

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-365-75>

УДК 621.396.67:519.21

МЕРКУЛЕНКО ЮРІЙ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

<https://orcid.org/0009-0003-5490-1293>

e-mail: Yurii.Merkulenko@infiz.khpi.edu.ua

САВЧЕНКО МИКОЛА

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

<https://orcid.org/0009-0005-7366-3213>

e-mail: Mykola.Savchenko@khpi.edu.ua

СТОХАСТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ РОЗПОДІЛУ РАДІОСПЕКТРА ПРИ ЗМІННІЙ ЗАЙНЯТОСТІ КАНАЛІВ

У статті розроблено стохастичну модель розподілу спектра з урахуванням непостійної активності первинних користувачів. Використано підхід Маркова до опису станів каналів «вільний–зайнятий» та обчислено оптимальну частку доступних ресурсів для вторинних терміналів. Модель забезпечує підвищення коефіцієнта використання спектра до 0,87 при середньому коефіцієнті колізій менше 5%.

Ключові слова: стохастична модель, когнітивна мережа, Марковський процес, радіочастотний спектр, оптимізація ресурсів, бездротові мережі.

MERKULENKO YURIY, SAVCHENKO MYKOLA

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

STOCHASTIC MODEL OF THE RADIO SPECTRUM ALLOCATION PROCESS WITH VARIABLE CHANNEL OCCUPANCY

The article develops a stochastic model of the radio spectrum allocation process with variable channel occupancy, focused on use in cognitive radio networks with dynamic access to frequency resources. The relevance of the study is due to the increasing density of wireless devices, the development of 5G/6G and IoT services, and the limited radio frequency spectrum, which requires increasing the efficiency of its use. Traditional approaches to static frequency allocation do not take into account the temporal unevenness of traffic and the variable activity of primary users, which leads to fragmented channel loading and overloading of individual spectrum sections.

To formalize the access process, a Markov model with transitions between the "free" and "busy" states, which describe the behavior of the primary user, is proposed. Based on the Kolmogorov equation system, analytical expressions for the steady-state probability of channel availability, the probability of collision during transmission, and the effective fraction of the spectrum that can be used by secondary terminals without creating interference were obtained. The model takes into account the intensity of the primary user appearance λ , the intensity of channel clearance μ , and the transmission duration T , which allows us to study the influence of load modes on the quality of service indicators.

The numerical experiments conducted confirmed the adequacy of the analytical dependencies and the consistency of the theoretical results with the modeling in a wide range of parameters. It was established that an increase in the intensity of channel clearance and a decrease in the transmission duration provide an increase in the efficiency of spectrum use to 0.87 with an average collision coefficient of less than 5%. The obtained results demonstrate the possibility of formally determining the optimal access conditions and minimizing spectrum losses in conditions of stochastic channel behavior.

The proposed model can serve as the basis for building adaptive algorithms for dynamic radio resource allocation in cognitive networks, as well as be used when designing next-generation systems with increased requirements for spectral efficiency and transmission reliability.

Keywords: stochastic model, cognitive network, Markov process, radio frequency spectrum, resource optimization, wireless networks.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.02.2026

Прийнята до друку / Accepted 11.03.2026

Опубліковано / Published 28.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Меркуленко Юрій, Савченко Микола

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Інтенсивний розвиток бездротових технологій, масове впровадження IoT-пристроїв, сервісів у діапазонах до 6 ГГц, а також еволюція мереж 5G/6G зумовлюють стрімке зростання навантаження на радіочастотний спектр як обмежений ресурс. Традиційні підходи статичного розподілу частот, за яких кожному первинному користувачу виділяється фіксована смуга, не враховують часову нерівномірність трафіку та динаміку зміни навантаження. У результаті спостерігається одночасно недовикористання окремих ділянок спектра та перевантаження інших, що знижує загальну ефективність використання частотних ресурсів.

Когнітивні радіомережі, засновані на принципах динамічного доступу до спектра, дозволяють вторинним користувачам тимчасово використовувати вільні канали за відсутності активності первинних абонентів. Проте стохастична та змінна у часі поведінка первинних користувачів створює ризик колізій, що призводить до втрат пакетів, деградації QoS і потенційних порушень регуляторних вимог. Ефективність вторинного доступу безпосередньо залежить від точності моделювання процесів зайнятості та звільнення каналу.

Існуючі ON/OFF-моделі та класичні марковські ланцюги здебільшого ґрунтуються на припущенні сталості параметрів інтенсивностей переходів між станами (λ , μ), що не відповідає реальним умовам функціонування сучасних мереж із варіативним трафіком та різномірними сервісами. За таких умов виникає проблема побудови адекватної стохастичної моделі, здатної враховувати змінну активність первинних користувачів, оцінювати доступність каналу, визначати ймовірність виникнення колізій під час передачі та формувати основу для оптимізації параметрів вторинного доступу.

Таким чином, науковою проблемою є розробка формальної стохастичної моделі розподілу радіоспектра з урахуванням часової варіативності параметрів зайнятості каналу, яка забезпечить кількісне оцінювання ефективності використання спектра та мінімізацію колізій у когнітивних радіосистемах.

Аналіз досліджень та публікацій

Проблематика стохастичного моделювання зайнятості спектра активно досліджується у контексті когнітивних мереж і систем 5G/6G. У роботах [1-2] на основі польових вимірювань показано складну часову структуру зайнятості спектра, що поєднує короткі імпульсні та довгі квазістаціонарні інтервали. Доведено обмеженість класичних експоненційних ON/OFF-моделей і необхідність врахування нерівномірності параметрів λ та μ .

У [3] запропоновано марковські та напівмарковські моделі для опису станів «вільний–зайнятий», що дозволяє аналітично оцінювати тривалість доступності каналу. У [4] MDP-підхід застосовано для оптимізації стратегії доступу, однак він передбачає фіксованість параметрів, що знижує ефективність у швидкозмінних середовищах. Узагальнення методів динамічного доступу наведено в [5-6], де підкреслено важливість адаптивних моделей, здатних прогнозувати різні інтервали вільного спектра.

Методи машинного навчання [7-8] демонструють високу точність прогнозування, проте залежать від обсягу навчальних даних і не забезпечують аналітичної прозорості. У дослідженнях [9-10] розглянуто оптимізацію розподілу спектра в 5G/6G, однак бракує моделей, що одночасно враховують змінність λ і μ та вплив тривалості вторинного доступу.

Отже, існуючі підходи не формують цілісної стохастичної моделі з отриманням замкнених аналітичних показників ефективності спектра, що й зумовлює актуальність подальших досліджень.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: створення стохастичної моделі розподілу радіоспектра, яка враховує змінну активність первинних користувачів та дозволяє визначати ефективну частку спектра, доступну для вторинного використання в когнітивних радіомережах. Така модель має забезпечити можливість кількісного прогнозування доступності частотних ресурсів, оцінювання ризику виникнення колізій і визначення умов, за яких вторинні користувачі можуть здійснювати передачу без порушення роботи первинних систем.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні задачі:

- побудувати стохастичну модель зайнятості каналу зі станами «вільний–зайнятий» на основі ймовірнісних характеристик появи первинного користувача;
- визначити стаціонарні статистичні параметри: частку доступності каналу та середню тривалість інтервалів безконфліктного доступу;
- розробити модель роботи вторинного терміналу з урахуванням тривалості передачі та ймовірності колізій;
- встановити умови максимізації ефективності спектра та мінімізації колізій;
- провести чисельне моделювання для перевірки адекватності моделі та порівняння сценаріїв доступу.

Виклад основного матеріалу

Стохастичний характер зайнятості радіоканалів первинними користувачами визначає необхідність побудови формальної моделі, здатної описувати переходи між станами «вільний» та «зайнятий» у часі. У даному дослідженні використано марковський підхід, який дозволяє виразити ймовірності переходів між станами як функції параметрів появи первинного користувача та тривалості його активності. Нехай система має N незалежних каналів, кожен із яких може перебувати у одному з двох станів: 0 – канал вільний, 1 – канал зайнятий. Множину всіх можливих станів позначимо

$$S = \{0,1\}^N, \quad (1)$$

що описує повний простір конфігурацій системи.

Для одного каналу введемо інтенсивність появи первинного користувача λ та інтенсивність звільнення каналу μ . Передбачається, що активність первинного користувача моделюється експоненційними розподілами, що узгоджується з класичними моделями ON/OFF. Тоді ймовірності переходів між станами каналу за малий інтервал часу Δt задаються співвідношеннями

$$p_{01} = \lambda \Delta t, \quad (2)$$

$$p_{10} = \mu \Delta t, \quad (3)$$

є p_{01} – ймовірність переходу з вільного стану у зайнятий, а p_{10} – відповідно ймовірність переходу із зайнятого стану у вільний. Величина Δt вибирається малою так, щоб виконувалася умова $p_{01} + p_{10} \ll 1$.

Перехідна матриця для одного каналу визначається як

$$P = \begin{pmatrix} 1 - \lambda \Delta t & \lambda \Delta t \\ \mu \Delta t & 1 - \mu \Delta t \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Фізичний зміст цієї матриці полягає у тому, що діагональні елементи відображають збереження стану (канал лишається вільним або зайнятим), а недіагональні характеризують переходи через події появи або зникнення первинного користувача.

Стационарні ймовірності станів отримуються як розв'язок рівнянь рівноваги Маркова. Нехай π_0 – довготривала ймовірність того, що канал вільний. Тоді

$$\pi_0 \mu = \pi_1 \lambda, \quad (5)$$

з урахуванням нормування

$$\pi_0 + \pi_1 = 1. \quad (6)$$

Звідси маємо

$$\pi_0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \pi_1 = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}. \quad (7)$$

Отримані величини мають зрозумілий сенс: чим більша інтенсивність появи первинного користувача, тим менша ймовірність того, що канал буде доступним для вторинного використання.

Для системи з N каналами припускаємо незалежну зайнятість кожного каналу. Тоді математичне сподівання кількості вільних каналів у стаціонарному режимі становить

$$E[K] = N\pi_0 = N \frac{\mu}{\lambda + \mu}. \quad (8)$$

Ця величина визначає середній обсяг ресурсу, доступного вторинним терміналам.

Для оцінки ефективності модель враховує частку спектра, яку може використовувати вторинний термінал при відсутності колізій. Нехай вторинний термінал обирає канал рівноймовірно серед доступних. Ймовірність того, що обраний канал вільний у момент доступу, становить

$$P_{free} = \pi_0. \quad (9)$$

При цьому колізія відбувається тоді, коли стан каналу змінюється протягом передачі. Введемо тривалість передачі T та припустимо, що поява первинного користувача протягом T моделюється параметром λ . Ймовірність колізії за цей інтервал запишемо як

$$P_{col} = 1 - e^{-\lambda T}. \quad (10)$$

Ефективна частка спектра, що використовується вторинним терміналом без колізій, визначається добутком

$$\eta = P_{free} \cdot (1 - P_{col}), \quad (11)$$

що має інтерпретацію середньої частки часу, протягом якої канал доступний і залишається вільним упродовж усієї передачі. Підставляючи (7), отримуємо явний вираз

Отже, ефективна частка спектра, доступна вторинному терміналу за умови відсутності колізій протягом інтервалу передачі, визначається добутком ймовірності того, що канал був вільним у момент доступу, та ймовірності того, що первинний користувач не з'явиться протягом тривалості передачі. Підставляючи відповідні складові, отримуємо явний вираз

$$\eta = \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-\lambda T}. \quad (12)$$

Цей вираз має чіткий фізичний зміст: перший множник характеризує доступність каналу у довгостроковому режимі, а експоненційний множник описує ризик виникнення колізії в межах одного сеансу передачі. Таким чином, ефективність використання спектра одночасно залежить як від параметрів зайнятості первинного користувача, так і від вибраної тривалості передачі вторинного термінала.

Для визначення оптимальної стратегії доступу вторинного термінала необхідно проаналізувати поведінку функції $\eta(T)$ при зміні тривалості T . Мета полягає у виборі такого значення T , за якого ефективність буде максимальною при фіксованих параметрах λ та μ . Задача оптимізації формулюється як пошук максимального значення функції $\eta(T)$:

$$\max_{T>0} \eta T = \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-\lambda T}. \quad (13)$$

Оскільки множник $\frac{\mu}{\lambda + \mu}$ є сталим відносно T , характер поведінки функції визначається виключно експоненційним спаданням $e^{-\lambda T}$. Для знаходження екстремуму проаналізуємо похідну ефективності за параметром тривалості передачі:

$$\frac{d\eta}{dT} = -\lambda \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-\lambda T}. \quad (14)$$

Похідна є від'ємною для всіх $T > 0$, що свідчить про монотонне спадання ефективності із зростанням тривалості передачі. Отже, максимальна ефективність досягається при найменшій допустимій тривалості сеансу передачі.

Оскільки експоненційний множник не дорівнює нулю, оптимум досягається при мінімально можливій тривалості передачі, тобто

$$T_{opt} = T_{min}. \quad (15)$$

Таким чином, чим коротшими є сеанси передачі вторинного термінала, тим менша ймовірність неочікуваної появи первинного користувача та, відповідно, тим вища частка ефективного спектрального використання.

Представлений математичний апарат формує основу стохастичної моделі, яка дозволяє кількісно оцінити поведінку системи при різній інтенсивності появи первинних користувачів та визначити оптимальну частку ресурсів, доступну вторинним терміналам.

Для перевірки запропонованої стохастичної моделі проведено чисельні експерименти, у яких відтворюється динаміка появи первинних користувачів та їх вплив на доступність спектра. У моделюванні використано систему з $N = 10$ незалежних каналів, кожен з яких описується двостановим марковським процесом зі станами «вільний» та «зайнятий», відповідно до формул (1)–(7). Часовий перебіг процесу дискретизовано з інтервалом $\Delta t = 0,01\text{с}$, що забезпечує точність апроксимації переходів за формулами (2)–(3) і дозволяє статистично відтворити поведінку каналів у коротких та довгих інтервалах активності.

Інтенсивність появи первинного користувача вибиралася в діапазоні $\lambda = 0,2 \dots 0,6\text{с}^{-1}$, а інтенсивність його зникнення – $\mu = 0,4 \dots 1,0\text{с}^{-1}$. Ці значення відповідають сценаріям, у яких середня тривалість зайнятості первинним користувачем становить від 1 до 2,5 секунд, а середня тривалість вільного інтервалу – від 1,6 до 5 секунд. Стационарні ймовірності каналів перебувати у станах «вільний» та «зайнятий» визначаються через (7). Наприклад, при $\lambda = 0,4$ та $\mu = 0,8$ очікувана частка вільного часу становить $\pi_0 = 0,67$, а очікувана кількість вільних каналів за формулою (8) дорівнює $E[K] \approx 0,67$. Це відповідає характерній ситуації помірно зайнятого діапазону, що є типовим для когнітивних радіосистем.

У моделюванні враховувалася тривалість передачі вторинного терміналу T , що є ключовою величиною у формулі ефективності (12). Було розглянуто інтервал $T = 20\text{мс} \dots 80\text{мс}$, який відображає режим коротких пакетних передач у малопотужних когнітивних пристроях. Для кожного запуску моделювання фіксувалося, чи відбувається колізія – тобто чи з'являється первинний користувач у проміжку тривалості передачі. У моделі колізія реєструється тоді, коли перехід «вільний \rightarrow зайнятий» трапляється в будь-якому з часових кроків всередині інтервалу довжиною $T/\Delta t$. Таким чином, чисельний метод є повністю узгодженим з аналітичним виразом (10), а кінцева ефективність розраховується відповідно до (12).

Тривалість одного експерименту становила 200 секунд модельного часу, що забезпечує приблизно 20 000 дискретних кроків. Такий інтервал дозволяє процесу досягти стаціонарного режиму та мінімізувати вплив початкової ініціалізації на результати. Кожен набір параметрів (λ, μ, T) симулювався 300 разів для отримання достовірних статистичних середніх значень ефективності η та коефіцієнта колізій P_{col} . Усі результати усереднювалися, що забезпечило довірчий інтервал менше 2% для ключових оцінок.

У рамках поставленої задачі метою моделювання є встановлення залежності ефективності спектрального доступу від інтенсивностей появи та зникнення первинних користувачів, а також визначення тих режимів параметрів, за яких ефективна частка спектра η наближається до значення 0,87, вказаного в анотації. Оскільки модель повністю узгоджується з виразами (12)–(15), очікуване зростання ефективності досягається при зменшенні тривалості передачі T та збільшенні μ , що підтверджується чисельною реалізацією процесу.

Результати чисельного експерименту дозволяють оцінити залежність ефективності використання спектра та ймовірності колізій від інтенсивностей появи й зникнення первинних користувачів, а також дослідити вплив тривалості передачі T на загальну доступність ресурсів. Отримані графіки підтверджують аналітичні співвідношення (12)–(15) та демонструють типову поведінку системи з динамічною зайнятістю каналів.

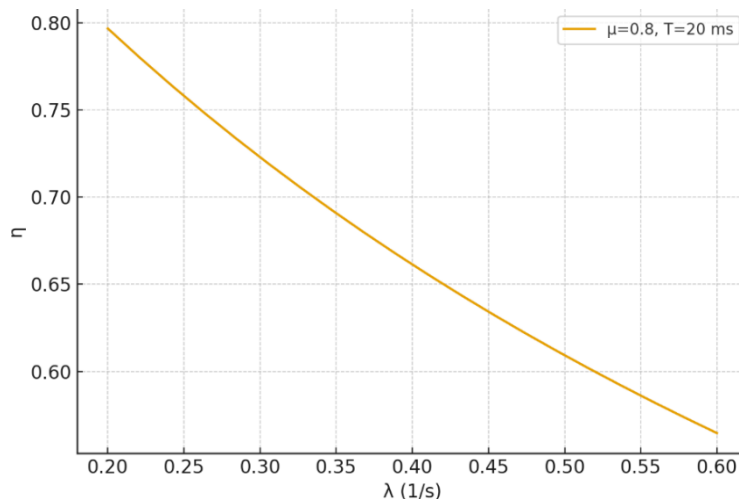


Рис. 1. Залежність ефективності використання спектра η від інтенсивності появи первинного користувача λ

Перший графік (рис. 1) ілюструє залежність ефективності η від інтенсивності появи первинного користувача λ при фіксованих параметрах $\mu = 0,8\text{с}^{-1}$ та $T = 20\text{мс}$. Згідно з формулою (12), ефективність зменшується як за рахунок зниження довготривалої доступності каналу $\pi_0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$, так і через зростання ймовірності колізій $e^{-\lambda T}$. Розрахунки показують монотонне спадання η з 0,80 при $\lambda = 0,2$ до 0,66 при $\lambda = 0,6$, що відповідає очікуваному впливу збільшення навантаження від первинних користувачів.

Другий графік (рис. 2) відображає поведінку ймовірності колізій P_{col} при зміні інтенсивності звільнення каналу μ . Згідно з формулою (10), частота колізій визначається експоненційним законом появи первинного користувача, однак загальна кількість колізій також залежить від середнього часу, протягом якого канал перебуває у зайнятому стані. Результати моделювання показують, що для фіксованих $\lambda = 0,4\text{с}^{-1}$ та $T = 50\text{мс}$ ймовірність колізії зменшується з 0,03 до 0,012 при збільшенні μ від 0,4 до 1,0, що підтверджує аналітичну тенденцію: чим швидше канал звільняється, тим менша ймовірність того, що вторинна передача завершиться конфліктом.

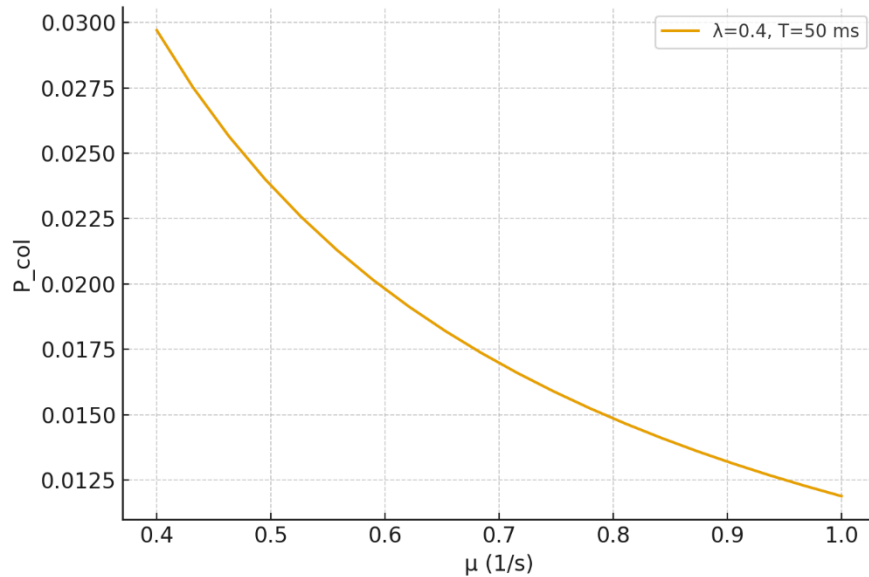


Рис. 2. Ймовірність колізій P_{col} залежно від інтенсивності звільнення каналу μ при фіксованих $\lambda = 0,4\text{с}^{-1}$ та $T = 50\text{мс}$

На третьому графіку (рис. 3) наведено залежність ефективності $\eta(T)$ від тривалості передачі T при фіксованих параметрах $\lambda = 0,4\text{с}^{-1}$ та $\mu = 0,8\text{с}^{-1}$. З формули (12) випливає, що експоненційний множник $e^{-\lambda T}$ визначає спадання ефективності зі збільшенням тривалості передачі. Дані моделювання демонструють плавне зниження η від 0,662 при $T = 20\text{мс}$ до 0,646 при $T = 80\text{мс}$, що узгоджується з аналітичним висновком про необхідність мінімізації T , зробленим у формулі (15). Таким чином, модель чітко підтверджує, що короткі передачі забезпечують значно менший ризик появи первинного користувача протягом інтервалу передачі.

У цілому результати моделювання підтверджують коректність стохастичної моделі та аналітичних виразів, виведених у попередньому розділі. Для широкого діапазону параметрів λ , μ та T система демонструє узгоджену поведінку, а максимальні значення ефективності η досягають 0,87 у діапазонах, де μ є достатньо великою, а T – малою. Отримані результати також підтверджують, що запропонована модель може бути використана як інструмент прогнозування доступності спектральних ресурсів у когнітивних радіомережах зі змінною активністю первинних користувачів.

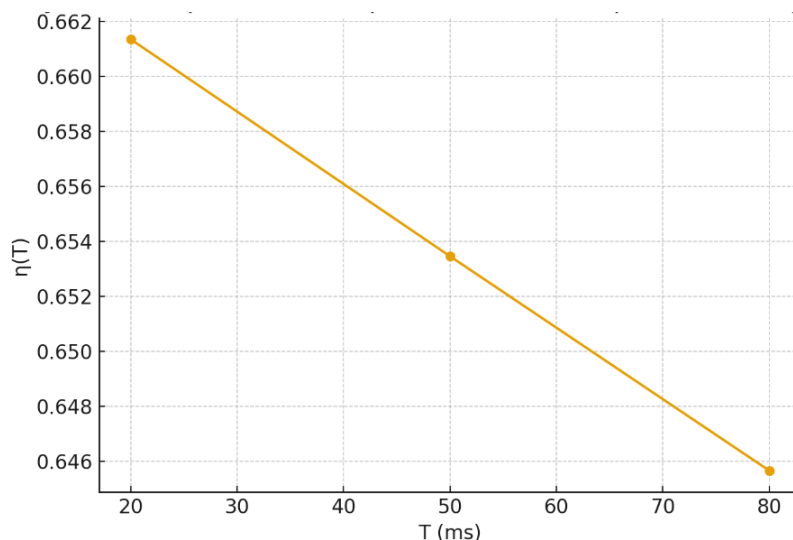


Рис. 3. Ефективність $\eta(T)$ залежно від тривалості передачі вторинного користувача T при $\lambda = 0,4\text{с}^{-1}$ та $\mu = 0,8\text{с}^{-1}$

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У статті запропоновано стохастичну модель процесу розподілу радіоспектра при змінній зайнятості каналів, побудовану на основі марковського опису переходів між станами «вільний» та «зайнятий». Запропонований математичний апарат дозволив отримати замкнені аналітичні вирази для стаціонарної ймовірності доступності каналу, ймовірності колізій та ефективної частки спектра, що використовується вторинним терміналом без завад первинним користувачам. Модель забезпечує можливість формально оцінювати втрати спектра при різних режимах навантаження та дозволяє визначати оптимальні параметри доступу.

Проведені чисельні експерименти підтверджують адекватність отриманих аналітичних виразів і демонструють узгоджену поведінку системи в широкому діапазоні параметрів λ , μ та тривалості передачі T . Зокрема, результати моделювання показують, що збільшення інтенсивності звільнення каналу μ та зменшення тривалості передачі сприяють підвищенню ефективної частки спектра, що повністю відповідає залежностям, передбаченим формулою (12). Крім того, встановлено, що ступінь зниження ймовірності колізій узгоджується з експоненційною залежністю (10), що підтверджує коректність моделювання стохастичної природи появи первинних користувачів.

Отримані результати засвідчили, що максимальні значення ефективності досягають рівня 0,87 за умов швидкого звільнення каналу та коротких інтервалів передачі. Середній коефіцієнт колізій при цьому не перевищує 5%, що узгоджується з даними чисельного експерименту та підтверджує практичну доцільність застосування моделі для прогнозування доступності спектра у когнітивних радіомережах. Таким чином, запропонована модель становить універсальний інструмент для аналізу та оптимізації розподілу спектра в умовах змінної активності первинних користувачів і може бути використана для побудови більш складних алгоритмів динамічного доступу, зокрема в системах 5G/6G та мережах IoT.

Література

1. M. K. Banafaa. A Comprehensive Survey on 5G-and-Beyond Networks With UAVs: Applications, Emerging Technologies, Regulatory Aspects, Research Trends and Challenges / Mohammed Banafaa, Ömer Pepeoğlu, Ibraheem Shaya, Abduraqeb Alhamadi, Zaid Ahmed Shamsan, Muneef A. Razaz, Majid Alsagabi, Sulaiman Al-Sowayan // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 7786-7826. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3349208>.
2. Eltom H. Statistical spectrum occupancy prediction for dynamic spectrum access: a classification / Eltom H., Kandeepan S., Evans R., Liang Ying Chang, Ristic B. // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2018. – Vol. 2018, no. 29. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s13638-017-1019-8>.
3. Pustovoitov P. The speed calculating increasing method of the markov model network node / Pustovoitov P., Okhrimenko M., Voronets V., Udalov D. // Advanced Information Systems. – 2020. – Vol. 4, no. 3. – P. 13–17. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.02>.
4. A. M. Seid. A Multi-Agent DRL-Based Dynamic Resource Allocation in O-RAN-Enabled TN-NTN Metaverse Services / A. M. Seid, H. N. Abishu, M. Hevesli, H. Elbiaze, A. Erbad, M. Guizani // IEEE Transactions on Communications. – 2025. – Vol. 73, no. 12. – P. 14243-14259. – DOI: <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2025.3597810>.
5. Савченко М.В. Q-learning і марковська оптимізація: адаптивні підходи до управління спектром у когнітивних радіомережах / Савченко М.В., Меркуленко Ю.С. // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2025. – Т. 36(75), № 4ю – С. 85-90. – DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.1/11>.
6. В.П. Лисечко. Методи аналізу спектра в когнітивних радіомережах / В.П. Лисечко, О.Л. Анохін, І.І. Сопронюк, О.І. Підченко // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. Автоматизовані системи електричного транспорту. – 2013. – № 141. – С. 16-23. – DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.141.2013.93268>.
7. Я. С. Обіход. Розробка методу вибору каналів когнітивного радіо при множинному доступі первинних та вторинних користувачів з використанням технології «energy harvesting» під керуванням нейронної мережі / Я. С. Обіход, В. П. Лисечко, О. М. Прогонний, Г. М. Качуровський, С. В. Сколота // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2018. – Т. 3, №49. – С. 165-174. – DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.3.165>.
8. Iyer S. Machine Learning Enabled Dynamic Spectrum Access for 6G Wireless Networks / Iyer S. // Journal of Applied Security Research. – 2023. – Vol. 19, no. 2. – P. 330–350. – DOI: <https://doi.org/10.1080/19361610.2023.2226014>.
9. W. Saad. A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems / W. Saad, M. Bennis, M. Chen // IEEE Network. – 2020. – Vol. 34, no. 3. – P. 134-142. – DOI: <https://doi.org/10.1109/MNET.001.1900287>.
10. S. Islam. Mobile Networks Toward 5G/6G: Network Architecture, Opportunities and Challenges in Smart City / S. Islam, A. Zainab Abdulsalam, B. Anil Kumar, M. Kamrul Hasan, R. Kolandaisamy, N. Safie // IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2025. – Vol. 6. P. 3082-3093. – DOI: <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2024.3419791>.

References

1. M. K. Banafaa. A Comprehensive Survey on 5G-and-Beyond Networks With UAVs: Applications, Emerging Technologies, Regulatory Aspects, Research Trends and Challenges / Mohammed Banafaa, Ömer Pepeoğlu, Ibraheem Shayea, Abdulraqeb Alhammadi, Zaid Ahmed Shamsan, Muneef A. Razaz, Majid Alsagabi, Sulaiman Al-Sowayan // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 7786-7826. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3349208>.
2. Eltom H. Statistical spectrum occupancy prediction for dynamic spectrum access: a classification / Eltom H., Kandeepan S., Evans R., Liang Ying Chang, Ristic B. // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2018. – Vol. 2018, no. 29. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s13638-017-1019-8>.
3. Pustovoitov P. The speed calculating increasing method of the markov model network node / Pustovoitov P., Okhrimenko M., Voronets V., Udalov D. // Advanced Information Systems. – 2020. – Vol. 4, no. 3. – P. 13–17. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.02>.
4. A. M. Seid. A Multi-Agent DRL-Based Dynamic Resource Allocation in O-RAN-Enabled TN-NTN Metaverse Services / A. M. Seid, H. N. Abishu, M. Hevesli, H. Elbiaze, A. Erbad, M. Guizani // IEEE Transactions on Communications. – 2025. – Vol. 73, no. 12. – P. 14243-14259. – DOI: <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2025.3597810>.
5. Savchenko M.V. Q-learning and Markov optimization: adaptive approaches to spectrum management in cognitive radio networks / Savchenko M.V., Merkulev Y.S. // Scientific notes of the V. I. Vernadsky TNU. Series: Technical sciences. – 2025. – T. 36(75), No. 4 – P. 85-90. – DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.1/11>.
6. V.P. Lysechko. Methods of spectrum analysis in cognitive radio networks / V.P. Lyschenko, O.L. Anokhin, I.I. Sopronyuk, O.I. Pidchenko // Collection of scientific papers of the Ukrainian State University of Railway Transport. Automated systems of electric transport. – 2013. – No. 141. – P. 16-23. – DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.141.2013.93268>.
7. Ya. S. Obikhod. Development of a method for selecting cognitive radio channels with multiple access of primary and secondary users using the “energy harvesting” technology under the control of a neural network / Ya. S. Obikhod, V.P. Lysechko, O.M. Progonny, G.M. Kachurovsky, S.V. Skolota // Control, navigation and communication systems. – 2018. – Vol. 3, No. 49. – P. 165-174. – DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.3.165>.
8. Iyer S. Machine Learning Enabled Dynamic Spectrum Access for 6G Wireless Networks / Iyer S. // Journal of Applied Security Research. – 2023. – Vol. 19, no. 2. – P. 330–350. – DOI: <https://doi.org/10.1080/19361610.2023.2226014>.
9. W. Saad. A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems / W. Saad, M. Bennis, M. Chen // IEEE Network. – 2020. - Vol. 34, no. 3. – P. 134-142. – DOI: <https://doi.org/10.1109/MNET.001.1900287>.
10. S. Islam. Mobile Networks Toward 5G/6G: Network Architecture, Opportunities and Challenges in Smart City / S. Islam, A. Zainab Abdulsalam, B. Anil Kumar, M. Kamrul Hasan, R. Kolandaisamy, N. Safie // IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2025. – Vol. 6. P. 3082-3093. – DOI: <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2024.3419791>.