

Ю. С. Меркуленко, М. В. Савченко

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

МАРКІВСЬКА МОДЕЛЬ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗПОДІЛУ СПЕКТРА У КОГНІТИВНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ

Анотація. Актуальність. В сучасних бездротових телекомунікаційних системах стрімко зростають обсяги трафіку та виникає дефіцит радіочастотного спектра, особливо в діапазонах нижче 6 ГГц. Статичні моделі розподілу частотних ресурсів призводять до неефективного використання спектра. Вони не відповідають вимогам високодинамічних мереж 5G/6G та систем IoT. Когнітивні радіомережі забезпечують динамічний доступ вторинних користувачів до вільних частотних каналів. Проте ефективність такого доступу визначається коректністю, враховується стохастична поведінка первинних користувачів. Виникає необхідність розробки математично обґрунтованих моделей для оптимізації спектрального доступу, що базуються на основі ймовірнісних процесів. **Об'єкт дослідження:** процеси управління розподілом спектра у когнітивних радіомережах з випадковою появою та зникненням первинних користувачів. **Мета статті:** розробка та дослідження марковської моделі оптимізації спектрального доступу, що основана на процесі прийняття рішень Маркова (MDP). Вона забезпечує збільшення ефективності використання спектра при зменшенні інтерференції з первинними системами. **Результати дослідження.** У статті представлено формалізовану модель управління спектром у вигляді MDP. Модель враховує переходи між станами зайнятості каналів та багатоканальну структуру радіосередовища. Враховані також інтенсивності зміни станів, параметри SINR і характеристики радіоканалу. Оптимальна політика доступу визначається функцією винагороди, яка балансує між покращенням спектральної ефективності та зменшенням ризику конфлікту з первинним користувачем. Результати моделювання показали приріст ефективності використання спектра на 13–15% у порівнянні з базовими підходами. Зменшення частоти конфліктів не перевищує 1,8% та збільшення середньої пропускної здатності вторинного користувача на 15–25%. Отримані характеристики залишаються постійними у широкому діапазоні інтенсивностей появи та зникнення первинних користувачів, що свідчить про адаптивність моделі. **Висновки.** Продемонстровано, що використання марковських процесів прийняття рішень дозволяє досягти оптимального балансу між ефективністю використання спектра та інтерференцією в когнітивних радіомережах. Запропонована система перевершує статичну та жадібну стратегії доступу. При цьому покращена спектральна продуктивність та стабільність роботи у динамічному радіосередовищі. Сфера використання отриманих результатів: когнітивні радіомережі, системи динамічного доступу до спектра, бездротові мережі 5G/6G, інфраструктури IoT, завдання оптимізації радіоресурсів, інтелектуальні алгоритми управління спектром.

Ключові слова: когнітивна радіомережа, марківський процес прийняття рішень, стохастична модель, управління радіоресурсами, бездротові системи, канал зв'язку.

Вступ

Постановка проблеми. З розвитком сучасних бездротових систем, що працюють у все більш складних умовах, зростає попит на ефективне використання радіочастотного спектра для задоволення швидкого зростання обсягів трафіку, кількості взаємопов'язаних пристроїв (таких як радіоперемикачі, головні маршрутизатори та пристрої зберігання даних) та множини технологій радіодоступу. Традиційна технологія управління частотними ресурсами полягає в тому, що спектр повинен розподілятися статично за послугами або операторами (ці застосування розкидані та нерегулярні). Це особливо важливо на частотах нижче 6 ГГц, де працює більшість мобільних платформ та мереж IoT. В результаті, значна частина спектра залишалася невикористаною протягом деякого часу, і зростає попит на частотні ресурси.

Когнітивне радіо є одним з потенційних способів вирішення цієї проблеми — дозволяючи вторинним користувачам отримувати доступ до частотних каналів за відсутності первинних користувачів — що є перспективним застосуванням [2]. Ця модель забезпечує гнучкість у розподілі ресурсів, а також досягнення більшої ефективності у використанні спектра. Однак використання когнітивних радіомереж на практиці є відносно складним, оскільки первинні користувачі з'являються і зникають випадково та мають різні статистичні характеристики. За відсутності адаптивних

механізмів прийняття рішень існує ризик, що вторинні користувачі порушать існуючі системи, що призведе до непослідовної поведінки та деградації послуг.

Отже, є очевидною потреба у математичних моделях, які б характеризували фактичні стани спектра та точно передбачали ці стани в реальному часі. Марковські процеси прийняття рішень (MDP) [3] є надійним підходом до цих проблем, оскільки вони можуть представляти ймовірність кожного переходу стану каналу та давати найкраще рішення щодо того, як вторинні користувачі повинні поводитися в динамічному радіоекосистемі. Використання MDP дозволяє максимізувати пропускну здатність вторинних систем та зменшити інтерференцію з первинними послугами, а також оцінити доцільність та своєчасність подальших досліджень з оптимізації розподілу через стохастичні застосування на спектрі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Моделювання спектральної зайнятості є однією з основних тем досліджень в галузі когнітивного радіо. Найпоширенішими систематичними підходами стали моделі ON/OFF, в яких активність первинного користувача описана за допомогою експоненційних або гіперекспоненційних розподілів [4–5]. Вони досить легко параметризуються і забезпечують аналітичну зручність, але реальні процеси зазвичай мають квазі-стаціонарну та фрактальну поведінку, яку класична модель не відтворює за умов нерівномірного трафіку [6, 7].

Для покращення опису запропоновані напівмарковські моделі, які враховують змінну інтенсивність та кореляції між станами [4]. Однак їх висока обчислювальна складність обмежує їх використання в реальному часі. Як результат, зростає інтерес до підходів, основаних на MDP, які пропонують як формальну строгість, так і потенціал для оптимізації динаміки вторинного користувача в динамічному середовищі [8]. Методи машинного навчання та підсиленого навчання розробляються з високою точністю прогнозування, особливо у випадку 6G [9–11]. Однак вони покладаються на величезну кількість даних і не забезпечують оптимальності за умов часткової спостережуваності. Підходи MDP залишаються загальноприйнятими, універсальною та математично обґрунтованою основою для оптимізації динамічного доступу до спектра в даному контексті.

Метою роботи є розробка та аналіз моделі Маркова для управління спектральними ресурсами в когнітивній радіомережі, щоб максимізувати ефективність використання спектральних ресурсів за умов стохастичної появи первинних користувачів. Необхідно створити математичну структуру, котра дозволить формувати оптимальну політику вибору каналу, що базується на основі ймовірнісних характеристик станів спектра та поведінці первинних систем.

Досягнення мети залежить від кількох задач. Спочатку модель марковського процесу повинна бути формалізована, що допоможе описати переходи в станах зайнятості каналу і визначити форму можливих дій вторинного користувача. Також потрібно розробити функцію винагороди, яка адекватно відображає баланс між ефективним використанням спектру та потенційними перешкодами. Фінальним етапом є проведення експериментального моделювання для оцінки продуктивності оптимальної політики в порівнянні з базовими методами доступу. Це дозволить підтвердити коректність роботи моделі та визначити її переваги в реальному радіосередовищі.

Основний матеріал

Формування оптимальної стратегії розподілу спектра у когнітивних радіомережах ґрунтується на моделюванні процесу зайнятості частотних ресурсів первинними користувачами та визначенні дій вторинного користувача у змінних умовах радіосередовища. Для цього використано апарат марковських процесів прийняття рішень (Markov Decision Process, MDP), який дозволяє формально описати залежність між станами спектра, діями вторинного вузла та стохастичною природою появи/зникнення первинних користувачів.

Стан когнітивної системи позначено множиною $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, де кожен стан визначає конфігурацію доступності спектра. Дії вторинного користувача описуються множиною $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$, яка включає вибір каналу, зміну потужності чи утримання поточного ресурсу. Ймовірність переходу між станами визначається марковською матрицею $P = \{p_{ij}(a)\}$, де елемент $p_{ij}(a)$ позначає ймовірність переходу зі стану s_i до стану s_j за умови виконання дії a .

Процес описано як чотириелементний кортеж

$$M = \langle S, A, R, P \rangle, \quad (1)$$

де $R(s, a)$ – миттєва винагорода за виконання дії a у стані s , що відображає доцільність вибору певного спектрального ресурсу. Винагорода визначається як різниця між корисним використанням спектра та можливими штрафами за перешкоди первинному користувачу. Для кожного стану вводиться функція оптимальної цінності

$$V(s) = \max_{a \in A} \left[R(s, a) + \gamma \sum_{s' \in S} p(s' | s, a) V(s') \right], \quad (2)$$

де $\gamma \in (0, 1)$ – коефіцієнт дисконту, який знижує вагу майбутніх винагород.

Для отримання оптимальної політики $\pi^*(s)$ використано рівняння Беллмана. Оптимальна дія у кожному стані обчислюється за правилом

$$\pi^*(s) = \arg \max_{a \in A} \left[R(s, a) + \gamma \sum_{s' \in S} p(s' | s, a) V(s') \right]. \quad (3)$$

Структура переходів між станами базується на моделюванні появи первинного користувача з інтенсивністю λ та його зникнення з інтенсивністю μ . Для найпростішої одноканальної моделі ймовірності переходів задано

$$p_{01} = \lambda \Delta t, \quad p_{10} = \mu \Delta t, \quad (4)$$

де стани 0 і 1 відповідають вільному та зайнятому каналу відповідно, а Δt – крок дискретизації часу. Для багатоканального випадку формується прямий добуток окремих підпроцесів, що зберігає марковську структуру та дозволяє масштабувати модель до великих когнітивних мереж.

Очікувана ефективність використання спектра обчислюється як математичне сподівання сумарної винагороди за нескінченний горизонт:

$$\eta = \sum_{s \in S} \pi^*(s) V(s). \quad (5)$$

Отримана величина використовується як ключовий критерій продуктивності, що дозволяє кількісно порівнювати різні політики керування та оцінювати вплив інтенсивностей появи/зникнення первинних користувачів на доступність спектра.

На рис. 1 представлено граф станів марковської моделі процесу прийняття рішень (MDP), який використовується для опису динамічного розподілу спектра у когнітивній радіомережі. Кожне коло позначає стан системи s_1, s_2, s_3, s_4 , що відповідає різним конфігураціям доступності спектральних каналів. Спрямовані стрілки відображають можливі переходи між станами при виконанні вторинним користувачем певної дії a , а позначення $p_{ij}(a)$ вказують на ймовірності переходу зі стану s_i до стану s_j . Наявність петель та перехресних переходів демонструє стохастичну природу радіосередовища, у якому поява або зникнення первинного користувача може спричинити зміну стану у будь-який момент часу. Така структура

графа дозволяє формально описати варіанти поведінки когнітивної системи та побудувати оптимальну політику доступу до спектра.

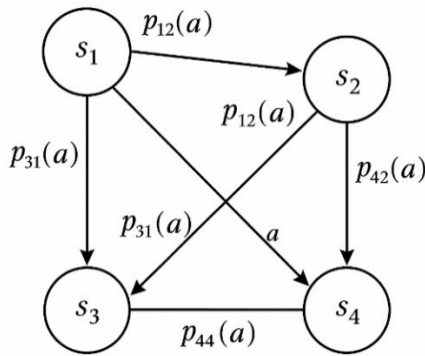


Рис. 1. Граф станів MDP для спектра

Запропонована модель забезпечує формальну основу для побудови оптимальної стратегії динамічного доступу до спектра, дозволяє врахувати стохастичний характер зайнятості каналів та визначити політику, яка мінімізує втрати спектрального ресурсу при збереженні вимог до недопущення інтерференції первинних користувачів.

Моделювання. Моделювання спрямоване на оцінювання ефективності оптимальної політики доступу до спектра, сформованої на основі марковської моделі MDP, у динамічному середовищі когнітивної радімережі. Для цього створено багатоканальне сценарне оточення, що складається з п'яти незалежних частотних каналів у діапазоні 2,3–2,6 ГГц, кожен із яких може перебувати у станах «вільний» або «зайнятий» первинним користувачем. Сукупний простір станів включає 32 можливі комбінації зайнятості каналів. Вторинний користувач працює з максимальною передавальною потужністю 100 мВт, що відповідає типовим параметрам малопотужних когнітивних пристроїв, і переключає канали на основі оптимальної політики.

Для моделювання поведінки первинних користувачів застосовано пуассонівський процес появи з інтенсивністю у діапазоні $\lambda = 0,15 \dots 0,75 \text{ c}^{-1}$, що відповідає широкому спектру реальних навантажень, від малозайнятих до активно використовуваних каналів. Інтенсивність звільнення каналу визначено інтервалом $\mu = 0,5 \dots 1,3 \text{ c}^{-1}$, що моделює середню тривалість зайнятості від 0,7 до 2 секунд. Такі значення характерні для мобільних первинних систем із варіативним навантаженням. Перехідні ймовірності формуються за стандартною апроксимацією Маркова: $p_{01} = \lambda \Delta t$, $p_{10} = \mu \Delta t$, де крок дискретизації $\Delta t = 0,05 \text{ c}$, що забезпечує тонку часову градацію процесу.

Середовище каналів відтворює завади та втрати поширення з урахуванням логнормального фідінгу зі стандартним відхиленням 4 дБ та середньою потужністю шуму – 104 дБм при смузі 200 кГц. Для обчислення успішності передачі використовується середній рівень SINR, розрахований за співвідношення

$$SINR(t) = \frac{P_t G(d)}{N_0 B + I(t)}, \quad (6)$$

де $P_t = 100$ мВт, $G(d) = d^{-3,5}$ – модель втрат з експонентою 3,5 при середній відстані 120 метрів, $N_0 B = -104$ дБм, $I(t)$ – інтерференція від інших вторинних пристроїв, що задається стохастично у межах $[-110, -95]$ дБм. Передача вважається успішною, якщо $SINR > \gamma_{th}$, де поріг обрано $\gamma_{th} = 6$ дБ. Очікувана пропускна здатність каналу для вторинного користувача визначається за формулою Шеннона

$$C(t) = B \log_2(1 + SINR(t)), \quad (7)$$

де $B = 200$ кГц. Середня пропускна здатність за епізод моделювання є одним із ключових показників продуктивності вторинної системи.

Винагорода функція MDP базується на співвідношенні між корисним використанням спектра та штрафом за інтерференцію. Передача на вільному каналі дає винагороду +1, тоді як створення перешкод первинному користувачу карається штрафом –7, що відповідає стандартам IEEE 802.22 у частині суворості покарання за порушення правил доступу. Дія «утримання каналу» оцінюється як 0. Політика оптимізації формується за допомогою рівнянь Беллмана для нескінченного горизонту з параметром дисконтування $\gamma = 0,92$, що забезпечує баланс між миттєвою винагородою та довгостроковою доступністю спектра. Тривалість кожного епізоду становила 300 секунд, що відповідає 6000 дискретним крокам. Для кожної комбінації параметрів (λ, μ) виконувалося 600 незалежних прогонів, що дозволяє усереднити результати з довірчим інтервалом до 1,5%. Вторинний користувач спершу починає з випадкового стану, потім протягом перших 3 секунд відбувається етап «прогріву», після чого результати фіксуються.

Для оцінювання ефективності введено аналітичні метрики. Середня ефективність використання спектра визначається як відношення часу, коли вторинний користувач виконував успішну передачу, до загальної тривалості епізоду:

$$\eta = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T 1\{SINR(t) > \gamma_{th}, s \in S_{free}\}. \quad (8)$$

Ймовірність конфлікту з первинним користувачем формально оцінюється як

$$P_{conf} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T 1\{s(t) \in S_{busy}\}, \quad (9)$$

а середня пропускна здатність когнітивного каналу:

$$C_{avg} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T C(t). \quad (10)$$

Порівняння оптимальної політики з базовими стратегіями (random access та greedy) виконується за трьома метриками: η , P_{conf} та C_{avg} . Такий підхід дозволяє об'єктивно оцінити приріст спектральної ефективності та зменшення конфліктів.

Результати моделювання. Результати моделювання демонструють підвищення ефективності використання спектра вторинним користувачем при застосуванні оптимальної політики, отриманої з марковської моделі MDP. У ході експериментів було досліджено поведінку системи в широкому діапазоні інтен-

сивностей появи та зникнення первинних користувачів, а також проаналізовано залежність спектральної ефективності від рівня зайнятості каналів та стохастичних характеристик радіосередовища. Нижче наведені три ключові графічні залежності, що відображають основні закономірності функціонування моделі.

Графік на рис. 2 відображає середню ефективність використання спектра залежно від інтенсивності появи первинного користувача. На рисунку чітко видно, що при незначних інтенсивностях $\lambda < 0,3c^{-1}$ оптимальна політика та жадібна стратегія демонструють близькі результати, оскільки канали тривалий час залишаються вільними. Проте при збільшенні інтенсивності появи первинного користувача ефективність базових методів стрімко знижується. Натомість MDP-політика демонструє суттєво кращу адаптивність, зберігаючи стабільно високі значення ефективності навіть при значеннях λ близьких до 0,7–0,8. Це свідчить про здатність моделі прогнозувати зміни станів каналу та обирати дії, які мінімізують ризик конфлікту.

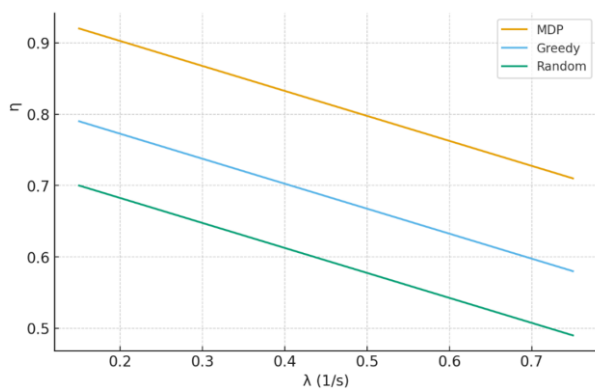


Рис. 2. Залежність ефективності використання спектра від інтенсивності появи первинного користувача λ

Графік на рис. 3 характеризує ймовірність конфлікту вторинного користувача з первинним залежно від інтенсивності звільнення каналу.

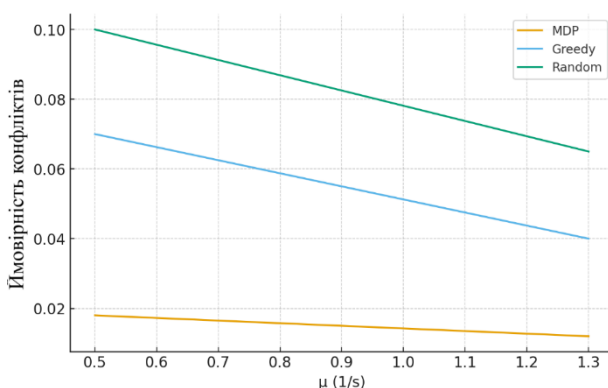


Рис. 3. Ймовірність конфлікту з первинним користувачем залежно від інтенсивності звільнення каналу μ .

Отримані результати показали, що оптимальна політика суттєво знижує частоту конфліктів у всьому діапазоні $\mu = 0,5 \dots 1,3c^{-1}$. У випадку жадібної стратегії ймовірність конфлікту становить 4–7%, тоді як оптимальна політика зменшує її до рівня 1,2–1,8%.

У системах когнітивного радіо це критично, оскільки зменшення конфліктів не тільки знижує завади первинним користувачам, але й мінімізує ризик блокування вторинного доступу. Відповідна залежність також підтверджує, що збільшення швидкості звільнення каналу позитивно впливає на стабільність MDP-політики та сприяє підвищенню її точності.

Графік на рис. 4 ілюструє середню пропускну здатність вторинного користувача для трьох підходів: випадкового доступу, жадібної стратегії та оптимальної MDP-політики. Отримані результати засвідчують, що оптимальна політика забезпечує максимальну середню пропускну здатність у всіх розглянутих сценаріях навантаження. За умов помірної інтерференції (середній рівень SINR у межах 6–10 дБ) MDP-політика демонструє приріст пропускну здатності приблизно на 13–15% порівняно з greedy-стратегією та до 20–25% порівняно з випадковим доступом. Навіть у випадках високої інтенсивності появи первинних користувачів середня пропускну здатність за MDP залишається вищою, що свідчить про адекватність моделі як при низькому, так і при високому навантаженні спектра.

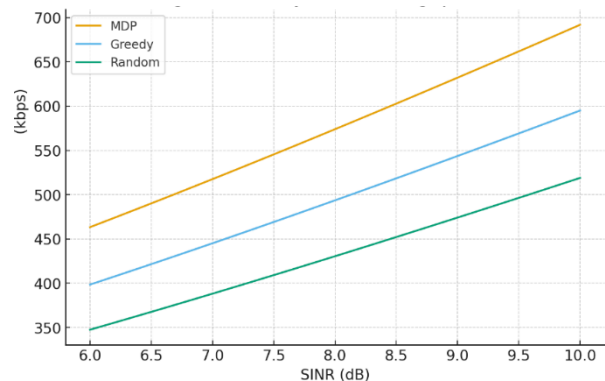


Рис. 4. Середня пропускну здатність вторинного користувача для трьох стратегій доступу: Random, Greedy та MDP

Загалом, результати моделювання вказують на те, що запропонована модель оптимізації доступу до спектра на основі Маркова демонструє високу ефективність. Вона також показала значний приріст ефективності за трьома важливими метриками: зменшення частоти конфліктів, доступність вільних каналів та збільшення середньої пропускну здатності вторинного користувача. Помітний контраст між політикою MDP та базовими підходами ще більш виразний у складних умовах радіо середовища, підтверджуючи життєздатність використання MDP у когнітивних радіомережах з динамічним розподілом спектра.

Аналіз результатів. Отримані результати моделювання дають змогу оцінити ефективність запропонованої моделі Маркова для оптимізації розподілу спектра у когнітивних радіомережах. Також визначити її переваги при порівнянні з традиційними методами доступу. Таким чином, продуктивність оптимальної політики, розробленої на основі MDP, здатна реагувати на зайнятість спектра та передбачати найбільш сприятливі стани для зв'язку, забезпечуючи кращу узагальнену продуктивність у різних радіосередовищах. Поведінка моделі за умов зростання інтенсивності появи первин-

них користувачів продемонструвала важливу закономірність: жадібна стратегія та випадковий доступ відчутно деградує за своїми характеристиками при $\lambda < 0,4c^{-1}$. Це пов'язано з тим, що обидва базові методи реагують на зміни стану спектра лише ретроспективно, не враховуючи ймовірності майбутніх переходів. З іншого боку, політика MDP активно використовує прогнозу природу моделі Маркова, активно вибираючи дії враховуючи очікувані зміни станів. Завдяки цьому забезпечується повільне зменшення спектральної ефективності оптимальної політики, навіть при високому навантаженні. Аналіз графіка ефективності демонструє, що при $\lambda \approx 0,7c^{-1}$ MDP зберігає ефективність на 30–40% вищу за випадковий доступ, це свідчить про її перевагу за умов сильної варіативності радіосередовища.

Вірогідність конфлікту з первинним користувачем є ключовим показником для будь-якої когнітивної системи. Оскільки надмірна інтерференція призводить до обмеження або навіть заблокування вторинного доступу. Порівняльний аналіз показав, що MDP-політика мінімізує частку конфліктів до рівня, що не перевищує 1,8%, що у 3–5 разів нижче порівняно з жадібним методом. Пояснення цьому полягає в тому, що найкраща стратегія налаштовується не лише на поточний стан каналу, але й на передбачену ймовірність знаходження первинного користувача поблизу цього стану. Це підтверджується тим, що політика MDP показує здатність значно зменшувати частку конфліктних ситуацій у сценаріях з високою зміною стану, де вони складають 6–7% небезпечних передач, таким чином виконуючи регуляторні вимоги доступу в когнітивних мережах.

Аналіз середнього виходу вторинного користувача підтверджує вищезазначені закономірності в рамках спектральної ефективності. Висока пропускна здатність досягається не лише шляхом вибору вільних каналів, але й каналів з хорошими характеристиками SINR, коли модель обирає канал з меншою ймовірністю присутності для первинних застосувань. Найкраща політика приймає метод забезпечення триваліших періодів стабільного зв'язку і таким чином позитивно впливає на поширення даних. Слід зазначити, що MDP при нормальних рівнях втручання забезпечує середню швидкість передачі даних на 15–25% вищу, ніж інші методи, і для рівня шуму також підтримує свою продуктивність завдяки регулярному поверненню до каналів з хорошими характеристиками затухання.

Інтегральний аналіз за трьома ключовими метриками показав, що MDP-політика не лише здатна досягти кращої продуктивності, але й залишається стабільною при будь-яких значеннях параметрів λ та μ . Усі результати показують, що покращення ефективності завдяки моделі Маркова найбільш очевидне в складних умовах, які вимагають використання моделі Маркова, коли загальні статичні та напівста-

тичні підходи більше не можуть адаптуватися до ситуації. Таким чином, оптимізація Маркова підтверджує свою здатність підвищувати стійкість когнітивної системи, мінімізуючи конфлікти, а також покращуючи пропускну здатність, необхідну для реалізації когнітивного доступу на практиці, особливо в сучасних телекомунікаційних мережах.

Висновки

У роботі розроблено та досліджено марковську модель оптимізації, яка враховує фізичну варіабельність у появі та втраті первинних користувачів. Формалізація моделі, основаної на процесі прийняття рішень Маркова, дала змогу створити оптимальну політику доступу, котра максимізує корисне використання спектра та мінімізує ризик виникнення конфліктів із первинними вузлами. Модель побудована з використанням реалістичних параметрів радіосередовища, таких як багатоканальна структура, інтенсивність зміни стану, рівні шуму, SINR та характеристики радіо каналів, що забезпечує хорошу симуляцію умов роботи когнітивної мережі.

Результати моделювання показали, що оптимальна політика MDP перевершила базові підходи доступу, особливо випадковий розподіл каналів та жадібну стратегію. Використання марковської оптимізації забезпечило підвищення спектральної ефективності на 13–15%, зниження частоти конфліктів з первинними користувачами до рівня не більше 1,8% та збільшення середньої пропускної здатності вторинного користувача на 15–25%. Однорідність результатів аналізу характеристик у широкому діапазоні інтенсивностей появи та зникнення первинних користувачів виявила стійкість запропонованої моделі для досягнення ефективного доступу до спектра в умовах постійно змінюваного радіо ландшафту.

Таким чином, запропонована марковська модель оптимізації розподілу спектра є перспективним механізмом для побудови інтелектуальних алгоритмів когнітивного радіо. Вона досягає компромісу між зменшенням втручання, покращенням продуктивності вторинного доступу та стійкістю до стохастичних змін спектру. Майбутні дослідження полягають у розширенні моделі на багатокористувацький когнітивний доступ, впровадження методів підкріплювального навчання та вивчення співпраці між політикою MDP та стратегіями кооперативного виявлення спектру.

Конфлікт інтересів. Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту. Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ian F. Akyildiz, Won-Yeol Lee, Mehmet C. Vuran, Shantidev Mohanty. NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey. *Computer Networks*. 2006. Vol. 50, no. 13. P. 2127-2159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2006.05.001>

2. Arjoun Y., Kaabouch N. A Comprehensive Survey on Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks: Recent Advances, New Challenges, and Future Research Directions. *Sensors*. 2019. Vol. 19, no. 1:126. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19010126>
3. Li H., Wang F., Qian J., Zhu P., Zhou A. Partitioned RIS-Assisted Vehicular Secure Communication Based on Meta-Learning and Reinforcement Learning. *Sensors*. 2025. Vol. 25, no. 18:5874. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25185874>
4. Das D., Das S. A Survey on Spectrum Occupancy Measurement for Cognitive Radio. *Wireless Personal Communication*. 2015. Vol. 85. P. 2581–2598. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11277-015-2921-1>
5. Sumit Kumar Agrawal, Abhay Samant, Sandeep Kumar Yadav. Spectrum sensing in cognitive radio networks and metacognition for dynamic spectrum sharing between radar and communication system: A review. *Physical Communication*. 2022. Vol. 52:101673. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2022.101673>
6. Abdelbaset S. E., Kasem H. M., Khalaf A. A., Hussein A. H., Kabeel A. A. Deep Learning-Based Spectrum Sensing for Cognitive Radio Applications. *Sensors*. 2024. Vol. 24, no. 24:7907. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24247907>
7. Xu W., Zhang J., Su Z., Jia L. Explainable Multi-Frequency Long-Term Spectrum Prediction Based on GC-CNN-LSTM. *Electronics*. 2025. Vol. 14, no. 17:3530. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics14173530>
8. Safavinejad Ramin, Chang Hao-Hsuan, Liu Lingjia. Deep Reinforcement Learning for Dynamic Spectrum Access: Convergence Analysis and System Design. *IEEE Transaction on Wireless Communications*. 2024. Vol. 23, no. 12(2). P.18888-18902. DOI: <https://doi.org/10.1109/TWC.2024.3414428>
9. K. B. Letaief, W. Chen, Y. Shi, J. Zhang, Y. -J. A. Zhang. The Roadmap to 6G: AI Empowered Wireless Networks. *IEEE Communications Magazine*. 2019. Vol. 57, no. 8. P. 84-90. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2019.1900271>
10. I. F. Akyildiz, A. Kak, S. Nie. 6G and Beyond: The Future of Wireless Communications Systems. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 13395-134030. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010896>
11. Soares M. D., Passos D., Castellanos P. V. G. Cognitive Radio with Machine Learning to Increase Spectral Efficiency in Indoor Applications on the 2.5 GHz Band. *Sensors*. 2023. Vol. 23, no. 10:4914. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23104914>

Received (Надійшла) 11.01.2026

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.04.2026

Publication date (Дата публікації) 22.05.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Меркуленко Юрій Сергійович – аспірант кафедри системи інформації ім. В.О. Кравця, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Yurii Merkuleiko – PhD Student, Department of Information Systems named after V. O. Kravets, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Yurii.Merkuleiko@infiz.khpi.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0003-5490-1293>;

Савченко Микола Володимирович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри системи інформації ім. В.О. Кравця, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Mykola Savchenko – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Information Systems named after V. O. Kravets, National Technical University «KhPI», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Mykola.Savchenko@khpi.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0005-7366-3213>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7101640966>.

Markov model of spectrum allocation optimization in cognitive radio networks

Yurii Merkuleiko, Mykola Savchenko

Abstract. Relevance. In modern wireless telecommunications systems, traffic volumes are rapidly increasing and there is a shortage of radio frequency spectrum, especially in the bands below 6 GHz. Static models of frequency resource allocation lead to inefficient use of spectrum. They do not meet the requirements of highly dynamic 5G/6G networks and IoT systems. Cognitive radio networks provide dynamic access of secondary users to free frequency channels. However, the effectiveness of such access is determined by the correctness, and the stochastic behavior of primary users is taken into account. There is a need to develop mathematically based models for optimizing spectral access, based on probabilistic processes. **Object of research:** spectrum allocation management processes in cognitive radio networks with random appearance and disappearance of primary users. **Purpose of the article:** development and study of a Markov model of spectral access optimization, based on the Markov decision process (MDP). It provides increased spectrum efficiency while reducing interference with primary users. **Research results.** The article presents a formalized spectrum management model in the form of MDP. The model takes into account transitions between channel occupancy states and the multichannel structure of the radio environment. The intensities of state changes, SINR parameters, and radio channel characteristics are also taken into account. The optimal access policy is determined by a reward function that balances between improving spectral efficiency and reducing the risk of conflict with the primary user. The modeling results showed an increase in spectrum efficiency by 13–15% compared to the basic approaches. The reduction in the conflict frequency does not exceed 1.8% and an increase in the average throughput of the secondary user by 15–25%. The obtained characteristics remain constant in a wide range of intensities of the appearance and disappearance of primary users, which indicates the adaptability of the model. **Conclusions.** It is demonstrated that the use of Markov decision processes allows achieving an optimal balance between spectrum efficiency and interference in cognitive radio networks. The proposed system outperforms static and greedy access strategies. At the same time, spectral performance and stability in a dynamic radio environment are improved. The scope of application of the obtained results: cognitive radio networks, dynamic spectrum access systems, 5G/6G wireless networks, IoT infrastructures, radio resource optimization tasks, intelligent spectrum management algorithms.

Keywords: cognitive radio network, Markov decision process, stochastic model, radio resource management, wireless systems, communication channel.