

УДК 621.396

д-р техн. наук, професор Сайко В. Г. ORCID: 0000-0002-3059-6787 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Станілога О. О. ORCID: 0009-0008-5031-3431 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ ТА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ЕФЕКТИВНОСТІ БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ СИСТЕМ КОГНІТИВНОГО РАДІО СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

У статті представлено комплексний аналіз сучасних тенденцій розвитку та модель оцінки характеристик ефективності безпроводових мереж систем когнітивного радіо спеціального призначення. Дослідження фокусується на ключових напрямках розвитку технологій, їхніх перевагах і недоліках, а також на перспективах застосування в критично важливих галузях. Особливу увагу приділено аналізу сучасних наукових досліджень та розробок у галузі когнітивного радіо, зокрема для військових систем, де надійність та безпека зв'язку є критично важливими.

Стаття розглядає основні принципи когнітивного радіо, такі як динамічний доступ до спектра, адаптивність до змін середовища та інтелектуальне управління ресурсами. Проаналізовано технології, що використовуються в системах когнітивного радіо спеціального призначення, включаючи програмно-визначені радіосистеми (SDR), когнітивні радіомережі (CRN) та технології безпеки зв'язку.

Основні тенденції розвитку, виявлені у процесі дослідження, включають використання штучного інтелекту та машинного навчання для оптимізації роботи мереж, розвиток гетерогенних мереж для забезпечення більшої гнучкості та надійності, а також посилення заходів безпеки для захисту від кібератак і радіоелектронної боротьби.

Специфікою мережевоцентричної системи зв'язку військового призначення є швидкий та гарантований доступ користувачів до її послуг. У представленій роботі розроблено модель вибору оптимальних параметрів когнітивної мережі зв'язку, яка самоорганізується, що забезпечують необхідну доступність його абонентів. Модель дозволяє вибрати оптимальні параметри майданного покриття та каналного ресурсу для забезпечення необхідної доступності когнітивної мережі зв'язку.

Стаття також розглядає перспективи практичного застосування когнітивного радіо в спеціальних системах, підкреслюючи його потенціал для забезпечення надійного та ефективного зв'язку в складних і мінливих умовах. Результати дослідження підкреслюють важливість подальших досліджень у цій галузі для розробки більш ефективних і безпечних систем когнітивного радіо.

Ключові слова: когнітивне радіо, безпроводові мережі, модель, спеціальне призначення, динамічний доступ до спектра, адаптивні системи, безпека зв'язку, штучний інтелект, гетерогенні мережі, військові системи зв'язку.

V. Sayko, O. Staniloha. Analysis of trends in development and a model for evaluating the performance characteristics of wireless networks used in special purpose cognitive radio systems

The article presents a comprehensive analysis of current trends in the development and a model for evaluating the performance characteristics of wireless networks in cognitive radio systems for special purposes. The study focuses on key directions in the development of these technologies, their advantages and limitations, as well as their potential applications in critical sectors. Particular attention is given to the analysis of contemporary scientific research and developments in the field of cognitive radio, especially for military systems, where communication reliability and security are of paramount importance.

The article examines the fundamental principles of cognitive radio, such as dynamic spectrum access, adaptability to changing environments, and intelligent resource management. It analyzes the technologies used in cognitive radio systems for special purposes, including software-defined radio (SDR), cognitive radio networks (CRNs), and communication security technologies.

The main development trends identified during the study include the use of artificial intelligence and machine learning to optimize network performance, the evolution of heterogeneous networks to ensure greater flexibility and reliability, and the enhancement of security measures to counter cyberattacks and electronic warfare.

A key feature of network-centric military communication systems is the rapid and guaranteed access of users to communication services. This work proposes a model for selecting optimal parameters of a self-organizing cognitive communication network that ensures the required availability for its users. The model enables the selection of optimal coverage and channel resource parameters to achieve the desired accessibility of the cognitive communication network.

The article also explores the prospects of practical application of cognitive radio in specialized systems, highlighting its potential to provide reliable and efficient communication in complex and dynamic environments.

The findings emphasize the importance of continued research in this area to develop more effective and secure cognitive radio systems.

Keywords: *cognitive radio, wireless networks, model, special purpose, dynamic spectrum access, adaptive systems, communication security, artificial intelligence, heterogeneous networks, military communication systems.*

Постановка проблеми

Сучасні безпроводові системи зв'язку стикаються з проблемою обмеженості радіочастотного спектра та необхідністю забезпечення високої надійності та безпеки передачі даних, особливо в умовах спеціального призначення. Когнітивне радіо, з його здатністю до динамічного управління спектром та адаптації до змін середовища, є перспективним рішенням для подолання цих викликів.

Актуальність дослідження полягає в аналізі сучасних тенденцій розвитку когнітивного радіо для спеціальних застосувань, визначенні ключових напрямів досліджень і перспектив їх практичного застосування. Актуальність дослідження безпроводових мереж систем когнітивного радіо спеціального призначення зумовлена низкою факторів, які відображають сучасні виклики та потреби в галузі зв'язку:

Перевантаженість радіочастотного спектра: Зі зростанням кількості безпроводових пристроїв та послуг радіочастотний спектр стає дедалі більш перевантаженим. Це особливо критично для систем спеціального призначення, де надійний зв'язок є життєво необхідним. Когнітивне радіо пропонує рішення цієї проблеми шляхом динамічного доступу до спектра, дозволяючи системам використовувати вільні частоти в реальному часі.

Вимоги до надійності та безпеки: Системи спеціального призначення, такі як військові, аварійно-рятувальні та критично важливі інфраструктурні системи, вимагають високого рівня надійності та безпеки зв'язку. Когнітивне радіо з його здатністю до адаптації та інтелектуального управління ресурсами може забезпечити стійкий та захищений зв'язок у складних умовах.

Необхідність адаптації до мінливих умов: Умови роботи систем спеціального призначення часто є непередбачуваними та мінливими. Це може включати радіоелектронну боротьбу, природні катастрофи або інші надзвичайні ситуації. Когнітивне радіо з його здатністю до адаптації до змін середовища може забезпечити безперебійний зв'язок у будь-яких умовах.

Розвиток технологій штучного інтелекту: Розвиток штучного інтелекту та машинного навчання відкриває нові можливості для оптимізації роботи когнітивного радіо. Алгоритми штучного інтелекту можуть використовуватися для прогнозування змін у радіочастотному середовищі, виявлення завад та прийняття оптимальних рішень щодо використання спектра.

Потреба в інтеграції різнорідних мереж: Сучасні системи спеціального призначення часто використовують різнорідні мережі зв'язку, такі як стільниковий зв'язок, супутниковий зв'язок та спеціалізовані радіосистеми. Когнітивне радіо може забезпечити інтеграцію цих мереж та ефективне використання їхніх ресурсів. Ураховуючи ці фактори, дослідження тенденцій розвитку безпроводових мереж систем когнітивного радіо спеціального призначення є надзвичайно актуальним і має велике значення для забезпечення надійного та ефективного зв'язку в критично важливих сферах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Фундаментальні роботи Дж. Мітоли III: Впливова робота "Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal" (1999) заклала основи концепції когнітивного радіо, виділивши ключові принципи та потенційні застосування. Подальші роботи Мітоли та його колег розвинули ідеї динамічного доступу до спектра та адаптивного управління радіоресурсами [1].

У відповідь на виклики, пов'язані з управлінням радіочастотним спектром у військових мережах, активно ведуться дослідження та розробки в галузі когнітивного радіо для

військового застосування. Основні напрямки цих досліджень включають розробку передових методів зондування спектра, створення ефективних протоколів для когнітивних мереж, посилення безпеки комунікацій та інтеграцію когнітивного радіо з іншими перспективними технологіями, такими як штучний інтелект (AI) та машинне навчання (ML). Важливу роль у цих дослідженнях відіграють оборонні агентства, такі як Агентство передових оборонних дослідницьких проєктів США (DARPA), яке реалізує програми Next Generation та CommEx, а також Європейське оборонне агентство (EDA) з його проєктами SCORED та CORASMA.

Одним із ключових прикладів ініціатив у галузі військового когнітивного радіо є програма Joint Tactical Radio Systems (JTRS), метою якої була розробка сімейства програмно-визначених радіостанцій з когнітивними можливостями для більш ефективного використання спектра та забезпечення сумісності між різними військовими підрозділами. У рамках цієї програми було розроблено концепцію динамічного доступу до спектра (DSA), яка дозволяє радіостанціям автоматично виявляти доступні частоти та використовувати їх для зв'язку, а також метод фрагментації спектра, що передбачає об'єднання невеликих фрагментів невикористаного спектра для створення ширших каналів зв'язку. Іншим прикладом є розробка компанією KNL когнітивних мережевих високочастотних радіостанцій (CNHF), які здатні автоматично сканувати та виявляти доступні смуги спектра, забезпечуючи надійний зв'язок навіть в умовах обмеженого спектра. Хоча концепція когнітивного радіо для військового застосування ще перебуває на етапі становлення, наявні програми та ініціативи становлять практичні кроки у напрямі інтеграції відповідних технологій у військові системи зв'язку.

Метою статті є аналіз сучасних тенденцій розвитку безпроводових мереж систем когнітивного радіо спеціального призначення, визначення ключових напрямів досліджень, перспектив їх практичного застосування та розробка моделі вибору оптимальних параметрів когнітивної мережі зв'язку, яка самоорганізується, що забезпечують необхідну доступність його абонентів.

Виклад основного матеріалу

1. Аналіз тенденцій розвитку безпроводових мереж систем когнітивного радіо спеціального призначення

Когнітивне радіо є однією з ключових технологій сучасних безпроводових мереж, що забезпечує адаптивне використання частотного спектра, підвищує ефективність радіочастотного ресурсу та сприяє розвитку інтелектуальних систем зв'язку. Його поява стала відповіддю на проблему обмеженості доступного спектра, зумовлену зростаючими вимогами до пропускної здатності мереж та щільністю розміщення безпроводових пристроїв.

Основною ідеєю когнітивних радіомереж є можливість забезпечувати високу пропускну здатність для мобільних користувачів за допомогою динамічних методів доступу до спектра і гетерогенної безпроводної архітектури. Однак невизначеність можливого доступного спектра і також змінні вимоги щодо якісних параметрів обслуговування для різних додатків, когнітивні радіомережі створюють унікальні завдання динамічного використання радіочастотного спектра.

Система когнітивного радіо включає наступні особливості [2]:

1. Уміння взаємодії з навколишнім середовищем для отримання інформації про його поточний стан.
2. Здатність інтелектуально аналізувати отриману інформацію про стан радіосередовища.
3. Вміння адаптивно змінювати конфігурацію системи при зміні параметрів радіосередовища.



Рис. 1. Загальні властивості когнітивного радіо

Функціонування когнітивної радіомережі передбачає забезпечення високої пропускної здатності для мобільних користувачів завдяки використанню гетерогенної архітектури бездротового зв'язку та методів динамічного доступу до спектра. Досягнення цієї мети можливе лише шляхом ефективного управління розподілом радіочастотного ресурсу в реальному часі. Однак когнітивні радіомережі стикаються з унікальними викликами, зокрема з постійними змінами доступності спектра та необхідністю задовольняти різні вимоги до якості обслуговування (QoS) залежно від характеристик конкретних застосувань [3]. Типовий цикл роботи когнітивного радіо представлений на рисунку 2.

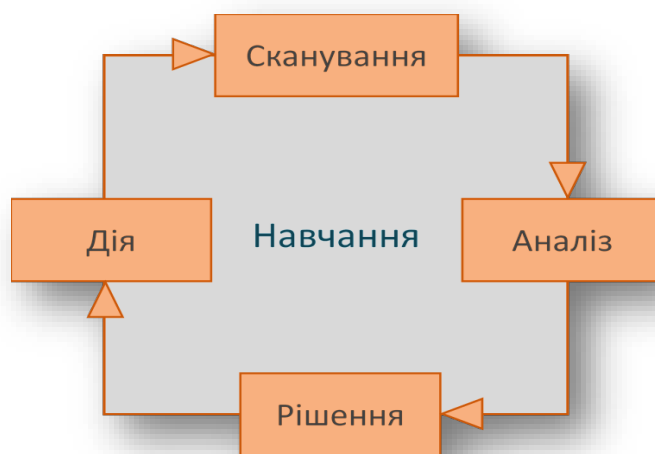


Рис. 2. Цикл роботи когнітивного радіо

Одним із головних напрямів розвитку когнітивного радіо є вдосконалення спектрального сенсингу, що передбачає використання методів енергетичного, цикло-статистичного та коваріаційного аналізу для ефективного виявлення доступних спектральних ресурсів. Особливу увагу приділяють розробці алгоритмів машинного навчання та глибоких нейронних мереж, які дозволяють підвищити точність розпізнавання вторинними користувачами спектральних прогалин та мінімізувати ймовірність хибних спрацьовувань.

Іншим важливим аспектом є динамічне управління спектром. Сучасні моделі включають механізми предиктивного аналізу, що ґрунтуються на методах штучного інтелекту та аналізі великих даних. Такі підходи дають змогу прогнозувати поведінку первинних користувачів та забезпечувати безперервність з'єднань для вторинних користувачів, що критично важливо для мобільних когнітивних мереж.

Значна увага приділяється оптимізації протоколів когнітивного радіо. Вдосконалення класичних моделей MAC-протоколів дозволяє мінімізувати затримки при доступі до каналу та підвищити ефективність спектрального використання. Використання технологій блокчейн у протоколах управління ресурсами дозволяє забезпечити децентралізований контроль над розподілом частотного спектра та підвищити рівень безпеки когнітивних мереж [4].

Окремо варто зазначити про інтеграцію когнітивного радіо у мережі 5G та перспективні розробки для 6G. У системах 5G когнітивне радіо використовується для динамічного розподілу ресурсів між різними класами сервісів, що дозволяє підвищити якість обслуговування та гнучкість мережевої інфраструктури. Очікується, що в 6G когнітивні мережі матимуть глибоку інтеграцію з технологіями штучного інтелекту, що забезпечить автономність прийняття рішень, самонавчання мережевих вузлів та адаптивну маршрутизацію трафіку в режимі реального часу.

Основні тенденції розвитку систем когнітивного радіо для застосування у військовій сфері:

– Підвищення безпеки: Безпека є першочерговим завданням у військових застосуваннях когнітивного радіо. Динамічний та відкритий характер когнітивних радіомереж (CRN) породжує унікальні загрози безпеці, такі як атаки імітації первинного користувача (PUE), де зломисник намагається видати себе за легітимного користувача спектра, обман зондування спектра, спрямований на введення в оману когнітивних радіостанцій щодо доступності спектра, та атаки на когнітивний двигун, який відповідає за прийняття рішень щодо використання спектра. Для протидії цим загрозам активно розвиваються методи підвищення безпеки когнітивних радіосистем. Одним із ключових напрямків є посилення можливостей протидії завадам. Когнітивне радіо значно покращує стійкість до навмисних завад завдяки своїй здатності швидко змінювати робочу частоту, використовувати технології формування променя для спрямування сигналу в потрібному напрямку та мінімізації випромінювання в інших напрямках, а також інтелектуально обирати оптимальні параметри зв'язку, такі як схема модуляції та рівень потужності, для мінімізації впливу завад. У майбутньому очікується розвиток протоколів безпеки для військового когнітивного радіо, включаючи використання алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання для виявлення аномальної поведінки та прогнозування потенційних загроз безпеці, впровадження динамічного керування ключами шифрування, що ускладнює несанкціонований доступ до інформації, а також розробку безпечних методів спільного використання спектра, які запобігають зломисному захопленню спектра.

– Розвиток адаптивності та стійкості: Адаптивність та стійкість є фундаментальними вимогами до військових комунікаційних систем, особливо в умовах динамічного та ворожого електромагнітного середовища. Когнітивне радіо забезпечує високий рівень адаптивності завдяки використанню різноманітних методів динамічного доступу до спектра (DSA) [5]. Ці методи включають безперервне зондування радіочастотного спектра для виявлення доступних смуг частот, інтелектуальний аналіз отриманої інформації для оцінки якості та придатності кожної смуги для зв'язку та прийняття рішень щодо вибору оптимальної смуги та параметрів передачі. Крім того, когнітивні радіосистеми здатні адаптуватися до мінливих умов мережі та потреб користувачів шляхом динамічного регулювання своїх робочих параметрів, таких як смуга пропускання каналу, схема модуляції, вихідна потужність передавача, залежно від поточного рівня перешкод, завантаженості мережі та конкретних

вимог до якості обслуговування для різних типів трафіку. Ще однією важливою тенденцією є розвиток когнітивної радіоелектронної боротьби (РЕБ), яка передбачає використання принципів когнітивного радіо в системах РЕБ для забезпечення кращої обізнаності про електромагнітне середовище, розробки адаптивних стратегій створення перешкод і підвищення стійкості власних систем до ворожих дій у спектрі.

– Підвищення ефективності використання спектра: Ефективне використання обмеженого радіочастотного спектра є ключовим фактором для забезпечення переваги у військових операціях. У зв'язку з цим спостерігається значна тенденція до використання штучного інтелекту та машинного навчання для інтелектуального управління спектром у когнітивних радіосистемах. Алгоритми штучного інтелекту та машинного навчання можуть аналізувати великі обсяги даних про електромагнітне середовище, прогнозувати доступність спектра, приймати рішення щодо динамічного розподілу радіочастотних ресурсів та виявляти несанкціоноване використання спектра з підвищеною точністю. Розробляються спеціалізовані фреймворки, такі як адаптивна динаміка спектра на основі AI (ASD) [6], які мають на меті оптимізувати розподіл спектра та зменшити кількість завад у режимі реального часу, використовуючи можливості машинного навчання та когнітивного радіо. Крім того, для підвищення ефективності використання спектра в широкосмугових системах зв'язку застосовується техніка фрагментації спектра, яка дозволяє об'єднувати невеликі, тимчасово вільні ділянки спектра в більш широкі смуги пропускання, придатні для передачі даних з високою швидкістю.

Впровадження систем когнітивного радіо у військових умовах пов'язане з низкою значних технічних й операційних викликів, а також регуляторних та стандартизаційних проблем. Технічні виклики включають забезпечення високої точності зондування спектра в складних та зашумлених військових середовищах, де необхідно виявляти слабкі сигнали та розрізняти легітимних користувачів спектра від джерел завад. Для реалізації можливостей когнітивного радіо потрібна швидка й ефективна обробка сигналів в реальному часі для виконання зондування спектра, прийняття рішень щодо використання спектра та адаптації параметрів зв'язку, що може бути обчислювально складним завданням. Важливим обмеженням є також енергоспоживання когнітивних радіосистем, особливо для мобільних та портативних військових пристроїв, які працюють від акумуляторів. Крім того, для забезпечення ефективної інтеграції нових технологій у військові комунікаційні інфраструктури необхідно забезпечити сумісність когнітивного радіо з існуючими застарілими системами зв'язку. Операційні виклики включають складність визначення та конфігурації відповідних політик для керування поведінкою когнітивного радіо в різноманітних військових сценаріях та на різних етапах операцій. У високомобільних і динамічних військових середовищах управління когнітивними радіомережами стає складним завданням, що включає питання контролю топології мережі, маршрутизації трафіку та забезпечення якості обслуговування (QoS). Також не менш важливим показником ефективності застосування є рівень навченості особового складу, який відповідає за управління та експлуатацію даних систем.

Нарешті, існують регуляторні та стандартизаційні питання, пов'язані з впровадженням когнітивного радіо у військовій сфері. На даний момент існує недостатньо конкретних правил і стандартів для когнітивного радіо, особливо у військовому контексті, що створює певні труднощі для розробки та розгортання цих систем. Для успішного впровадження когнітивного радіо може знадобитися розробка нових режимів управління спектром, які б враховували специфіку роботи таких систем.

– Потенційні майбутні застосування та вдосконалення когнітивного радіо у військовій галузі:

Майбутнє когнітивного радіо у військовій галузі обіцяє значні вдосконалення та розширення спектра застосувань. Очікується широке використання когнітивного радіо для покращення комунікаційних можливостей автономних систем і безпілотних літальних апаратів (БпЛА) [7]. Завдяки своїй здатності до адаптації та ефективного використання спектра, когнітивне радіо може забезпечити надійні та стійкі канали зв'язку для керування автономними платформами та передачі даних від них, що є критично важливим для розвідки, спостереження та виконання бойових завдань.

Інтеграція когнітивного радіо з іншими новими технологіями, такими як мережі 5G, штучний інтелект та машинне навчання, а також хмарні мережі, відкриває нові перспективи для розвитку військових комунікацій. Штучний інтелект та машинне навчання можуть бути використані для інтелектуального управління спектром, оптимізації параметрів зв'язку та підвищення безпеки, тоді як мережі 5G можуть забезпечити високу швидкість передачі даних та низьку затримку, необхідні для сучасних військових застосувань. Хмарні технології можуть сприяти централізованому управлінню та обміну інформацією в когнітивних радіомережах [8].

Очікується значний прогрес у застосуванні когнітивного радіо в галузі РЕБ та радіотехнічної розвідки. Когнітивні радіосистеми можуть бути використані для розробки більш досконалих методів адаптивного створення завад, здатних ефективно протидіяти ворожим комунікаціям, а також для покращення можливостей виявлення, ідентифікації й аналізу радіосигналів противника.

Впровадження когнітивного радіо також має потенціал для значного покращення ситуаційної обізнаності на полі бою та підтримки концепції мережево-центричної війни. Завдяки здатності до ефективного використання спектра та забезпечення надійного зв'язку в складних умовах, когнітивне радіо може сприяти більш швидкому та безпечному обміну інформацією між різними підрозділами та системами, що є ключовим елементом для досягнення інформаційної переваги [9].

II. Модель вибору оптимальних параметрів когнітивної мережі радіозв'язку спеціального призначення, яка самоорганізується, що забезпечують необхідну доступність його абонентів при мережевоцентричному варіанті її побудови

Далі наведемо приклад розробленої когнітивної моделі, що дозволяє вибрати оптимальні параметри площадного покриття та каналного ресурсу для забезпечення необхідної доступності когнітивної мережі спеціального призначення радіозв'язку при мережевоцентричному варіанті її побудови для забезпечення високої доступності абонентів.

Основні вихідні параметри для моделювання:

- Радіус зони зв'язку (R): від 1 км до 10 км.
- Кількість каналів зв'язку (C): від 1 до 10.
- Доступність (A): імовірність успішного встановлення зв'язку.
- Коефіцієнти впливу:
 - α — вплив розширення зони покриття;
 - β — вплив розширення кількості каналів.

Математична модель доступності (1):

$$A = 1 - e^{-\alpha R} e^{-\beta C}, \quad (1)$$

де $\alpha = 0,2$, $\beta = 0,3$ — емпіричні коефіцієнти, налаштовані під реальні умови (можуть коригуватись).

Методика оптимізації:

- Визначити цільову доступність (наприклад, $A \geq 0,9$).
- Підібрати мінімальні значення R і C , що задовольняють умову.
- За потреби — врахувати енергоспоживання або навантаження на мережу як обмеження.

Аналіз ефективності:

- 1) Провести симуляцію за різних значень R і C .
- 2) Побудувати графіки доступності.
- 3) Оцінити межу насичення (тобто збільшення параметрів без значного приросту доступності).

На відміну від відомих публікацій з даної тематики, у статті розглядається модель мережецентричної когнітивної системи зв'язку військового призначення, специфікою якої є швидкий та гарантований доступ користувачів до її послуг. Доступність когнітивної радіосистеми дозволяє забезпечити посадовим особам органів управління та оперативному складу пунктів управління різних ланок можливість використання ресурсів радіомереж зв'язку (видів зв'язку) у зоні відповідальності об'єднання за збереження встановлених пріоритетів і способів встановлення зв'язку. Для таких складних моделей одержання аналітичних результатів із використанням традиційних математичних методів теорії масового обслуговування дуже важко. Тому у статті для оцінки ефективності бездротової мережі та проведення чисельних розрахунків застосовується імітаційне моделювання на основі методу Монте-Карло, що є універсальним засобом дослідження характеристик таких складних систем. Імітаційна модель для дослідження основних характеристик такої систем була розроблена мовою Python, яка є модульною компонентною бібліотекою та середовищем моделювання мереж [10].

На рисунку 3 представлено основні результати, які отримані при використанні моделі динамічної радіомережі, що самоорганізується, з адаптивним числом каналом.

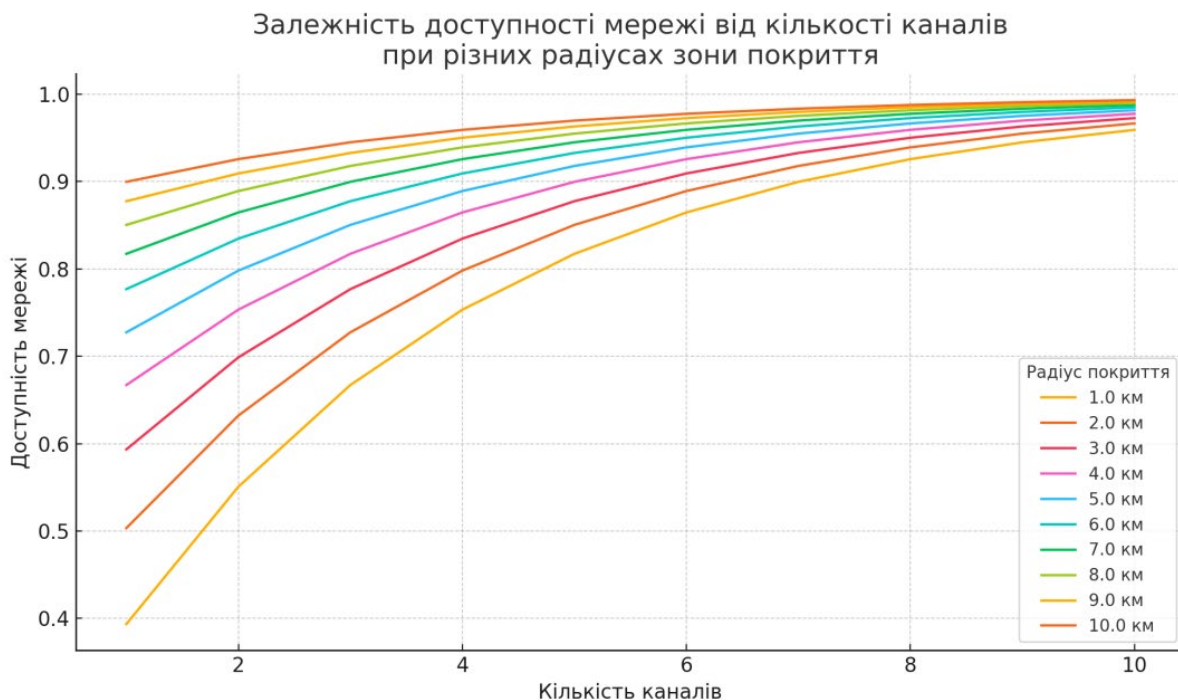


Рис. 3. Залежність доступності мережі від кількості радіоканалів при різних радіусах зони покриття

На рисунку 4 представлено 3D поверхню доступності основних результатів, отриманих при використанні моделі динамічної радіомережі, що самоорганізується, з адаптивним числом каналом.

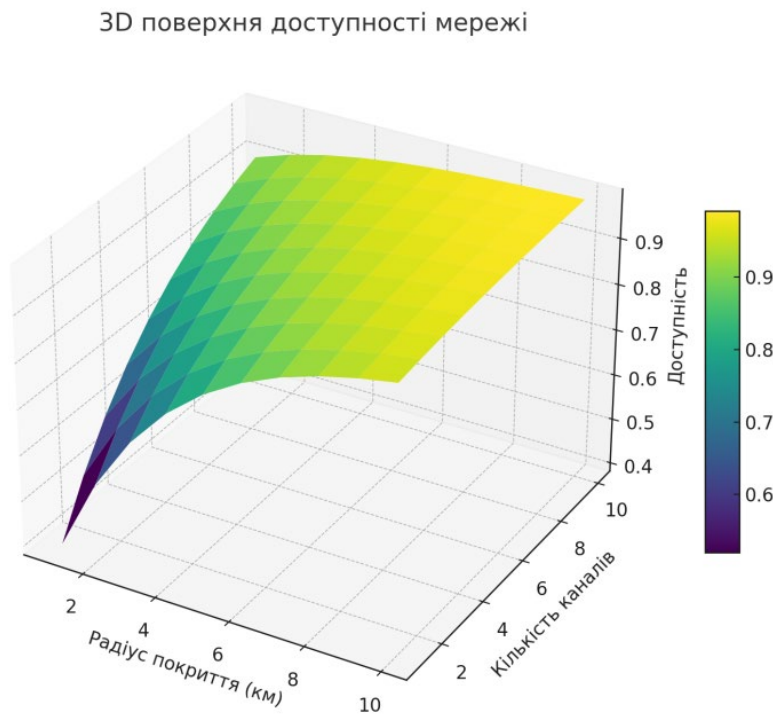


Рис. 4 Вигляд 3D поверхні доступності мережі від кількості радіоканалів при різних радіусах зони покриття

Аналіз отриманих залежностей дозволяє зробити наступні висновки.

Доступність зростає з кількістю каналів, причому:

при малому радіусі зростання доступності повільне (через слабе покриття). При великому радіусі зростання дуже швидке, вже при 4–6 каналах доступність сягає 0,9–0,95. Якщо радіус покриття малий, то навіть збільшення кількості каналів не дає значного ефекту. Кількість каналів стає високоефективною лише при хорошому радіусі. Система має бути збалансована: не лише кількість каналів, а й якість та зона покриття мають бути оптимальними. Для мережевоцентричної архітектури важливо утримувати високу доступність при обмежених ресурсах, тому знання цих залежностей критичне.

Висновок

1. У результаті проведеного аналізу було виявлено, що безпроводові мережі систем когнітивного радіо спеціального призначення демонструють значний потенціал для забезпечення надійного та ефективного зв'язку в умовах обмеженості спектра та високих вимог до безпеки, особливо у військовій сфері.

2. Розроблена модель вибору оптимальних параметрів когнітивної мережі зв'язку, яка самоорганізується, що забезпечують необхідну доступність його абонентів. Дана модель дозволяє вибрати оптимальні параметри майданного покриття та каналного ресурсу для забезпечення необхідної доступності когнітивної мережі зв'язку.

Напрямки подальших досліджень

Удосконалення даної моделі щодо оптимізації когнітивної радіомережі з урахуванням енергоспоживання та затримок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. J. Mitola III. Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal // IEEE Personal Communications. August 1999. Vol. 6, no. 4. P. 13–18.
2. Mitola J. Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications. IEEE International Workshop, San Diego, CA, USA, Nov. 1999. P. 3–10.
3. Джон Мак-Кейб (John McCabe) і команда Windows Server. Введення в Windows Server 2016 / Джон Мак-Кейб (John McCabe) і команда Windows Server. Редмонд, штат Вашингтон: Microsoft Press, 2016. С. 18–20.
4. Haykin S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. Feb. 2005. Vol. 23, no. 2. P. 201–220.
5. Yucek T., Arslan H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications // IEEE Communications Surveys & Tutorials. First Quarter 2009. Vol. 11, no. 1. P. 116–130.
6. Goldsmith A., Jafar S. A., Maric I., Srinivasa S. Breaking spectrum gridlock with cognitive radio: An information-theoretic perspective // Proceedings of the IEEE. May 2009. Vol. 97, no. 5. P. 894–914.
7. Akyildiz I. F., Lee W. Y., Vuran M. C., Mohanty S. NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey // Computer Networks. Sep. 2006. Vol. 50, no. 13. P. 2127–2159.
8. Zhao Q., Sadler B. A survey of dynamic spectrum access // IEEE Signal Processing Magazine. May 2007. Vol. 24, no. 3. P. 79–89.
9. Le L. B., Hossain E. Cognitive radio network for internet of things: potential benefits and challenges // IEEE Internet of Things Journal. June 2017. Vol. 4, no. 3. P. 565–581.
10. Cabric D., Mishra S. M., Brodersen R. W. Implementation issues in building practical cognitive radios // IEEE Communications Magazine. Sep. 2004. Vol. 42, no. 9. P. 104–111.