

Ю.С. ЖУГА, В.А. ЛОШАКОВ, д-р техн. наук,
М.В. МОСКАЛЕЦЬ, д-р техн. наук, С.О. САБУРОВА

РОЗРОБКА ТА НАЛАШТУВАННЯ ФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ LTE НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ SDR

Вступ

Реалізувати функції радіосистем нових поколінь та їх зміну через програмне реконфігурування замість використання традиційних апаратних засобів дозволяє технологія Software Defined Radio (SDR). Це забезпечує гнучкість та економічність у розробці та тестуванні безпроводових систем на різних платформах з використанням персональних або вбудованих комп'ютерів.

Мета роботи – розробка апаратно-програмного стенду на базі радіоплатформи LimeSDR з дослідження мобільних систем зв'язку, зокрема LTE, а також можливість його використання для роботи з іншими системами, такими як 5G, радіомоніторингу, супутникового зв'язку та телебачення. При цьому більша частина роботи SDR радіоплатформи виконується на персональному комп'ютері, який забезпечує необхідну програмну конфігурацію радіосистеми.

Стенд створено на основі кафедрального та зовнішнього досвіду використання SDR-технології при розробці фізичних моделей базових станцій мереж мобільного зв'язку нових поколінь, цифрового наземного та супутникового телебачення [1–4].

В навчальних цілях стенд може використовуватись як автономно, так і дистанційно з застосуванням, наприклад, кафедрального сервера. Враховуючи російську військову агресію, яка серйозно вплинула на українську освіту, створивши загрози для життя і здоров'я учасників освітнього процесу та спричинивши руйнування освітньої інфраструктури, можливість створення дистанційних лабораторій стала відповіддю на ці виклики, дозволяючи продовжувати навчання в умовах обмежень [5].

Архітектура системи для SDR-базової LTE мережі

Вибір апаратних компонентів для SDR-базової мережі LTE зумовлений необхідністю досягнення балансу між продуктивністю, вартістю та освітньою цінністю. Кожен елемент системи добирався з урахуванням забезпечення гнучкості та функціональності, залишаючись доступним для академічних та дослідницьких цілей. Така комбінація створює платформу, яка імітує реальні мобільні мережі або інші радіосистеми, дозволяє їх вивчення та проведення експериментів.

Архітектура стенду базується на поєднанні апаратних та програмних компонентів, що разом створюють функціональну LTE мережу.

Ядром системи є радіоплатформа *LimeSDR*, яка виступає радіочастотним SDR інтерфейсом базової станції, а програмний пакет *srsRAN* забезпечує реалізацію стеку протоколів LTE.

Ключові компонентами архітектури:

- радіоплатформа LimeSDR – радіочастотний SDR інтерфейс базової станції (eNodeB);
- хост-комп'ютер під управлінням Ubuntu 20.04 LTS, який реалізує програмне забезпечення srsRAN та управляє всією системою;
- програмний пакет *srsRAN*, який реалізує стек протоколів LTE з відкритим вихідним кодом, включаючи функціональність *eNodeB*, *EPC* та *UE*;
- програмовані SIM-карти, які використовуються для емуляції абонентських пристроїв та забезпечення аутентифікації в мережі;
- тестові смартфони – пристрої Android та iPhone, які використовуються для перевірки функціонування мережі.

На рис. 1 представлено фото стенду.



Рис. 1. Загальний вигляд експериментальної установки з LimeSDR

Ця архітектура дозволяє реалізувати повну наскрізну LTE мережу від радіоінтерфейсу до опорної мережі, придатну для проведення широкого кола досліджень.

Апаратні компоненти LTE мережі на базі радіоплатформи LimeSDR

Апаратна конфігурація LTE мережі на базі радіоплатформи LimeSDR є ключовою для забезпечення гнучкості та функціональності стенду при вирішенні освітніх та дослідницьких задач.

LimeSDR

Радіоплатформа LimeSDR є центральною частиною апаратної конфігурації. Її універсальність відкриває широкі можливості для реалізації програмно-визначеної мережі LTE.

Основні характеристики LimeSDR:

- діапазон частот 100 кГц – 3,8 ГГц, який охоплює більшість комерційних та експериментальних діапазонів LTE;
- ширина смуги частот радіоканалу – 61,44 МГц, що достатньо для реалізації різних конфігурацій LTE мережі;
- можливість реалізації 2x2 MIMO;
- MIMO FPGA – Altera Cyclone IV EP4CE40F23, яка забезпечує обробку сигналів в реальному часі;
- АЦП-12-бітний з частотою дискретизації 160 МГц;
- ЦАП-12-бітний з частотою дискретизації 640 МГц.

Host Computer

Хост-комп'ютер запускає програмне забезпечення *srsRAN* та управляє всією системою. Використовується комп'ютер середньої потужності з процесором – Int. Core i5, оперативною пам'яттю – 16 ГБ та операційною системою Ubuntu 20.04 LTS. Попереднє намагання використати віртуальну машину виявилось помилковим. Її обмежені обчислювальні можливості обумовили нестабільну роботу системи. Це підтвердило важливість використання фізичного хост-комп'ютера з достатньою потужністю для забезпечення стабільної роботи фізичної SDR моделі БС LTE.

Antennas

При експериментах моделі БС LTE використовувались стандартні якісно узгоджені, перевірені з використанням векторного аналізатора *NanoVNA* антени в діапазоні частот 700 – 2700 МГц.

Cooling System

У ході експериментів LimeSDR виявився схильним до перегріву. При перевищенні температури процесора 65°–70° починались збої у роботі. Встановлення вентилятору (див. рис. 1) забезпечило необхідне охолодження процесора та стабільну роботу системи.

Additional Hardware

Критично важливим для коректної роботи LimeSDR є використання порту USB3.0, оскільки він забезпечує необхідну високу пропускну спроможність передачі даних між LimeSDR та комп'ютером.

Іншими важливими компонентами мережі є *програмовані SIM-карти Gialer* для емуляції абонентських пристроїв та *тестові абонентські термінали*. При експериментах для перевірки роботи мережі використано *смартфон* та *iPhone* (рис. 1).

Програмні компоненти та конфігурація системи SDR-базової LTE мережі

Програмна частина SDR-базової LTE мережі є важливим елементом для забезпечення функціональності та стабільної роботи системи. Налаштування ґрунтується на відкритому програмному пакеті *srsRAN*, який дозволяє реалізувати стек протоколів LTE.

srsRAN Software Suite

Основою програмної інфраструктури є пакет *srsRAN* з відкритим кодом, який забезпечує реалізацію протоколів LTE та 5G NR. Він пропонує гнучку SDR систему, яка охоплює всі необхідні компоненти від базової станції до опорної мережі.

Основні компоненти *srsRAN*:

1. *srsENB* реалізує функції базової станції LTE (eNodeB), управляє радіоресурсами, плануванням та зв'язком з опорною мережею;
2. *srsEPC* виступає як опорна мережа LTE (Evolved Packet Core). Цей компонент управляє аутентифікацією користувачів, керує управлінням сеансами та маршрутизацією користувацького трафіку даних;
3. *srsUE* – необов'язковий компонент, який може емулювати користувацьке обладнання, що особливо корисно при налагодженні та тестуванні.

Модульна архітектура *srsRAN* дозволяє легко адаптувати її до дослідницьких та освітніх цілей. Використання SoapySDR як драйвера для взаємодії з LimeSDR забезпечує гнучкість у налаштуванні радіочастотного інтерфейсу.

Налаштування та конфігурація програмного забезпечення

Процес налаштування *srsRAN* включає кілька етапів, кожен з яких впливає на загальну продуктивність системи.

1. *Підготовка системи*. Цей крок включає видалення будь-якого конфліктуючого програмного забезпечення та встановлення всіх необхідних залежностей. Це критично важливо для створення чистого середовища для ефективної роботи *srsRAN*.

2. *Встановлення srsRAN*. Процес встановлення включає компіляцію програмного забезпечення з відкритим вхідним кодом, яке забезпечує сумісність з конкретним апаратним обладнанням.

3. *Конфігурація*. Налаштування *srsRAN* включає зміну конфігураційних файлів, які визначають поведінку системи. Це включає налаштування наступних ключових конфігураційних файлів:

– *epc.conf* конфігурує Evolved Packet Core, включаючи такі параметри, як код країни мобільного зв'язку (MCC), код мобільної мережі (MNC) та IP-адресація для різних мережних інтерфейсів;

– *enb.conf* налаштовує параметри eNodeB, включаючи ідентифікацію комірки, потужність передачі та з'єднання з опорною мережею;

– *rr.conf* визначає параметри радіоресурсів, що критично важливо для управління фізичним рівнем з'єднання LTE;

– *user_db.csv* – файл бази даних, що містить інформацію про абонентів, необхідну для аутентифікації та контролю доступу.

Кожен з цих конфігураційних файлів відіграє важливу роль у визначенні поведінки та можливостей LTE мережі.

SIM Card Programming

Програмування SIM-карт – необхідний етап забезпечення роботи приватної LTE мережі.

Використання програматора SIM-карт та спеціалізованого програмного забезпечення дозволило записати на SIM-карти такі необхідні параметри:

- IMSI (Міжнародний ідентифікатор мобільного абонента);
- ключі аутентифікації (Ki та OPc);
- ідентифікація PLMN (Загальна Наземна Мобільна Мережа).

Ці параметри забезпечують можливість аутентифікації пристроїв у приватній мережі та їх підключення до LTE мережі.

Налаштування стенду та експерименти

Реалізація базової станції LTE на основі SDR передбачає процеси *налаштування, конфігурації та тестування*.

Налаштування параметрів eNodeB та EPC розпочинається з вибору EARFCN 3500, що відповідає діапазону 22 у спектрі LTE мережі. Цей вибір забезпечує баланс між покриттям та пропускну здатністю, з урахуванням можливостей експериментальної установки.

Налаштування потужності передачі та чутливості приймача забезпечує стабільну роботу мережі. Параметри *tx_gain* та *rx_gain* ітеративно змінюються на основі моніторингу якості сигналу та зони покриття.

Конфігурація мережі також вимагає ретельного налаштування. Основні параметри включають: код країни мобільного зв'язку (MCC) – 999; код мобільної мережі (MNC) – 69; назву точки доступу (APN) – "srsapn".

Ці конфігурації було застосовано в ключових файлах: *epc.conf*, *enb.conf* та *rr.conf*.

Тестування включало серію експериментів для оцінки продуктивності та надійності мережі на базі SDR. Проведено вимірювання швидкості передачі даних за допомогою програми *Speedtest*, а також аналіз стабільності з'єднання під час різних сценаріїв використання.

Результати вимірювань: середня швидкість завантаження – 3Мбіт/с; максимальна швидкість завантаження – 3,5Мбіт/с; середня швидкість вивантаження – 2,5 Мбіт/с.

Також проведено тестування стабільності мережі під час передачі даних у режимі *потокowego відео*. Відео переглядалося протягом 1–2 годин. Відеокадри стабільні і без розривів з'єднання або помітних затримок. Таким чином, підтверджено надійність з'єднання за умови інтенсивного навантаження.

Оптимізація та підвищення продуктивності LTE мережі

Після початкових експериментів, коли максимальна швидкість передачі даних складала 3,5 Мбіт/с, з метою покращення продуктивності LTE мережі змінювались ключові параметри конфігурації базової станції. Зокрема, змінювалась *кількість фізичних ресурсних блоків (PRB)*, яка у початковій конфігурації дорівнювала – 6 PRB, та проводились додаткові тести.

Приклад команд для налаштування

Використовувались наступні конфігурації команд запуску базової станції:

1. *Базова конфігурація* (3 Мбіт/с):

```
sudo srsenb --rf.device_name=soapy --rf.device_args="driver=lime,soapy=0" --enb.n_prb=6 --rf.srate=3.84e6 --rf.dl_earfcn=3500 --expert.lte_sample_rates=true --rf.tx_gain=70 --rf.rx_gain=30.
```

2. *Покращена конфігурація* (10–12 Мбіт/с):

```
sudo srsenb --rf.device_name=soapy --rf.device_args="driver=lime,soapy=0" --enb.n_prb=25 --rf.srate=7.68e6 --rf.dl_earfcn=3500 --expert.lte_sample_rates=true --rf.tx_gain=70 --rf.rx_gain=30.
```

3. *Оптимізована конфігурація* (30–32 Мбіт/с):

```
sudo srsenb --rf.device_name=soapy --rf.device_args="driver=lime,soapy=0" --enb.n_prb=50 --rf.srate=15.36e6 --rf.dl_earfcn=3500 --expert.lte_sample_rates=true --rf.tx_gain=70 --rf.rx_gain=30.
```

Пояснення ключових параметрів:

enb.n_prb – кількість фізичних ресурсних блоків. Збільшення цього параметра з 6 до 50 дозволило значно розширити смугу пропускання, підвищивши максимальну швидкість передачі даних;

rf.srate – частота дискретизації. Зміна цього параметра з 3.84e6 до 15.36e6 дозволила обробляти ширший діапазон частот, що позитивно вплинуло на продуктивність мережі;

rf.tx_gain та *rf.rx_gain* – коефіцієнти підсилення. Підібрані значення підсилення забезпечили стабільну роботу системи;

rf.device_name=soapy – SoapySDR застосовується як універсальний драйвер для взаємодії з LimeSDR;

rf.device_args="driver=lime,soapy=0". Параметр *driver=lime* вказує на використання LimeSDR, а *soapy=0* використовується для вибору відповідного пристрою через SoapySDR.

Збільшення кількості PRB та відповідне підвищення частоти дискретизації дозволили суттєво розширити смугу пропускання системи та підвищити максимальну швидкість передачі даних (табл. 1).

Таблиця 1

Ключові параметри конфігурації

Конфігурація	Кількість PRB	Частота дискретизації	Швидкість завантаження, Мбіт/с
Базова конфігурація	6	3.84e6	3
Покращена конфігурація	25	7.68e6	10-12
Оптимізована конфігурація	50	15.36e6	30-32

Швидкості передачі даних виявилися нижчими за комерційні LTE мережі через кілька факторів. Основними причинами стали обмежені обчислювальні можливості LimeSDR та хост-комп'ютера, а також експериментальний характер установки, орієнтованої на дослідження шляхів покращення характеристик, а не на досягнення комерційних показників.

Під час експериментів виявлено кілька викликів, які вплинули на стабільність роботи та продуктивність системи.

Забезпечення задовільного теплового режиму LimeSDR при тривалих тестах виявилось неможливим без зовнішнього примусового охолодження (рис. 1).

Точне налаштування частотних параметрів виявилось критичним для стабільної роботи мережі.

При підключенні мобільних терміналів критичним виявилось налаштування конфігурації APN.

Сильна залежність якості з'єднання та швидкості від характеристик мобільних терміналів та середовища розповсюдження підтвердила важливість адаптації мережних рішень до умов каналу.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на впровадження технології MIMO та massive MIMO.

Проект *srsRAN* вже дозволяє використовувати MIMO для downlink, що може подвоїти швидкість передачі даних. В нашому випадку до 60 Мбіт/с.

Висновки

Показано, що для навчальних та дослідницьких цілей у галузі телекомунікацій перспективним є використання платформи LimeSDR через її високі технічні характеристики, підтримку технології MIMO та порівняно низьку ціну. Гнучкість такої платформи дозволяє моделювати різні сценарії роботи мобільних мереж. Це відкриває широкі можливості в лабораторних умовах або дистанційно вивчати та випробувати нові технології і алгоритми, що робить такий стенд корисним інструментом у навчальних закладах та дослідницьких установах.

Розроблено покрокову інструкцію зі створення фізичної моделі БС стандарту LTE на базі LimeSDR та комп'ютера із ОС Ubuntu. Надана покрокова інструкція щодо встановлення необхідного програмного забезпечення, його налаштування та використання на практиці.

Подальші дослідження можуть включати розширення функціональності платформи через впровадження МІМО, розширення діапазону робочих частот, підтримку нових стандартів 5G та 6G.

Список літератури:

1. Loshakov V.A., Moskalets M.V., Vellio A. Complex of laboratory works for studying communication systems and radio monitoring based on SDR technology. KhNURE, 2019.
2. LTE/NR (2023) Base Station Software <https://bellard.org/lte/>.
3. srsRAN. (2023). srsRAN 4G. GitHub.
4. https://github.com/srsran/srsRAN_4G.
5. Lime Microsystems. (2023). LimeSDR. <https://limemicro.com/products/boards/limesdr/>.
6. Татаринцева Ю., Заволодько Г. Теоретичні засади впровадження онлайн-лабораторій у вищій дистанційній освіті. Харків : НТУ "ХПІ", 2023. URL: <http://bellard.org/>.
7. Bondarenko I., Dushenkov O., Loshakov V. Development of the complex laboratory works for research digital television and mobile communication systems based on sdr technology // Automation of Technological and Business Processes. 2023. Vol. 15(2). P. 40–50. URL: <https://doi.org/10.15673/atbp.v15i2.2524>.

Надійшла до редколегії 10.01.2026

Прийнята до друку після рецензування 23.04.2026

Публікація (оприлюднення) 30.04.2026

Відомості про авторів:

Жуга Юрій Сергійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри інфокомунікаційної інженерії ім. В.В. Поповського, Україна; e-mail: yurii.zhuha@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0007-6508-8831>.

Лошаков Валерій Андрійович – д-р техн. наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри інфокомунікаційної інженерії ім. В.В. Поповського, Україна; e-mail: valerii.loshakov@nure.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5794-4094>

Москалець Микола Вадимович – д-р техн. наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри інформаційно-мережної інженерії, Україна; e-mail: mykola.moskalets@nure.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1726-1250>

Сабурова Світлана Олександрівна – Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри інфокомунікаційної інженерії ім. В.В. Поповського, Україна; e-mail: svitlana.saburova@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4001-1594>