

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Сопронюк Іван Іванович

УДК 621.391.8; 004.052

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОДИ МОНІТОРИНГУ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРУ ДЛЯ
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БЕЗПРОВОДОВИХ
КОГНІТИВНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка

Галузь знань – 17 Електроніка та телекомунікації

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ І.І. Сопронюк

Науковий керівник:
Лисечко Володимир Петрович,
доктор технічних наук, професор

Харків-2024

АНОТАЦІЯ

Сопронюк І.І. Методи моніторингу частотного спектру для підвищення ефективності безпроводових когнітивних телекомунікаційних систем.

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка. – Український державний університет залізничного транспорту, Україна, Харків, 2024.

В дисертаційній роботі вирішується актуальне науково-технічне завдання по підвищенню ефективності безпроводових когнітивних телекомунікаційних систем на основі удосконалення методів спектрального моніторингу частотного спектру шляхом впровадження гібридних методів, які забезпечують ефективну ідентифікацію вільних частотних смуг, підвищення рівня завадостійкості та спектральної ефективності, з побудовою адаптивних алгоритмів, здатних функціонувати в умовах складного радіосередовища.

Об'єктом дослідження є процес моніторингу частотного спектру в безпроводових когнітивних телекомунікаційних мережах на основі впровадження гібридних методів та адаптивних алгоритмів, що забезпечують динамічне виявлення невикористаних частотних ресурсів та оптимізацію використання спектра в умовах змінного радіосередовища.

Предметом дослідження – методи, моделі, алгоритми оптимізації спектрального моніторингу та адаптивного управління радіочастотними ресурсами безпроводових когнітивних телекомунікаційних систем.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності функціонування безпроводових когнітивних телекомунікаційних систем шляхом впровадження гібридних методів спектрального моніторингу, отриманих на основі удосконалення методів оптимізації та аналізу радіочастотного спектру, а також розроблення алгоритмів управління спектральними ресурсами в умовах динамічно змінюваного радіосередовища.

У **вступі** обґрунтовано актуальність поставленої загальної науково-технічної задачі, пов'язаної з підвищенням ефективності функціонування когнітивних безпроводових телекомунікаційних систем через удосконалення методів спектрального моніторингу, а також сформульовано задачі дисертаційного дослідження. Проаналізовано проблеми, які виникають через збільшення навантаження на частотний спектр, радіоелектронну боротьбу та кіберзагрози, обумовлені сучасними умовами розвитку телекомунікаційних мереж. Обґрунтовано, що досягнення високої завадостійкості, ефективного використання спектру та динамічної адаптації до змін у когнітивному радіосередовищі є перспективними напрямками розвитку когнітивних телекомунікаційних мереж.

Окреслено зв'язок дисертації з актуальними науковими програмами, планами та напрямками досліджень, сформовано наукову новизну виконаного дослідження та науково доведену практичну цінність отриманих результатів. Наведено інформацію про особистий внесок автора у публікації наукових статей, а також представлено перелік публікацій автора, що відповідають темі дисертації.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасних методів спектрального моніторингу в когнітивних безпроводових телекомунікаційних мережах, зокрема методів адаптивного управління частотним спектром. Обґрунтовано необхідність впровадження гібридних методів для підвищення ефективності управління радіочастотними ресурсами. Особлива увага приділялась дослідженню існуючих підходів до спектрального моніторингу та їх здатності до функціонування в умовах складних умов радіосередовища. Проведено порівняння та оцінку ефективності сучасних методів моніторингу за критеріями точності виявлення сигналів, швидкості реакції на зміни в частотному спектрі та завадостійкості, що дозволило визначити основні напрямки подальшого дослідження.

У **другому розділі** розроблено новий гібридний метод спектрального моніторингу на основі часових сегментів зі змінною довжиною – VTSM (Variable Time Segment Monitoring), який відрізняється від традиційних методів тим, що використовує адаптивну часову сегментацію сигналів, яка динамічно підлаштовується до змін у спектрі залежно від статистичних характеристик

сигналу, тоді як традиційні методи зазвичай використовують фіксовані параметри аналізу і не здатні ефективно реагувати на швидкі зміни в реальному часі. В результаті експериментальної верифікації доведено, що метод VTSM є найбільш ефективним при середніх і високих рівнях SNR, коли потрібно аналізувати складні ансамблі сигналів в динамічних або змінних безпроводових телекомунікаційних системах. Для відомих сигналів при високих рівнях SNR VTSM може поступатися методам спектрального моніторингу, які спеціально налаштовані на конкретні характеристики сигналу.

У третьому розділі проведено удосконалення інтегрованого методу спектрального моніторингу за рахунок використання вейвлет-перетворень (Морле та Добеші) та адаптивної фільтрації (Калмана, LMS та RLS) на різних етапах обробки сигналів. Розроблено алгоритм методу спектрального моніторингу, який використовує варіативні часові сегменти, що дозволяє проводити аналіз спектра в реальному часі та відслідковувати зміни в спектральному складі сигналу. Доведено, що використання багатокритеріальної оптимізації для адаптивного налаштування параметрів алгоритмів підвищує їх точність та адаптивність, що сприяє підвищенню ефективності моніторингу та управління спектральними ресурсами. В результаті експериментів з використанням програмної реалізації доведено, що метод максимально ефективний при високих значеннях SNR (до 85,6%), але навіть при низьких значеннях SNR ефективність досягає – 15,4%. Обґрунтовано, що інтеграція статистичних підходів з адаптивними фільтраційними техніками забезпечує ефективне зменшення впливу шумів та частотних спотворень, які виникають у безпроводових радіомережах.

У четвертому розділі розроблено метод ієрархічного циклічного спектрального моніторингу з використанням інформаційних критеріїв Акайке та Байеса для вибору оптимальних моделей сигналів, що забезпечує баланс між точністю та складністю моделі. Запропоновано багатокрокову адаптивну фільтрацію з використанням фільтрів Калмана, Вінера та медіанного фільтра, яка дозволяє ефективно знижувати рівень шуму та враховувати завмирання

сигналу, що підвищує загальну точність і надійність спектрального моніторингу. Алгоритм реалізації методу, розроблений на основі цих підходів, демонструє переваги в порівнянні з традиційними методами завдяки своїй здатності адаптуватися до швидких змін у спектральному середовищі та різних типів радіозавад. Експериментально доведено, що метод покращує якість виявлення сигналів, забезпечуючи суттєве підвищення амплітуди та співвідношення сигнал/шум, особливо для таких сигналів, як Wi-Fi та 5G NR. Це свідчить про високу адаптивність методу до складних умов радіочастотного середовища.

Висновки відображають узагальнені результати дисертаційного дослідження, що спрямовані на вирішення актуальної науково-практичної проблеми та підтверджують виконання поставлених у роботі завдань.

Проведене дисертаційне дослідження дозволило сформулювати основні **наукові результати**.

1. **Вперше** розроблено метод моніторингу частотного спектру – VTSM (Variable Time Segment Monitoring) на основі неоднорідної декомпозиції часових сегментів та адаптивного спектрального аналізу в залежності від статистичних властивостей сигналу. Запропонований метод, на відміну від традиційних, забезпечує динамічну адаптацію довжини сегментів від характеристик сигналу в реальному часі, що підвищує точність виявлення частотних компонентів, знижує вплив шуму та збільшує ефективність використання спектра в умовах динамічних передач.

2. **Удосконалено** метод спектрального моніторингу на основі варіативних часових сегментів та адаптивних вейвлет-перетворень (Морле, Добеші) та адаптивних фільтрів: Калмана, LMS та RLS для оптимізації виявлення та аналізу спектральних характеристик у різних умовах навантаження. Запропонований метод відрізняється від відомих здатністю забезпечувати високий рівень адаптивності та точності за рахунок використання передових фільтраційних технік і спектрального аналізу.

3. **Удосконалено** метод ієрархічного циклічного моніторингу

частотного спектру за рахунок застосування інформаційних критеріїв Акайке та Байєса для виявлення вільних частотних смуг у спектральному діапазоні, а також з багатоступеневою фільтрацією, для зменшення шумів та спотворень сигналу, і з врахуванням завмирань. Запропонований метод відрізняється від існуючих тим, що критерій Акайке використовується для початкового вибору моделей, а критерій Байєса забезпечує уточнення налаштування і запобігання «перенавчання», що робить метод більш ефективним для застосування у складних радіосередовищах з різними типами шумів та спотворень.

Практичне значення результатів дисертаційного дослідження полягає в розробці алгоритмів реалізації розроблених методів, які є науково-практичною основою для вдосконалення систем спектрального моніторингу в когнітивних безпроводових телекомунікаційних системах, зокрема для оптимізації окремих компонентів цих систем. На основі розроблених методів запропоновані технічні рішення, алгоритми та програмні реалізації, що дозволяють:

– на основі аналізу вимог до методів спектрального моніторингу відповідно стандартів IEEE обґрунтувати, що обмежена здатність методів до адаптації в умовах високої інтерференції та недостатня точність виявлення первинних користувачів вимагають подальшого вдосконалення методів для підвищення надійності управління спектральними ресурсами та мінімізації впливу завмирань, шуму та перешкод;

– розробити алгоритми та програмну реалізацію методу спектрального моніторингу VTSM (Variable Time Segment Monitoring), особливістю якого є застосування адаптивної часової сегментації та динамічне налаштування до змін частотно-часових характеристик сигналу;

– розробити алгоритми методу спектрального моніторингу з використанням варіативних часових сегментів, що дозволяє проводити аналіз спектра в реальному часі та відслідковувати зміни в спектральному складі сигналу;

– обґрунтувати необхідність інтеграції статистичних підходів із адаптивними фільтраційними техніками, що дозволяє суттєво зменшити вплив шумів та частотних спотворень у безпроводових когнітивних мережах;

– розробити алгоритм та програмну реалізацію метода ієрархічного циклічного спектрального моніторингу з використанням інформаційних критеріїв Акайке (AIC) і Байєса (BIC) для оптимального вибору моделей сигналу, що дозволяє досягти балансу між точністю та складністю;

– експериментально довести ефективність запропонованого методу для всіх типів сигналів, особливо для тих, що мають високі початкові значення співвідношення сигнал/шум (SNR).

На основі проведеного дисертаційного дослідження підтверджено теоретичну та практичну цінність запропонованих в роботі методів та алгоритмів спектрального моніторингу. Розроблено рекомендації для їх практичного використання та визначено перспективні шляхи подальшого розвитку і вдосконалення методів управління частотним спектром.

Ключові слова: стандарти IEEE, методи спектрального моніторингу, безпроводові когнітивні телекомунікаційні радіосистеми, завадостійкість, оптимізація сигналів, адаптація радіочастотних ресурсів, частотний спектр, математичні моделі оптимізації, інформаційні критерії Акайке, критерій Байєса, варіативна часова сегментація, фільтрація Калмана, фільтр Вінера, медіанний фільтр, сигнал-шум (SNR), багатокритеріальна оптимізація, вейвлет-перетворення.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати:

1. Soproniuk I., Komar O. Adaptive approach to spectrum monitoring in cognitive radio networks through signal detection optimization. Науковий журнал «Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво». Телекомунікації та радіотехніка, Луцьк, 2024. № 56, 2024. С. 392-400. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-56-47>.

2. Soproniuk I., Komar O. Evaluating the characteristics of the VTSM spectrum sensing method in cognitive radio networks. Наукоємні технології, «Електроніка, телекомунікації та радіотехніка», Київ, № 3 (63), 2024. С. 265-273. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.63.18949>.

3. Lysechko V., Soproniuk I. Spectrum Sensing Using Wavelet Transforms and Filtering Under Signal Frequency Distortion and Fading Conditions. SISIOT (Security of Infocommunication Systems and Internet of Things), Vol.2, No.1 (Aug.2024), P.01011 (7) //Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича DOI: <https://doi.org/10.31861/sisiot2024.1.01011>

4. Komar O., Lysechko V., Veklych O., Bershov V., Soproniuk I. Methods for evaluating the impact of energy and correlation properties of signals on the resilience to inter-channel interference in intelligent radio systems. Mechanics Transport Communications. Journal article № 2599 Vol. 22, 3/3. 2024. P. IV-6-IV-19, https://mtc-aj.com/library/2599_EN.pdf.

5. Лисечко В.П., Сопронюк І.І. Метод моніторинга спектра в когнитивних радіосетях на основі БПФ. Вестник Национального технического университета «ХПИ», 2011. Вип. 16, 2011. С. 173-180.

6. Лисечко В.П., Сопронюк І.І., Ухова О.О. Метод моніторинга спектра в когнитивних радіосетях на основі використання інформаційного критерія Акайке. Системи обробки інформації. ХУПС ім. І. Кожедуба. Вип. 5(95). 2011. С.108-112.

7. Лисечко В.П., Сопронюк І.І., Самад Фарид Абдель. Дослідження завадостійкості систем безпроводового доступу. Системи обробки інформації. Х.: ХУПС. Вип. 2(83). 2010. С. 153-155.

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

9. Лисечко В.П., Сопронюк І.І., Северінов О.В. Моніторинг спектру у каналах із завмираннями та частотними спотвореннями. Системи обробки інформації. Х.: ХУПС ім. І. Кожедуба. Вип. 9(90). 2010. С.94-98.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

1. Sopronyuk I.I., Lysechko V.P., Komar O.M. Advancing spectrum sensing in cognitive radio networks. *Проблеми інформатики та моделювання* (ПІМ-2024). Тези 24 міжнародної науково-технічної конференції. Харків: НТУ «ХПІ», 20-23 вересня 2024. С. 128-129.

2. Soproniuk I.I., Pastushenko V.V., Lysechko V.P. Spectral monitoring method based on multistage filtering and AIC& Bayesian information criteria. Тези доповідей за матеріалами 37 міжнародної науково-практичної конференції *«Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»*. Харків: УкрДУЗТ, 10-11 жовтня 2024. С.55-56.

3. Сопронюк І.І., Лисечко В.П. Метод спектрального моніторингу на основі декомпозиції часових сегментів// Тези XII міжнародної науково-практичної конференції *«Людина, суспільство, комунікативні технології»* – Харків: УкрДУЗТ, 25 жовтня 2024. – С. 202 - 204.

4. Лисечко В. П. , Сопронюк І.І., Шимків М.В. Моніторинг спектру у каналах із завмираннями та частотними спотвореннями//Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: матеріали доповідей 26-ї міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 18-19 вересня 2013 р.). – 2013. – № 4 (додаток). – С. 66-67.

ABSTRACT

Soproniuk I.I. Methods of frequency spectrum monitoring for improving the efficiency of wireless cognitive telecommunication systems. Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining a scientific doctor of philosophy (PhD) in specialty 172 – Electronic communications and radio engineering. – Ukrainian State University of Railway Transport, Ukraine, Kharkiv, 2024.

The dissertation addresses the urgent scientific and technical task of improving the efficiency of wireless cognitive telecommunication networks by enhancing spectrum monitoring methods through the implementation of hybrid techniques. These methods enable the effective identification of free frequency bands, increase interference resistance, and improve spectral efficiency, with the development of adaptive algorithms capable of functioning in complex radio environments.

Object of the research is the process of monitoring the frequency spectrum in wireless cognitive telecommunication networks based on the implementation of hybrid methods and adaptive algorithms that enable dynamic detection of unused frequency resources and optimization of spectrum usage in a variable radio environment.

Subject of the research includes the methods, models, and algorithms for optimizing spectrum monitoring and adaptive management of radio frequency resources.

The aim of the dissertation is to improve the efficiency of wireless cognitive telecommunication systems by introducing hybrid methods of spectrum monitoring, derived from optimization techniques and enhanced methods of radio frequency spectrum analysis, as well as developing adaptive algorithms for managing spectral resources in a dynamically changing radio environment.

In the introduction, the relevance of the scientific problem related to improving the efficiency of cognitive wireless telecommunication systems through

the enhancement of spectrum monitoring methods is substantiated. The research objectives of the dissertation are also formulated. Issues arising from the increasing load on the frequency spectrum, electronic warfare, and cyber threats due to modern telecommunication network development conditions are analyzed. It is justified that achieving high interference resistance, efficient spectrum utilization, and dynamic adaptation to changes in the cognitive radio environment are promising directions for the development of cognitive telecommunication networks.

The dissertation's connection with current scientific programs, research plans, and areas of investigation is outlined, and the scientific novelty of the conducted research and the scientifically proven practical value of the obtained results are presented. Information regarding the author's personal contribution to the publication of scientific articles is provided, along with a list of publications relevant to the dissertation's topic.

The first chapter provides an analysis of modern spectrum monitoring methods in cognitive wireless telecommunication networks, particularly focusing on adaptive spectrum management methods. The necessity of implementing hybrid methods to enhance the efficiency of radio frequency resource management is substantiated. Special attention is given to examining existing approaches to spectrum monitoring and their capability to operate under challenging radio environment conditions. A comparison and evaluation of the effectiveness of current monitoring methods are conducted based on criteria such as signal detection accuracy, response time to spectrum changes, and interference resistance. This analysis has helped identify key directions for further research.

The second chapter introduces a new hybrid spectrum monitoring method called VTSM (Variable Time Segment Monitoring), which differs from traditional methods by utilizing adaptive time segmentation of signals. This segmentation dynamically adjusts to spectral changes based on the statistical characteristics of the signal, whereas traditional methods typically use fixed analysis parameters and cannot effectively respond to rapid changes in real time. Experimental verification has demonstrated that the VTSM method is most effective at medium and high SNR

levels when complex signal ensembles need to be analyzed in dynamic or variable wireless telecommunication systems. However, for known signals at high SNR levels, VTSM may be less efficient compared to spectrum monitoring methods specifically optimized for particular signal characteristics.

The third chapter introduces enhancements to the integrated spectrum monitoring method through the use of wavelet transforms (Morlet and Daubechies) and adaptive filtering (Kalman, LMS, and RLS) at various stages of signal processing. A spectrum monitoring algorithm has been developed that utilizes variable time segments, enabling real-time spectrum analysis and tracking of changes in the signal's spectral composition. It has been proven that the use of multi-criteria optimization for adaptive parameter tuning of the algorithms increases their accuracy and adaptability, which enhances the efficiency of monitoring and managing spectral resources. The experimental results, based on software implementation, demonstrate that the method is highly effective at high SNR values (up to 85,6%), while even at low SNR levels, its efficiency remains at 15,4%. It is substantiated that integrating statistical approaches with adaptive filtering techniques effectively reduces the impact of noise and frequency distortions encountered in wireless radio networks.

The fourth chapter develops a method for hierarchical cyclic spectrum monitoring using Akaike and Bayesian information criteria for selecting optimal signal models, balancing accuracy and model complexity. A multi-step adaptive filtering approach, employing Kalman, Wiener, and median filters, is proposed, which effectively reduces noise levels and accounts for signal fading, thereby improving the overall accuracy and reliability of spectrum monitoring. The algorithm developed from these approaches demonstrates advantages over traditional methods due to its ability to adapt to rapid changes in the spectral environment and various types of noise. Experimental results show that the method enhances signal detection quality, significantly improving both amplitude and signal-to-noise ratio, especially for signals such as Wi-Fi and 5G NR. This highlights the method's high adaptability to challenging radio frequency environments.

The conclusions reflect the generalized results of the dissertation research, which are aimed at solving a relevant scientific and practical problem and confirm the achievement of the objectives set forth in the work.

The conducted dissertation research has allowed for the formulation of the **key scientific outcomes**.

1. For the first time, the VTSM (Variable Time Segment Monitoring) method for frequency spectrum monitoring has been developed, based on non-uniform time segment decomposition and adaptive spectral analysis depending on the statistical properties of the signal. Unlike traditional methods, this approach dynamically adapts segment lengths according to signal characteristics in real time, which improves the accuracy of frequency component detection, reduces noise impact, and enhances spectrum utilization efficiency in dynamic transmission conditions.

2. The method of spectrum monitoring has been improved through the use of variable time segments, adaptive wavelet transforms (Morlet, Daubechies), and adaptive filters (Kalman, LMS, and RLS) for optimizing the detection and analysis of spectral characteristics under varying load conditions. The proposed method differs from existing ones by its ability to provide a high level of adaptability and accuracy through the use of advanced filtering techniques and spectral analysis.

3. The method of hierarchical cyclic frequency spectrum monitoring has been improved by incorporating Akaike and Bayesian information criteria for detecting unused frequency bands in the spectral range, along with multi-step filtering to reduce noise and signal distortions while accounting for fading. The proposed method differs from existing ones by using the Akaike criterion for initial model selection and the Bayesian criterion for fine-tuning and preventing «overfitting», making the method more effective for application in complex radio environments with various types of noise and distortions.

The practical results significance of the dissertation research lies in the development of methods that form a scientific and practical foundation for improving spectrum monitoring systems in cognitive wireless telecommunication systems, particularly for optimizing certain components of these systems. Based on the

developed methods, technical solutions, algorithms, and software implementations have been proposed, allowing:

- based on the analysis of the requirements for spectrum monitoring methods in accordance with IEEE standards, it has been substantiated that the limited adaptability of current methods under high interference conditions and the insufficient accuracy in detecting primary users require further improvement to enhance the reliability of spectrum resource management and minimize the impact of fading, noise, and interference;

- the development of algorithms and a software implementation for the VTSM (Variable Time Segment Monitoring) spectrum monitoring method, which features adaptive time segmentation and dynamic adjustment to changes in the signal's frequency-time characteristics;

- the development of algorithms for the spectrum monitoring method utilizing variable time segments, enabling real-time spectrum analysis and tracking changes in the spectral composition of the signal;

- the justification of the necessity to integrate statistical approaches with adaptive filtering techniques, which significantly reduces the impact of noise and frequency distortions in cognitive wireless networks;

- the development of an algorithm and software implementation for a hierarchical cyclic spectrum monitoring method using Akaike (AIC) and Bayesian (BIC) information criteria for optimal signal model selection, ensuring a balance between accuracy and complexity;

- the experimental demonstration of the effectiveness of the proposed method for all types of signals, particularly those with high initial signal-to-noise ratio (SNR) values.

Based on the conducted dissertation research, the theoretical and practical value of the proposed spectrum monitoring methods and algorithms has been confirmed. Recommendations for their practical application have been developed, and prospective directions for further development and improvement of frequency spectrum management methods have been identified.

Keywords: IEEE standards, spectral monitoring methods, wireless cognitive telecommunication radio systems, noise immunity, signal optimization, adaptation of radio frequency resources, frequency spectrum, mathematical optimization models, Akaike information criteria (AIC), Bayesian criterion (BIC), variable time segmentation, Kalman filtering, Wiener filter, median filter, signal-to-noise ratio (SNR), multi-criteria optimization, wavelet transform.

LIST OF PUBLICATIONS OF THE ACQUIRER

Scientific works in which the main scientific results were published:

1. Soproniuk, I., & Komar, O. (2024). Adaptive approach to spectrum monitoring in cognitive radio networks through signal detection optimization. *Naukovyi zhurnal «Kompiuterno-intehrovani tekhnolohii: osvita, nauka, vyrobnytstvo»*. Telekomunikatsii ta radiotekhnika, Lutsk, 2024. № 56, S. 392-400. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-56-47>

2. Soproniuk I., Komar O., Evaluating the characteristics of the VTSM spectrum sensing method in cognitive radio networks. 2024 – Natsionalnyi aviatsiinyi universytet. Naukoiemni tekhnolohii, «Elektronika, telekomunikatsii ta radiotekhnika», Kyiv, 2024. № 3 (63), P. 265-273, 2024 DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.63.18949>

3. Lysechko V., Soproniuk I. Spectrum Sensing Using Wavelet Transforms and Filtering Under Signal Frequency Distortion and Fading Conditions. *SISIOT (Security of Infocommunication Systems and Internet of Things)*, Vol.2, No.1 (Aug.2024), P.01011 (7) // Chernivtsi National University named after Yuriy Fedkovych. DOI: <https://doi.org/10.31861/sisiot2024.1.01011>

4. Komar O., Lysechko V., Veklych O., Bershov V., Soproniuk I. Methods for evaluating the impact of energy and correlation properties of signals on the resilience to inter-channel interference in intelligent radio systems *Mechanics Transport Communications*. 2024 // Journal article № 2599 Vol. 22, issue 3/3. P. IV-6-IV-19, https://mtc-aj.com/library/2599_EN.pdf.

5. Lysechko V.P., Soproniuk I.I. Metod monitoringa spektra v kognitivnykh radiosetyakh na osnove BPF. Vestnik Natsionalnoho tekhnicheskoho universiteta «KhPI», 2011. Vyp. 16, 2011. S. 173 – 180.

https://www.kpi.kharkov.ua/archive/naukova_periodika/vestnik/Technika_i_elektrofizika_vysokikh_napriazhenii/2011/16/20111628.pdf.

6. Lysechko V.P., Soproniuk I.I., Ukhova O.O. Metod monitoringa spektra v kognitivnykh radiosetyakh na osnove ispolzovaniia informatsionnoho kriteriia Akaike. Systemy obrobky informatsii. KhUPS im. I. Kozheduba, 2011. Vyp. 5(95). S. 108-112.

7. Lysechko V.P., Soproniuk I.I., Samad Farid Abdel. Doslidzhennia zavadostiikosti system bezprovodovoho dostupu. Systemy obrobky informatsii. Kh.: KhUPS, 2010. Vyp. 2(83). S. 153-155.

8. Lysechko V.P., Stepanenko Yu.H., Soproniuk I.I., Briuzhina N.O. Doslidzhennia metodiv analizu spektra v kognitivnykh radiomereshakh. Zbirnyk naukovykh prats. Kh.: Kharkivskoho universytetu Povitrianykh Syl im. I. Kozheduba, 2010. Vyp. 3 (25). S. 137-145.

9. Lysechko V.P., Soproniuk I.I., Severinov O.V. Monitorynh spektra u kanalah iz zavmiranniamy ta chastotnymy spotrovenniamy. Systemy obrobky informatsii. Kh.: KhUPS im. I. Kozheduba, 2010. Vyp. 9(90). S. 94-98.

Published works of an approbation nature:

1. Soproniuk I.I., Lysechko V.P., Komar O.M. Advancing spectrum sensing in cognitive radio networks. *Problems of informatics and modeling (PIM-2024)*. Abstracts of the 24th international scientific and technical conference. Kharkiv: National Technical University «KhPI», 20-23 veresnya 2024. S. 128-129.

2. Soproniuk I.I., Pastushenko V.V., Lysechko V.P. Spectral monitoring method based on multistage filtering and AIC & Bayesian information criteria. Tezy dopovidey za materialamy 37 mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «*Informatsiyno-keruyuchi systemy na zaliznychnomu transporti*». Kharkiv: UkrDUZT, 10-11 zhovtnya 2024. S. 55-56.

3. Soproniuk I.I., Lysechko V.P. Metod spektralnoho monitorynhu na osnovi dekompozytsiyi chasovykh sehmmentiv. Tezy XII mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «*Lyudyna, suspilstvo, komunikatyvni tekhnolohiyi*» Kharkiv: UkrDUZT, 25 zhovtnya 2024. S. 202-204.

4. Lysechko V. P., Sopronyuk I. I., Shymkiv M. V. Spectrum monitoring in channels with fading and frequency distortions//Information and control systems in railway transport: materials of the reports of the 26th international scientific and practical conference (Kharkiv, September 18-19, 2013). – 2013. – No. 4 (supplement). – P. 66-67.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	21
ВСТУП.....	23
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОНІТОРИНГУ СПЕКТРУ ТА ПЕРСПЕКТИВ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ В БЕЗПРОВОДОВИХ КОГНІТИВНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ	33
1.1 Аналіз стандартів IEEE для спектрального моніторингу у безпроводових когнітивних мережах.....	33
1.2 Оптимізація методів моніторингу спектру з урахуванням вимог стандартів IEEE.....	40
1.3 Порівняльний аналіз методів моніторингу частотного спектру в безпроводових когнітивних радіомережах.....	45
1.3.1 Оцінка ефективності методу на основі енергетичного детектора (EDS – Energy Detector Based Monitoring).....	45
1.3.2 Метод моніторингу частотного спектру на основі форми сигналу (WFB – Waveform-Based Monitoring).....	51
1.3.3 Метод моніторингу частотного спектру на основі циклостационарного детектування (CSD - Cyclostationary Detection).....	52
1.3.4 Метод спектрального моніторингу на основі узгоджених фільтрів (MF – Matched Filtering).....	55
1.3.5 Метод моніторингу частотного спектру на основі кореляційного аналізу (CFSM – Correlation-based Frequency Spectrum Monitoring).....	57
Висновки до розділу 1.....	60
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МЕТОДУ МОНІТОРИНГУ СПЕКТРУ НА ОСНОВІ ДЕКОМПОЗИЦІЇ ЧАСОВИХ СЕГМЕНТІВ ТА АДАПТИВНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ.....	63

2.1 Основні характеристики та принципи функціонування методу VTSM для динамічного моніторингу спектру.....	63
2.2 Розробка алгоритму методу моніторингу спектру на основі декомпозиції часових сегментів VTSM.....	68
2.3 Верифікація методу моніторингу спектру VTSM.....	74
Висновки до розділу 2.....	80
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ІНТЕГРОВАНОГО МЕТОДУ СПЕКТРАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ З ВИКОРИСТАННЯМ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕНЬ ТА ФІЛЬТРАЦІЇ З ВРАХУВАННЯМ СПОТВОРЕНЬ ТА ЗАВМИРАННЯ ЧАСТОТИ СИГНАЛУ.....	82
3.1 Методологія та алгоритм інтегрованого методу моніторингу частотного спектру	82
3.2 Верифікація ефективності методу спектрального моніторингу з використанням вейвлет-перетворення Морле і Добеші та фільтрації.....	94
3.3 Удосконалення інтегрального методу спектрального моніторингу за рахунок використання адаптивних вейвлет-перетворень та адаптивних фільтрів.....	105
Висновки до розділу 3.....	114
РОЗДІЛ 4 МЕТОД ІЄРАРХІЧНОГО ЦИКЛІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРУ З ЗАСТОСУВАННЯМ ІНФОРМАЦІЙНИХ КРИТЕРІЇВ АКАЙКЕ І БАЙЄСА ТА БАГАТОКРОКОВОЮ ФІЛЬТРАЦІЄЮ	116
4.1 Обґрунтування застосування багатокрокової фільтрації та інформаційних критеріїв у поєднанні з відстанню Кульбака-Лейблера для підвищення ефективності спектрального моніторингу.....	116
4.2 Розробка алгоритму методу ієрархічного циклічного моніторингу частотного спектру	122

4.3 Експериментальна оцінка ефективності методу ієрархічного циклічного спектрального моніторингу на основі інформаційних критеріїв Акайке та Байєса з багатокроковою фільтрацією.....	135
Висновки до розділу 4.....	147
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	149
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	152
ДОДАТОК А Список наукових праць здобувача.....	168
ДОДАТОК Б Акт реалізації результатів наукових досліджень у військовій частині А7223.....	170
ДОДАТОК В Акт впровадження у навчальний процес.....	171
ДОДАТОК Г Фрагмент коду на мові Python експериментальної методу моніторингу спектру VTSM.....	173
ДОДАТОК Д Фрагмент коду на мові Python розрахунків показників інтегрального методу спектрального моніторингу за рахунок використання адаптивних вейвлет-перетворень та адаптивних фільтрів ...	176
ДОДАТОК Е Фрагмент коду на мові Python експериментальної оцінки методу ієрархічного циклічного спектрального моніторингу на основі інформаційних критеріїв Акайке та Байєса в умовах спотворень та завмирань.....	178

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- AIC – Akaike Information Criterion (Інформаційний критерій Акайке)
- ANL – Average Noise Level (Середній рівень шуму)
- AUC – Area Under the Curve (Площа під кривою)
- AWGN – Additive White Gaussian Noise (Адитивний білий гауссів шум)
- BIC – Bayesian Information Criterion (Інформаційний критерій Байеса)
- BS – Base Station (Базова станція)
- BS MIB – База даних управління базовою станцією
- BPF – Band-Pass Filter (Смуговий фільтр)
- CSD – Cyclostationary Detection (Циклостаціонарне детектування)
- DFS – Dynamic Frequency Selection (Динамічний вибір частот)
- DWT – Discrete Wavelet Transform (Дискретне перетворення Вейвлета)
- EDS – Energy Detection Scheme (Енергетичний детектор)
- EMD – Empirical Mode Decomposition (Емпіричний модальний розклад)
- FAF – Fade Adaptation Factor (Коефіцієнт адаптації до завмирання)
- FD – Frequency Distortion (Спотворення частоти)
- FEF – Filter Efficiency Factor (Фактор ефективності фільтрації)
- FFT – Fast Fourier Transform (Швидке перетворення Фур'є)
- FPR – False Positive Rate (Ймовірність хибного виявлення)
- GL SAP – Геолокація для управління спектром
- GPS – Global Positioning System (Глобальна система позиціювання)
- ННТ – Hilbert-Huang Transform (Перетворення Гільберта-Хуанга)
- IEEE 1900 (DySPAN) – Стандарт динамічного управління спектром
- IEEE 802.11af – Стандарт для Wi-Fi на телевізійних білих просторах
- IEEE 802.15.4m – Стандарт для когнітивних сенсорних мереж
- IEEE 802.16h – Стандарт для WiMAX з підтримкою когнітивного доступу
- IEEE 802.22 – Стандарт для використання телевізійних білих просторів у когнітивних мережах
- LMS – Least Mean Squares (Алгоритм найменших середніх квадратів)

LoRaWAN – Long Range Wide Area Network (Далекобійна мережа великого радіусу дії)

LTE – Long-Term Evolution (Стандарт безпроводової широкосмугової передачі даних)

LTE-Advanced – Стандарт 4G мобільного зв'язку з когнітивними функціями

MAC – Medium Access Control (Рівень управління доступом до середовища)

MF – Matched Filtering (Узгоджена фільтрація)

PFA – Probability of False Alarm (Ймовірність хибної тривоги)

PHY – Physical Layer (Фізичний рівень)

PSD – Power Spectral Density (Спектральна щільність потужності)

RLS – Recursive Least Squares (Рекурсивні найменші квадрати)

ROC – Receiver Operating Characteristic (Крива робочих характеристик приймача)

SNR – Signal-to-Noise Ratio (Співвідношення сигнал/шум)

SM – Spectrum Management (Управління спектром)

SSF – Spectrum Sensing Function (Функція виявлення спектра)

SVD – Singular Value Decomposition (Сингулярний розклад)

TPR – True Positive Rate (Показник точності виявлення)

UWB – Ultra-Wideband (Ультраширокопasmуговий)

VTSM – Variable Time Segment Monitoring (Моніторинг зі змінною часовою сегментацією)

Wi-Fi 6 – Стандарт безпроводового зв'язку шостого покоління

WRAN – Wireless Regional Area Network (Безпроводова регіональна мережа)

WFB – Waveform-Based Monitoring (Моніторинг на основі форми сигналу)

WT – Wavelet Transform (Вейвлет-перетворення)

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Динамічний розвиток когнітивних безпроводових телекомунікаційних мереж в умовах війни в Україні висуває нові вимоги до методів моніторингу частотного спектру, особливо через зростаюче навантаження на радіочастотні ресурси, радіоелектронну боротьбу та кіберзагрози. В таких умовах спектральний моніторинг стає особливо актуальним для ефективного управління частотами, оскільки дозволяє оптимізувати розподіл радіочастот між різними системами зв'язку, підвищуючи загальну ефективність телекомунікаційних мереж і мінімізуючи конфлікти між цивільними та військовими користувачами.

Основними проблемами у сфері спектрального моніторингу є високий рівень динамічності спектрального навантаження та часті зміни у розподілі частотних ресурсів між користувачами, що вимагає застосування гібридних методів моніторингу, які здатні оперативно відстежувати зміни в радіо інформаційному середовищі та автоматично коригувати розподіл частот.

Розв'язати ці проблеми можливо за рахунок впровадження інноваційних методів та технологій. По-перше, це гібридні методи спектрального моніторингу, що використовують алгоритми штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання та автоматично визначають вільні частотні діапазони, або перешкоди чи зміни спектру. По-друге, впровадження технологій динамічного розподілу спектру, які дозволяють радіо мережам самостійно адаптуватися до змін у середовищі за рахунок вибору оптимальних частотних діапазонів для передачі даних. Це мінімізує інтерференцію між системами та підвищує загальну ефективність використання частотних ресурсів.

По-третє, для підвищення завадостійкості та захисту від радіоелектронної боротьби необхідно застосовувати ефективні методи обробки сигналів, включаючи технології спектральної фільтрації та шифрування передач, що дозволяє зменшити вплив зовнішніх завад, а також підвищує захищеність когнітивних мереж від спроб несанкціонованого доступу або

навмисного втручання.

Крім того, важливо розробляти комплексні системи моніторингу, які будуть інтегровані з інструментами кіберзахисту для виявлення та нейтралізації загроз, пов'язаних із кібернападами на критичну інфраструктуру телекомунікацій. Тісна взаємодія між спектральним моніторингом та системами захисту мереж забезпечить всебічну безпеку та стійкість телекомунікаційних систем.

Вищезазначене обґрунтовує необхідність вирішення **актуального науково-технічного завдання**, яке полягає в підвищенні ефективності безпроводових когнітивних телекомунікаційних мереж на основі удосконалення методів спектрального моніторингу шляхом впровадження гібридних методів, які забезпечують ефективну ідентифікацію вільних частотних смуг, підвищення рівня завадостійкості та спектральної ефективності, з побудовою адаптивних алгоритмів, здатних функціонувати в умовах складного радіосередовища.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі «Транспортний зв'язок» Українського державного університету залізничного транспорту.

Науково-практичні результати отримані в ході дисертаційного дослідження застосовуються у службовій діяльності військової частини А7223, про що свідчить наведений в Додатку Б – Акт впровадження результатів дисертаційного дослідження.

Також результати роботи впроваджено в навчальний процес Українського державного університету залізничного транспорту – Додаток В.

Об'єктом дослідження є процес моніторингу частотного спектру в безпроводових когнітивних телекомунікаційних мережах на основі впровадження гібридних методів та адаптивних алгоритмів, що забезпечують динамічне виявлення невикористаних частотних ресурсів та оптимізацію використання спектру в умовах змінного радіосередовища.

Предмет дослідження – методи, моделі, алгоритми оптимізації спектрального моніторингу та адаптивного управління радіочастотними ресурсами.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності безпроводових когнітивних телекомунікаційних систем шляхом впровадження гібридних методів спектрального моніторингу, отриманих на основі методів оптимізації та удосконалення методів аналізу радіочастотного спектру, та розроблених адаптивних алгоритмів управління спектральними ресурсами в умовах динамічно змінюваного радіосередовища.

Відповідно меті дисертаційної роботи визначено наступні **часткові задачі дослідження**.

1. Провести аналіз вимог стандартів IEEE 802.22, IEEE 1900, IEEE 802.11af, IEEE 802.15.4m, IEEE 802.16h та LTE-Advanced до методів спектрального моніторингу з зосередженням уваги на перспективах підвищення ефективності безпроводових когнітивних телекомунікаційних мереж на основі впровадження гібридних методів моніторингу спектру, які забезпечують надійну ідентифікацію вільних частотних смуг, підвищення рівня завадостійкості та спектральної ефективності, а також розробки адаптивних алгоритмів, здатних функціонувати в умовах складного радіосередовища.

2. Розробити новий гібридний метод спектрального моніторингу VTSM (Variable Time Segment Monitoring), алгоритм на його основі та програмну реалізацію, що відрізняється від традиційних методів застосуванням адаптивної часової сегментації та динамічного налаштування до змін частотно-часових характеристик сигналу і забезпечує ефективне виявлення вільних частотних смуг та зниження рівня завад. Провести експериментальну верифікацію методу з використанням методів статистичного аналізу та рекурсивної фільтрації, обґрунтувати переваги в порівнянні з традиційними підходами за показниками ідентифікації частотних ресурсів і завадостійкості.

3. Удосконалити та верифікувати метод спектрального моніторингу на основі адаптивних вейвлет-перетворень (Морле та Добеші) і фільтрів (Калмана,

LMS, RLS). Провести експериментальну перевірку методу на сигналах 4G LTE, 5G NR, Wi-Fi 6, DVB-T2, GPS для підтвердження його ефективності в умовах складного радіочастотного середовища, а також для обґрунтування переваг за показниками виявлення вільних частотних ресурсів та завадостійкості порівняно з традиційними підходами.

4. Обґрунтувати необхідність інтеграції статистичних підходів з адаптивними фільтраційними техніками для оптимізації процесів спектрального моніторингу та зменшення впливу шумів і частотних спотворень у безпроводових когнітивних мережах. Провести експериментальні дослідження для підтвердження науково-практичних гіпотез щодо ефективності даного підходу.

5. Удосконалити метод ієрархічного циклічного спектрального моніторингу, алгоритм та його програмну реалізацію з використанням інформаційних критеріїв Акайке (AIC) і Байєса (BIC) для оптимального вибору моделей сигналу з урахуванням балансу між точністю та складністю моделі, а також із застосуванням багатокрокової адаптивної фільтрації на основі фільтрів Калмана, Вінера та медіанного з метою зниження інтерференції і врахування умов завмирання сигналу. Провести експериментальні дослідження для валідації переваг методу для підвищення загальної ефективності спектрального моніторингу в порівнянні з традиційними підходами.

6. Провести експериментальну оцінку ефективності запропонованого методу для Wi-Fi, 5G NR, Bluetooth, GSM, LoRaWAN, UWB, особливо для тих сигналів, які мають високі початкові значення співвідношення сигнал/шум (SNR). Здійснити поетапну верифікацію методу з метою визначення продуктивності застосування фільтра Калмана, інформаційних критеріїв Акайке (AIC) та Байєса (BIC), а також рекурсивного оновлення спектральних оцінок для підвищення точності та надійності спектрального моніторингу в умовах змінного радіочастотного середовища.

Методи дослідження. Для вирішення науково-практичних задач, поставлених в дисертаційному дослідженні, було застосовано: методи

спектрального аналізу для виявлення вільних частотних смуг та оцінки спектральної щільності потужності сигналів у безпроводових телекомунікаційних мережах; методи багатокрокової фільтрації (фільтри Калмана, Вінера, медіанний фільтр) для усунення шумів, завмирань та спотворень сигналів у когнітивних радіомережах; інформаційні критерії Акайке (AIC) і Байєса (BIC) для вибору оптимальної моделі спектрального моніторингу та запобігання перенавантаженню; теорія ймовірностей для оцінки якості апроксимації сигналів і аналізу відстані Кульбака-Лейблера між фактичною та апроксимуючою моделями.

Для проведення експериментальної верифікації результатів використовувалось імітаційне моделювання частотних діапазонів сигналів у динамічному когнітивному радіосередовищі, а також статистичні методи аналізу, зокрема розрахунок співвідношення сигнал/шум (SNR), ймовірності виявлення сигналу (AUC), аналіз кривої робочих характеристик приймача (ROC), регресійний і кореляційний аналіз для перевірки точності та ефективності розроблених алгоритмів.

Наукові результати, отримані в результаті виконання дисертаційної роботи, ґрунтуються на розробці та удосконаленні методів моніторингу та оптимізації використання радіочастотного спектру в когнітивних безпроводових телекомунікаційних мережах. А саме:

1. **Вперше** розроблено метод моніторингу частотного спектру – VTSM (Variable Time Segment Monitoring) на основі неоднорідної декомпозиції часових сегментів та адаптивного спектрального аналізу в залежності від статистичних властивостей сигналу. Запропонований метод, на відміну від традиційних, забезпечує динамічну адаптацію довжини сегментів від характеристик сигналу в реальному часі, що підвищує точність виявлення частотних компонентів, знижує вплив шуму та збільшує ефективність використання спектру в умовах динамічних передач.

2. **Удосконалено** метод спектрального моніторингу на основі варіативних часових сегментів та адаптивних вейвлет-перетворень (Морле, Добеші) та

адаптивних фільтрів: Калмана, LMS та RLS для оптимізації виявлення та аналізу спектральних характеристик у різних умовах навантаження. Запропонований метод відрізняється від відомих здатністю забезпечувати високий рівень адаптивності та точності за рахунок використання передових фільтраційних технік і спектрального аналізу.

3. Удосконалено метод ієрархічного циклічного моніторингу частотного спектру за рахунок застосування інформаційних критеріїв Акайке та Байєса для виявлення вільних частотних смуг у спектральному діапазоні, а також багатоступеневої фільтрації, для зменшення шумів та спотворень сигналу з врахуванням завмирань. Запропонований метод відрізняється від існуючих тим, що критерій Акайке використовується для початкового вибору моделей, а критерій Байєса забезпечує уточнення налаштування і запобігання «перенавчанню», що робить метод більш ефективним для застосування у складних радіосередовищах з різними типами шумів та спотворень.

Практичні результати дисертаційного дослідження полягають у розробці технологічних рішень, алгоритмів та програмних реалізацій на основі запропонованих методів у сфері когнітивних безпроводових телекомунікаційних систем, зокрема:

– на основі аналізу вимог до методів спектрального моніторингу відповідно стандартів IEEE обґрунтовано, що обмежена здатність методів до адаптації в умовах високої інтерференції та недостатня точність виявлення первинних користувачів вимагають подальшого вдосконалення методів для підвищення надійності управління спектральними ресурсами та мінімізації впливу завмирань, шуму та перешкод. За допомогою експериментальної оцінки традиційних методів моніторингу частотного спектру обґрунтовано необхідність застосування гібридних підходів для підвищення якості виявлення сигналів у складних умовах радіосередовища;

– розроблено новий метод спектрального моніторингу VTSM (Variable Time Segment Monitoring), алгоритм та програмну реалізацію, особливістю якого є застосування адаптивної часової сегментації та динамічне налаштування до

змін частотно-часових характеристик сигналу. Оптимізовано процес ідентифікації вільних частотних смуг та зниження рівня завад за допомогою методів статистичного аналізу і рекурсивної фільтрації. Експериментально доведено, що метод VTSM дозволяє підвищити точність на 18,5% при середньому рівні SNR (10 дБ) та знизити ймовірність хибних тривог на 10,2% у порівнянні з традиційними методами. При високому рівні SNR VTSM показує максимальну ефективність, забезпечуючи точність виявлення на 15,2% вищу, ніж у методу енергетичного детектування та на 10,5% вищу за метод узгодженої фільтрації. При низькому SNR (5 дБ) метод VTSM показав на 3,7% кращу точність порівняно з методом енергетичного детектора, але поступається методу узгодженої фільтрації;

– розроблено алгоритм методу спектрального моніторингу з використанням варіативних часових сегментів, що дозволяє проводити аналіз спектру в реальному часі та відслідковувати зміни в спектральному складі сигналу. Метод базується на застосуванні адаптивних вейвлет-перетворень (Морле та Добеші) та фільтрів (Калмана, LMS та RLS) для забезпечення високої точності аналізу. В результаті проведених експериментів доведено, що запропонований метод досягає максимальної ефективності точності виявлення сигналів при високих SNR – до 85,6%. Експериментальна перевірка на сигналах 4G LTE, Wi-Fi 6 і GPS підтвердила здатність методу ефективно працювати в умовах складного радіочастотного середовища;

– обґрунтовано необхідність інтеграції статистичних підходів із адаптивними фільтраційними техніками, що дозволило суттєво зменшити вплив шумів та частотних спотворень у безпроводових когнітивних мережах. Експериментально доведено, що навіть при низьких значеннях SNR, ефективність методу залишається на прийнятному рівні, досягаючи 15,4% точності виявлення сигналів. Впровадження адаптивної фільтрації дозволило знизити ймовірність хибних тривог до 0,01 при SNR = -5 дБ, що забезпечує надійну роботу в умовах підвищеного шуму;

– розроблено алгоритм та програмну реалізацію методу ієрархічного циклічного спектрального моніторингу з використанням інформаційних критеріїв Акайке (AIC) і Байєса (BIC) для оптимального вибору моделей сигналу, що дозволяє досягти балансу між точністю та складністю моделі. Відмінною рисою методу є поетапна багатокрокова адаптивна фільтрація з використанням фільтрів Калмана, Вінера та медіанного, що підвищує ефективність моніторингу шляхом зниження рівня шумів та врахування завмирань сигналу. Експериментально отримані результати показали значне покращення для сигналів із високим початковим SNR. Амплітуда для Wi-Fi зросла на 7,06%, а SNR – на 15,03%. Для 5G NR приріст амплітуди склав 8,42%, а SNR – 18,18%. Для сигналів з нижчим SNR, таких як UWB та LoRaWAN, амплітуда збільшилася на 7,46% та 6,25% відповідно, а SNR – на 18,18% і 10%. Сигнал Bluetooth показав зростання амплітуди на 7,14%, а SNR – на 15,38%, тоді як для GSM ці показники становили 7,06% і 12,5%, що демонструє ефективну адаптацію методу до шумів та завмирань;

– експериментально доведено ефективність запропонованого методу для всіх типів сигналів, особливо для тих, що мають високі початкові значення співвідношення сигнал/шум (SNR). Після первинного застосування фільтра Калмана було зафіксовано покращення амплітуди на 3 – 4% і підвищення SNR на 0,2–0,3%. Використання інформаційних критеріїв Акайке (AIC) та Байєса (BIC) забезпечили ще вищі результати: амплітуда збільшилася до 7,46%, а SNR підвищився до 18,18%. Рекурсивне оновлення спектральних оцінок дозволило досягти додаткового удосконалення для Bluetooth та 5G NR, де приріст SNR склав до 5,13%.

Науково-практичні результати дисертаційної роботи впроваджено у службову діяльність військової частини А7223. В Додатку Б до дисертації наведено відповідний Акт реалізації.

Особистий внесок здобувача включає розробку нових методів, алгоритмів та технічних рішень, які дозволили ефективно вирішити поставлені

в дисертаційній роботі завдання та досягти поставлених цілей. У спільних наукових публікаціях здобувачеві належить наступний внесок.

В статті [1] – метод спектрального моніторингу з використанням адаптивних вейвлет-перетворення Морле і Добеші та адаптивної фільтрації; в роботі [2] – метод моніторингу спектру на основі декомпозиції часових сегментів (VTSM) для динамічного моніторингу спектру; в [3] – метод ієрархічного циклічного моніторингу частотного спектру в каналах із завмираннями та спотвореннями; в статті [4] – дослідження причин виникнення міжканальних завад у інтелектуальних радіосистемах та оцінки впливу енергетичних і кореляційних властивостей сигналів на стійкість до цих завад; в роботі [5] – оцінка та аналіз методів моніторингу спектра в когнітивних радіомережах на основі дискретного перетворення Фур'є; в [6] – оцінка ефективності застосування інформаційного критерію Акайке в алгоритмах моніторингу спектра когнітивних радіомереж дозволяє оптимізувати вибір моделей для обробки сигналів, в [7] – аналіз методів спектрального моніторингу в контексті дослідження завадостійкості систем безпроводового доступу для визначення впливу завад на якість передачі даних, в [8] – експериментальна оцінка ефективності виявлення вільних частотних діапазонів, в статті [9] – дослідження методів виявлення та моніторингу спектра в каналах із завмираннями та частотними спотвореннями.

Апробація результатів. Основні наукові положення і результати дисертаційної роботи пройшли авторську апробацію на наступних конференціях:

– 24 міжнародна науково-технічна конференція. «Проблеми інформатики та моделювання» (ПІМ-2024). Харків: НТУ «ХПІ», 20-23 вересня 2024;

– 37 міжнародна науково-практична конференція «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті». Харків: УкрДУЗТ, 10-11 жовтня 2024;

– XII міжнародна науково-практична конференція «Людина, суспільство, комунікативні технології» Харків: УкрДУЗТ, 25 жовтня 2024;

– 26 міжнародна науково-практична конференція, Харків, 18-19 вересня 2013.

Публікації. Науково-практичні результати, отримані в межах даного дисертаційного дослідження були опубліковані автором у 13 наукових працях: 9 статей у фахових виданнях України, у тому числі, 1 стаття у міжнародному виданні та відображено у 4 апробаційних публікаціях за матеріалами міжнародних науково-практичних конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота містить 167 сторінок основного тексту, у тому числі, 38 рисунків, 26 таблиць, 154 найменування у списку використаних джерел, 6 Додатків (А-Е). Загальний обсяг дисертаційної роботи викладено на 181 сторінці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Альошин Г.В., Панченко С.В., Приходько С.І. Проблеми теорії телекомунікаційних систем та мереж. Харків: УкрДАЗТ, 2018. 260 с.
2. Аносов А.О., Проценко М.М., Дубинко О.Л., Павлушко М.Я. Застосування вейвлет-перетворення для аналізу цифрових сигналів Журнал «Сучасний захист інформації». 2018. №1 (33), С.38-42.
3. Барановська І.М., Мельник М.М., Коваль В.В. Підвищення ефективності когнітивних радіомереж на основі адаптивних алгоритмів обробки сигналів. Журнал «Телекомунікаційні системи». 2022. № 5. С. 91-98.
4. Бартків Н.І. Методи та локалізація джерел несанкціонованого випромінювання. Захист інформації. 2009. № 3. С. 68–73.
5. Грабар І.Г. Застосування вейвлет-перетворення функції вібросигналу в технічній діагностиці механізмів з ударними навантаженнями / І. Г. Грабар, В. Ф. Запольский, В. К. Захаров., М. Б. Кришевский // Вісник ЖІТІ. 2002. № 23. С. 16 – 21.
6. Данилюк С.О., Гриценко В.М. Методологія аналізу спектральних характеристик складних сигналів у безпроводових мережах. Журнал «Наукові записки НаУКМА». 2020. Т. 3. С. 45-52.
7. Діденко Ю.М., Савчук І.В. Моделювання та аналіз радіотехнічних систем. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 280 с.
8. Зайцев Д.А., Макаренко Д.В. Адаптивні методи обробки сигналів в радіотехнічних системах. Львів: Львівська політехніка, 2021. 270 с.
9. Індик С.В., Лисечко В.П. Дослідження ансамблевих властивостей складних сигналів, отриманих за рахунок частотної фільтрації псевдовипадкових послідовностей з низькою взаємодією у часовій області. Збірник наукових праць. Харків: ХУПС ім. І. Кожедуба. 2020. Вип. 4 (66). С.46-50. DOI: 10.30748/zhups.2020.66.06.

10. Коваленко О.В., Павленко С.М. Розробка методів зменшення шуму у когнітивних радіомережах. Журнал «Системи обробки інформації». 2022. № 4. С. 22-29.
11. Козлов В.М., Петрова Л.О. Методи підвищення завадостійкості телекомунікаційних систем. Київ: КНУ імені Тараса Шевченка, 2020. 310 с.
12. Кузьменко В.В., Савенко І.І. Методи аналізу та обробки сигналів у системах когнітивного радіо. Вісник Сумського державного університету. 2022. № 5. С. 22-30.
13. Лазаренко О.В., Котляр А.М. Покращення завадостійкості в телекомунікаційних системах за допомогою адаптивних алгоритмів. Вісник Вінницького національного технічного університету. 2021. Т. 3. С. 58-65.
14. Лисечко В.П., Сопронюк І.І., Северінов О.В. Моніторинг спектру у каналах із завмираннями та частотними спотвореннями. Системи обробки інформації. Х.: ХУПС ім. І. Кожедуба, 2010. Вип. 9(90). С.94-98.
15. Лисечко В.П., Сопронюк І.І. Метод моніторинга спектра в когнітивних радіосетях на основі БПФ. Вестник Национального технического университета «ХПИ» - 2011. Вип. 16 2011. С.173 - 180.
16. Лисечко В.П., Сопронюк І.І., Ухова О.О. Метод моніторинга спектра в когнітивних радіосетях на основі використання інформаційного критерія Акайке. Системи обробки інформації. ХУПС ім. І. Кожедуба. 2011. Вип. 5(95). С.108-112.
17. Лисечко В.П., Сопронюк І.І., Фарид Абдель Самад. Дослідження завадостійкості систем безпроводового доступу. Системи обробки інформації. Х.: ХУПС. 2010. Вип. 2(83). С.153-155.
18. Лисечко В.П., Степаненко Ю.Г., Сопронюк І.І., Брюзгіна Н.О. Дослідження методів аналізу спектру в когнітивних радіомережах. Збірник наукових праць. Х.: Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба. 2010. Вип. 3 (25). С.137-145.
19. Обіход Я.Я. Розробка методу вибору каналів когнітивного радіо при множинному доступі первинних та вторинних користувачів з використанням

технології “ENERGY HARVESTING” під керуванням нейронної мережі / Я.Я. Обіход, В.П. Лисечко, Т.М. Олефіренко // Збірник наукових праць. Полтава: УкрДУЗТ, Вип. 3(49). 2018. С. 165-174.

20. Орленко П.П., Вишняков О.О. Оптимізація передачі даних у когнітивних мережах з використанням вейвлет-перетворень. Журнал «Електроніка та зв'язок». 2020. № 2. С. 33-40.

21. Проценко М. М. Методика вибору вейвлет-функції для обробки цифрових сигналів. Вісник ЖДТУ. Житомир, ЖДТУ, 2009. №49. С.97-100.

22. Тарасенко В.П., Сидоренко І.І. Методологія аналізу та обробки сигналів у телекомунікаційних системах. Журнал «Вісник Харківського національного університету радіоелектроніки». 2020. Т. 5. С. 51-59.

23. Трохимчук О.О., Тимошенко О.А. Аналіз параметрів когнітивних радіомереж з урахуванням інтерференційних складових. Вісник Дніпровського національного університету. 2020. Т. 10. С. 72-80.

24. Фролов В.М., Котляр А.М. Адаптивні алгоритми обробки сигналів в умовах шуму та інтерференції. Журнал «Радіоелектроніка». 2021. № 3. С. 44-51.

25. Хорошко В.О. Пошук та локалізація радіозакладних пристроїв: навчальний посібник / В.О. Хорошко, О.Д. Азаров, Г.О. Максименко, Ю.Є. Яремчук. ВНТУ. Вінниця, 2007. 333 с.

26. Яковлева О.М., Савастру О.В., Драганюк С.В. Методи підвищення завадостійкості в телекомунікаційних мережах. Журнал «Системи управління, навігації та зв'язку». 2019. № 4. С. 171-175.

27. Abdulsattar M., Hussein, Z.A. (2012). Energy detection technique for spectrum sensing in cognitive radio: a survey. International Journal of Computer Networks & Communications. (IJCNC), 4(5). P. 223–245.

28. Afifi W., Krunz M. TSRA: An Adaptive Mechanism for Switching between Communication Modes in Full-Duplex Opportunistic Spectrum Access Systems. IEEE Trans. Mob. Comput. 2017, 16, 1758–1772.

29. Ahmad W.S.H.M.W., Radzi N.A.M., Samidi F., Ismail A., Abdullah F., Jamaludin M.Z., Zakaria M. 5G technology: Towards dynamic spectrum sharing using cognitive radio networks. *IEEE Access* 2020, 8, 14460–14488.
30. Aijaz A., Aghvami A.H. Cognitive machine-to-machine communications for Internet-of-Things: A protocol stack perspective. *IEEE Internet Things J.* 2015, 2, 103–112.
31. Akyildiz I.F., Lo B.F., Balakrishnan R. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: A survey. *Phys. Commun.* 2011, 4, 40–62.
32. Ali M., Qaisar S., Naeem M., Ejaz W., Kvedaraite N. LTE-U WiFi HetNets: Enabling Spectrum Sharing for 5G/Beyond 5G Systems. *IEEE Internet Things Mag.* 2020, 3, 60–65.
33. Al-Kofahi, O.M.; Almasaeid, H.M.; Al-Mefleh, H. Efficient on-demand spectrum sensing in sensor-aided cognitive radio networks. *Comput. Commun.* 2020, 156, 11–24.
34. Arjoune Y., Kaabouch N. A comprehensive survey on spectrum sensing in cognitive radio networks: Recent advances, new challenges, and future research directions. *Sensors* 2019, 19, 126.
35. Aswathy G., Gopakumar K. Sub-Nyquist wideband spectrum sensing techniques for cognitive radio: A review and proposed techniques. *AEU Int. J. Electron. Commun.* 2019, 104, 44–57.
36. Awe O.P., Deligiannis A., Lambbotharan S. Spatio-temporal spectrum sensing in cognitive radio networks using beamformer-aided SVM algorithms. *IEEE Access* 2018, 6, 25377–25388.
37. Axell E., Leus G., Larsson E. G., & Poor H. V. (2012). Spectrum sensing for cognitive radio: State-of-the-art and recent advances. *IEEE Signal Processing Magazine*, 29(3). P. 101–116.
38. Bagwari A., Tomar G. S. (2013). Adaptive double-threshold based energy detector for spectrum sensing in cognitive radio networks. *International Journal of Electronics Letters*. 1(1): P. 24–32 DOI:10.1080/21681724.2013.773849

39. Batyha R.M., Janani S., Rose S.G.H. (2022). Cyclostationary Algorithm for Signal Analysis in Cognitive 4G Networks with Spectral Sensing and Resource Allocation. *International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS)*, 14(3). P. 47–58. <https://doi.org/10.17762/ijcnis.v14i3.5570>
40. Bayhan S., Gür G., Zubow A. PoMeS: Profit-maximizing sensor selection for crowd-sensed spectrum discovery. In *Proceedings of the International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks*, Poznan, Poland, 11–12 June 2019; pp. 3–16.
41. Bojja Venkatakrishnan S., Alwan E.A., Volakis J.L. Wideband RF Self-Interference Cancellation Circuit for Phased Array Simultaneous Transmit and Receive Systems. *IEEE Access* 2018, 6, 3425–3432.
42. Borza P.N., Machedon-Pisu M., Hamza-Lup F. Design of Wireless Sensors for IoT with Energy Storage and Communication Channel Heterogeneity. *Sensors* 2019, 19, 3364.
43. Cabric D., Tkachenko A., Brodersen R.W. (2006). Spectrum sensing measurements of pilot, energy, and collaborative detection. In *IEEE Military Communications Conference*, 2006. P. 1-7.
44. Cacciapuoti A.S., Akyildiz I.F., Paura L. Correlation-aware user selection for cooperative spectrum sensing in cognitive radio ad hoc networks. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 2012, 30, 297–306.
45. Chauhan P., Deka S.K., Chatterjee B.C., Sarma N. Cooperative Spectrum Prediction-Driven Sensing for Energy Constrained Cognitive Radio Networks. *IEEE Access* 2021, 9, 26107–26118.
46. Chen H., Zhou M., Xie L., Wang K., Li J. Joint spectrum sensing and resource allocation scheme in cognitive radio networks with spectrum sensing data falsification attack. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2016, 65, 9181–9191.
47. Chen Y., Zheng K., Zhang H. (2009). Spectrum sensing algorithms for cognitive radio: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 11(1). P. 84–98.

48. Clement J.C., Krishnan K.V., Bagubali A. (2012). Cognitive radio: Spectrum sensing problems in signal processing. *International Journal of Signal Processing*. 40(16). P. 37–40. DOI:10.5120/5067-7475
49. Dandawate A., Giannakis G. Statistical tests for presence of cyclostationarity. *IEEE Trans. Signal Process.* 1994, 42, 2355–2369.
50. Derakhshani M., Le-Ngoc T., Nasiri-Kenari M. Efficient Cooperative Cyclostationary Spectrum Sensing in Cognitive Radios at Low SNR Regimes. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2011, 10, 3754–3764.
51. Digham F., Alouini M.S., Simon K. On the Energy Detection of Unknown Signals Over Fading Channels. *IEEE Trans. Commun.* 2007, 55, 21–24.
52. Eduardo A.F., González Caballero R.G. Experimental evaluation of performance for spectrum sensing: Matched filter vs energy detector. *IEEE Colombian Conference on Communication and Computing*. P. 59–67. DOI: 10.1109/ColComCon.2015.7152105
53. Ejaz W., Ibnkahla M. Multiband spectrum sensing and resource allocation for IoT in cognitive 5G networks. *IEEE Internet Things J.* 2017, 5, 150–163.
54. Fang Y., Li L., Li Y., Peng H., Yang Y. Low energy consumption compressed spectrum sensing based on channel energy reconstruction in cognitive radio network. *Sensors* 2020, 20, 1264.
55. Gavrilovska L., Atanasovski V., Macaluso I., DaSilva L.A. Learning and reasoning in cognitive radio networks. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2013, 15, 1761–1777.
56. Ghasemi A., Sousa E.S. Spectrum sensing in cognitive radio networks: requirements, challenges and design trade-offs. *IEEE Communications Magazine*, Vol. 46(4), 2008. PP. 32-39.
57. Ghasemi A., Sousa E. Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments. In *Proceedings of the First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005, DySPAN 2005, Baltimore, MD, USA, 8–11 November 2005*; pp. 131–136.

58. Giri M.K., Majumder S. Eigenvalue-based cooperative spectrum sensing using kernel fuzzy c-means clustering. *Digit. Signal Process.* 2021, 111, 102996.
59. Gupta M.S., Kumar K. Progression on spectrum sensing for cognitive radio networks: A survey, classification, challenges and future research issues. *J. Netw. Comput. Appl.* 2019, 143, 47–76.
60. Hamdaoui B., Khalfi B., Guizani M. Compressed wideband spectrum sensing: Concept, challenges, and enablers. *IEEE Commun. Mag.* 2018, 56, 136–141.
61. Han S., Chih-Lin I., Xu Z., Rowell C. Large-scale antenna systems with hybrid analog and digital beamforming for millimeter wave 5G. *IEEE Commun. Mag.* 2015, 53, 186–194.
62. Havryliuk V. Audio Frequency Track Circuits Monitoring Based on Wavelet Transform and Artificial Neural Network Classifier. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). DOI: 10.1109/ukrcon.2019.8879833
63. Haykin S. Cognitive radio: brainempowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23(2). 2005. P. 201–220.
64. He Z.Q., Yuan X. Cascaded channel estimation for large intelligent metasurface assisted massive MIMO. *IEEE Wirel. Commun. Lett.* 2019, 9, 210–214.
65. Hossain M.A., Md Noor R., Yau K.L.A., Azzuhri S.R., Z'aba M.R., Ahmedy I., Jabbarpour M.R. Machine Learning-Based Cooperative Spectrum Sensing in Dynamic Segmentation Enabled Cognitive Radio Vehicular Network. *Energies* 2021, 14, 1169.
66. Hossain M.A., Schukat M., Barrett E. Enhancing the spectrum sensing performance of cluster-based cooperative cognitive radio networks via sequential multiple reporting channels. *Wirel. Pers. Commun.* 2021, 116, 2411–2433.
67. Huang S., Ye Y., Xiao M., Poor H.V., Skoglund M. Decentralized beamforming design for intelligent reflecting surface-enhanced cell-free networks. *IEEE Wirel. Commun. Lett.* 2020, 10, 673–677.

68. Indyk S., Lysechko V. The formation method of complex signals ensembles with increased volume based on the use of frequency bands. *Control, navigation and communication system*. 2020. Issue 4 (62). P. 119-121.
69. Jaber M., Nasser A., Charara N., Mansour A., Yao K.C. One-Class based Learning for Spectrum Sensing in Cognitive Radio. In *Proceedings of the 28th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, Amsterdam, The Netherlands, 18–21 January 2020.
70. Jia M., Zhang X., Sun J., Gu X.; Guo Q. Intelligent resource management for satellite and terrestrial spectrum shared networking toward B5G. *IEEE Wirel. Commun.* 2020, 27, 54–61.
71. Jin Z., Yao K., Lee B., Cho J., Zhang L. Channel status learning for cooperative spectrum sensing in energy-restricted cognitive radio networks. *IEEE Access* 2019, 7, 64946–64954.
72. Joshi G.P., Nam S.Y., Kim S.W. Cognitive radio wireless sensor networks: Applications, challenges and research trends. *Sensors* 2013, 13, 11196–11228.
73. Kadjo J.M., Yao K.C., Mansour A. Blind detection of cyclostationary features in the context of cognitive radio. In *Proceedings of the 2016 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT)*, Limassol, Cyprus, 12–14 December 2016; pp. 150–155.
74. Karpova R., Volkov M. Time-Frequency Analysis in Signal Processing. *Journal of Advanced Signal Research*, Vol. 11, No. 2, 2021, pp. 65-78. DOI: 10.1615/journal.2021.65-78.
75. Kassri N., Ennouaary A., Bah S. A review on SDR, spectrum sensing, and CR-based IoT in cognitive radio networks. *International Journal of Communications*. Vol. 12, No. 6. 2021. P. 100–121 DOI:10.14569/IJACSA.2021.0120613
76. Kaur A., Kumar K. Imperfect CSI based Intelligent Dynamic Spectrum Management using Cooperative Reinforcement Learning Framework in Cognitive Radio Networks. *IEEE Trans. Mob. Comput.* 2020.

77. Kaur A., Sharma S., Mishra A. An Efficient Opposition Based Grey Wolf Optimizer for Weight Adaptation in Cooperative Spectrum Sensing. *Wirel. Pers. Commun.* 2021, 1–20.
78. Kay S.M. Robust detection by autoregressive spectrum analysis. *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.* 1982, 30, 256–269.
79. Khalaf Z., Nafkha A., Palicot J. Blind Spectrum Detector for Cognitive Radio using Compressed Sensing. In *Proceedings of the 2011 IEEE Global Telecommunications Conference-GLOBECOM*, Houston, TX, USA, 5–9 December 2011.
80. Khamayseh S., Halawani A. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: a survey on machine learning-based methods. *Journal of Telecommunications and Information Technology.* 3. 2020. P. 36–46 DOI:10.26636/jtit.2020.137219
81. Khan A.A., Rehmani M.H., Rachedi A. Cognitive-radio-based internet of things: Applications, architectures, spectrum related functionalities, and future research directions. *IEEE Wirel. Commun.* 2017, 24, 17–25.
82. Khattab A., Elgaml N., Mourad H.A. Single-channel slotted contention in cognitive radio vehicular networks. *IET Commun.* 2019, 13, 1078–1089.
83. Kuznetsov T., Borysenko S. Machine Learning Applications in Signal Processing. *Kyiv Polytechnic Institute Journal*, Vol. 8, No. 4, 2021, pp. 97-109. DOI: 10.20535/kpi.2021.97-109.
84. Kwasinski A., Wang W., Mohammadi F.S. Reinforcement learning for resource allocation in cognitive radio networks. *Mach. Learn. Future Wirel. Commun.* 2020, 27–44.
85. Lee K.E., Park J.G., Yoo S.J. Intelligent Cognitive Radio Ad-Hoc Network: Planning, Learning and Dynamic Configuration. *Electronics* 2021, 10, 254.
86. Lee W., Kim M., Cho D. Deep Cooperative Sensing: Cooperative Spectrum Sensing Based on Convolutional Neural Networks. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2019, 68, 3005–3009.

87. Lees W.M., Wunderlich A., Jeavons P.J., Hale P.D., Souryal M.R. Deep learning classification of 3.5-GHz band spectrograms with applications to spectrum sensing. *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.* 2019, 5, 224–236.
88. Li W., Zhu C., Leung V.C., Yang L.T., Ma Y. Performance comparison of cognitive radio sensor networks for industrial IoT with different deployment patterns. *IEEE Syst. J.* 2015, 11, 1456–1466.
89. Li Z., Wu W., Liu X., Qi P. Improved cooperative spectrum sensing model based on machine learning for cognitive radio networks. *IET Commun.* 2018, 12, 2485–2492.
90. Liu B., Li Z., Si J., Zhou F. Optimal sensing interval in cognitive radio networks with imperfect spectrum sensing. *IET Commun.* 2016, 10, 189–198.
91. Liu X., Jia M., Zhang X., Lu W. A novel multichannel Internet of things based on dynamic spectrum sharing in 5G communication. *IEEE Internet Things J.* 2018, 6, 5962–5970.
92. Liu Y., Zhong Z., Wang G., Hu D. Cyclostationary Detection Based Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks. *Journal of Communications.* 10(1). 2015. P. 74–79 DOI:10.12720/jcm.10.1
93. Lu Y., Zhu P., Wang D., Fattouche M. Machine learning techniques with probability vector for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks. In *Proceedings of the 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Doha, Qatar, 3–6 April 2016*; pp. 1–6.
94. Mishra S., Sahai A., Brodersen R. Cooperative sensing among cognitive radios. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Communication, Istanbul, Turkey, 11–15 June 2006*; Volume 4, pp. 1658–1663.
95. Mitola J., Maguire G.Q. Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal. *IEEE Personal Communications*, Vol. 6(4), 1999. PP. 13-18.
96. Moawad A., Yao K.C., Mansour A., Gautier R.A. Wideband Spectrum Sensing Approach for Cognitive Radios Based on Cepstral Analysis. *IEEE Open J. Commun. Soc.* 2020, 1, 863–888.

97. Molina-Tenorio Y., Prieto-Guerrero A., Aguilar-Gonzalez R., Ruiz-Boqué S. Machine Learning Techniques Applied to Multiband Spectrum Sensing in Cognitive Radios. *Sensors* 2019, 19, 4715.
98. Moon B. Dynamic spectrum access for internet of things service in cognitive radio-enabled LPWANs. *Sensors* 2017, 17, 2818.
99. Mroue M., Nasser A., Parrein B., Mansour A., Zaki C., Cruz E.M. ESco: Eligibility score-based strategy for sensors selection in CR-IoT: Application to LoRaWAN. *Internet Things* 2021, 13, 100362.
100. Nasser Abbass, Hussein Al Haj Hassan, Jad Abou Chaaya, Ali Mansour, Koffi-Clément Yao Spectrum Sensing for Cognitive Radio: Recent Advances and Future Challenge. *Sensors* 2021, Vol. 21(7), 2408. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21072408>
101. Ning W., Huang X., Yang K., Wu F., Leng S. Reinforcement learning enabled cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks. *J. Commun. Netw.* 2020, 22, 12–22.
102. Ozturk M., Gogate M., Onireti O., Adeel A., Hussain A., Imran M.A. A novel deep learning driven, low-cost mobility prediction approach for 5G cellular networks: The case of the Control/Data Separation Architecture (CDSA). *Neurocomputing* 2019, 358, 479–489.
103. Obikhod Y.Y. Improvement of the cognitive radio system area management method with using neural networks / Y. Obikhod, V. Lysechko, Y. Sverhunova, O. Zhuchenko, O. Progonniy, G. Kachurovskiy, V. Tretijk, V. Malyuga, V. Voinov // *Eastern-European JOURNAL of enterprise technologies*, Vol. 4/9 (88). 2017. P. 22-29.
104. Obikhod, Y.Y. Mobile user's multiple detection method on the basis of the particle swarm optimization in the cognitive radio network. *Quarterly scientific and technical journal*. Kharkiv: National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" Vol. 2(2). 2018.P. 127-132.

105. Piyare R., Murphy A.L., Magno M., Benini L. On-demand LoRa: Asynchronous TDMA for energy efficient and low latency communication in IoT. *Sensors* 2018, 18, 3718.
106. Politis C., Maleki S., Tsinos C.G., Liolis K.P., Chatzinotas S., Ottersten B. Simultaneous Sensing and Transmission for Cognitive Radios With Imperfect Signal Cancellation. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2017, 16, 5599–5615.
107. Qin Z., Liu Y., Gao Y., El Kashlan M., Nallanathan A. Wireless powered cognitive radio networks with compressive sensing and matrix completion. *IEEE Trans. Commun.* 2016, 65, 1464–1476.
108. Rahman M.L., Zhang J.A., Huang X., Guo Y.J., Lu Z. Joint communication and radar sensing in 5G mobile network by compressive sensing. *IET Commun.* 2021, 14, 3977–3988.
109. Rodriguez J., Rodriguez L., Martinez A. Spectrum analysis and noise reduction in dynamic wireless networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing.* 2022. Vol. 21(5). PP. 1863-1875.
110. Sahai A., Patel G., Dick C., Sabharwal A. On the impact of phase noise on active cancelation in wireless full-duplex. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2013, 62, 3494-4510.
111. Saiapina I., Holub H., Kulbovskiy I. Improving Noise Immunity of Audio Frequency Track Circuits Using Neural Networks and Data Classification. (2023). *TRANSBALTICA XIII: Transportation Science and Technology*. DOI: 10.1007/978-3-031-25863-3_67.
112. Selen Y., Tullberg H., Kronander J. Sensor Selection for Cooperative Spectrum Sensing. In *Proceedings of the 2008 3rd IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Chicago, IL, USA, 14–17 October 2008; pp. 1–11.
113. Shang B., Liu L. Machine learning meets point process: Spatial spectrum sensing in user-centric networks. *IEEE Wirel. Commun. Lett.* 2019, 9, 34–37.

114. Shang B., Marojevic V., Yi Y., Abdalla A.S., Liu L. Spectrum sharing for UAV communications: Spatial spectrum sensing and open issues. *IEEE Veh. Technol. Mag.* 2020, 15, 104–112.

115. Shi Z., Gao W., Zhang S., Liu J., Kato N. AI-enhanced cooperative spectrum sensing for non-orthogonal multiple access. *IEEE Wirel. Commun.* 2019, 27, 173–179.

116. Shi Z., Gao W., Zhang S., Liu J., Kato N. Machine learning-enabled cooperative spectrum sensing for non-orthogonal multiple access. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2020, 19, 5692–5702.

117. Song M., Xin C., Zhao Y., Cheng X. Dynamic Spectrum Access: From Cognitive Radio to Network Radio. *IEEE J. Wirel. Commun.* 2012, 50, 23–29.

118. Subhedar M., Birajdar G. Spectrum sensing techniques in cognitive radio networks: A survey. *International Journal of Next-Generation Networks. (IJNGN) Vol. 3, No. 2.* 2011. P. 37–51 DOI:10.5121/ijngn.2011.3203

119. Supraja P., Gayathri V., Pitchai R. Optimized neural network for spectrum prediction using genetic algorithm in cognitive radio networks. *Clust. Comput.* 2019, 22, 157–163.

120. Supraja P., Pitchai R. Spectrum prediction in cognitive radio with hybrid optimized neural network. *Mob. Netw. Appl.* 2019, 24, 357–364.

121. Suresh S., Prakriya S., Bhatnagar M.R. Kurtosis based spectrum sensing in cognitive radio. *Phys. Commun.* 2012, 3, 230–239.

122. Tegui D., Nir V.L., Scheers B. Spectrum Sensing Method Based on The Likelihood Ratio Goodness of Fit test. *IEEE Electron. Lett.* 2015, 51, 253–255.

123. Toma O.H., Lopez-Benitez M., Patel D.K., Umebayashi K. Estimation of primary channel activity statistics in cognitive radio based on imperfect spectrum sensing. *IEEE Trans. Commun.* 2020, 68, 2016–2031.

124. Tseng F.H., Chao H.C., Wang J. Ultra-dense small cell planning using cognitive radio network toward 5G. *IEEE Wirel. Commun.* 2015, 22, 76–83.

125. Varun M., Annadurai C. PALM-CSS: A high accuracy and intelligent machine learning based cooperative spectrum sensing methodology in cognitive health care networks. *J. Ambient. Intell. Humaniz. Comput.* 2020.
126. Wang C.X., Haider F., Gao X., You X.H., Yang Y., Yuan D., Aggoune H.M., Haas H., Fletcher S., Hepsaydir E. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks. *IEEE Commun. Mag.* 2014, 52, 122–130.
127. Wen W.S., Kang Z.J., Qiu L., Zhao M. SNR-based weighted cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks. *J. China Univ. Posts Telecommun.* 2010, 17, 1–7.
128. Wilfred A., Okonkwo O. R. A review of cyclostationary feature detection-based spectrum sensing technique in cognitive radio networks. *E3 Journal of Scientific Research. EJSR* (4)3_16-01. P. 041–047, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.18685/0>
129. Willkomm D., Machiraju S., Bolot J., Wolisz A. Primary user behavior in cellular networks and implications for dynamic spectrum access. *IEEE Commun. Mag.* 2009, 47, 88–95.
130. Wu J., Wang C., Yu Y., Song T., Hu J. Performance optimisation of cooperative spectrum sensing in mobile cognitive radio networks. *IET Commun.* 2020, 14, 1028–1036.
131. Xin C. Network Coding Relayed Dynamic Spectrum Access. In *Proceedings of the ACM the Workshop in Cognitive Radio Networks (CoRoNet)*, Chicago, IL, USA, 20–24 October 2010; pp. 31–36.
132. Xing P., Liu J., Zhai C., Wang X., Zheng L. Self-interference suppression for the full-duplex wireless communication with large-scale antenna. *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.* 2016, 27, 764–774.
133. Xing X., Jing T., Li H., Huo Y., Cheng X., Znati T. Optimal spectrum sensing interval in cognitive radio networks. *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.* 2013, 25, 2408–2417.
134. Yang L., Chen Z., Yin F. Cyclo-energy detector for spectrum sensing in cognitive radio. *AEU Int. J. Electron. Commun.* 2012, 66, 89–92.

135. Yang Q., Huang Y.F., Yen Y.C., Chen L.Y., Chen H.H., Hong X.M., Shi J.H., Wang L. Location based joint spectrum sensing and radio resource allocation in cognitive radio enabled LTE-U systems. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2020, 69, 2967–2979.
136. Yazdani H., Vosoughi A., Gong X. Achievable Rates of Opportunistic Cognitive Radio Systems Using Reconfigurable Antennas with Imperfect Sensing and Channel Estimation. 2020, arXiv:2007.04390.
137. Yazdani H., Vosoughi A., Gong, X. Beam selection and discrete power allocation in opportunistic cognitive radio systems with limited feedback using ESPAR antennas. *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.* 2019, 6, 325–339.
138. Ye Y., Li Y., Lu G., Zhou F. Improved energy detection with Laplacian noise in cognitive radio. *IEEE Syst. J.* 2017, 13, 18–29.
139. Yilmaz Y., Guo Z., and Wang X. Sequential joint spectrum sensing and channel estimation for dynamic spectrum access. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 32(11), 2014, pp. 2000–2012.
140. Yu L., Wang Q., Guo Y., Li P. Spectrum availability prediction in cognitive aerospace communications: A deep learning perspective. In *Proceedings of the 2017 Cognitive Communications for Aerospace Applications Workshop (CCAA)*, Cleveland, OH, USA, 27–28 June 2017; pp. 1–4.
141. Yucek T., Arslan H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 11(1), 2009. P. 116–130.
142. Zappone A., Di Renzo M., Debbah M. Wireless networks design in the era of deep learning: Model-based, AI-based, or both? *IEEE Trans. Commun.* 2019, 67, 7331–7376.
143. Zayen B., Hayar A. M., Nussbaum D. Blind Spectrum Sensing for Cognitive Radio Based on Model Selection. *Mobile Commun. Group, Inst. Eurecom, Sophia Antipolis*, 2008, pp. 1-4.

144. Zeng Y., Liang, Y.-C. Spectrum-sensing algorithms for cognitive radio based on statistical covariances. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(4). 2007. P. 1804–1815.

145. Zeng Y., Liang Y.C. Eigenvalue-Based Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio. *IEEE Trans. Commun.* 2009, 57, 1784–1793.

146. Zhang Y., Li R., Duan L. Spectrum sharing for cognitive radio networks: A multi-agent reinforcement learning approach. *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2021. Vol. 18(2). pp. 823-835.

147. Zhang G., Wang X., Liang Y.C., Liu J. Fast and Robust Spectrum Sensing via Kolmogorov-Smirnov Test. *IEEE Trans. Commun.* 2010, 58, 3410–3416.

148. Zhang R., Liang Y.-C. (2009). Robust distributed spectrum sensing in cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(4). P. 1762–1770.

149. Zhang W., Wang C.X., Ge X., Chen Y. Enhanced 5G cognitive radio networks based on spectrum sharing and spectrum aggregation. *IEEE Trans. Commun.* 2018, 66, 6304–6316.

150. Zhang X., Ma Y., Qi H., Gao Y., Xie Z., Xie Z., Zhang M., Wang X., Wei G., Li Z. Distributed compressive sensing augmented wideband spectrum sharing for cognitive IoT. *IEEE Internet Things J.* 2018, 5, 3234–3245.

151. Zheng G., Krikidis I.O., Ottersten B. Full-Duplex Cooperative Cognitive Radio with Transmit Imperfections. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2013, 12, 2498–2511.

152. Zheng S., Chen S., Qi P., Zhou H., Yang X. Spectrum sensing based on deep learning classification for cognitive radios. *China Commun.* 2020, 17, 138–148.

153. Zhou X., Sun M., Li G.Y., Juang B.H. Intelligent Wireless Communications Enabled by Cognitive Radio and Machine Learning. *China Commun.* 2018, 15, 16–48.

154. Zhu Y., Liu J., Feng Z., Zhang P. Sensing Performance of Efficient Cyclostationary Detector with Multiple Antennas in Multipath Fading and Lognormal Shadowing Environments. *J. Commun. Netw.* 2014, 16, 162–171.