

РЕЦЕНЗІЯ

офіційного рецензента
на дисертаційну роботу
СОПРОНЮКА Івана Івановича

на тему: «Методи моніторингу частотного спектру для підвищення ефективності безпроводових когнітивних телекомунікаційних систем»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії,
спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»,
галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

Актуальність теми дисертації.

У сучасному світі безпроводові технології, які охоплюють майже всі сфери суспільного життя, набувають дедалі більшого значення, перетворюючи радіочастотний спектр на один із найважливіших ресурсів. Класичні традиційні методи управління радіочастотним спектром є недостатньо ефективними для задоволення зростаючих вимог сучасних технологій. Це зумовлює необхідність впровадження технологій когнітивних телекомунікаційних систем, які завдяки інтелектуальним методам аналізу та управління радіочастотним спектром здатні забезпечити його раціональне використання.

Ефективність таких систем значною мірою визначається не лише технологічними інноваціями, але й адаптивними регуляторними підходами. Когнітивний моніторинг спектру передбачає не просто реєстрацію поточного стану його використання, але й здатність до навчання, прогнозування, а також розробки та впровадження оптимальних рішень у реальному часі. Це дозволяє знизити рівень взаємних завад, підвищити ефективність використання радіочастотного спектру та адаптуватися до складних умов сучасного радіосередовища.

З цього випливає актуальність та перспективність досліджень методів моніторингу частотного спектру, яким присвячене дисертаційне дослідження. Однією з головних переваг когнітивних мереж є їх здатність активувати ресурси виключно тоді, коли це потрібно користувачам, що сприяє значній економії енергії та фінансових витрат. Окрім цього, вдосконалення методів спектрального моніторингу здатне суттєво підвищити безпеку і стійкість систем зв'язку. Зокрема, це дозволяє ідентифікувати зловмисні аномалії, уникати «спектральних пасток» та ефективно реагувати на перенасичення каналів зв'язку, що є надзвичайно важливим для забезпечення національної безпеки та оборони. Для вирішення цих завдань майбутні системи повинні інтегрувати багаторівневі підходи до моніторингу стану радіосередовища.

Особливу увагу варто звернути на соціальний аспект впровадження когнітивних систем моніторингу. В умовах воєнного конфлікту, який триває в Україні, такі системи можуть гарантувати надійність зв'язку навіть у складних умовах радіозавад чи блокувань. У післявоєнний період вони відкривають нові можливості для створення сучасної цифрової інфраструктури, здатної залучати інвестиції та сприяти економічному відновленню країни.

Оцінка наукового рівня дисертації.

Вибрана дисертантом тема роботи пов'язана з науковою проблематикою в телекомунікаціях та радіотехніці та спрямована на формування нових наукових положень та компетенцій у галузі електроніки та телекомунікацій.

Вибір теми та мети дослідження виявляє глибоке розуміння глобальних викликів та інноваційних рішень і робить дослідження значущим як у науковому, так і у практичному контексті.

Методи дослідження, що використані в роботі відповідають сучасним вимогам до наукових досліджень. Здобувач відмінно виконав всі етапи наукового дослідження: огляд літератури, системний аналіз, моделювання, оптимізація, проектування та синтез та провів порівняння отриманих даних із відомими дослідженнями. Отримані здобувачем результати розв'язують актуальну науково-практичну задачу підвищення ефективності безпроводових когнітивних телекомунікаційних систем шляхом розробки та впровадження гібридних методів спектрального моніторингу, отриманих на основі оптимізації та удосконалення методів аналізу радіочастотного спектру, та розроблених адаптивних алгоритмів управління спектральними ресурсами в умовах динамічно змінюваного радіосередовища. Таким чином, варто відмітити високий рівень виконання поставленого наукового завдання, оволодіння методологією наукової діяльності.

Ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків, сформульованих у дисертації.

Дисертаційну роботу, подану до розгляду, можна характеризувати як достатньо обґрунтовану наукову роботу, що має чіткий структурований вигляд. Усі наукові результати, які отримані автором І. І. Сопронюком, опираються на загальноприйняті стандарти у галузі аналізу та обробки сигналів безпроводового зв'язку. Автором на високому рівні і у достатньому обсязі проведені теоретичні та експериментальні дослідження, для розроблених та удосконалених методів запропоновані відповідні алгоритми їх реалізації, виконано аналіз та вибір критеріїв оцінки ефективності, що дозволяє здійснити порівняння ряду показників проведення спектрального аналізу та детектування сигналів для різних технологій зв'язку.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень та результатів підтверджується коректною постановкою завдань, визначенням умов та обмежень процесу детектування сигналів, аналізом та вибором моделей сигналу та шуму, результатами проведення верифікації запропонованих алгоритмів спектрального аналізу.

Достовірність наукових положень і висновків та повнота викладу основних положень дисертації в опублікованих працях.

В запропонованій роботі для досягнення поставленої загальної мети дослідження було розв'язано ряд взаємопов'язаних часткових задач, зокрема:

здійснено аналіз вимог стандартів сучасного безпроводового зв'язку до методів спектрального моніторингу; розроблено ряд алгоритмів гібридних методів спектрального моніторингу з вивченням і реалізацією динамічного часового сегментування, адаптивних методів фільтрації при різних заводових умовах роботи систем; адаптивного вейвлет-перетворення для забезпечення гнучкості, адаптивності та здатності працювати з просторовими сигналами в

реальному часі, використанням інформаційних критеріїв Акайке і Байєса для оптимального вибору моделей сигналу з урахуванням балансу між точністю та складністю моделі; розроблена програмна реалізація запропонованих алгоритмів, що дозволяє здійснити достовірну верифікацію методів і отримати якісні і кількісні показники їх роботи у порівнянні з традиційними методами.

На основі розв'язання цих завдань сформовано наукові результати і висновки, які в сукупності підтверджують досягнення поставленої мети.

Достовірність отриманих наукових результатів в дисертації підтверджена через: чітку постановку завдання дослідження, що відповідає реальним умовам; результатами комп'ютерного моделювання, які демонструють покращені результати стосовно підвищення ефективності роботи пристроїв телекомунікацій.

Запропоновані результати та висновки були опубліковані та пройшли апробацію згідно встановлених вимог, зокрема у 13 наукових працях, серед яких 9 статей у фахових виданнях, 1 у міжнародному виданні, 4 доповіді на міжнародних наукових конференціях. Особистий внесок здобувача, що включає розробку нових методів, алгоритмів та технічних рішень, повною мірою відображений в публікаціях і вказаний у вступі роботи.

Практичне застосування результатів досліджень підкріплене актами впровадження, що додаються до дисертаційної роботи.

Наукова новизна та практична цінність одержаних результатів та висновків.

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.

Практична цінність результатів дослідження полягає у впровадженні нових підходів до моніторингу частотного спектру, які значно підвищують ефективність роботи безпроводових когнітивних телекомунікаційних систем. Розроблені методи дозволяють аналізувати спектральні ресурси в реальному часі, знаходити вільні частоти та прогнозувати їх використання з мінімізацією впливу інтерференції. Завдяки цьому досягається оптимізація спектрального розподілу, що є ключовим завданням у сучасних умовах перевантаження радіочастотного середовища.

У практичному аспекті ці результати можуть бути використані для покращення якості мобільного зв'язку, збільшення пропускної здатності мереж і забезпечення стабільності передачі даних навіть у складних умовах. Розроблені методи також сприятимуть вдосконаленню систем державного спектрального моніторингу, що дозволить ефективніше боротися з нелегальним використанням частот та забезпечувати раціональний розподіл ресурсу.

Структура дисертаційної роботи та відповідність встановленим вимогам. Структура роботи включає всі необхідні компоненти. Мета, задачі, предмет і об'єкт дослідження вибрані коректно і точно описують область дослідження. Ідеї, методи, моделі та результати виражені чітко і лаконічно, узагальнено рекомендації щодо впровадження а також визначено суть вкладу в науку. Зміст кожного розділу логічний, відповідає суті завдання, не містить надлишкової інформації.

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. Загальний обсяг дисертаційної роботи викладено на 181 сторінці.

В анотації дисертації стисло представлені основні результати дослідження із зазначенням наукової новизни та практичного значення і дозволяє сформулювати загальне уявлення про об'єм і зміст представленої роботи.

У **вступі** міститься коротка характеристика роботи, чітко обґрунтовано актуальність і своєчасність проведеного дослідження, сформульовано мету, предмет і об'єкт дослідження, сформовано перелік задач, які необхідно розв'язати для досягнення поставленої мети, висвітлено наукові і практичні результати дослідження. Подана інформація про публікації автора та його особистий вклад по темі дослідження, показана загальна структура роботи.

В **першому розділі** обґрунтовано важливість застосування адаптивних підходів для підвищення якості виявлення сигналів у складних умовах радіосередовища. Доведено, що існуючі методи виявлення потребують вдосконалення для забезпечення більшої ефективності в умовах замирань, шуму та інтерференції. Проведено порівняльний аналіз методів моніторингу частотного спектру включаючи адаптивні підходи.

В **другому розділі** на основі проведеного порівняльного аналізу різних методів спектрального моніторингу вперше розроблено метод моніторингу спектру на основі декомпозиції часових сегментів та адаптивного спектрального аналізу (VTSM), який забезпечує значні переваги порівняно з методами: енергетичне детектування, узгоджена фільтрація, моніторинг на основі форми

сигналу та циклостационарне детектування. Результати верифікації показали найбільшу ефективність методу VTSM при середніх і високих рівнях SNR, особливо у середовищах, де динаміка сигналів і шуму змінюється.

Третій розділ зосереджується на встановленні необхідності і ефективності використання адаптивних методів фільтрації та вейвлет-перетворення при виконанні спектрального аналізу та детектування сигналів. Розроблено методологію та алгоритм інтегрованого методу спектрального моніторингу з використанням вейвлет-перетворень та фільтрації на різних етапах обробки сигналів. Запропоновано комплексний підхід до спектрального моніторингу, який включає етапи збору сигналів, попередньої обробки, рекурсивного часового сегментування та спектрального аналізу, що дозволяє ефективно працювати в умовах високого рівня шумів та спотворень.

В четвертому розділі розроблено алгоритм методу ієрархічного циклічного моніторингу частотного спектру, який відрізняється від традиційних підходів через використання адаптивних фільтраційних методів. Інтеграція інформаційних критеріїв Акайке та Байєса допомагає уникати перенавчання моделей, забезпечуючи оптимальний баланс між складністю моделі та її точністю, що є суттєвою перевагою над класичними підходами, які не враховують динамічні зміни в радіочастотному спектрі.

Висновки адекватно відображають стан і рівень виконання поставлених завдань, об'єктивно показують новизну і практичну цінність отриманих результатів, підкреслюють внесок автора у науку, вказують обмеження та напрямки майбутніх досліджень, є логічно зв'язаними і обґрунтованими.

Список використаних джерел містить 154 найменування, з них 26 вітчизняних публікацій. Слід відмітити, що в основному автор спирався на сучасну літературу з використанням досвіду закордонних науковців та розробників у галузі. Посилання в тексті дисертації оформлені коректно, що забезпечує дотримання академічної доброчесності при підготовці роботи.

Загалом подача матеріалу, наукових концепцій і висновків відзначається доступним і зрозумілим стилем, позначення всіх параметрів і змінних відповідають загальноприйнятому математичному апарату, пояснення формул викладені чітко і повністю, висновки супроводжуються достатньою кількістю ілюстративного матеріалу, що наочно демонструє показники методів для широкого кола сигналів різних типів технологій зв'язку.

Відсутність (наявність) порушень академічної доброчесності. За результатами перевірки дисертації та наукових публікацій встановлено, що текст є оригінальним, не виявлено плагіату, самоплагіату, фабрикивання, фальсифікування даних чи будь яких інших порушень принципів академічної доброчесності.

Зауваження до змісту та оформлення дисертації.

До змісту роботи виникли наступні запитання:

1. Пункт 1.3. містить якісний порівняльний аналіз актуальних методів моніторингу частотного спектру. Проте не розглядається оцінка кількісних показників ефективності кожного методу.

2. Для алгоритму VTSM основою для встановлення порогових значень детектування є оцінка енергетичних статистик. Проте відсутні вказівки щодо

оцінки похибок і відхилень при вимірюванні цих енергетичних показників, що впливає на якість визначення порогу.

3. З роботи не зрозуміло, на які існуючі наукові розробки чи практичні підходи спирався автор при формуванні алгоритму, представленого на рис. 3.2.

До оформлення рецензованої роботи є деякі зауваження:

1. Формула розрахунку SNR зустрічається в тексті роботи двічі як (1.7) та (4.11).

2. У формулах (3.5) (3.21) відсутнє розшифрування змінних.

3. В різних частинах роботи присутні різні позначення вхідного сигналу як, $y(t)$, $r(t)$, $x(t)$, що може ускладнювати сприйняття.

4. Об'єкти на рисунках варто виділяти не лише кольором а й числовими чи символічними позначеннями для можливості правильно інтерпретувати результати для друкованого варіанту роботи.

Висновок щодо відповідності дисертації чинним вимогам.

1. Дисертаційну роботу Сопрошока Івана Івановича на тему: «Методи моніторингу частотного спектру для підвищення ефективності безпроводових когнітивних телекомунікаційних систем» можна вважати завершеною науковою працею, що включає самостійні авторські висновки і результати, які мають наукове підґрунтя і є адаптовані для практичного застосування в галузі телекомунікацій.

2. Дисертаційна робота за змістом та оформленням відповідає «Вимогам до оформлення дисертації», Наказ № 40 МОН України від 12.01.2017 р. зі змінами, внесеними згідно з Наказом МОН України № 759 від 31.05.2019 р.

3. Дисертаційна робота відповідає спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка», галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» та вимогам постанови «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» затвердженої Кабінетом Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 р (зі змінами, внесеними згідно з Постановою КМУ № 502 від 19.05.2023р.), а її автор, Сопронюк Іван Іванович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка», галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації».

Офіційний рецензент
професор кафедри транспортно-логістичного зв'язку
доктор технічних наук, професор

«04» 02 2025 року



Микола ШТОМПЕЛЬ

Підпис засвідчую:

Особистий підпис
засвідчую 04.02 2025 р.
Завідуючий канцелярією
УкрДУЗТ

Світлана Чепелюк