

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

В.о. ректора

Українського державного університету
залізничного транспорту,

д.т.н., професор

Сергій ПАНЧЕНКО

24 січня 2025



ВИСНОВОК

Українського державного університету залізничного транспорту
про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів
дисертації

Бершова В'ячеслава Султанбековича на тему «Методи формування
ансамблів складних сигналів для підвищення завадостійкості безпроводових
когнітивних телекомунікаційних мереж», поданої на здобуття наукового ступеня
доктора філософії

спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка

з галузі знань 17 – Електроніка та телекомунікації

1. Актуальність теми дослідження та її зв'язок з науково-дослідними роботами.

В умовах війни когнітивні радіомережі стали набагато важливішими, ніж просто засіб електронних комунікацій. Їхня безперебійна та скоординована робота є основою обороноздатності країни, захисту критично важливої інфраструктури та забезпечення надійного зв'язку для військових і цивільних. Завдяки адаптивним властивостям і можливості динамічного управління частотним спектром, когнітивні мережі забезпечують стійке управління у складних умовах бойових дій, підтримують функціонування енергетичних, транспортних і комунікаційних мереж, а також забезпечують зв'язок у регіонах з активними бойовими діями, блекаутами чи іншими надзвичайними ситуаціями.

Однак ефективна робота когнітивних радіомереж у змінному спектральному середовищі пов'язана з рядом викликів. Серед них – необхідність швидко реагувати на зміну доступності частот, що ускладнюється високою конкуренцією за ресурси через зростання кількості користувачів і нерівномірність розподілу спектра. Це може спричинити зниження якості зв'язку через шуми, міжканальну та міжсимвольну інтерференцію, і, відповідно, нестабільну пропускну здатність. Крім того, когнітивні радіомережі часто стають об'єктами кібератак, які можуть створювати перешкоди або спричинити збої в

стають об'єктами кібератак, які можуть створювати перешкоди або спричиняти збої в роботі систем, що потребує застосування надійних методів захисту.

Забезпечення безперебійної роботи когнітивних радіомереж можливе завдяки використанню ключових технологічних підходів. Одним із них є динамічне управління спектром, яке дозволяє системам автоматично адаптуватися до змін у спектральному середовищі, максимально ефективно використовуючи доступні частоти. Використання алгоритмів машинного навчання для аналізу і прогнозування змін у спектрі також підвищує ефективність управління ресурсами.

Додатково, застосування методів багаторівневого рекурентного аналізу, сегментування, адаптивної фільтрації та оптимізації параметрів сигналів дозволяє когнітивним мережам ефективно розпізнавати й обробляти сигнали навіть за умов значних завад і шумів.

Таким чином, актуальним завданням є підвищення завадостійкості та пропускну здатності когнітивних безпроводових радіомереж шляхом розробки та впровадження методів, моделей і алгоритмів багаторівневого рекурентного часово-частотного сегментування сигналів. Це включає трансформацію складних сигналів і оптимізацію їхніх параметрів із врахуванням потреб користувачів, ефективності використання спектральних ресурсів, а також мінімізації взаємної кореляції сигналів для зниження інтерференції та покращення якості зв'язку.

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 дисертаційної роботи акт впровадження результатів дисертаційного дослідження. Також результати роботи впроваджено в навчальний процес Луцького національного технічного університету – Додаток В дисертаційної роботи.

2. Мета і задачі дослідження.

У дисертаційній роботі визначено мету дисертаційного дослідження, якою є підвищення завадостійкості безпроводових когнітивних телекомунікаційних систем шляхом формування ансамблів складних сигналів, отриманих на основі оптимізації та удосконалення методів багаторівневого рекурентного часово-частотного сегментування та розроблених адаптивних алгоритмів аналізу і обробки ансамблів складних сигналів.

Для досягнення зазначеної мети здобувачем було поставлено та виконано наступні визначено наступні часткові задачі дослідження.

1. Виконано порівняльну оцінку сучасних методів аналізу, обробки та формування ансамблів складних сигналів у когнітивних радіомережах з зосередженням уваги на технологіях та алгоритмах обробки складних

ансамблів, а також теоретичні та практичні дослідження шляхів підвищення завадостійкості та пропускнуї здатності в інтелектуальних телекомунікаційних системах. Визначено переваги та недоліки ефективності існуючих методів багаторівневого рекурентного частотно-часового сегментування, науково обґрунтовано застосування найдієвіших з врахуванням адаптивності до умов швидкозмінного радіосередовища.

2. Удосконалено метод багаторівневого рекурентного часо-частотного сегментування для збільшення об'ємів ансамблів сигналів, розроблено практичний алгоритм багаторівневого сегментування, оптимізовано з застосуванням математичних методів часо-частотний розподіл для створення максимального обсягу ансамблів складних сигналів.

3. Здійснено наукове обґрунтування, надано математичний інструментарій, розроблено адаптивний алгоритм та програмну реалізацію методу аналізу та обробки ансамблів складних сигналів на основі специфічних перетворень та оптимізованих фільтрів, що використовуються на різних етапах багатоступеневого рекурентного часо-частотного сегментування. Проведено відповідні обчислення з експериментальними доказами стабільності роботи запропонованого методу.

4. Розроблено та верифіковано метод формування ансамблів складних сигналів на основі багатомасштабної (мультискейлової) декомпозиції часових інтервалів на різних рівнях часової деталізації та проведено моделювання досліджень і відповідні тести.

5. Оцінено ефективність запропонованого методу багатомасштабної декомпозиції часових інтервалів у реальних умовах шляхом аналізу розрахункових значень ключових показників (MSE, SNR, кореляція) та визначено його вплив на якість сигналів у когнітивних телекомунікаційних мережах.

6. Проведено порівняльний аналіз результатів розрахунків ключових показників (MSE, SNR, кореляція) для запропонованого методу та традиційних підходів, обґрунтовано його переваги у зниженні шумів, оптимізації спектру і підвищенні завадостійкості.

3. Наукові положення, розроблені особисто здобувачем, та їх новизна.

Здобувачем виконано актуальне науково-технічне завдання по підвищенню ефективності безпроводових когнітивних телекомунікаційних систем на основі впровадження методів, моделей та практичних алгоритмів багаторівневого рекурентного часо-частотного сегментування складних сигналів з подальшою трансформацією складних сигналів та оптимізацією параметрів, підвищення завадостійкості.

Об'єктом дослідження є процес створення ансамблів складних сигналів на основі багаторівневої рекурентної декомпозиції часової та частотної областей та подальшої трансформації та оптимізації параметрів сигналів.

Предмет дослідження – методи, моделі, алгоритми оптимізації та багаторівневої рекурентної сегментації.

Положення, що виносяться на захист і є науковими результатами, дисертаційної роботи є наступні:

1. **Удосконалено** метод багаторівневого рекурентного часового сегментування інтервалів на основі часово-частотних перетворень та адаптивної фільтрації для підвищення ефективності аналізу та обробки сигналів, з метою створення ансамблів сигналів на різних рівнях часової і частотної деталізації, що дозволяє забезпечити високу точність і адаптивність в умовах динамічного когнітивного радіосередовища

2. **Удосконалено** метод аналізу та обробки ансамблів складних сигналів на основі застосування специфічних перетворень та оптимізованих фільтрів на різних етапах методу багатоступеневого рекурентного часово-частотного сегментування з врахуванням умов зміни параметрів сигналу, наявності та інтенсивності завад, а також швидкозмінних характеристик когнітивного радіосередовища. Запропонований метод відрізняється від існуючих здатністю до адаптації і ефективного аналізу сигналів у складних умовах когнітивного радіосередовища, що забезпечує високий рівень завадостійкості телекомунікаційної системи.

3. **Вперше запропоновано** метод формування ансамблів складних сигналів на основі багатомасштабної (мультискейлової) часової сегментної декомпозиції, який дозволяє створювати ансамблі сигналів на різних рівнях часової деталізації (макро, мезо і мікро-рівень), забезпечуючи кращу адаптивність, ефективність та завадостійкість порівняно з традиційними підходами, які використовують однорідні декомпозиції.

4. Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій.

Дисертаційна робота здобувача Бершова В.С. є завершеною науковою працею, яка виконувалась протягом 2022-2025.

Наукові положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи є в достатній мірі обґрунтованими та впливають з результатів досліджень. Зокрема, при виконанні дослідження використано значний обсяг сучасних літературних джерел, значна кількість яких є авторитетними науковими публікаціями, що індексуються наукометричними базами Scopus, WoS та інші.

Методи дослідження. У дисертаційному дослідженні для вирішення поставлених задач було використано широкий спектр методів та підходів.

Зокрема, методи оптимізації застосовувались для визначення оптимальних параметрів складних сигналів і розробки ефективних алгоритмів управління спектральними ресурсами. Теорія ймовірностей слугувала базою для аналізу характеристик випадкових процесів, що виникають у середовищі когнітивних радіомереж під впливом динамічних змін спектрального ресурсу. Теорія інформації використовувалась для оцінки ефективності передачі даних у багатокористувацькому середовищі, з урахуванням умов множинного доступу та потенційного впливу завад.

Для підтвердження теоретичних результатів та перевірки висунутих гіпотез було застосовано методи імітаційного моделювання, що дозволили створити віртуальні моделі когнітивних мереж і дослідити їх поведінку в різних сценаріях. Також широко використовувались методи симуляції, які забезпечували можливість перевірки працездатності запропонованих алгоритмів у умовах реальних технічних обмежень.

Додатково, для аналізу отриманих результатів були залучені статистичні методи, зокрема методи вибіркової статистики, регресійного аналізу для встановлення функціональних залежностей між ключовими параметрами системи, а також кореляційного аналізу для оцінки ступеня взаємозв'язку між характеристиками сигналів і якістю зв'язку. Цей комплекс методів забезпечив повний і всебічний аналіз поставлених у дослідженні задач.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень та результатів дисертації підтверджується апробацією на фахових конференціях та семінарах, публікацією в рецензованих наукових виданнях та актами впровадження (військова частина А7223 та навчальний процес Луцького національного технічного університету).

5. Теоретичне і практичне значення результатів дисертаційного дослідження

У дисертаційній роботі отримано нове рішення науково-технічної задачі по підвищенню завадостійкості та пропускну здатності безпроводових когнітивних радіосистем, за рахунок формування ансамблів складних сигналів на основі методів оптимізації та удосконалених методів багаторівневого рекурентного сегментування часової та частотної областей, з побудовою адаптивних алгоритмів з високим ступенем деталізації аналізу та обробки сигналів.

Практичне значення отриманих результатів:

– на основі порівняльного аналізу методів аналізу, обробки та формування ансамблів складних сигналів у когнітивних радіомережах, виявлено їх переваги та недоліки, а також на реальних прикладах проведено експериментальне тестування сучасних багаторівневих рекурентних методів. За результатами експериментів обґрунтовано і доведено їх достатню практичну ефективність для

реалізації практичних задач в когнітивних радіомережах, яка стосується методів багаторівневого рекурентного частотно-часового сегментування;

– розроблено алгоритм багаторівневого рекурентного часово-частотного сегментування ансамблів складних сигналів, де на різних етапах науково обґрунтовано вибір оптимальних методів перетворення та фільтрації. Доведено, що застосування запропонованого адаптивного алгоритму дозволяє підвищити ефективність обробки сигналів в діапазоні від 21,3 до 30,5% в залежності від початкового рівня шумів та інтерференції, характеристик сигналу та складності когнітивної радіомережі;

– розроблено алгоритм і програмні рішення до оптимізованого методу аналізу та обробки ансамблів складних сигналів з застосуванням специфічних перетворень та адаптивних фільтрів, що в результаті експериментальної апробації дозволило отримати ефективність у показниках зниження рівня шуму на 21,7–29,6% та підвищенні рівня показників якості сигналу на 14,3–24,5%;

– розроблено алгоритм та програмну реалізацію методу багаторівневого рекурентного часово-частотного сегментування з врахуванням адаптивного використання фільтрів, таких як LMS та RLS та оптимізованих перетворень, таких як STFT, вейвлет та Гілберта, що дозволило в загальному вигляді підвищити завадостійкість системи на 9,8-18,9%;

– розроблено алгоритм та програмну реалізацію методу багатомасштабної (мультискейлової) часової декомпозиції з першого до третього рівня, а також оцінено ефективність алгоритму, в результаті чого отримано наступні практичні результати у вигляді динаміки розрахункових показників. А саме: зменшення помилки (MSE) системи на 62,5–69,7%, що підвищує точність відновлення сигналу та завадостійкість, збільшення співвідношення сигнал/шум (SNR) на 41,4–55,3%, що призводить до зменшення впливу шумів, і підвищує якість передачі даних та пропускну здатність; зниження енергетичних витрат на 35,4–43,5%, що доводить ефективне використання енергії при тривалій роботі радіосистеми;

– верифіковано запропоновані методи, визначено їх ефективність та переваги у порівнянні з традиційними методами. Доведено, що запропоновані методи забезпечують вищу точність аналізу та обробки сигналів, підвищення показників завадостійкості, а також оптимізацію використання частотного спектру. Отримані результати підтверджено позитивною динамікою показників, а саме: зниження рівня інтерференції на 21,5-27,3%, енергетичних витрат у діапазоні 35,4–43,5%, підвищення співвідношення сигнал/шум на 41,4–55,3%, збільшення загальної пропускну здатності мережі на 12,3-14,6%.

6. Апробація результатів дослідження.

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 «ХП», 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, комунікаційні технології». Харків: УкрДУЗТ, 25 жовтня 2024 р.;
- I міжвузівська наукова конференція «Стан та перспективи розвитку інфокомунікацій в сучасних умовах». Харківський національний університет повітряних сил ім. І. Кожедуба. Харків: 22 листопада 2024. С. 80-81.

7. Повнота викладення основних наукових результатів дисертації в публікаціях та особистий внесок у них автора.

Дисертаційна робота є результатом самостійного науково-прикладного дослідження автора. Результати дисертаційного дослідження, що складають наукову новизну та виносяться на захист, отримано здобувачем самостійно. Науково-практичні результати, отримані в даного дисертаційного дослідження опубліковано у 10 наукових працях: 4 статей у фахових виданнях України, 1 стаття у міжнародному виданні та відображено у 5 публікаціях за матеріалами міжнародних науково-практичних конференцій.

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати:

1. Bershov V., Zhuchenko O. Adaptive method of forming complex signals ensembles based on multi-level recurrent time-frequency segment modeling. Наукоємні технології, «Електроніка, телекомунікації та радіотехніка», № 3 (63), 2024. С. 257-264. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.63.18953>
2. Bershov, V., Yakymchuk N. The method of forming ensembles of complex signals based on multi-scale decomposition of time intervals at different levels of detail. Науковий журнал «Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво». Телекомунікації та радіотехніка, Луцьк, № 56, 2024. С. 325-334. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-56-39>
3. [Lysechko V., Bershov V. Justification of Filter Selection Methods for Enhancing the Efficiency of Multilevel Recurrent Time-Frequency Segmentation. SISIOT \(Security of Infocommunication Systems and Internet of Things\), vol. 2, no.1, p. 01006, 2024. P. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.31861/sisiot2024.1.01006>](#)
4. Lysechko V. P., Komar O. M., Bershov V. S., Veklych O. K. Optimization of the parameters of synthesized signals using linear approximations by the Nelder-Mead method. Radio Electronics, Computer Science, Control, (3), 35, 2024. P. 35-43. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-3-4> (**Web Of Science** – 2024).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

5. 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, issue 3/3. 2024. P. 6-19. ISSN 1312-3823 (print), ISSN 2367-6620 (online).*

6. Bershov V. S., Zhuchenko O. S. Optimization of complex signal ensembles through the use of adaptive filtering in the multiscale temporal decomposition method. *Проблеми інформатики та моделювання (ПІМ-2024). Тези 24 міжнародної науково-технічної конференції. Харків: НТУ «ХП», 20-23 вересня 2024. С. 51-52.*

7. Bershov V. S., Zhuchenko O. S. Adaptive method for forming signal ensembles based on multilevel time-frequency segmentation. Тези доповідей за матеріалами 37 міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті». Харків: УкрДУЗТ, 10-11 жовтня 2024. С.51-53.

8. Бершов В. С., Жученко О. С. Обґрунтування методу багатомасштабної декомпозиції часових інтервалів. Тези XII міжнародної науково-практичної конференції «Людина, суспільство, комунікаційні технології». Харків: УкрДУЗТ, 25 жовтня 2024 р. С. 152-154.

9. Komar O., Veklych O., Bershov V. Optimization methods for signal processing to enhance interference resilience in modern communication systems. Тези доповіді за матеріалами I міжвузівською наукової конференції «Стан та перспективи розвитку інфокомунікацій в сучасних умовах». Харківський національний університет повітряних сил ім. І. Кожедуба. Харків: 22 листопада 2024. С. 80-81.

10. Lysechko V. P., Bershov V. S. The method of multilevel recurrent time frequency segmentation with adaptive filtering. Тези доповіді за матеріалами I міжвузівською наукової конференції «Стан та перспективи розвитку інфокомунікацій в сучасних умовах». Харківський національний університет повітряних сил ім. І. Кожедуба. Харків: 22 листопада 2024. С. 82-83.

У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать такі наукові результати: [1] – представлено розроблений адаптивний метод формування ансамблів складних сигналів, заснованого на багаторівневому рекурентному часово-частотному сегментуванні; [2] – запропоновано новий підхід до формування ансамблів сигналів у динамічних когнітивних радіосередовищах, заснований на багатомасштабній декомпозиції часових інтервалів, що дозволяє створювати ансамблі сигналів з різними рівнями

часових деталей; [3] – здійснено обґрунтування методів вибору фільтрів для підвищення ефективності багаторівневої рекурентної частотно-часової сегментації в когнітивних телекомунікаційних системах; [4] – розроблено та перевірено алгоритми, на основі методу Нелдера-Міда для оптимізації параметрів лінійних апроксимацій синтезованих сигналів, які об'єднують спектральний, часовий і статистичний аналізи та забезпечують розумну оптимізацію; [5] – проведено поглиблений аналіз методів оцінки впливу енергетичних і кореляційних властивостей сигналів на їх стійкість до міжканальних перешкод в інтелектуальних радіосистемах, запропоновано інноваційні механізми автоматичного виявлення та компенсації перешкод; [6] – розроблено метод оптимізації складних ансамблів сигналів шляхом використання адаптивної фільтрації в методі багатомасштабної часової декомпозиції; [7] – досліджено впровадження адаптивного методу формування ансамблів складних сигналів, заснованого на багаторівневому рекурентному часово-частотному сегментуванні, що дозволяє змінювати використовувати сегменти неоднакової довжини для забезпечення гнучкості та адаптації процесу обробки; [8] – запропоновано аналіз та обґрунтування застосування методу багатомасштабної декомпозиції часових інтервалів для збільшення об'ємів ансамблів сигналів; [9] – здійснено аналіз та порівняльну оцінку методів оптимізації обробки сигналів для підвищення стійкості до перешкод у сучасних системах зв'язку; [10] – розроблено та верифіковано метод багаторівневої рекурентної часової частотної сегментації з адаптивною фільтрацією для створення максимального обсягу ансамблів складних сигналів.

8. Загальний висновок.

Дисертаційна робота Бершова В'ячеслава Султанбековича на тему «Методи формування ансамблів складних сигналів для підвищення завадостійкості безпроводових когнітивних телекомунікаційних мереж», є оригінальним, самостійним, завершеним науковим дослідженням, що стосується актуальної проблематики і містить оригінальні підходи щодо розв'язання теоретичних та практичних завдань по підвищенню ефективності безпроводових когнітивних телекомунікаційних систем.

Основні положення, висновки та рекомендації дисертаційного дослідження містять елементи наукової новизни, є повністю обґрунтованими та науково-практично аргументованими і отримали апробацію на наукових та науково-практичних конференціях. Всі наукові положення та отримані результати дослідження знайшли відображення в публікаціях здобувача. Зміст дисертації відповідає визначеній меті. Поставлені здобувачем наукові завдання вирішені в повній мірі і науково обґрунтовані. Мету дослідження досягнуто.

Роботу виконано у відповідності до вимог академічної доброчесності. Ознак академічного плагіату не виявлено. Дисертаційне дослідження виконане державною мовою.

За актуальністю, ступенем новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною цінністю здобутих результатів дисертація Бершова В'ячеслава Султанбековича відповідає спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» з галузі знань 17 – Електроніка та телекомунікації та вимогам Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у вищих навчальних закладах (наукових установах), затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 року № 261 (зі змінами і доповненнями від 03 квітня 2019 року № 283) та вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44 зі змінами, внесеними згідно з постановою Кабінету Міністрів України від 21 березня 2022 року № 341, а також Вимогам до оформлення дисертації, затвердженим наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 року № 40.

Дисертація Бершова В'ячеслава Султанбековича на тему «Методи формування ансамблів складних сигналів для підвищення завадостійкості безпроводових когнітивних телекомунікаційних мереж», може бути рекомендована до подання та захисту в разовій спеціалізованій вченій раді на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Головуючий:
Ректор Українського
державного університету
залізничного транспорту,
д.т.н., професор



Сергій ПАНЧЕНКО

Декан факультету
інформаційно-керуючих
систем та технологій,
доцент кафедри автоматичної та
комп'ютерного телекерування
рухом поїздів, к.т.н., доцент



Сергій ЗМІЙ