про Землю, дільність зв'язку розрахована виходячи з рівняння Фрііса та двопрменевої моделі. За їх результатами можна стверджувати, що SDR здатен забезпечувати зв'язок з достатнім бюджетом каналу, а отже якістю.

РОЗДІЛ 4

ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ СТАНЦІЇ

4.1. Інструкції для реалізації

Суть побудови може зводитись до вибору одного з готових пристроїв на ринку пропозицій, але такі реалізації значно більші в ціні. Прикладом може слугувати лінійка пристроїв LimeNET: попри відносно невелику вартість представників SDR, готові БС, закономірно, на порядок дорожчі. Особливо в випадку цілого хабу "в коробці" з дискретним процесором та відеокартою. Поряд з ним в розумінні оптимальності рішення опиняється й варіант власноручного виготовлення SDR. Звісно цей варіант певним чином може бути дешевшим, якщо наявні представники апаратного устаткування та знання технології виготовлення SDR — необхідної якості. За відсутності останніх, в рамках даної роботи, цей варіант признається не оптимальним.

Тоді має місце вибір поміж готовими програмними та апаратними рішеннями, через менший "поріг" для старту з технічно-економічної точки зору. А значить, ми маємо справу зі схемою наступного змісту:

- апаратна частина БС:
 - комп'ютер (загального користування/RaspberryPi).
 - пристрій SDR
 - мобільний телефон.
- програмна частина БС:
 - BTS;
 - BSC; MSC;
 - HLR; VLR;
 - AUC; EIR.

В попередньому розділі було продемонстровано тим більшу дальність зв'язку, чим більша довжина хвилі, а отже менша частота. Якщо обмежитись лише стандартом GSM (через більшу варіативність програмних рішень, бо не кожен SDR зможе відповідати вимогам того, чи іншого ПЗ), то розглянемо приклад встановлення та оговоримо принцип функціонування частини проекту Osmocom. А саме OpenBSC (що містить об'єднання трьох проектів: OsmoBSC, OsmoMSC, OsmoHLR), OsmoNITB та OsmoTRX. Цього набору достатньо для прийому та моніторингу радіоефіру, а також передачі та ретрансляції сигналу.

Встановлення розділяється на декілька сфер: ОС, супутні бібліотеки, програми від Osmocom. За ОС обрано Ubuntu 20.04 з сімейства GNU/Linux. Серед рекомендацій пропонується використання такої не нижче версії 12.04. Ці та інші дистрибутиви можна завантажити з офіційного сайту. Що до бібліотек взаємодії, то згідно з тредом на сайті проекту [19], є проблема в роботі між OsmoTRX та PlutoSDR через особливості бібліотеки взаємодії — libiio. Має місце таке пояснення: “ІІО не підтримує часові позначки...Тому для запуску на Pluto потрібно буде додати їх до всієї архітектури ІІО та плутівського коду FPGA, а це велика кількість роботи”. Станом на червень 2020-го року рішення цього питання не було надано. Через це умовно оберемо іншого представника для опису процесу інсталяції. Згідно з роботою [20] можемо скористатись пристроєм LimeSDR.

Перейдемо до встановлення бібліотек, необхідних утиліт та залежностей. Почнемо з установки пакетів:

```
sudo apt-get install git g++ gcc make
```

git — для взаємодії з ресурсом Github, **g++** — аналог мови c++, частина колекції компіляторів для GNU, **gcc** — компілятор мови програмування c++ для GNURadio, **make** — інструмент для роботи в командному рядку, що дозволяє встановлювати новітні версії популярних інструментів для розробників.

Аби мати доступ до порту USB без привілеїв root-користувача, необхідно встановити правила udev та перезавантажити систему:

```
sudo apt-get install limesuite-udev
sudo reboot
```

Встановлення залежностей з репозиторієм MyriadRF задля доступу до останніх версій інструментів та драйверів для LimeSDR:

```
sudo add-apt-repository -y ppa:myriadrf/drivers
sudo add-apt-repository -y ppa:myriadrf/gnuradio
sudo apt-get update
```

Для сумісності версій інструментів та бібліотек пропонується оновити прошивку пристрою за допомогою LimeSuiteGUI — утиліти для налаштування та налагодження апаратних платформ, на базі мікросхеми LMS7002M:

```
sudo apt-get install limesuite
LimeUtil --update
```

Можна скористатись і наступним шляхом оновлення:

```
LimeSuiteGUI
```

Далі необхідно слідувати шляху Options -> Connection -> LimeSDR, зачекати встановлення з'єднання та продовжити Modules -> Programming -> Program.

Бібліотеки UHD та Soapy забезпечуватимуть загальний інтерфейс до апаратних засобів SDR, що можна додавати через зовнішні модулі. Насамперед, SoapySDR дозволить нам отримати доступ через API Soapy до A3 LimeSDR. UHD, в свою чергу, змусить вже SoapySDR діяти як UHD-пристрій.

```
sudo apt-get install soapysdr soapysdr-module-lms7
sudo apt-get install uhd-soapysdr
sudo apt-get install uhd-host # for the uhd_find_devices tool
```

Перевірка правильності встановлення бібліотеки Soapy:

```
SoapySDRUtil -find
```

Має відобразитись вивід, подібний до цього:

```
Found device 0
addr = 2d80:8408
driver = lime
label = LimeSDR-USB [USB 3.0] 1060C00872040
```

```
media = USB 3.0
module = STREAM
name = LimeSDR-USB
serial = 0001060C00872040
```

Аби переконатись, що пристрій визначений як UHD-пристрій:

```
uhd_find_devices
```

Якщо вивід запиту подібний до нижчевказаного, то все в порядку:

```
linux; GNU C++ version 6.3.0 20170406; Boost_106200; UHD_003.010.002.000-
release
```

```
-----
-- UHD Device 0
-----

Device Address:
  addr: 2d80:8408
  driver: lime
  label: LimeSDR-USB [USB 3.0] 1060C00872040
  media: USB 3.0
  module: STREAM
  name: LimeSDR-USB
  serial: 0001060C00872040
  type: soapy
```

Встановлення програм Osmocom. Звісно краще встановити залежність від репозиторію:

```
wget https://download.opensuse.org/repositories/network:/osmocom:/latest/
xUbuntu_20.04/Release.key
sudo apt-key add Release.key
rm Release.key
echo "deb https://download.opensuse.org/repositories/network:/osmocom:/latest/
xUbuntu_20.04/ ." | sudo tee /etc/apt/sources.list.d/osmocom-latest.list
sudo apt-get update
```

проте для страту достатньо і самої команди встановлення:

```
sudo apt-get update
sudo apt-get install osmocom-nitb osmo-bts-trx
```


За останньою командою було встановлено:

osmocom-nitb — пакети "мережа в коробці", що містять повну базову мережу GSM та контролер БС, ***osmo-bts-trx*** — сама приймальна БС, яка працює з програмним забезпеченням, що, в свою чергу, діє як модем (пристрій фізичного рівня), використовуючи апаратну платформу (в даному випадку LimeSDR).

Після встановлення, настає час конфігурації. В файлі *openbsc.cfg* необхідно змінити наступні значення:

```
network country code 255 # Ukraine
mobile network code 6 # operator lifecell
band GSM900 # here you can decide standard
arfcn 172 # here you can decide channel [21]
short name hothg
long name HOTHGNet
auth policy accept-all
```

З точки зору безпеки варто приділити увагу останньому параметру; так як за прикладом вказано значить, що кожен зможе під'єднатися до мережі. Цим можна знехтувати, якщо мережа тестова, але важлива або особлива інформація може бути під загрозою через її можливу доступність. За для підвищення безпеки варто

Наступним файлом буде *osmo-bts.cfg*, де варто змінити лише параметр *band 900*, у відповідності до обраного раніше. Останнім для налаштування буде файл *osmo-trx.cfg*, де можна змінити *tx-path*, *rx-path* за необхідності на потрібні шляхи. Більше деталей у прикладах, які можна знайти у списку літератури [22].

Запуск БС! Наступні команди варто вводи по черзі:

```
sudo osmo-trx-lms
osmo-nitb
osmo-bts-trx
```

Під'єднатись до такої мережі з телефону під керуванням ОС Android буде просто, користуючись можливістю обрати бажану мережу із налаштувань.

Проте, існують спеціальні сім-карти sysmoUSIM-SJS1 для тестування мережі. У них є цікаві фішки, котрі натякають: ця “іграшка” вартує своїх 50 [євро] (за комплект зі 10 одиниць).

Важливі деталі:

- За посиланням [23] можна знайти цілу низку функцій, що вже реалізовані і можуть бути використані в інтерфейсі OpenBSC telnet.
- Знання мови програмування python дозволить створити ряд корисних і цікавих функцій власної мережі.
- Необхідно використовувати значення NCC та MNC за замовчуванням, що будуть виставленні при створенні файлу, аби не втручатися в наявні мережі операторів, бо це може завдати неприємностей!

4.2. Альтернативні SDR рішення

Достатньо оновити техніку, чи придбати таку, що буде відповідати потребам. Бажаєш розгорнути свою мережу зв'язку на відстані до 10 км без, навіть, можливості переступити законодавчі норми — будь-ласка купуй рації. Набір для шістьох вартуватиме близько 150\$. Таке рішення просте у використанні, не потребує налаштувань, безпечне для операторів. Що правда, є можливість підслухати та бути підслуханим, бо ж захисту інформації за таку ціну буде небагато. А проте доступно, свою мету виконують, а більшого від них і не очікують.

Одним із варіантів рішення, також, можуть слугувати дискретні антени, котрі можна розмістити на будь-якій поверхні та підняти на потрібну висоту. Головною перешкодою виявляється необхідність кабельного підключення та відповідного порту в телефоні. Такий пристрій зустрічається або серед спеціалізованих моделей, або серед старих телефонів (по типу Siemens ME45). Регулювання висоти забезпечує деяку гнучкість в певних умовах. З економічної точки зору таке підсилення потребує коаксіального кабелю (довжиною до 20-ти метрів), що буде вартувати до 15\$ (для розрахунку обрано кабель RG-58), до

ціни також може входити невелика вартість б/у телефону (близько 10\$) та сама антена. Конфігурацію можна змінити та трохи адаптувати, змінюючи антену для передачі. Позбавитись від необхідності прямого підключення до терміналу можна, купивши антену на прийом. Варіант з дискретною антеною дозволяє вирішити проблему підсилення рівня сигналу і з точки зору ефективності більш придатний для стаціонарних рішень, де є можливість використати антену з вузькоспрямованою діаграмою спрямованості. Звісно, можна розширити функціонал на більший пакет функцій (наприклад, додати фільтрацію чи інше).

Можливо, що дискретною антеною і кабелем до неї варто буде користуватись і в випадку використання SDR, проте це більш готовий модуль, котрий не так обмежений у функціях; не просто підсилює сигнал, а й дозволяє, наприклад, обрати кращу для різних умов технологію зв'язку. Тобто ясно виокремлюється більша адаптивність під вже придбані пристрої, непередбачувані умови та розвиток. Адаптацію під різні технології зв'язку може робити і сам телефон, але автору роботи відомо лише про автоматичне переналаштування поміж доступними.

Висновок до четвертого розділу

В останньому розділі було приведено інструкцію по збору та запуску БС для стандарту GSM на основі проектів OsmoNiBT та osmoTRX.

Апаратна платформа, а разом з нею і програмна підтримують можливість реалізації різних стандартів, включаючи четверте покоління. А при достатній кількості часу та бажання обраний програмний проект дозволяє вільно створювати власні функції. Проте, використання такої системи, навіть за наявності усіх технічних устаткувань, обмежена законом, тому варто тестуватися в підвалі, а розгортати там, де зв'язку ще немає, або користуватися проміжною БС виключно як підсилювачем терміналу, не перевищуючи норми максимальної вихідної потужності.

Певну складність складає поріг знань та умінь, аби підготувати такий проект до роботи, тому було присвячено деякий обсяг роботи альтернативним рішенням, котрі не можуть сперечатися з SDR, але й за мету такого не мають, виконуючи чіткі функції в межах, дозволених чинним законодавством.

ВИСНОВОК

Мета цієї роботи була досягнена. Теоретично вдалося проаналізувати наявні дані про концепцію SDR. Серед наявних здебільшого позитивні сторони, а тенденції на перенесення апаратних функцій у вигляд завдань для ПЗ лише зростають.

Для перевірки відповідності характеристик PlutoSDR до вимог, котрі висувають важкодоступні регіони було використано приблизні розрахунки за двопробеневою моделю розповсюдження хвиль, рівнянням Фрііса, а також приблизними значеннями коефіцієнта додаткових втрат при проходженні листового покриву різної щільності. В результаті, було отримано бюджет каналу на рівні [100 dB], що є хорошим показником.

Обрана програмна платформа у вигляді проекту Osmocom, хоч і має конфлікти з обраною апаратною частиною радіочастотного обладнання, що було несподіванкою під час підготовки до роботи, має чудові можливості та чіткі інструкції для взаємодії з іншими представниками реалізації концепції SDR.

Дослідивши можливості радіомодуля, можна стверджувати, що там, де телефон втрачатиме здатність підключитися до БС, SDR-модуль зможе забезпечити достатню для з'єднання потужність та якість сигналу, завдяки гнучкому переналаштуванню. Проте, умови прямої видимості краще не порушувати, бо перед ефектом загасання гнучкість в решті-решт виявиться безсилою.

Дана робота носила практичний характер по розробці наукових та практичних основ реалізації базової станції для забезпечення зв'язком важкодоступних регіонів, як постійним так і ситуаційним.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Історія SDR:
https://en.wikipedia.org/wiki/Software-defined_radio [Електронний ресурс]
<https://www.ni.com/ru-ru/innovations/white-papers/17/software-defined-radio--past--present--and-future.html> [Електронний ресурс]
2. Коротка історія SDR: <https://www.nutaq.com/blog/short-history-software-defined-radio-sdr-technology> [Електронний ресурс]
3. Поняття SDR:
https://www.wirelessinnovation.org/Introduction_to_SDR [Електронний ресурс]
4. Відомості про SDR:
<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/introduction-to-software-defined-radio/>
 [Електронний ресурс]
5. José Raúl Machado-Fernández: “Software Defined Radio: Basic Principles and Applications”, 2014:
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-11292015000100007&lng=en&nrm=iso&tlng=en [Електронний ресурс]
6. Travis F. Collins, Robin Getz, Di Pu, Alexander M. Wyglinski: “Software-Defined Radio for Engineers”, 2018
7. Деталі архітектури SDN:
https://www.openairinterface.org/?page_id=466 [Електронний ресурс]
8. Основні відомості про SoC: https://en.wikipedia.org/wiki/System_on_a_chip [Електронний ресурс]
9. Vijendra Singh Tomar, Vimal Bhatia: “Low Cost and Power Software Defined Radio using Raspberry Pi for Disaster Effected Regions”, 2015
10. Перелік програмно-апаратних рішень для концепції SDR: <https://laptrinhx.com/rfsec-tools-1561460436/> [Електронний ресурс]
11. Технічні характеристики мікросхеми AD9363:
<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9363.pdf>
12. Відомості про проект OsmocomBB: <http://osmocom.org/> [Електронний ресурс]
13. Вільні діапазони на теренах України:
https://radiostancii.com.ua/razreshennye_chastoty [Електронний ресурс]
14. Статистична інформація про ліси України:
<https://tlu.kiev.ua/nasha-dijalnist/profesiino-pro-lis/objektivna-informacija-shchodolisiv.html> [Електронний ресурс]
15. Л. М. Логачова, Т. І. Бугрова, навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів “Поширення земних радіохвиль та мобільний зв’язок”, 2019, ст. 69-70, 199-200
16. Moritz, Н.: “Geodetic Reference System”, 1980
17. Метод та формули для розрахунку параметрів БС:
<https://www.compel.ru/lib/74345> [Електронний ресурс]
18. Посилання на інструмент моделювання в Excel:
<http://e2e.ti.com/support/wireless-connectivity/sub-1-ghz/f/156/t/375556> [Електронний ресурс]
19. Посилання на форум з об’явленням проблеми сумісності PlutoSDR та osmoTRX:
<http://osmocom.org/issues/3911>
20. Лошаков В.А., Москалець М.В., Велліо А., Al-Vandavi Saif Ahmed Iskandar Ismael, Хвостик І.О.: “Комплекс лабораторних робіт з дослідження систем зв’язку та радіомоніторингу на базі SDR технології”, 2019

21. Сайт для онлайн розрахунку каналу:
https://www.sqimway.com/gsm_band.php [Електронний ресурс]
22. Статті на тему розгортання проекту OsmoNiBT на Linux:
<https://github.com/dartdart26/sdr/wiki/Running-osmo-nitb-on-LimeSDR-USB>
<https://medium.com/@lucasteske/creating-your-own-gsm-network-with-limesdr-1935bac257f4>
23. Документ, з реалізованими функціями в програмному рішенні проекту Osmocom:
<https://ftp.osmocom.org/docs/latest/osmobsc-vty-reference.pdf> [Електронний ресурс]

Додаток А

Таблиця А.1

Орієнтовні значення $\epsilon_{г\text{зм}}$ та $\sigma_{г\text{зм}}$ для різних видів земних покривів приведені в таблиці А.1

Вид земної поверхні або покриття	Довжина хвилі λ , м	Відносна діелектрична проникність $\epsilon_{г\text{зм}}$	Питома провідність $\sigma_{г\text{зм}}$, См/м
Морська вода	Більше 1,0	75	1...6
	0,1	70	1...6
	0,03	65	10...20
	0,003	10	10...20
Прісна вода річок, озер	Більше 1,0	80	$10^{-2} \dots 3 \cdot 10^{-2}$
	0,1	75	1...2
	0,03	65	10...20
	0,003	10	-
Вологий ґрунт	Більше 1,0	20...30	$2 \cdot 10^{-2} \dots 3 \cdot 10^{-1}$
	0,1	20...30	$5 \cdot 10^{-1} \dots 1$
	0,03	10...20	1...3
Сухий ґрунт	Більше 1,0	3...6	$10^{-5} \dots 2 \cdot 10^{-3}$
	0,1	3...6	$10^{-2} \dots 7 \cdot 10^{-2}$
	0,03	3...6	$10^{-1} \dots 2 \cdot 10^{-1}$
Мерзлий ґрунт	Більше 1,0	3...6	$10^{-3} \dots 10^{-2}$
	0,1	-	-
	0,03	-	-
Лід ($t = -10^\circ\text{C}$)	Більше 1,0	4...5	$10^{-2} \dots 10^{-1}$
	0,1	3...5	$10^{-4} \dots 10^{-3}$
	0,03	3...2	$10^{-4} \dots 10^{-3}$
Сніг ($t = -10^\circ\text{C}$)	Більше 1,0	1,2	10^{-6}
	0,1	1,2	10^{-5}
	0,03	1,2	10^{-5}
Ліс	Більше 10	1,004	1...6
	0,1	1,04...1,4	$10^{-6} \dots 10^{-5}$
	-	-	$10^{-5} \dots 10^{-3}$

* Значення останньої комірки другого стовпчика подібне до передостанньої у цьому ж стовпчику.

Додаток Б

Карти покриття мережею БС території Західної України (ЗУ) основними операторами зв'язку.

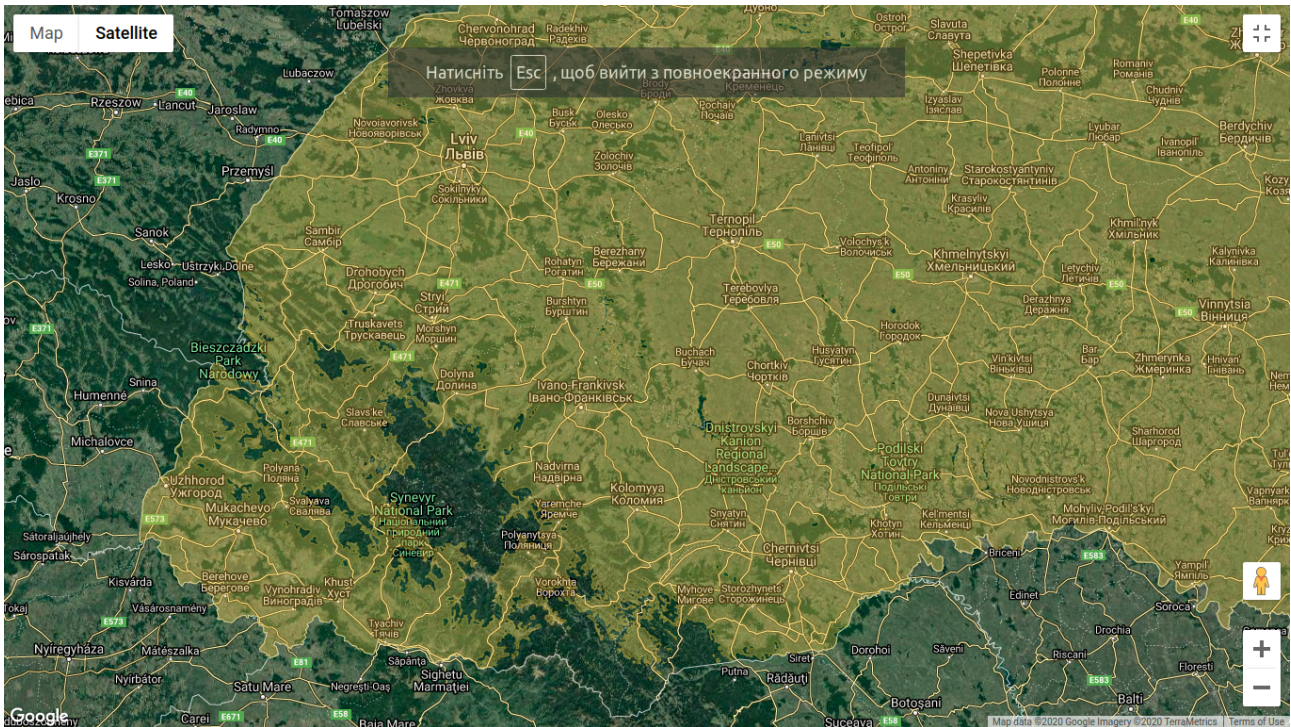


Рис. Б.1 - Мапа покриття території ЗУ мережею 2-го покоління оператором lifecell.



Рис. Б.2 Мапа покриття території ЗУ мережею 3-го покоління оператором lifecell.

Рис. Б.3 Мапа покриття території ЗУ мережею 3-го покоління оператором Vodafone.

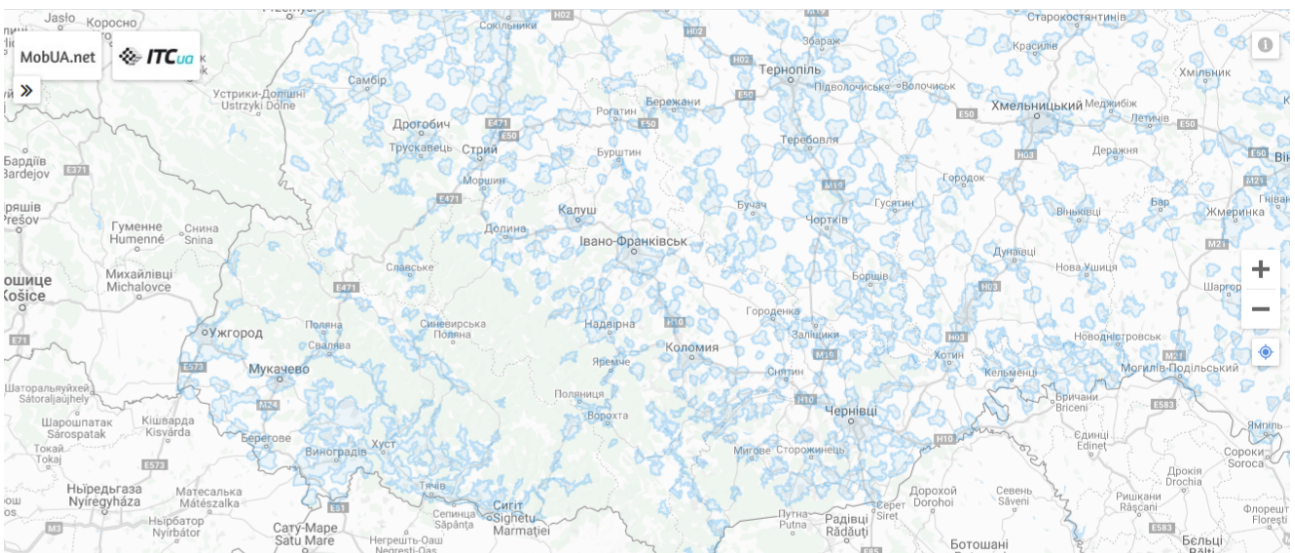


Рис. Б.4 Мапа покриття території ЗУ мережею 3-го покоління оператором Київстар.

Рис. Б.5. Загальна мапа покриття території ЗУ мережами 3-го покоління трійкою операторів.

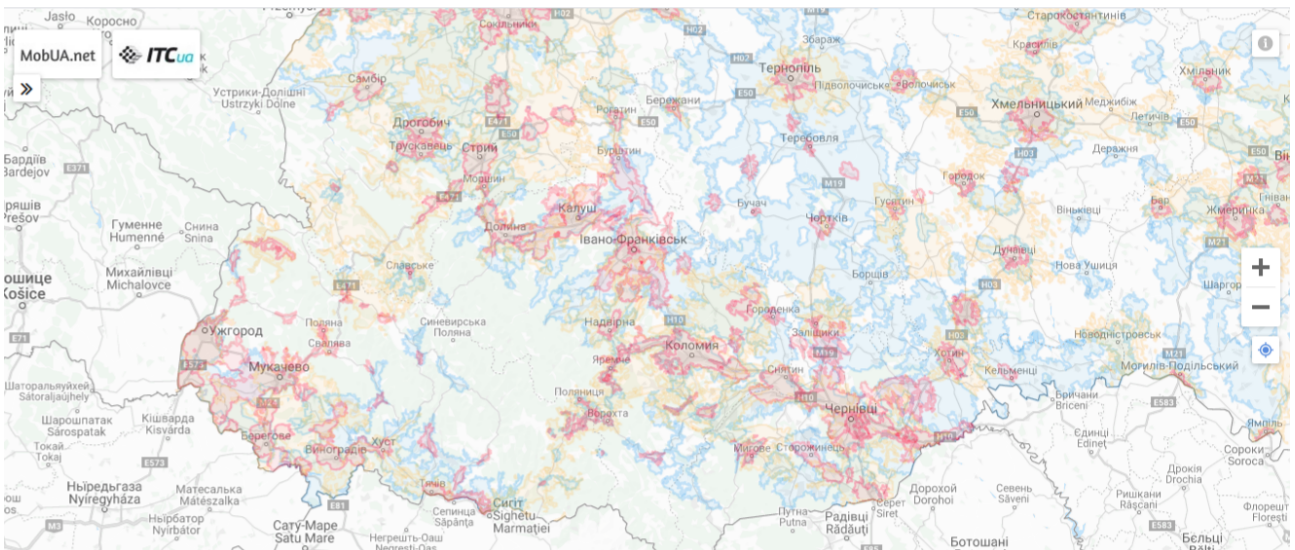


Рис. Б.6. Загальна мапа покриття території ЗУ мережами 4-го покоління трійкою операторів.

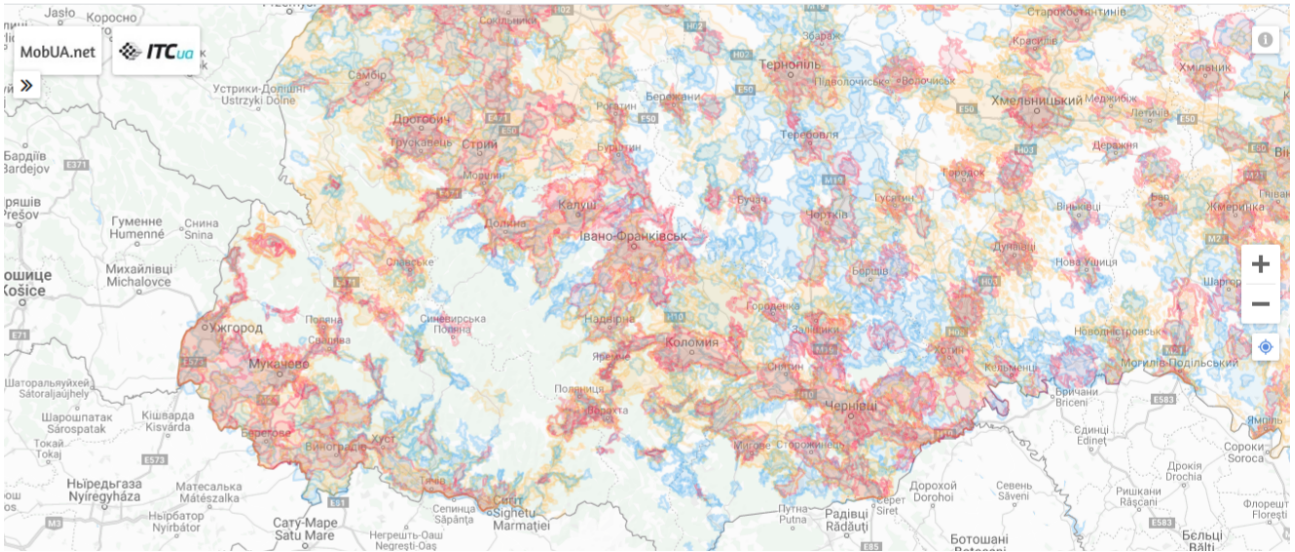


Рис. Б.7. Мапа, що відображає покриття території ЗУ мережами, як 3-го, так і 4-го покоління стандартів трійкою операторів.