

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЯНИШИН ВОЛОДИМИР БОГДАНОВИЧ

УДК 621.391

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі
(шифр і назва спеціальності)

05 «Технічні науки»
(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ / В.Б. Янишин /

Науковий керівник –
Кирик Мар'ян Іванович,
к.т.н., доцент

Ідентичність всіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

*Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради*

/Л.В. Демидов/

Львів – 2018

АНОТАЦІЯ

Янишин В.Б. Моделі та алгоритми управління радіочастотним спектром в когнітивних радіомережах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.12.02 «Телекомунікаційні системи та мережі» (172 Телекомунікації та радіотехніка). – Національний університет «Львівська Політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2018.

Роботу присвячено дослідженню методів динамічного доступу до радіо середовища та алгоритмів ефективного управління радіочастотним спектром у когнітивних радіо мережах. Ускладнення безпроводних телекомунікаційних систем призводить до постійного удосконалення методів контролю використання обмеженого частотного ресурсу. Оскільки існує зростаючий попит на використання радіочастотного діапазону, незважаючи на те, що більшість спектру уже зайнято, велика його частина використовується нерегулярно, що призводить до неповного використання значної кількості цього ресурсу.

У дисертації розв'язано актуальне наукове завдання – розроблення ефективних методів та алгоритмів управління радіочастотним спектром в когнітивних радіомережах для підвищення рівня якості сервісу, що ними надається. Система керування, яка використовується у мережах когнітивного радіо, повинна збирати дані стосовно стану радіосередовища і на основі наявної інформації розвивати різні стратегії роботи системи зв'язку. Когнітивна система радіозв'язку під час навчання повинна враховувати особливості смуг частот, що використовуються, і допустимих конфігурацій наявного устаткування.

Проаналізовано й узагальнено теоретичні напрацювання підходів 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. Визначено загальні властивості когнітивного радіо: можливість отримання інформації про середовище радіозв'язку, здатність виконувати інтелектуальний аналіз інформації про стан радіосередовища, здатність адаптивно змінювати параметри системи телекомунікації, при зміні параметрів радіосередовища, з метою забезпечити ефективне функціонування системи зв'язку. Когнітивні радіомережі 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 додатками. Таким чином, нові функції управління радіочастотним спектром, необхідні для когнітивних радіомереж.

Визначено основні функції процесу управління радіочастотним спектром, що складається з чотирьох основних етапів: сканування радіочастотного спектру, вибір смуг спектру, спільне використання і мобільність радіочастотного спектру. Проаналізовано основні функції когнітивного радіо, схеми управління радіочастотним спектром і особливості мережевої архітектури когнітивної радіомережі. Визначено, що сканування радіочастотного спектру дає змогу користувачам адаптуватися до навколишнього середовища шляхом виявлення «мертвих зон» спектру, не створюючи перешкод первинній мережі. Це може бути досягнуто вмінням виявити слабкі сигнали первинних користувачів в широкому спектральному діапазоні, за допомогою широкосмугового моніторингу в реальному часі. Проведено дослідження ефективності сканування спектру одним когнітивним користувачем та з використанням методу кооперативного сканування. За допомогою методів вибору радіочастотного спектру на основі доступності спектру, користувач когнітивного радіо може виділити

кращий з частотних каналів. Цей вибір залежить не тільки від наявності вільного спектру, але також визначається на основі певних внутрішніх правил, наприклад по вимогам щодо якості обслуговування (QoS) або статистичним параметрам каналу. Спільне використання радіочастотного спектру координує доступ до мережі когнітивного радіо, який має бути узгоджений між когнітивними користувачами, щоб запобігти колізії повідомлень декількох користувачів в частинах спектру, які перекриваються, оскільки можуть виникати ситуації коли декілька користувачів когнітивного радіо намагаються отримати доступ до одного діапазону спектру. Мобільність спектру дозволяє користувачам когнітивного радіо не перешкоджати роботі первинної мережі. Таким чином, якщо первинним користувачем планується використання конкретної ділянки спектру, то повідомлення користувача когнітивного радіо повинно призупиняється на цій ділянці і продовжується в іншій вільній частині спектру.

Вперше запропоновано інтелектуальну імітаційну модель системи керування когнітивною радіомережею, яка відрізняється від існуючих моніторингом та збором статистичних параметрів радіочастотних каналів, що дає змогу прогнозувати їх стан для підвищення ефективності використання радіочастотного ресурсу та оцінювання якості надання послуг QoS. Набув подальшого розвитку метод виявлення енергії сигналу на основі періодограми Уелча, який відрізняється від існуючих динамічною зміною кількості часових сегментів періодограми, їх величини перекриття між собою та частотних відліків усереднення, що дало змогу підвищити ефективність сканування радіочастотного спектру. Удосконалено модель вибору смуги спектру, яка відрізняється від існуючої використанням методів балансування вхідного навантаження на основі оцінювання ймовірності зайняття радіочастотного каналу і на основі параметрів отриманих при скануванні радіочастотного каналу, що дало змогу покращити швидкодію системи керування когнітивною мережею.

Розроблено програмний комплекс для реалізації системи керування когнітивною мережею, який дає змогу проводити дослідження та порівняння ефективності роботи алгоритмів сканування, вибору, спільного використання та забезпечення мобільності смуг спектру. Розроблено алгоритм реалізації методу сканування спектру з кооперативною співпрацею когнітивних користувачів, що дало змогу знизити ймовірність помилкового рішення та ймовірність невиявлення первинного користувача. Розроблено алгоритм реалізації методу вибору радіочастотного спектру на основі балансування вхідного навантаження, що дало змогу мінімізувати тривалість прийняття системного рішення про розподіл радіоканалів до 20% при низькому вхідному навантаженні і навіть більше ніж на 50% при високому вхідному навантаженні.

Проведено аналіз процесу мобільності спектру і методів передавання смуг спектру для обслуговування користувачів в когнітивних радіомережах. Визначено два основні критерії при переключенні частотного каналу: ймовірність прогнозування того, що теперішній і цільовий канали зайняті або простоюють та очікувану тривалість періоду простою каналу. На основі цих критеріїв розроблено політику мобільності смуг спектру і запропоновано алгоритм проактивного передавання обслуговування смуг спектру, що базується на попередньому прогнозуванні стану частотного каналу із використанням статистичних даних про його використання. Визначено залежності середнього значення пропускної спроможності для користувача КР і ймовірності виникнення колізії між первинним та когнітивним користувачами від завантаженості первинної мережі. 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.

Ключові слова: когнітивне радіо, безпроводна мережа, система керування, розподіл радіочастотних ресурсів, сканування радіочастотного спектру, QoS.

Список публікацій здобувача:

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

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 пропускну 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.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

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. Havronskyi // 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) – Жовтень 9 - 11, 2014, Харків. - С.185-187.

ABSTRACT

Yanyshyn V.B. Radio frequency spectrum management models and algorithms in cognitive radio networks. – Proficiency scientific treatise on the rights of the manuscript.

Thesis submitted in fulfillment of the Candidate of Engineering Science (Ph.D.) degree in technical sciences on specialty 05.12.02 – «Telecommunication systems and networks» (172 – Telecommunications and Radio Engineering). – Lviv Polytechnic National University of Ministry for Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

The thesis is devoted to the research of methods of dynamic access to the radio environment and algorithms for efficient radio spectrum management in cognitive radio networks. The complication of wireless telecommunication systems leads to continuous improvement of the limited frequency resource management methods. As there is a growing demand for the use of the radio frequency band, despite the fact that most of the spectrum is already occupied, much of it is used irregularly, which leads to incomplete use of a significant amount of this resource.

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 (QoS) improving. The control system, that used in cognitive radio, should collect radio environment information and develop

various strategies based on available information for the communication system. The cognitive radio communication system should take into account the frequency bands features and available equipment permissible configurations during the learning process.

Theoretical approaches for construction of cognitive radio systems have been analyzed and generalized. The cognitive radio distinctive features are ability to adaptively receive and transmit the signal when radio frequencies, the modulation type, type of encoding and other system parameters are changing. The cognitive radio system is a radio network with a mechanism for controlling means of varying levels of adaptation to changing conditions of radio environments. The general properties of cognitive radio are determined: the possibility of obtaining information about the radio environment, the ability to perform intelligent analysis of information about the state of the radio environment, the ability to adaptively change the parameters of the telecommunication system, when changing the parameters of the radio environment, in order to ensure the effective functioning of the communication system. Cognitive radio networks generate unique tasks that arise from their coexistence with primary networks, as well as the existence of various quality service requirements (QoS) presented by various applications. Thus, the new radio frequency spectrum management functions required for cognitive radio networks.

The basic spectrum management process functions, are determined, which consists of four main stages: radio frequency spectrum sensing, radio spectrum decision, radio frequency spectrum sharing and the radio frequency spectrum mobility. The basic functions of cognitive radio, radio frequency spectrum management schemes and network architecture features of the cognitive network are analyzed. The radio frequency spectrum sensing allows cognitive users to adapt to the environment by detecting the "spectrum holes" of the spectrum without interfering with the primary network. This can be achieved by the ability to detect

weak signals from primary users in a wide spectral range, through broadband monitoring in real time. A study of the efficiency of scanning a spectrum by one cognitive user and using the method of cooperative scanning was conducted. With the help of radio frequency spectrum selection methods based on the spectrum availability, the cognitive radio user can select the best of the frequency channels. This choice depends not only on the availability of the free spectrum, but also on the basis of certain internal rules, such as quality of service (QoS) requirements or channel statistical parameters. Sharing the radio spectrum coordinates the access to the cognitive radio network, which should be agreed upon between cognitive users to prevent the collision of messages from multiple users in overlapping spectrum segments, as there may be situations when several users of cognitive radio try to access one range of spectrum. The spectrum mobility allows users of cognitive radio to not interfere with the work of the primary network. Thus, if the primary user is planning to use a specific area of the spectrum, the message from the cognitive radio user should be stopped at this frequency band resumed in another free part of the spectrum.

The intellectual computer model of the cognitive radio network management system was proposed, which differs from the existing models by monitoring and collection of radio frequency channels statistical parameters, which allows to predict their state for increasing the efficiency of using radio frequency resource and assessing the quality of QoS services. The method of detecting the signal energy based on the Welch periodogram, which differs from the existing dynamic change in the number of elements of the periodogram shift, the number of time segments and frequency domain, has been further developed, which has enabled to increase the efficiency of the scanning of the radio spectrum. The model for choosing a radio frequency channel is improved, which differs from the existing use of load balancing methods based on the probability of channel occupation and

the choice of spectrum based on its scan, which made it possible to improve the performance of the cognitive network control system.

The cognitive network management system application programming is developed, which allows to conduct research and compare the efficiency of sensing spectrum, spectrum selection, spectrum sharing and spectrum mobility algorithms. An implementation algorithm for the spectrum sensing method with co-operative collaboration of cognitive users was developed, which made it possible to reduce the probability of false alarms and the likelihood of non-identification of the primary user. The implementation algorithm of the method for selecting the radio frequency spectrum on the basis of the balancing of the input load was developed, which made it possible to minimize the duration of the adoption of the system solution by 20% and even more than 50% at high input load.

The spectrum mobility process and spectrum switching methods in cognitive networks are analyzed. The two main criteria for switching the frequency channel are defined: the probability of predicting that the current and target channels are busy or idle and the expected duration of the idle channel period. Based on these criteria, a spectrum mobility policy was developed and an improved algorithm for proactive spectrum transmission protocol was proposed, based on the preliminary prediction of the frequency channel state using statistical data on its use. The advanced algorithm of the proactive transmission protocol in service of the spectrum with the use of statistical data of functioning of the system 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.

Keywords: cognitive radio, wireless network, control system, spectrum management, spectrum sensing, QoS.

The list of author's publications:

Scientific works where major scientific results of the thesis are published:

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, vol. 1, no. 1, August 2014 - P.294-306.

2. Klymash M. Channel Selection Algorithms Performance Evaluation Model for Spectrum Decision in Cognitive Radio / M. Klymash, M. Kyryk, V. Yanyshyn // Radioelectronics and telecommunications. The Herald of Lviv Polytechnic National Univeristy – Lviv, 2017– №874 – P. 87-94.

3. Kyryk M. Spectrum Mobility Techniques Performance Evaluation Model for Cognitive Radio / M. Kyryk, V. Yanyshyn, M. Pitsyk // Radioelectronics and telecommunications. The Herald of Lviv Polytechnic National Univeristy – Lviv, 2016. – №849 – P. 194-202.

4. Kyryk M. Power Spectral Density Evaluation Model Based on Welch's Periodogram for Cognitive Radio / M. Kyryk, V. Yanyshyn, R. Kolodiy // Radioelectronics and telecommunications. The Herald of Lviv Polytechnic National Univeristy – Lviv, 2015. – №818 – P. 86-93.

5. Kyryk M. Effective Capacity Evaluation Model for Cognitive Radio Networks Using OFDM / M. Kyryk, V. Yanyshyn, B. Strykhalyuk // Radioelectronics and telecommunications. The Herald of Lviv Polytechnic National Univeristy – Lviv, 2014. – №796 – P. 104-112.

Proceedings that certify an improvement of thesis materials:

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. Havronskyi // 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. Kyryk M. Research of the Cognitive Radio Networks Cooperative Spectrum Sensing Efficiency / M. Kyryk, V. Yanyshyn // Proceedings of Scientific and Practical Conference "Modern Telecommunication Problems and Training of

Specialists in the Field of Telecommunications - SPTEL-2014", October 30 - November 2, 2014 p., Lviv. – P.153-154.

13. Yanyshyn V. The Spectrum Sensing Efficiency Research in Cognitive Radio Networks / V. Yanyshyn. // First International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications. Science and Technology» October 9 - 11, 2013, Kharkiv. - P.185-187.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	18
ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ СИСТЕМ КОГНІТИВНОГО РАДІО	26
1.1. Технологія когнітивного радіо	29
1.2. Міжнародна стандартизація когнітивного радіо	36
1.3. Мережева архітектура когнітивного радіо	38
1.3.1. Мережеві компоненти	42
1.3.2. Гетерогенність радіочастотного спектру	42
1.3.3. Гетерогенність мережі.....	45
1.3.4. Міжрівнева взаємодія в когнітивних радіомережах.....	47
1.4. Висновки до 1-го розділу.....	50
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ РАДІОЧАСТОТНИМ СПЕКТРОМ В КОГНІТИВНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ	51
2.1. Порівняльний аналіз методів сканування радіочастотного спектру	53
2.1.1. Метод виявлення енергії сигналу первинного користувача.....	61
2.1.2. Метод виявлення енергії на основі періодограми	64
2.1.3. Основні проблеми методів сканування спектру	66
2.2. Процес вибору радіочастотного спектру	67
2.2.1. Характеристика радіочастотного каналу у когнітивній радіомережі	68
2.2.2. Процедура прийняття рішень	68
2.2.3. Методи вибору смуг спектру.....	70
2.2.4. Основні проблеми методів вибору смуг спектру	73
2.3. Спільне використання радіочастотного спектру.....	74
2.3.1. Класифікація спільного використання спектру	74

	16
2.3.2. Основні проблеми спільного використання спектру	77
2.4. Методи забезпечення мобільності спектру.....	78
2.4.1. Критерії і методика передавання смуг спектру для обслуговування користувачів.....	79
2.4.2. Основні проблеми забезпечення мобільності спектру.....	82
2.5. Висновки до 2-го розділу.....	83

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КОГНІТИВНОЮ РАДІОМЕРЕЖЕЮ

3.1. Принципи побудови когнітивної радіомережі на основі OFDM.....	84
3.2. Імітаційна модель когнітивної радіо системи для оцінки пропускну здатності.	88
3.3. Імітаційна модель процесу виявлення енергії сигналу на основі оцінки спектральної густини потужності	98
3.4. Імітаційна модель процесу оцінки ефективності методів вибору радіочастотного спектру	102
3.5. Алгоритм проактивного передавання смуг спектру для обслуговування первинних користувачів.....	106
3.6. Висновки до 3-ого розділу.....	109

РОЗДІЛ 4. ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РАДІОЧАСТОТНОГО СПЕКТРУ В КОГНІТИВНИХ МЕРЕЖАХ.....

4.1. Дослідження ефективності сканування спектру	111
4.2. Моделювання ймовірнісних характеристик приймача з використанням періодограми Уелча.....	116
4.3. Дослідження ефективності алгоритмів вибору каналів з балансуванням навантаження	122
4.4. Оцінювання ефективності методів передавання смуг спектру для обслуговування користувачів.....	124

4.5. Дослідження середньої сумарної пропускної спроможності імітаційної моделі системи керування когнітивною радіомережею	126
4.6. Висновки до 4-го розділу.....	128
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ	130
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	133
ДОДАТОК А. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	146
ДОДАТОК Б. Модель програмного комплексу системи керування використанням спектру когнітивного радіо	149
ДОДАТОК В. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	156

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АКХ – Автокореляційна характеристика;
- ЗКУ – Загальний канал управління;
- КР – Когнітивне радіо;
- СКФ – Спектральна кореляційна функція;
- С/Ш – Відношення сигнал-шум;
- ШПФ – Швидке перетворення Фурє;
- CR – Cognitive Radio – Когнітивне радіо;
- CRS – Cognitive Radio System – Когнітивне радіо система;
- CRN – Cognitive Radio Network – Когнітивне радіо мережа;
- CRU – Cognitive Radio User – Когнітивний радіо користувач;
- FCC – Federal Communications Commission – Федеральна комісія зі зв'язку США;
- ITU – International Telecommunications Union – Міжнародний союз електрозв'язку;
- MOS – Mean Opinion Score – Середня суб'єктивна оцінка;
- OODA – Observe, Orient, Decide, Act – цикл Спостереження, Орієнтація, Рішення, Дія;
- PU – Primary user – Первинний, ліцензійний користувач;
- QoS – Quality of service – Якість обслуговування, якість надання послуг, якість сервісу;
- QoE – Quality of Experience – Якість сприйняття послуг;
- SDR – Software-defined radio – Система і (або) пристрій радіозв'язку з програмованими параметрами;
- SU – Secondary user – Вторинний, неліцензійний користувач;
- WSD – White Space Devices.

ВСТУП

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 вирішити такі задачі:

- 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. Під час розв'язання поставлених завдань у роботі використовувалися методи теорії інформації (для дослідження процесу управління використанням радіочастотного спектру), математичної статистики (для дослідження методів забезпечення мобільності спектру), теорії систем масового обслуговування (для оцінювання ефективності методів вибору смуг спектру), теорії ймовірностей (для дослідження методів сканування спектру), математичного та комп'ютерного моделювання (для оцінювання ефективності методів управління використанням радіочастотного спектру).

Наукова новизна отриманих результатів:

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 помилкового рішення 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

пропускної 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.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ СИСТЕМ КОГНІТИВНОГО РАДІО

Існує зростаючий попит на використання радіочастотного діапазону спектру, незважаючи на те, що більшість ділянок вже зайнято. 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 [37,81].

Отже, для вирішення цих проблем, нещодавно були запропоновані динамічні методи доступу до спектру, що дозволяють використовувати вільні частини спектру в моменти їх простою. Перешкоди від одночасного використання в одному діапазоні частот декількох передавачів можуть привести до значних спотворень переданої інформації і значно ускладнити роботу телекомунікаційних систем різного призначення. Одне з можливих рішень цієї проблеми є впровадження систем когнітивного радіо (КР) [80]. Системи, що побудовані по принципах когнітивного радіо використовують

на вторинній основі не зайняті в даний час частини спектру (так звані "мертві зони" спектру) або враховують особливості сигналу від первинної мережі для співпраці з нею. Крім того, основним критерієм для таких систем є відсутність перешкод для первинної мережі.

Підхід до побудови системи когнітивного радіо, яку ще називають смарт-радіо, є передовою технологією для забезпечення ефективного використання радіочастотного спектру. Відмінними рисами когнітивного радіо є здатність усіх прийомо-передавачів адаптивно приймати і передавати сигнал при зміні радіочастот, а також при зміні типу модуляції, типу кодування та інших параметрів системи [14, 76, 82] .

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

Когнітивне радіо являє собою розумну радіо систему з механізмом самоврядування, що може динамічно та автономно змінювати свої робочі параметри базуючись на взаємодії з навколишнім середовищем, в якому система працює. Механізм самоврядування визначається вміннями самонавчання і штучного інтелекту.

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

Система когнітивного радіо включає наступні особливості [1]:

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



Рис.1.1. Загальні властивості когнітивного радіо.

При взаємодії з системою радіозв'язку для когнітивної системи найбільш важливими критеріями є налаштування прийомо-передавачів (тип модуляції, параметри модуляції, діапазон частот, і т.д) і аналіз результатів вимірювань.

Отже, щоб вирішити ці завдання, кожен користувач когнітивної мережі повинен [14]:

- Визначити доступні частини спектру
- Серед них вибрати найкращий частотний канал

- Надати доступ до цього каналу когнітивним користувачам
- Коли виявлено ліцензованого користувача – звільнити канал

Саме функції управління використанням спектру можуть реалізувати ці властивості. Ці функції можна звести до чотирьох основних завдань: сканування спектру, вибір спектру, спільне використання спектру і мобільність спектру.



Рис.1.2. Основні завдання когнітивного радіо.

1.1. Технологія когнітивного радіо

Когнітивне радіо (КР) – це радіо система, яка відчуває та усвідомлює всі зміни в її робочому середовищі і може, відповідно до них, динамічно та автономно коригувати свої робочі радіопараметри.

В основі когнітивної радіо мережі повинна забезпечуватися висока пропускна здатність для мобільних користувачів, за допомогою гетерогенної архітектури бездротової мережі і методів динамічного доступу до спектру. Ця ціль може бути реалізована тільки за допомогою ефективних динамічних

методів управління використання спектру. Тому, когнітивні радіо мережі створюють унікальні проблеми через часті швидкі зміни в доступності спектру, а також потребі забезпечити різноманітні вимоги щодо якості обслуговування (QoS) різних додатків.

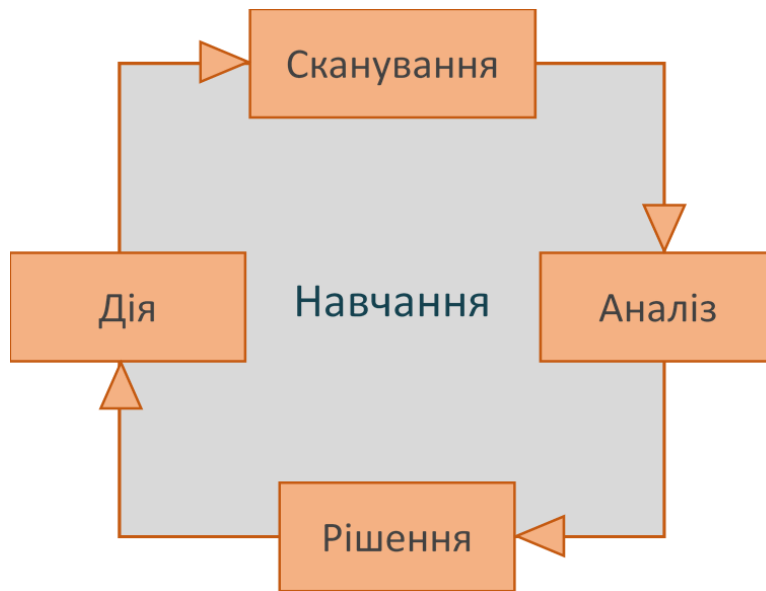


Рис.1.3. Цикл роботи когнітивного радіо.

Технологія когнітивного радіо являє собою набір ключових перспективних методів і технік, які забезпечують можливість спільного використання спектру певним чином. Формально, когнітивне радіо визначається як радіо, яке може змінити параметри передавача, базуючись на взаємодії з навколишнім середовищем [37]. З цього можна визначити дві основні характеристики когнітивного радіо [1]:

- *Когнітивність*: ідентифікація ділянок спектру, які в певний час та в певному місці не використовуються, проводиться через взаємодію в реальному часі з навколишнім радіо середовищем. Як показано на рис.1.4, когнітивність дозволяє використовувати тимчасово незайняті смуги спектру, які називають «спектральні діри» або «мертві зони». Отже, так може бути обрана найкраща смуга спектру, для спільного використання з іншими

користувачами, і експлуатування без втручання в роботу ліцензованих користувачів.

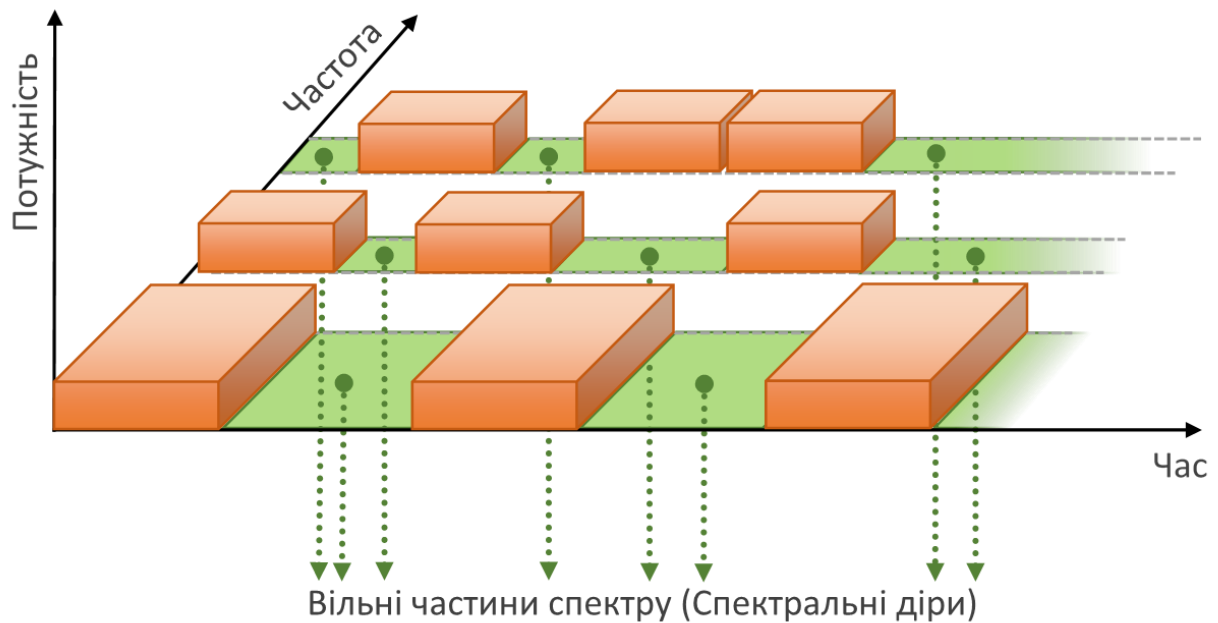


Рис 1.4. Концепція вибору вільних частин спектру.

- *Реконфігурація*: когнітивне радіо може бути запрограмоване для передачі і прийому на різних смугах частот, а також для використання різних технологій доступу за підтримки свого апаратного забезпечення [4]. Завдяки цій характеристиці, можуть бути вибрані найбільш придатні робочі параметри і найкращі частини спектру.

Для того, щоб забезпечити ці можливості, когнітивне радіо потребує нову архітектуру радіочастотного приймача. Основними компонентами прийомо-передавача когнітивного радіо є радіочастотний інтерфейс і блок обробки основної смуги частот, які вже були запропоновані для радіо з програмованими параметрами (SDR), як показано на рис.1.5 [55].

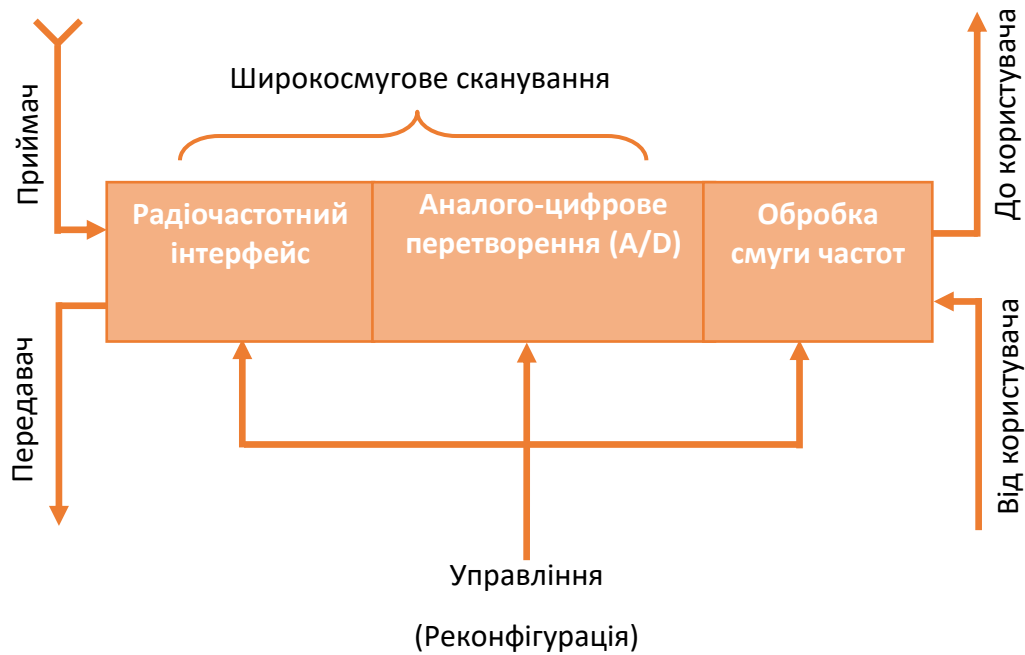


Рис 1.5. Архітектура когнітивного радіо прийомо-передавача.

У радіочастотному інтерфейсі прийманий сигнал посилюється, змішується і проходить аналого-цифрове (A/D) перетворення. У блоці обробки основної смуги частот, сигнал модулюється або демодулюється. Кожен компонент може бути налаштований шиною керування для адаптації до мінливого в часі радіочастотного середовища. Новітньою характеристикою когнітивного прийомо-передавача є широкопсмуговий радіочастотний інтерфейс, який здатний здійснювати одночасне сканування в широкому діапазоні частот. Ця функція пов'язана, головним чином, з радіочастотними апаратними технологіями, такими, як широкопсмугова антена, підсилювач потужності, адаптивний фільтр. Радіочастотні апаратні засоби для КР повинні налаштовуватися на будь-яку частину з великого діапазону спектру. Однак, так як приймач КР отримує сигнали від різних передавачів, що працюють на різних рівнях потужності, частотних смугах і розташуваннях, радіочастотний інтерфейс повинен мати можливість виявити слабкий сигнал у широкому динамічному діапазоні, що є основною проблемою в дизайні прийомо-передавача КР [56].

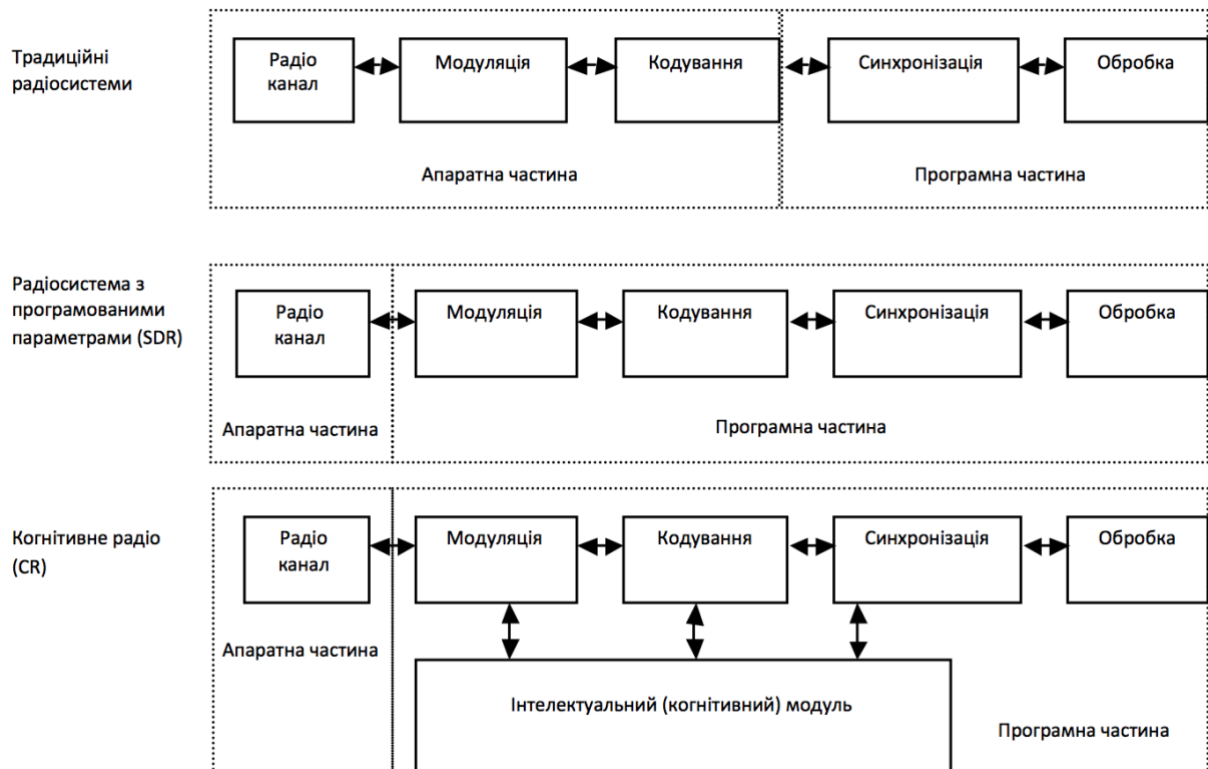


Рис.1.6. Порівняння традиційних радіосистем, радіосистем з програмованими параметрами (SDR) і когнітивного радіо (CR).

Як видно з рис.1.6., радіосистема КР, як і SDR, має програмно-конфігуративну платформу. Відмінною особливістю КР є наявність інтелектуального (когнітивного) модуля.

Властивість когнітивності (тобто здатності до пізнання і самонавчання), по відношенню до радіосистеми, означає її здатність вирішувати такі завдання:

- 1) проводити моніторинг спектру і виявляти частотні смуги, які в даний момент часу не використовуються;
- 2) аналізувати параметри радіоканалу, оцінювати передану по каналу інформацію, прогнозувати стан радіоканалу;
- 3) контролювати рівень потужності випромінювання і управляти процесом динамічного доступу до спектру.

Для виконання цих функцій апаратно, КР повинне мати в своєму складі елементи, які забезпечують формування і обробку радіосигналів (радіоплатформу з можливістю реконфігурації):

- елемент, який здійснює нагляд за радіочастотним спектром (моніторинг спектру);
- елемент, який здійснює аналіз результатів спостережень і навчання системи (когнітивний або інтелектуальний модуль);
- елемент, який забезпечує нормативну керованість системи (відповідно до діючих цілей, правил і політики управління спектром);
- елемент, який накопичує знання і отримані відомості (база даних)

Структурна схема КР, яка виконує ці функції, наведена на рис.1.7.

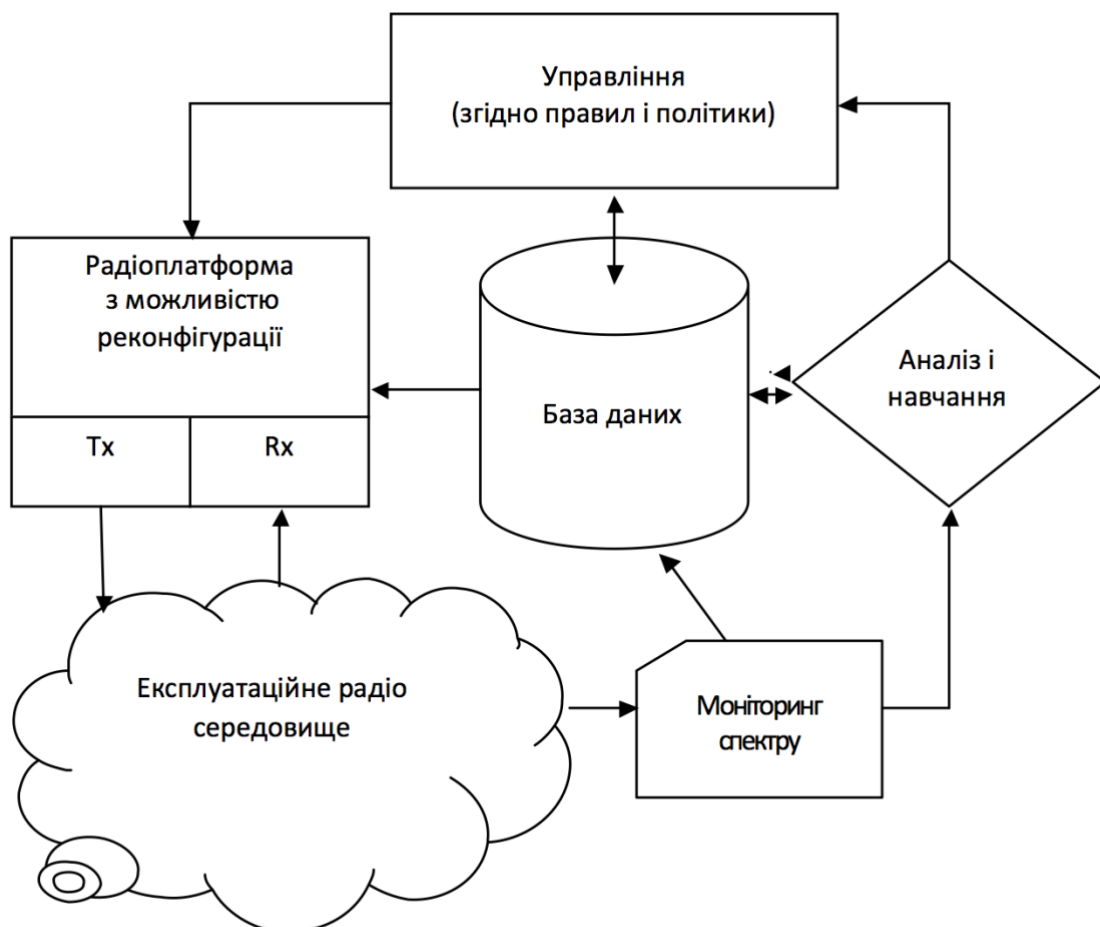


Рис.1.7. Функціональна структурна схема КР.

З метою структурно-логічного опису принципів функціонування системи КР, використовується поняття «цикли пізнання». Такий цикл може бути представлений у вигляді кібернетичної моделі OODA (Observe - спостерігай, Orient - орієнтуйся, Decide - вирішуй, Act - дій) [3]. Зазначена модель передбачає багаторазове повторення циклу дій, яка сформована чотирма послідовними взаємодіючими процесами: спостереження, орієнтацією, рішенням, дією управління. Фактично, цикл має розвиток ситуації по спіралі, і на кожному етапі цієї спіралі здійснюється взаємодія з експлуатаційним середовищем.

Спостереження – це процес збору інформації, необхідної для прийняття рішення в кожному конкретному випадку. Необхідна інформація може бути отримана як від зовнішніх, так і від внутрішніх джерел. Під внутрішніми джерелами інформації розуміються елементи зворотного зв'язку циклу. В якості зовнішніх джерел використовуються датчики (сенсори) КР та інші канали отримання інформації.

Орієнтація – найбільш відповідальний і найбільш складний, з когнітивної точки зору, етап у всьому циклі OODA. Етап орієнтації складається з двох під етапів: аналіз і синтез. Аналіз допускає розбиття ситуації на дрібні елементарні частини, які більш легкі для розуміння. Керуючі пристрої, що приймають рішення, прагнуть провести декомпозицію задачі до такого рівня, при якому новоутворені складові завдання стають близькими до стандартних ситуацій, для яких в системі вже є план вирішення. Ознайомлення з цими елементарними завданнями досягається шляхом навчання та накопичення досвіду. Таке ознайомлення можливо тільки на основі заздалегідь розроблених правил і політик управління спектром, а також планів використання спектру. Когнітивний модуль просто ідентифікує поточну ситуацію з іншими подіями, з якими він знайомий, і застосовує заздалегідь заготовлений план дій для поточної ситуації. Потім ці елементарні плани об'єднуються в загальний план дій, який і відповідає під

етапу синтезу. Вироблений план запам'ятовується з метою можливого подальшого використання. Якщо немає планів, з числа яких може бути вибрано рішення, то процес залишається на етапі орієнтації і здійснюється подальша декомпозиція задачі.

Ухвалення рішення – третій етап циклу OODA. Якщо до цього етапу було сформовано тільки один план, то просто приймається рішення - виконувати цей план, чи ні. Якщо ж є сформовані декілька альтернативних варіантів дій, то пристрій, на даному етапі, здійснює вибір найкращого з них для подальшої реалізації. Вибір найкращого плану може здійснюватися певним критерієм або групою критеріїв, наприклад, за критерієм ефективність.

Дія управління – заключний етап циклу, який передбачає практичну реалізацію прийнятого рішення. Дія передбачає управління системою з метою поліпшення результатів спостереження в наступному циклі.

1.2. Міжнародна стандартизація когнітивного радіо

На міжнародному рівні питання про впровадження когнітивних радіосистем було включено до порядку денного Всесвітньої конференції радіозв'язку 2012 року. У 2007-2011 рр. дослідні комісії і робочі групи ITU-R проводили дослідження, спрямовані на визначення потреб у регулюванні використання радіочастотного спектру когнітивними системами. В рамках цих досліджень вивчалися питання забезпечення електромагнітної сумісності при впровадженні когнітивних систем, а також сценарії впровадження та технічні характеристики когнітивних систем.

В даний час існують та розробляються такі нормативні документи:

- *Стандарт IEEE 802.11af*. Початок розробки – січень 2010 р. Основна мета – адаптація сімейства стандартів IEEE 802.11 до роботи на телевізійних смугах частот.

Міжнародна стандартизація когнітивного радіо.

Характеристика	ECMA-392	IEEE 802.22	IEEE 802.11af	IEEE 802.16h
Будова мережі				
Дальність зв'язку	до 2 км	17-33 км	100 м; 5 км	17-33 км
Коміркова структура	-	-	-	+
Mesh структура	+	-	+	-
Мобільність	+	-	-	+
Естафетна передача	-	-	-	+
Канал передачі і доступу				
Ширина каналу	6,7,8 МГц	6,7,8 МГц	5,10,20,40 МГц	1.5-20 МГц
Об'єднання каналів	-	-	+	+
Модуляція	OFDM	OFDM	OFDM	OFDM
Пропускна здатність	31.56 Мбіт/с	23 Мбіт/с	10-100 Мбіт/с	80 Мбіт/с
Метод доступу	CSMA/CS, TDMA	OFDMA	CSMA/CS, TDMA	TDMA, OFDMA
Когнітивні функції				
Контроль зайнятості спектру	+	+	-	+
Інтерфейс з базою даних	+	+	+	-

Стандарт IEEE 802.11af – оцінюється як найбільш перспективний, оскільки в його розробці беруть активну участь виробники апаратного обладнання. Як очікується, сертифікація пристроїв, за даним стандартом, почнеться вже в поточному році.

При цьому, питання роботи даних пристроїв з базою даних, для реалізації механізму геолокації, знаходяться поза рамками стандарту. Розглядаються два можливих варіанти використання пристроїв даного стандарту:

- всередині приміщення, з дальністю менше 100 м (аналогічно існуючим WLAN);
- поза приміщеннями, з дальністю роботи не більше 5 км.
- *Стандарт IEEE 802.16h.* Спочатку націлений на адаптацію стандарту IEEE 802.16 до смуги частот 3650-3700 МГц, цей стандарт в даний час адаптується і до телевізійних смуг частот.
- *Стандарт IEEE 802.22.* Заснований на стандарті IEEE 802.16d (фіксований WiMAX) та спрямований на реалізацію правил, встановлених Федеральним агентством по зв'язку (Federal Communications Commission, FCC) для когнітивних систем в смугах частот телебачення (передбачає прослуховування ефіру, механізм геолокації для отримання доступних частотних каналів і, відповідно, динамічний вибір робочого частотного каналу та зміни потужності випромінювання). Слід зазначити, що багато експертів не очікують швидкої появи на ринку обладнання даного стандарту [95,101].
- *ECMA-392.* Стандарт для персональних та портативних пристроїв, що функціонують в «білих плямах» частотно-територіального ресурсу (White Space Devices, WSD). Описує фізичний рівень (PHY) і рівень MAC, включаючи протокол обміну і механізми забезпечення сумісності. Обладнання на базі даного стандарту може незабаром з'явитися на ринку, однак при цьому не можна не сказати, що ECMA-392 є закритим стандартом, а значить, число виробників обладнання буде обмежено.

Ведуться розробки (поки, щоправда, на початковій стадії) також інших стандартів. В даний час створена велика кількість прототипів WSD-пристроїв в смугах частот телебачення, які мають різні характеристики.

1.3. Мережева архітектура когнітивного радіо

Загальний опис архітектури когнітивних радіомереж є найважливішою передумовою розвитку комунікаційних протоколів, які направлені на

вирішення задач динамічного доступу до спектру. Основні компоненти архітектури когнітивної радіо мережі можна класифікувати на групи: основну (первинну, ліцензовану) мережу та другорядну (вторинну, неліцензовану) мережу, якою є когнітивне радіо. Первинні мережі – це існуючі мережі, де первинні користувачі мають ліцензії для роботи в певному діапазоні спектру. Діяльністю первинних користувачів керують первинні базові станції. Завдяки своїм пріоритетом у доступі до спектру, операції первинних користувачів не повинні бути порушені неліцензійними користувачами.

Архітектуру мереж когнітивного радіо можна розділити на наступні типи: архітектура типу інфраструктура, самоорганізована архітектура (ad-hoc) і архітектура типу mesh.

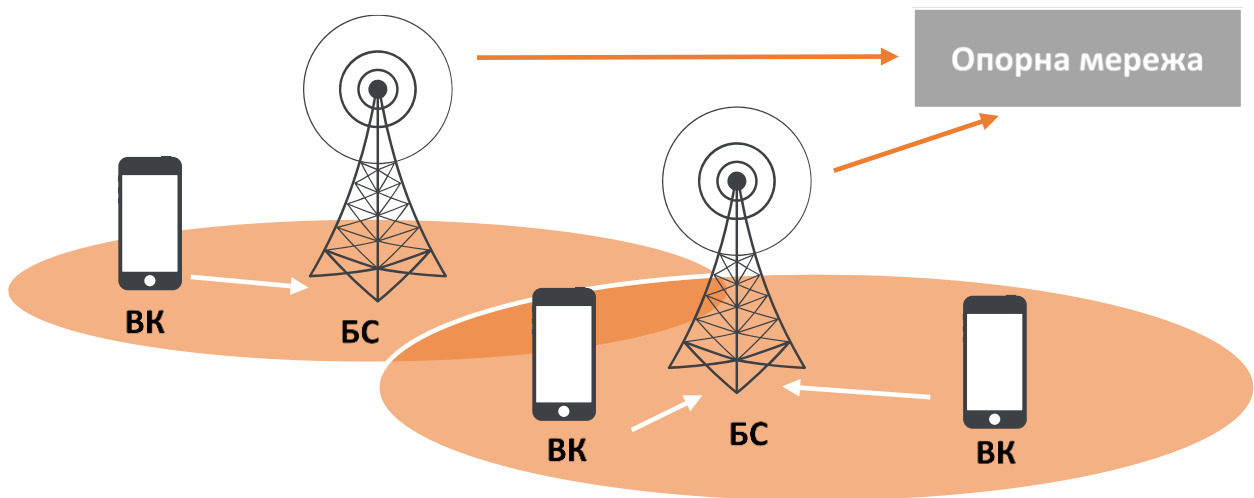


Рис. 1.8. Архітектура когнітивної мережі типу інфраструктура.

Архітектура типу інфраструктура. В цій архітектурі (рис. 1.8), кожен користувач може отримати тільки прямий доступ до базової станції відповідної комірки. Користувачі, що здійснюють передачу через певну базову станцію, повинні спілкуватися один з одним через ту ж базову станцію. А от зв'язок між різними комірками проходить через ядро мережі.

Базова станція може підтримувати один або кілька стандартів зв'язку (протоколів) для виконання різних вимог від користувачів. Термінал когнітивного радіо може також отримати доступ до інших видів систем зв'язку тільки через базову станцію.

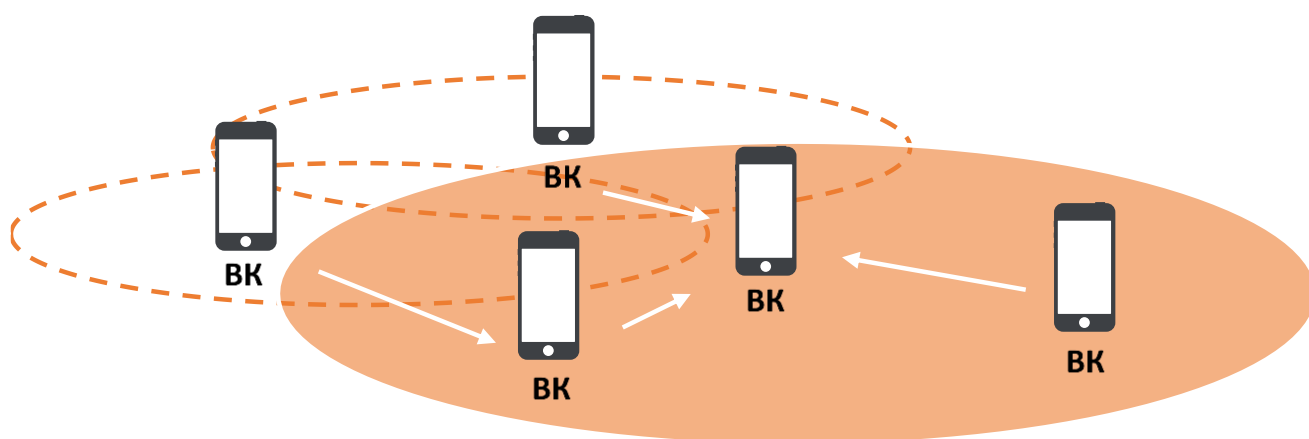


Рис. 1.9. Архітектура Ad-hoc когнітивної мережі.

Архітектура Ad-hoc (самоорганізована). В даному типі архітектури немає інфраструктурної підтримки (рис. 1.9), мережа є самоорганізованою. Такий режим роботи мережі ще називають "точка-точка". Якщо один користувач виявляє, що поруч є інші користувачі, то вони можуть з'єднатися через певні стандарти зв'язку (протоколи) і створити між собою канал зв'язку, тобто термінали користувачів безпосередньо взаємодіють один з одним. Можна відзначити, що ці канали між вузлами можуть бути створені різними комунікаційними технологіями. Крім того, два термінали когнітивного радіо можуть взаємодіяти один з одним за допомогою існуючих комунікаційних протоколів (наприклад, WiFi, Bluetooth) або динамічно, використовуючи "дірки в спектрі". Плюсом такої архітектури є те, що потрібен мінімум додаткового обладнання: кожна станція повинна бути оснащена безпроводним адаптером. Така архітектура добре підходить для створення тимчасової мережі.

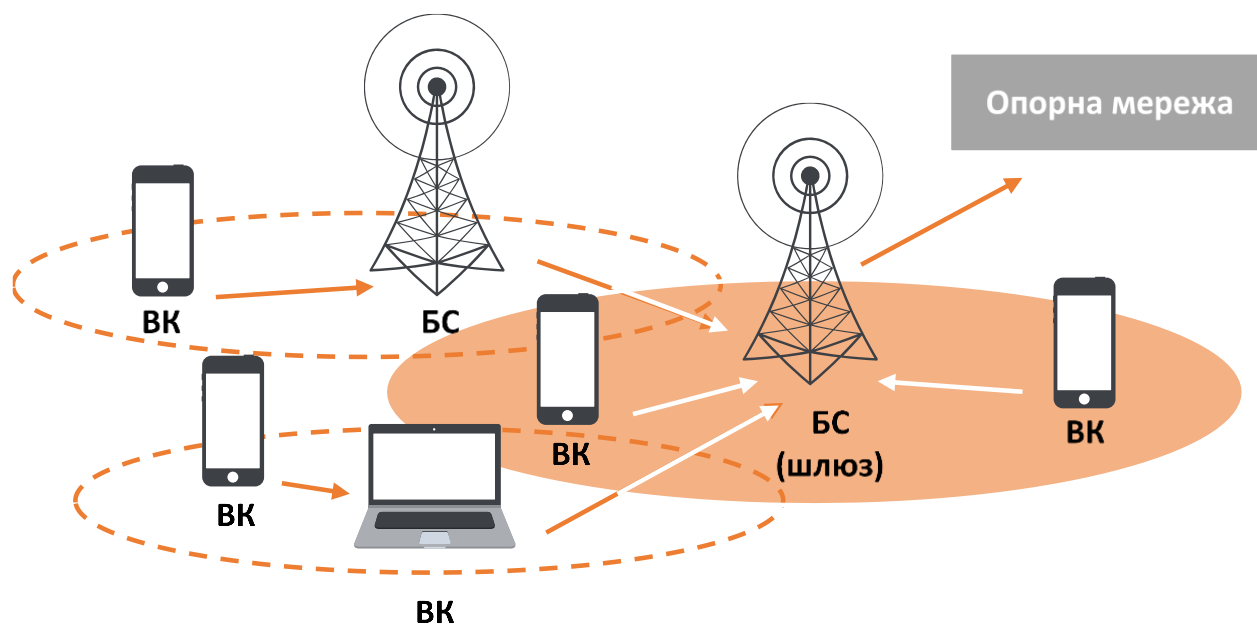


Рис. 1.10. Mesh архітектура когнітивної мережі.

Mesh архітектура. Вона являє собою поєднання інфраструктурної та ad-hoc архітектури, а також дозволяє здійснювати безпроводні з'єднання між базовими станціями (рис. 1.10). Ця мережева архітектура схожа на архітектуру гібридних безпроводних Mesh-мереж. У цій архітектурі, базові станції працюють в якості маршрутизаторів безпроводної мережі і формують безпроводну опорну мережу. Користувачі можуть отримати або прямий доступ до базової станції, або використовувати інші термінали користувачів, як проміжні вузли зв'язку. Деякі базові станції можуть підключатися до опорної мережі і працювати в якості шлюзів. Оскільки базові станції можуть бути розгорнуті без необхідності підключення до провідної опорної мережі, ця архітектура гнучкіша і дешевша при плануванні місця розташування базових станцій. Якщо базові станції володіють можливостями когнітивного радіо, вони можуть використовувати "дірки" в спектрі для зв'язку один з одним.

Також така децентралізована архітектура мережі дає високий ступінь надійності. Mesh-мережі будуються, як сукупність кластерів. Територія покриття розділяється на зони, число яких теоретично не обмежене.

Особливістю Mesh-мереж є використання спеціальних протоколів, що дозволяють кожній точці доступу створювати таблиці абонентів мережі, з контролем стану транспортного каналу і підтримкою динамічної маршрутизації трафіку за оптимальним маршрутом між сусідніми точками. При відмові будь-якого з вузлів, відбувається автоматичне перенаправлення трафіку за іншим маршрутом, що гарантує не просто доставку трафіку адресату, а доставку за мінімальний час. Процедура розширення мережі обмежується встановленням нових вузлів, інтеграція яких в існуючу мережу відбувається автоматично. Недолік подібних мереж полягає в тому, що вони використовують проміжні пункти для передачі даних; це може викликати затримку при пересиланні інформації і, як наслідок, знизити якість трафіку реального часу.

1.3.1. Мережеві компоненти

Когнітивні радіо мережі (також названі, як динамічні мережі доступу до спектру, вторинні мережі або неліцензійні мережі) не мають ліцензії на роботу в бажаному діапазоні. Отже, потрібні додаткові функціональні можливості, щоб отримати доступ до ліцензованих діапазонів спектру для користувачів когнітивного радіо.

Когнітивні радіо мережі також можуть бути оснащені базовими станціями КР, які забезпечують з'єднання користувачів когнітивного радіо. Також, когнітивні радіо мережі можуть включати в себе посередників спектру, які відіграють важливу роль у розподілі ресурсів спектру між різними мережами когнітивного радіо [54].

1.3.2. Гетерогенність радіочастотного спектру

Користувачі КР можуть звертатися як до ліцензійних частин спектру, що використовуються первинними користувачами, так і до неліцензійних

частин спектру, через технології широкосмугового доступу. Отже, в мережах КР, робочі частини спектру можуть бути класифіковані як ліцензійні робочі смуги і неліцензійні робочі групи.

- Ліцензійні робочі смуги: переважно використовується первинними мережами. В цьому випадку, основним завданням для КР мережі є зосередження на виявленні первинних користувачів. Пропускна здатність каналу залежить від перешкод сусідніх первинних користувачів. Крім того, якщо в смузі спектру, зайнятої користувачами КР, з'являються первинні користувачі, то користувачі КР мають негайно звільнити цю смугу спектру і перейти до іншої частини доступного спектру.

- Неліцензовані робочі смуги: за відсутності первинних користувачів, користувачі КР мають однакові права на доступ до спектру. Таким чином, для користувачів КР необхідно поборотися за неліцензійні групи певними методами розподілу спектру.

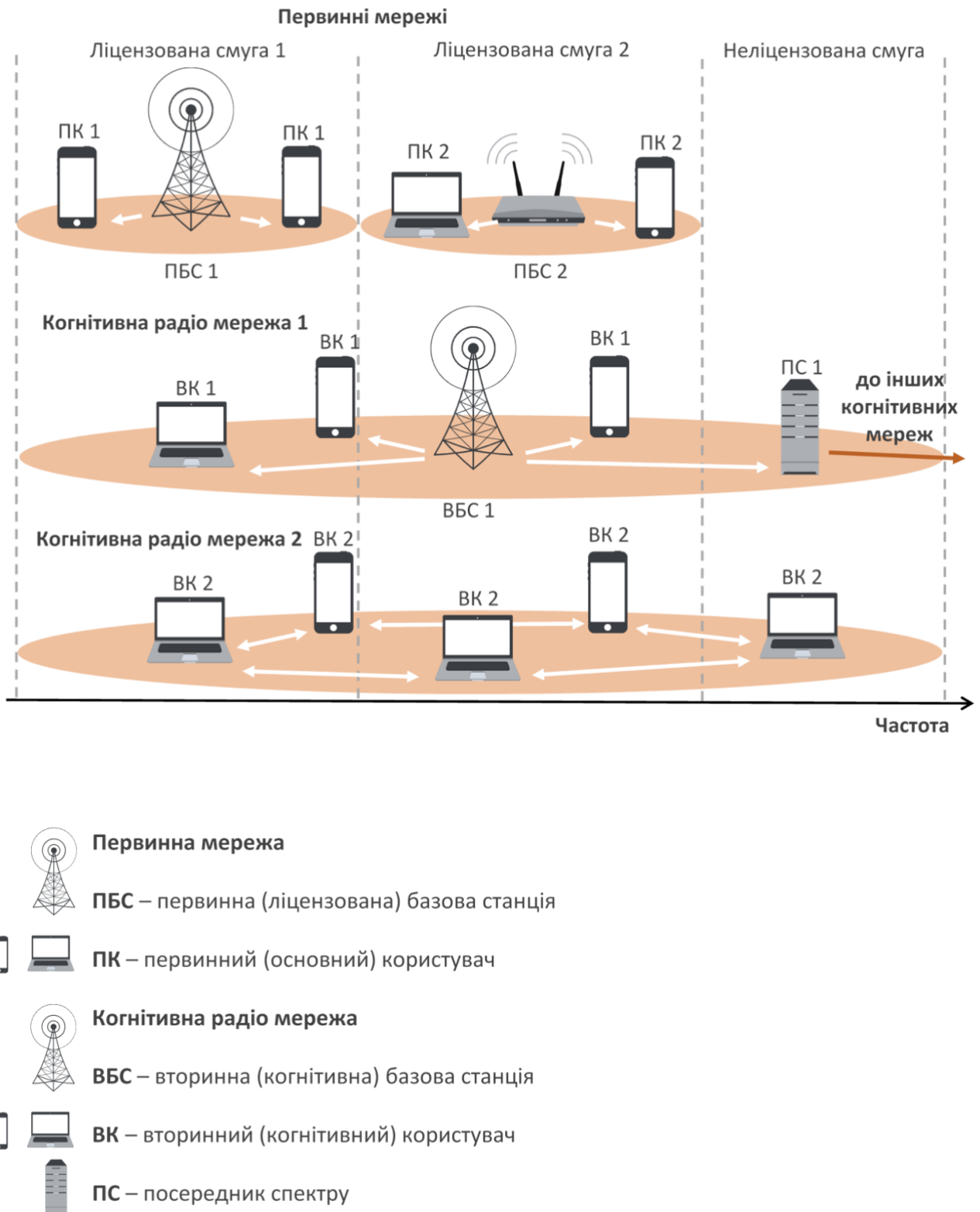


Рис. 1.11. Архітектура когнітивної мережі

1.3.3. Гетерогенність мережі

Як показано на рис. 1.11, користувачі КР мають можливість виконати три різних види доступу:

- *Доступ до КР мережі*: КР користувачі можуть отримати доступ до власної базової станції, на обох ліцензійних і неліцензійних смугах спектру. Політика спільного використання спектру може бути незалежною від первинної мережі, тому що всі взаємодії відбуваються тільки всередині мережі КР.

- *Спеціальний доступ (ad hoc)*: користувачі КР можуть спілкуватися з іншими користувачами через спеціальний (ad hoc) зв'язок КР в обидвох ліцензійних і неліцензійних смугах спектру.

- *Первинний доступ до мережі*: користувачі КР можуть також отримати доступ до первинної базової станції через ліцензовані смуги. На відміну від інших типів доступу, користувачі КР вимагають адаптивного управління доступом до середовища (за допомогою протоколу MAC), що дозволяє налаштовуватися на різні первинні мережі з різними технологіями доступу.

У відповідності з архітектурою КР, показаною на рис. 1.11, необхідні різні функціональні можливості для підтримки управління використанням спектру в мережах КР. Структура управління використанням спектра для зв'язку КР мережі показана на рис. 1.12. Як видно із значного числа взаємодій, що функції управління використанням спектра вимагають міжрівневого підходу до проектування [83].

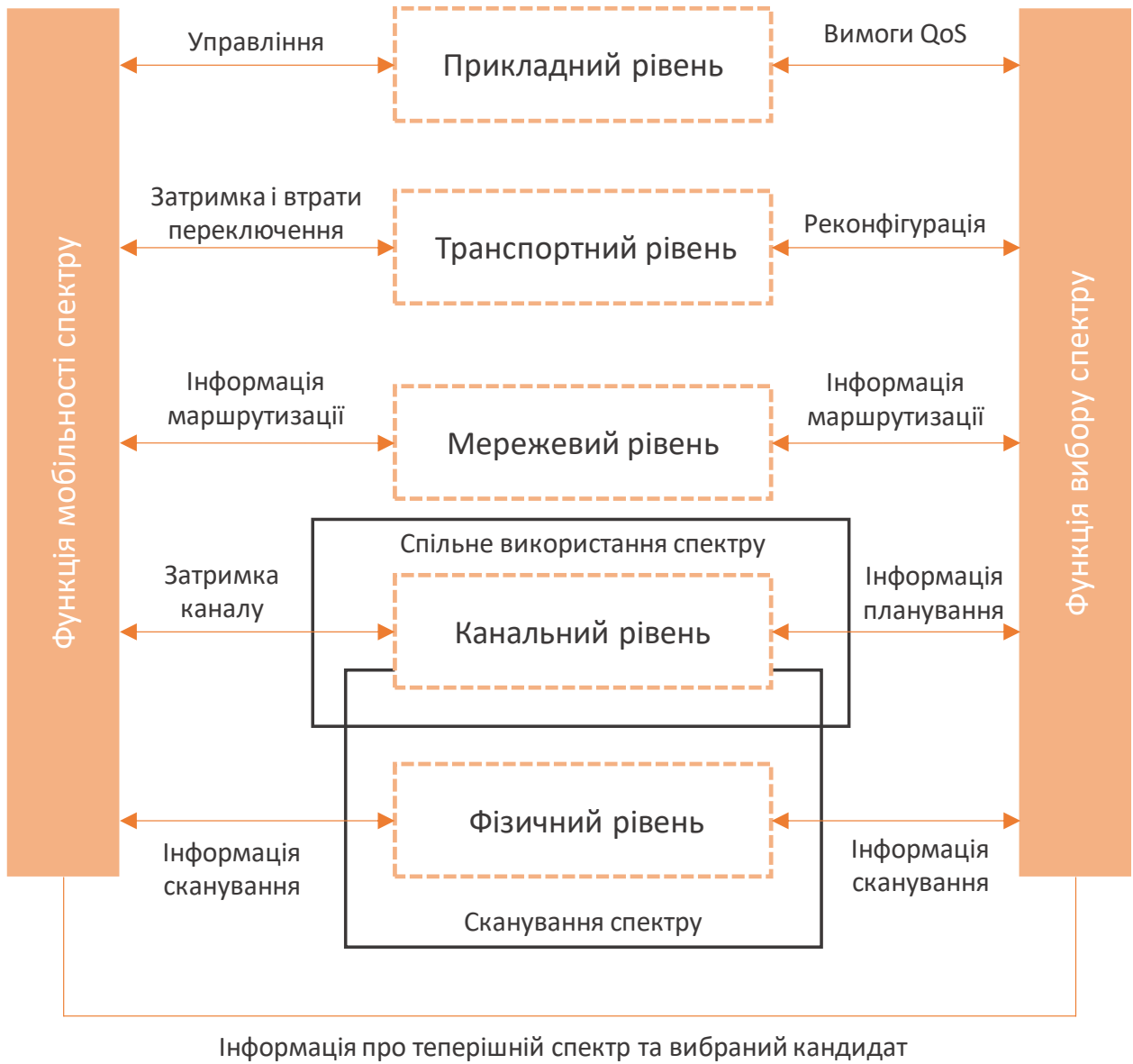


Рис 1.12. Управління використання радіочастотного спектру для мереж когнітивного радіо.

1.3.4. Міжрівнева взаємодія в когнітивних радіомережах

Сучасні системи зв'язку розробляються на базі моделі OSI (відкритих систем). Кожен з рівнів розробляється незалежно і може бути змінений, або розширений без впливу на компоненти інших рівнів. Завдяки відповідним інтерфейсам, на кожному з рівнів, обладнання різних виробників може взаємодіяти одне з одним.

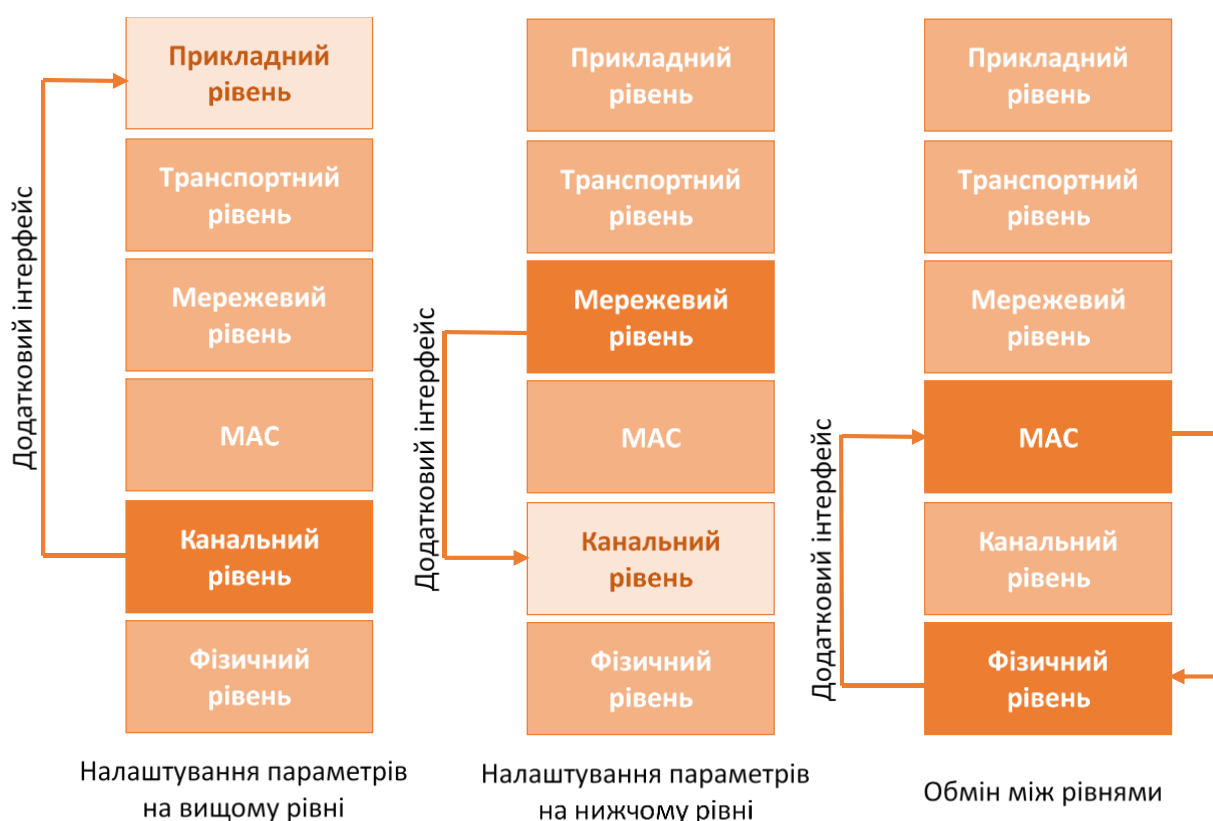


Рис. 1.13. Типи міжрівневої взаємодії.

Однак, всі операції між рівнями виконуються послідовно (від вищого рівня до нижчого). Це веде до витрат в обчисленнях і великих затримок. Через таку ізольованість рівнів, вищий рівень не може отримувати інформацію про нижчий, а значить, взаємодія рівнів обмежена. Розвиток існуючої системи рівнів призвів до створення нових варіантів міжрівневої

взаємодії. Наприклад, резервування функцій одного з рівнів (контроль помилки на фізичному і каналному рівнях). Головною метою системи міжрівневої взаємодії є збільшення інформаційного потоку між рівнями. Приклад такої взаємодії представлений на рис. 1.13.

Взаємодія може здійснюватися як від вищого рівня до нижчого, так і навпаки. Наприклад, інформація про швидкість передачі з каналного рівня може передаватися на прикладний рівень і тим самим змінювати швидкість кодування відеопотоку у відповідній програмі. Якщо швидкість передачі в каналі зменшується, швидкість стиснення відео також зменшується. Рівні можуть бути об'єднані для інтегрування своїх функцій. Наприклад, каналний і транспортний рівні можуть бути об'єднані для спільного забезпечення управління чергами та доступу до каналу. Концепція міжрівневої взаємодії передбачає створення єдиного інтерфейсу для обміну даними і контролем між усіма рівнями. Потрібно пояснити принцип дії когнітивного радіо, використовуючи терміни "вимірювання" і "змінний параметр". Результат вимірювання відображає поточне значення параметру, після чого параметр може бути змінений для отримання нової характеристики.

Таким чином, будь-яка дія являє собою налаштування параметрів пристрою когнітивного радіо для отримання необхідної продуктивності. При проектуванні пристрою когнітивного радіо закладається така кількість змінних параметрів, при яких характеристики пристрою змінювалися б максимально ефективно, для здійснення всіх необхідних функцій.



Рис. 1.14. Міжрівнева взаємодія для систем когнітивного радіо з нечіткою логікою

Зручно розділити керовані параметри за рівнями телекомунікаційної системи. На кожному рівні – свої параметри для зміни. На фізичному рівні: потужність передачі, вид модуляції, частота несучої, ширина смуги частот. На каналному: тип пакету, величина пакету, швидкість передачі, протокол передачі. На мережевому і транспортному рівнях: алгоритм планування мережі, параметри протоколу. На прикладному рівні: тип стиснення або кодування.

Приклад міжрівневої взаємодії наведено на Рис 1.14. [55]. Інформація зібрана когнітивним радіо досить широка і тому радіоінтерфейсу потрібно виділити тільки потрібну інформацію. Для цього можна використовувати алгоритм нечіткої логіки. У такій системі параметри протоколів, на різних рівнях, можуть бути змодельовані як змінні нечіткої логіки, керовані контролером нечіткої логіки.

1.4. Висновки до 1-го розділу

1. Визначено ряд унікальних завдань внаслідок невизначеності потенційно доступного спектру, а також через існування різних вимог до якості обслуговування (QoS), що пред'являються різними додатками. Проведено аналіз, класифікацію і порівняння традиційних радіосистем, радіосистем з програмованими параметрами і систем з використанням технології когнітивного радіо, відмінною особливістю яких є наявність інтелектуального (когнітивного) модуля. Основні властивості технології когнітивного радіо - моніторинг спектру, аналіз і оцінка параметрів радіоканалу, можливість гнучкої і швидкої реконфігурації.

2. Розглянуто функціональна структурна схема та описано цикл роботи когнітивного радіо, який складається з чотирьох етапів: сканування, аналіз, прийняття рішення, дія.

3. Представлено мережеву архітектуру когнітивної радіо мережі та суттєві не вирішені проблеми доступу, основні компоненти якої можна класифікувати на групи: основна (первинна, ліцензована) мережа та другорядна (вторинна, неліцензована) мережа, якою є когнітивне радіо.

4. Проаналізовано проблеми функціональних можливостей і вимоги, які накладаються на когнітивну радіо мережу. Також, в даному розділі описана постановка задачі дослідження, зміст якої полягає в розробленні моделі системи керування когнітивною радіомережею, для дослідження і покращення ефективності управління радіочастотним спектром, із використанням методів динамічного доступу до радіо середовища.

РОЗДІЛ 2.

МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ РАДІОЧАСТОТНИМ СПЕКТРОМ В КОГНІТИВНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ

Когнітивні радіо мережі створюють унікальні проблеми через потребу співпраці з первинними мережами, а також через різні вимоги QoS. Таким чином, потрібні нові функції управління використання спектру для мереж КР, з наступними критичними завданнями проектування:

- Усунення перешкод: КР мережам слід уникати втручання у первинні мережі.

- Обізнаність QoS: КР мережі повинні підтримувати QoS-обізнаний зв'язок, враховуючи динамічність і гетерогенність спектрального середовища, щоб вибрати відповідний діапазон спектру.

- Безшовний зв'язок: КР мережі повинні забезпечити безперебійний зв'язок, незалежно від типу первинних користувачів.

Для вирішення цих завдань, необхідні нові функціональні можливості управління використання спектру в мережах КР. Процес управління використання спектра складається з чотирьох основних етапів:

- Сканування спектру: користувач КР може виділити тільки невикористані частини спектру. Таким чином, користувач КР повинен контролювати доступні частотні діапазони, збирати про них інформацію, а потім виявити в них «мертві зони».

- Вибір спектру: на основі доступності спектру, користувач КР може виділити канал. Цей вибір залежить не тільки від наявності спектру, але також визначається на основі певних внутрішніх (і, у відповідних випадках, зовнішніх) правил.

- Спільне використання спектру: доступ до мережі КР має бути узгоджений, щоб запобігти колізії повідомлень декількох користувачів в частинах спектру, які перекриваються, оскільки можуть виникати ситуації

коли декілька користувачів КР намагаються отримати доступ до одного діапазону спектру.

- Мобільність спектру: користувачі КР не повинні перешкоджати роботі первинної мережі. Таким чином, якщо первинним користувачем планується використання конкретної ділянки спектру, то повідомлення користувача КР повинно бути призупинено і продовжено в іншій вільній частині спектру.

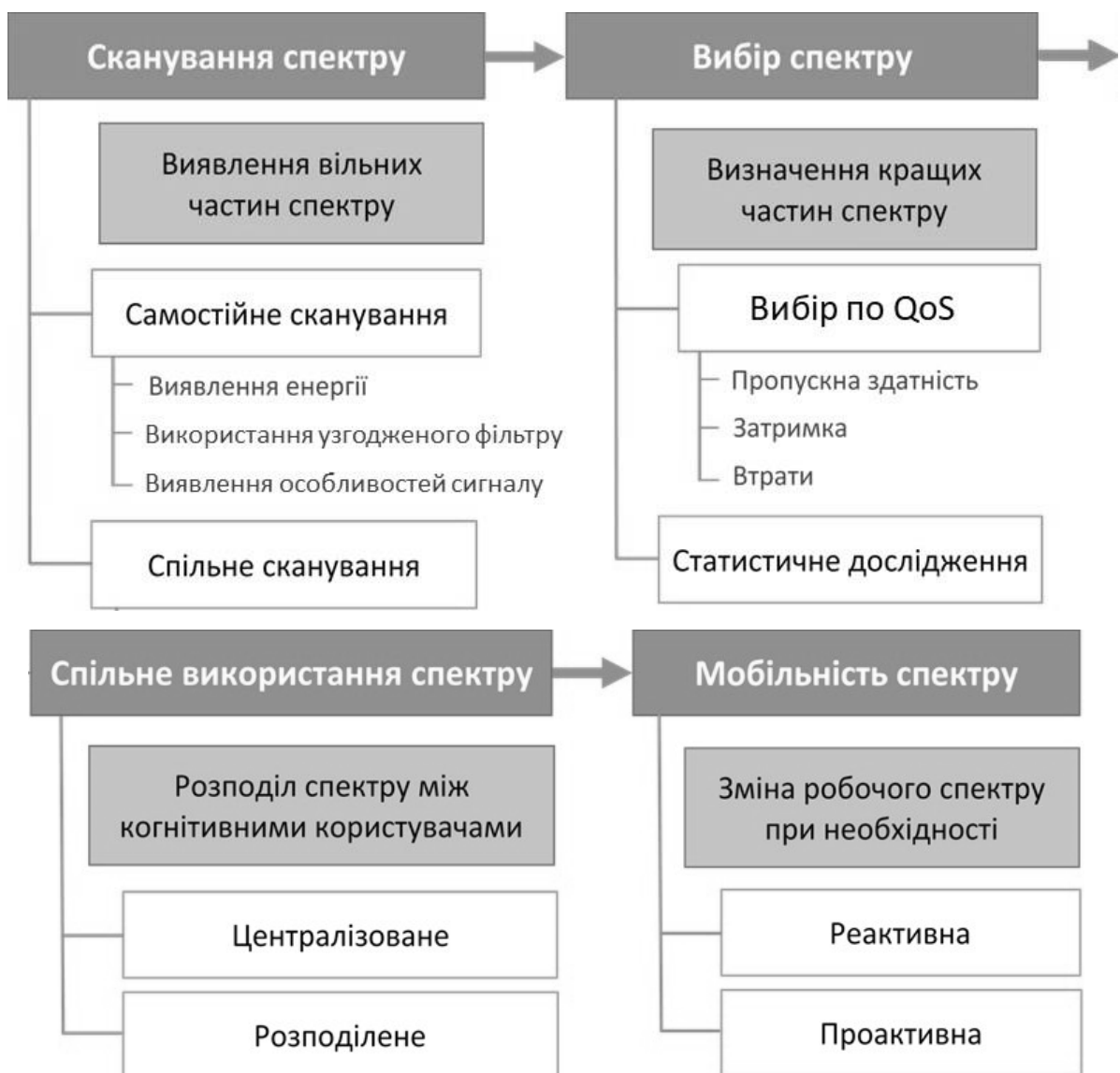


Рис. 2.1. Процес управління радіочастотним спектром

2.1. Порівняльний аналіз методів сканування радіочастотного спектру

Когнітивне радіо розроблене для того, щоб бути обізнаним і чутливим до змін в навколишньому радіо середовищі, що робить сканування спектру важливою вимогою для реалізації мереж КР. Сканування спектру КР дозволяє користувачам адаптуватися до навколишнього середовища шляхом виявлення мертвих зон спектру, не створюючи перешкод в первинній мережі. Це може бути досягнуто вмінням виявити слабкі сигнали первинних користувачів в широкому діапазоні спектра, за допомогою широкосмугової чутливості в реальному часі [48,100]. В КР первинними користувачами вважаються ті користувачі, які мають вищий пріоритет або ліцензію на право на використання певних частин спектру. Сканування спектру є ключовим елементом у КР, так як воно дозволяє КР адаптуватися до навколишнього середовища шляхом виявлення «мертвих зон» спектру. Найбільш ефективним способом виявлення доступності певних частин спектра є виявлення первинних користувачів, які можуть передавати дані у цих частинах. Тим не менш, для КР досить складно отримати прямий моніторинг каналу між первинним передавачем і приймачем. Таким чином, більшість існуючих алгоритмів сканування спектру спрямовані на виявлення передачі первинного сигналу на основі місцевих спостережень КР. Надалі, позначимо $x(t)$ прийнятий сигнал в КР.

Для підвищення точності виявлення, може бути використано багато методів виявлення сигналу при скануванні спектру. У цьому розділі ми дамо короткий огляд деяких відомих технік сканування спектру.

Первинне виявлення передавача базується на виявленні слабого сигналу від первинного передавача через локальний моніторинг користувачів КР. Зазвичай використовуються три методи для виявлення передавача:

виявлення сигналу з допомогою узгодженого фільтру, виявлення енергії сигналу і виявлення особливостей сигналу [56, 77].

Виявлення сигналу з допомогою узгодженого фільтру. Якщо вторинний користувач може отримати попередню інформацію про сигнал первинного користувача, оптимальним методом виявлення сигналу є узгоджений фільтр, так як він максимізує відношення сигнал-шум (С/Ш) прийнятого сигналу. Узгоджений фільтр працює шляхом зіставлення відомого сигналу, або шаблону, з невідомим сигналом, для виявлення присутності шаблону в невідомому сигналі. Це еквівалентно згортки невідомого сигналу з оберненою в часі версією шаблону.

$$Y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h[n-k]x[k] \quad (2.1)$$

де x – вхідний сигнал, h - імпульсна характеристика узгодженого фільтру, яка відповідає еталонному сигналу для максимізації відношення сигнал-шум.

Основною перевагою узгодженого фільтру є те, що він вимагає менше часу для досягнення високого коефіцієнта посилення обробки за рахунок когерентного детектування [9]. Суттєвий недолік узгодженого фільтру – потреба у додатковому чутливому приймачу для кожного типу сигналу основного користувача. І ще, використання узгодженого фільтра може бути суворо обмежено, тому що інформація про сигнал первинного користувача не завжди доступна системі КР. Використання такого підходу все таки можливо, навіть якщо ми маємо часткову інформацію про сигнал первинного користувача, наприклад символи пілот-сигналу або преамбул, що можуть бути використані для когерентного детектування [46].

Виявлення енергії. Якщо КР приймач не може зібрати достатньо інформації про сигнал первинного користувача, оптимальним детектором для такого випадку є метод виявлення енергії [51]. У цьому підході, вимірюється

спектральна енергія в каналі або показник потужності прийнятого сигналу, для визначення, чи є канал в режимі очікування чи ні. Спочатку, вхідний сигнал фільтрують за допомогою смугового фільтру для вибору діапазону частот, що представляє інтерес. Далі відбувається піднесення до квадрату і інтегрування вихідного сигналу в інтервалі спостереження. Результат інтегрування порівнюють із заданим пороговим значенням, на основі чого можна зробити висновок про наявність чи відсутність сигналу первинного користувача. При спектральному аналізі в цифровій області, використовують методи основані на швидкому перетворенні Фур'є (ШПФ). Зокрема, прийнятий сигнал $x(t)$, вибрана частина з часового вікна, спочатку пропускають через пристрій ШПФ, щоб отримати спектр потужності $|X(f)|^2$. Тоді локалізується пік в спектрі потужності. Після обрізання вікна спектра з піком, отримаємо $|Y(f)|^2$.

Виявлення енергії сигналу від первинного користувача здійснюється за допомогою задоволення умов однієї з двох наступних гіпотез:

$$\begin{aligned} H_0 : Y[n] &= W[n], \\ H_1 : Y[n] &= X[n] + W[n], \end{aligned} \quad (2.2)$$

$n=1, \dots, N;$

де N – інтервал спостереження, H_0 – гіпотеза про відсутність сигналу від первинного користувача, H_1 – гіпотеза про присутність сигналу від первинного користувача, $W[n]$ – представляє собою шум навколишнього середовища, $X[n]$ – представляє собою сигнал від первинного користувача.

Продуктивність детектора енергії сигналу характеризується двома параметрами: ймовірністю не виявлення сигналу (Q_m) та ймовірністю помилкового виявлення сигналу (Q_f), які визначаються як:

$$Q_f = \text{Pr ob}\{Decide(H_1 | H_0)\} \quad (2.3)$$

$$Q_m = \text{Pr ob}\{Decide(H_0 | H_1)\}$$

Хоча метод виявлення енергії може бути реалізований без будь-яких попередніх знань про сигнал первинного користувача, він все ще має деякі недоліки. Перша проблема в тому, що він погано працює в умовах низького відношення сигнал-шум. Тому, що дисперсія шуму точно не відома при низькому відношенню сигнал-шум, і саме невизначеність шуму може призвести до того, що метод виявлення енергії стане неефективним [51]. Іншою актуальною проблемою є нездатність розрізняти перешкоди від інших вторинних користувачів, які разом використовують той же канал із первинним користувачем [32]. Крім того, поріг, який використовується у визначенні наявності енергії залежить від дисперсії шуму, а також невеликі помилки оцінки потужності шуму можуть призвести до значної втрати продуктивності.

Виявлення циклічної стаціонарності. Відноситься до методів виявлення особливостей сигналу. Є більш стійким до невизначеності шумів, ніж метод виявлення енергії. Якщо сигнал первинного користувача має властивість циклічної стаціонарності, він може бути виявлений при дуже низьких значеннях відношення С/Ш, використовуючи інформацію владену в прийнятому сигналі (особливість циклічної стаціонарності). Сигнал називається циклічно стаціонарним (у широкому сенсі), якщо його автокореляційна характеристика є періодичною функцією в часі з деяким періодом [2]. Виявлення циклічної стаціонарності може бути виконано наступним чином.

1) Спочатку циклічну автокореляційну характеристику (АКХ) спостережуваного сигналу $x(t)$ розраховують як:

$$R_x^\alpha(\tau) = E[x(n + \tau) \cdot x^*(n - \tau) \cdot e^{-j2\pi f n}] \quad (2.4)$$

де $E[x]$ означає операцію статистичного очікування і α це циклічна частотна.

2) Далі отримуємо спектральну кореляційну функцію (СКФ) $S(f, \alpha)$ з дискретного перетворення Фур'є АКХ. СКФ також називають спектральною циклічністю, яка являє собою двовимірну функцію в залежну від частоти f і циклічної частоти α .

$$S(f, \alpha) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} R_x^\alpha(\tau) e^{-j2\pi f \tau} \quad (2.5)$$

3) Виявлення завершується шляхом пошуку унікальної циклічної частоти, відповідного піку в площині СКФ.

Цей підхід до виявлення є стійким до випадкового шуму і перешкод від інших модульованих сигналів, тому що шум має пік у площині СКФ тільки при нульовій циклічній частоті і різні модульовані сигнали мають різні унікальні циклічні частоти. [57]. Експериментальні результати показують чудову продуктивність виявлення навіть в області з дуже низьким відношенням сигнал-шум. [2].

Такий підхід може відрізнити сигнал первинного користувача серед сигналів інших користувачів КР на тій же смузі частот за умови, що циклічні особливості первинного користувача і сигналів КР відрізняються один від одного, що зазвичай має місце, тому що різні бездротові системи зазвичай використовують різні структури і параметри сигналу. Скориставшись різними характеристиками циклічної стаціонарності сигналів первинного і вторинного користувачів, стратегія знаходження інформації про розподіл каналів запропонована в системі спектрального об'єднання [107], де первинна мережа являє собою систему LTE, а КР мережа є системою безпроводної

мережі на основі OFDM. Тим не менш, виявлення циклічної стаціонарності є більш складним для реалізації, ніж виявлення енергії, і вимагає попереднього знання формату модуляції сигнал первинного користувача.

Виявлення, за допомогою вейвлет-перетворення. Це механізм багатомасштабного аналізу, де вхідний сигнал розкладається на різні частотні компоненти, а потім кожен компонент вивчається з визначенням співпадіння в його масштабі. На відміну від перетворення Фур'є, використовуючи синус і косинус як основні функції, вейвлет-перетворення використовує вейвлети нестандартної форми як основні функції, що може запропонувати більш досконалі інструменти для виявлення різких змін і певних місцевих особливостей [37]. Для опису сигналу в широкосмугових каналах, вейвлет-підхід має переваги з точки зору вартості реалізації і гнучкості в адаптації до динамічних змін спектру, на відміну від звичайного використання декількох вузькосмугових фільтрів [14]. Для того, щоб ідентифікувати місцеположення вільних смуг частот, весь широкосмуговий діапазон моделюється як послідовність частотних піддіапазонів, де спектральна характеристика є гладкою в межах кожного піддіапазону, але різко змінюється на границі двох сусідніх піддіапазонах. При використанні вейвлет-перетворення особливості спектральної густини потужності $S(f)$ спостережуваного сигналу $x(t)$, можуть бути розташовані таким чином, що вільну смугу частот легко можна буде знайти. Одне з найважливіших завдань вейвлет-підходу є реалізація на практиці високочастотної дискретизації для характеристики широкої смуги частот.

Виявлення коваріації. Враховуючи, що статистичні коваріаційні матриці (або автокореляції) сигналу і шуму, як правило, відрізняються, тому методи були запропоновані методи виявлення сигналу засновані на виявленні коваріації [107]. Спостерігаючи за тим, чи елементи поза головною діагоналлю коваріаційної матриці прийнятого сигналу дорівнюють нулю, можна визначити, що первинний сигнал користувач відсутній і навпаки, коли він присутній. Розроблено такі два методи виявлення [39]: виявлення

коваріації абсолютного значення і виявлення коваріаційної норми Фробеніуса. Ці методи можуть бути використані для виявлення різних сигналів без попереднього знання самого сигналу, частотного каналу і потужності шуму. Застосовуючи спектральний розклад коваріаційної матриці, далі існує два методи виявлення, званих виявлення максиміального власного значення матриці і виявлення максимального власного значення матриці [36,38]. Суть методів власного виявлення полягає в значній різниці власного значення отриманої коваріаційної матриці сигналу, коли присутній сигнал основного користувача і коли ні.

Таблиця 2.1

Порівняльний аналіз методів сканування радіочастотного спектру.

	Переваги	Недоліки
Виявлення енергії	<ul style="list-style-type: none"> - простота реалізації - не потрібна додаткова інформація про сигнал 	<ul style="list-style-type: none"> - ефективність сканування залежить від величини потужності шуму - тривалий час сканування - не можна використовувати для детектування широкосмугових сигналів
Узгоджений фільтр	<ul style="list-style-type: none"> - короткий час сканування - оптимальний детектор сигналу в Гаусівському білому шумі 	<ul style="list-style-type: none"> - потребує інформацію про сигнал - потребує окремих приймач для кожного типу сигналу
Виявлення особливостей сигналу	<ul style="list-style-type: none"> - стійкий до невизначеності шуму - висока ефективність при низькому значенню сигнал-шум 	<ul style="list-style-type: none"> - висока складність обчислень - тривалий час сканування

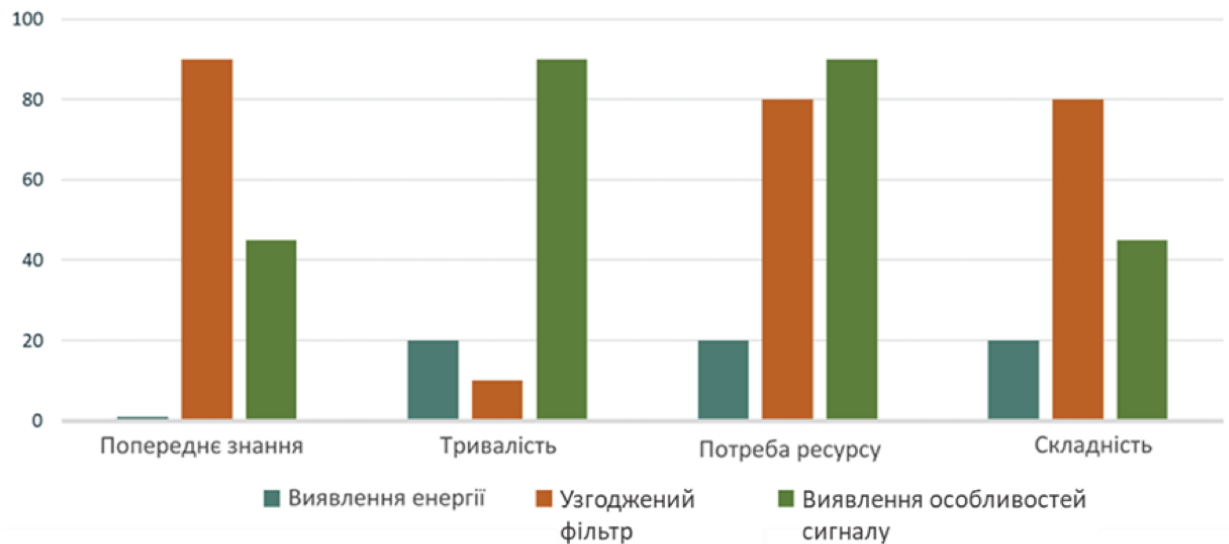


Рис.2.2. Відносне порівняння методів сканування радіочастотного спектру

Для порівняння ефективності сканування радіочастотного спектру проведено обрахунок ймовірності не виявлення та ймовірності помилкового виявлення сигналу від первинного користувача [23]. Їх залежність графічно зображена на рис.2.3.а) для відношення сигнал шум $SNR = 0$ дБ та на рис.2.3.б) для відношення сигнал шум $SNR = 6$ дБ.

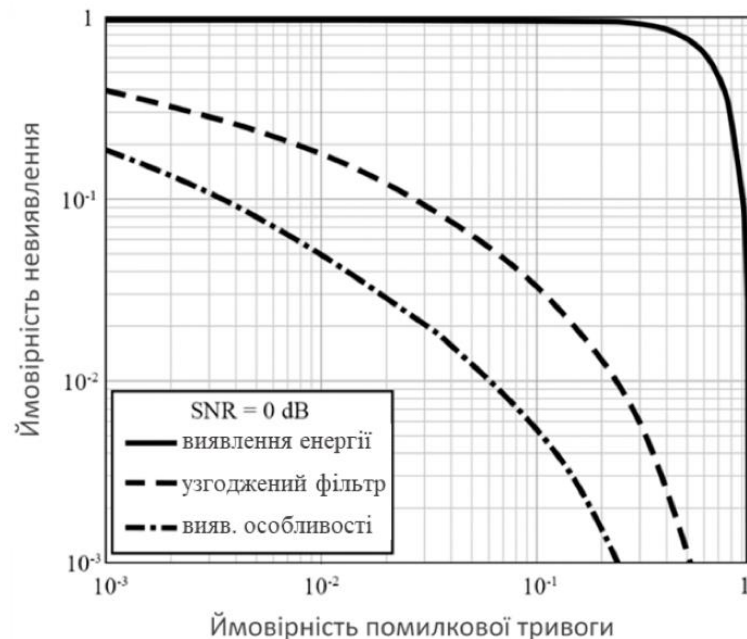


Рис.2.3. а) Залежність між ймовірністю невиявлення та ймовірністю помилкового рішення для трьох методів сканування спектру.

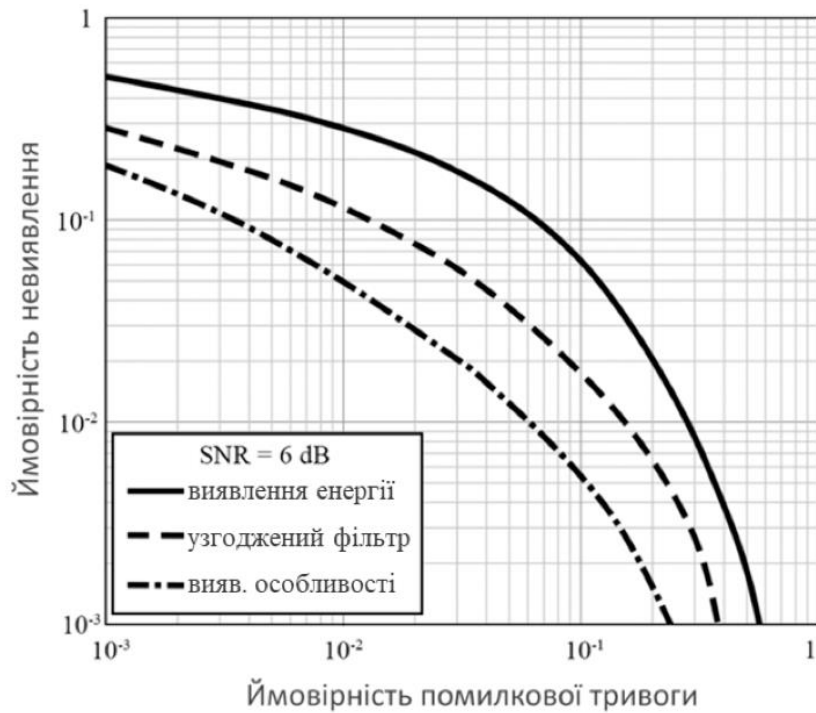


Рис.2.3. б) Залежність між ймовірністю невиявлення та ймовірністю помилкового рішення для трьох методів сканування спектру.

2.1.1. Метод виявлення енергії сигналу первинного користувача

Якщо вторинний приймач не може зібрати достатньо інформації про сигнал первинного приймача, оптимальним детектором для такого випадку є метод виявлення енергії [1,78]. Це поширений метод для виявлення невідомих сигналів, який базується на вимірюванні енергії в прийнятому сигналі протягом певного часу спостереження [55]. Блок-схема детектора енергії показано на рис.2.4.

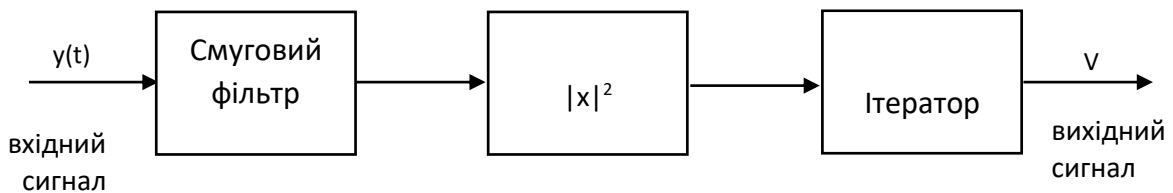


Рис.2.4. Блок-схема виявлення енергії.

Спочатку, вхідний сигнал $y(t)$ фільтрують за допомогою смугового фільтра з метою обмеження шуму і вибору потрібної смуги пропускання. Шум на виході фільтра має обмежену по смузі спектральну густину. Далі, в детекторі енергії, йде пристрій піднесення до квадрату і завершується часовим інтегратором. Вихідний сигнал V від інтегратора обраховується як[55]:

$$V = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t |y(r)|^2 dr \quad (2.6)$$

В завершення, цей вихідний сигнал V порівнюється з пороговим η для того, щоб вирішити, чи присутній сигнал первинного користувача чи ні. Поріг η встановлюється відповідно до статистичних властивостями вихідного сигналу V , коли присутній тільки шум. Детектор енергії також часто згадується як квадратичний детектор [56].

Виявлення енергії виконується за допомогою вимірювання енергії прийнятого сигналу $x_i(t)$ у фіксованому діапазоні смуги пропускання ΔF за час спостереження T_c . Енергія зібрана в частотній області позначається E_i , який служить в якості статистичного вирішення з наступним розподілом [26]:

$$E_i(t) = \begin{cases} \chi_{2u}^2, & H_0 \\ \chi_{2u}^2(2\gamma_i), & H_1 \end{cases} \quad (2.7)$$

де χ_{2u}^2 означає центральний розподіл хі-квадрат із $2u$ ступенями свободи і $\chi_{2u}^2(2\gamma_i)$ означає нецентральний розподіл хі-квадрат зі $2u$ ступенями свободи і нецентральним параметром $2\gamma_i$, відповідно. Миттєве значення відношення сигнал-шум прийнятого сигналу i -тим КР це γ_i , а $u = T_c \Delta F$ параметра

сканування спектру рівний добуток тривалості сканування на ширину смуги пропускання. Виявлення первинного сигналу здійснюється шляхом порівняння енергії E_i з порогом ζ_i . Таким чином, ймовірність помилкового рішення та ймовірність виявлення визначаються як:

$$P_f^{(i)} = \Pr\{E_i > \zeta_i | H_0\} \quad (2.8)$$

$$P_d^{(i)} = \Pr\{E_i > \zeta_i | H_1\}$$

За Релеєм для каналу із затухання, середня ймовірність помилкового рішення, середня ймовірність виявлення і середня ймовірність не виявлення мають вигляд [26]:

$$P_f^{(i)} = \frac{\Gamma\left(u, \frac{\zeta_i}{2}\right)}{\Gamma(u)} \quad (2.9)$$

$$P_d^{(i)} = e^{-\frac{\zeta_i}{2}} \sum_{p=0}^{u-2} \frac{1}{p!} \left(\frac{\zeta_i}{2}\right)^p + \left(\frac{1+\gamma_i}{\gamma_i}\right)^p \left[e^{-\frac{\zeta_i}{2(1+\gamma_i)}} - e^{-\frac{\zeta_i}{2}} \sum_{p=0}^{u-2} \frac{1}{p!} \left(\frac{\zeta_i \gamma_i}{2(1+\gamma_i)}\right)^p \right] \quad (2.10)$$

$$P_m^{(i)} = 1 - P_d^{(i)} \quad (2.11)$$

де $\bar{\gamma}_i$ означає середнє відношення сигнал-шум i -ого КР-приймача, $\Gamma(\alpha, x)$ це неповна гамма-функція визначена як $\Gamma(\alpha, x) = \int_x^\infty t^{\alpha-1} e^{-t} dt$ і $\Gamma(\alpha)$ це гамма-функція.

Запропоновано удосконалення методу виявлення енергії, основані на дискретному перетворенні Фур'є – оригінальний метод періодограми та метод періодограми Уелча.

2.1.2. Метод виявлення енергії на основі періодограми.

Метод періодограми – це метод виявлення енергії на основі ДПФ для оцінки спектральної густини потужності. Назва методу періодограма походить з того, що він був вперше використаний у визначенні можливих прихованої періодичності у часових рядах. Спектральна оцінка періодограми може бути визначена як [9]:

$$\phi_p(\omega) = \frac{1}{N} \left| \sum_{t=1}^N y(t) e^{-i\omega t} \right|^2 \quad (2.12)$$

Основні обмеження методу періодограми виникають через дисперсію. Періодограма це суперечливий метод для спектральної оцінки через те, що оцінка продовжує коливатися навколо істинного значення спектральної густини потужності для нульової дисперсії. Цей ефект не може бути усунений, навіть якщо довжина елементів обробки N збільшується до безмежної. Крім того, той факт, що оцінка за методом періодограми некорелюється при великих значеннях N дозволяє періодограмі проявляти нестійку поведінку.

Метод періодограми Уелча є одним з декількох модифікованих методів на основі періодограми, які намагаються поліпшити його статистичні властивості. Метод періодограми Уелча, як і інші модифіковані методи періодограми, зменшує дисперсію оцінюваного спектру за рахунок збільшення зсуву, а отже, і за рахунок зменшення точності [66]. Ідея періодограми Уелча полягає в розділенні послідовності даних на сегменти для того, щоб зменшити високі коливання періодограми. У методі Уелча ці сегменти даних можуть перекриватися, що є особливістю даного методу, яка

відрізняє його від деяких інших модифікованих періодограм (наприклад, методу Бартлетт або методу Блекман-Тьюки) [66].

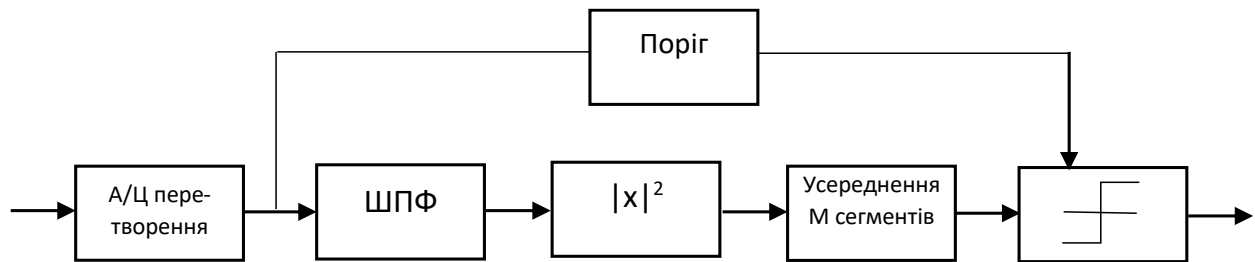


Рис.2.5. Реалізація детектора енергії з використанням періодограми Уелча.

Блок-схему детектора енергії з використанням періодограми Уелча показано на рис.2.5. Спочатку послідовність вхідних даних проходить фільтрацію і аналогово-цифрове перетворення. Після цього, послідовність даних розділяється на M сегментів. Далі проводиться усереднення кожного сегмента. Довжина кожного сегмента даних є N_{DS} , що відповідає довжині елементів ШПФ, без використання вставлення нулів. Якщо використовується вставлення нулів і нулі вставлені в кінці сегмента для спектральної інтерполяції, довжина елементів ШПФ рівна довжині сегмента даних N_{DS} доданої до числа вставлених нулів. Сегменти можуть перекривати один на одного на K елементів. ШПФ виконується для кожного сегмента, і після цього, елементи сегмента підносяться до квадрату. Усереднення проводиться по всіх сегментах. Нарешті, вихідні значення в потрібній смузі частот порівнюються з пороговим і приймається рішення про присутність сигналу чи його відсутність. Для того, щоб отримати майже максимальне зниження дисперсії з фіксованою довжиною вхідної послідовності, рекомендоване значення [66]: $K = N_{DS} / 2$.

Якщо розмір елементів ШПФ збільшується, покращує точність по частоті, яка допомагає виявити вузькосмуговий сигнал. Зсув при оцінці методом періодограми в Уелча, як і при оригінальному методі періодограми,

може бути зменшений шляхом збільшення довжини вхідної послідовності. Між тим, в порівнянні з оригінальною періодограмою, використання періодограми Уелча при оцінці зменшує дисперсію.

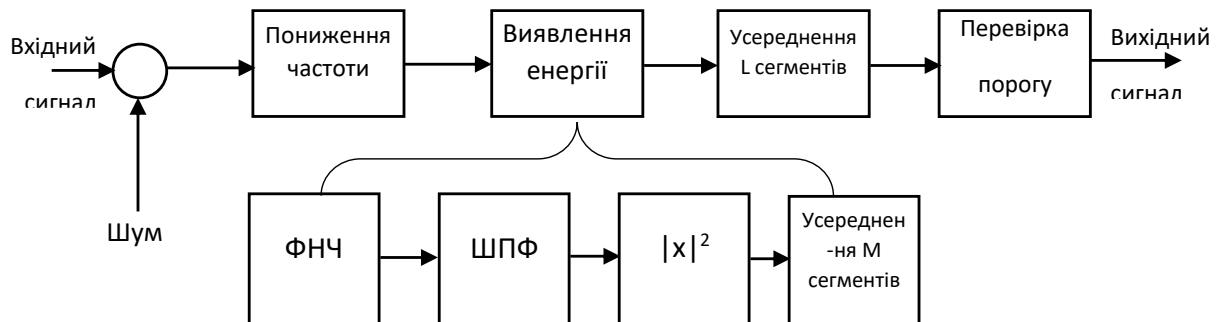


Рис.2.6. Структурно-функціональна схема імітаційної моделі процесу оцінювання спектральної густини потужності на основі періодограми Уелча.

Вхідний сигнал з шумом конвертується з пониженням частоти. Після чого, сигнал надходить на детектор енергії періодограми Уелча. На першому етапі періодограми проводиться фільтрація нижніх частот сигналу. Для цього використовується еліптичний цифровий фільтр з мінімальним затуханням у вибраній смузі. Після фільтрації, виконується швидке перетворення Фур'є і піднесення сигналу до квадрату. Кількість елементів швидке перетворення Фур'є рівна 1024. Вхідна послідовність розділяється на 8 сегментів і далі виконується усереднення над кожним з цих сегментів. Розділення на сегменти робиться за допомогою прямокутного вікна (рамки). Вікна можуть перекриватися. Вихідний сигнал з детектора енергії порівнюється з порогом, для визначення наявності сигналу.

2.1.3. Основні проблеми методів сканування спектру

Існують декілька відкритих проблем, які ще повинні бути досліджені для розвитку сканування спектру:

- Вимір температури інтерференції: у зв'язку з відсутністю взаємодії між основною мережею і КР мережі, як правило, користувач КР не може знати точне місце розташування первинного приймача. Таким чином, необхідні нові методи, для вимірювання або оцінювання температури інтерференції з сусідніми первинними приймачами.

- Сканування спектру в багатокористувацьких мережах: багатокористувацьке середовище, що складається з декількох користувачів КР і первинних користувачів, робить його більш важким у виявленні «мертвих зон» спектру і оцінки інтерференції. Таким чином, функції сканування спектру повинні бути розроблені з урахуванням багатокористувацького середовища.

- Спектрально-ефективне сканування: сканування не може бути виконано при передачі пакетів. Отже, користувачі КР повинні припинити передачу, коли відбувається сканування, що знижує ефективність використання спектра. З цієї причини, важливим питанням є баланс між спектральною ефективністю і точністю сканування. Крім того, оскільки час сканування безпосередньо впливає на якість передачі, повинні бути розроблені новітні алгоритми сканування спектру таким чином, щоб час сканування звести до мінімуму в межах даної точності.

2.2. Процес вибору радіочастотного спектру

КР мережі потребують можливостей для вирішення, які смуги спектру серед доступних є кращими відповідно до QoS вимог додатків. Це поняття називається *вибір спектру* і являє собою важливою темою в мережах КР, хоче ще не досить дослідженою. Вибір спектру тісно пов'язаний з характеристиками каналу і діяльністю первинних користувачів, та залежить від діяльності інших користувачів в мережі КР. Вибір спектру зазвичай складається з двох кроків: по-перше, кожна смуга спектру характеризується, на основі місцевих спостережень КР користувачів, і також, на основі

статистичної інформації первинних мереж. Потім, ґрунтуючись по цих характеристиках, проводиться вибір найбільш підходящим діапазон спектру. Отже, більш детально дослідимо характеристика каналу, процедура прийняття рішення і проблем вибору спектру в мережах КР.

2.2.1. Характеристика радіочастотного каналу у когнітивній радіомережі

Оскільки доступні «мертві зони» спектру мають різні характеристики, які змінюються з плином часу, кожна «мертва зона» спектру повинна бути охарактеризована з урахуванням зміни середовища радіозв'язку в часі і спектральних параметрів, таких, як робоча частота і пропускну здатність.

- Інтерференція: допустима потужність для користувача КР, яка використовується для оцінки пропускну здатності каналу, може бути отримана в залежності від рівня інтерференції первинного приймача.

- Просторові втрати поширення: втрати в просторі тісно пов'язані з відстанню і частотою. Якщо робоча частота збільшується, збільшуються втрати в просторі, що призводить до зниження відстані передавання. Якщо потужність передачі збільшується, щоб компенсувати збільшення втрат в просторі, інтерференція на інших користувачів може збільшитися.

- Помилки в безпроводному каналі: Залежно від схеми модуляції і рівня інтерференції, кількість помилок в каналі може змінюватися.

- Затримки каналного рівня: Для вирішення втрат, помилок в безпроводному каналі та інтерференції, різні типи протоколів каналного рівня можуть використовуватися на різних діапазонах спектру. Однак, повний аналіз і моделювання процесу управління використанням спектру в мережах КР поки що не розроблено.

2.2.2. Процедура прийняття рішень

Наступним кроком, після проведення характеристики доступних діапазонів спектру, є вибір найбільш підходящого діапазону спектру з урахуванням вимог QoS і спектральних характеристик. Таким чином, режим передачі і смуга пропускання для передачі можуть бути змінені.

Пропонується метрика – активність первинного користувача [10], для опису динамічного характеру КР мереж, що визначається як ймовірність появи первинного користувача під час передачі користувачем КР. Тому що немає ніякої гарантії, що смуга спектру буде доступна протягом усього часу зв'язку користувача КР, важливо врахувати, як часто первинний користувач з'являється на смузі спектру.

Тому, через операції первинних мереж, КР користувачі не можуть отримати надійний канал зв'язку протягом тривалого періоду часу. Крім того, CR користувач може не виявити однієї смуги спектру для задоволення своїх вимог. Таким чином, кілька несуміжних смуг спектру можуть бути одночасно використані для передачі в мережах КР, як показано на рис. 2.10. Цей метод може створювати сигнал, який не тільки дозволяє високу пропускну здатність, а також несприйнятливий до перешкод і діяльності первинних користувачів. Навіть якщо відбувається передача обслуговування спектру в одній з поточних смуг, решта частин спектру смуги будуть підтримувати поточну передачу.

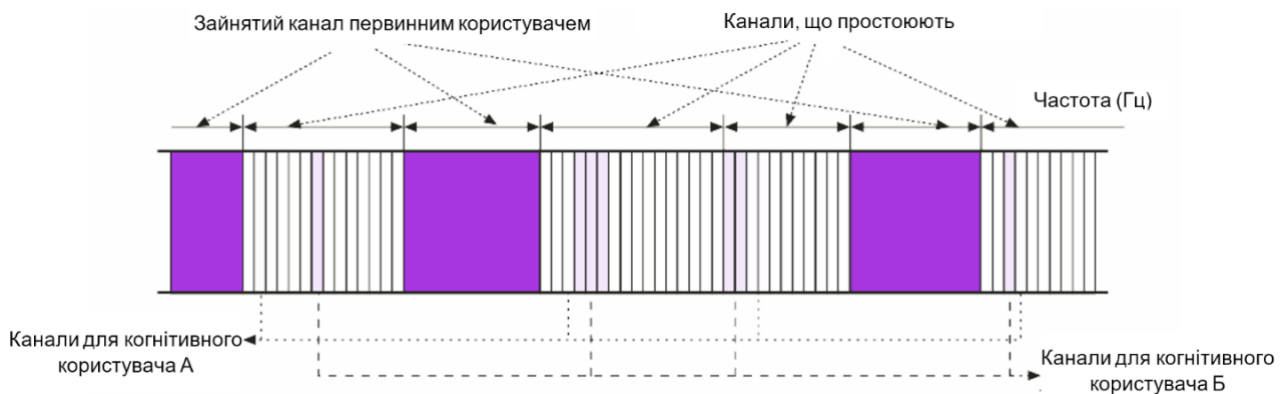


Рис 2.7. Структура каналу мульти-спектрального вибору.

2.2.3. Методи вибору смуг спектру

В більшості методи вибору смуг спектру можна класифікувати на дві категорії: методи без балансування навантаження і методи з балансуванням навантаження. Методи з балансуванням навантаження можна розділити також на два варіанти: метод на основі ймовірності та метод на основі сканування.

- Вибір спектру без балансування навантаження – метод, при якому вторинний користувач може вибрати свій робочий канал, базуючись на одному або декількох параметрах каналу, наприклад: завантаженість каналу, ймовірності того, що канал перебуває в режимі простою, час очікування, час перебування в режимі простою або продуктивність каналу [5,6].

- Вибір на основі оцінювання ймовірності заняття радіоканалу – цей метод працює на балансу навантаження вторинних користувачів одразу в декількох каналах когнітивної радіо мережі по параметрах ймовірності зайняття каналу, ймовірності вибору каналу, ймовірність переривання у каналі і т д.

- Вибір на основі сканування параметрів радіоканалу – цей метод потребує попереднього сканування всіх каналів-кандидатів, щоб знайти найбільш підходящий робочий канал [1]. У даному методі основний параметр, що впливає на тривалість розподілу каналів є кількість робочих каналів.

Тривалість доставки даних визначається як тривалість від початку пересилання даних з першим часовим інтервалом, до завершення передавання даних з останнім часовим інтервалом. Очевидно, що кількість подій передачі обслуговування значимо впливає на тривалість часу доставки даних. Загальну тривалість прийняття рішення про розподіл радіо каналів для методу вибору каналу на основі оцінювання ймовірності заняття можна визначити як:

$$E[S_{pb}] = E[W_{pb}] + E[T_{pb}] \quad (2.13)$$

А для методу вибору каналу на основі сканування його параметрів як:

$$E[S_{sb}] = E[W_{sb}] + E[T_{sb}] \quad (2.14)$$

Проблему мінімізації тривалості прийняття рішення про розподіл радіо каналів для методу вибору каналу на основі ймовірності можна вирішити як [25]:

$$p = \arg \min E[S_{pb}(p_{pb})] \quad (2.15)$$

$$0 \leq p_{pb}^{(k)} \leq 1, \quad \forall k \in \Omega, \quad (2.16)$$

де $\Omega = \{1, 2, \dots, M\}$ набір каналів кандидатів, $E[S_{pb}]$ – тривалості прийняття рішення системи для вторинного з'єднання.

$$\sum_{k \in \Omega} p_{pb}^{(k)} = \sum_{k=1}^M p_{pb}^{(k)} = 1, \quad (2.17)$$

$$p^{(k)} = p_p^{(k)} + p_s^{(k)} < 1, \quad (2.18)$$

де $p^{(k)}$ – це ймовірність зайнятості k -ого каналу. $p_p^{(k)}$ – це ймовірність зайняття k -ого каналу первинним користувачем, $p_s^{(k)}$ – це ймовірність зайняття k -ого каналу вторинним користувачем [25]:

$$p_p^{(k)} = \lambda_p^{(k)} E[X_p^{(k)}], \quad (2.19)$$

$$p_s^{(k)} = \lambda_s^{(k)} E[X_s^{(k)}], \quad (2.20)$$

Далі $T^{(k)}$ – це тривалість доставки даних для k -ого каналу вторинним користувачем.

$$E[T^{(k)}] = E[X_s^{(k)}] + E[N^{(k)}]E[Y_p^{(k)}], \quad (2.21)$$

де

$$E[N^{(k)}] = \lambda_p^{(k)} E[X_s^{(k)}] \quad (2.22)$$

$$E[Y_p^{(k)}] = \frac{E[X_p^{(k)}]}{1 - \lambda_p^{(k)} E[X_p^{(k)}]} \quad (2.23)$$

Середня тривалість доставки даних для методу вибору каналу на основі оцінювання ймовірності зайняття можна розрахувати як:

$$E[T_{pb}] = \sum_{k=1}^M p_{pb}^{(k)} E[T^{(k)}] \quad (2.24)$$

$$E[W_{pb}^{(k)}] = \frac{E[R^{(k)}]}{(1 - p_p^{(k)})(1 - p_p^{(k)} - p_s^{(k)})} \quad (2.25)$$

де $E[R^{(k)}]$ позначає час простою системи, коли з'єднання завершено в k -ому каналі:

$$E[R^{(k)}] = \frac{1}{2} \lambda_p^{(k)} E[(X_p^{(k)})^2] + \frac{1}{2} p_{pb}^{(k)} \lambda_s E[(X_s^{(k)})^2] \quad (2.26)$$

Для методу вибору каналу на основі сканування його параметрів, середній час доставки даних складає [25]:

$$E[T_{sb}] = \sum_{k=1}^M p_{sb}^{(k)} E[T^{(k)}] \quad (2.27)$$

$$E[W_{sb}] = n\tau + \Pr\{\varepsilon^c\} \times E[W'_{sb}] \quad (2.28)$$

де ε – це подія, що хоча б один з каналів в даний момент простоює, а ε^c – комплементарне значення події, τ – час сканування одного каналу.

$$\begin{aligned} \Pr\{\varepsilon\} &= \sum_{k=1}^n [\Pr\{\varepsilon | k_{idle}\} \times \Pr\{k_{idle}\}] = \\ &= \sum_{k=1}^n [(1 - (P_F)^k) \sum_{\mathfrak{S} \subseteq \Omega, |\mathfrak{S}|=k} \left[\prod_{i \in \mathfrak{S}} (1 - p^{(i)}) \prod_{j \in \Omega - \mathfrak{S}} p^{(j)} \right]] \end{aligned} \quad (2.29)$$

де $p^{(k)} = p_p^{(k)} + p_p^{(k)}$ ймовірність помилкового рішення.

$$\Pr\{\varepsilon^c\} = 1 - \Pr\{\varepsilon\} \quad (2.30)$$

Також, якщо всі канали знаходяться в зайнятому стані, тоді ймовірність того, що вторинний користувач може використати певний канал рівна $1/n$.

2.2.4. Основні проблеми методів вибору смуг спектру

При розробці методів вибору спектру, деякі проблеми все ще залишаються невирішеними:

- Модель вибору: оцінювання пропускної здатності спектру за допомогою відношення сигнал-шум (SNR) не є достатнім для характеристики смуги спектру в мережах КР. Крім того, додатки потребують різні вимоги QoS. Тому, розробка програмно- і спектрально-адаптивних моделей вибору спектру все ще залишається відкритим питанням.

- Співпраця з реконфігурації: методи КР дозволяють реконфігурувати параметри передачі на оптимальну роботу в певному діапазоні спектра.

Тобто, навіть якщо відношення сигнал-шум змінюється, швидкість передачі бітів і частота появи помилкових бітів (BER) може бути забезпечена за рахунок використання адаптивної модуляції замість перевибору спектру. Таким чином у виборі спектру, потрібні основи для співпраці з реконфігурацією.

- Вибір спектру серед гетерогенних смуг спектру: В даний час, деякі смуги спектру призначені для різних цілей, в той час як деякі смуги залишаються неліцензовані. Тому, мережа КР повинна підтримувати вибір робочого спектру як на ліцензованих, так і на неліцензованих смугах.

2.3. Спільне використання радіочастотного спектру

Спільний характер використання бездротового каналу вимагає координації спроб передавання даних між користувачами КР. У цьому відношенні спільне використання спектру повинно включати в себе багато функціональні можливості протоколу MAC. Крім того, унікальні характеристики КР, такі як співіснування користувачів КР з ліцензійними користувачами і широкосмуговість доступного спектра, несуть істотно різні проблеми для спільного використання спектру в мережах КР. Існуючі роботи по спільному використанні спектру спрямовані на вирішення цих проблем і можуть бути класифіковані за чотирма аспектами: архітектура, поведінка розподілу спектру, техніка доступу до спектру, і масштаб.

2.3.1. Класифікація спільного використання спектру

Перша класифікація, на основі архітектури, може бути централізованою або розподіленою.

- Централізоване спільне використання спектру: розподіл спектру і процедури доступу управляються центральним об'єктом. Крім того, може бути використана процедура розподіленого сканування, так як вимірювання

розподілу спектру направляються в центральний об'єкт, де будується карта розподілу спектру [6].

- Розподілене спільне використання спектру: правила розподілу спектру і доступу засновані на місцевих (або, в певних випадках, глобальних) політиках, які виконуються кожним вузлом окремо [18]. Розподілені рішення також використовуються для різних мереж, таким чином, що базова станція (БС) змагається з її сусідніми БС відповідно до QoS вимог своїх користувачів виділити їй відповідну частину спектру [99].

Друга класифікація заснована на розподілі поведінки, при якому доступ до спектру може бути кооперативним або не кооперативним. Кооперативні підходи, в цілому, перевершують некооперативних підходи, а також наближені до глобального оптимуму [29]. Крім того, результати кооперативних методів певною мірою справедливі, так як поліпшують продуктивність. З іншого боку, зниження продуктивності некооперативних підходів, як правило, компенсується значно нижчим інформаційним обміном і, отже, споживанням енергії.

Методи спільного використання спектру, як правило, зосереджені на двох типах рішень: спільного використання спектру всередині КР мережі (внутрішньомережеве спільне використання спектру) і серед кількох співіснуючих КР мереж (міжмережеве спільне використання спектру). Внутрішньомережеве спільне використання спектру спрямоване на розподіл спектру між суб'єктами мережі КР, як показано на рис. 2.8.

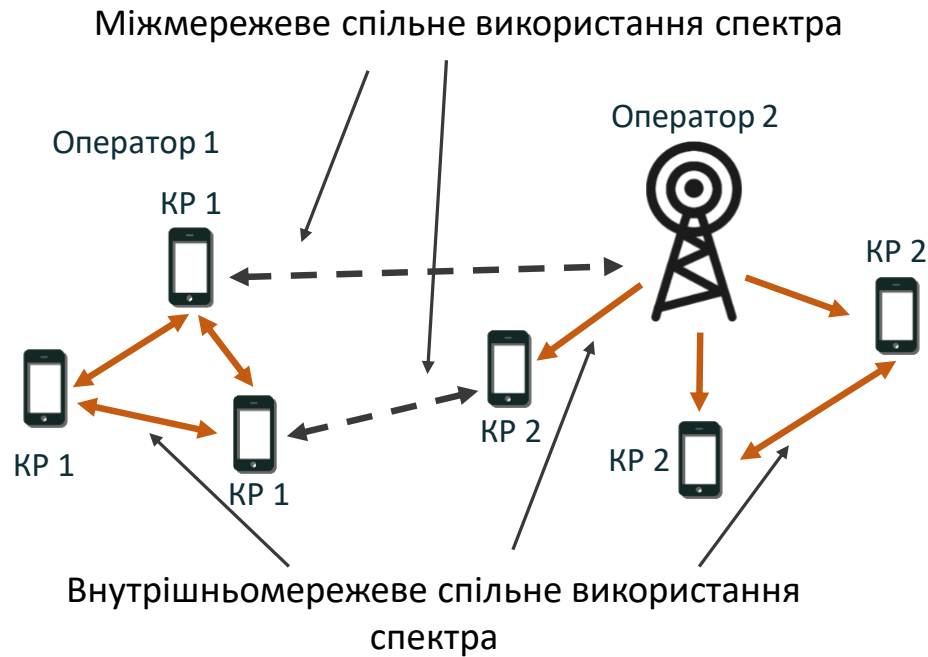


Рис 2.8. Внутрішньомережеве та міжмережеве спільне використання спектра в мережах КР.

Відповідно, користувачі мережі КР намагаються отримати доступ до вільного спектру, не створюючи перешкод для первинних користувачів. Внутрішньомережеве спільне використання спектру ставить унікальні питання, які не були розглянуті раніше в системах бездротового зв'язку.

- Міжмережеве спільне використання спектру: архітектура КР дає кілька систем, які будуть розгорнуті в місцях і смугах і спектру, що перекриваються, як показано на рис. 2.8. Поки міжмережеве рішення спільного використання спектру забезпечує більш широкий погляд на концепцію спільного використання спектру шляхом включення певної політики оператора. Далі будуть описані потенційні проблеми і відкриті питання дослідження цього аспекту.

2.3.2. Основні проблеми спільного використання спектру

Є багато відкритих дослідницьких питань для реалізації ефективних і безперебійних методів спільного спектру в мережах КР, таких як:

- Загальний канал управління: загальний канал управління (ЗКУ) полегшує багато функцій спільного використання спектру. Однак, оскільки канал повинен бути звільнений, коли первинний користувач вибирає цей канал, впровадження фіксованого ЗКУ є неприпустимим. Крім того, в мережах КР, спільний канал для всіх користувачів є дуже сильно залежний від топології і змінюється в часі [11]. Отже, повинні бути розроблені або методи пом'якшення ЗКУ або повинні бути використані місцеві ЗКУ для кластерів з вузлів.

- Динамічний радіодіапазон: у зв'язку з взаємозалежністю між радіодіапазоном і діапазоном робочих частот, сусіди вузла можуть мінятися, так як змінюються робочі частоти. До цих пір немає точного вирішення цього важливого завдання в мережах КР, пропонуються частотно-обізнані методи спільного використання спектра.

- Одиниця спектру: Майже всі вибори спектру і технології спільного використання розглядають канал в якості основної одиниці спектру. Отже, визначення каналу у вигляді одиниці спектру має вирішальне значення в розвитку алгоритмів.

- Інформація про розташування: важливе припущення в існуючій роботі є те, що вторинні користувачі знають розташування і потужність передачі первинних користувачів, так що розрахунки перешкод можуть бути виконані легко. Однак таке допущення не завжди може бути дійсним в мережах КР.

2.4. Методи забезпечення мобільності спектру

Четвертий крок управління використанням спектру, як пояснювалося раніше, управління мобільністю спектру. Після того, як КР займає найкращі доступні смуги спектру, діяльність первинних користувачів на обраному діапазоні спектру може вимагати, щоб користувач змінив свою робочу смугу спектру, що називають мобільність спектру. Мобільність спектру породжує новий тип передачі обслуговування в мережі КР – передавання смуги спектру для обслуговування первинних користувачів. Протоколи для різних верств мережевого стеку повинні адаптуватися до параметрів каналу робочої частоти. Крім того, вони повинні бути прозорими для передавання смуги спектру і асоційованої затримки. Кожен раз, коли користувач КР змінює робочу частоту, мережеві протоколи можуть вимагати змін робочих параметрів. Мета управління мобільністю в спектрі КР мереж, це забезпечення плавного і швидкого переходу з мінімальним погіршенням продуктивності, під час передавання смуги спектру. Однією з основних вимог протоколів управління мобільністю є інформація про тривалість передавання смуги спектру для обслуговування. Внутрішні характеристики мережі КР дають розвиток двом новим концепціям: мобільність спектру і передавання смуг спектру для обслуговування. До цих пір немає науково-дослідної роботи з вирішення проблем передавання смуг спектру для обслуговування. Хоча, механізми мобільності засновані на передавання смуг спектру для обслуговування були досліджені в стільникових мережах, що може закласти основу в цій області, та дане завдання ще є відкритою темою дослідження, яку ще належить вивчити.

Процес передавання смуг спектру для обслуговування, в основному, зосереджений на виборі нового частотного каналу. Відповідно, до типу вибору цільового каналу, методи передачі обслуговування частотного каналу можна класифікувати на: реактивне передавання каналу для обслуговування і

проактивне передавання каналу для обслуговування, на основі сканування спектру.

При реактивному передавання смуг спектру для обслуговування, на основі сканування спектру, когнітивний користувач виконує пошук цільового каналу і саме перемикання каналу здійснюється вже після виявлення основного користувача. Хоча, концепція цього підходу є інтуїтивно зрозумілою, для роботи такого підходу потрібно провести процедуру сканування спектру і реконфігурації, що викликає достатню затримку і можливість збою, як для передачі когнітивного користувача так і для передачі первинного користувача, що є серйозною проблемою. Інший підхід, - проактивне передавання смуг спектру для обслуговування, пропонує дозволити неліцензованим користувачам звільнити канал перед тим, як його займе основний користувач, щоб уникнути небажаних колізій. Для цього, когнітивному користувачу потрібно передбачити майбутній стан доступності каналу, виконувати перемикання каналу і реконфігурацію, на основі спостережуваної статистики використання каналу. Такий підхід дозволяє значно зменшити колізії первинним і когнітивним користувачами.

2.4.1. Критерії і методика передавання смуг спектру для обслуговування користувачів

Використовуючи статистику по спостереженню використання каналу, когнітивний користувач може робити прогнози про доступність каналу до завершення передавання поточного пакету. На основі визначеного прогнозу, когнітивний користувач вирішує, чи залишитися в даному каналі чи переключитися на новий канал або зовсім зупинити поточну передачу [7]. Пропонується використати два критерії для визначення того, чи буде відбуватися передача обслуговування спектру: ймовірність прогнозування того, що теперішній канал і канал-кандидат (тобто канал, який може бути

обраний для продовження поточної передачі даних) зайнятий або простуює і очікувана тривалість періоду простою каналу.

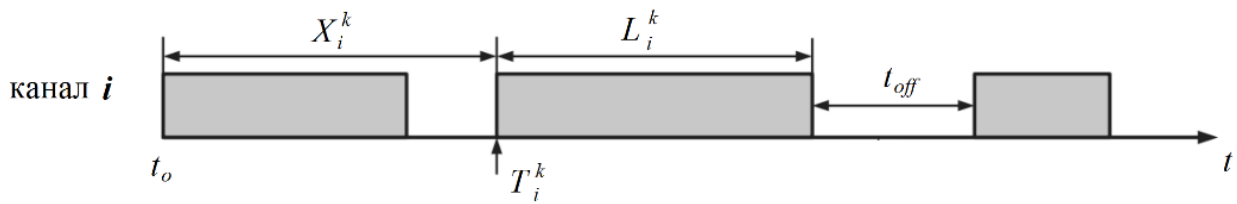


Рис.2.9. Активність первинного користувача в i -му каналі

Виходячи з цих критеріїв, розробляємо політику передавання смуг спектру для обслуговування. Рис. 2.9. показує активність первинного користувача по каналу i , де X_i^k і T_i^k представляють час між початками передачі пакету і час прибуття k -го пакету відповідно. Відповідно до припущення, що пакети первинного користувача з'являються випадковим чином згідно закону розподілу Пуассона [24], час X_i^k є розподілений по експоненціальному закону з середньою швидкістю появи нового пакету λ_i пакетів в секунду і довжині пакета первинного користувача наступним законом $f_{L_i}(l)$. Як видно з рис. 2.9, для будь-якого моменту часу t , ймовірність того, що i -й канал зайнятий або простуює можна записати в такий спосіб [50]:

$$\begin{aligned} \Pr(N_i(t)=1) & \text{ якщо } T_i^k < t \text{ і } T_i^k + L_i^k \geq t, & k \geq 1 \\ \Pr(N_i(t)=0) & \text{ якщо } T_i^k + L_i^k < t \text{ і } T_i^{k+1} \geq t, & k \geq 1 \\ & T_i^{k+1} \geq t, & k = 0 \end{aligned} \quad (2.31)$$

де L^k позначає довжину k -го пакета даних первинного користувача в i -му каналі. Таким чином, ймовірність того, що канал i вільний у будь-який момент часу t може бути отримано відповідно до виразу:

$$\Pr(N_i(t) = 1) = \int_0^{\infty} \left[\sum_{k=1}^{\infty} \Pr(T_i^k + L_i < t | k) \Pr(k) + \Pr(T_i^k \geq t) \Pr(k = 0) \right] f_{L_i}(l) dl \quad (2.32)$$

$$\Pr(N_i(t) = 1) = \int_0^{\infty} \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{(\lambda_i(t - L_i))^k}{k!} e^{-\lambda_i(t - L_i)} \right] \left(\frac{(\lambda_i t)^k}{k!} e^{-\lambda_i t} \right) \frac{(\lambda_i t)^k}{k!} e^{-\lambda_i t} + e^{-2\lambda_i t} \right\} f_{L_i}(l) dl$$

Нехай t_{off} представлятиме тривалість періоду виключення. Для i -ого каналу, функція розподілу ймовірності залежно від тривалості періоду виключення визначається:

$$\Pr(t_{off} < x) = \int_0^{\infty} \int_0^{1+x} \lambda_i e^{-\lambda_i t} f_{L_i}(l) dt dl = \int_0^{\infty} (1 - e^{-\lambda_i(l+x)}) f_{L_i}(l) dt dl \quad (2.33)$$

Отже, на підставі наведеної вище ймовірності, політика, що когнітивний користувач повинен перемкнутися на новий канал визначається як:

$$\Pr(N_i(t) = 0) < \tau_L \quad (2.34)$$

де τ_L - це порогове значення ймовірності, нижче якого канал вважається зайнятим і когнітивний користувач повинен здійснити передачу обслуговування спектра, тобто поточний канал більше не простоює в кінці передачі пакету. Крім того, така політика, що канал j стає каналом кандидатом в момент часу $t \in$

$$\begin{cases} \Pr(N_j(t) = 0) \geq \tau_H \\ \Pr(t_{j,off} > \eta) \geq \theta \end{cases} \quad (2.35)$$

де t_n це порогове значення ймовірності, що канал вважається таким, що простоює в кінці поточного пакету передачі, η є сумою тривалості передавання пакету плюс тривалість тимчасового інтервалу (тобто, $\eta = \xi + \beta$), а θ є порогове значення ймовірності, що канал буде вважатися таким, що простоює при наступній передачі пакету. Другий критерій (2.27) означає, що для того, щоб підтримувати хоча б один пакет когнітивного користувача, ймовірність того, що тривалість простою j -ого каналу є довшим, ніж тривалість передачі пакету повинна бути вище або рівна θ .

2.4.2. Основні проблеми забезпечення мобільності спектру

Нижче перераховані відкриті дослідницькі питання для ефективної мобільності спектру в мережах КР:

- Мобільність спектру в тимчасовій області: КР мережа адаптується до безпроводного спектру на основі доступних смуг. Оскільки, ці доступні смуги змінюються з часом, тому забезпечення QoS в цьому середовищі є складним завданням.

- Мобільність спектру в просторі: доступні діапазони також змінюються, якщо користувач переходить з одного місця в інше. Таким чином, безперервний розподіл спектру є основною проблемою.

2.5. Висновки до 2-го розділу

1. В даному розділі визначено основні функції процесу управління використання спектру, що складається з чотирьох основних етапів: сканування спектру, вибір смуг спектру, спільне використання спектру і забезпечення мобільності спектру.

2. Проведено порівняльний аналіз ефективності методів сканування радіочастотного спектру по параметрах ймовірності не виявлення та ймовірності помилкового виявлення. Визначено основні переваги та недоліки даних методів.

3. Запропоновано методику вибору радіочастотного спектру та процедуру прийняття рішення системою керування когнітивної радіомережі на основі показника тривалості прийняття системного рішення. Проведена класифікація процесу спільного використання та методів забезпечення мобільності радіочастотного спектру для когнітивних користувачів.

4. Визначено два основні критерії при перемиканні частотного каналу: ймовірність того, що теперішній і цільовий канали зайняті або простоюють та очікувана тривалість періоду простою каналу. Запропоновано реактивний та проактивний методи забезпечення мобільності радіочастотного спектру при процесі передаванні обслуговуванні спектру.

РОЗДІЛ 3.

РОЗРОБЛЕННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КОГНІТИВНОЮ РАДІОМЕРЕЖЕЮ

3.1. Принципи побудови когнітивної радіомережі на основі OFDM

Велика частина уваги при огляді когнітивного радіо (КР) приділяється використанню мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів OFDM, що є методом модуляції сигналу кодування цифрових даних на декількох несучих частотах, які можуть вирішити багато проблем, що виникають з високошвидкісними системами комунікацій. Тому бажано використовувати OFDM-технологію для побудови вторинної/неліцензійної системи передачі даних [67]. Це дозволяє гнучко управляти смугою пропускання передаваного сигналу залежно від числа частот, що зайняті первинною/ліцензованою мережею в певному місці і поліпшити ефективність прийому даних в умовах багатопроменевого поширення.

Переваги використання OFDM в системах когнітивного радіо [79]:

- Висока спектральна ефективність завдяки майже прямокутному спектру частот для великої кількості піднесучих;
- Надійність проти вузькосмугових перешкод;
- Проста цифрова реалізація з використанням швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) ;
- Зменшення ефекту дисперсії багатопроменевого поширення каналів, з якими стикаються системи із високими швидкостями передачі даних;
- Масштабованість;
- Відносна простота приймачів;
- Гнучке програмне впровадження виділення спектральних піднесучих OFDM .

Недоліки:

- Високий пік-фактор (відношення піку до середньої потужності) вимагають застосування високолінійних підсилювачів;
- Високий вплив фазового шуму, викликаного недосконалістю передавача і приймача системи;
- Потрібно забезпечити точну часову і частотну синхронізацію.

Отже, завдяки своїм можливостям для сканування та вибору спектра, разом із гнучкістю та адаптивністю, OFDM безумовно визначається як краща технологія передачі для систем КР [4].

Основою системи КР повинна бути можливість вимірювання, тобто відчувати, вчитися, і бути в курсі важливих змін і станів у радіосередовищі. Система повинна бути в змозі знайти і використовувати незайняті частини спектра швидким і ефективним способом. Популярні алгоритми сканування спектру, такі як узгоджена фільтрація, виявлення енергії, спектральна кореляція, сканування основні форми сигналу, повинні забезпечити обізнаність системи КР [5]. Крім того, кооперативне сканування спектру може не тільки скоротити час виявлення, збільшити гнучкість, але і вирішити проблему прихованого терміналу, затінення або важкого багатопроменевого завмирання сигналу. У системах OFDM, перетворення з часової області в частотну область досягається за рахунок використання ШПФ. Всі точки в частотно-часовій площині робочого діапазону системи OFDM можуть бути відскановані без будь-яких додаткових апаратних засобів або розрахунку завдяки повторному використанні апаратних ядер ШПФ. Використовуючи частотно-часову площину, вибір доступних частин спектру для експлуатації (“мертвих зон” спектру) може здійснюватися за допомогою простої перевірки гіпотез [19]. У цих алгоритмах сканування спектра, наявність схеми ШПФ в системі з OFDM полегшує вимоги до обладнання. Крім того, вимоги до обчислювальних ресурсів для алгоритму сканування спектра знижується, так як приймач вже використовує ШПФ для прийнятого сигналу для того, щоб перетворити його в частотній області для виявлення даних.

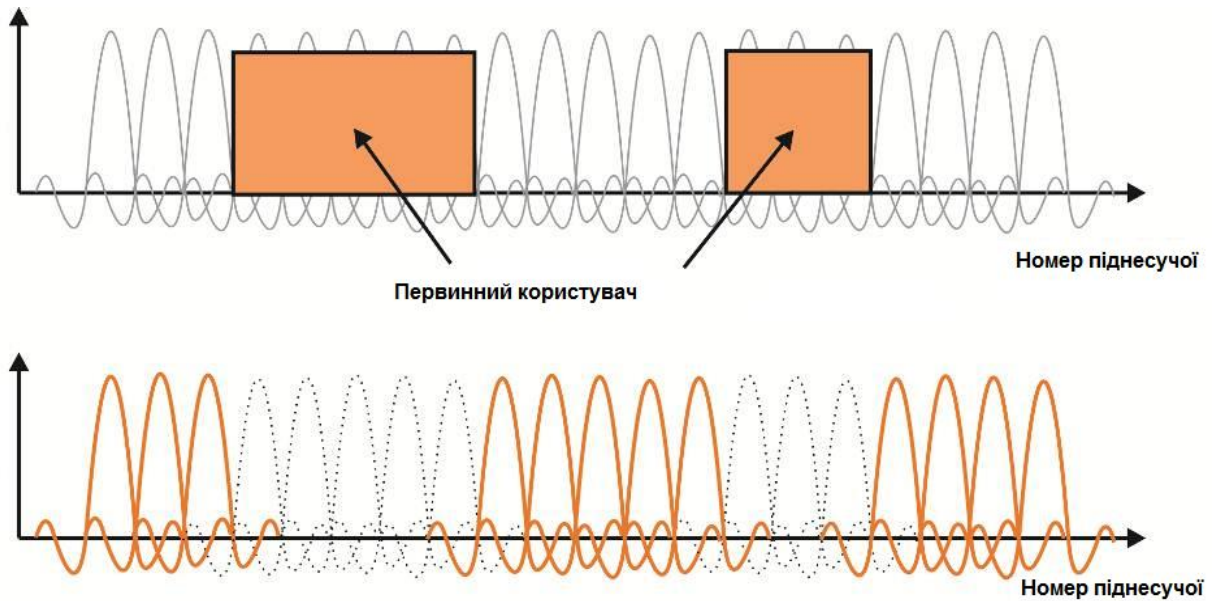


Рис.3.1. Формування спектру з використанням OFDM.

Приклад виключення заборонених частот загального діапазону первинної мережі відбувається таким чином. OFDM-символ - це група піднесучих, які являють собою цифровий паралельний потік бітів. Комплексна огибаюча $\dot{s}(t)$ одного OFDM-символу, який починається в момент часу t_k , має наступний вигляд [41]:

$$\dot{s}(t) = \sum_{i=0}^{n-1} \dot{d}_i e^{j2\pi \frac{i(t-t_k)}{T}} ; t_k \leq t \leq t_k + T, \quad (3.1)$$

де d_i - комплексне число, що представляє амплітуду і початкову фазу i -ї піднесучої OFDM-сигналу; n - число піднесучих коливань в OFDM-символі. Схема формування комплексних огибаючих OFDM-символів на прикладі восьми піднесучих і спектральна щільність відповідного OFDM-сигналу з $N = 8$ показана на рис. 3.2.

Якщо відомо, які діапазони частот використовуються первинною мережею і там неможливо передавати дані вторинної мережі, то необхідно

виключити передачу на тих піднесучих, що збігаються з забороненими частотами. Якщо для цього потрібно виключити передачу на i -й частоті первинної мережі, відповідно до (3.1) при формуванні OFDM-символу d_i потрібно прирівняти до нуля. Наприклад, якщо потрібно виключити передачу на 2, 3 і 5-й частотах, тоді відповідно потрібно $d_2 = d_3 = d_5 = 0$.

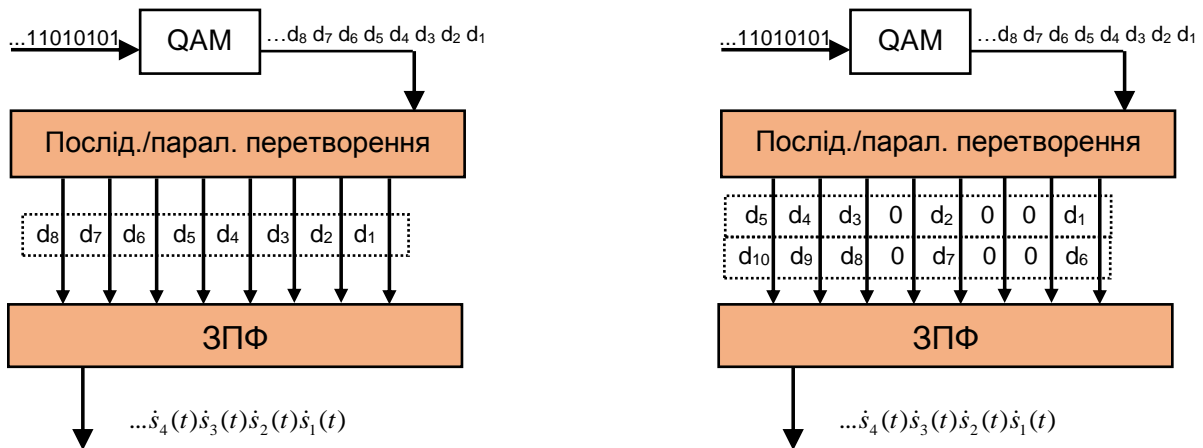


Рис. 3.2. Схема формування комплексних огибаючих OFDM-символів.

Отже, для формування OFDM-символів з можливим виключенням частот початкову схему потрібно змінити шляхом встановлення нульових символів в заданих положеннях. Це може бути зроблено під час послідовно-паралельної трансформації потоку QAM-символів, знаючи кількість і номери частот, що виключаються з передачі. Рис.3.2 показує модифіковану схему формування комплексних огибаючих OFDM-символів за винятком зайнятих частот (в даному випадку другої, третьої і п'ятої).

У цьому випадку загальна швидкість передачі даних вторинної мережі зменшується пропорційно кількості виключених піднесучих. Щоб уникнути втрати інформації в процесі обнулення піднесучих, потокова бітова швидкість на вході QAM-модулятора має бути узгоджена з наявними частотними ресурсами. У відповідності з моделлю OSI завдання управління бітовим потоком швидкості вирішується на транспортному рівні.

3.2. Імітаційна модель когнітивної радіо системи для оцінки пропускної здатності.

В даній роботі пропонується наступна модель когнітивної мережі. Первинна (ліцензійна) мережа представляє собою одну з комірок системи LTE, в якій працюють декілька мобільних операторів на різних виділених частотних смугах. Дана комірka накладається з вторинною (неліцензійною) мережею, що працює в наступних смугах частот (рис. 3.3, 3.4) [22,102]:

- LTE Band 1 FDD (1920-1980 МГц і 2110-2170 МГц);
- LTE Band 3 FDD (1710-1785 МГц і 1805-1880 МГц);
- LTE Band 39 TDD (1880-1920 МГц);
- LTE Band 40 TDD (2300-2400 МГц);
- LTE Band 41 TDD (2500-2690 МГц);

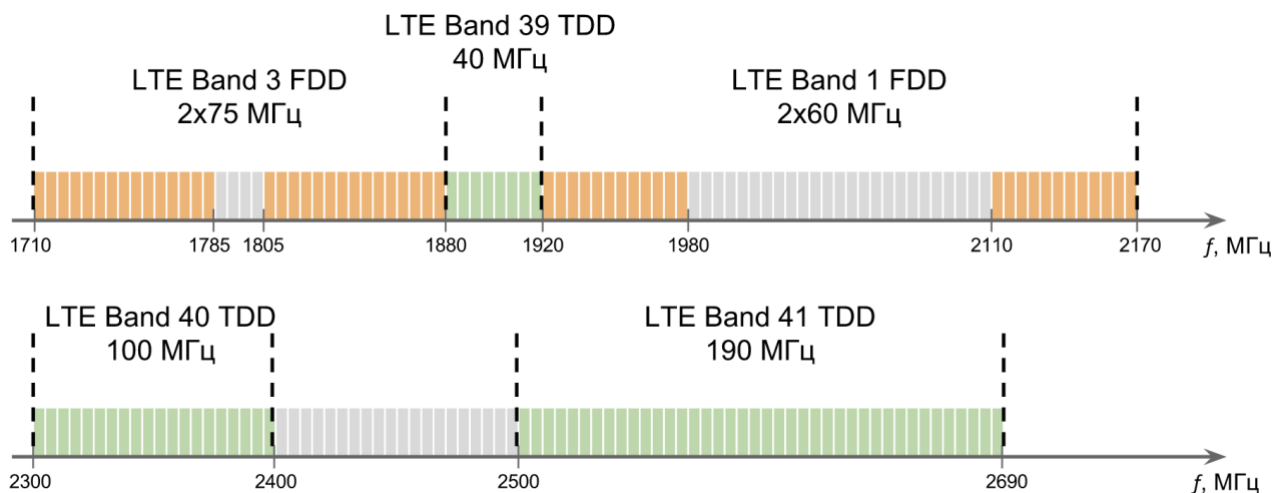


Рис. 3.3. Схематичне зображення розподілу ділянок частотного спектру між первинною і вторинною мережами.

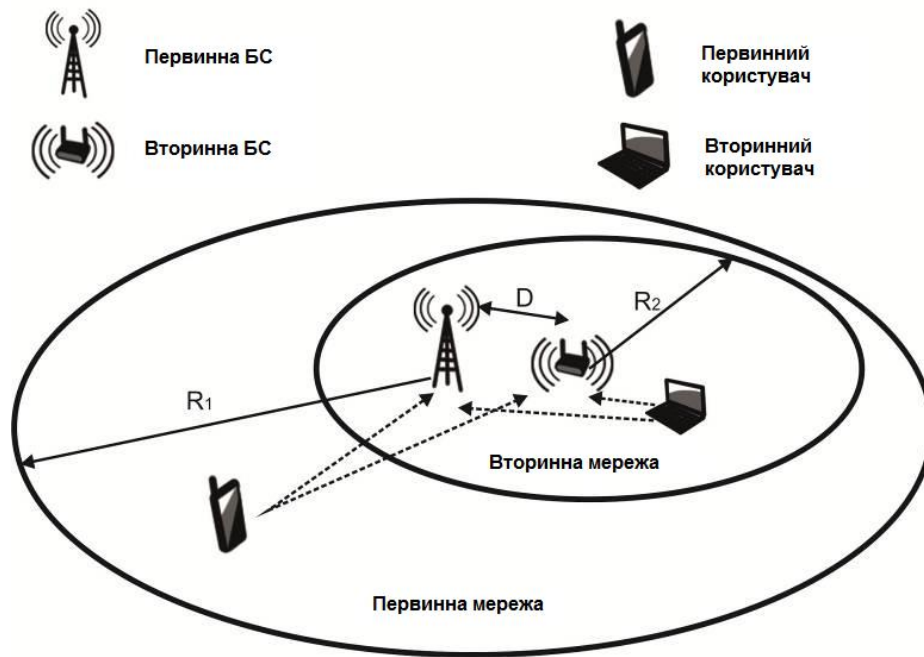


Рис. 3.4. Структура взаємодії первинної та вторинної когнітивної мережі.

Для даної моделі структура організації даних когнітивної радіомережі, що використовує OFDM, визначається наступним чином: у часовій області дані організовані у комірки (кадри) тривалістю 10 мс, а кожна з цих комірок складається з десяти суб-комірок (підкадрів) тривалістю по 1 мсек, які, в свою чергу, розділені на два слоти по 0,5 мсек. В частотній області дані згруповані в групи по 12 частот, кожна з яких займає частотний діапазон в 15 кГц, що дає в цілому смугу 180 кГц. Група з дванадцяти піднесучих частот тривалістю в один слот називається ресурсний блок (РБ). Найменша одиниця ресурсу є одна піднесуча тривалістю в один слот і називаються ресурсний елемент (РЕ). Залежно від типу захисного інтервалу (префіксу) - нормального або розширеного, один ресурсний блок складається з 84 або 72 ресурсних елементів, відповідно. Одним ресурсний елемент залежить від способу модуляції може включати в себе два біти для QPSK, 4 біти для 16QAM і 6 бітів для 64QAM [22].

Згідно 3GPP специфікаціям ширина каналу в мережі LTE може бути 1.4, 3, 5, 10, 15, 20 МГц [52]. Чим більша ширина каналу, тим вищі швидкості

передачі даних можна досягти. Весь доступний діапазон розбивається на ресурсні блоки (РБ). Нижче наводиться таблиця для визначення кількості доступних ресурсних блоків в залежності від ширини каналу. Для даної моделі когнітивної радіомережі вибрано ширину одного радіо каналу 5МГц.

Таблиця 3.1

Кількість ресурсних блоків в залежності від ширини каналу

	Ширина каналу, МГц					
	1.4	3	5	10	15	20
К-ть ресурсних блоків	6	15	25	50	75	100

На підставі цих даних можна обчислити максимальну теоретичну ємність однієї базової станції КР, розташованої в первинній мережі LTE. Так як для ширини каналу в 5МГц відповідає 25 ресурсним блокам OFDM, то загальне число ресурсних блоків можна визначити як:

$$\begin{aligned}
 N_{RB} &= (N_{band_1} + N_{band_3} + N_{band_39} + N_{band_40} + N_{band_41}) * 25 = \\
 &= (30 + 24 + 8 + 20 + 38) * 25 = 3000 \text{ ресурсних блоків.} \quad (3.2)
 \end{aligned}$$

Якщо припустити, що використовується 64QAM модуляція із стандартним захисним інтервалом, швидкість передачі даних може бути розрахована таким чином: кожен з 3000 ресурсних блоків складається з 84 ресурсних елементів, кожен з них по 6 бітів інформації. Тривалість елементу ресурсів - 0,5 мс. Таким чином, швидкість передачі даних [85]:

$$C_{max} = N_{RB} * N_{RE} * n_{mod} / t_{slot} = 3000 * 84 * 6 / 0.5 * 10^{-3} = 2883.9 \text{ Мбіт/с} \quad (3.3)$$

Проте, обчислена пропускна здатність є значно вищою ніж ефективна, так як це обчислення враховує всі передані біти, в тому числі і контрольні біти корекції помилок системи (FEC), біти контролю інформації, переданих базовою станцією і не береться до уваги число зайнятих частотних каналів первинним користувачем.

Таблиця 3.2

Пропускна здатність при використанні QPSK 1/2

	Cmax, Мбіт/с					
	Nch=1	Nch=2	Nch=3	Nch=4	Nch=5	Nch=6
Nop=1	476.65	472.64	468.64	464.63	460.62	456.62
Nop=2	472.64	464.63	456.62	448.61	440.60	432.59
Nop=3	468.64	456.62	444.60	432.59	420.57	408.55

Таблиця 3.3

Пропускна здатність при використанні 16QAM 3/4

	Cmax, Мбіт/с					
	Nch=1	Nch=2	Nch=3	Nch=4	Nch=5	Nch=6
Nop=1	1429.94	1417.92	1405.91	1393.89	1381.87	1369.86
Nop=2	1417.92	1393.89	1369.86	1345.83	1321.79	1297.76
Nop=3	1405.91	1369.86	1333.81	1297.76	1261.71	1225.66

Таблиця 3.4

Пропускна здатність при використанні 64QAM 4/5

	Cmax, Мбіт/с					
	Nch=1	Nch=2	Nch=3	Nch=4	Nch=5	Nch=6
Nop=1	2383.23	2363.20	2343.18	2323.15	2303.12	2283.10
Nop=2	2363.20	2323.15	2283.10	2243.04	2202.99	2162.93
Nop=3	2343.18	2283.10	2223.01	2162.93	2102.85	2042.77

У табл. 3.2-3.4 відображаються результати наближеної оцінки пропускної спроможності в когнітивній радіомережі для різної техніки модуляції, типу корекції помилок. Але в такому розрахунку вважалося, що всі робочі частоти в первинній мережі операторами мобільного LTE постійно зайняті первинними користувачами, і не беруться до уваги умови радіо середовища і вимоги користувачів КР. Пропонується створити інтелектуальну імітаційну модель такої системи, щоб визначити ефективну ємність обраної системи.

Ця модель являє собою спільну роботу первинної і вторинної когнітивної мережі. Первинна мережа представлена однією LTE коміркою, де співпрацюють три мобільні оператори з різним числом робочих частот. Первинні користувачі завантажують первинну систему викликами, і бажають отримати відповідні послуги. Нові первинні користувачі появляються випадковим чином і відповідають експоненціальному розподілу з $\lambda = N_{\max \text{ PU}} / T_{\text{PU}}$, де $N_{\max \text{ PU}}$ - очікувані максимальне число первинних користувачів, T_{PU} - середня тривалість виклику. Кожен первинний користувач належить одному з декількох операторів мобільного зв'язку, відповідно займає частотному каналі $N_{\text{ch } i}$ на час $T_{\text{ac } i}$.

Таблиця 3.5

Параметри якості моделювання для різних типів послуг

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

Оскільки когнітивна мережа надає мультисервісні послуги, то новий вторинний користувач потребує обслуговування одного з трьох типів трафіку з відповідними параметрами якості. Дані про різні типи користувачів зведені до таблиці 3.5 [85].

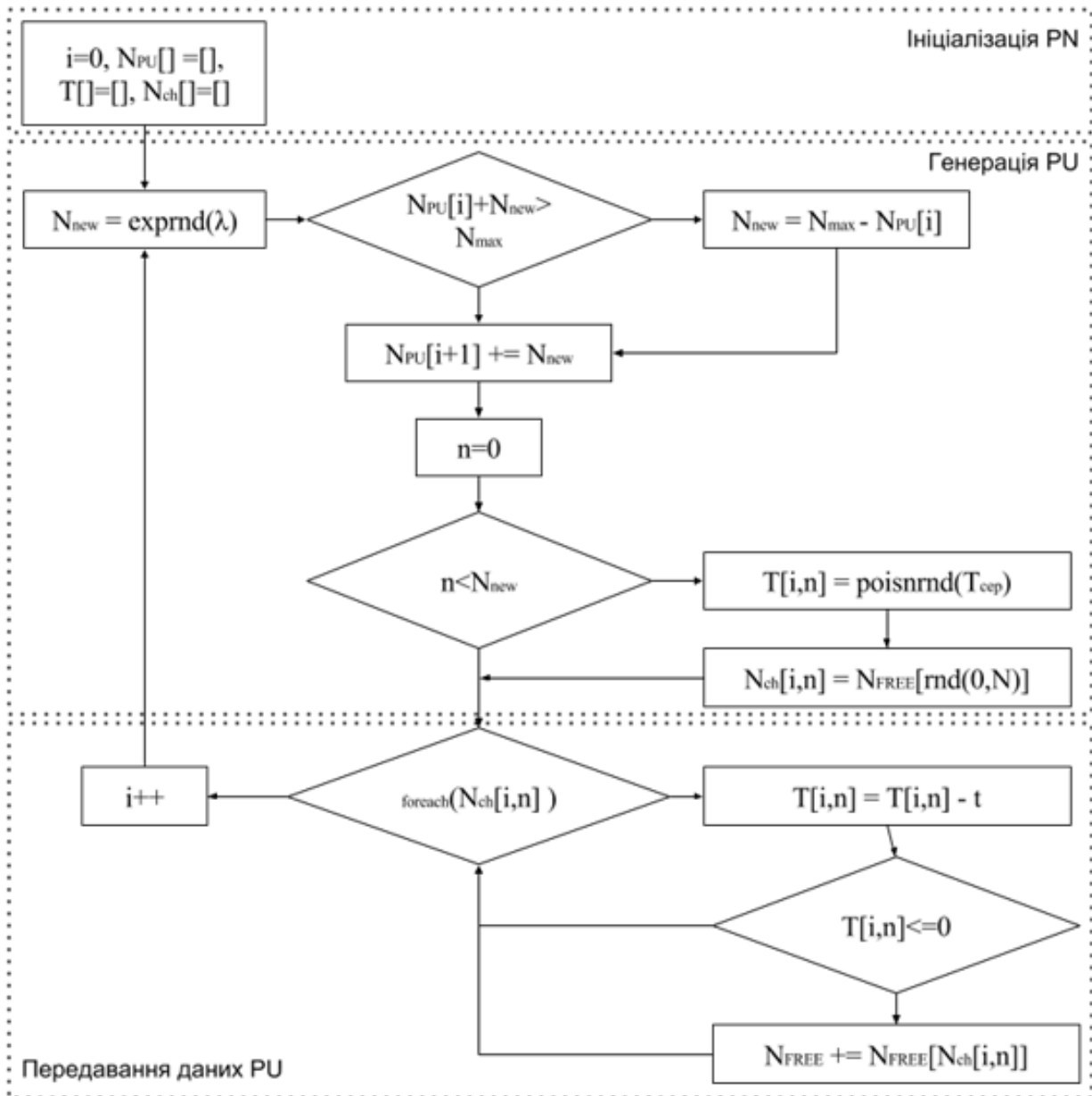


Рис. 3.5. Блок-схема алгоритму реалізації моделі первинної мережі.

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. Когнітивна мережа працює за наступним схемою [85]:

1. Спочатку відбувається сканування спектру для виявлення доступних радіочастотних каналів і визначення їх параметрів якості. У даній моделі використовується метод виявлення енергії, детальна модель якого буде описана в наступному підрозділі. Результатом сканування є масив даних із значеннями параметрів сканування для кожного частотного каналу. Масив передається до бази даних, де він зберігається на протязі тривалого часу.

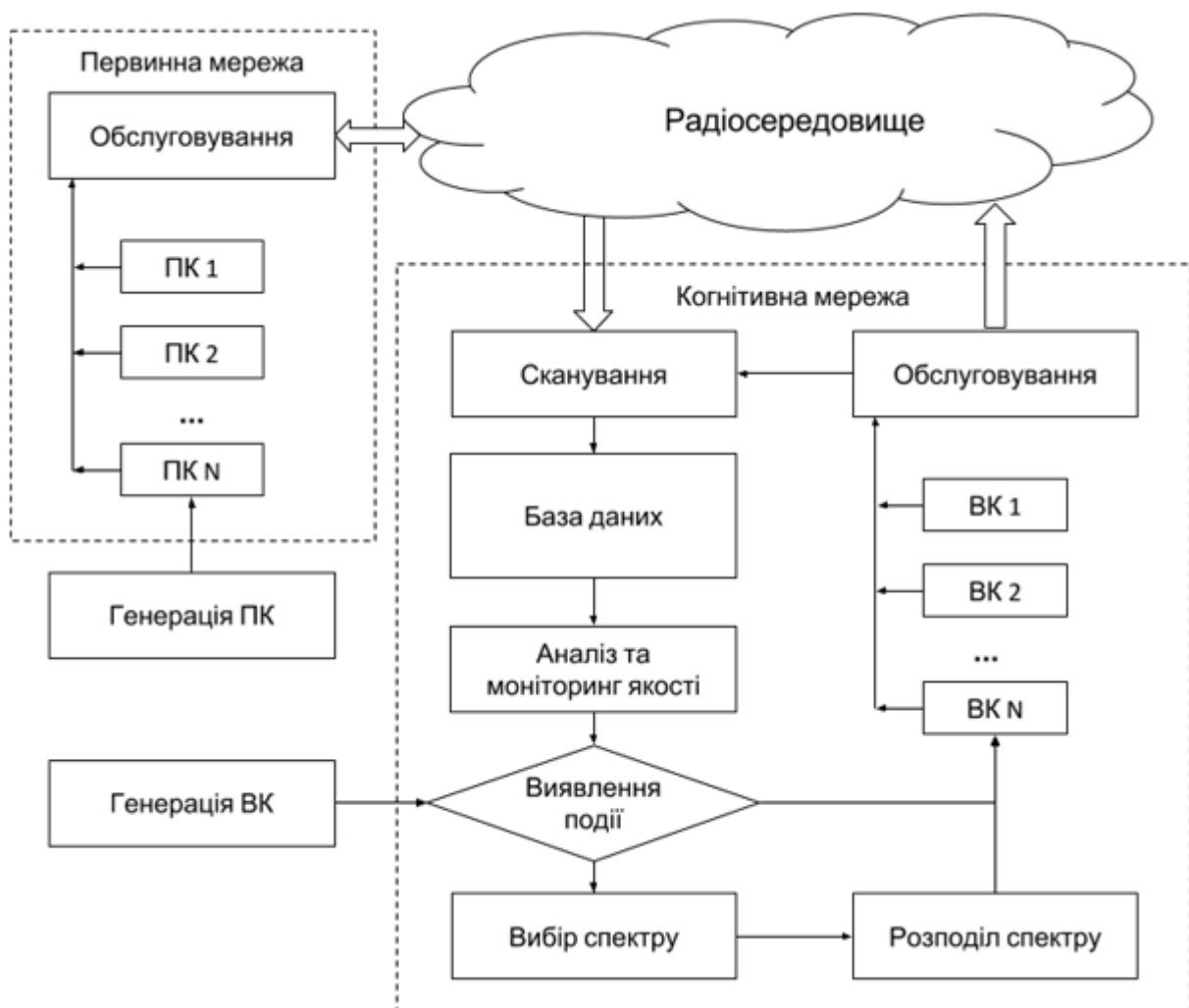


Рис. 3.5. Блок-схема імітаційної моделі системи керування когнітивною радіомережею.

2. Отримані дані аналізуються та проводиться обрахунок статистичних параметрів, моніторинг якісних параметрів та прогнозування майбутнього стану кожного частотного радіоканалу. Всі дані зберігаються до бази даних КР.

3. На основі проведеного моніторингу визначається присутність однієї або кількох подій:

- Поява первинного користувача: коли первинний користувач з'являється в певній смузі, всі користувачі КР, що використовували цю частину спектру повинні переміститися до нових смуг;
- Поява КР користувача: коли новий користувач КР з'являється в мережі КР, йому повинна бути призначена нова смуга спектру для його наступного обслуговування;
- Погіршення якості каналу: коли стан каналу погіршується, користувач КР повинен переключитися на інший діапазон спектру з кращою якістю.
- Звільнення каналу: коли первинний або когнітивний користувач завершує передавання інформації, він звільняє канал, що використовувався. В такому випадку, даний канал може бути використаний іншим користувачем КР, якщо є потреба.

4. Коли хоча б одна подія виявлена, тоді мережа КР переналаштовує свій розподіл ресурсів для підтримки якості обслуговування. У разі короткострокових змін каналу, таких як різке завмирання, мережа КР перерозподілить ресурси в межах діапазону спектру за допомогою методів вибору радіочастотних каналів. Імітаційна модель вибору каналу детальніше описана в підрозділі 3.4. Якщо з'являється первинний користувач або поточна смуга спектру не може забезпечити задану якість обслуговування на довгостроковий період з урахуванням поточних умов спектру, система керування КР визначає, чи вона приймає нового вхідного користувача КР чи

ні. Якщо новому користувачу КР дозволено передавати, йому присвоюються відповідні радіочастотні канали під час процесу вибору смуг спектру.

5. Відбувається передача даних користувачами КР на вибраних радіочастотних каналах. Проводиться обрахунок статистичних, якісних параметрів каналів. Також формується прогноз про наступну доступність кожного радіочастотного каналу, що використовуються мережею КР.

Таблиця 3.6

Параметри якості для різних типів модуляції

Тип модуляції	FEC	SINR, дБ	IM, дБ	D_{\max} , км
QPSK	1/2	2	2,5	3
16QAM	3/4	12,2	3	1,4
64QAM	4/5	18,6	4	0,7

Відношення сигнал/шум і рівень перешкод розраховується для кожного вторинного користувача в залежності від їхнього місця розташування. На основі чого визначається техніка модуляції, тип корекції помилок (FEC) (табл. 3.6 [45]) і визначається потрібна кількість і якість частотних каналів, що призначаються кожному вторинному користувачу на момент передачі.

Заключний етап - розрахунок загальної пропускної здатності для всіх користувачів. Моделювання було проведено для різної кількості частот в одному секторі з наявністю первинних користувачів одного, двох або трьох операторів мобільного зв'язку. Експериментальні результати моделювання відображаються в таблиці 3.7 і графічно на рис. 3.6.

Таблиця 3.7

Пропускна здатність при різній кількості робочих частот

	C, Мбіт/с					
	Nch=1	Nch=2	Nch=3	Nch=4	Nch=5	Nch=6
Nop=1	1992.79	1893.70	1837.89	1807.79	1789.53	1774.24
Nop=2	1966.87	1853.67	1784.09	1740.18	1708.05	1679.04
Nop=3	1940.14	1812.87	1729.56	1671.84	1625.85	1583.11

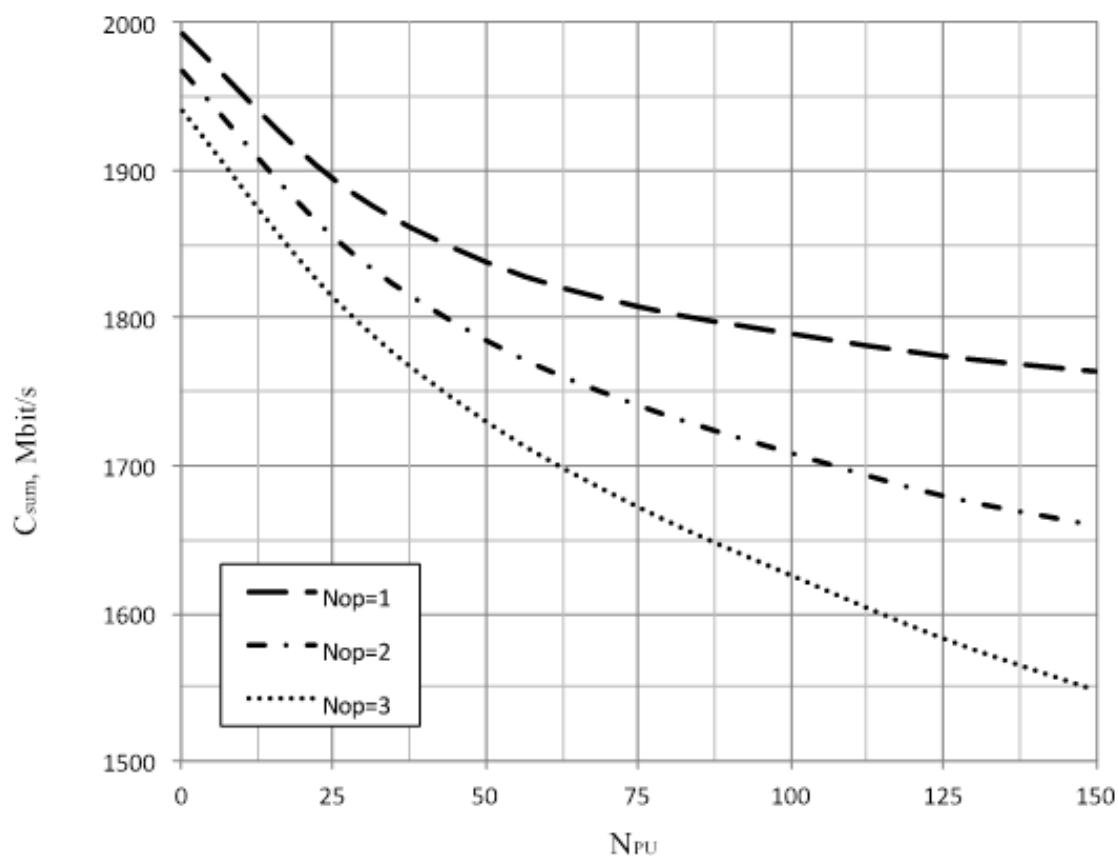


Рис. 3.6. Отримана за результатами моделювання залежність пропускної здатності мережі для різної кількості операторів мобільного зв'язку від кількості робочих частот.

3.3. Імітаційна модель процесу виявлення енергії сигналу на основі оцінки спектральної густини потужності

Оскільки, основними недоліками методу виявлення енергії 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. Тому для розв'язання цих проблем пропонується використати удосконалення методу виявлення енергії із застосуванням періодограми Уелча, що дозволяє проводити оцінку спектральної густини потужності сканованого сигналу від первинного користувача.

Для проведення теоретичної оцінки спектральної густини потужності, а також експериментів за допомогою математичного моделювання вибрана імітаційна модель, структурно-функціональна схема якої представлена на рис.3.7. Дана модель працює за наступною схемою: основний користувач працює в стандарті LTE і посилає сигнал в одному з частотних каналів шириною 5 МГц у робочій смузі LTE Band 1 (1920-1980 МГц і 2110-2170 МГц) або LTE Band 3 FDD (1710-1785 МГц і 1805-1880 МГц). У цьому каналі відбувається змішування з комплексним адитивним білим Гаусівським шумом. Для виявлення наявності сигналу використовується метод періодограми Уелча. Отже, спочатку, шум додається до вхідного ВЧ сигналу. Потім отриманий сигнал конвертується з пониженням частоти. Вхідний сигнал з шумом конвертується з пониженням частоти. Після чого, проводиться фільтрація нижніх частот сигналу. Для цього використовується еліптичний цифровий фільтр 8-го порядку з мінімальним затуханням в смузі затримки 20 дБ і частотою зрізу 5 МГц. Вхідний сигнал поділяється на сегменти в часовій області, і кількість сегментів позначається M . Після фільтрації, виконується швидке перетворення Фур'є і піднесення сигналу до

квадрату. Кількість елементів швидке перетворення Фур'є рівна 1024. Вхідна послідовність спочатку розділяється на M часових сегментів і далі виконується усереднення над кожним з цих сегментів. Розділення на сегменти робиться за допомогою часових вікон (рамок), які можуть перекриватися [87].

Кількість частотних відліків, що знаходяться близько області нульової частоти позначається L . Усереднене значення частотних відліків L передається до загальної бази даних когнітивної радіосистеми, де зберігаються ці дані для кожного частотного каналу в якому проводиться сканування. Вихідний сигнал з детектора енергії порівнюється з порогом, для визначення наявності сигналу.



Рис.3.7. Структурно-функціональна схема імітаційної моделі процесу виявлення енергії за допомогою періодограми Уелча із динамічною зміною кількості часових сегментів та частотних відліків усереднення вхідного сигналу.

В даній моделі вибір кількості часових сегментів M , їх перекриття, а також вибір кількості частотних відліків L для усереднення динамічно змінюється залежно від вхідних параметрів частотного каналу, що є основною відмінністю цієї моделі, від існуючих. Початкові значення цих параметрів вибрані $M=8$, без перекриття часових сегментів, $L=1$. Наступні значення визначається системою керування когнітивної мережі, базуючись на статистичній інформації про вибраний частотний канал, яку вона отримує із загальної бази даних КР [87].

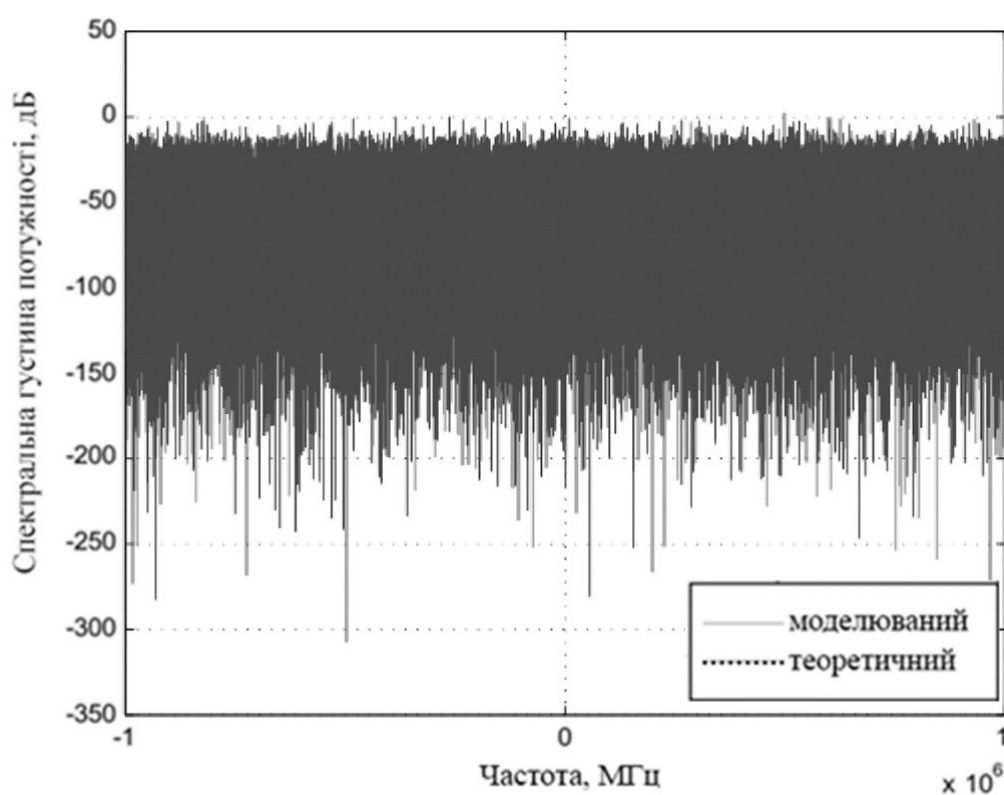
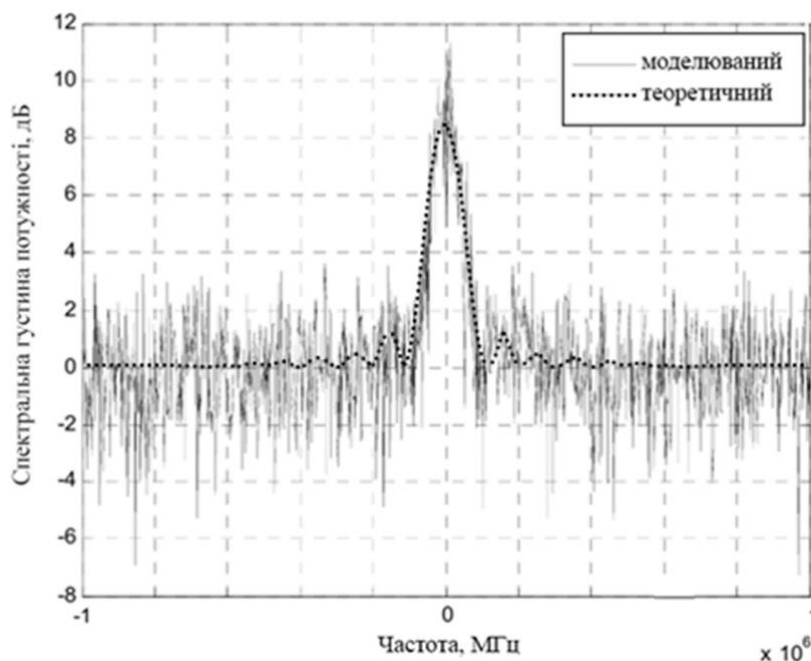


Рис.3.8. а) Спектральна густина потужності для варіанту відсутності сигналу первинного користувача



б)

Рис.3.8. б) Спектральна густина потужності для варіанту присутності сигналу первинного користувача.

Теоретична спектральна густина потужності показана на рис.3.8. для варіантів відсутності та присутності сигналу (суміші сигналу з шумом) первинного користувача. Змодельовану криву спектральної густини потужності було отримано за допомогою періодограми Уелча. На високих частотах можна помітити згладжування спектру при порівнянні теоретичної і змодельованої кривих – змодельована крива є вищою. Згладжування є результатом того, що модельований сигнал є дискретним в часі, а спектр сигналу є періодичним, але при аналізі сигнал є безперервним в часі, а його спектр є неперіодичним. Згладжування спектру не може бути усунуте повністю за допомогою функції управління вікнами, при отриманні результатів згладжування від прямокутної форми символу в сигналі. Змінюючи форму імпульсу згладжування буде зменшуватися.

3.4. Імітаційна модель процесу оцінки ефективності методів вибору радіочастотного спектру

На початковому етапі, вторинні користувачі повинні розпочати процес сканування спектру для виявлення первинних користувачів. Якщо поточний частотний канал вільний, то вторинний користувач може займати його для передачі даних. В іншому випадку, якщо канал знаходиться в зайнятому стані, вторинний користувач повинен почати процес передавання обслуговування спектру [88].

Важливою метрикою якості обслуговування (QoS) для оцінювання ефективності з'єднання вторинних користувачів є тривалість прийняття системного рішення S про розподіл радіоканалів. Вона складається з часу очікування W і тривалості доставки даних T . Таким чином, отримуємо [88]:

$$E[S] = E[W] + E[T] \quad (3.4)$$

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 першим часовим інтервалом, до завершення передавання даних з останнім часовим інтервалом. Очевидно, що кількість подій передавання обслуговування значимо впливає на тривалість часу доставки даних.

Структурно-функціональна схема імітаційної моделі оцінювання ефективності методів вибору спектру для різних алгоритмів перемикавання каналу показана на рис.3.9. Запропонована модель є одним з модулів інтелектуальної імітаційної моделі системи керування когнітивної радіо мережі, описаної в вище.

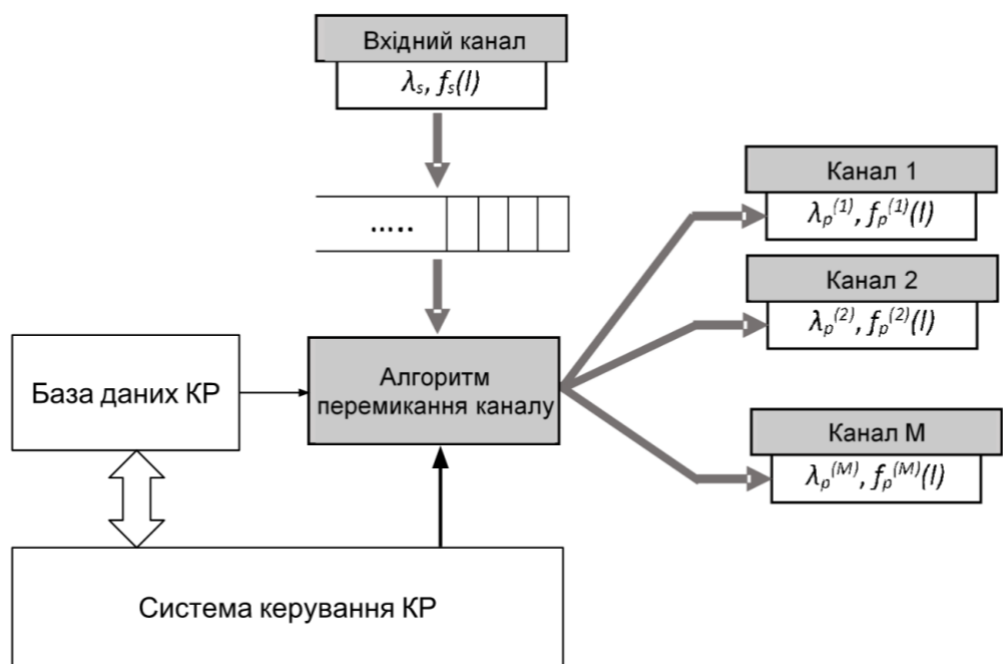


Рис.3.9. Структурно-функціональна схема імітаційної моделі процесу оцінювання ефективності методів вибору спектру на основі різних алгоритмів перемикання каналу.

Загальна тривалість вторинного з'єднання системи буде оцінено з використанням цієї моделі для різних алгоритмів перемикання каналу. Кожне первинне і вторинне з'єднання являє собою процес надходження пакетів з різною інтенсивністю, розподіленою по закону Пуассона [25]. Отже, позначимо середню інтенсивність поступлення пакетів для k -ого каналу первинного з'єднання як $\lambda_p^{(k)}$, а λ_s – середня інтенсивність поступлення пакетів вторинного з'єднання когнітивної радіо мережі. $L_p^{(k)}$ – розмір даних в бітах на пакет для k -ого каналу первинного з'єднання, а його функція розподілу ймовірності $f_p^{(k)}(l)$. L_s є розмір даних для вторинного з'єднання із функцією розподілу ймовірності $f_s(l)$.

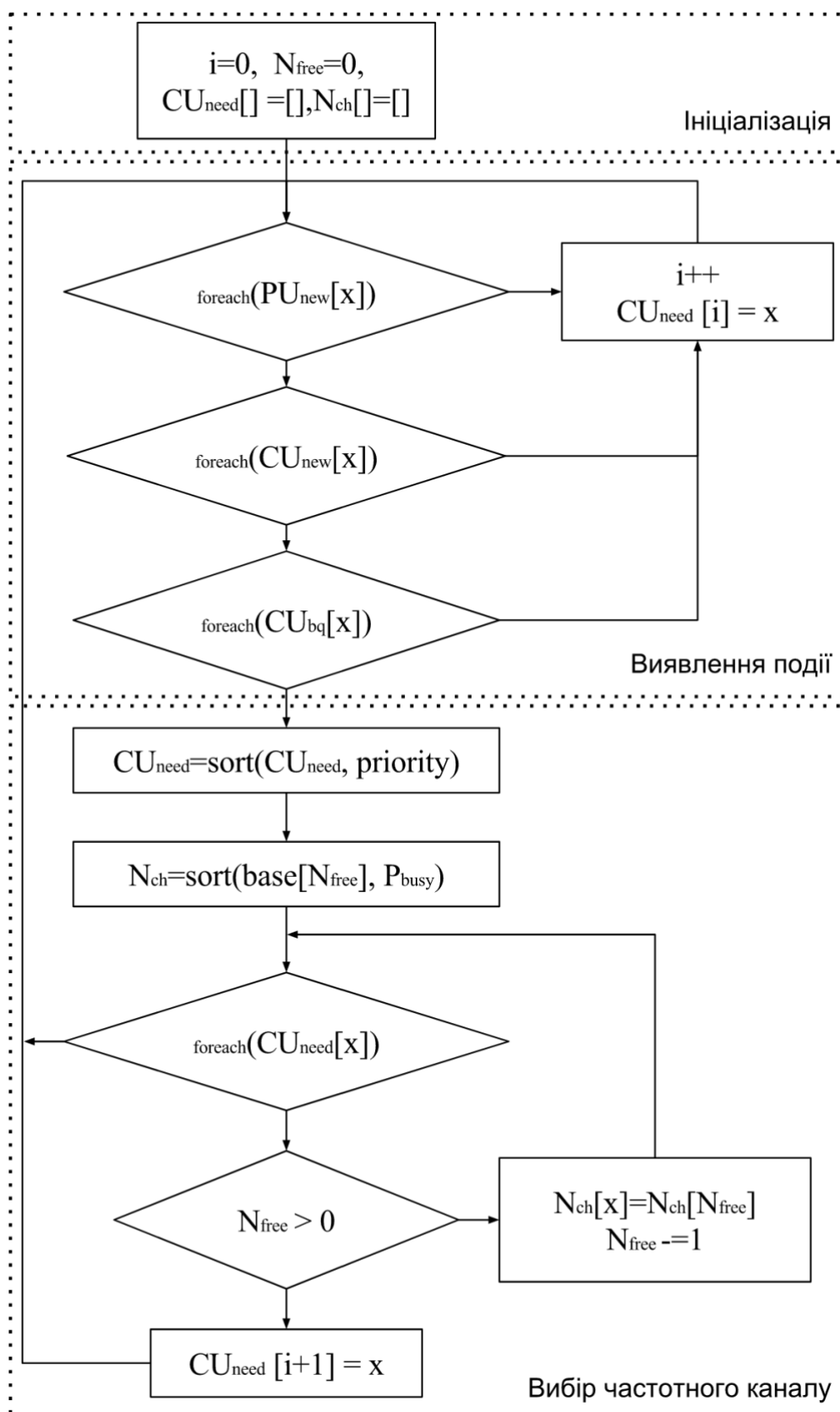


Рис.3.10. Блок-схема алгоритму реалізації методу вибору частотного каналу на основі оцінювання ймовірності зайняття каналу.

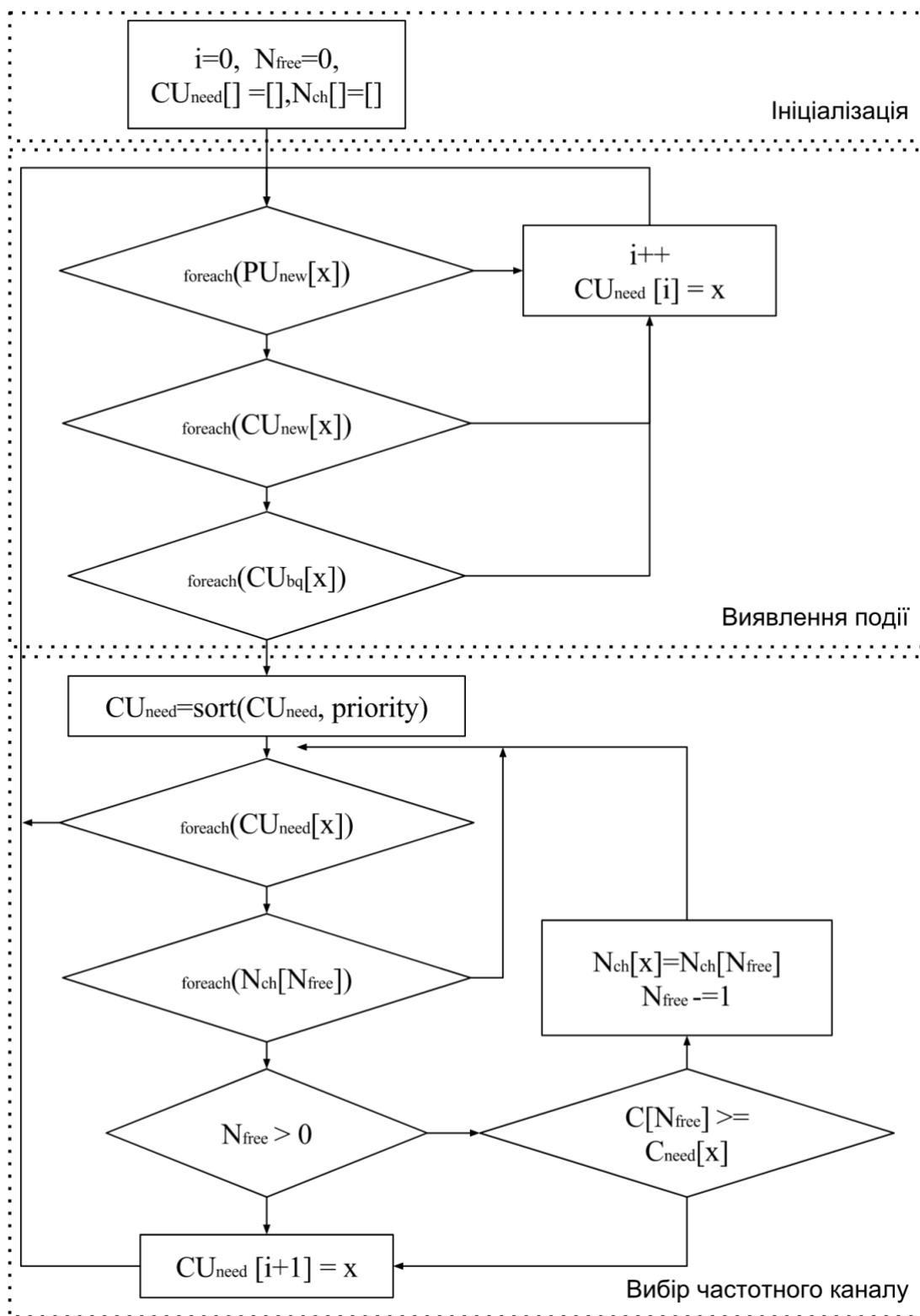


Рис.3.11. Блок-схема алгоритму реалізації методу вибору частотного каналу на основі параметрів отриманих при скануванні радіоканалу.

3.5. Алгоритм проактивного передавання смуг спектру для обслуговування первинних користувачів.

Пропонований протокол передачі обслуговування спектру побудований на основі вищевказаної політики спектру – передачі смуг спектру для обслуговування первинних користувачів. Він складається з двох частин. Перша частина, а саме Алгоритм 1 (блок-схема алгоритму представлена на рис. 3.12.), описує процес, як пара когнітивних користувачів ініціює нову передачу [85,91].

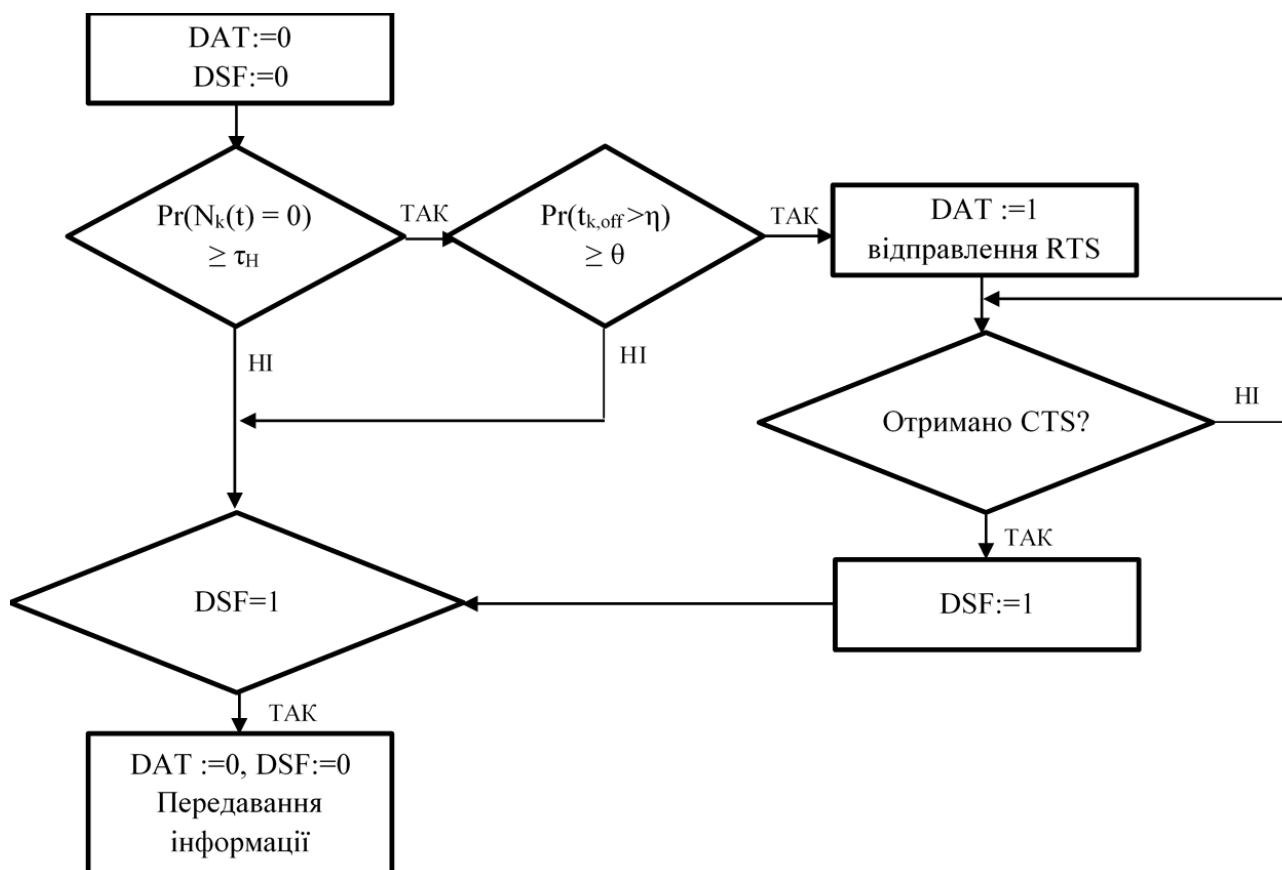


Рис. 3.12. Блок-схема алгоритму початку нової передачі.

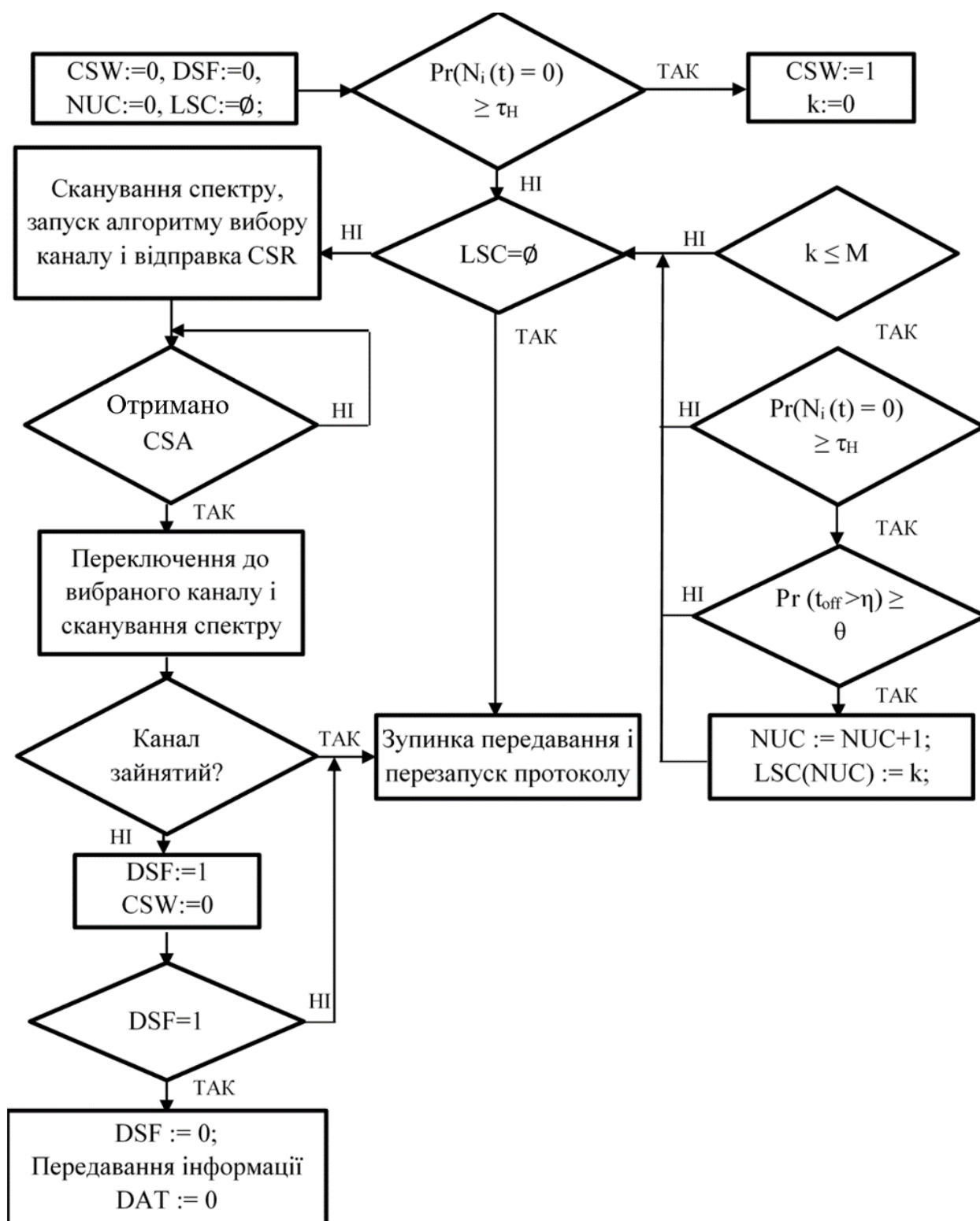


Рис. 3.13. Блок-схема алгоритму проактивної передачі обслуговування спектру.

Друга частина, а саме Алгоритм 2 (блок-схема алгоритму представлена на рис. 3.13), проактивно передавання смуг спектру для обслуговування

первинного екористувача під час активної передачі когнітивного користувача. Метою даного пропонованого алгоритму є визначення чи потрібно парі когнітивних користувачі, що здійснюють активну передачу пакету, проводити процес передачі обслуговування спектра, а потім переключитися на новий канал на після закінчення передачі даного пакету. Використання пропонованого протоколу дозволяє когнітивним користувачам уникнути перебоїв з первинним користувачем, коли той з'являються.

На рис. 3.13 позначення DAT є прапорцем дозволу для запиту на передачу даних, DSF є прапорцем дозволом власне передачі даних, t є початком 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.

3.6. Висновки до 3-ого розділу

1. У розділі проводилась оцінка пропускної здатності когнітивної радіомережі, що працює одночасно із мережею LTE, як первинною радіомережею. Для покращення швидкості передачі даних і ефективнішого використання вибраних діапазонів частот мережі LTE запропоновано використовувати технологію передачі OFDM, завдяки своїм можливостям для сканування та вибору спектра, разом із гнучкістю та адаптивністю, OFDM безумовно визначається як краща технологія передачі для систем КР. Запропоновано модель взаємодії первинної мережі LTE та вторинної КР мережі, що складається з первинної і вторинної радіо комірок.

2. Здійснено математичне імітаційне моделювання, для більш точної оцінки пропускної здатності системи КР при одночасній роботі до трьох операторів первинних мобільних мереж із різним числом робочих частот. На основі результатів моделювання визначено, що навіть при максимальній завантаженості абонентами первинної мережі середня пропускна здатність когнітивної радіомережі не менше 1500 Мб/с.

3. Проведено удосконалення методу сканування спектру та оцінки спектральної густини потужності, що базується на виявленні енергії за допомогою періодограми Уелча із динамічною зміною кількості часових сегментів та частотних відліків усереднення вхідного сигналу.

4. Удосконалено модель оцінки ефективності методів вибору смуги спектру на основі введеного показника продуктивності – тривалості прийняття системного рішення про розподіл каналів. Розроблено алгоритми реалізації методів вибору радіочастотного спектру з використанням балансування вхідного навантаження на основі сканування параметрів частотного каналу і на основі оцінювання ймовірності його заняття.

5. Запропоновано покращений алгоритм проактивного протоколу передавання смуг спектру для обслуговування користувачів, що базується на попередньому прогнозуванні стану частотного каналу із використанням статистичних даних про його використання.

РОЗДІЛ 4.

ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РАДІОЧАСТОТНОГО СПЕКТРУ В КОГНІТИВНИХ МЕРЕЖАХ

4.1. Дослідження ефективності сканування спектру

Розглянемо КР мережу, що складається з (вторинних) користувачів і загальної системи керування. Ця система керує мережею КР і всіма асоційованими k користувачами КР. Вважатимемо, що кожен користувач КР виконує локальне сканування спектру самостійно. У даному випадку розглядається i -й користувач, який працює на основі методу виявлення енергії. Сутність полягає у перевірці бінарних гіпотез [84]:

H_0 : Первинний користувач відсутній.

H_1 : Первинний користувач знаходиться в робочому стані.

$$x_i(t) = \begin{cases} n_i(t), & H_0 \\ h_i s(t) + n_i(t), & H_1 \end{cases} \quad (4.1)$$

де $x_i(t)$ – це спостережуваний сигнал на i -го КР, $s(t)$ є сигналом, що надходять від первинного передавача, $n_i(t)$ є адитивним Гаусівським білим шумом, і h_i є комплексним коефіцієнтом посилення каналу сканування між первинним користувачем і i -тим КР.

Виявлення енергії виконується за допомогою вимірювання енергії прийнятого сигналу $x_i(t)$ у фіксованому діапазоні смуги пропускання ΔF за час спостереження T_s . Енергія зібрана в частотній області позначається E_i , який служить в якості статистичного вирішення з наступним розподілом [26, 89]:

$$E_i(t) \approx \begin{cases} \chi_{2u}^2, & H_0 \\ \chi_{2u}^2(2\gamma_i), & H_1 \end{cases} \quad (2)$$

$$(4.2)$$

де χ_{2u}^2 означає центральний розподіл хі-квадрат із $2u$ ступенями свободи і $\chi_{2u}^2(2\gamma_i)$ означає нецентральний розподіл хі-квадрат зі $2u$ ступенями свободи і нецентральним параметром $2\gamma_i$, відповідно. Миттєве значення відношення С/Ш прийнятого сигналу i -тим КР це γ_i , а параметр $u = T_c \Delta F$ рівний добуток часу сканування на ширину смуги пропускання. Виявлення сигналу первинного користувача здійснюється шляхом порівняння енергії E_i з вибраним порогом ζ_i . Таким чином, ймовірність помилкового рішення визначається $P_f^{(i)} = \text{Prob}\{E_i > \zeta_i | H_0\}$ та ймовірність виявлення визначається $P_d^{(i)} = \text{Prob}\{E_i > \zeta_i | H_1\}$. За Релеєм для затухання каналу, середня ймовірність помилкового рішення, середня ймовірність виявлення і середня ймовірність не виявлення мають вигляд [26]:

$$P_f^{(i)} = \frac{\Gamma(u, \frac{\zeta_i}{2})}{\Gamma(u)} \quad (4.3)$$

$$P_d^{(i)} = e^{-\frac{\zeta_i}{2}} \sum_{p=0}^{u-2} \frac{1}{p!} \left(\frac{\zeta_i}{2}\right)^p + \left(\frac{1+\gamma_i}{\gamma_i}\right)^p \left[e^{-\frac{\zeta_i}{2(1+\gamma_i)}} - e^{-\frac{\zeta_i}{2}} \sum_{p=0}^{u-2} \frac{1}{p!} \left(\frac{\zeta_i \gamma_i}{2(1+\gamma_i)}\right)^p \right] \quad (4.4)$$

$$P_m^{(i)} = 1 - P_d^{(i)} \quad (4.5)$$

де $\bar{\gamma}_i$ означає середнє відношення сигнал-шум i -ого користувача КР, $\Gamma(\alpha)$ це гамма-функція, $\Gamma(\alpha, x)$ це неповна гамма-функція визначена як $\Gamma(\alpha, x) = \int_x^\infty t^{\alpha-1} e^{-t} dt$.

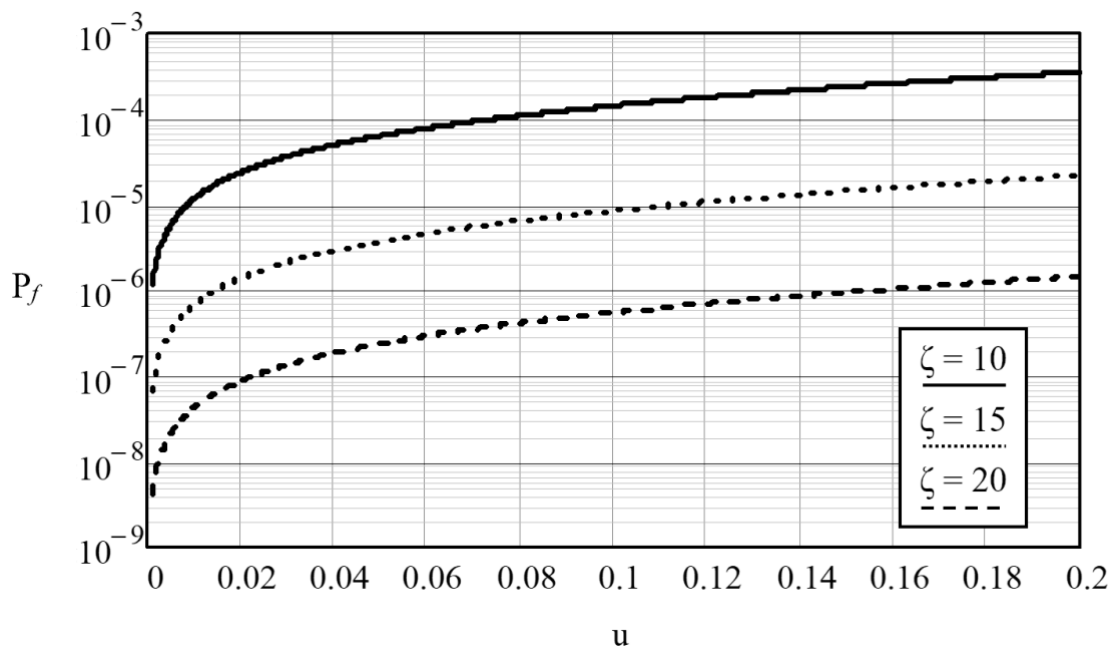


Рис. 4.1. а) Залежність ймовірності прийняття помилкового рішення від параметра сканування u при різних порогових значеннях енергії сигналу ξ .

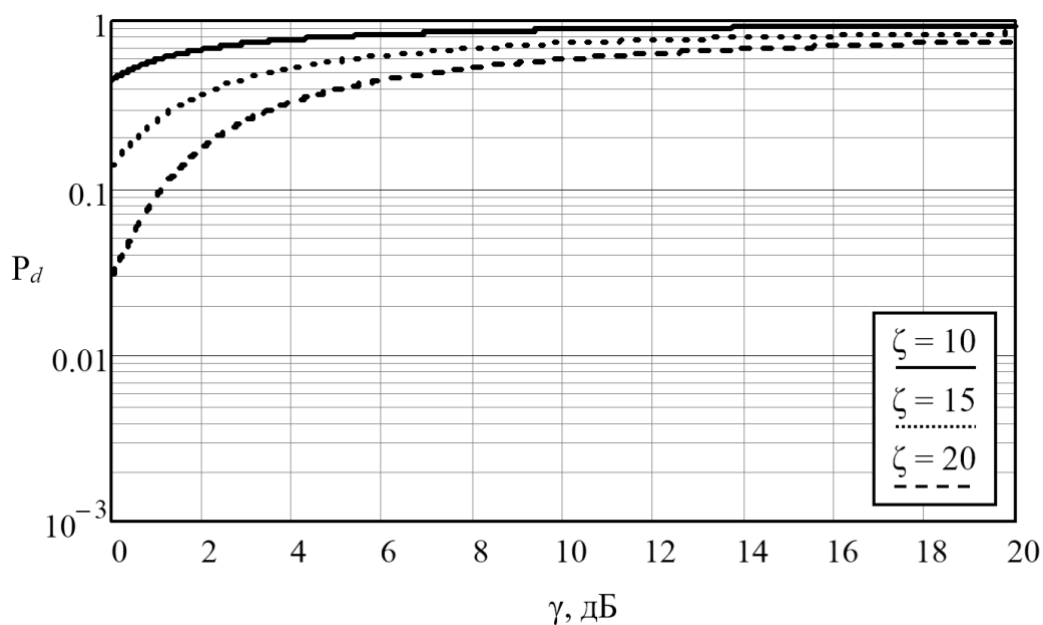


Рис. 4.1. б) Залежність ймовірності виявлення радіосигналу від відношення сигнал-шум γ при різних порогових значеннях енергії сигналу ξ .

На рис. 4.1, зображені криві ймовірності помилкового рішення та ймовірності виявлення енергії відповідно до формул (4.3) і (4.5) при значенні

порогової енергії 10, 15 і 20 дБ відповідно. На графіку 4.1 б), використовуємо параметр $u = 0,5$. Ретельне спостереження графіків показує, що ефективність виявлення енергії одним КР погіршується, коли відношення сигнал-шум зменшується, а детектування помилкового рішення ймовірніше при менших значеннях порогової енергії.

Ймовірність помилкового рішення при кооперативному скануванні спектра 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 [27]:

$$Q_f = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - P_f^{(i)}) = 1 - (1 - P_f^{(i)})^k \quad (4.6)$$

$$Q_m = \prod_{i=1}^k P_m^{(i)} = (P_m^{(i)})^k \quad (4.7)$$

$$Q_d = 1 - Q_m \quad (4.8)$$

де $P_f^{(i)}, P_m^{(i)}$ - ймовірності помилкового рішення та невиявлення i -го користувача, а k - загальна кількість користувачів що приймала участь у кооперативному скануванні.

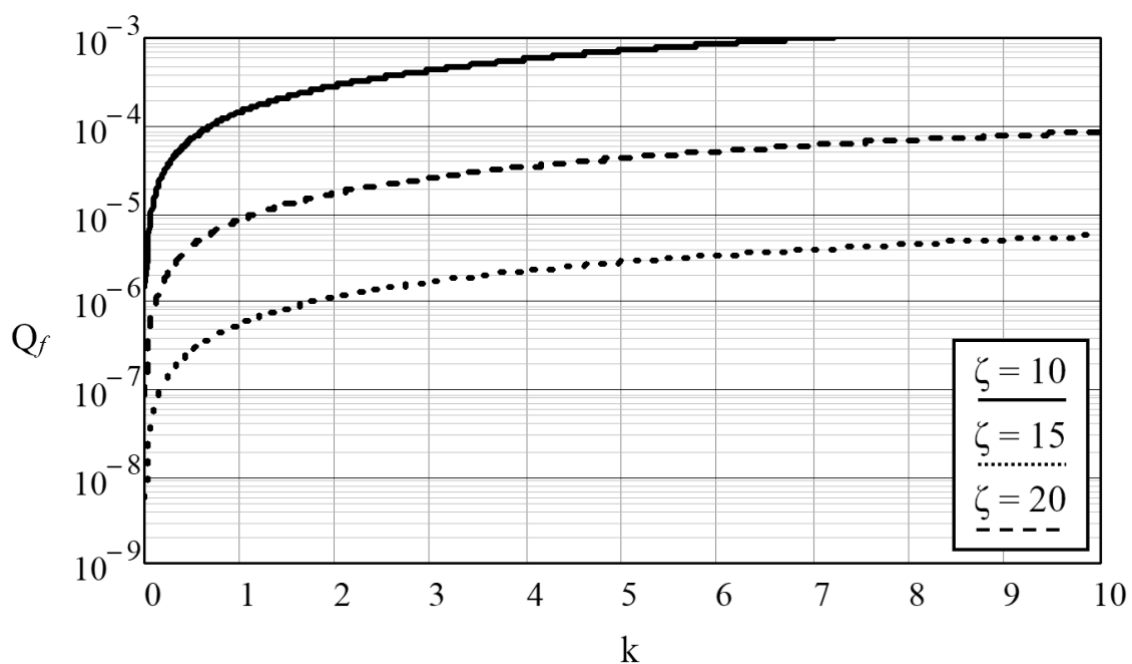


Рис. 4.2. а) Залежність ймовірності помилкового рішення від середньої кількості користувачів КР для випадку кооперативного сканування.

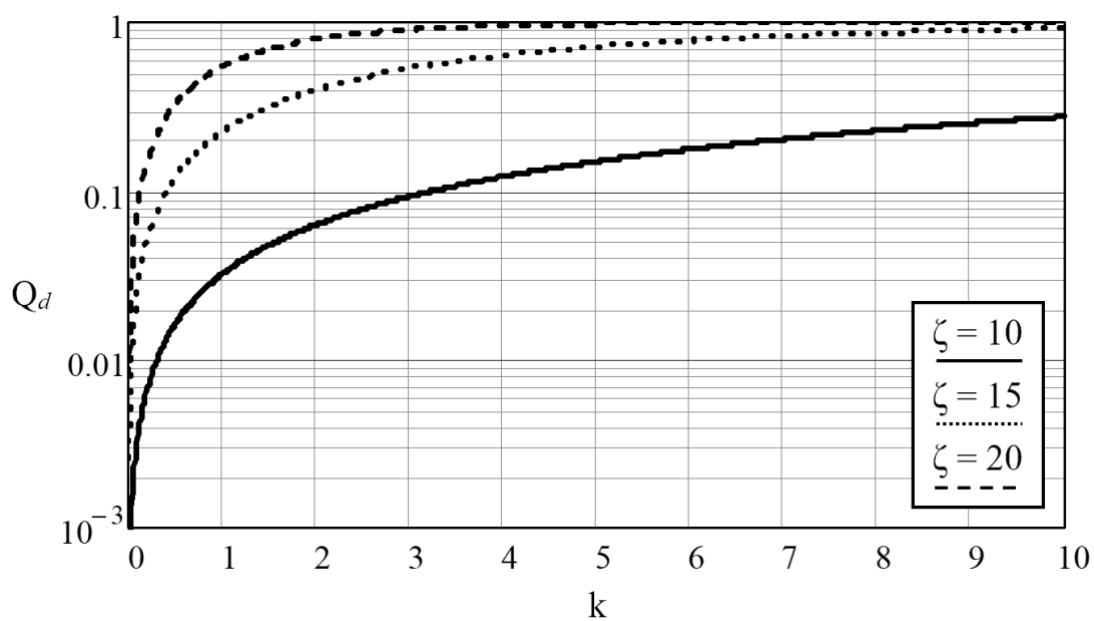


Рис. 4.2. б) Залежність ймовірності виявлення сигналу первинного користувача від середньої кількості користувачів КР для випадку кооперативного сканування.

Із залежності зображених на рис. 4.2, чітко видно, що навіть один додатковий користувач надзвичайно сильно покращує ефективність сканування навіть при низьких значеннях сигнал-шум. Отже, кооперативне виявлення є більш точними, оскільки невизначеність у при виявленні одним користувачем може бути мінімізована за рахунок співпраці користувачів. Крім того, ефект багатопроменевого загасання й затінення зменшується, так що ймовірність виявлення в сильно затінених зонах навколишнього середовища покращується.

4.2. Моделювання ймовірнісних характеристик приймача з використанням періодограми Уелча

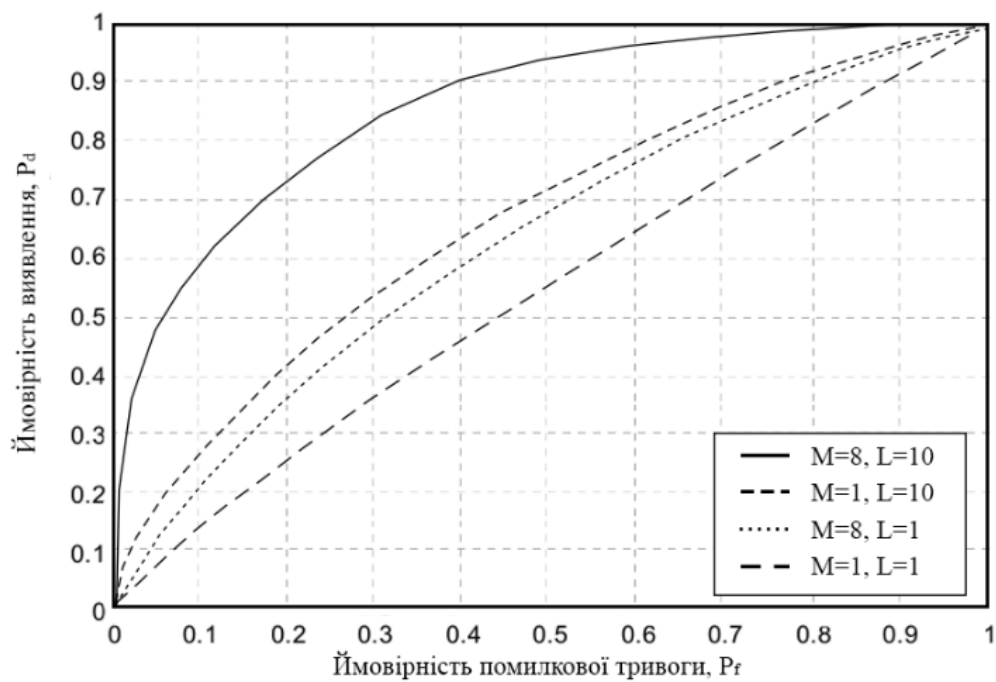
Використовуючи комп'ютерне моделювання випадкового процесу за допомогою метода Монте-Карло, проведено аналіз робочих характеристик приймача з використанням періодограми Уелча. Кожен сценарій моделювання повторюється 10^5 разів. При моделюванні використовуються комплекс адитивного білого Гаусівського шуму в каналі і QPSK маніпульованого інформаційного сигналу. Для відношення сигнал-шум взяті значення -5 і 2 дБ. Кількість елементів ШПФ $N_{\text{FFT}} = 512$ або 1024, що відповідає довжині сегмента і прямокутного вікна перетворення. При не використанні перекриття, блок довжиною N_b рівний 205 і 410 символів для ШПФ розміром 512 і 1024, відповідно. І при використанні перекриття N_b відповідно становить 116 або 231. При аналізі та моделюванні використовувався час сканування $T_c = 20$ мс. На рис.4.3 представлені теоретичні і змодельовані криві робочих характеристик приймача для періодограми Уелча. Теоретична залежність між ймовірністю виявлення сигналу первинного користувача та ймовірністю помилкового рішення обчислена за допомогою рівнянь [87]:

$$P_f = P\{Y > \lambda | H_0\} = \frac{\Gamma\left(LM, \frac{\lambda}{2\sigma^2}\right)}{\Gamma(LM)} \quad (4.9)$$

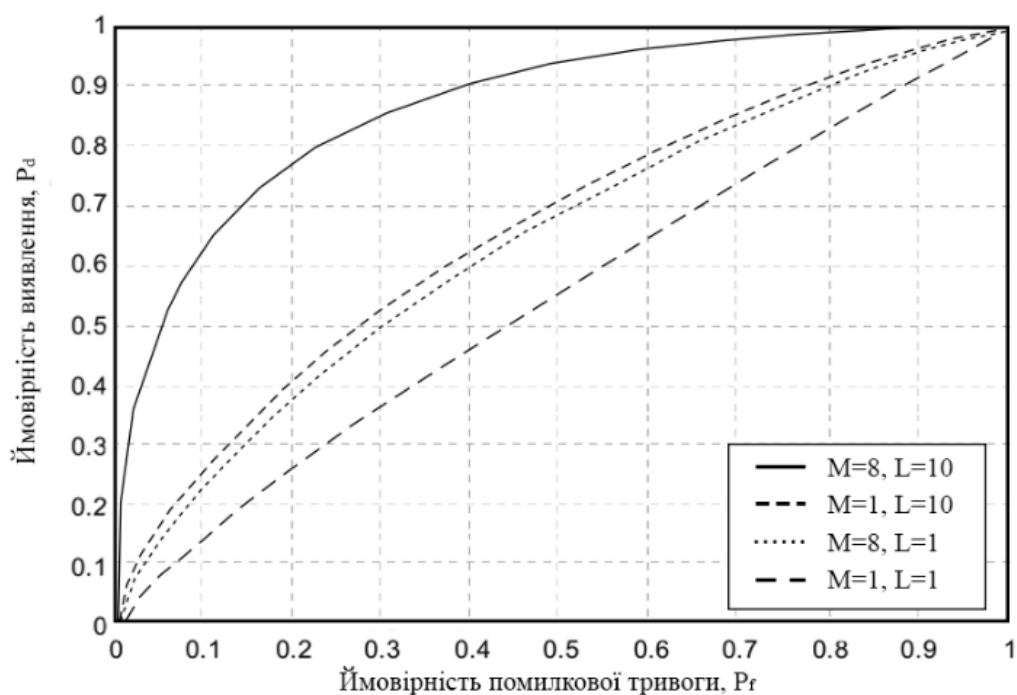
$$P_d = P\{Y > \lambda | H_1\} = Q_m\left(\sqrt{\frac{LMA^2T}{\sigma^2}}, \sqrt{\frac{\lambda}{\sigma^2}}\right) \quad (4.10)$$

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, A - амплітуда сигналу.

На рис.4.5.а. зображені теоретичні та змодельовані криві робочих характеристик приймача для одного сегмента і восьми сегментів при виявленні одного QPSK-сигналу, відношення сигнал-шум рівне -5 дБ, $N_{\text{FFT}}=1024$. У цьому випадку число частотних відліків зосереджених біля нульової частоти $L = 10$. Порівнюючи два випадки: у першому випадку використовуємо тільки один сегмент, який відповідає періодограмі, а у другому випадку використовуємо 8 сегментів, що не перекриваються. Видно, що продуктивність краща при використанні 8 неперекриваючих один одного сегментів. На рис.4.3.а також показано виявлення сигналу QPSK, коли відношення С/Ш = -5 дБ і $N_{\text{FFT}} = 1024$. У цьому випадку кількість частотних відліків зосереджених біля нульової частоти $L = 1$. Тепер можна побачити, що продуктивність гірша, ніж у випадку, коли $L = 10$. На рис.4.3.б випадку використовується $N_{\text{FFT}} = 512$. Порівнюючи рис.4.3.а і рис.4.3.б можна помітити, що довжина ШПФ не впливає на продуктивність.

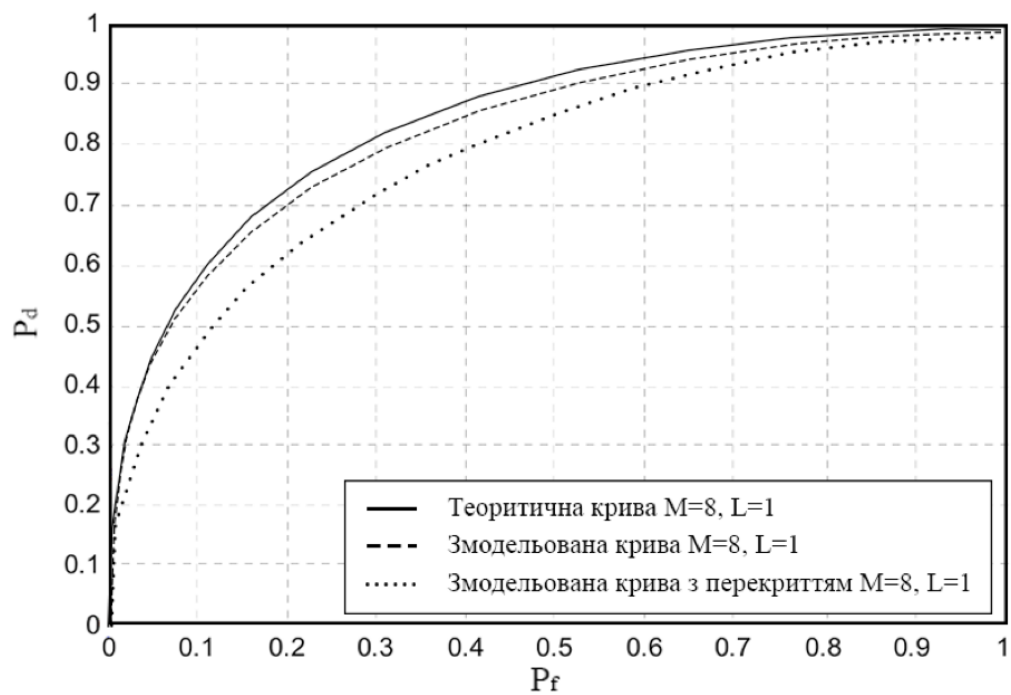


а)

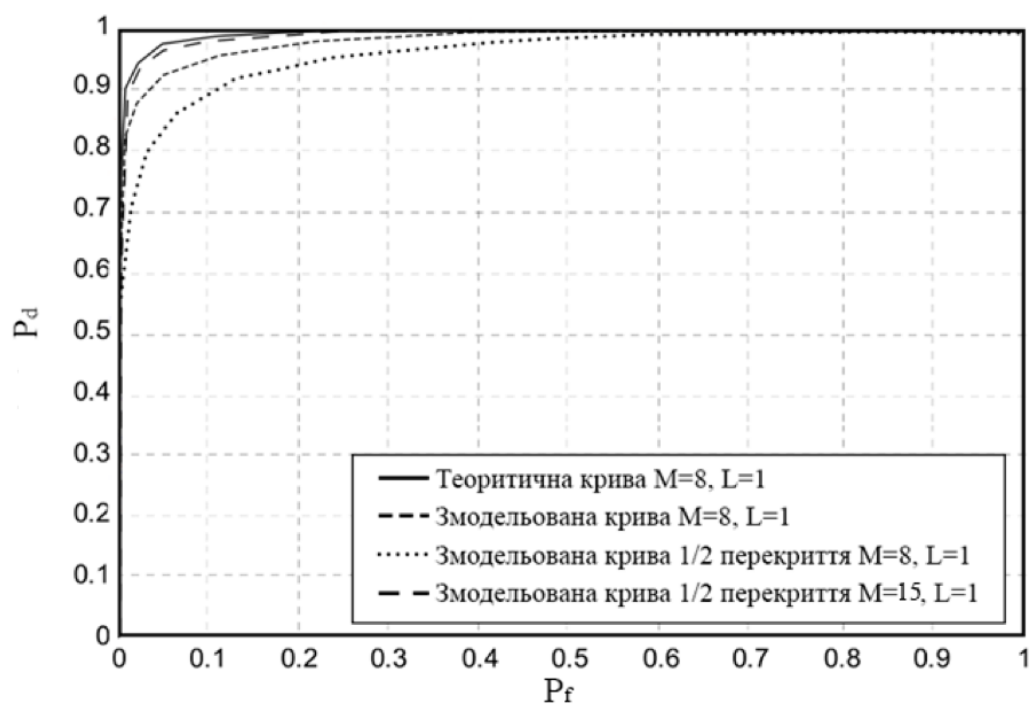


б)

Рис.4.3. Залежність між ймовірністю виявлення сигналу первинного користувача та ймовірністю помилкового рішення для відношення сигнал-шум -5дБ при а) $N_{FFT} = 1024$; б) $N_{FFT} = 512$.



а)

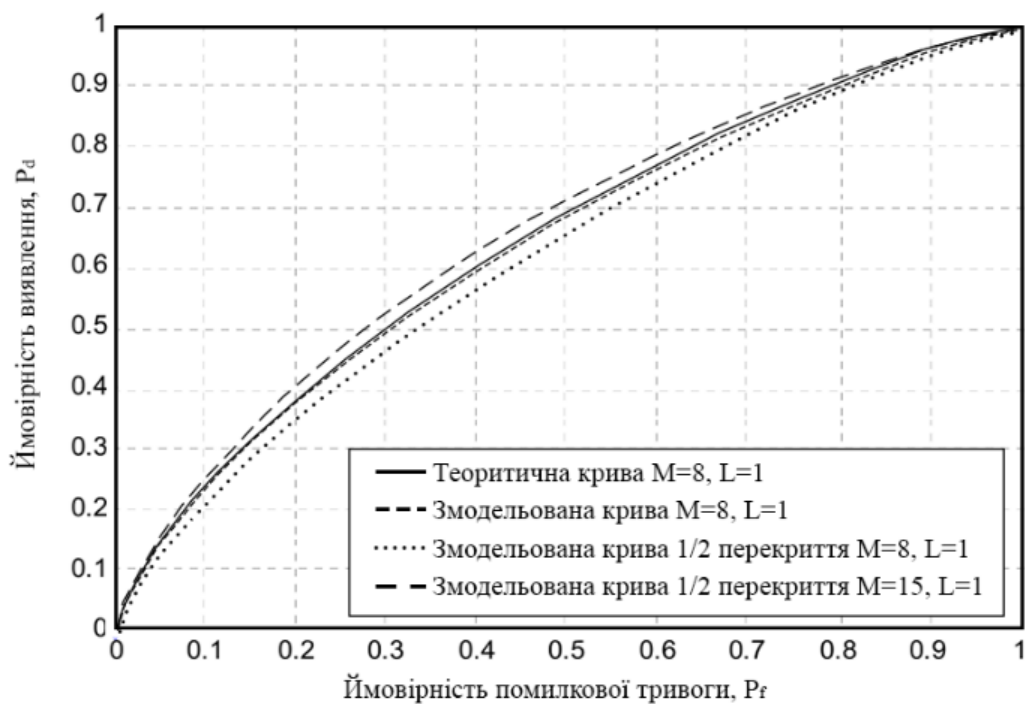


б)

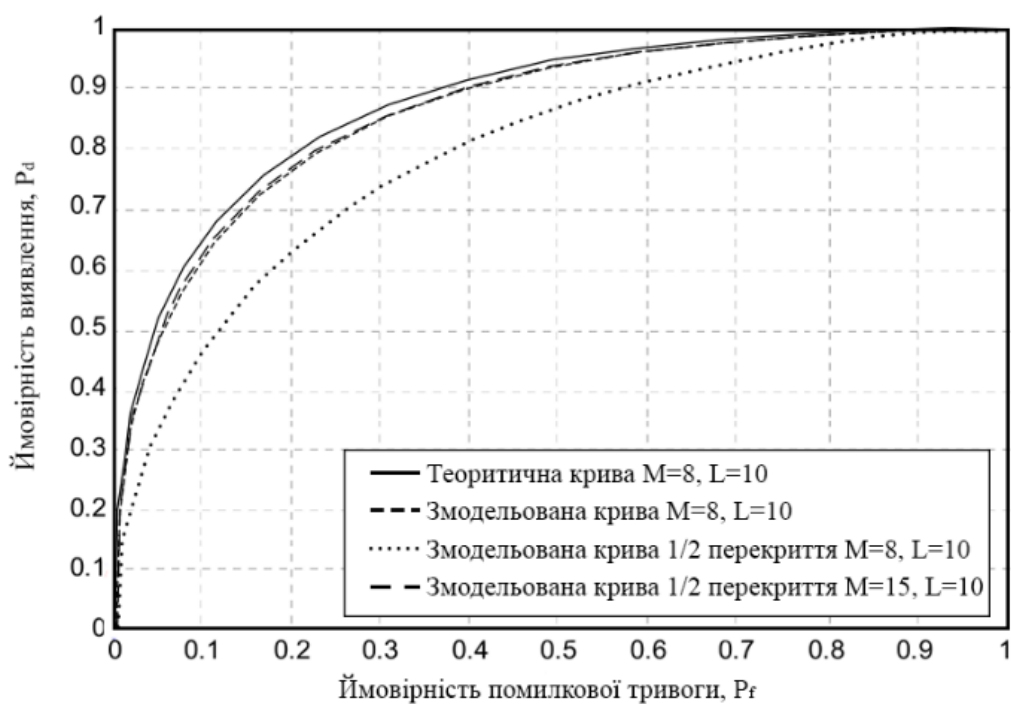
Рис.4.4. Залежність між ймовірністю виявлення сигналу первинного користувача та ймовірністю помилкового рішення при
 а) $N_{\text{FFT}} = 1024$, $C/\text{Ш} = -5$ дБ, б) $N_{\text{FFT}} = 1024$, $C/\text{Ш} = 2$ дБ

На рис.4.4.а. представлений випадок перекриття для восьми сегментів і довжина блока $N_p = 231$ елементи. У випадку сегментів, що не перекриваються $N_p = 410$ елементів. Сегменти перекривають один на одного на половині елементів N_{FFT} . Можна помітити, що при використанні перекриття продуктивність майже така ж, як і без перекриття, але тепер довжина пакета може бути значно меншою.

На рис.4.4.б. зображені робочі характеристики приймача, коли $N_{\text{FFT}} = 1024$, $C/\text{Ш} = 2$ дБ, $L = 1$, і в разі перекриття $M = 8$ або 15 . Також моделюється випадок, коли $M = 15$ і $N_p = 205$, тобто довжина пакета для випадку, коли не використовуємо перекриття. Порівнюючи випадок з перекриттям із 15 сегментів та випадок без перекриття з восьми сегментів, то чітко видно поліпшення продуктивності при останньому випадку. Рис.4.5.а. і рис.4.5.б. відображають випадки перекриття і без перекриття, коли $N_{\text{FFT}} = 512$, $C/\text{Ш} = -5$ дБ, $L = 1$ або 10 , і в разі перекриття $M = 8$ або 15 . При використанні $L = 1$, можна бачити, що продуктивність гірша, ніж у випадку, коли $L = 10$. Крім того, розрахунки показують, що можна досягти за невеликого приросту продуктивності за допомогою перекриття в порівнянні з випадком без перекриття. Тим не менш, навіть з усередненням і перекриттям ймовірність виявлення мала з низькою ймовірністю помилкового рішення.



а)



б)

Рис.4.5. Залежність між ймовірністю виявлення сигналу первинного користувача та ймовірністю помилкового рішення при:
 а) $N_{\text{FFT}} = 512$, $C/\text{Ш} = -5$ дБ; б) $N_{\text{FFT}} = 512$, $C/\text{Ш} = 2$ дБ.

4.3. Дослідження ефективності алгоритмів вибору каналів з балансуванням навантаження

На основі проведеного імітаційного моделювання здійснимо порівняння алгоритму без балансування навантаження із запропонованими алгоритмами вибору каналів на основі ймовірності та на основі сканування. Порівняння ефективності проведено по параметру тривалості прийняття системного рішення про розділ радіоканалів для кожного з алгоритмів в залежності від інтенсивності вхідного навантаження [88].

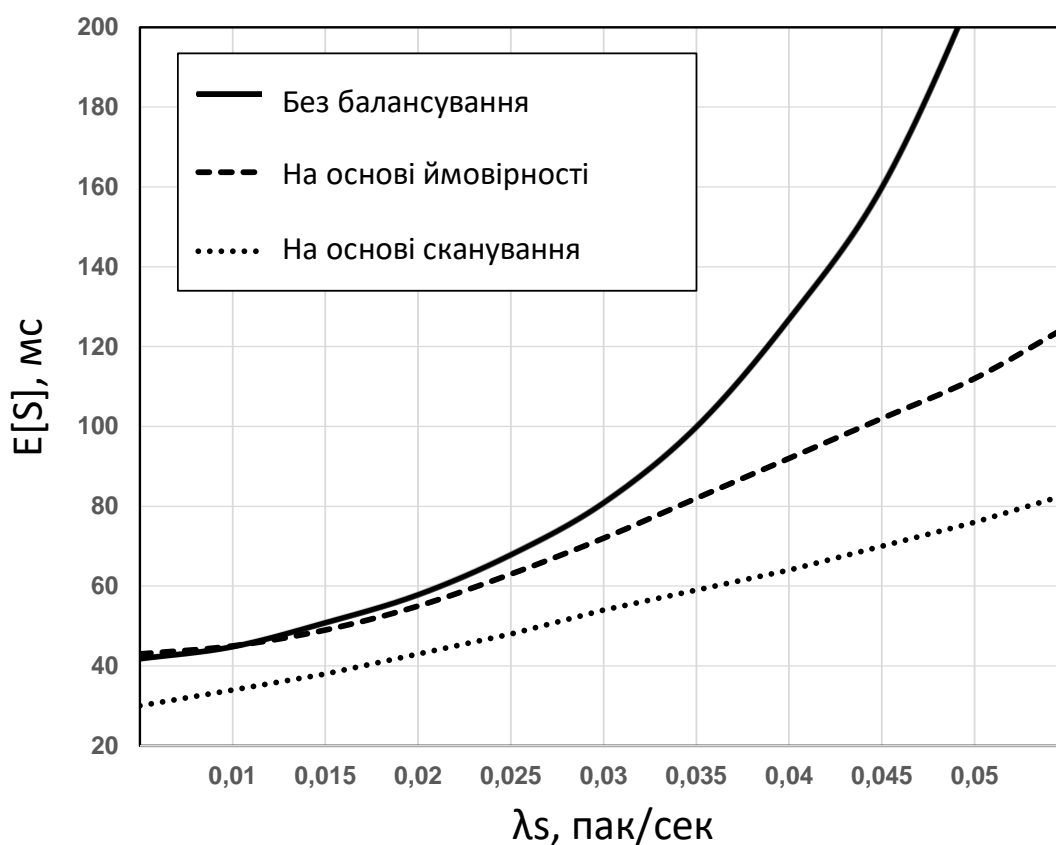


Рис. 4.6. Залежність тривалості прийняття системного рішення від інтенсивності вхідного навантаження при $\tau=5$, $P_m=0.1$, $P_f=0.1$, $E[Xs]=10$;

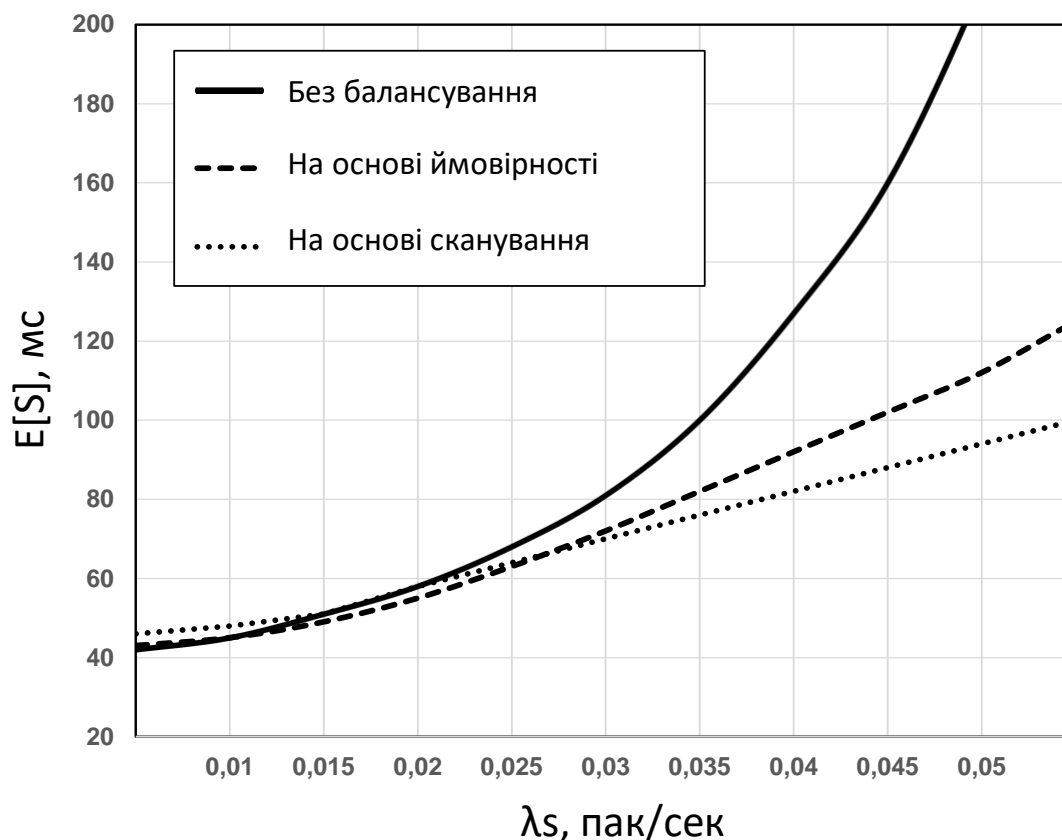


Рис. 4.7. Залежність тривалості прийняття системного рішення від інтенсивності вхідного навантаження при $\tau=10$, $P_m=0.1$, $P_f=0.1$, $E[X_s]=10$;

Результати моделювання графічно представлені на рис. 4.6-4.7. З наведених графіків можна побачити залежності тривалості прийняття системного рішення $E[S]$ від середньої швидкості надходження вторинних з'єднань λ_s для трьох різних алгоритмів переключення каналів: алгоритм без балансування навантаження, алгоритм на основі оцінювання ймовірності зайняття і алгоритм на основі сканування параметрів радіоканалу для значень середнього часу сканування одного частотного каналу $\tau=5$ та $\tau=10$ мс. Оскільки в алгоритмі без балансування навантаження всі вторинні з'єднання обирають канал з найменшою ймовірністю зайняття, то порівнявши його з двома іншими алгоритмами балансування навантаження, можна сказати наступне: для алгоритму переключення каналів на основі сканування його параметрів, загальний час перерозподілу каналів є найкоротшим, коли τ є низьким, навіть при високих навантаженнях, оскільки даний алгоритм за

допомогою широкосмугового сканування може досить істотно скоротити час очікування. Але коли τ високий, а $\lambda_s < 0.025$, то найнижчий загальний системний час показує алгоритм на основі оцінювання ймовірності зайняття, 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.

4.4. Оцінювання ефективності методів передавання смуг спектру для обслуговування користувачів

Проведемо імітаційне моделювання для порівняння пропонованого проактивного методу передавання смуг спектру для обслуговування користувачів із реактивним методом на основі запропонованих алгоритмів. У реактивному підході передавання смуг спектра, когнітивний користувач здійснює передавання пакету даних без прогнозування доступності поточного каналу до моменту завершення передавання. Тобто, когнітивний користувач не змінює поточного каналу до завершення передавання пакету, якщо попередній пакет успішно прийнятий. Передача обслуговування спектру виникає, тільки якщо поточна передача фактично стикається з передачею первинного користувача і пакет, що створив колізію повинен передатися повторно. Для оцінки ефективності кожного методу проведемо обрахунок залежностей середнього значення пропускної спроможності для когнітивного користувача та ймовірності виникнення колізії від середньої кількості первинних користувачів. Для цього використаємо модель системи керування когнітивною мережею описану в попередніх розділах. Спершу проведемо моделювання для визначення середнього значення пропускної спроможності для когнітивного користувача залежно від завантаженості первинної мережі [85].

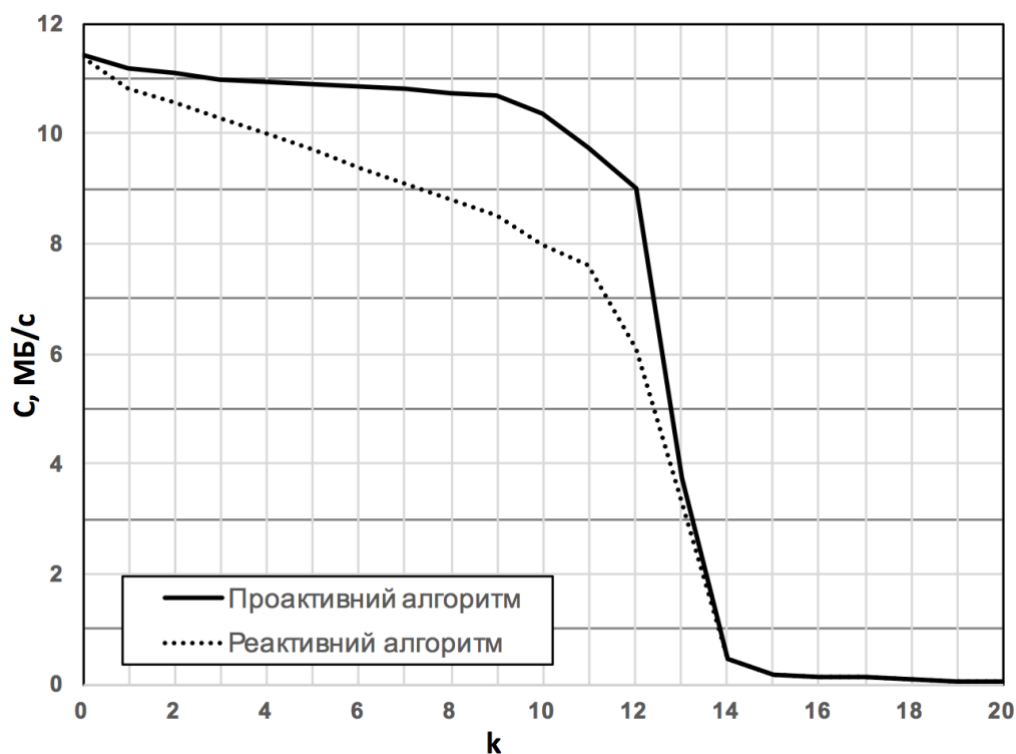


Рис. 4.8. Залежність середнього значення пропускної спроможності для когнітивного користувача від середньої кількості первинних користувачів для проактивного і реактивного методів передавання смуг спектру для обслуговування користувачів.

На рис. 4.8 представлено результат моделювання для проактивного і реактивного методів передавання смуг спектру для обслуговування користувачів – залежність середнього значення пропускної спроможності для когнітивного користувача від середньої кількості первинних 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.

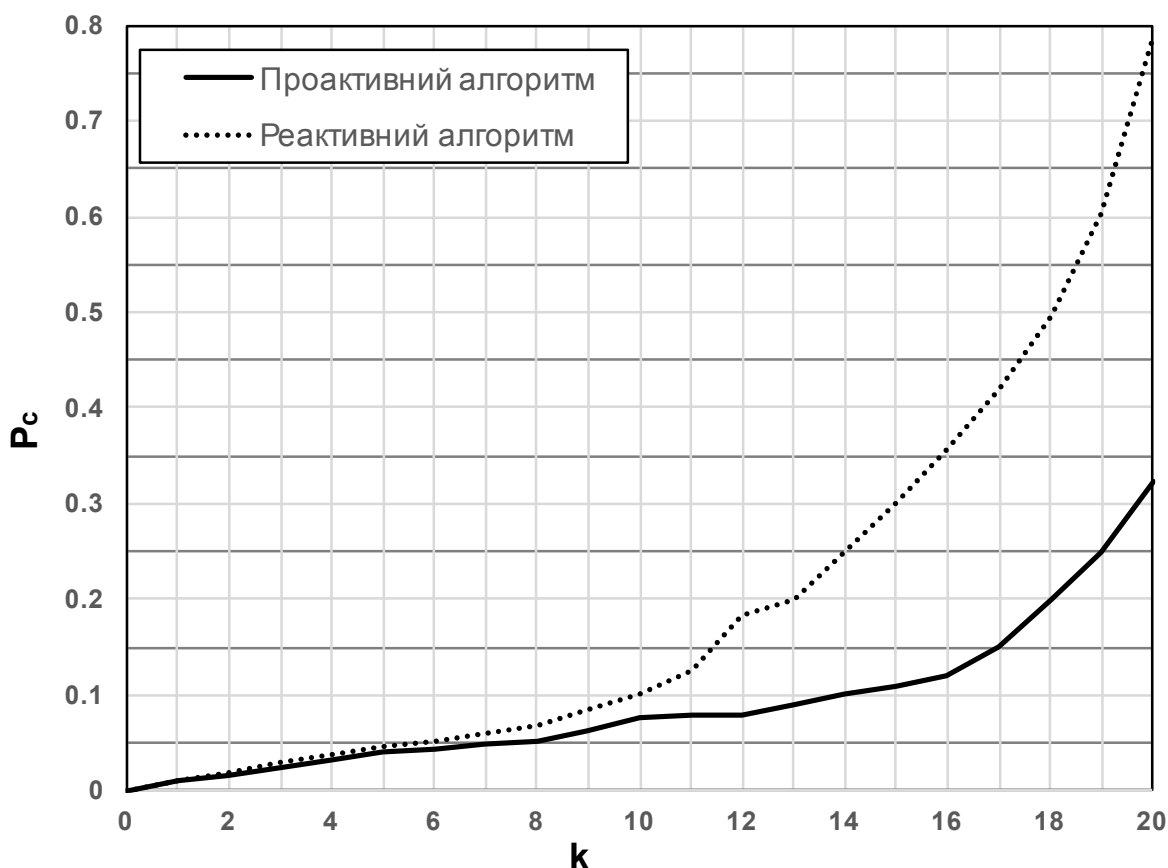


Рис. 4.9. Залежність ймовірності виникнення колізії від середньої кількості первинних користувачів для проактивного і реактивного методів передавання спектру для обслуговування користувачів.

На рис. 4.9 представлено результат моделювання ймовірності виникнення колізії залежно від середньої кількості первинних користувачів для проактивного і реактивного методів. І в даному випадку, використання проактивного методу передачі обслуговування спектру зменшує ймовірність виникнення колізії приблизно в два рази. Це свідчить про те, що кращим методом мобільності спектру є реактивний метод передачі обслуговування.

4.5. Дослідження середньої сумарної пропускної спроможності імітаційної моделі системи керування когнітивною радіомережею

Проведено моделювання для порівняння сумарної пропускної спроможності когнітивної радіомережі на основі інтелектуальної імітаційної

моделі з використанням удосконалених методів управління радіочастотним спектром та моделлю без вдосконалення (рис. 4.10). Удосконалена модель включає в себе використання методу виявлення енергії на основі періодограми Уелча з динамічною зміною кількості часових сегментів та частотних відліків усереднення, методу вибору каналу з балансуванням навантаження та проактивного алгоритму передавання спектру для обслуговування користувачів.

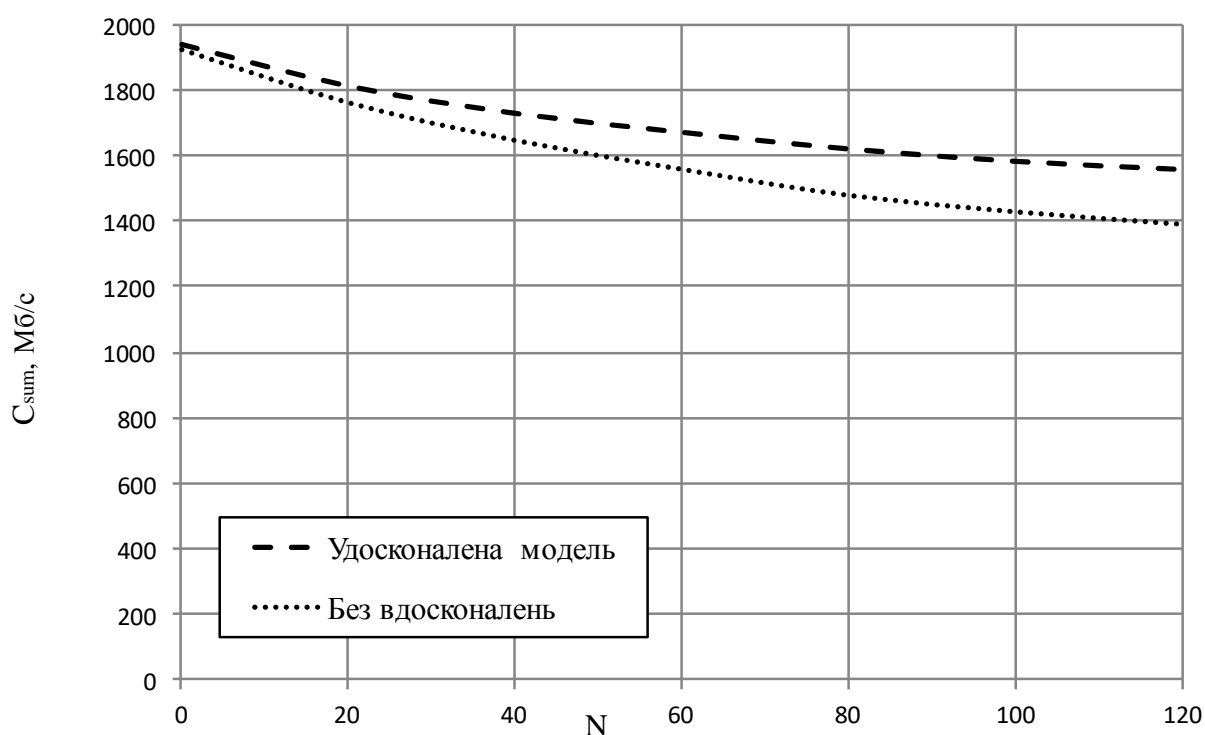


Рис. 4.10. Залежність середньої сумарної пропускної спроможності когнітивної радіомережі від кількості робочих частотних каналів у первинній радіомережі.

Результати моделювання представлені на рис. 4.10. На основі результатів моделювання визначено, що при максимальній завантаженості первинної мережі середня сумарна пропускна здатність когнітивної радіомережі зростає на 7-12%.

4.6. Висновки до 4-го розділу

1. Проведено дослідження ефективності сканування спектру для одного користувача КР та при кооперативному скануванні. Визначено, що ефективність виявлення енергії одним КР погіршується, коли відношення сигнал-шум зменшується, прийняття помилкового рішення ймовірніше при менших значеннях порогової енергії, а при проведенні кооперативного виявлення кожен наступний додатковий користувач суттєво покращує ефективність сканування.

2. Проведено ряд експериментів виявлення енергії за допомогою періодограми Уелч для суміші адитивного білого Гаусівського шуму і QPSK маніпульованого сигналу для відношення сигнал-шум -5 і 2 дБ, різною кількістю елементів ШПФ та довжиною блоків для випадків з перекриттям і без перекриття сегментів. Моделювання показало, що даний метод виявлення сигналу добре працює для вузькосмугових сигналів. Результати моделювання показують, що можна досягти невеликого приросту продуктивності всередньому на $7-8\%$ за допомогою перекриття сегментів в часовій області у порівнянні з випадком без перекриття.

3. Проведено моделювання процесу мобільності спектру для визначення залежності середнього значення пропускної спроможності когнітивного користувача і ймовірності виникнення колізії від завантаженості первинної мережі. Результати моделювання показують, що пропонуваній проактивний протокол має більш високу продуктивність у порівнянні з реактивним методом. З точки зору середньої пропускної здатності для когнітивних користувачів продуктивність зростає в середньому на 25% і майже вдвічі знижується ймовірність виникнення колізії із первинними користувачами.

4. 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. 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 ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Akyildiz I.F. A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks / Akyildiz I.F., Lee W.-Y., Vuran M. C., Shantidev M. // IEEE Communications Magazine, vol. 46, April 2008. - P. 40-48.
2. Aparna P.S. Cyclostationary Feature Detection in Cognitive Radio using Different Modulation Schemes / P.S.Aparna, M.Jayasheela // International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 47– No.21, June 2012.
3. Atapattu S. Performance of an Energy Detector over Channels with Both Multipath Fading and Shadowing / S. Atapattu, C. Tellambura, and H. Jiang // IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 9, No. 12, 2010, pp. 3662–3670.
4. Axell E. Optimal and sub-optimal spectrum sensing of OFDM signals in known and unknown noise variance / E. Axell, E. G. Larsson // IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 29, pp. 290-304, Feb. 2011.
5. Biglieri E. Principles of Cognitive Radio / E. Biglieri, A. Goldsmith, L. J. Greenstein, N. Mandayam, and H. V. Poor // Cambridge University Press, Nov. 2012.
6. Brandon F. Lo A survey of common control channel design in cognitive radio networks / Brandon F. Lo // Physical Communication, pp. 26-39, 2011.
7. Christian I. Spectrum Mobility in Cognitive Radio Networks / I.Christian, S.Moh, I.Chung, and J.Lee // Chosun University, IEEE Communications Magazine, June 2012
8. Fan R. Joint optimal cooperative sensing and resource allocation in multi-channel cognitive radio networks / R. Fan, H. Jiang, Q. Guo, Z. Zhang // IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 60, no. 2, pp. 722-729, Feb. 2011

9. Fanan A.M. Survey: A Comparison of Spectrum Sensing Techniques in Cognitive Radio / A.M. Fanan, N.G. Riley, M. Mehdawi, M. Ammar, and M. Zolfaghari // Computers and Industrial Engineering (ICICIE'2014) Jan. 15-16, 2014 Kuala Lumpur
10. Ghasemi A. Spectrum sensing in cognitive radio networks: Requirements, challenges, and design / Ghasemi A., Sousa S.E. // IEEE Communications Magazine, vol. 46, April 2008. - P. 32-39.
11. Gromakov Y.A. The concept of development of mobile and wireless public / Gromakov Y.A. // Eco-Trendz, Moscow, 2002.
12. Gromakov Y.A. Standards and mobile radio systems / Gromakov Y.A. // Eco-Trendz, Moscow, 1998.
13. Gromakov Y.A. The concept of development of mobile and wireless public / Gromakov Y.A. // Telecommunication - 2008. - № 12. - C. 51-57.
14. Haykin S. Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications / Haykin S. // IEEE JSAC, vol. 23, no. 2, 2005, pp. 201-208.
15. Hillenbrand J. Calculation of detection and false alarm probabilities in spectrum pooling systems / Hillenbrand J., Weiss T.A., Jondral F.K. // IEEE Commun. Lett., vol. 9, no. 4, pp. 349-351, 2005.
16. Hoang D.T. Opportunistic Channel Access and RF Energy Harvesting in Cognitive Radio Networks / D. T. Hoang, D. Niyato, P. Wang, and D. I. Kim // IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 21, no. 11, pp. 2039-2052, 2014.
17. Hossain K. Wideband spectrum sensing for cognitive radios with correlated subband occupancy / K. Hossain, B. Champagne // IEEE Signal Process. Lett., vol. 18, no. 1, pp. 35-38, Jan. 2011.
18. Jain N. Energy Harvesting and Spectrum Sharing Protocol for Wireless Sensor Networks / N. Jain and V. A. Bohara // IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 4, no. 6, pp. 697-700, Dec. 2015.

19. Jiang H. Optimal Selection of Channel Sensing Order in Cognitive Radio / H. Jiang, L. Lai, R. Fan // IEEE Trans. Wireless Communication, vol. 8 Jan. 2009.
20. Khan A. A. When Cognitive Radio Meets the Internet of Things / A. Khan, M. H. Rehmani, and A. Rachedi // IEEE IWCMC, Sep. 2016.
21. 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.
22. Kyryk M. OFDM-based Cognitive Radio System Capacity Evaluation Model / M.Kyryk, V.Yanyshy // Proceedings of XIIIth international conference «The experience of designing and application of CAD Systems in microelectronics» CADSM'2015. – Lviv-Poljana, Ukraine. – 2015. – P. 137-139.
23. Kyryk M. Performance Comparison of Cognitive Radio Networks Spectrum Sensing Methods / M.Kyryk, V.Yanyshyn, L.Matiishyn, V.Havronskyy // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2016. – Lviv-Slavske, Ukraine. – 2016. – P. 597-600.
24. 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, Ukraine. – 2016. – P. 18-20.
25. 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. – Lviv-Poljana, Ukraine. – 2017. – P. 289-291.
26. Kyryk M. The Cooperative Spectrum Sensing Performance Research in Cognitive Radio Network / 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. – 2014. – P. 448-450.

27. Kyryk M. The Spectrum Sensing Techniques Efficiency 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, Ukraine. – 2015. – P. 35-37.

28. Lee W.-Y. A spectrum decision framework for cognitive radio networks / W.-Y. Lee, I. F. Akyildiz // IEEE Trans. Mobile Computing, Feb. 2011, pp. 161-174.

29. Letaief K. Cooperative communications for cognitive radio networks / Letaief K., Zhang W. // Proceedings of the IEEE, vol. 97, no. 5, pp. 878-893, May 2009.

30. Lin P. H. Multi-phase smart relaying and cooperative jamming in secure cognitive radio networks / P. H. Lin, F. Gabry, R. Thobaben, E. A. Jorswieck, and M. Skoglund // IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, vol. 2, no. 1, pp. 38–52, Mar. 2016.

31. Liu Y. Wireless Energy Harvesting in a Cognitive Relay Network / Y. Liu, S. A. Mousavifar, Y. Deng, C. Leung, and M. ElKashlan // IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 15, no. 4, pp. 2498-2508, Apr. 2016.

32. Mariani A. Energy Detector Design for Cognitive Radio Applications / A. Mariani, A. Giorgetti, and M. Chiani // Proc. IEEE Int. Waveform Diversity & Design Conference, Niagara, NY, 2010, pp. 53–57.

33. Mariani A. Effects of Noise Power Estimation on Energy Detection for Cognitive Radio Applications / A. Mariani, A. Giorgetti, and M. Chiani // IEEE Transactions on Communications, Vol. 59, Issue 12, 2011, pp. 3410–3420

34. Mariani A. SNR Wall for Energy Detection with Noise Power Estimation / A. Mariani, A. Giorgetti, and M. Chiani // Proceeding of IEEE International Conference on Communications (ICC), Kyoto, Japan, 2011

35. Mishra S. Cooperative sensing among cognitive radios / S. Mishra, A. Sahai, R. Brodersen // in Proc. IEEE ICC, pp. 1658-1663, June 2006.
36. Mitola J. Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications / Mitola J. // Mobile Multimedia Communications (MoMuC'99), IEEE International Workshop, San Diego, CA, USA, Nov. 1999. - P. 3-10.
37. Mitola J. Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio / Mitola J. // Doctor of Technology, Royal Inst. Technol. (KTH), Stockholm, Sweden, 2000.
38. Mitola J. Cognitive radio: making software radios more personal / Mitola J., Maguire G.Q. // IEEE Personal Communications. - Vol. 6. - No. 4 - Aug. 1999. - P. 13-18.
39. Mosleh S. Distributed opportunistic interference alignment using threshold-based beamforming in MIMO overlay cognitive radio / S. Mosleh, J. Abouei, and M. R. Aghabozorgi // IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 63, no. 8, pp. 3783–3793, Oct. 2014.
40. Mounika B. Spectrum Sensing Techniques and Issues in Cognitive Radio / B.Mounika,K.R.Chandra,R.R.Kumar // International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) - ISSN: 2231-5381 Vol4 Issue4- April 2013.
41. Nee R. van OFDM for wireless multimedia communications / R. van Nee, Prasad R. // N.Y.: Artech House, 2000.
42. Ng C. Queueing Modelling Fundamentals with Applications / Ng C., Soong B. // Communication Networks, 2nd. John Wiley & Sons Inc., 2008.
43. Poorkasmaei S. Asynchronous orthogonal differential decoding for multiple access channels / S. Poorkasmaei and H. Jafarkhani // IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 14, no. 1, pp. 481–493, Jan. 2015.

44. Saxena V. A Survey of various spectrum sensing techniques in cognitive radio networks: Non cooperative systems / V.Saxena and S.J.Basha // Department of ECE, LNCT Indore, RGPV university, 2013
45. Sessia S. I. Baker LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice / Sessia S. I., Toufic M. // A John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 2009. - 522 p.
46. Shobana S. Matched Filter Based Spectrum Sensing on Cognitive Radio for OFDM WLANs / S.Shobana, R.Saravanan, R.Muthaiah // International Journal of Engineering and Technology (IJET), ISSN : 0975-4024 Vol 5 No 1 Feb-Mar 2013.
47. Singh A. Different spectrum sensing techniques used in non cooperative system / A.Singh,V.Saxena // International journal of engineering and innovative technology, Volume1, Issue 2 , February 2012.
48. Song Y. Cognitive Radio Mobile Ad Hoc Networks / Y.Song, J. Xie // DOI C Springer Science+Business Media, LLC, 2011.
49. Song Y. Common Hopping Based Proactive Spectrum Handoff in Cognitive Radio Ad Hoc Networks / Y.Song, J. Xie // IEEE Global Communications Conference, Dec. 2010.
50. Song Y. ProSpect: A Proactive Spectrum Handoff Framework for Cognitive Radio Ad Hoc Networks without Common Control Channel / Y.Song, J. Xie // IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 11, pp. 1127-1139, 2012.
51. Stabellini L. Experimental comparison of dynamic spectrum access techniques for wireless sensor networks / L.Stabellini and M.U.Javed // The Royal Institute of Technology, Electrum 418, SE-164 40 Kista, Sweden.
52. Stasiak M. Modelling and Dimensioning of Mobile Wireless Networks: From GSM to LTE / Stasiak M., Glabowski M. // 2011.
53. Stoica P. Introduction to Spectral Analysis / P. Stoica, R. L. Moses // New Jersey, Prentice Hall, 1997.

54. Tabakovic Z. A survey of cognitive radio systems / Z.Tabakovic // Croatian post and electronic communications agency, 2013.
55. Tang H. Some physical layer issues of wide-band cognitive radio systems / Tang H. // in Proc. IEEE Int. Symp. on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, Nov. 2005, pp. 151-159.
56. Tevfik Y. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications / Tevfik Y., Huseyin A. // IEEE Communications Surveys & Tutorials, Volume 11, Issue 1, pp. 116 - 130, 2009
57. Tzamaloukas A. Channel-hopping multiple access / A. Tzamaloukas, J. J. Garcia-Luna-Aceves // in Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC), June 2000.
58. Volkov L.N. Digital radio: basic methods and characteristics / Volkov L.N., Nemirovsky M.S., Shinakov Y.S. // Eco-Trendz, Moscow, 2005.
59. Wang C. Modeling and Analysis for Proactive-decision Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks / C. Wang, L. Wang // IEEE International Conference on Communications (ICC), Jun. 2009.
60. Wang C-W Modeling and Analysis for Reactivedecision / C-W. Wang, Li-C. Wang, F. Adachi // Global Telecommunications Conference, IEEE, pp. 1- 6, Dec. 2010.
61. Wang F. Relay Selection and Power Allocation for Cooperative Network With Energy Harvesting / F. Wang, S.Guo, Y. Yang, and B. Xiao // IEEE Sys. J., vol. pp, no. 99, pp. 1-12, April 2016.
62. Wang L. Load-Balancing Spectrum Decision for Cognitive Radio Networks / L. Wang, C. Wang, F. Adachi // IEEE Journal on Selected Areas in Communications, May, 2011.
63. Wang L. Spectrum handoff for cognitive radio networks: Reactivesensing or proactive-sensing? / L. Wang, C. Wang // in Proc. IEEE

International in Performance, Computing and Communications Conference (IPCCC), pp. 343-348, December 2008.

64. Wang P. Multiantenna-assisted spectrum sensing for cognitive radio / P. Wang, J. Fang, N. Han, H. Li // IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 59, pp. 1791-1800, May 2010.

65. Wang W. Modeling and analysis for proactive-decision spectrum handoff in cognitive radio networks / W. Wang, L.-C. Wang // in Proc. IEEE ICC, pp. 1-6, June 2009.

66. Welch P. D. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms / P. D. Welch // IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, vol. au-23, pp. 70-73, June 1967.

67. Weiss T. A diversity approach for the detection of idle spectral resources in spectrum pooling systems / Weiss T., Hillenbrand J., Jondral F. // in Proc. of the 48th Int. Scientific Colloquium, Ilmenau, Germany, Sep. 2003.

68. Wylie-Green M. Dynamic spectrum sensing by multiband OFDM radio for interference mitigation / Wylie-Green M. // in First IEEE International Symposium on DySPAN 2005, 2005, pp. 619-625.

69. Yadav N. A comprehensive study of spectrum sensing techniques in cognitive radio / N.Yadav and S.Rathi // International journal of Advances in engineering & technology, July 2011.

70. Yang L. Proactive channel access in dynamic spectrum networks / L. Yang, L. Cao, H. Zheng // Physical Communication (Elsevier), vol. 1, pp. 103-111, June 2008.

71. Yao Y. Spectrum Decision for Cognitive Radio Networks / Y. Yao, D. Erman, A.P. Popescu // 10th Scandinavian Workshop on Wireless Adhoc Networks (ADHOC), Sweden, May 2011.

72. Yucek T. Spectrum characterization for opportunistic cognitive radio systems / Yucek T., Arslan H. // Proc. IEEE Military Commun. Conf. (MILCOM), pp. 1-6, 2006.
73. Yucek T. A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications / T. Yucek, H. Arslan // IEEE Communications Surveys and Tutorials, Vol. 11, No. 1, 2009, pp. 116–130.
74. Zheng G. Information and Energy Cooperation in Cognitive Radio Networks / G. Zheng, Z. Ho, E. A. Jorswieck, and B. Ottersten // IEEE Trans. Sig. Process., vol. 62, no. 9, pp. 2290-2303, May 2014.
75. Ziafat S. Spectrum sensing techniques for cognitive radio networks: performance analysis / S.Ziafat, W.Ejaz and H.Jamal // IEEE, 2011.
76. Бузов А. Л. Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем. Учебное пособие / А.Л. Бузов //Под ред. д.т.н., проф. М.А. Быховского. — М.: Эко-Трендз, 2006. — С.376.
77. Виноградова О. Ю. Метод підвищення ефективності використання радіочастотного діапазону для мереж IEEE 802.22 WRAN / О. Ю. Виноградова, С. О. Нікітін // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ": зб. наук. пр. Темат. вип: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2011. – № 16. – С. 39-43.
78. Волощук Ю. І. Сигнали та процеси у радіотехніці: Підручник для студентів вищих навчальних закладів, том 2 / Ю. І. Волощук // Харків: «Компанія СМІТ», 2003. — С.237-244.
79. Галкин В. А. Цифровая мобильная радиосвязь. Учебное пособие для вузов / В. А. Галкин // М.: Горячая линия-Телеком, 2007. - С.432.
80. Гепко И.А. Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития / Гепко И.А., Олейник В.Ф., Чайка Ю.Д., Бондаренко А.В. // К.: «ЕКМО», 2009. – С.672.

81. Гринкевич Г.О. Інформаційні мережі безпроводового зв'язку: перспективи розвитку на найближче майбутнє / Г.О. Гринкевич, Л.Ю. Гонтаренко, А.К. Глебов, Д.Ю. Мостіпан // Системи управління, навігації та зв'язку, 2014, – випуск 1(29) – С.110-120.

82. Гурьянов І.О. Когнітивне радіо: нові підходи до забезпечення радіочастотним ресурсом перспективних радіотехнологій // І.О. Гурьянов / «Електросвязь». – 2012. – № 8. – С.5-8.

83. Зинченко Л.А. Эволюционное проектирование элементов телекоммуникационных систем / Л.А. Зинченко, С.Н. Сорокин // Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003. – С. 1-2.

84. Кирик М.І. Дослідження ефективності кооперативного сканування в когнітивних радіомережах / М.І. Кирик, В.Б. Янишин // Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій-2014 (СПТЕЛ-2014) . – С. 153-154.

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

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

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

88. Климаш М.М. Модель оцінки ефективності алгоритмів переключення радіочастотних каналів для вибору спектру у когнітивних

радіомережах / М.М. Климаш, М.І. Кирик, В.Б. Янишин // Вісник Національного Університету “Львівська політехніка”. Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2017. – №880. – С. 73-81.

89. Лисечко В.П. Дослідження методів аналізу спектру в когнітивних радіомережах / В.П. Лисечко, Ю.Г. Степаненко, І.І. Сопронюк, Н.О. Брюзгіна // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба. – Х.: ХУ ПС, 2010. – Вип. 3 (25). – С. 137-145.

90. Лисечко В.П. Методи аналізу спектра в когнітивних радіомережах / В.П. Лисечко, О.І. Підченко, О.Л. Анохін, І.І. Сопронюк // Збірник наукових праць УкрДАЗТ, 2013, вип. 141

91. Лисечко В.П. Розробка методу розподілу ресурсів когнітивної радіомережі з використанням мультиагентних систем / В.П. Лисечко, О.М. Воронець, О.В. Сєверінов // Системи обробки інформації – 2013 – випуск 2 (109) – С. 221-225.

92. Ложковський А.Г. Спрощений розрахунок коефіцієнта Херста методом R/S-аналізу / Ложковський А.Г. // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2017. – № 1. – С. 34-40.

93. Ложковський А.Г. Дослідження впливу пріоритетів на час очікування пакетів в одноканальній системі / Ложковський А.Г., Голубенко В.В. // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2016. – № 2. – С. 45-50.

94. Ложковський А.Г. Розрахунок імовірності очікування обслуговування в одноканальній системі із самоподібним трафіком / Ложковський А.Г., Гуляєв К.Д. // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2015. – № 2. – С. 31-35.

95. Масесов М.О. Рекомендації щодо впровадження стандарту безпроводового зв'язку IEEE 802.22 у системах радіозв'язку спеціального призначення. / М.О. Масесов, І.В. Панченко, Л.О. Бондаренко, В.В. Малих // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ” №1 – 2013 – С.47-53.

96. Отрох С. І. Методи забезпечення стійкості мережі майбутнього до дії зовнішніх дестабілізуючих факторів / Отрох С. І., Ярош В. О., Власенко В. О., Зіненко Ю. М. // Телекомунікаційні та інформаційні технології. –2017. – №2(55) – С. 24-30.

97. Отрох С. І. Побудова системи відновлення мережі майбутнього / Отрох С.І., Ярош В.О. // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2017. – № 1. – С. 139-144.

98. Отрох С. І. Методи розрахунку надійності телекомунікаційних мереж майбутнього / Отрох С.І., Ярош В.О., Федюнін С.А., Власенко В.О. // Наукові записки УНДІЗ. – 2016. – №4(44) – С. 13-20.

99. Сверидюк С.О. Дослідження методів внутрішньомережевого співіснування абонентів когнітивної мережі / С.О. Сверидюк, В.П. Лисечко, О.М. Прогонний //Збірник наукових праць УкрДАЗТ – 2012 – вип. 128 – С.140-145.

100. Сопронюк І.І. Метод моніторингу спектра в когнітивних радіомережах на основі використання інформаційного критерію Акайке / І.І. Сопронюк, В.П. Лисечко, Е.А. Ухова // Системи обробки інформації – 2011 – випуск 5 (5) – С. 108-112.

101. Сторчак К.П. Вирішення технічних проблем розвитку ІКТ за допомогою інтелектуальних радіотехнологій / К.П. Сторчак, В.І. Примаченко, А.О. Макаренко // Наукові записки УНДІЗ. – 2017. – №3(47) – С.28-32.

102. Тихвинский В.О. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура / В.О. Тихвинский, Терентьев С.В., А.Б. Юрчук // М.: Эко-Трендз, 2010. – С.284.

103. Янишин В.Б. Дослідження ефективності сканування спектру в когнітивних радіомережах / В.Б. Янишин // IEEE First International Scientific-

Practical Conference «Problems of Infocommunications. Science and Technology». – Харків. – 2013. – С.185-187.

104. FCC ET Docket No. 03-108, Facilitating Opportunities for Flexible, Efficient, and Reliable Spectrum Use Employing Cognitive Radio Technologies, FCC Report and Order, March, 2005.

105. ISO / IEC 7498-1-99. "Information technology. Open Systems Interconnection. Basic Reference Model. Part 1. The basic model. - M.: Standartinform, 2006.

106. ISO / IEC 7498-1-99. "Information technology. Open Systems Interconnection. Basic Reference Model. Part 1. The basic model. - M.: Standartinform, 2006.

107. ITU-R Reports M.2117 (2007): Software-defined radio in the land mobile, amateur and amateur-satellite services. - ITU-R, 2007.

ДОДАТОК А. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи



АКТ
про використання результатів дисертаційної роботи
аспіранта кафедри телекомунікацій Національного університету
“Львівська політехніка”

Янишина Володимира Богдановича

Ми, представники Товариства з обмеженою відповідальністю Телерадіокомпанія “Західтелесервіс”, в особі технічного директора Віхрецького Леоніда Костянтиновича та головного спеціаліста Маліченко Володимира Олексійовича даним актом стверджуємо впровадження й використання результатів дисертаційної роботи Янишина В.Б., а саме застосування алгоритмів реалізації методу сканування радіочастотних каналів з кооперативною співпрацею користувачів та методу вибору радіочастотного каналу на основі балансування вхідного навантаження.

Розроблені Янишином В.Б. методи оцінки ефективності механізмів сканування та вибору радіочастотного каналу дозволяють знизити ймовірність помилкової тривоги та ймовірність не виявлення користувача, а також мінімізувати затримки системи при обслуговуванні користувачів за умови високого вхідного навантаження, що дає змогу забезпечити задовільну якість обслуговування в мультисервісній безпроводній мережі на основі врахуванням співвідношення параметрів трафіку.

Впроваджені моделі та методи є науковими результатами дисертаційної роботи Янишина В.Б. і використані при модернізації телекомунікаційної мережі ТОВ «Західтелесервіс».

Технічний директор _____

 / Віхрецький Л.К.

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Аспірант

 Янишин В.Б.
 “15” листопада 2017р.

“ЗАТВЕРДЖУЮ”
 Директор
 ТзОВ ВКФ «Радіо сервіс», лімітед
 КОМЕРЦІЙНА ФІРМА
 Тишин В. О.
 “15” листопада 2017р.



АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
 аспіранта кафедри “Телекомунікацій”
 Національного університету “Львівська політехніка”

Янишина Володимира Богдановича

Даний акт складений про те, що у ТзОВ ВКФ “Радіо сервіс”, лімітед використані результати дисертаційної роботи Янишина Володимира Богдановича “Моделі та алгоритми управління радіочастотним спектром в когнітивних радіомережах”. На телекомунікаційній мережі ТзОВ ВКФ “Радіо сервіс”, лімітед впроваджені наступні результати:

1. Імітаційна модель системи керування когнітивною радіомережею, із можливістю накопиченню статистичних параметрів радіочастотних каналів, аналізу даних та прогнозуванням їх стану.
2. Імітаційна модель вибору радіочастотного каналу, з використанням методів балансування вхідного навантаження на основі врахування ймовірності зайняття каналу і на основі моніторингу параметрів, що дає змогу покращити швидкодію системи керування когнітивною радіомережею.

Запропонована модель системи керування когнітивною радіомережею сприяє розробленню безпроводних телекомунікаційних сервісних платформ з відкритою архітектурою, а також удосконаленні систем зберігання статистичних даних комунікаційної активності абонентів рухомого зв'язку.

Впроваджені моделі та методи є науковими результатами дисертаційної роботи Янишина В.Б. і використані при модернізації безпроводної мережі.

Результати дисертаційної роботи “Моделі та алгоритми управління радіочастотним спектром в когнітивних радіомережах” використовувались на безоплатній основі.

15 листопада 2017, м. Львів



"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Проректор з науково-педагогічної роботи

НУ "Львівська політехніка"

доц. Давидчак О. Р.

11 2018 р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи

Янишина Володимира Богдановича

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

у навчальному процесі кафедри телекомунікацій

Даний акт складений комісією у складі:

- д.т.н., доц. Стрихалюк Б.М., голова методичної ради Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки;
- к.т.н., доц. Озірковський Л.Д., декан базової вищої освіти Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки;
- д.т.н., проф. Климаш М.М., завідувач кафедри телекомунікацій

про те, що в навчальному процесі кафедри телекомунікацій використано результати кандидатської дисертаційної роботи “Моделі та алгоритми управління радіочастотним спектром в когнітивних радіомережах” – а саме модернізовано курси лекцій з дисциплін:

- «Телекомунікаційні та інформаційні мережі, ч.1» для студентів напряму 6.050903 «Телекомунікації» у частині теоретичних основ проектування безпроводних телекомунікаційних систем;

- «Системне програмування інфокомунікацій» для студентів спеціальності 8.172 «Телекомунікації та радіотехніка» спеціалізації 8.172.01 «Інформаційні мережі зв'язку», у якому використано програмний комплекс для реалізації системи керування когнітивною радіомережею.

Члени комісії:

Стрихалюк Б.М.

Озірковський Л.Д.

Климаш М.М.

ДОДАТОК Б. Модель програмного комплексу системи керування використання спектру когнітивного радіо

1. Основні компоненти

Дана комп'ютерна модель складається з наступних основних компонентів:

- Робоче радіосередовище
- Менеджер радіочастот
- Менеджер первинної мережі
- Менеджер вторинної мережі
- Система управління роботи когнітивного радіо

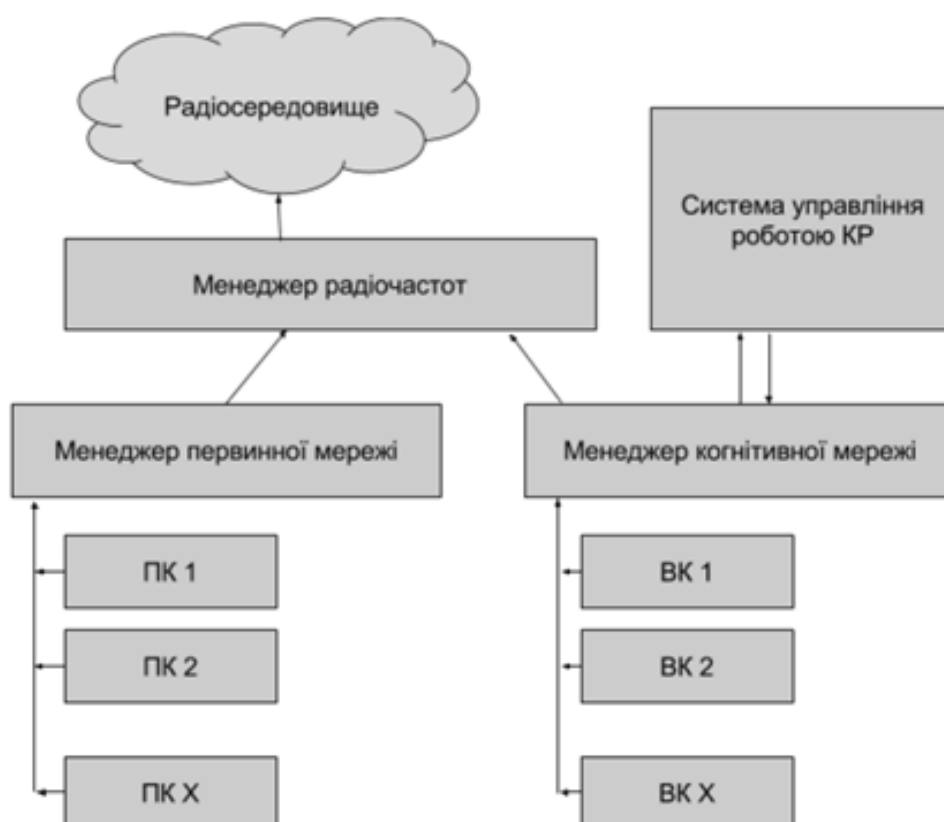


Рис 1. Схема роботи комп'ютерної моделі.

2. Менеджер радіочастот

Основне завдання менеджера радіочастот є створення програмної моделі умовного радіосередовища для гнучкого налаштування його параметрів та управління доступом користувачів як і первинної так і вторинної мереж. Менеджер радіочастот являє собою програмний клас, що містить наступні змінні та функції:

Змінні:

<i>channelsNum</i>	загальна кількість каналів
<i>FrequencyRange</i>	потрібний діапазон частот радіосередовища
<i>channelWidth</i>	ширина одного каналу в МГц
<i>channels</i>	список з усіх наявних частотних каналів

Функції:

<i>Init()</i>	ініціює створення програмного радіосередовища з вибраними параметрами
<i>OnStop()</i>	зупиняє роботу програмного радіосередовища
<i>GetFrequencies(range)</i>	отримати список частотних каналів заданих діапазоном частот
<i>GetAllWorkFrequencies()</i>	отримати список усіх робочих частотних каналів
<i>GetAllFreeFrequencies()</i>	отримати список усіх вільних частотних каналів
<i>GetFirstFreeFrequency()</i>	отримати наступний вільний частотний канал


```

public class FrequencyManager : MonoBehaviour {

    private int channelsNum;

    public FrequencyRange FrequencyRange;           //(МГц) діапазон частот
    public float channelWidth = 0.2f;              //(МГц) ширина каналу
    public List<FrequencyChannel> channels;

    public void Init(){
        channelsNum = (int)(FrequencyRange.width() / channelWidth);

        channels = new List<FrequencyChannel>();
        for (int i = 0; i < channelsNum; i++) {
            float _f = FrequencyRange.start + i * channelWidth;
            channels.Add(new FrequencyChannel(i, new FrequencyRange(_f,_f+channelWidth)));
        }
    }

    public void OnStop(){
        channels = new List<FrequencyChannel>();
    }

    public List<FrequencyChannel> GetFrequencies(FrequencyRange _range){
        if (_range.start < FrequencyRange.start) {
            Debug.LogError("GetFrequencies: start range is less then we have");
            _range.start = FrequencyRange.start;
        }
        if (_range.end > FrequencyRange.end) {
            Debug.LogError("GetFrequencies: end range is more then we have");
            _range.end = FrequencyRange.end;
        }

        int start_num = (int)((_range.start - FrequencyRange.start) / channelWidth);
        int end_num = (int)((_range.end - FrequencyRange.start) / channelWidth);

        List<FrequencyChannel> _channels = new List<FrequencyChannel>();
        for (int i = start_num; i < end_num; i++) {
            _channels.Add (channels[i]);
        }

        return _channels;
    }

    public List<FrequencyChannel> GetAllWorkFrequencies(){
        List<FrequencyChannel> _channels = new List<FrequencyChannel>();
        for (int i = 0; i < channels.Count; i++) {
            if (channels [i].is_working) {
                _channels.Add (channels[i]);
            }
        }

        return _channels;
    }

    public List<FrequencyChannel> GetAllFreeFrequencies(){
        List<FrequencyChannel> _channels = new List<FrequencyChannel>();
        for (int i = 0; i < channels.Count; i++) {
            if (channels [i].is_free) {
                _channels.Add (channels[i]);
            }
        }

        return _channels;
    }
}

```

Рис. 2. Фрагмент коду класу менеджер радіочастот.

Менеджер радіочастот при ініціації програмно будує радіосередовище у вигляді сукупності радіочастотних каналів на основі заданих стартових параметрів. Кожен радіочастотний канал являє собою клас що містить наступні змінні:

Змінні:

<i>is_free</i>	прапорець, що визначає зайнятість частотного каналу будь-яким користувачем
<i>is_working</i>	прапорець, що визначає загальну доступність до роботи частотного каналу
<i>num</i>	номер частотного каналу
<i>range</i>	діапазон частот, що займає даний канал
<i>user</i>	визначає користувача, який в даний момент займає частотний канал. Якщо канал вільний, змінна встановлюється як null
<i>network</i>	визначає ліцензійну мережу до якої належить даний частотний канал

Змінна *range* являє собою клас частотний діапазон і має наступні складові:

Змінні:

<i>start</i>	початкова частота діапазону (МГц)
<i>end</i>	кінцева частота діапазону (МГц)

Функції:

<i>width()</i>	отримати ширину діапазону (МГц)
----------------	---------------------------------


```

[Serializable]
public class FrequencyRange{
    public float start;
    public float end;

    public FrequencyRange(float _s, float _e){
        if (_e > _s) {
            start = _s;
            end = _e;
        } else {
            start = _e;
            end = _s;
        }
    }

    public float width(){
        return end - start;
    }
}

[Serializable]
public class FrequencyChannel {

    public bool is_free{
        get {
            if (is_working && user == null) {
                return true;
            }
            return false;
        }
    }

    public bool is_working {
        get {
            if (network != null && network.type == NetworkType.none) {
                return false;
            }
            return true;
        }
    }

    public int num;
    public FrequencyRange range;
    public User user = null;

    public Network network;

    public FrequencyChannel(int _num, FrequencyRange _range){
        num = _num;
        range = _range;
    }
}

```

Рис. 3. Фрагменти коду класу діапазон частот та частотний канал.

3. Менеджер первинної мережі

Менеджер первинної мережі являє собою програмну імітацію роботи існуючих ліцензійних мереж з максимальним наближенням до реальних умов. Включає в себе генерацію користувачів первинної мережі, їх доступ до радіочастотного ресурсу мережі та надання послуг у передаванні даних.

Змінні:

<i>type</i>	тип мережі (первинна, вторинна)
<i>workRanges</i>	список робочих частотних діапазонів мережі
<i>channels</i>	список робочих частотних каналів мережі
<i>userTypes</i>	список типів користувачів, що можуть бути згенеровані та обслуговуватися менеджером мережі
<i>users</i>	список активних користувачів даної мережі
<i>gen_frequency</i>	частота генерації нового користувача (користувачів/сек)
<i>max_user_num</i>	максимальна кількість унікальних користувачів мережі (при значенні 0 - безліч користувачів)

Функції:

<i>Init()</i>	ініціює створення програмної первинної мережі з вибараними параметрами
<i>OnStop()</i>	зупиняє роботу програмної первинної мережі
<i>StartGenerateUsers()</i>	стартує алгоритм генерації користувачів
<i>GenerateUser(type)</i>	генерує нового користувача вибраного типу
<i>GetRandomUserType()</i>	отримати випадковий тип користувача (відповідно до вагового коефіцієнта)

```

public enum NetworkType{
    none = 0,
    primary = 1,
    secondary = 2,
}

public class Network : MonoBehaviour {

    public NetworkType type;

    public List<FrequencyRange> workRanges;

    public List<FrequencyChannel> channels;

    public List<UserType> userTypes;
    public List<User> users;

    public float gen_frequency = 1;
    public int max_user_num = 100;

    public void Init()
    {
        users = new List<User> ();
        channels = new List<FrequencyChannel> ();

        foreach (FrequencyRange _range in workRanges) {
            List<FrequencyChannel> _channels = ModelManager.frequencyManager.GetFrequencies (_range);
            foreach (FrequencyChannel _c in _channels) {
                if (!channels.Contains (_c)) {
                    _c.network = this;
                    channels.Add (_c);
                }
            }
        }

        if (workRanges.Count == 0) {
            channels = ModelManager.frequencyManager.GetAllWorkFrequencies ();
        }

        StartGenerateUsers ();
    }

    public void OnStop(){
        StopAllCoroutines ();

        foreach (Transform _t in transform) {
            Destroy (_t.gameObject);
        }

        users = new List<User> ();
        channels = new List<FrequencyChannel> ();
    }

    public void StartGenerateUsers()
    {
        StartCoroutine (GenerateUserDelay ());
    }

    public UserType GetRandomUserType(){
        int _sum = 0;
        int[] _weights = new int[userTypes.Count];
        for (int i = 0; i < userTypes.Count; i++) {
            _sum += userTypes[i].weight;
            _weights [i] = _sum;
        }

        int _random = Random.Range (0, _sum);
        for (int i = 0; i < _weights.Length; i++) {
            if (_random < _weights [i]) {
                return userTypes [i];
            }
        }
        return new UserType ();
    }
}

```

Рис. 4. Фрагмент коду класу менеджер первинної мереж.

ДОДАТОК В. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

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 пропускну 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.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

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 (Співдоповідач, форма участі – заочна).

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

8. Kyryk M. Performance Comparison of Cognitive Radio Networks Spectrum Sensing Methods / М. Курык, V. Yanyshyn, L. Matiishyn, V. Havronskyu // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2016, 23-26 February, Lviv-Slavske. – 2016. – P. 597 - 600 (Співдоповідач, форма участі – очна).

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

10. Kyryk M. OFDM-based Cognitive Radio System Capacity Evaluation Model / М. Курык, 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 (Співдоповідач, форма участі – очна).

11. Kyryk M. The Cooperative Spectrum Sensing Performance Research in Cognitive Radio Networks / М. Курык, 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 (Співдоповідач, форма участі – очна).

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 (Співдоповідач, форма участі – заочна).

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. 185-18 (форма участі – заочна).