

УДК 621.396.4

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/21>**Сайко В. Г.**

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Комаров В. О.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Гетьман А. В.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Мусієнко В. А.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Колодійчук Л. В.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Станілога О. О.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

МОДЕЛЬ ОЦІНКИ СТРУКТУРИ ЦІЛЬОВОГО СИГНАЛУ ВИЯВЛЕННЯ ЧАСТОТНИХ КАНАЛІВ У КОГНІТИВНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Одним із важливих науково-технічних завдань військових фахівців-зв'язківців є впровадження когнітивних радіомереж у військових операціях. Це особливо актуально під час виявлення та аналізу хімічних, біологічних, радіологічних і ядерних загроз, управління військами, оцінки бойових втрат, розвідки, спостереження за полем бою та наведення на цілі. Когнітивний радіозв'язок забезпечує безперервний моніторинг радіосередовища та оновлення бази знань для мінімізації завад. Його ефективність значною мірою залежить від точності алгоритмів визначення вільних каналів та управління спектральними ресурсами. При цьому основною проблемою впровадження когнітивного радіо в силових структурах є створення високоточних пристроїв для аналізу спектра та розробка алгоритмів обміну інформацією між вузлами мережі. Важливим аспектом також є оцінка ефективності цих рішень для забезпечення надійного моніторингу частотного спектра в спеціалізованих когнітивних радіосистемах. Паралельно для рішення задач силовими структурами спеціального призначення активно впроваджується технологія зв'язку та управління спеціалізованими БПЛА через інфраструктуру операторів стільникового зв'язку стандартів 4G LTE/5G. Це пояснюється широким покриттям, поширеністю та простою підключення до мережі.

В статті досліджено запропоновану модель для когнітивних радіомереж, яка дозволяє розпізнавати сигнали стандартів NR та LTE на основі аналізу вибірок радіосигналів, записаних у середовищі MatLab. Розглянуто загальну характеристику технології когнітивного радіозв'язку, проаналізовано перспективи та виклики його застосування в силових структурах спеціального призначення. Також проведено експериментальне дослідження роботи приймача когнітивного радіо під час аналізу структури сигналів NR та LTE з використанням нейромережових методів та глибокого навчання у середовищі MatLab.

Ключові слова: сигнали стандартів NR та LTE, нейромережові методи, когнітивні радіомережі спеціального призначення.

Постановка проблеми. 1.1. Загальна характеристика технології когнітивного радіозв'язку.

Технології когнітивного радіозв'язку можуть застосовуватися для налаштування з'єднань між терміналами та різними радіосистемами, операторами зв'язку, що сприяє ефективнішому управ-

лінню доступним радіочастотним спектром [1, 2]. Вони слугують інструментом як для колективного використання частот, так і для організації гнучкого доступу до них. Системи когнітивного радіозв'язку включають різноманітні технології радіодоступу, а самоналаштовувані мережі з різ-

ними топологіями забезпечують їх використання відповідно до локальної доступності спектра. Для цього необхідно визначати розташування та характеристики інших технологій у межах доступної смуги частот, а також сканувати весь діапазон, щоб оцінити локальне навантаження.

Когнітивне радіо поділяється на два основні типи:

- **Повне когнітивне радіо (Mitola radio)**, яке враховує всі можливі параметри бездротового вузла чи мережі.

- **Когнітивне радіо з виявленням спектра**, що аналізує виключно радіочастотний спектр.

Також існує кілька варіантів використання когнітивного радіо залежно від доступності частот:

- **Licensed-Band Cognitive Radio** – працює в ліцензованих діапазонах, за винятком неліцензованих зон (наприклад, U-NII або ISM). Робоча група IEEE 802.22 розробила стандарт для бездротових регіональних мереж (WRAN), які функціонуватимуть у незадіяних телевізійних каналах (так звані «білі простори») [3].

- **Когнітивне радіо без ліцензії** – використовує виключно неліцензовані частини спектра, як це передбачено у специфікаціях IEEE 802.15 Task Group 2, що регламентує співіснування IEEE 802.11 та Bluetooth [4, 5].

До ключових функцій когнітивного радіозв'язку належать [6, 7]:

- **Мобільність спектра** – зміна частоти роботи відповідно до умов, що дозволяє оптимально використовувати доступні ресурси та забезпечувати безперебійний зв'язок.

- **Спільне використання спектра** – дозволяє когнітивним користувачам використовувати смуги частот, виділені для ліцензованих користувачів, при цьому дотримуючись обмежень щодо рівня випромінювання.

- **Спільне використання спектра на основі зондування** – когнітивні пристрої спочатку аналізують активність у частотних діапазонах і лише за відсутності ліцензованих користувачів можуть здійснювати передачу.

- **Спільне використання спектра через базу даних** – передбачає, що пристрої повинні отримати дозвіл на використання частот, керуючись інформацією з бази даних «білих просторів», яка прогнозує рівень завад і визначає можливість доступу.

Ці підходи дозволяють когнітивному радіозв'язку динамічно адаптуватися до змін у спектральному середовищі та сприяють раціональному використанню частотних ресурсів.

1.2. Перспективи та виклики застосування когнітивного радіо в силових структурах спеціального призначення.

Одним із ключових науково-технічних завдань військових фахівців-зв'язківців є впровадження когнітивних радіомереж у військових операціях, зокрема під час виявлення та аналізу хімічних, біологічних, радіологічних і ядерних загроз, управління військами, оцінки бойових втрат, спостереження за полем бою, розвідки та наведення на цілі.

Для реалізації таких завдань необхідно враховувати наступні аспекти:

1. Сумісність із наявними системами спеціального радіозв'язку. У силових підрозділах спеціального призначення експлуатуються різні бездротові системи та засоби зв'язку, часто несумісні між собою. Ці радіозасоби мають різні робочі частоти, потужність передачі, методи модуляції і т. д. і не можуть забезпечити взаємозв'язок та інтероперабельність, що стало важливим фактором, що обмежує спільні дії Збройних сил. Незалежно завантажуючи різне програмне забезпечення, когнітивне радіо може зв'язуватися як з короткохвиловими радіостанціями, так і з ультракороткохвиловими радіостанціями і навіть із супутниками. Саме тому, що когнітивний радіозв'язок може автономно вивчати мережеві комунікаційні протоколи та служби. Однією з переваг когнітивного радіо є можливість поступового впровадження новітніх технологій без необхідності одномоментної заміни всіх радіозасобів. Завдяки можливості програмної та апаратної реконфігурації когнітивне радіо здатне взаємодіяти з попередніми поколіннями систем радіозв'язку. Але з іншого боку, когнітивний радіозв'язок породжує унікальні завдання, що виникають внаслідок їх співіснування з іншими мережами, а також через існування різних вимог до якості обслуговування (QoS), що пред'являються різними додатками відповідних радіомереж. Тому, необхідні нові інноваційні функції управління радіочастотним спектром для когнітивних радіомереж спеціального призначення.

2. Необхідність підвищення ефективності керування використанням спектру. Управління спектром на полі бою є дуже важливою темою і військові всіх країн надають великого значення дослідженню цього питання. Однак в більшості виділення спектра на полі бою переважно здійснюється як виділення фіксованих частот. З одного боку, така схема розподілу не лише призводить до низького використання ресурсів спектру, але

й легко викликає електромагнітні завади всередині системи або між іншими системами; з іншого боку, ця схема розподілу вимагає багато часу планування спектра на початок битви. Крім того, одного разу певна частота зв'язку не може бути змінена, що б не відбувалося в бойовому стані, тому що в сучасних бойових діях, де ситуація на полі бою швидко змінюється, схема виділення фіксованого спектру затримує бойові частини. Когнітивний радіозв'язок може відчувати електромагнітну обстановку поля бою у тому районі, де він знаходиться, та автоматично визначати наявність необхідної смуги пропускання та спектру. Таким чином, виділення ресурсів спектра може бути виконано швидко за допомогою когнітивного радіозв'язку, а частота зв'язку може автоматично регулюватися в процесі зв'язку. Це не тільки підвищує швидкість роботи в мережі, а й покращує електромагнітну сумісність усієї системи зв'язку.

3. Необхідність поліпшити завадозахищеність системи спеціального радіозв'язку. Завадостійкість є важливим показником для засобів зв'язку в умовах сучасної війни, а також важливою гарантією перемоги у війні. Традиційні технології завадостійкості у каналі в основному включають розширений спектр, стрибкоподібну перебудову частоти, стрибкоподібну перебудову в часі та споріднені технології, похідні від них [8, 9, 10]. Когнітивний радіозв'язок не тільки має вищезгадану здатність протидії завадам, але також зменшує рівень завад, регулюючи напрямки променя завдяки використанню технології визначення положення у поєднанні з технологією МІМО, також може знизити потужність передачі і поліпшити здатність до захисту від перехоплення. Когнітивне радіо має розширені можливості машинного навчання, які можуть вивчати та аналізувати завади, щоб вибирати відповідні стратегії захисту від завад (вибір відповідного каналу зв'язку, методу модуляції, потужності передачі, шаблону стрибкоподібної перебудови частоти тощо) для активного уникати завад.

4. Адаптація до змінних умов середовища. У процесі пересування силових підрозділів виникають «мертві зони» через природні перешкоди, такі як тунелі або гірська місцевість. Когнітивне радіо дозволяє коригувати параметри роботи відповідно до змін довкілля, а також ефективніше розподіляти частотний ресурс та потужність передавачів. Крім того, система забезпечує можливість зв'язку командного центру з тимчасовими дислокаціями при затримках у русі, збоях зв'язку або зміні складу підрозділу.

5. Використання інтелектуальних антенних решіток. Подальший розвиток когнітивного радіо передбачає активне застосування інтелектуальних антенних систем, зокрема технології МІМО, яка є основою зв'язку четвертого та п'ятого покоління (4G/5G). Однак, розміщення антенних решіток на мобільних об'єктах спеціального призначення може бути обмеженим. У таких випадках перспективними є кооперативні антенні системи МІМО (СО-МІМО), що об'єднують антени кількох користувачів у єдину віртуальну антену для спільного радіообміну. Такі системи є економічно вигідними, оскільки підтримують різні стандарти зв'язку та здатні працювати в широкому діапазоні частот (від 2 МГц до 2,5 ГГц). Подальше впровадження когнітивного радіо може зменшити кількість необхідних антен у військових мережах, оптимізувати використання частотного ресурсу і, як наслідок, знизити рівень електромагнітного випромінювання, що позитивно вплине на здоров'я військових і довкілля.

6. Структура когнітивного радіо та його функціонування. Когнітивне радіо складається з кількох підсистем [11]:

- Моніторинг спектра в реальному часі дозволяє виявляти вільні частотні ділянки («білі плями») та часові проміжки, доступні для передачі даних.
- Система навчання аналізує отриману інформацію для подальшого ухвалення рішень.
- Підсистема прийняття рішень прогнозує зашумленість каналу, оцінює швидкість руху об'єкта та можливість встановлення зв'язку на необхідній частоті, що забезпечує передачу сигналів без взаємних завад.

Для запобігання завадам когнітивне радіо здійснює постійний моніторинг радіосередовища та оновлює базу знань. Ефективність таких мереж значною мірою залежить від точності алгоритмів визначення незайнятих каналів та управління спектральними ресурсами.

Основною проблемою впровадження когнітивного радіо в силових структурах є розробка високоточних пристроїв для аналізу спектра, а також алгоритмів обміну інформацією між вузлами. Важливо оцінити ефективність цих рішень для забезпечення надійного моніторингу частотного спектра в спеціалізованих когнітивних радіосистемах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.
Методи зондування спектра. Методи спектрального зондування можна класифікувати на три основні категорії:

1. Виявлення передавача

Когнітивні радіостанції повинні мати можливість визначати, чи присутній сигнал основного передавача у певному спектрі. Для цього використовуються різні методи:

- **Виявлення за допомогою узгодженого фільтра [11].**

- **Метод енергетичного виявлення [11, 12].** Цей метод оцінює наявність або відсутність сигналу шляхом вимірювання потужності отриманого сигналу. Він є простим у реалізації, однак потребує точної інформації про рівень шуму. Недосконале визначення потужності шуму може спричинити ефект *стіни SNR*, при якому за певного рівня співвідношення сигнал/шум (SNR) неможливо надійно виявити переданий сигнал, навіть збільшуючи час спостереження. Встановлено, що цей ефект спричинений не самою невизначеністю шуму, а недостатньою точністю оцінки його потужності.

- **Циклостационарний метод виявлення [11].** Базується на тому, що більшість штучних сигналів зв'язку (BPSK, QPSK, AM, OFDM тощо) мають циклостационарні характеристики, тоді як шумові сигнали (наприклад, білий шум) такими характеристиками не володіють. Цей метод дозволяє ефективно розпізнавати сигнали, замасковані шумом, та є стійким до змін дисперсії шуму. Циклостационарні детектори можуть працювати в одноцикловому або багатоперіодичному режимі.

2. Широкополосне зондування спектра

Передбачає аналіз великої спектральної смуги (сотні мегагерц або навіть кілька гігагерц). Оскільки сучасні аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) мають обмеження щодо частоти дискретизації при високій роздільній здатності, для реалізації цього методу застосовують новітні підходи, зокрема компресійне вимірювання та суб-Найквістову дискретизацію.

3. Спільне виявлення

Цей метод передбачає об'єднання даних від кількох користувачів когнітивного радіо для покращення виявлення основним користувачем.

Методи виявлення на основі завад

- **CR на основі нульового простору.** Використовуючи багатоканальні антени, когнітивне радіо може визначати нульовий простір основного користувача і передавати сигнали саме в цьому просторі, мінімізуючи взаємні завади.

Керування спектром

Когнітивне радіо повинно ефективно використовувати спектр, вибираючи найоптимальніші доступні частоти для забезпечення якісного

зв'язку без створення завад для основних користувачів. Функції керування спектром включають:

- **Аналіз спектра** – оцінка доступних частотних діапазонів та їх стану.

- **Прийняття рішень щодо використання спектра** – вибір найкращої смуги частот відповідно до вимог якості обслуговування.

Таким чином, ефективне зондування спектра та управління його ресурсами є ключовими факторами у впровадженні когнітивного радіо.

Постановка завдання. На даний момент активно розвивається технологія забезпечення зв'язку та управління БПЛА спеціального призначення з використанням наявної інфраструктури операторів стільникового зв'язку стандартів 4G LTE/5G через його поширеність, широке покриття територій та легке підключення до мережі. Подібний спосіб управління БПЛА вже був протестований багатьма закордонними операторами, наприклад AT&T, Telefonica, Vodafone тощо.

При цьому кожен несанкціонований БПЛА, який передає дані в процесі польоту, визначається як абонентський термінал, що використовує ідентичні звичайному абонентському пристрою (стільниковому телефону) принципи роботи, тобто володіє SIM-карткою або eSIM і працює відповідно до стандартів LTE, визначених організацією.

Для виявлення несанкціонованих БПЛА, які під час польоту передають дані бездротовим каналом зв'язку, як це робить стандартний термінал LTE (наприклад, мобільний телефон), пропонується метод виявлення на базі керуючих сигналів LTE, випромінюваних самим БПЛА в процесі польоту. Але для цього необхідно розробити інноваційні алгоритми прийому та аналізу сигналів взаємодії між базовою станцією та абонентом мереж 4G LTE для подальшого використання в системах когнітивного радіозв'язку.

Метою роботи є дослідження моделей і алгоритмів для когнітивних радіомереж, що забезпечують розпізнавання сигналів стандартів NR та LTE на основі аналізу вибірок радіосигналів, отриманих із попередньо записаних сигналів цих стандартів у середовищі MatLab. Крім того, передбачено проведення експериментальної перевірки роботи приймача когнітивного радіо під час аналізу структури цільового сигналу NR та LTE з використанням нейромережних підходів і методів глибокого навчання.

Особливістю даного процесу є те, що при цьому створюються зображення спектрограм із сигналів заданої смуги частот. З отриманого зображення

спектрограми генеруються зображення RGB (аббр. від англ. Red, Green, Blue – червоний, зелений, синій) роздільною здатністю 128×128 пікселів, що дозволяє розмістити в пам'яті досить великий пакет зображень під час навчання, забезпечуючи при цьому досить точне уявлення за часом та частотою.

Виклад основного матеріалу дослідження. Методичні аспекти визначення спектра сигналів NR (5G New Radio) та LTE (Long-Term Evolution) з використанням глибокого навчання.

Загальні зауваження. Визначення спектра сигналів NR (5G New Radio) та LTE (Long-Term Evolution) з використанням глибокого навчання у MATLAB у контексті семантичної сегментації включає кілька ключових етапів, від збору даних до навчання та розгортання моделі. Цей процес поєднує обробку сигналів, вилучення ознак та класифікацію із застосуванням нейромережових моделей.

Процес отримання інформації про канали вручну є складним і потребує глибоких експертних знань. Але для спрощення доцільно використовувати глибокі нейронні мережі у поєднанні з програмним середовищем MatLab, що дозволяє аналізувати частотний ресурс та оцінювати його поточну зайнятість. В статті здійснюється моделювання процесу розпізнавання сигналів стандартів NR та LTE у визначених діапазонах спектра, а також розглядається навчання мережі семантичної сегментації для їх ідентифікації у широкосмужових спектрограмах.

Мережа семантичної сегментації проходить навчання на великих наборах даних у рамках штучної нейронної мережі для моніторингу спектру. В процесі навчання застосовується технологія комп'ютерного зору, що використовує семантичну сегментацію для обробки бездротових сигналів, ідентифікації об'єктів та визначення їх розташування на спектрограмі. Семантична сегментація, яка передбачає поділ зображення на окремі групи пікселів, використовується для аналізу спектрального складу широкосмужової спектрограми.

Однією з ключових переваг бездротових сигналів у сфері глибокого навчання є можливість їх попереднього формування із заданим рівнем шуму у середовищі моделювання MatLab [13]. Також існують моделі спотворень каналів та радіочастот, що дозволяють автоматично генерувати сигнали 5G NR за допомогою 5G Toolbox [14] та сигнали LTE за допомогою LTE Toolbox [15], усуваючи потребу у ручному маркуванні. Ці сигнали

можуть бути передані через стандартні моделі каналів для створення навчальних даних. Перед початком навчання мережі семантичної сегментації необхідно сформувати відповідний набір навчальних даних. У подальшому розглядаються особливості процесу моделювання відповідно до [14, 15, 16].

1. Підготовка даних

1.1. Збір та генерація даних

У MATLAB можна отримати дані NR та LTE двома способами:

- Симуляція сигналів за допомогою 5G Toolbox та LTE Toolbox.
- Захоплення реальних сигналів через програмно-визначувані радіосистеми (SDR), такі як USRP або RTL-SDR.

1.2. Перетворення сигналів у зображення (спектрограми)

Для семантичної сегментації необхідно подати сигнали як зображення. Для цього застосовуються методи спектрального аналізу:

- Короткочасне перетворення Фур'є (STFT).
- Вейвлет-перетворення (CWT).
- Перетворення Чірпа (Chirp Transform).

Навчальні дані представлені сигналами із заданими параметрами, які поділяються на кадри. Кожен кадр триває 40 мс і включає 40 субкадрів. Передбачається, що сигнал 5G NR або LTE займає постійну смугу частот протягом усього часу кадру. Для оцінки продуктивності мережі генеруються кадри, у яких сигнали 5G NR та LTE розташовуються у випадкових смугах у межах заданого частотного діапазону. Частота дискретизації становить 61,44 МГц, що забезпечує достатню точність обробки більшості сигналів. У разі необхідності моніторингу ширшого спектра частота дискретизації може бути збільшена з повторним формуванням навчальних кадрів і перенавчанням мережі.

У середовищі MatLab навчальні дані створюються за допомогою функції *helperSpecSenseTrainingData*, яка використовує *helperSpecSenseNRSignal* для генерації сигналів 5G NR і *helperSpecSenseLTESignal* для сигналів LTE. Відповідні параметри для сигналу 5G NR наведені в таблиці 1, а для сигналу LTE – у таблиці 2. Для моделювання спотворень у каналі застосовуються функції *nrCDLChannel* та *LteFadingChannel*, параметри яких представлені в таблиці 3.

Генерація спектрограм здійснюється за допомогою функції *helperSpecSenseSpectrogramImage*, що використовує швидке перетворення Фур'є довжиною 4096 відліків. З отриманої спектро-

Таблиця 1

Змінні параметри сигналів 5G NR

Параметри 5G NR	Значення	Величина
Смуга пропускання	[10 15 20 25 30 40 50]	МГц
Відстань між піднесучими	[15 30]	кГц
Шаблон блоку SSB	[«Випадок А» «Випадок В»]	
Період SSB	[20]	мс

Таблиця 2

Змінні параметри сигналів LTE

Параметри LTE	Значення	Величина
Опорний канал	[«R.2», «R.6», «R.8», «R.9»]	
Смуга пропускання	[10 5 15 20]	МГц
Тип дуплексу	FDD	

Таблиця 3

Змінні параметри каналу

Параметри каналу	Значення	Величина
Смуга пропускання	[0 40]	дБ
Тип дуплексу	[0 500]	Гц

грами створюються RGB-зображення (Red, Green, Blue – червоний, зелений, синій) з роздільною здатністю 128×128 пікселів, що забезпечує збереження великого обсягу даних під час навчання та високу точність представлення інформації у часово-частотній області.

Функція *helperSpecSenseTrainingData* також дозволяє завантажувати навчальні дані зі сховища MatLab, які містять три набори сигналів:

1. 5G NR;
2. LTE;
3. комбіновані 5G NR та LTE.

Кожен набір містить 900 кадрів, необхідних для навчання глибокої нейронної мережі семантичної сегментації. Використовуються RGB-зображення з роздільною здатністю 128×128 пікселів для навчання мережі з нуля, а зображення 256×256 пікселів – для трансферного навчання на попередньо навчених мережах семантичної сегментації.

Завантажені навчальні дані містять як промарковані LTE та NR-сигнали, так і невідомі сигнали у визначеному частотному діапазоні. Аналогом тестових даних є сигнали, отримані з реального радіоефіру за допомогою апаратної частини програмно-конфігурованого радіо [17]. Оскільки для навчання використовується нейронна мережа, далі будуть розглянуті особливості моделювання її архітектури.

2. Створення архітектури семантичної сегментації

У MATLAB можна використовувати програми пакети Deep Learning Toolbox та Computer Vision Toolbox. Найчастіше застосовують Custom, ResNet-50, MobileNet-v2, U-Net, SegNet чи фреймворк DeepLabV3 [18, 19, 20].

2.1. Підготовка розмітки

- Кожній спектрограмі зіставляється маска, де різні частотні області відповідають NR чи LTE.

- Розмітка виконується вручну або за допомогою скрипту.

2.2. Створення моделі

У моделюванні, проведеному відповідно до [14], аналізуються чотири моделі глибоких нейронних мереж:

1. ResNet-18;
2. ResNet-50;
3. MobileNet-v2;
4. Custom.

Перші три моделі є згортковими нейронними мережами, попередньо навченими для класифікації зображень за 1000 категоріями об'єктів. Вхідний розмір зображень для цих мереж становить 224×224 пікселів. Ключова відмінність між ними – глибина мережі: 18 шарів у ResNet-18, 50 шарів у ResNet-50 і 53 шари у MobileNet-v2.

Для навчання мережі з нуля використовується архітектура Custom, яка працює із зображеннями 128×128 пікселів. Під час навчання на основі обраних параметрів завантажуються відповідні навчальні дані. Оскільки у цій роботі розглядаються кадри саме 128×128 пікселів, застосовується архітектура Custom.

Завантаження навчальних зображень спектрограм сигналів 5G NR та LTE здійснюється за допомогою функції *imageDatastore*, яка дозволяє ефективно обробляти великі колекції зображень із диска. Спектрограми представлені у форматі *.png*. Додатково використовується функція *pixelLabelDatastore* для завантаження міток пікселів спектрограм. Кожен піксель отримує одну з наступних міток:

- «NR» – сигнал 5G NR,
- «LTE» – сигнал LTE,
- «Noise» – шум,
- «Unknown» – невідомий сигнал.

Файли міток пікселів зберігаються у форматі *.hdf*.

Для аналізу розподілу класів у навчальному наборі використовується функція *countEachLabel*, яка підраховує кількість пікселів кожного класу та буде відповідний графік. На рис. 1 показано

графік розподілу пікселів за мітками класів, отриманий у результаті імітаційного моделювання. Він демонструє, що клас «Noise» домінує, тоді як «Unknown» має найменшу частку, що вказує на значний рівень шуму у спектрограмах.

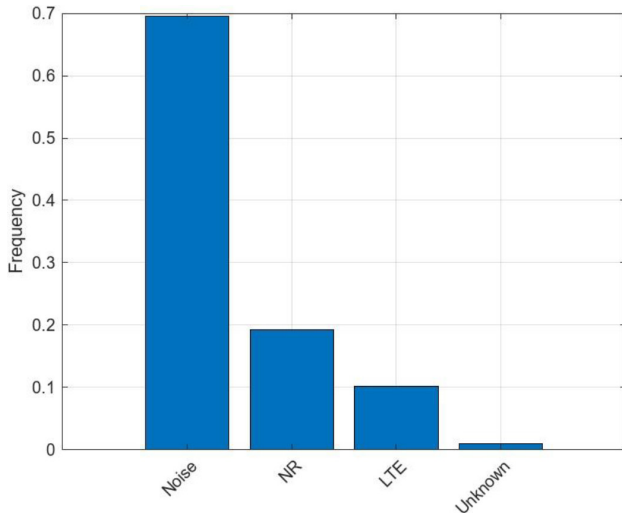


Рис. 1. Розподіл пікселів за мітками класів

У навчальному наборі бездротові сигнали часто розподілені нерівномірно. Сигнали 5G NR можуть мати більшу пропускну здатність, ніж LTE, а шум займає значну частину фонового спектра. Це призводить до дисбалансу класів, що може негативно вплинути на навчання мережі, оскільки модель схильна до переваги домінуючих класів.

Підготовлені дані поділяються на три набори:

- 80 % – для навчання,
- 10 % – для перевірки,
- 10 % – для тестування.

Розподіл даних між наборами здійснюється випадковим чином за допомогою функції `helperSpecSensePartitionData`, яка поділяє як зображення, так і мітки пікселів відповідно до вказаного співвідношення.

3. Навчання моделі

3.1. Налаштування параметрів

3.2. Запуск навчання

У процесі навчання використовується типовий підхід для мереж семантичної сегментації, що включає поетапне зменшення та збільшення роздільної здатності зображення. Спочатку, між згортковим шаром та шаром випрямної функції лінійної активації (ReLU), відбувається зменшення дозволу вхідного зображення. Функція ReLU виконує нелінійне перетворення, пропускаючи лише позитивні значення: якщо вхідне значення менше або дорівнює нулю, вихід буде також нульовим. Після цього проводиться віднов-

лення вихідного дозволу, щоб відповідати розміру вхідного зображення.

У цьому процесі мережа використовує нелінійні фільтри, які оптимізовані для сегментації певних класів. Спочатку задається вхідний шар, після чого мережа поступово знижує роздільну здатність через згорткові шари та ReLU. Заповнення у згорткових шарах обирається таким чином, щоб вихідний розмір залишався ідентичним вхідному, що полегшує конструювання архітектури, оскільки більшість шарів зберігають однакові розміри на різних етапах обробки.

Зменшення роздільної здатності (downsampling) реалізується за допомогою шару максимального пулінгу, який вибирає максимальне значення у вибірці. Використання шару максимального пулу дозволяє зменшити розмірність вхідних даних удвічі. В результаті, після проходження через кілька таких рівнів, вхідні дані зменшуються у 16 разів.

Збільшення роздільної здатності (upsampling) виконується за допомогою транспонованого згорткового шару (також відомого як шар деконволюції). Використання транспонованої згортки одночасно забезпечує і підвищення роздільної здатності, і фільтрацію.

Фінальний набір шарів відповідає за класифікацію кожного пікселя, забезпечуючи збереження тих самих просторових розмірів (висоти та ширини), що й у вхідного зображення. Вони об'єднуються для передбачення категорії кожного пікселя. Завершальний етап навчання мережі семантичної сегментації включає складання всіх шарів в єдину архітектуру.

Після завершення навчання необхідно оцінити ефективність нейронної мережі.

4. Тестування та розгортання

4.1. Застосування навченої моделі

4.2. Оцінка точності

Для оцінки ефективності розпізнавання сигналів використовуються фрагменти записів, що містять сигнали 5G NR і LTE. Для отримання піксельних оцінок із зображень спектрограм у тестовому наборі застосовується функція `semanticseg`, а функція `evaluateSemanticSegmentation` використовується для обчислення різних метрик, що характеризують якість семантичної сегментації.

На рис. 2 представлена матриця невизначеності, де:

- вісь X відповідає за шукані класи сигналів,
- вісь Y – за розпізнані сигнали,
- по діагоналі вказано відсоток правильно розпізнаних сигналів.

True Class	Predicted Class			
	LTE	NR	Noise	Unknown
LTE	95.1%	2.8%	2.1%	0.0%
NR	2.7%	92.6%	4.7%	0.0%
Noise	3.3%	7.6%	89.2%	0.0%
Unknown				

Рис. 2. Матриця невизначеності для всіх тестових кадрів

Далі тестові дані розподіляються на захоплені та згенеровані набори, і процес аналізу повторюється, але вже лише для кадрів із захопленими даними.

Рис. 3 демонструє нормалізовану матрицю невизначеності, яка свідчить, що мережа часто плутає сигнали NR із класами «Noise» або «Unknown». Аналіз перехоплених сигналів показав, що файли з префіксом CF3550 мають низьке відношення сигнал/шум, через що мережа зазнає труднощів із правильною ідентифікацією.

True Class	Predicted Class			
	LTE	NR	Noise	Unknown
LTE	99.9%		0.1%	0.0%
NR	0.2%	89.6%	7.3%	2.9%
Noise	0.0%	0.3%	98.0%	1.7%
Unknown	0.0%	0.1%	0.5%	99.4%

Рис. 3. Нормалізована матриця невизначеності

На рис. 4 наведено результат ідентифікації сигналів 5G NR і LTE у спектрограмі:

- (а) – із урахуванням файлів з префіксом CF3550,
- (б) – без урахування цих файлів.

Аналізуючи спектрограму без урахування файлів із префіксом CF3550, можна побачити чітке розмежування сигналів NR та LTE.

Маркерна спектрограма, представлена на рис. 5, показує, що більшу частину смуги частот займає «Noise», а також підтверджує, що ширина частотної смуги NR перевищує LTE.

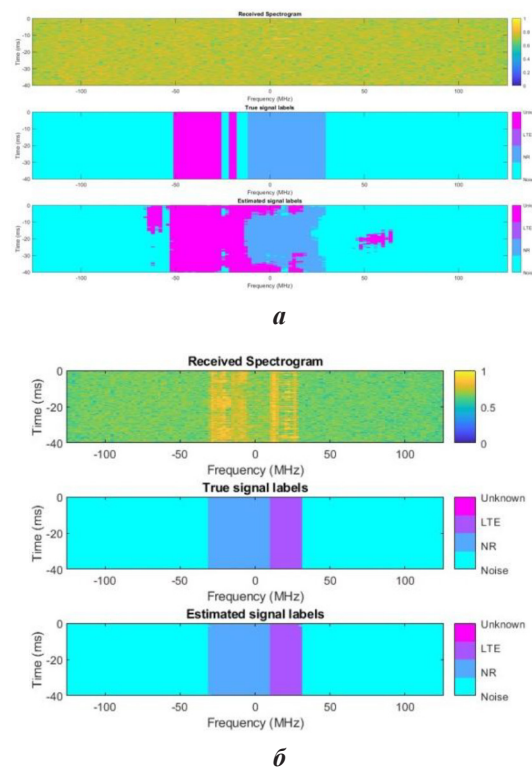


Рис. 4. Ідентифікація сигналів 5G NR та LTE у спектрограмі з урахуванням (а) та без урахування (б) назви файлу з префіксом CF3550

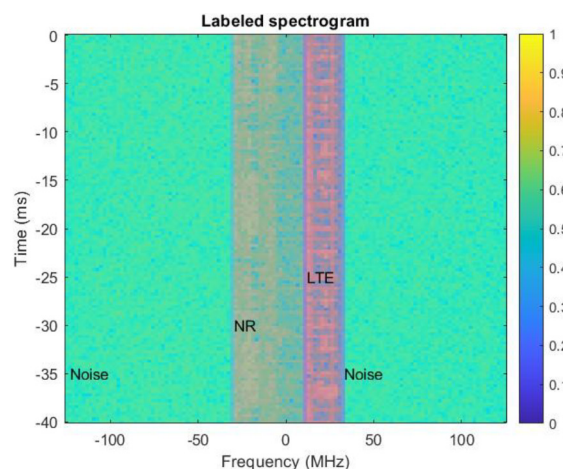


Рис. 5. Маркована спектрограма

На цьому завершується процес аналізу структури сигналів NR та LTE з використанням нейромережових підходів і методів глибокого навчання.

Висновки.

1. Наведено загальну характеристика технології когнітивного радіозв'язку, перспективи та виклики застосування когнітивного радіо в силових структурах спеціального призначення.

2. Проведено дослідження моделей і алгоритмів, що забезпечують розпізнавання сигналів стандартів NR та LTE на основі аналізу вибірок

радіосигналів, отриманих із попередньо записаних сигналів цих стандартів у середовищі MatLab.

3. Використовуючи MATLAB та глибокі нейромережі, можна автоматично ідентифікувати

сигнали NR та LTE на основі їх спектральних характеристик. Семантична сегментація дозволяє локалізувати сигнали в частотній ділянці, що корисно для моніторингу 5G/LTE мереж.

Список літератури:

1. Климаш М.М. Модель оцінки ефективності алгоритмів переключення радіочастотних каналів для вибору спектру у когнітивних радіомережах. *Вісник Національного Університету «Львівська політехніка». Радіoeлектроніка та телекомунікації*. 2017. № 880. С. 73–81.

2. Янишин В.Б. Моделі та алгоритми управління радіочастотним спектром в когнітивних радіомережах. НУ «Львівська політехніка». Львів. 2018. 158 с.

3. IEEE Standard – Information Technology-Telecommunications and Information Exchange between Systems-Wireless Regional Area Networks-Specific Requirements-Part 22: Cognitive Wireless RAN MAC and PHY specifications: Policies and Procedures for Operation in the Bands that Allow Spectrum Sharing where the Communications Devices May Opportunistically Operate in the Spectrum of Primary Service. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/802.22/5896/>

4. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/802.15.4/7029/>

5. IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks. Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/802.11/5536/>

6. Рекомендация МСЭ-R М.2330-0 Когнитивные системы радиосвязи в наземной подвижной службе. 11/2014.

7. Отчет МСЭ-R SM.2256-1. (08/2016). Измерения и оценка занятости спектра.

8. Системи та мережі цифрового радіозв'язку: інженерно-технічний довідник / [Олійник В.Ф., Кривуца В.Г., Сайко В.Г., Булгач С.В.]. – Ніжин : ТОВ «Видавництво «Аспект-Поліграф», 2011. – 612 с.

9. Сайко В.Г. Системи бездротового цифрового радіозв'язку нового покоління: Монографія. / В.Г. Сайко. – К. : ПП «Золоті ворота», 2011. – 300 с.

10. Слободянюк П.В., Наритник Т.М., Благодарний В.Г., Сайко В.Г., Булгач В.Л. Теорія і практика управління використанням радіочастотного ресурсу. Навчальний посібник. / за редакцією Кривуци В.Г. К. : ДУІКТ, 2012. – 596 с.

11. Лисечко В.П. Методи та моделі підвищення завадостійкості безпроводових інтелектуальних телекомунікаційних систем на базі складних сигнально-кодових конструкцій. Національний авіаційний університет, 2023. Київ, 350 с.

12. Безрук В.М., Іваненко С.А. Обнаружение незанятых частотных каналов в когнитивных радиосетях. *Радіотехніка (Харьков)*. 2017. № 1. С. 4–8.

13. Syed S.N., Lazaridis P.I., Khan F.A., Ahmed Q.Z., Hafeez M. et al. Deep Neural Networks for Spectrum Sensing: A Review / IEEE Access. 2023. Vol. 11. PP. 89591–89615. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3305388 EDN: PUAYON

14. Spectrum Sensing with Deep Learning to Identify 5G and LTE Signals. URL: <https://www.mathworks.com/help/comm/ug/spectrum-sensing-with-deep-learning-to-identify-5g-and-lte-signals.html> (дата звернення 04.02.2025).

15. 5G Toolbox. URL: <https://www.mathworks.com/products/5g.html> (дата звернення 04.02.2025).

16. LTE Toolbox. URL: <https://www.mathworks.com/products/lte.html> (дата звернення 04.02.2025).

17. Бойко Ю.М. Програмно-конфігуровані системи передавання, приймання та обробки інформації: монографія. ХНУ, Хмельницький, 2023. 317 с.

18. resnet18. URL: <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/resnet18.html> (дата звернення 04.02.2025).

19. resnet50. URL: <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/resnet50.html> (дата звернення 04.02.2025).

20. mobilenetv. URL: <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/resnet50.html> (дата звернення 04.02.2025).

Saiko V. G., Komarov V. O., Hetman A. V., Musiienko V. A., Kolodiichuk L. V., Staniloha O. O.

MODEL FOR ESTIMATING THE STRUCTURE OF THE TARGET SIGNAL FOR DETECTION OF FREQUENCY CHANNELS IN COGNITIVE RADIO NETWORKS FOR SPECIAL PURPOSES

One of the important scientific and technical tasks of military communications specialists is the implementation of cognitive radio networks in military operations. This is especially relevant during the detection and analysis of chemical, biological, radiological and nuclear threats, troop management, assessment of combat losses, reconnaissance, battlefield surveillance and target guidance. Cognitive radio communications provide continuous monitoring of the radio environment and updating of the knowledge base to minimize interference. Its effectiveness largely depends on the accuracy of algorithms for determining free channels and managing spectral resources. At the same time, the main problem of implementing cognitive radio in power structures is the creation of high-precision devices for spectrum analysis and the development of algorithms for exchanging information between network nodes. An important aspect is also the assessment of the effectiveness of these solutions for ensuring reliable monitoring of the frequency spectrum in specialized cognitive radio systems. In parallel, to solve the tasks of special-purpose power structures, the technology of communication and control of specialized UAVs through the infrastructure of cellular operators of 4G LTE/5 G standards is being actively implemented. This is explained by the wide coverage, prevalence and ease of connection to the network. The article investigates the proposed model for cognitive radio networks, which allows recognizing signals of the NR and LTE standards based on the analysis of radio signal samples recorded in the MatLab environment. The general characteristics of cognitive radio communication technology are considered, the prospects and challenges of its application in special-purpose power structures are analyzed. An experimental study of the operation of a cognitive radio receiver during the analysis of the structure of NR and LTE signals using neural network methods and deep learning in the MatLab environment is also conducted.

Key words: NR and LTE standard signals, neural network methods, special-purpose cognitive radio networks.