

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет "Львівська політехніка"

Янишин Володимир Богданович



УДК 621.391

**Моделі та алгоритми управління радіочастотним спектром в
когнітивних радіомережах**

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті "Львівська політехніка" Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Кирик Мар'ян Іванович,
Національний університет "Львівська політехніка",
докторант кафедри телекомунікацій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Ложковський Анатолій Григорович,
Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова,
завідувач кафедри комутаційних систем;

кандидат технічних наук, доцент
Отрох Сергій Іванович,
Державний університет телекомунікацій,
завідувач кафедри мобільних та
відеоінформаційних технологій.

Захист дисертації відбудеться "20" квітня 2018 р. о 14³⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті "Львівська політехніка" (79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд. 218 XI корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного університету "Львівська політехніка" (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий "16" березня 2018 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради



І.В.Демидов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Ускладнення безпроводних телекомунікаційних систем призводить до постійного удосконалення методів контролю за використанням обмеженого частотного ресурсу. Сучасні безпроводні мережі характеризуються статичною політикою розподілу спектру, за якої державні установи призначають власникам ліцензій на довгостроковій основі певні смуги спектру для використання у великих географічних регіонах. Останнім часом у зв'язку зі збільшенням потреб у частотних ресурсах, ця політика стикається з дефіцитом вільного спектру в окремих смугах. Існує зростаючий попит на використання радіочастотного діапазону, незважаючи на те, що більшість спектру вже зайнято. У світовій практиці певний частотний діапазон призначають для певної галузі на довгостроковій основі. Тим не менше, частоти для чітко визначених галузей не завжди ефективно використовуються, здебільшого – в міру необхідності. З іншого боку, велика частина призначеного радіоспектру використовується нерегулярно, що призводить до неповного використання значної кількості цього дефіцитного ресурсу. Отже, для вирішення цих проблем нещодавно були запропоновані динамічні методи доступу до спектральних смуг, які дозволяють використовувати вільні частини спектру в моменти їх простою. Перешкоди від одночасного використання в одному діапазоні частот декількох передавачів можуть призвести до значних спотворень переданої інформації і значно ускладнити роботу телекомунікаційних систем різного призначення. Одним із можливих шляхів розв'язання цієї проблеми є впровадження систем когнітивного радіо.

Когнітивна радіосистема являє собою радіомережу з механізмом самоуправління, різними рівнями засобів адаптації до мінливих умов радіосередовища. Механізм самоуправління ґрунтується на принципах навчання і штучного інтелекту. Відмінними рисами когнітивного радіо є здатність усіх прийомо-передавачів адаптивно приймати і передавати сигнал при динамічному змінненні радіочастот, типу модуляції, типу кодування та інших параметрів системи.

Система керування, що використовується в мережах когнітивного радіо, повинна збирати інформацію про радіосередовище і розвивати різні стратегії на основі наявної інформації для ефективної роботи системи зв'язку. Когнітивна система радіозв'язку, в ході навчання, повинна враховувати особливості смуг радіочастот, що використовуються, і допустимих конфігурацій наявного устаткування. Когнітивні радіостанції мають можливість динамічно визначати і використовувати діапазон частот для доступу до мережі.

Когнітивні радіомережі були розроблені, щоб забезпечувати високу пропускну здатність для мобільних користувачів за допомогою гетерогенної безпроводної архітектури і динамічних методів доступу до спектру. Ця мета може бути реалізована тільки за допомогою динамічних і ефективних методів управління використанням радіочастотних ресурсів. Однак, когнітивні радіомережі породжують низку унікальних завдань внаслідок невизначеності потенційно доступного спектру, а також через існування різних вимог до якості обслуговування (QoS), що пред'являються різними додатками.

Отже, актуальним є *наукове завдання* розроблення ефективних методів та алгоритмів управління радіочастотним спектром в когнітивних радіомережах для підвищення рівня якості сервісів, що ними надаються.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження виконувались у відповідності до наукового напрямку кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка» - «Інфокомунікаційні системи та мережі», в межах низки держбюджетних науково-дослідних робіт: «Моделі та структури конвергентних телекомунікаційних мереж на основі CLOUD – технологій» («ДБ/CLOUD»), (2013-2014 рр.), № держреєстрації 0113U003184, «Методи побудови та моделі інформаційно-телекомунікаційної інфраструктури на основі SDN – технологій для систем електронного урядування» (ДБ/SDN), (2015-2016), № держреєстрації 0115U000444.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є покращення параметрів якості надання сервісу у когнітивній радіомережі на основі розроблення моделі її системи керування із застосуванням методів динамічного доступу до радіосередовища для покращення ефективності використання радіочастотного ресурсу.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

- Провести аналіз основних функцій когнітивного радіо, процесу управління радіочастотним спектром і особливостей архітектури когнітивної радіомережі;

- Провести аналіз методів і технологій динамічного доступу до радіосередовища на етапах сканування, вибору, спільного використання та мобільності спектру когнітивної радіомережі;

- Розробити імітаційну модель системи керування когнітивною радіомережею із можливістю широкого і гнучкого налаштування вхідних параметрів, вибору методів управління радіочастотним спектром, а також із можливістю подальшого удосконалення моделі;

- Удосконалити метод сканування радіочастотного спектру для підвищення ефективності виявлення первинного користувача;

- Удосконалити модель вибору радіочастотного каналу на основі методів балансування вхідного навантаження для покращення швидкодії системи керування когнітивною радіомережею;

- Здійснити моделювання і дослідження запропонованих моделей і алгоритмів для оцінювання ефективності використання радіочастотного спектру, зокрема визначення параметрів якості надання послуг QoS.

Об'єкт дослідження – процес управління радіочастотним спектром в когнітивних радіомережах.

Предмет дослідження – моделі та алгоритми управління радіочастотним спектром на основі динамічного доступу до радіосередовища в когнітивних радіомережах.

Методи дослідження. Дослідження виконано на основі використання методів: теорії інформації, математичної статистики, теорії систем масового обслуговування, теорії ймовірностей, математичного та комп'ютерного моделювання.

Наукова новизна роботи полягає у тому, що:

1. Вперше запропоновано імітаційну модель системи керування когнітивною радіомережею, яка відрізняється від існуючих інтелектуальними та адаптивними властивостями, а саме прогнозуванням стану радіочастотних каналів на основі їх моніторингу та збору статистичних даних про функціонування їх фізичного, каналного і транспортного рівнів, що дало змогу підвищити ефективність використання радіочастотного ресурсу, зокрема покращити показники якості надання послуг.

2. Набув подальшого розвитку метод виявлення енергії сигналу на основі періодограми Уелча, який відрізняється від існуючих динамічною зміною кількості елементів зсуву періодограми, кількості часових сегментів та частотних відліків усереднення, що дало змогу підвищити ефективність сканування радіочастотного спектру.

3. Удосконалено модель вибору радіочастотного каналу, що відрізняється від існуючої використанням методів балансування вхідного навантаження на основі врахування ймовірності зайняття каналу і сканування його параметрів, що дало змогу покращити швидкодію системи керування когнітивною радіомережею.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

- Розроблено програмний комплекс для реалізації імітаційної моделі системи керування когнітивною радіомережею, який дає змогу проводити дослідження та порівняння ефективності роботи алгоритмів сканування, вибору, спільного використання та забезпечення мобільності спектру;

- Розроблено алгоритм реалізації методу сканування спектру з кооперативною співпрацею когнітивних користувачів, що дало змогу знизити ймовірність помилкової тривоги та ймовірність невиявлення первинного користувача;

- Розроблено алгоритм реалізації методу вибору радіочастотного спектру на основі балансування вхідного навантаження, що дало змогу мінімізувати тривалість прийняття системою рішення про розподіл радіоканалів на 20% і більше, ніж на 50%, за умови високого вхідного навантаження;

- Запропоновано удосконалений алгоритм для реалізації проактивного протоколу передавання спектру для обслуговування користувачів з використанням статистичних даних про функціонування системи та попереднього прогнозування стану радіочастотного каналу, що дало змогу покращити пропускну спроможність системи когнітивного радіо на 25% і майже вдвічі знизити ймовірність виникнення колізії між первинними та когнітивними користувачами.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати та положення дисертації представлені, доповідались та всебічно обговорені на 8-ми міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях, наукових семінарах та симпозіумах: Міжнародній науково-технічній конференції «The experience of designing and application of CAD Systems in microelectronics» CADSM'2017 (Поляна-Свалява, 21-25 лютого 2017 р.); Науково-практичній конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій» (23-26 лютого 2016 р., м. Львів); Проблеми інфокомунікацій. Наука і технології: 3-ій Міжнародній науково-практичній конференції (4-6 жовтня 2016 р., м. Харків); International

Conference «Advanced Information and Communication Technologies» (AICT 2015) (29 жовтня - 01 листопада 2015р., м. Львів); 13th International Conference CADSM 2015 (24-27 лютого 2015 р., м. Львів-Поляна); XIth International Conference TCSET'2014 “Modern problems of radioengineering, telecommunications and computer science” (25 лютого - 1 березня 2014 р., м. Львів-Славське); Науково-практичній конференції “Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій” (30 жовтня - 2 листопада 2014 р., м. Львів); International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications, Science and Technology» PICS&T'2013 (9-11 жовтня 2013р, м. Харків). Крім цього, дисертаційна робота представлена на науковому семінарі кафедри телекомунікацій Національного університету "Львівська політехніка".

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи та її наукові положення опубліковані в науково-технічних журналах, у збірниках праць міжнародних конференцій та семінарів. Всього опубліковано 13 наукових праць, серед них 4 статі у наукових фахових виданнях України, одна публікація у науковому періодичному виданні іншої держави, матеріали доповідей на міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях – 8.

Особистий внесок здобувача. Всі результати наукових, теоретичних, і практичних досліджень, які викладені в дисертації, одержані автором особисто. У працях, опублікованих у співавторстві, дисертантові належать: у роботах [1, 6] – розроблення методу балансування вхідного навантаження на основі оцінювання ймовірності заняття каналу при його скануванні; [2, 7] – створення інтелектуальної імітаційної моделі системи керування когнітивною радіомережею на основі проактивного алгоритму переключення каналів; [3] – удосконалення методу виявлення енергії на основі періодограми Уелча; [4] – розроблення моделі багаторівневої буферизації даних для мультисервісного трафіку; [5, 9] – розроблення моделі оцінювання пропускну здатності когнітивної радіомережі на основі OFDM; [8, 13] – розроблення імітаційної моделі керування когнітивною радіомережею; [10, 11, 12] - розроблення моделі кооперативного сканування в когнітивних радіомережах.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та 3-ох додатків. Загальний обсяг роботи складає 158 сторінок друкованого тексту, з них основного тексту – 103 сторінки, 46 рисунків та 9 таблиць. Список використаних джерел містить 107 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтовано актуальність обраної тематики, її зв'язок з науковими програмами, визначено мету та завдання дослідження. Визначено та розкрито предмет та об'єкт дослідження, висвітлено методи, використані в процесі роботи. У вступі також розкрито наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, подано відомості про апробацію, публікації, структуру й обсяг роботи.

У **першому розділі** – «Аналіз основних принципів побудови систем когнітивного радіо» – було проаналізовано й узагальнено теоретичні

напрацювання, підходи щодо побудови систем когнітивного радіо. Відмінними рисами когнітивного радіо є здатність усіх прийомо-передавачів адаптивно приймати і передавати сигнал при змінненні радіочастот, а також зміні типу модуляції, типу кодування та інших параметрів системи. Когнітивна радіосистема являє собою радіомережу з механізмом управління засобами різного рівня адаптації до мінливих умов радіосередовища. Механізм самоуправління ґрунтується на принципах навчання і штучного інтелекту. Загальні властивості когнітивного радіо: можливість отримання інформації про середовище радіозв'язку, здатність виконувати інтелектуальний аналіз інформації про стан радіосередовища, здатність адаптивно змінювати параметри системи телекомунікацій при зміні параметрів радіосередовища, з метою забезпечення ефективного функціонування системи зв'язку. Тому кожен когнітивний користувач в мережі повинен визначити, які частини спектру доступні, вибрати кращий доступний канал, координувати доступ до цього каналу з іншими користувачами та звільнити канал, коли виявлено ліцензійного користувача.

Когнітивні радіомережі (КР) породжують унікальні завдання, що виникають внаслідок їх співіснування з первинними мережами, а також через існування різних вимог до якості обслуговування (QoS), що пред'являються різними користувацькими додатками. Таким чином, необхідні нові функції управління радіочастотним спектром для мереж КР з наступними ключовими завданнями проектування: усунення перешкод – КР-мережам слід уникати втручання у функціонування первинних мереж; обізнаність про QoS – КР-мережі повинні підтримувати QoS-обізнаний зв'язок, враховуючи динамічність і гетерогенність спектрального середовища, щоб використовувати відповідний діапазон спектру; безшовний зв'язок – КР-мережі також повинні забезпечити безперебійний зв'язок, незалежно від типу первинних користувачів.

У другому розділі – **«Методи управління радіочастотним спектром в когнітивних радіомережах»** – визначено основні функції та проведено дослідження методів управління радіочастотним спектром в мережах КР. Основна увага зосереджена на розвитку мереж КР, які не вимагають змін в існуючій мережній інфраструктурі. Представлено концепцію управління радіочастотним спектром і забезпечення необхідної функціональності КР-мереж. Процес управління радіочастотним спектром складається з чотирьох основних етапів: сканування спектру, вибір спектру, спільне використання спектру і забезпечення мобільності спектру. Сканування радіочастотного спектру дає змогу користувачам адаптуватися до навколишнього середовища шляхом виявлення «мертвих зон» спектру, не створюючи перешкод первинній мережі.

Методи виявлення передавача можна поділити на три категорії: виявлення енергії сигналу, виявлення сигналу за допомогою узгодженого фільтру і виявлення особливостей сигналу. Якщо когнітивний приймач не може зібрати достатньо інформації про сигнал первинного приймача, то оптимальним детектором для такого випадку є метод виявлення енергії. Це поширений метод для виявлення невідомих сигналів, який базується на вимірюванні енергії в прийнятому сигналі протягом певного часу спостереження:

$$V = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t |y(r)|^2 dr. \quad (1)$$

Виявлення первинного сигналу здійснюється шляхом порівняння енергії E_i з порогом ζ_i . Таким чином, ймовірність прийняття помилкового рішення визначається $P_f^{(i)} = \text{Prob}\{E_i > \zeta_i | H_0\}$ та ймовірність виявлення визначається $P_d^{(i)} = \text{Prob}\{E_i > \zeta_i | H_1\}$. Ймовірність помилкового рішення, ймовірність виявлення і ймовірність невиявлення для i -ого КР-приймача мають вигляд:

$$P_f^{(i)} = \frac{\Gamma(u, \frac{\zeta_i}{2})}{\Gamma(u)} \quad (2)$$

$$P_d^{(i)} = e^{-\frac{\zeta_i}{2}} \sum_{p=0}^{u-2} \frac{1}{p!} \left(\frac{\zeta_i}{2}\right)^p + \left(\frac{1+\gamma_i}{\gamma_i}\right)^p \left[e^{-\frac{\zeta_i}{2(1+\gamma_i)}} - e^{-\frac{\zeta_i}{2}} \sum_{p=0}^{u-2} \frac{1}{p!} \left(\frac{\zeta_i \gamma_i}{2(1+\gamma_i)}\right)^p \right] \quad (3)$$

$$P_m^{(i)} = 1 - P_d^{(i)} \quad (4)$$

де γ_i - це миттєве значення відношення сигнал-шум i -ого КР-приймача, $u = T_c \Delta F$ - це параметр сканування, визначений як добуток тривалості сканування на ширину смуги пропускання, $\Gamma(\alpha)$ - це гамма-функція, $\Gamma(\alpha, x)$ - це неповна гамма-функція визначена як $\Gamma(\alpha, x) = \int_x^\infty t^{\alpha-1} e^{-t} dt$.

КР-мережі також потребують можливості вирішувати, які смуги спектру серед доступних є кращими, відповідно до QoS-вимог додатків. Дане поняття називається вибір смуги спектру. Вибір смуги спектру зазвичай складається з двох кроків: спочатку кожна смуга спектру характеризується на основі локальних спостережень користувачів КР та на основі статистичної інформації від первинних мереж. Потім, ґрунтуючись на цій характеристиці, проводиться вибір найбільш придатного діапазону спектру. Важливою метрикою якості обслуговування (QoS) для оцінювання ефективності вибору смуги спектру є тривалість прийняття системного рішення S про розподіл радіоканалів. Вона складається з часу очікування W і тривалості доставки даних T :

$$E[S] = E[W] + E[T], \quad (5)$$

де $E[x]$ є математичне сподівання величини x . В даному випадку час очікування визначається як тривалість від моменту, коли запит на передавання даних надходить в систему до моменту запуску передавання даних. Тривалість часу очікування залежить від алгоритму переключення каналу, що вибраний системою керування КР. Тривалість доставки даних визначається як інтервал часу від початку пересилання даних з початком першого часового інтервалу до завершення передавання даних з кінцем останнього часового інтервалу.

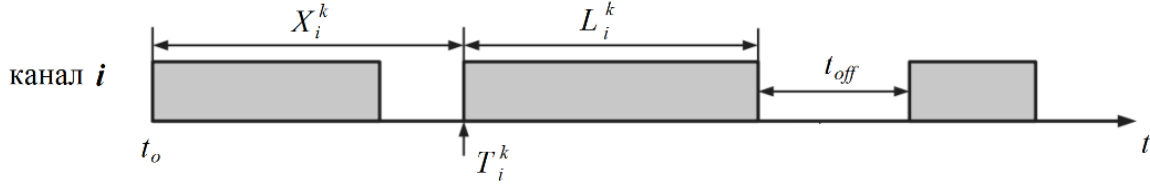


Рис. 1. Схематичне зображення активності первинного користувача в i -му каналі

Після того, як КР захоплює найкращі доступні смуги спектру, діяльність первинних користувачів на обраному діапазоні спектру може вимагати, щоб вторинний користувач змінив свою робочу смугу спектру, що, у свою чергу, називають мобільністю спектру. Мобільність спектру породжує новий тип передавання обслуговування в мережі КР – передавання смуг спектру для обслуговування користувачів. Використовуючи статистику, отриману в результаті спостереження радіоканалу, система керування КР може робити прогнози про доступність каналу до завершення передавання поточного пакету. На основі цього прогнозу когнітивний користувач вирішує, чи залишитися в даному каналі, чи переключитися на новий канал або ж зовсім зупинити поточну передачу.

Для будь-якого моменту часу t , ймовірність того, що i -й канал зайнятий або простоює можна записати в такий спосіб:

$$\begin{aligned} \Pr(N_i(t) = 1) & \text{ якщо } T_i^k < t \text{ ; } T_i^k + L_i^k \geq t, \quad k \geq 1, \\ \Pr(N_i(t) = 0) & \text{ якщо } T_i^k + L_i^k < t \text{ ; } T_i^{k+1} \geq t, \quad k \geq 1, \\ & T_i^{k+1} \geq t, \quad k = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

де T_i^k – момент прибуття k -го пакету, L_i^k – позначає довжину k -го пакету даних первинного користувача в i -му каналі. Таким чином, ймовірність того, що канал i вільний у будь-який момент часу t може бути отримана:

$$\begin{aligned} \Pr(N_i(t) = 1) &= \int_0^\infty \left[\sum_{k=1}^\infty \Pr(T_i^k + L_i^k < t | k) \Pr(k) + \Pr(T_i^k \geq t) \Pr(k = 0) \right] f_{L_i}(l) dl \\ &= \int_0^\infty \left\{ \sum_{k=1}^\infty \left[\frac{(\lambda_i(t - L_i))^k}{k!} e^{-\lambda_i(t - L_i)} \right] \left[\frac{(\lambda_i t)^k}{k!} e^{-\lambda_i t} \right] \frac{(\lambda_i t)^k}{k!} e^{-\lambda_i t} + e^{-2\lambda_i t} \right\} f_{L_i}(l) dl. \end{aligned} \quad (7)$$

Для i -ого каналу, функція розподілу ймовірності, залежно від тривалості періоду простою, визначається:

$$\Pr(t_{off} < x) = \int_0^\infty \int_0^{1+x} \lambda_i e^{-\lambda_i t} f_{L_i}(l) dt dl = \int_0^\infty (1 - e^{-\lambda_i(l+x)}) f_{L_i}(l) dl. \quad (8)$$

Метою керування мобільністю в КР-мережах є забезпечення плавного і швидкого переходу під час передавання смуг спектру для обслуговування користувачів з мінімальним погіршенням продуктивності системи. Однією з основних вимог до методів керування мобільністю є інформація про тривалість процесу передавання смуг спектру для обслуговування користувачів.

У третьому розділі – «Розроблення імітаційної моделі системи керування когнітивною радіомережею» – запропоновано імітаційну модель системи керування когнітивною мережею з інтелектуальними та адаптивними властивостями на основі збору, моніторингу та аналізу статистичних параметрів радіочастотних каналів із можливістю прогнозування їх майбутнього стану для оцінювання якості надання послуг (QoS) та підвищення ефективності використання радіочастотного ресурсу. Імітаційна модель системи керування когнітивною радіомережею представляє собою опис процесів спільного функціонування первинної (ліцензійної) і вторинної когнітивної мережі. Первинна мережа представлена у вигляді комірки системи LTE, в якій працюють декілька мобільних операторів на різних виділених частотних смугах (рис. 2, 3).

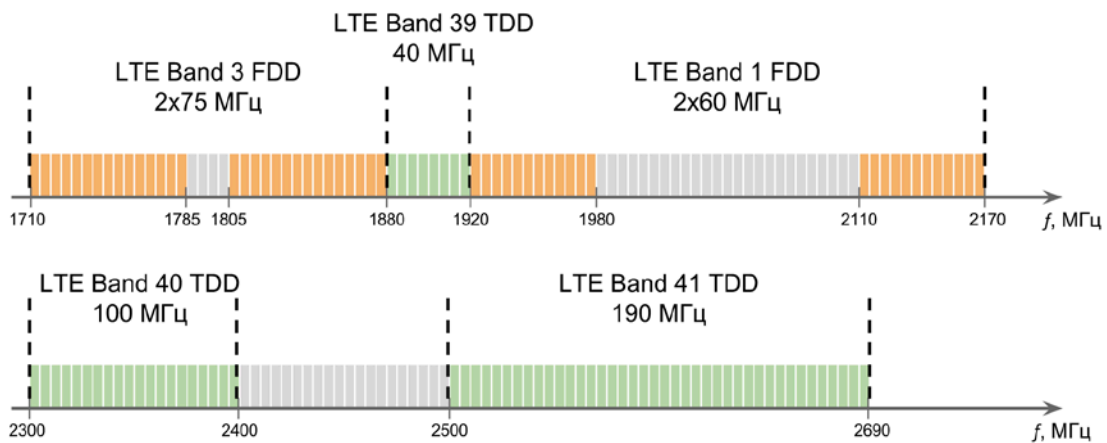


Рис. 2. Схематичне зображення розподілу ділянок частотного спектру між первинною і вторинною мережами

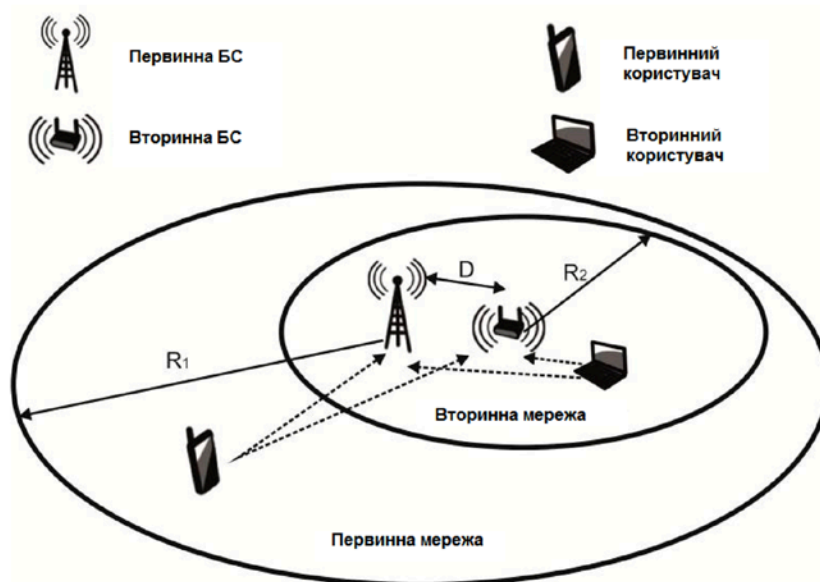


Рис. 3. Структура взаємодії первинної та вторинної когнітивної мережі

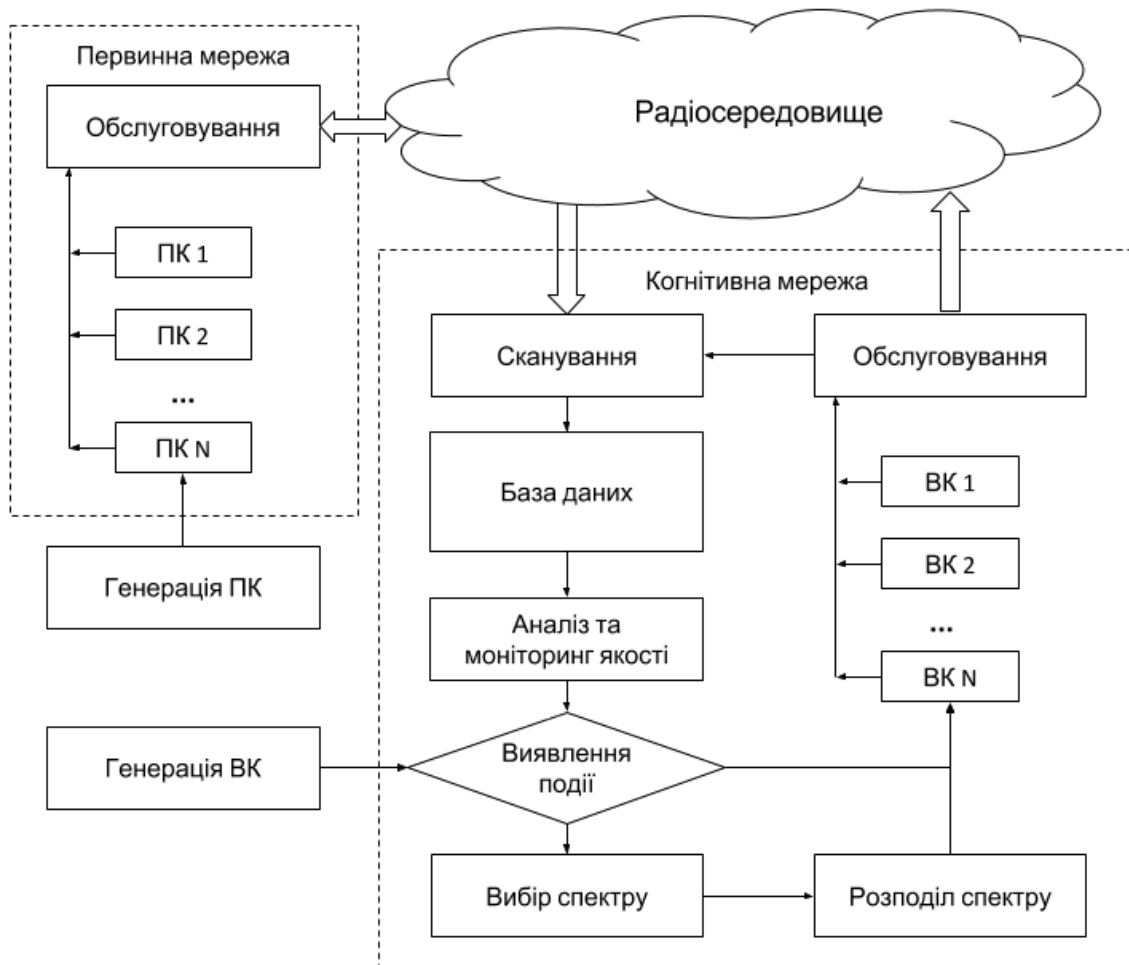


Рис. 4. Блок-схема імітаційної моделі системи керування когнітивною радіомережею

В даній моделі когнітивна радіомережа надає мультисервісні послуги трьох різних типів трафіку: сервісні дані, дані з негарантованою доставкою, дані реального часу. При генерації нового вторинного користувача тип послуги присвоюється випадковим чином, відповідно до ймовірності генерування. Дані про різні типи послуг зведені до табл. 1.

Таблиця 1.

Параметри при проведенні моделювання для різних типів послуг

Тип трафіку	Пріоритет	Ймовірність генерування $P_{tr\ gen}$	Сер. час передавання T_{av} , сек	Сер. швидкість передавання C_{av} , Кбіт/с
Service	1	0.5	1	64
Real-Time	2	0.15	300	2048
Best Effort	3	0.35	60	512

Імітаційна модель системи керування когнітивною мережею включає в себе процес управління використанням спектру на основі алгоритму, що складається з декількох змінних модулів. Кожному модулю відповідає певна аналітична та імітаційна модель. На початковому етапі вторинні користувачі розпочинають процес сканування спектру для виявлення первинних користувачів. Для цього використовується метод виявлення енергії сигналу первинного користувача. Оскільки основними недоліками даного методу є неефективність в умовах низького

відношення сигнал-шум та нездатність розрізняти перешкоди від інших вторинних користувачів, які разом використовують той самий канал із первинним користувачем, то для його удосконалення пропонується використати модифікований метод виявлення енергії із застосуванням періодограми Уелча.

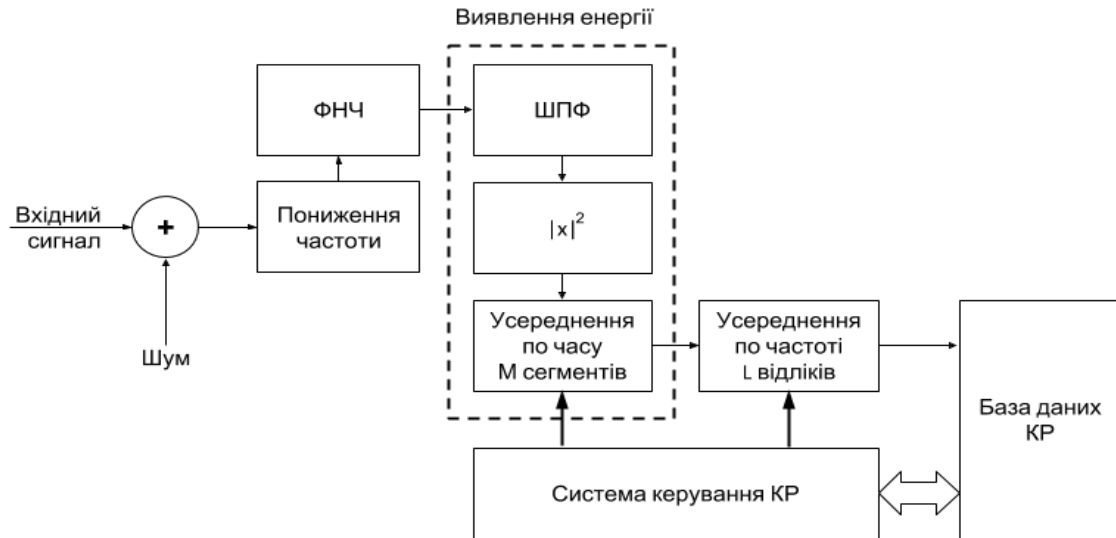


Рис. 5. Структурно-функціональна схема імітаційної моделі процесу виявлення енергії за допомогою періодограми Уелча із динамічною зміною кількості часових сегментів та частотних відліків усереднення вхідного сигналу

Запропоновано імітаційну модель процесу виявлення енергії із застосуванням періодограми Уелча, основною відмінністю від існуючих якої є динамічна зміна кількості часових сегментів періодограми M для усереднення, величини їх перекриття між собою, та кількості частотних відліків L . Значення цих параметрів визначаються системою керування когнітивної мережі, базуючись на статистичній інформації про вибраний частотний канал, яку вона отримує із загальної бази даних КР. Вихідний сигнал порівнюється з порогом, для визначення наявності або відсутності сигналу. Результати сканування передаються до загальної бази даних когнітивної радіосистеми, де вони зберігаються для кожного частотного каналу в якому проводиться сканування.

Якщо певний частотний канал визначається як вільний, то вторинний користувач може займати його для передавання даних. В даній моделі кожне первинне і вторинне з'єднання являє собою процес надходження пакетів з різною інтенсивністю, розподіленою за законом Пуассона. Середню інтенсивність поступлення пакетів для k -ого каналу первинного з'єднання позначено як $\lambda_p^{(k)}$, а як λ_s – середню інтенсивність поступлення пакетів вторинного з'єднання когнітивної радіомережі. $L_p^{(k)}$ – обсяг даних в бітах на пакет для k -ого каналу первинного з'єднання, а $f_p^{(k)}(l)$ – відповідна функція розподілу ймовірності. L_s є обсягом даних в бітах на пакет для вторинного з'єднання із функцією розподілу ймовірності $f_s(l)$ (див. рис. 6).



Рис. 6. Структурно-функціональна схема імітаційної моделі процесу оцінювання ефективності методів вибору спектру на основі різних алгоритмів перемикання каналу

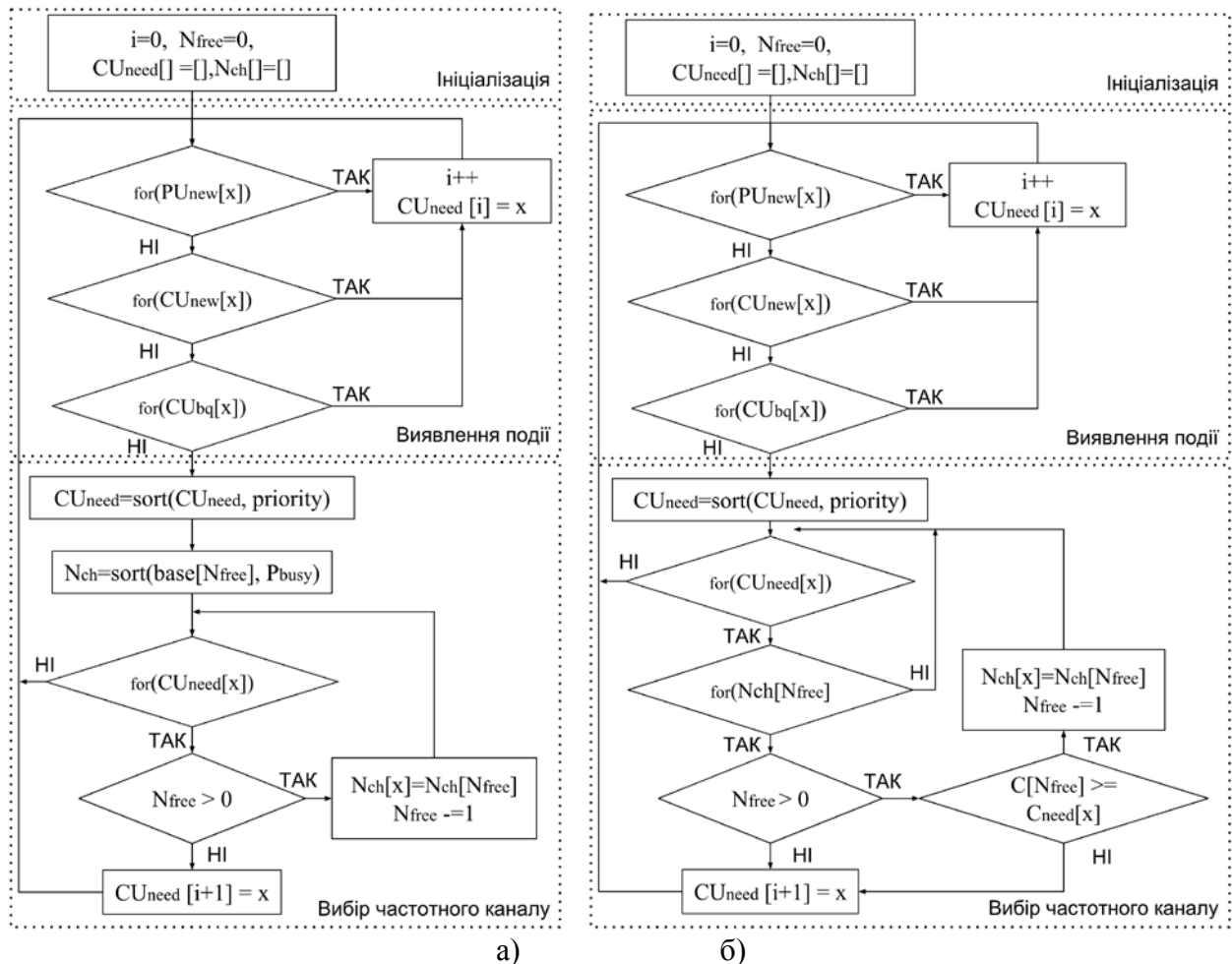


Рис. 7. Блок-схема алгоритмів реалізації методів вибору частотного каналу а) на основі оцінювання ймовірності зайняття радіоканалу; б) на основі параметрів отриманих при скануванні радіоканалу

До завершення процесу поточного передавання система керування КР проводять обчислення прогнозу про доступність радіоканалів і визначає якому з когнітивних користувачів потрібно почати процес передавання смуги спектру для

обслуговування первинних користувачів. З цією метою запропоновано алгоритм проактивного передавання смуг спектру для обслуговування первинних користувачів, що визначає, чи потрібно когнітивному користувачеві після закінчення передавання поточного пакету переключитися на новий радіоканал.

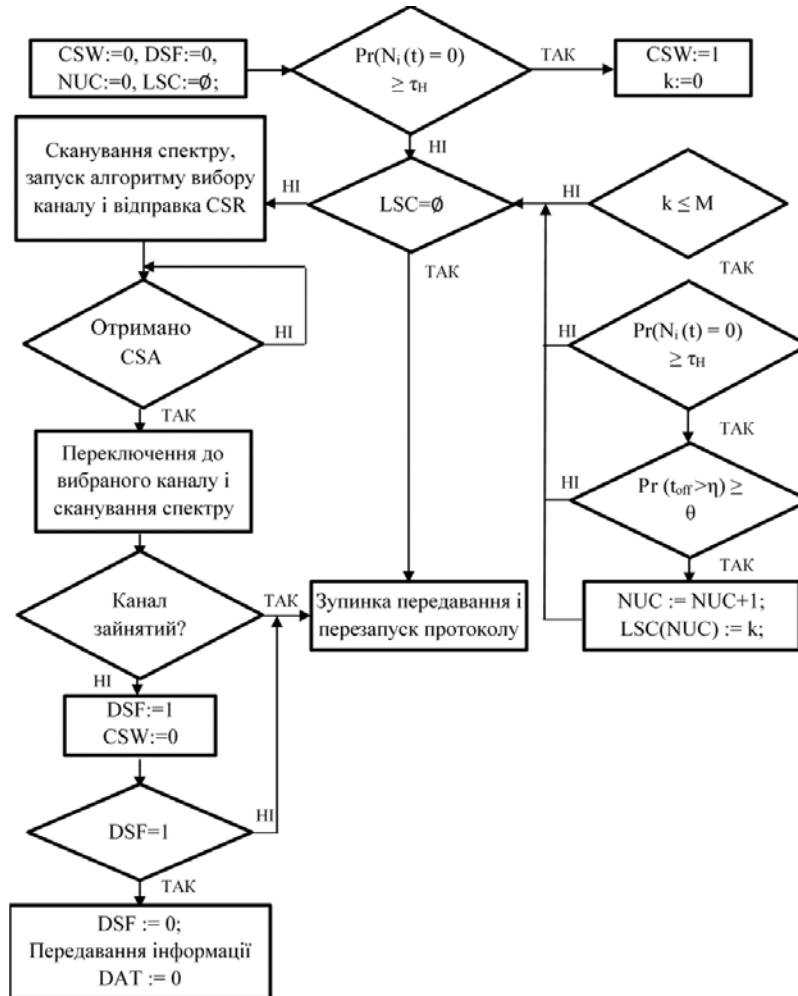


Рис. 8. Блок-схема алгоритму проактивного передавання смуг спектру для обслуговування первинних користувачів

На рис. 8. позначення DAT є прапорцем дозволу для запиту на передавання даних, DSF є прапорцем дозволу для власне передавання даних, t є моментом початку наступного часового слоту, а k є наступним частотним каналом для переключення. CSW є прапорцем дозволу для переключення радіочастотних каналів, NUC - є номером частотного каналу, LSC - список каналів кандидатів для передачі даних, i - це поточний канал.

У четвертому розділі – «Оцінювання ефективності використання радіочастотного спектру в когнітивних мережах» – проводиться аналіз ефективності процесів сканування радіочастотного спектру, обрахунок спектральної густини потужності в радіоканалі, оцінювання ефективності різних алгоритмів вибору радіоканалів та проактивного методу передавання смуг спектру для обслуговування користувачів на основі запропонованої моделі когнітивної радіосистеми. Для оцінювання ефективності сканування обраховано залежності ймовірності прийняття помилкового рішення P_f від параметра сканування u та

ймовірності виявлення енергії P_d від відношення сигнал-шум при різних значеннях порогової енергії радіосигналу. Ретельне дослідження цих даних показує, що ефективність виявлення енергії одним КР-користувачем погіршується, коли відношення сигнал-шум зменшується, а прийняття помилкового рішення є більш ймовірним при менших порогових значеннях енергії радіосигналу.

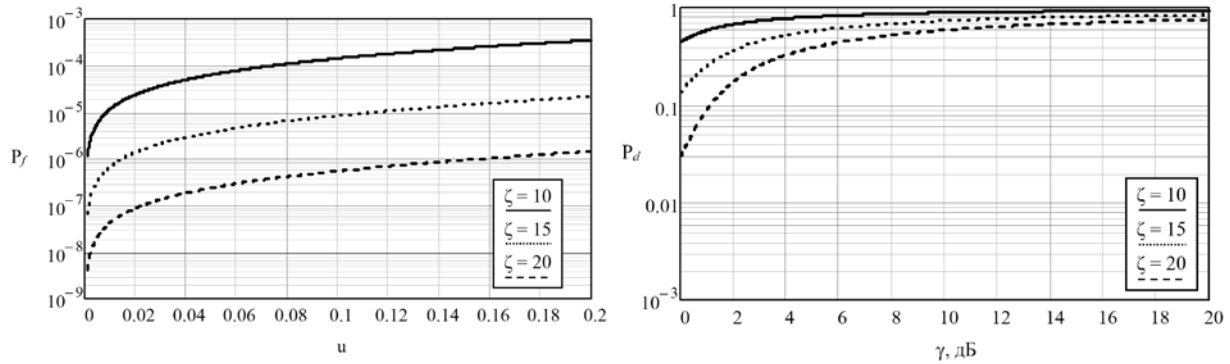


Рис. 9. Залежність ймовірності прийняття помилкового рішення від параметра сканування u та ймовірності виявлення радіосигналу від відношення сигнал-шум γ при різних порогових значеннях енергії сингалу ζ

Ймовірність прийняття помилкового рішення при кооперативному скануванні спектру визначається на основі логічного правила «або», а ймовірність невиявлення за правилом «і». Таким чином, ймовірність помилкового рішення, ймовірність невиявлення і ймовірність виявлення сигналу первинного користувача для випадку кооперативного сканування мають вигляд:

$$Q_f = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - P_f^{(i)}) = 1 - (1 - P_f^{(i)})^k, \quad (9)$$

$$Q_m = \prod_{i=1}^k P_m^{(i)} = (P_m^{(i)})^k, \quad (10)$$

$$Q_d = 1 - Q_m. \quad (11)$$

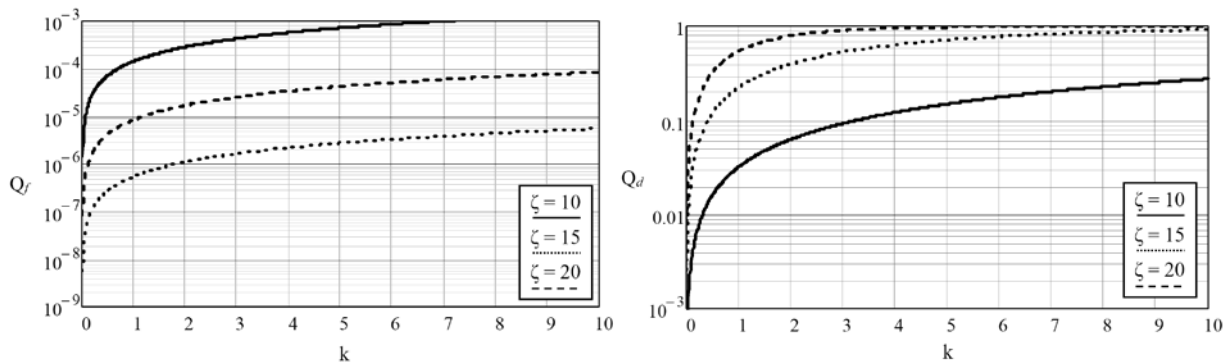


Рис. 10. Залежність ймовірності прийняття помилкового рішення та ймовірності виявлення сигналу первинного користувача від середньої кількості користувачів КР при застосуванні кооперативного сканування

Результати дослідження показують, що навіть лише один додатковий користувач покращує ефективність сканування, особливо при низьких значеннях сигнал-шум. Отже, кооперативне виявлення є набагато точнішим.

Використовуюючи комп'ютерне моделювання випадкового процесу, проведено аналіз методу сканування з використанням періодограми Уелча. В процесі дослідження кожен сценарій моделювання повторюється 10^5 разів. Кількість елементів ШПФ $N_{\text{FFT}} = 1024$. При використанні перекриття сегментів в часовій області, довжина блоку рівна $N_b=205$ символів. Теоретична залежність між ймовірністю виявлення сигналу первинного користувача та ймовірністю помилкового рішення обчислена за допомогою рівнянь:

$$P_f = P\{Y > \lambda | H_0\} = \frac{\Gamma\left(LM, \frac{\lambda}{2\sigma^2}\right)}{\Gamma(LM)}, \quad (12)$$

$$P_d = P\{Y > \lambda | H_1\} = Q_m\left(\sqrt{\frac{LMA^2T}{\sigma^2}}, \sqrt{\frac{\lambda}{\sigma^2}}\right), \quad (13)$$

де H_1 і H_0 – гіпотези про наявність та відсутність сигналу, відповідно, $\Gamma(x)$ – неповна і повна Гамма функції, σ - дисперсія шуму, λ – порогова енергія, $Q_m(x)$ - Q-функція Маркума, M – кількість сегментів в часовій області, L - кількість частотних відділів, A - амплітуда сигналу.

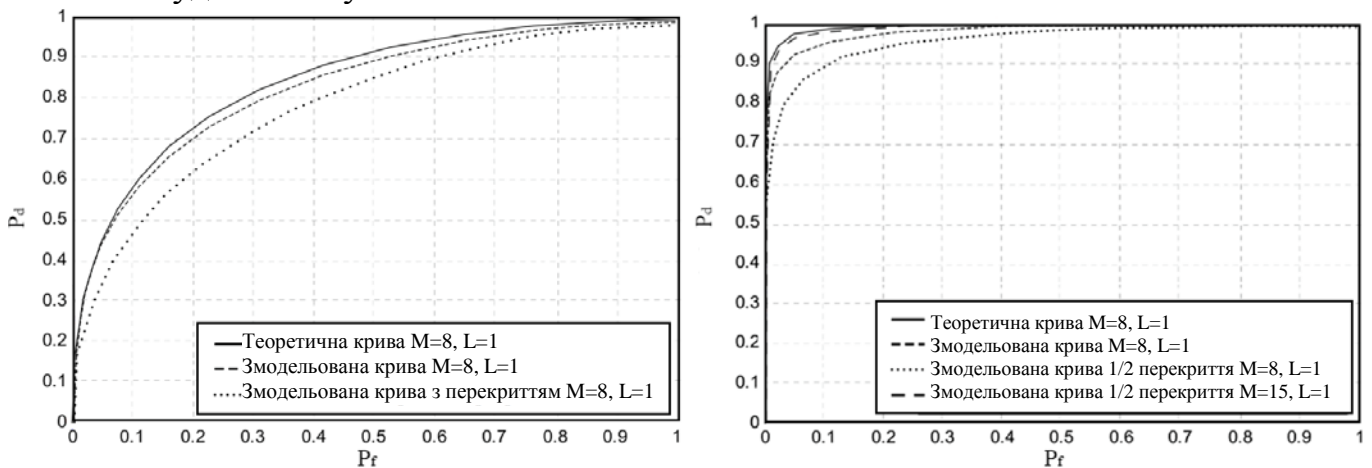


Рис. 11. Залежність між ймовірністю виявлення сигналу первинного користувача та ймовірністю помилкового рішення при: а) $N_{\text{FFT}} = 1024$, $E/N_0 = -5$ дБ, б) $N_{\text{FFT}} = 1024$, $E/N_0 = 2$ дБ

На рис. 11 зображені результати моделювання, коли $N_{\text{FFT}} = 1024$, $E/N_0 = 2$ дБ, $L = 1$, і $M = 8$ або $M = 15$, в разі 1/2 перекриття сегментів сигналу в часовій області. Порівнюючи випадок з перекриттям із 15 сегментами сигналу та випадок без перекриття з вісьмома сегментами, в останньому випадку чітко видно покращення продуктивності в середньому на 7-8%.

Результати моделювання залежності тривалості прийняття системного рішення про призначення радіоканалів $E[S]$ від середньої інтенсивності надходження вторинних з'єднань λ_s графічно представлено на рис. 12. Моделювання проводилося для значень середньої тривалості сканування одного частотного каналу $\tau=5$ та $\tau=10$ мс і для трьох різних алгоритмів перемикання радіоканалів: алгоритму без балансування навантаження, алгоритму на основі оцінювання ймовірності заняття каналу і алгоритму на основі сканування параметрів радіоканалу.

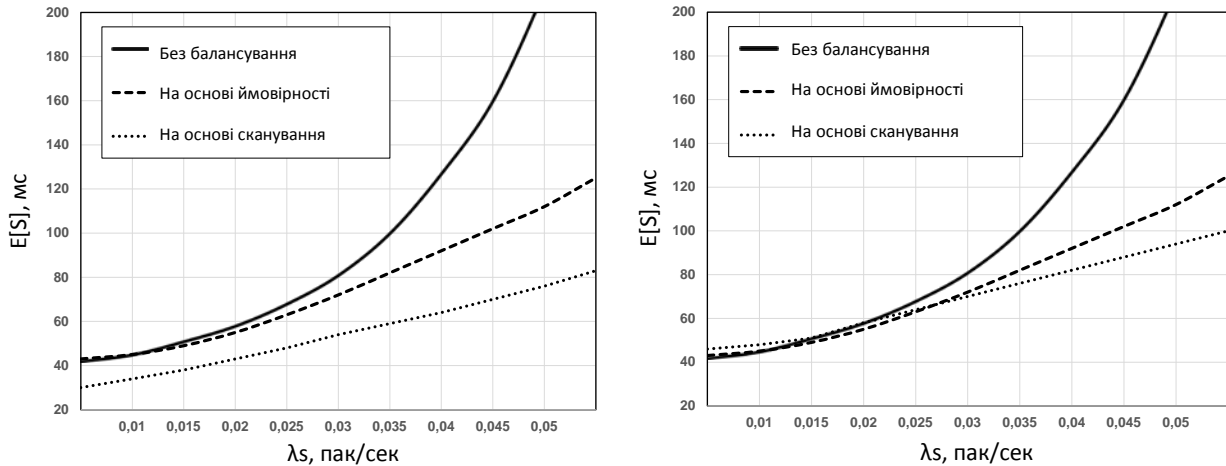


Рис. 12. Залежність тривалості прийняття системного рішення від інтенсивності вхідного навантаження при: а) $\tau=5$; б) $\tau=10$.

Для алгоритму вибору радіоканалу на основі сканування його параметрів, тривалість прийняття системного рішення є найменшою, коли τ є низьким, навіть при високих навантаженнях, оскільки даний алгоритм за допомогою широкосмугового сканування може досить істотно скоротити час призначення радіоканалів. Але коли τ високий і $\lambda_s < 0.025$, то алгоритм на основі оцінювання ймовірності зайняття каналу демонструє нижчу тривалість прийняття системного рішення, так як він може вибрати канали із більш низькою ймовірністю зайняття. Таким чином, можна знизити тривалість прийняття системного рішення до 20% при низькому навантаженні і більше, ніж на 50% при високому навантаженні.

На рис. 13. представлено результати моделювання для проактивного і реактивного методів передавання смуг спектру для обслуговування користувачів. Чітко видно, що при середній завантаженості первинної мережі середня пропускна здатність на одного когнітивного користувача для проактивного методу на 20-25% вища, ніж при використанні реактивного методу.

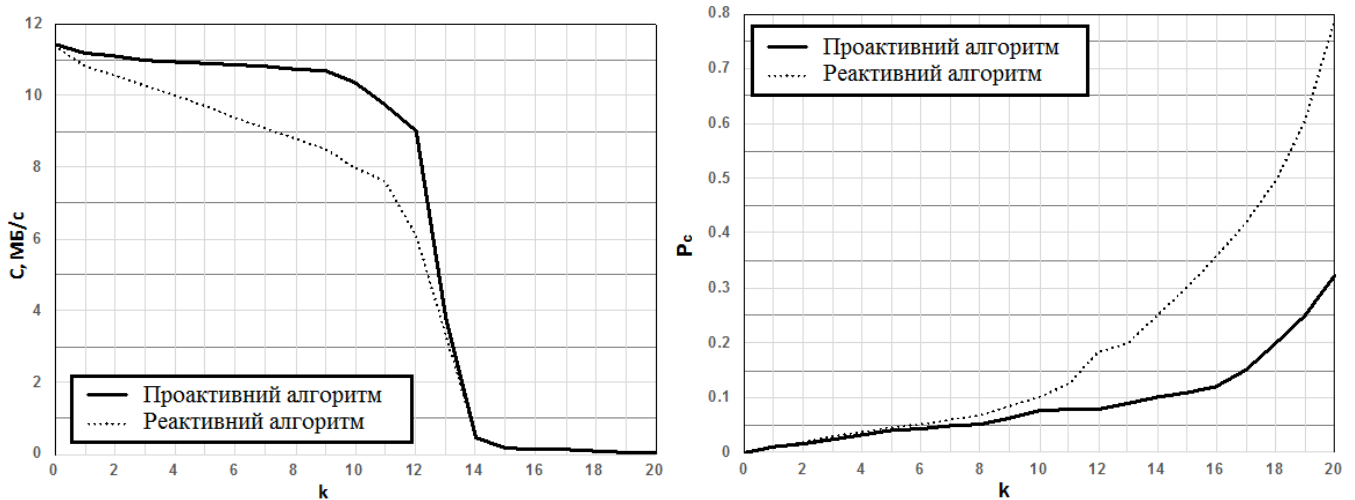


Рис. 13. Залежність середнього значення пропускної спроможності та ймовірності виникнення колізії від середньої кількості первинних користувачів

За результатами моделювання залежності ймовірності виникнення колізії від середньої кількості первинних користувачів для проактивного і реактивного методів можна визначити, що використання проактивного методу передавання смуг спектру

для обслуговування первинних користувачів зменшує ймовірність виникнення колізії приблизно в два рази.

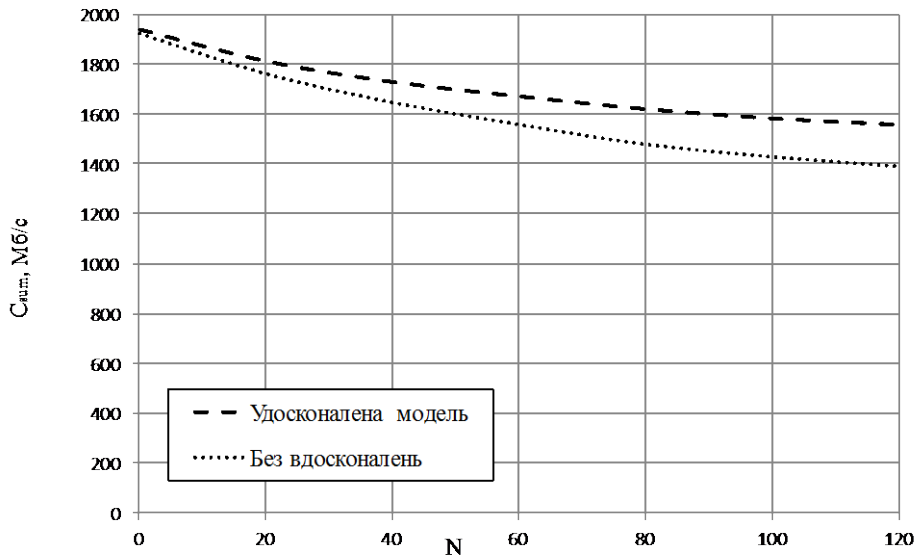


Рис. 14. Залежність середньої сумарної пропускної спроможності когнітивної радіомережі від кількості робочих частотних каналів у первинній радіомережі.

Проведено моделювання сумарної пропускної спроможності когнітивної радіомережі на основі інтелектуальної імітаційної моделі з використанням удосконалених методів управління радіочастотним спектром для порівняння з моделлю без такого вдосконалення (рис. 14). На основі результатів моделювання визначено, що при максимальній завантаженості первинної мережі середню сумарну пропускну здатність КР мережі можливо підвищити на 7-12%.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано наукове завдання розроблення ефективних методів та алгоритмів управління радіочастотним спектром в когнітивних радіомережах для підвищення рівня якості сервісів, що ними надаються. Основні наукові результати полягають у наступному:

1. Визначено основні функції процесу управління радіочастотним спектром, проаналізовано основні функції когнітивного радіо, схеми управління радіочастотним спектром і особливості мережевої архітектури когнітивної радіомережі. Проведено дослідження ефективності сканування спектру одним когнітивним користувачем та з використанням методу кооперативного сканування. Визначено, що кооперативне виявлення первинних користувачів є більш точним.

2. Розроблено імітаційну модель системи керування когнітивною радіомережею із можливістю широкого і гнучкого налаштування вхідних параметрів, вибору методів управління радіочастотним спектром та з можливістю подальшого удосконалення. Дана модель відрізняється від існуючих моніторингом, збором статистичних параметрів радіочастотних каналів та прогнозуванням їх стану, що дало змогу підвищити ефективність використання радіочастотного ресурсу, зокрема покращити показники якості надання послуг.

3. Удосконалено метод сканування спектру для оцінювання спектральної густини потужності, що базується на виявленні енергії сигналу за допомогою періодограми Уелча із динамічною зміною кількості часових сегментів періодограми, величини їх перекриття. Проведено ряд експериментів для суміші адитивного білого Гаусівського шуму і сигналу первинного користувача при різних значеннях відношення сигнал-шум у каналах зв'язку. Результати моделювання показали, що даний метод виявлення сигналу ефективно працює для вузькосмугових сигналів та підвищує ефективність сканування спектру всередньому на 7-8%.

4. Удосконалено імітаційну модель процесу оцінювання ефективності методів вибору смуг спектру на основі використання розроблених алгоритмів балансування вхідного навантаження. За результатами моделювання визначено, що при низькому навантаженні від вторинних користувачів, алгоритм на основі оцінювання ймовірності заняття каналу зменшує тривалість прийняття системного рішення про призначення радіоканалів до 20%, а при високому навантаженні – алгоритм переключення каналів на основі сканування параметрів радіоканалу зменшує тривалість прийняття системного рішення більше, ніж на 50%.

5. Визначено два основні критерії при перемиканні частотного каналу: ймовірність того, що теперішній і цільовий канали зайняті або простоюють та очікувана тривалість періоду простою каналу. На основі цих критеріїв розроблено політику мобільності спектру і запропоновано алгоритм проактивного передавання смуг спектру для обслуговування первинних користувачів, що базується на попередньому прогнозуванні стану частотного каналу із використанням статистичних даних про його використання.

6. Визначено залежності середнього значення пропускної спроможності для користувача КР і ймовірності виникнення колізії між первинним та когнітивним користувачами від завантаженості первинної мережі. Результати моделювання показують, що запропонований проактивний алгоритм має більш високу продуктивність у порівнянні з реактивним. З точки зору середньої пропускної здатності для користувачів КР, продуктивність зростає в середньому на 25% і майже вдвічі знижується ймовірність виникнення колізії із первинними користувачами.

7. Проведено моделювання для оцінювання пропускної здатності когнітивної радіомережі на основі імітаційної моделі з використанням удосконалених методів управління радіочастотним спектром при роботі системи в умовах наближених до реальних. На основі результатів моделювання визначено, що навіть при максимальній завантаженості первинної мережі середня сумарна пропускна здатність моделі когнітивної радіомережі з удосконаленнями зростає на 7-12%.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в журналах, що включені до міжнародних наукометричних баз даних:

1. Klymash M. Data Buffering Multilevel Model at a Multiservice Traffic Service Node / M. Klymash, M. Kyryk, N. Pleskanka and V. Yanyshyn // Smart Computing Review. – 2014. - Vol. 1. - No. 1. - P.294-306.

2. Климаш М.М. Оцінка ефективності алгоритмів перемикання радіочастотних каналів для вибору спектра у когнітивних радіомережах / Климаш М.М., Кирик М.І., Янишин В.Б. // Радіоелектроніка та телекомунікації.

Вісник Національного Університету “Львівська політехніка”. – Львів, 2017. – №874. – С. 87-94.

3. Кирик М.І. Модель оцінки ефективності методів спектральної мобільності для когнітивних радіомереж / Кирик М.І., Янишин В.Б., Піцик М.В. // Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник Національного Університету “Львівська політехніка”. – Львів, 2016. – №849. – С. 194-202.

4. Кирик М.І. Модель оцінки спектральної густини потужності на основі методу періодограми Уелча для когнітивного радіо / Кирик М.І., Янишин В.Б., Колодій Р.С. // Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник Національного Університету “Львівська політехніка”. – Львів, 2015. – №818. – С. 86-93.

5. Кирик М.І. Модель оцінки пропускної здатності когнітивної радіомережі на основі OFDM / Кирик М.І., Янишин В.Б., Стрихалюк І.Б. // Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник Національного Університету “Львівська політехніка”. – Львів, 2014. – №796. – С. 104-112.

Публікації у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій:

6. Kyryk M. Spectrum decision methods performance evaluation model for cognitive radio / M. Kyryk, N. Pleskanka, V. Yanyshyn // Proceedings of XIVth international conference «The experience of designing and application of CAD Systems in microelectronics» CADSM'2017, 21-25 February, Lviv-Poljana. – 2017. – P. 289 – 291.

7. Kyryk M. Proactive spectrum handoff performance evaluation model for cognitive radio / M. Kyryk, V. Yanyshyn // Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), Third International Scientific-Practical Conference, Kharkiv, 2016. – P. 18-20.

8. Kyryk M. Performance Comparison of Cognitive Radio Networks Spectrum Sensing Methods / M. Kyryk, V. Yanyshyn, L. Matiishyn, V. Havronsky // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2016, 23-26 February, Lviv-Slavske. – 2016. – P. 597 - 600.

9. Kyryk M. Cooperative Spectrum Sensing Performance Analysis in Cognitive Radio Networks / M. Kyryk, V. Yanyshyn // 1st IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2015 (AICT-2015): Conference Proceedings. – Lviv, 2015. – P. 35-37.

10. Kyryk M. OFDM-based Cognitive Radio System Capacity Evaluation Model / M. Kyryk, V. Yanyshyn // Proceedings of XIIIth international conference «The experience of designing and application of CAD Systems in microelectronics» CADSM'2015, 24-27 February, Lviv-Poljana. – 2015. – P. 137-139.

11. Kyryk M. The Cooperative Spectrum Sensing Performance Research in Cognitive Radio Networks / M. Kyryk, V. Yanyshyn, D. Kozhurov // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: Proceedings of the International Conference TCSET'2014, Lviv-Slavske, Ukraine, February 25 - March 1, 2014. – Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2014. – P. 448-450.

12. Кирик М.І. Дослідження ефективності кооперативного сканування в когнітивних радіомережах / Кирик М.І., Янишин В.Б. // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції “Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – СПТЕЛ-2014”, 30 жовтня - 2 листопада 2014 р., Львів. – С. 153-154.

13. Янишин В.Б. Дослідження ефективності сканування спектру в когнітивних радіомережах / Янишин В.Б. // Матеріали першої Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми інфокомунікацій. Наука і технології (PICS&T-2013) – 9-11 Жовтня– 2013, Харків. - С. 185-187.

Анотація

Янишин В. Б. Моделі та алгоритми управління радіочастотним спектром в когнітивних радіомережах. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, м. Львів, 2018.

У дисертації розв’язано актуальне наукове завдання розроблення ефективних методів та алгоритмів управління радіочастотним спектром в когнітивних радіомережах для підвищення рівня якості сервісів, що ними надаються. Визначено основні функції процесу управління радіочастотним спектром, проаналізовано основні функції когнітивного радіо, схеми управління радіочастотним спектром і особливості мережевої архітектури когнітивної радіомережі. Проведено дослідження ефективності сканування спектру одним когнітивним користувачем та з використанням методу кооперативного сканування. Розроблено інтелектуальну імітаційну модель системи керування когнітивною мережею із можливістю широкого і гнучкого налаштування вхідних параметрів, вибору методів управління радіочастотним спектром, а також із можливістю подальшого удосконалення. Проведено удосконалення методу сканування спектру для оцінювання спектральної густини потужності, що базується на виявленні енергії за допомогою періодограми Уелча. Удосконалено імітаційну модель процесу оцінювання ефективності методів вибору смуг спектру на основі використання розроблених алгоритмів балансування вхідного навантаження. Запропоновано удосконалений алгоритм проактивного передавання смуг спектру для обслуговування первинних користувачів із використанням статистичних даних про функціонування системи та попереднім прогнозуванням стану частотного каналу, що дало змогу покращити пропускну спроможність системи когнітивного радіо на 25% і майже вдвічі знизити ймовірність виникнення колізії між первинними та когнітивними користувачами. На основі результатів моделювання визначено, що навіть при максимальній завантаженості первинної мережі середня сумарна пропускну здатність моделі когнітивної радіомережі з удосконаленнями зростає на 7-12%.

Ключові слова: когнітивне радіо, система керування, розподіл радіочастотних ресурсів, QoS.

Аннотация

Янишин В.Б. Модели и алгоритмы управления радиочастотным спектром в когнитивных радиосетях. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.02 - телекоммуникационные системы и сети. - Национальный университет «Львовская политехника» Министерства образования и науки Украины, г. Львов, 2018.

В диссертации решена актуальная научная задача разработки эффективных методов и алгоритмов управления радиочастотным спектром в когнитивных радиосетях для повышения уровня качества сервисов, предоставляемых ними. Определены основные функции процесса управления радиочастотным спектром, проанализированы основные функции когнитивного радио, схемы управления радиочастотным спектром и особенности сетевой архитектуры когнитивной радиосети. Проведено исследование эффективности сканирования спектра одним когнитивным пользователем и с использованием метода кооперативного сканирования. Разработана интеллектуальная имитационная модель системы управления когнитивной сетью с возможностью широкой и гибкой настройки входных параметров, выбора методов управления радиочастотным спектром, а также с возможностью дальнейшего усовершенствования. Проведено усовершенствование метода сканирования спектра для оценки спектральной плотности мощности, основанное на выявлении энергии с помощью периодограммы Уэлча. Усовершенствована имитационная модель процесса оценки эффективности методов выбора полос спектра на основе использования разработанных алгоритмов балансировки входящей нагрузки. Предложен усовершенствованный алгоритм проактивной передачи полос спектра для обслуживания первичных пользователей с использованием статистических данных о функционировании системы и предварительным прогнозированием состояния частотного канала, что позволило улучшить пропускную способность системы когнитивного радио на 25% и почти вдвое снизить вероятность возникновения коллизии между первичными и когнитивными пользователями. На основе результатов моделирования определено, что даже при максимальной загруженности первичной сети средняя суммарная пропускная способность модели когнитивной радиосети с усовершенствованиями повышается на 7-12%.

Ключевые слова: когнитивное радио, система управления, распределение радиочастотных ресурсов, QoS.

Abstract

Yanyshyn V.B. Radio frequency spectrum management models and algorithms in cognitive radio networks. - On the rights of the manuscript.

The thesis submitted in fulfilment of the PhD degree in technical science on specialty 05.12.02 - telecommunication systems and networks. - Lviv Polytechnic National University of Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

The thesis solves an actual scientific problem - development of effective radio frequency spectrum management methods and algorithms in cognitive radio networks for the quality of service improving. The basic functions of cognitive radio, radio frequency spectrum management schemes and features of the network architecture of the cognitive network are analyzed. A study of the efficiency of spectrum scanning by one cognitive user and using the method of cooperative scanning was conducted. The intellectual computer model of the cognitive network management system with the possibility of wide and flexible adjustment of input parameters, choice of radio frequency spectrum management methods, and with the possibility of further improvement and scaling is developed. Improvement of spectral scanning method and estimation of spectral power density based on energy detection using the Welch periodogram was contributed. The model for assessing the efficiency of spectrum selection methods based on the introduced

new performance indicator - the duration of the adoption of a system solution (radio channel designation) for the algorithms for balancing the input load has been improved.

The simulation system model has been proposed to calculate main system operational parameters and integrated in simplified model of cognitive radio network with one primary system and one secondary cell. The model uses queueing systems to evaluate how effects on the total system configuring time of the secondary connections on sensing errors, multiple interruptions and capacity of channel. Based on the results, when using load-balancing methods, the total system configuring time can be reduced from 20% and even up to 50%.

The advanced algorithm of the proactive protocol of spectrum transmission for service with the use of statistical data about system operation and preliminary forecasting of the frequency channel status was proposed, which allowed to improve the bandwidth of the cognitive radio system by 25% and almost halve the likelihood of a collision between the primary and cognitive users.

The simulation was conducted for estimating the bandwidth of a cognitive radio network on the basis of an intellectual simulation model with the use of advanced methods for managing the radio frequency spectrum under the system's operation in conditions close to real. Based on the results of the simulation, it is determined that even with the maximum load of the primary network, the average total bandwidth of the cognitive radio network model with improvements is increased by 7-12%.

Key words: cognitive radio, control system, distribution of radio frequency resources, QoS.