

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ІВАНЕНКО СТАНІСЛАВ АНДРІЙОВИЧ

УДК 621.391

ДИСЕРТАЦІЯ
**ВИЗНАЧЕННЯ НЕЗАЙНЯТИХ ЧАСТОТНИХ КАНАЛІВ У
КОГНІТИВНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ МЕТОДАМИ ВИЯВЛЕННЯ ТА
РОЗПІЗНАВАННЯ СИГНАЛІВ В УМОВАХ АПРІОРНОЇ
НЕВИЗНАЧЕНОСТІ**

Спеціальність: 05.12.17 – Радіотехнічні та телевізійні системи

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

Науковий керівник: Безрук Валерій Михайлович,
доктор технічних наук, професор

Ідентичність всіх примірників дисертації засвідчую:

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

Харків – 2019

АНОТАЦІЯ

Іваненко С.А. Визначення незайнятих частотних каналів у когнітивних радіомережах методами виявлення та розпізнавання сигналів в умовах апріорної невизначеності. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.12.17 «Радіотехнічні та телевізійні системи». - Харківський національний університет радіоелектроніки, - Харків, 2019.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної наукової задачі пошуку незайнятих частотних каналів у когнітивних радіомережах.

Проведено аналіз існуючих методів виявлення первинних користувачів частотного ресурсу, зокрема розглянуто виявлення первинних передавачів за допомогою наступних методів: енергетичного методу, методу узгодженої фільтрації, кореляційного та циклостационарного методів. Також були розглянуті дві групи алгоритмів: параметричні та непараметричні.

В результаті аналізу були виявлені певні недоліки розглянутих методів щодо їх використання для задач пошуку незайнятих частотних каналів у когнітивних радіомережах. Здебільшого це обумовлено тим, що більшість із них потребую певну кількість апріорної інформації щодо сигналів, які необхідно виявити. В реальних умовах роботи, враховуючи широкий діапазон частот, у яких працює стандарт когнітивного радіо IEEE 802.22 (54-862 МГц), мати необхідну кількість даних не представляється можливим. В свою чергу це створює суттєву апріорну невизначеність при вирішенні задачі радіомоніторингу у когнітивних радіомережах і створює певні обмеження щодо використання відомих алгоритмів виявлення сигналів.

З метою вирішення задачі виявлення незайнятих частотних каналів у когнітивних радіомережах запропоновано використання алгоритмів

виявлення змін статистичних властивостей сигналів. Дані алгоритми дозволяють виявляти невідомі сигнали з метою знаходження незайнятих частотних каналів в умовах апіорної невизначеності.

Досліджено робочі характеристики і виконано порівняльний аналіз розроблених алгоритмів шляхом імітаційного моделювання на ЕОМ з використанням реальних сигналів, які працюють у діапазоні частот, що визначені для роботи стандарту. Для цього були використані широкосмуговий та вузькосмуговий сигнали. Проведено аналіз ефективності роботи даних алгоритмів.

Здійснено вибір оптимальних алгоритмів виявлення сигналів за сукупністю показників якості методами багатокритеріальної оптимізації.

Знайдений оптимальний час сканування під час виявлення сигналів запропонованими методами. Вироблено рекомендації щодо використання алгоритмів виявлення та розпізнавання сигналів під час сканування спектру.

Ключові слова: алгоритми виявлення невідомих сигналів, когнітивна радімережа, частотний ресурс, радіомоніторинг, ефективність використання радіоспектру, сканування, розпізнавання, апіорна невизначеність.

ABSTRACT

Ivanenko S.A. Determination of unoccupied frequency channels in cognitive radio networks by methods of signal detection and recognition шт. сщтвшешщт щт а priori uncertainty. - Qualification research work as a manuscript.

The thesis for a candidate degree (Ph.D.) in major 05.12.17 – radiotechnical and television systems. – Kharkiv National University of Radio Electronics. – Kharkiv, 2018.

The dissertation work is devoted to the solution of an actual scientific problem of search of unoccupied frequency channels in cognitive radio networks.

The analysis of existing methods for identifying the primary users of the frequency resource was performed. It was considered the detection of primary

transmitters using the following method: the energy method, the method of matched filtering, correlation and cyclostationary methods. Two groups of algorithms were also considered: parametric and nonparametric.

Certain drawbacks of their use for the search of unoccupied frequency channels in cognitive radio networks were revealed. This is mainly due to the fact that most of them need a certain amount of a priori information regarding the signals that need to be detected. In practice, given the wide range of frequencies in which the IEEE 802.22 (54-862 MHz) cognitive radio standard operates, it is not possible to have the required amount of data. In turn, this creates a significant a priori uncertainty in solving the problem of radio monitoring in cognitive radio networks and creates certain restrictions on the use of known signal detection algorithms.

In order to solve the problem of detection of unoccupied frequency channels in cognitive radio networks the using of detecting algorithms of changes in the statistical properties of signals is proposed. These algorithms make it possible to detect unknown signals in order to find unoccupied frequency channels under a priori uncertainty.

The performance characteristics are investigated and the comparative analysis of the developed algorithms is carried out by simulation on a computer using real signals operating in the frequency range defined for the standard. Broadband and narrowband signals were used for this purpose. The analysis of the efficiency of these algorithms was performed.

The choice of optimal algorithms for detection of signals in the aggregate indicators of the quality of methods of multicriteria optimization was performed

The optimal scanning time during radio monitoring in cognitive radio networks was found. Recommendations on the use of algorithms for detection and recognition of signals during spectrum scanning are developed.

Keywords: mobile communication network, signal detection algorithms, cognitive resource allocation, resource clustering, space-time access.

Список публікацій здобувача:

1. Иваненко С.А., Оптимизация при планировании сетей 4G / С.А. Иваненко, В.М. Безрук // 3-я Международная научно-практическая конференция молодых ученых «Інфокомунікації- сучасність та майбутнє», Одеса, ОНАЗ, 17-18 октября 2013. - С. 38-39.
2. Ivanenko S.A., Planning and Optimization of Networks 4G / S.A. Ivanenko, V.M. Bezruk // 23-rd "International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2013), (Sevastopol, Crimea, Ukraine, September 8-13 2013. - P. 500-501.
3. Безрук В.М., Многокритериальная оптимизация проектных решений при планировании сетей LTE / В.М. Безрук, С.А. Иваненко, Д.В. Чеботарёва // Первая международная научно-практическая конференция "Проблемы инфокоммуникаций. Наука и технологии. PIC S&T' – 2013", Харьков, Украина 9-11 октября 2013. - С. 87-89.
4. Bezruk V., Multicriteria Optimization in Planning of Mobile Communication Networks / V. Bezruk, D. Chebotareva, S. Ivanenko, M. Jo // 20th International Conference On Microwaves, Radar And Wireless Communications "Mikon-2014, Gdansk, Poland, June 16 – 18 2014. - P. 633-640.
5. Безрук В.М., Методы многокритериальной оптимизации в планировании сетей мобильной связи / В.М. Безрук, С.А. Иваненко, Д.В. Чеботарёва // VII Міжнародна науково-практична конференція "Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій", Запоріжжя, Україна, 17-19 вересня 2014. - С. 74-75.
6. Bezruk V.M., , Multicriteria Choice of Optimal Design Decisions When Planning of LTE Networks / V.M. Bezruk, D.V. Chebotareva, S.A. Ivanenko // XIIth International Conference "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, TCSET'2014", Lviv-Slavske, Ukraine, February 25 – March 1 2014. - P. 53-55.

7. Иваненко С.А., Анализ эффективности антенных систем mimo при различных видах модуляции в рамках многокритериальной оптимизации сетей LTE / С.А. Иваненко, В.М. Безрук // 19-й Международный молодежный форум «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И МОЛОДЕЖЬ В XXI веке», Харьков, 20 – 22 апреля 2015. - С. 147-148.

8. Ivanenko S.A., Methods of Detecting of Unknown Signals in Cognitive Radio Network / S.A. Ivanenko, V.M. Bezruk // The Third International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications. Science and Technology» PICS&T-2016, Kharkiv, October 4–6 2016. – P. 65–66.

9. Иваненко С.А., Методы обнаружения незанятых частотных каналов в когнитивных радиосетях / С.А. Иваненко, В.М. Безрук // IEEE Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки «УкрМіКо'2016/UkrMiCo'2016», Київ, 11-15 вересня 2016. - С. 385-387.

10. Иваненко С.А., Применение коротких рамочных антенн с целью повышения качественных характеристик приёма в когнитивных радиосетях / С.А. Иваненко, В.М. Безрук // 20-й Юбилейный алгоритмы и антенна международный молодежный форум «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И МОЛОДЕЖЬ В XXI веке» Харьков, 19 – 21 апреля 2016. С. 39-40.

11. Иваненко С.А., Обнаружение и распознавание радиоизлучений при автоматизированном радиомониторинге заданных частотных диапазонов / С.А. Иваненко, В.М. Безрук // V-а Міжнародна науково-практична конференція «Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах», Чернівці, 3-5 листопада 2016. С. 67-68.

12. Иваненко С.А., Методы обнаружения незанятых частотных каналов в когнитивных радиосетях / С.А. Иваненко, В.М. Безрук // 2-я Международная научно-техническая конференция «Проблемы электромагнитной совместимости перспективных беспроводных сетей связи» ЭМС-2016, Харьков, 24-25 мая 2016. С.23-24.

13. Волошина Е.Ю., Применение SDR технологии в задачах радиомониторинга / Е.Ю. Волошина, С.А. Иваненко // 21-й Международный молодежный форум «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И МОЛОДЕЖЬ В XXI веке», Харьков, 25 – 27 апреля 2017. С. 147-148.

14. Дмитренко І.В., Оптимізація зони покриття мережі WI-FI / І.В. Дмитренко, С.А. Иваненко // 21-й Международный молодежный форум «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И МОЛОДЕЖЬ В XXI веке», Харьков, 25 – 27 апреля 2017. С. 151-152.

15. Малявіна К.В., Застосування SDR технології у системах супутникового зв'язку / К.В. Малявіна, С.А. Иваненко // 21-й Международный молодежный форум «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И МОЛОДЕЖЬ В XXI веке», Харьков, 25 – 27 апреля 2017. С. 169-170.

16. Дмитренко І.В., Розробка магнітної рамкової антени для задач радіомоніторингу короткохвильового діапазону // І.В. Дмитренко, С.А. Иваненко // 22-й Международный молодежный форум «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И МОЛОДЕЖЬ В XXI веке», Харьков, 17-20 апреля 2018. С. 54-55.

17. Дмитренко І.В., Дослідження методів узгодження магнітної рамкової антени в короткохвильовому діапазоні // І.В. Дмитренко, С.А. Иваненко // XII Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів, Харків, 17-19 квітня 2018. С. 176-177.

18. Волошина О.Ю., Дослідження алгоритму виявлення невідомих сигналів у когнітивних радіомережах // О.Ю. Волошина, С.А. Иваненко // XII Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів, Харків, 17-19 квітня 2018. 2 с.

19. Дмитренко І.В., Покращення зони покриття мережі WI-FI за допомогою антени Харченко / І.В. Дмитренко, С.А. Иваненко // VI-й Міжнародний Радіоелектронний Форум «ПРИКЛАДНА РАДІОЕЛЕКТРОНІКА. СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ» МРФ–2017 Харків, 24 - 26 жовтня 2017. С. 228-231.

20. Іваненко С.А., Исследование алгоритмов обнаружения неизвестных сигналов в когнитивных радиосетях / С.А. Іваненко, В.М. Безрук, Калюжний Н.М. // VI-й Міжнародний Радіоелектронний Форум «ПРИКЛАДНА РАДІОЕЛЕКТРОНІКА. СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ» МРФ–2017 Харків, 24 - 26 жовтня 2017. С. 225-227.

21. Ivanenko S., Bezruk V. Methods of Signal Detecting in Automated Radiomonitoring // The Second International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2017). - Odessa, September 11-15 2017. P. 374–376.

22. Ivanenko S., Methods for the Detection and Recognition of Signals in Conditions of a Priori Uncertainty/ S. Ivanenko, V. Bezruk //The Third International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics «УкрMiCo'2018/ UkrMiCo'2018» , Odessa, September 10–14 2018. P. 1-5.

23. Іваненко С.А., Обнаружение незанятых частотных каналов в когнитивных радиосетях / С.А. Іваненко, В.М. Безрук // Радиоелектроника и информатика: научн.-техн. журн. - 2017. - №1(76). – С. 4–8.

24. Іваненко С.А., Исследования методов обнаружения неизвестных сигналов / В.М. Безрук, С.А. Іваненко // Радиотехника: Всеукр. міжвед. научн.-техн. сб.- 2017. – Вып. 191. – С. 167–172.

25. Ivanenko S. Detection of unknown signals in cognitive radio networks / S. Ivanenko, V. Bezruk, // Information and Telecommunication Sciences. – 2018. - Вып. 1. – P. 5–10 DOI: 10.20535/2411-2976.12018.5-10

26. Безрук В.М., Обнаружение и распознавание сигналов в условиях повышенной априорной неопределенности в задачах радиомониторинга /В.М. Безрук, С.А. Іваненко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава. – 2018. - Вып. 2(48). – С. 135–141. DOI:10.26906/SUNZ.2018.2.135

27. Безрук В.М. Сравнительный анализ алгоритмов обнаружения неизвестных сигналов с учетом совокупности показателей качества / В.М.

Безрук, С.А. Иваненко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи.–2018. – Вип. 2(86) – С. 67–74. DOI: 10.32620/reks.2018.2.07

28. Ivanenko S.A. Signal recognition when conducting radio monitoring in cognitive radio networks / S.A Ivanenko., V.M. Bezruk // Sciences of Europe (Praha, Czech Republic). – 2018. – VOL 2, No 29, – P. 59–65.

29. Bezruk V. Selection and recognition of the specified radio signals in the sw band / V. Bezruk, S. Ivanenko // Information and Telecommunication Sciences. – 2018. – №. 2. – С. 21–26. DOI: 10.20535/2411-2976.22018.21-26

30. Иваненко С.А. Обнаружение и распознавание сигналов в условиях априорной неопределенности при автоматизированном радиомониторинге / С.А. Иваненко, В.М. Безрук // Радиоэлектроника и информатика: научн.-техн. журн. – 2018. – №3(82). – С. 8–12.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ ТА ТЕРМІНІВ	13
ВСТУП.....	15
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЗАДАЧ РАДІОМОНІТОРИНГУ В КОГНІТИВНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ	23
1.1. Аналіз технології когнітивного радіо	23
1.2. Методи управління та забезпечення адаптивності когнітивних радіомереж	29
1.3. Аналіз методів виявлення незайнятих частотних каналів під час радіомоніторингу в когнітивних радіомережах.....	36
1.3.1. Інтерференційний метод виявлення незайнятих частотних каналів....	41
1.3.2. Методи виявлення сигналів первинних радіоприймачів.....	42
1.3.3. Методи виявлення первинних радіопередавачів.....	42
1.3.4. Енергетичний метод виявлення сигналів.....	46
1.3.5. Метод узгодженої фільтрації.....	47
1.3.6. Метод виявлення властивостей циклостационарності.....	48
1.3.7. Кореляційний метод.....	49
1.3.8. Моніторинг спектру на основі параметричних алгоритмів.....	50
1.3.9. Моніторинг спектру на основі непараметричних алгоритмів.....	50
1.3.10. Алгоритм виявлення сигналів на основі виявлення зміни імовірнісних властивостей сигналів.....	53
Висновки по розділу 1.....	55
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ВИЯВЛЕННЯ НЕВІДОМИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ ЗАДАЧ РАДІОМОНІТОРИНГУ	56
2.1. Методи виявлення невідомих сигналів на основі зміни імовірнісних властивостей.....	56
2.2. Дослідження статистичних характеристик шуму в частотних каналах.....	59

2.3. Визначення порогових значень вирішальної статистики в алгоритмах виявлення невідомих сигналів в частотних каналах.....	68
Висновки по розділу 2.....	72
РОЗДІЛ 3 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ ВИЯВЛЕННЯ НЕВІДОМИХ СИГНАЛІВ ШЛЯХОМ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НА ЕОМ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕАЛЬНИХ СИГНАЛІВ І ШУМУ	74
3.1. Вибір умов проведення експерименту з дослідження алгоритмів виявлення.....	74
3.2. Дослідження робочих характеристик алгоритмів виявлення невідомих сигналів методом імітаційного моделювання на ЕОМ.....	78
3.3. Оцінювання показників якості алгоритмів виявлення невідомих сигналів за сукупністю показників якості.....	90
3.4. Вибір оптимальних алгоритмів виявлення невідомих сигналів за сукупністю показників якості методами багатокритеріальної оптимізації.....	91
Висновки по розділу 3.....	97
РОЗДІЛ 4 РОЗПІЗНАВАННЯ СИГНАЛІВ В КОГНІТИВНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ ПРИ НАЯВНОСТІ КЛАСУ НЕВІДОМИХ СИГНАЛІВ.....	100
4.1. Постановка задачі розпізнавання сигналів в задачах радіомоніторингу..	100
4.2. Методи розпізнавання сигналів при наявності класу невідомих сигналів..	101
4.3. Дослідження методів розпізнавання заданих сигналів із використанням реальних сигналів.....	101
Висновки по розділу 4.....	114
РОЗДІЛ 5 ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АЛГОРИТМІВ ВИЯВЛЕННЯ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ СИГНАЛІВ В КОГНІТИВНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ.....	116
5.1. Визначення оптимального часу сканування частотних каналів	116

5.2. Особливості використання алгоритмів виявлення невідомих сигналів в КР при кооперативному скануванні спектру	122
5.3. Процедури функціонування когнітивних радіомереж з використанням алгоритмів виявлення невідомих сигналів та розпізнавання заданих під час радіомоніторингу.....	126
Висновки по розділу 5.....	128
ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ.....	130
Список використаних джерел.....	134
Додаток А.....	148
Додаток Б.....	149

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ ТА ТЕРМІНІВ

АБГШ – адитивний білий гаусів шум;
АВ – алгоритм виявлення;
АС – абонентська станція;
БС – базова станція;
ВСШ – відношення сигнал-шум;
ВЧ – високі частоти;
ДЕФ – дискретні експоненційні функції;
ДПФ – дискретне перетворення Фур'є;
ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;
КР – когнітивне радіо;
НЧ – низькі частоти;
ПП – первинний передавач;
ППРЧ – програмне перестроювання радіочастоти;
РМ – радіомоніторинг;
ШПФ – швидке перетворення Фур'є;
АМ (Amplitude Modulation) – амплітудна модуляція;
CW (Morse Code) – код Морзе;
CDMA (Code Division Multiple Access) – множинний доступ з кодовим розподілом;
DVB-T (Digital Video Broadcasting – Terrestrial) – стандарт наземного цифрового телебачення;
FM (Frequency Modulation) – частотна модуляція;
FCC (Federal Communications Commission) – федеральна комісія зв'язку;
FSK (Frequency Shift Keying) – частотна маніпуляція;
LTE (Long-Term Evolution) – довгостроковий розвиток;
MIMO (Multiple Input Multiple Output) – множинний вхід- множинний вихід;
NFM (Narrow Frequency Modulation) – вузька частотна модуляція;

OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) – мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів;

SDR (Software Defined Radio) – програмно визначуване радіо;

SISO (Single Input Single Output) – єдиний вхід - єдиний вихід;

SSB (Single-sideband Modulation) – однополосна модуляція;

SSF (Spectrum Sensing Function) – функції сканування спектра;

SNR (Signal-to-noise ratio) – відношення сигнал-шум;

TDD (Time Division Duplex) – часовий дуплекс;

TPC (transmission power control) – управління потужністю передачі;

UWB (Ultra-Wide Band) – надширока смуга;

WFM (Wide Frequency Modulation) – широка частотна модуляція;

WMAN (Wireless Metropolitan Area Networks) – бездротові міські мережі.

WPAN (Wireless personal area network) – бездротові персональні мережі.

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток інфокомунікаційних технологій, які визначаються зростанням обсягів трафіку і появи нових послуг, призводить до необхідності постійного зростання і модернізації телекомунікаційних систем. Особливий розвиток отримали бездротові технології, які стрімко розвиваються в поточний момент часу [1]. Проблемними особливостями надання послуг бездротового зв'язку є [2]:

- зростаюча швидкість передачі даних;
- брак частотних каналів;
- невисока ефективність використання частотного ресурсу, внаслідок статичного розподілу частот за ліцензіями.

На сьогоднішній день розподіл смуг частот між операторами зв'язку відбувається на підставі відповідних ліцензій державних органів частотного регулювання. Ліцензовані смуги частот доступні для використання тільки тими користувачами, за якими вони закріплені. Однак сам радіоресурс є обмеженим і як показують проведені дослідження [2], його використання ефективно не на всіх доступних частотах.

Тому при експлуатації бездротових мереж в першу чергу необхідно контролювати завантаженість частотного ресурсу і проводити пошук незайнятих частотних каналів, які тимчасово не використовуються первинними ліцензійними користувачами. У цьому напрямі одним із ключових підходів до підвищення ефективності використання частотного ресурсу є використання методів управління і механізмів, що базуються на принципах когнітивності. Такий підхід був запропонований в роботах J. Mitola і став засновником концепції когнітивного радіо [4,5].

Даний підхід дозволяє використовувати незайняті ділянки спектру в ті моменти, коли вони не використовуються первинними користувачами, які мають право їх експлуатації на ліцензійній основі. Це надає можливість

підвищити ефективність використання спектру на етапі надання доступу до частотного ресурсу.

Когнітивна радіомережа (КР) – це бездротова система зв'язку, яка шляхом аналізу навколишньої ситуації і адаптації до неї шляхом навчання, реагує на зміни в середовищі зміною своїх параметрів у реальному часі з метою збільшення ефективності використання спектрального ресурсу [5]. Важливою особливістю систем КР є їх можливість виявлення і динамічного використання незайнятих діапазонів радіочастот для доступу абонентів до мережі КР. Така можливість здійснюється завдяки проведенню автономного радіомоніторингу (РМ) у всьому робочому діапазоні частот, який може становити від декількох МГц до одиниць ГГц, що визначається стандартом, який використовує когнітивні функції.

Основним завданням РМ в КР є виявлення сигналів, які діють у всьому робочому діапазоні частот, і поділі цього діапазону на «зайняті» та «вільні» смуги частот [7-9].

Значний внесок щодо завдань радіомоніторингу, виявлення та розпізнавання сигналів в інформаційних системах внесли багато вчених. Серед них Коханович Г. Ф. [9], Рембовський, А. М. [7], Богданович В.А. [10], Сенін А.Г. [11], Козьмін В.А [12], Сосулин Ю.Г. [13], Чемаров А.О. [14], Омельченко В.А. [15], [16], Безрук В.М. [8]. Із зарубіжних дослідників великий внесок внесли Helstrom С. W. [17], Poor, Н. V. [18] та ін.

Завдання виявлення сигналів в КР є досить складним, так як в даний момент часу в ефірі працює велика кількість джерел радіовипромінювання, що використовують різні види сигналів і параметрів модуляції. І кожен день їх кількість зростає, тому мати відомості про всі джерела радіовипромінювання не представляється можливим. Таким чином, в силу обмеженості апріорних відомостей щодо сигналів, які підлягають виявленню, найчастіше характерний граничний випадок – повна їх відсутність.

Так як процес РМ в КР виключає оператора, який коригує параметри мережі, потрібне застосування таких алгоритмів виявлення (АВ),

характеристики яких були б стійкі щодо невідомих параметрів і властивостей виявляємих сигналів в широкому діапазоні частот.

Варіантом подолання апріорної невизначеності подібного роду може бути застосування адаптивних АВ. Адаптивні параметричні АВ радіосигналів мають на увазі використання моделей стандартних законів розподілу, таких як розподіл Гаусса, Релея, Райса і ряду інших подібних, але в разі зміни виду функції розподілу сигналу ефективність виявлення вищезазначених алгоритмів падає [20-23].

Подолати апріорну невизначеність також можна із застосуванням алгоритмів, що використовують принцип інваріантності. Але даний тип АВ забезпечує ефективне виявлення тільки вузькосмугових сигналів. В діапазоні роботи КР зустрічаються також і широкосмугові сигнали телевізійного мовлення і УКХ радіостанції [14, 22,23].

Виявлення широкосмугових сигналів є суттєвою проблемою в умовах апріорної невизначеності. Алгоритми, що дозволяють їх виявити представлені у [6], [24-27].

Дані АВ можуть бути засновані на використанні кореляційного аналізу, вейвлет-аналізу [28] або перевірці спостережуваного сигналу на ознаки циклостационарності [30-32].

Хоча зазначені методи мають суттєву завадостійкість при порівнянні з енергетичним детектором, але водночас вимагають значних обчислювальних витрат і часу на обробку інформації. Крім того, для використання більшості даних алгоритмів потрібно апріорне знання ширини смуги, яку займає сигнал, який виявляється, що на практиці складно для виконання.

Одним із шляхів подолання апріорної невизначеності є застосування алгоритмів, що використовують для виявлення зміну статистичних властивостей сигналів. В цьому напрямку працювали такі вчені як Лібенсон М. Н. [32], Андерсон Т. [33], Айвазян С.А [34]. АВ синтезовані на основі даних ознак не вимагають апріорних відомостей щодо характеристик сигналів.

Таким чином, більшість АВ незайнятих частотних каналів малопридатна для ефективної роботи в задачах радіомоніторингу в КР і в даний час розробка алгоритмів визначення незайнятих частотних каналів, орієнтованих на застосування в умовах апріорної невизначеності щодо діючих в робочій смузі сигналів є *актуальною науково-прикладною задачею*.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.

Дисертаційні дослідження проводились відповідно до наступних програм та нормативно-правових документів: Закон України «Про основні засади розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки» від 09.01.2007 р., № 537-V, Закон України «Про телекомунікації» від 18.11.2003 р., № 1280-IV, Державна науково-технічна програма «Створення перспективних телекомунікаційних систем і технологій», планів наукової, науково-технічної діяльності Харківського національного університету радіоелектроніки. Матеріали дисертації було використано у звіті про науково-дослідну роботу № 320 «Розроблення нової інформаційної технології комплексного розпізнавання радіо випромінюючих об'єктів методами статистичної радіотехніки та штучного інтелекту» (№ ДР 0117U002528), у якій здобувач був виконавцем.

Мета і задачі дослідження.

Метою дисертаційної роботи є визначення незайнятих частотних каналів в КР методами виявлення та розпізнавання сигналів в умовах апріорної невизначеності.

Відповідно до зазначеної мети в роботі поставлені і вирішені наступні **задачі**:

1. Порівняльний аналіз існуючих алгоритмів виявлення сигналів і оцінка ступеня їх застосовності для вирішення завдання радіомоніторингу в КР.

2. Розробка алгоритмів визначення незайнятих каналів методами виявлення невідомих сигналів для задач радіомоніторингу в умовах апріорної невизначеності.

3. Дослідження робочих характеристик і порівняльний аналіз запропонованих методів виявлення невідомих сигналів шляхом імітаційного моделювання на ЕОМ з використанням реальних сигналів та шуму.

4. Вибір оптимальних алгоритмів виявлення невідомих сигналів за сукупністю показників якості методами багатокритеріальної оптимізації.

5. Розробка алгоритму селекції та розпізнавання заданих сигналів під час радіомоніторингу в КР.

6. Визначення оптимального часу сканування при застосуванні запропонованих алгоритмів виявлення сигналів.

7. Вироблення рекомендацій щодо процедур функціонування когнітивних радіомереж під час РМ.

Об'єкт дослідження. Визначення незайнятих частотних каналів при проведенні РМ в КР.

Предмет дослідження. Методи виявлення невідомих та розпізнавання заданих сигналів на основі зміни імовірнісних властивостей сигналів, які дозволяють розв'язати задачу виявлення незайнятих частотних каналів у когнітивних радіомережах

Методи досліджень При вирішенні поставлених задач використані методи теорії ймовірності і математичної статистики, статистичної радіотехніки, теорії виявлення, спектрального аналізу, методи імітаційного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Запропоновано нові методи виявлення незайнятих частотних каналів в когнітивних радіомережах, які відрізняються використанням методів виявлення невідомих сигналів на фоні шуму в умовах апріорної невизначеності, які базуються на зміні імовірнісних властивостей

спостережень. Запропоновані методи дозволяють підвищити ефективність визначення незайнятих частотних каналів в когнітивних радіомережах.

2. Отримали подальший розвиток методи виявлення невідомих сигналів, що засновані на зміні імовірнісних властивостей спостережень, відмінною особливістю яких є використання інформації тільки про шум у частотному каналі і прийняття рішень у спектральній області.

3. Вперше досліджено робочі характеристики спектральних методів виявлення невідомих сигналів з використанням реальних сигналів і шумів у частотному діапазоні, що використовується для когнітивних радіомереж.

4. Вперше вирішена задача розпізнавання заданих сигналів при наявності невідомих сигналів під час радіомоніторингу в когнітивних радіомережах, відмінною особливістю якої є використання навчальних вибірок тільки для заданих сигналів. Використання запропонованих алгоритмів селекції і розпізнавання дозволяє уникнути помилки розпізнавання, коли невідомий сигнал може бути визначений як один із заданих.

5. Вперше запропоновано алгоритм визначення незайнятих частотних каналів для їх надання вторинним користувачами когнітивних радіомереж з використанням неklasичних методів виявлення та розпізнавання сигналів в умовах апіорної невизначеності.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Порівняльний аналіз ефективності алгоритмів виявлення сигналів дозволив дати рекомендації щодо їх практичного використання. При апіорній невизначеності щодо параметрів сигналів первинного користувача рекомендується використовувати алгоритми, які засновані на виявленні зміни статистичних властивостей сигналів. Коли параметри сигналів первинного користувача відомі і є в базі даних, рекомендується використання алгоритмів, заснованих на виявленні властивостей циклостаціонарності або ж метод узгодженої фільтрації.

2. Розроблена програмна реалізація методів виявлення невідомих сигналів та розпізнавання заданих сигналів при наявності невідомих сигналів в умовах апіорної невизначеності. За допомогою SDR приймача отримані вибірки реалізацій різних типів реальних сигналів і шуму, що діють в діапазоні роботи когнітивних радіомереж. За допомогою розроблених програм та отриманих вибірок шляхом імітаційного моделювання отримані робочі характеристики алгоритмів виявлення та розпізнавання для різних типів сигналів.

3. Отримана ефективність виявлення невідомих сигналів запропонованими алгоритмами в 2-7 разів більше відносно класичного енергетичного детектора при відношенні «сигнал-шум» -3 дБ при ширині смуги сигналів в межах 3 – 150 кГц.

4. Отримані прийнятні для практики радіомоніторингу ймовірності правильного розпізнавання заданих сигналів (понад 0.9) при наявності невідомих сигналів.

5. Практичне застосування запропонованих методів дозволить підвищити ефективність виявлення незайнятих каналів в умовах апіорної невизначеності, яка суттєво впливає на якість роботи радіомережі в цілому та на ефективність використання спектру відповідно.

6. Розрахований оптимальний час сканування під час використання запропонованих методів визначення незайнятих частотних каналів, який складає від 1 мс до 2,5 мс, для сигналів смугою 150 кГц. При цьому отримана досяжна пропускна здатність для вторинної мережі КР досягає 4,9 біт/с/Гц.

7. Результати дисертаційних досліджень реалізовані в навчальному процесі кафедри інформаційно-мережної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки, зокрема, у дисципліні «Основи інформаційно-комунікаційних технологій» та у звіті НДР № 320 “Розроблення нової інформаційної технології комплексного розпізнавання радіо випромінюючих об’єктів методами статистичної радіотехніки та

штучного інтелекту”(№ ДР 0117U002528), що підтверджуються відповідними актами впровадження.

Наукове значення: запропоновані та досліджені нові спектральні методи виявлення невідомих сигналів на фоні заданого шуму, а також розпізнавання сигналів, заданих навчальними вибірками, при наявності невідомих сигналів. Використання цих методів дає можливість отримати більш ефективне вирішення актуальної науково-прикладної задачі визначення незайнятих частотних каналів в когнітивних радіомережах в умовах апіорної невизначеності.

Особистий внесок здобувача в спільних публікаціях:

- у роботі [35] автору належить аналіз методів, які використовуються під час радіомоніторингу в КР, обґрунтовується необхідність використання методів виявлення сигналів, які не потребують апіорних відомостей щодо виявлюваних сигналів;

- у роботі [36], [37] автору належить дослідження робочих характеристик алгоритмів виявлення невідомих сигналів у часовій та спектральних областях. Отримані залежності показників виявлення від ВСШ із використанням реальних сигналів;

- у роботі [38] автору належить формулювання задачі розпізнавання заданих сигналів за наявності класу невідомих сигналів під час проведення радіомоніторингу;

- у роботі [39] автором виконаний порівняльний аналіз запропонованих алгоритмів виявлення, проведений багатокритеріальний вибір переважного варіанту алгоритму виявлення невідомих сигналів із використанням реальних сигналів з урахуванням заданих показників якості;

- у роботах [40], [41], [42] автору належить вирішення задачі селекції і розпізнавання сигналів під час радіомоніторингу в діапазоні роботи КР із використанням реальних сигналів.

Апробація результатів дисертації: Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались на наукових семінарах кафедри

інформаційно-мережної інженерії ХНУРЕ, а також на 22-х Міжнародних конференціях, з яких 3 індексуються в науковій базі Scopus [43-64].

Публікації:

За темою дисертації подано 8 статей, які опубліковано в спеціалізованих фахових виданнях, з них 1 стаття опублікована за кордоном.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, який складається з 133 найменувань. Загальний обсяг роботи 156 сторінок з них: 47 рисунків, 7 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ЗАДАЧ РАДІОМОНІТОРИНГУ У КОГНІТИВНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ

1.1 Аналіз технології когнітивного радіо

Сучасні тенденції розвитку інформаційних систем і технологій спрямовані на підвищення ефективності їх експлуатації. Особливий розвиток отримали бездротові технології, які стрімко розвиваються в поточний момент часу.

З кожним роком кількість пристроїв, що використовують радіоресурс, неухильно зростає. Однак сам частотний ресурс обмежений і вже зараз досить переповнений. Огляд сучасного стану потреб абонентів щодо мобільних послуг свідчить, що зараз відбувається інтенсивне зростання мобільного трафіку в мережах зв'язку. Тому, щоб задовольнити запити споживачів необхідне впровадження сучасних технологій використання частотного ресурсу [1].

Водночас їх введення в експлуатацію пов'язано з низкою проблем, однією з яких є недостатня кількість вільних частотних смуг. При цьому оператори не можуть відмовитися від експлуатації існуючих технологій, щоб таким чином звільнити частоти для впровадження нових технологій.

На даний момент часу, розподіл смуг частот між операторами зв'язку відбувається на підставі ліцензій, які видає державний центр радіочастот. Смуги частот, на які видано ліцензії, можуть використовуватися лише тими організаціями, за якими вони закріплені, що виключає можливість його використання іншими засобами і іншими користувачами. При цьому аналіз використання частотного ресурсу свідчить, що його ефективне використання відбувається не на всіх доступних частотах [2]. Освоєння нових частотних діапазонів в силу різних факторів відбувається досить повільно, тому все частіше вдаються до процедур рефармінгу і вимушеного ущільнення технологій на частотних діапазонах. Таким чином, отримання нових ліцензій

стає досить складним, але в той же час вкрай необхідним для розвитку телекомунікаційної індустрії в цілому.

Слід зазначити, що всі бездротові мережі доступу від WPAN до WMAN використовують діапазони УВЧ і СВЧ, які характеризуються значним загасанням при поширенні і слабким огинанням хвилюю перешкод [65]. Це означає, що на цих частотах, на відстанях більше 2-3 км практично неможливо забезпечити зв'язок поза прямої видимості між передавачем і приймачем. Якщо для щільної міської забудови проблема усувається встановленням достатньої кількості базових станцій, то для сільської місцевості з її малою щільністю абонентів - таке рішення не є рентабельним.

Ця обставина стала однією з передумов появи на світ стандарту IEEE 802.22 [66], [67], який працює на більш низьких частотах, де ослаблення з відстанню значно менше, а перешкоди не є непереборною перешкодою. Його робота заснована на принципах КР.

Впровадження технології когнітивного радіо покликане стати вирішенням вищезазначених проблем, так як його використання призводить до підвищення ефективності використання радіочастотного ресурсу.

Стандарт використовує діапазон частот від 54 до 862 МГц. Даний діапазон має наступні позитивні властивості:

- відносно низький рівень виробничих та іоносферних шумів;
- прийнятні габарити антен для ефективного прийому і передачі сигналу;
- високі якісні характеристики поширення сигналу в умовах прямої видимості;
- можливість забезпечення великих зон покриття, особливо в передмісті та сільській місцевості.

Водночас значна частина діапазону частот від 54 до 862 МГц активно використовується для мереж наземного телевізійного мовлення, зокрема цифровим стандартом DVB.

У цих умовах робота нового стандарту IEEE 802.22 заснована на застосуванні когнітивних радіотехнологій, щоб забезпечити електромагнітну сумісність системи широкосмугового радіодоступу та наземного ТВ мовлення в одному географічному районі.

Когнітивна радіомережа — самоорганізаційна радіосистема з динамічним доступом до радіочастотного спектру, яка здатна пізнавати свою експлуатаційну та географічну середу, адаптувати до неї свої функціональні параметри і протоколи та/або змінювати свою експлуатаційне середовище за рахунок накопичених у процесі функціонування знань і набутих навичок, з урахуванням встановлених регуляторних політик і свого функціонального стану [68].

Цей принцип організації функціонування радіомереж дозволяє працювати декільком радіотехнологіям, в умовах нестачі частотного ресурсу. Радіомережі, робота яких організована за даним принципом, здатні аналізувати поточний стан зайнятості радіоефіру та приймати рішення про використання не зайнятих на даний момент часу радіочастот, що призводить до збільшення ефективності експлуатації радіочастотного ресурсу в цілому. Таким чином, відбувається його використання на вторинній основі, що розширює кількість доступних частотних ресурсів, і при цьому немає необхідності у виділенні додаткових частот [5].

Слід зазначити, що дослідження, що стосуються розробки когнітивного радіо (КР) ведуться в ряді міжнародних та національних інститутів, серед яких: IEEE (США), National Institute of Information and Communications Technology (Японія), Communication Research Centre (Канада), Radio Communications Agency (Нідерланди) [69].

В США з 2004 року проводиться активна робота по стандартизації радіотехнологій, що використовують «білі плями» (незайняті частотні

смуги), насамперед, в Інституті інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE). В результаті були розроблені стандарти IEEE 802.22.1-2010 (захист ліцензованих пристроїв від перешкод) і IEEE 802.22-2011 (когнітивні бездротові регіональні мережі доступу), триває активна робота над проектом IEEE 802.22.2 (практичні рекомендації щодо розгортання та інсталяції систем 802.22).

У 2011 році була завершена робота над стандартом IEEE 802.22 для регіональних бездротових мереж WRAN (Wireless Regional Area Networks) на базі технології КР (мережі WRAN є однією з областей застосування технології КР). Цей стандарт буде використовуватися для передачі даних із застосуванням технології динамічного доступу до спектру в невикористовуваних смугах частот ТВ-діапазону (54-862 МГц) [70].

У вересні 2010 року Федеральна комісія із зв'язку США FCC розподілила діапазон 700 МГц для неліцензійного застосування систем мобільного широкосмугового доступу.

У вересні 2011 року FCC затвердила правила використання «білих плям», а в січні 2012 року компанія Spectrum Bridge отримала дозвіл на застосування розробленої бази даних частотних проміжків в ТВ-діапазоні. В якості першого типу обладнання, яке отримало схвалення для використання в неліцензованій смузі частот, був пристрій компанії Koos Technical Services.

В Уілмінгтоні була розгорнута дослідна мережа передачі даних в ТВ-діапазоні. В даний час вона використовується для контролю якості води, міського освітлення вулиць, контролю рівня води і попередження про повінь. Пізніше планується використання мережі для управління дорожнім рухом і систем ЖКГ.

В 2012 р на Всесвітній конференції зв'язку прийнята Резолюція МСЕ-R 58 (СOM6/1), згідно з якою рекомендується інтенсивніше досліджувати технології КР з метою розробки пропозицій щодо впровадження когнітивних систем зв'язку в діапазоні 470-862 МГц і створення зони для практичних випробувань.

У 2012 році компанією Iteam Systems розроблена комплексна система динамічного управління використанням радіочастотного спектру. Інтелектуальний збір інформації про маловикористовувані ділянки спектру є основою запропонованої платформи Ittiam MWLAN.

У Європі діють кілька проектів, присвячених когнітивному радіо, включаючи ARAGORN (www.ict-aragorn.eu), PHYDYAS (www.ist-phydyas.org), SENDORA (www.sendora.eu).

У Росії в ГКРЧ при Міністерстві зв'язку і масових комунікацій РФ прийнято рішення № 12-14-08 від 16 березня 2012 року «Про створення дослідної зони по впровадженню когнітивних систем широкосмугового бездротового доступу в Російській Федерації у смузі радіочастот 470-686 МГц».

Організацією "Интеллект Телеком" проведені дослідження зі створення нової системи стільникового зв'язку на принципах когнітивного радіо, що працює спільно з технологією GSM в смугах частот 900/1800 МГц. В процесі випробувань отримана швидкість передачі даних до 18 Мбіт/с [71].

Після перших позитивних результатів випробувань КР на острові Б'ют і в Кембриджі, компанія British Telecom розширила зону випробувань в Корнуоллі на заході Великобританії. Також проводяться спільні випробування технології LTE компаніями Everything Everywhere і British Telecom. Випробування технології LTE проводилися в діапазоні 800 МГц, а випробування КР будуть проводитися в діапазоні 470 – 790 МГц.

Слід зазначити, що для європейських країн мають велике значення загальні підходи в регулюванні використання вивільнюваних смуг частот. Цими питаннями, крім ЕСС / СЕРТ і ETSI, займається група з розробки політики в області спектру при Єврокомісії (RSPG). Позиція RPG, відображена у звітах 2010-11 рр, містить рекомендації щодо створення спільної платформи досліджень і регулювання, а також загальної бази даних по когнітивному радіо та здійснення обміну інформацією.

Багато з цих положень були підтверджені в ході ВКР-12 в Женеві. Визнавши, що не потрібно змін регламенту радіозв'язку для таких систем, були сформульовані проблеми, які потребують вирішення. Зокрема, ці системи, використовуючи динамічний доступ до спектру, матимуть складнощі при реєстрації в Міжнародному довідковому реєстрі частот, екзаменації порушених адміністрацій зв'язку та усуненні створюваних перешкод.

Необхідність розвитку КР спостерігається також у зв'язку з потребою розвитку і стандартизацією мереж міжмашинного обміну даними (M2M) або телематичних послуг.

Основною метою впровадження нового стандарту є забезпечення широкосмугового бездротового доступу на віддалених територіях. В даному випадку, основними конкурентними системами стандарту IEEE 802.22 є системи мобільного зв'язку, що працюють нижче 1 ГГц. Порівняння основних параметрів бездротових систем наведено в табл. 1.1 [72].

Табл. 1.1. Порівняльна таблиця технічних характеристик бездротових технологій

Стандарт	802.22	2G(EDGE)	3G(Rev.A)	3G(Rev.B)	3G (UMTS Rel.8)	3,99G (LTE Rel.8)
Діапазон частот, МГц	54-862	890-915 935-960	824-849 869-894	824-849 869-894	890-915 935-960	LTE 700 LTE 800 LTE 900
Максимальна зона покриття, км	30-50	25-30	25-30	15-20	15-20	20-35
Ширина каналу, МГц	6/7/8	0,2	1,25	5	5	5
Швидкість передачі, Мбіт/с	23/27/31	0,474	3,1	14.7	14,4	43,2 MIMO 2-2 21,6 SISO

Безумовно, технологію GSM / EDGE не можна вважати повноцінним конкурентом стандарту IEEE 802.22. Однак технології CDMA EV-DO також дозволяють використовувати спрямовані антени користувача, що дозволяє збільшити зону покриття до 30 км на відкритій місцевості.

Слід зазначити, що основним конкурентом стандарту IEEE 802.22 є технологія LTE, що працює в різних частотних діапазонах від 700 МГц до 3,7 ГГц. Так, мережа LTE, розгорнута в діапазоні 700 МГц в США використовує слоган "LET in Rural America" налічує понад 12 млн. абонентів. У Німеччині мережа LTE, розгорнута в діапазоні 800 МГц, що налічує більше 4500 базових станцій вже виконала ліцензійні зобов'язання з первісного покриття територій з відсутніми послугами широкосмугового доступу. Мережі в діапазонах 700 і 800 МГц (частоти цифрового дивіденду) вже розгорнуті в десятках країн Європи, Америки та Азії.

Водночас мережі LTE як і CDMA є універсальними, забезпечуючи необхідне покриття як на макро - так і на мікро-рівні. Таким чином, конкуренція з існуючими мережами 3G/4G для нового стандарту IEEE 802.22 видається малоперспективною [72]..

Перспективною є можливість використання стандарту IEEE 802.22 в діапазоні метрових хвиль (нижче 300 МГц), де зона покриття може бути збільшена до 70 км.

1.2 Методи управління та забезпечення адаптивності когнітивних радіомереж

Однією з найбільш важливих властивостей когнітивного радіо є можливість прийому, вимірювання, моніторингу, вивчення і сканування радіоспектра, з метою виявлення та ефективного використання для адаптивної передачі вільних частотних смуг. Це є важливим завданням, так як когнітивні радіопристрої, фактично, не мають відомостей про інші пристрої, що використовують частотний ресурс. Отримання відомостей про них

ґрунтується на інформації, отриманій від інших пристроїв, або ж отриманій самостійно [52-55].

Задача сканування радіоспектра полягає у виявленні так званих «спектральних дірок», а саме діапазонів частот виділених первинним користувачам, але в певний момент часу або залежно від географічного розташування, що не використовуються цими користувачами [5]. На рис.1.1 зображено, яким чином утворюються незайняті канали під час використання спектру [73].

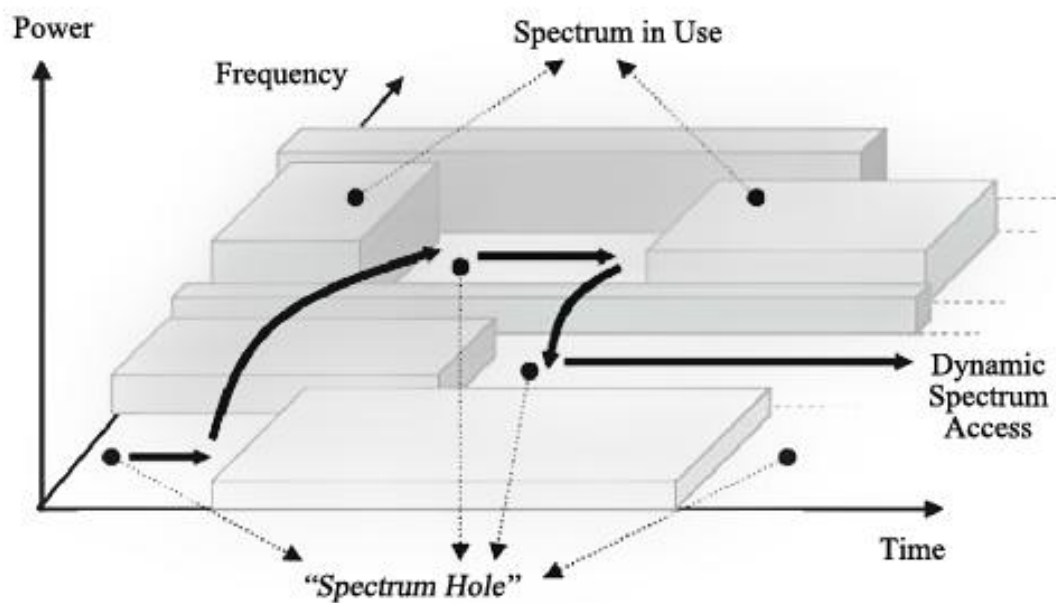


Рис. 1.1. «Спектральні дірки»

Розподіл спектру для загального використання користувачами КР в даному частотному діапазоні, може бути як вертикальним, так і горизонтальним. Горизонтальний поділ - користувачі КР і первинні користувачі мають однакові шанси на доступ до спектру так само як і в бездротових локальних мережах WI-FI, і в порядку загального поліпшення функціонування системи користувачі КР можуть вибрати канал з меншою кількістю користувачів чи меншим трафіком. При даному підході первинні користувачі і користувачі КР співіснують і використовують діапазони одночасно.

Вертикальний поділ - користувачі КР мають менший пріоритет, щодо первинних користувачів. І таким чином користувачі КР повинні звільняти частотні канали якомога швидше, коли первинні користувачі починають свою роботу.

Для того, щоб ефективно використовувати прогалини у вже використовуваних частотах, передбачений цілий ряд механізмів, які забезпечують когнітивність радіомережі.

Властивість когнітивності по відношенню до радіосистеми позначає її здатність вирішувати наступні задачі [3]:

- - моніторинг спектра з метою виявлення незайнятих в даний момент часу частотних смуг (спектральних дірок);
- аналіз параметрів радіоканалу з метою отримання інформації та прогнозування стану радіоканалу;
- контроль рівня випромінюваної потужності і управління процесом динамічного розподілу частот.

Для виконання цих завдань функціональна схема КР повинна мати в своєму складі елементи, які забезпечують [4]:

- - формування та обробку радіосигналів з використанням SDR технологій;
- моніторинг радіочастотного спектру;
- аналіз результатів, отриманих в результаті спостережень і навчання системи;
- контроль і управління системою згідно з діючими правилами, а також з політикою управління спектром;
- накопичення знань (база даних).

Для гарантованого виключення перешкод діючим радіозасобам від систем КР необхідно використовувати геолокаційну базу даних, яка містить відомості про місцезнаходження і роботу засобів радіозв'язку. База даних

забезпечує вибір робочих частот для систем когнітивного радіозв'язку таким чином, щоб забезпечити як саму можливість їх роботи, так і відсутність перешкод іншим системам і засобам радіозв'язку. При цьому інші радіоелектронні засоби (діючі в рамках звичайного порядку призначення частот) мають пріоритет у використанні радіочастотних каналів перед системами когнітивного радіо.

На практиці це означає, що якщо деяка смуга частот або радіоканал починають використовуватися іншими радіозасобами, за якими закріплені ці частоти, система когнітивного радіо повинна перебудуватися на іншу частоту/канал. Таким чином, технологія когнітивного радіо, в принципі, не може використовуватися як єдина технологія надання, наприклад, платних послуг, так як постійна наявність доступного для роботи когнітивного радіо радіочастотного спектра не гарантовано.

Керування спектром в стандарті IEEE 802.22 – це когнітивна функція на базовій станції, яка використовує вхідні дані від функції сканування спектра (SSF), геолокації, і діючої бази даних, щоб прийняти рішення про частотний канал, який буде використовуватися, а також обмеження на випромінювану потужність, що накладаються для конкретного користувацького пристрою.

Прийнята наступна класифікація когнітивних пристроїв з урахуванням використовуваного ними способу доступу до радіочастотного спектру, який забезпечує виключення перешкод чинним засобам радіозв'язку:

- системи з когнітивним пілот сигналом;
- системи на основі індивідуального або колективного контролю зайнятості каналів;
- системи з геолокаційної базою даних захищаючих засобів радіозв'язку.

При цьому можлива комбінація зазначених способів.

Сканування спектру здійснюється на можливий канал роботи (N) і сусідні канали ($N \pm 1$), щоб переконатися, що відсутнє працююче ліцензоване обладнання (цифрового або аналогового телевізійного мовлення або бездротових мікрофонів).

Якщо буде встановлено, що робота WLAN-мережі на каналі N може створити перешкоди для трансляції діючих працюючих передавачів, можуть бути вжиті наступні дії:

- зменшення граничної випромінюваної потужності обладнання користувача, використовуючи метод управління потужністю передачі (TPC);
- якщо таке зниження потужності не забезпечує необхідної якості передачі в системі стандарту IEEE 802.22 почати пошук іншого частотного каналу;
- зменшення випромінюваної потужності на базовій станції для зниження можливих перешкод.

Система радіозв'язку стандарту IEEE 802.22 може бути орієнтована на великі зони покриття, до 100 км. Типовий розмір зони покриття складає від 17 до 30 км в сільській місцевості, забезпечуючи зв'язок до 255 користувачів.

Мінімальна швидкість передачі становить 1,5 Мбіт/с від БС до АС і до 384 кбіт/с від АС до БС. Для сумісності з ефірними телевізійними мережами у різних країнах світу ширина частотного каналу може бути обрана 6, 7 або 8 МГц [72].

У стандарті IEEE 802.22 для передачі даних визначено 12 комбінацій з трьох модуляцій (QPSK, QAM-16, QAM-64) і чотири швидкості кодування ($1/2$, $2/3$, $3/4$, $5/6$), які можуть бути адаптивно обрані для досягнення різних компромісів швидкості передачі даних і надійності передачі, в залежності від стану радіоканалу і перешкод.

IEEE 802.22 використовує метод OFDMA з єдиним режимом 2048 піднесучих, що дозволяє забезпечити надійну роботу в режимі відсутності прямої видимості. Чотири різних довжини циклічного префікса: $1/4$, $1/8$, $1/16$,

1/32 від тривалості символу, забезпечують гнучкість вибору між урахуванням впливу різних затримок поширення сигналу та ефективністю використання спектру.

Так як не завжди вдається досягти сумісності з мережами ТБ мовлення, у первісній версії стандарту передбачається використання тільки режиму часового дуплексу (TDD). Однак у більш пізніх версіях передбачається використання також режиму частотного дуплексу (FDD).

Всі вузли в мережі IEEE 802.22 використовують два типи антен – спрямовані антени для передачі даних і антени сканування.

На базових станціях, для передачі даних, використовуються звичайні для систем мобільного зв'язку антени – секторні або всеспрямовані. У користувачів застосовуються спрямовані антени з коефіцієнтом посилення до 14 дБ.

Антени сканування це всеспрямовані антени, що забезпечують чутливість до вертикальної і горизонтальної поляризації, що дозволяє сприймати сигнал від телевізійних станцій і бездротових мікрофонів.

Істотним недоліком стандарту IEEE 802.22 є неможливість підтримки технологій множинних антен (MIMO) і формування діаграми спрямованості [72]. Це пов'язано з тим, що в діапазоні частот 54-862 МГц фізично складно забезпечити достатню рознесення декількох антен, яке має складати не менше трьох довжин хвиль (тобто більше 3 м на середній частоті).

Реалізація функцій, які покладені на КР, можлива при використанні SDR-платформи.

SDR (Software Defined Radio – SDR, також використовують термін: « що програмно конфігурується») – це будь-який пристрій передачі даних, в якому всі або деякі функції фізичного рівня є програмно обумовленими [77].

Завдяки програмному налаштуванню один приймач може бути пристосований під безліч різних форм сигналу. Такий пристрій є основою для побудови універсально-сумісних систем.

В результаті використання цієї технології такі апаратні елементи: як фільтри, змішувачі, підсилювачі, детектори, модулятори і демодулятори – стають не потрібними. У той же час можливе отримання багатофункціональної платформи, яка має безліч режимів роботи і набір діапазонів частот, перемикання між якими здійснюється автоматично і динамічно, у тому числі віддаленим способом [78].

Цифровим методом виконуються наступні функції: фільтрація (НЧ, ВЧ, смугові і загороджувальні фільтри), модуляція (AM, FM, PM, FSKM, BPSK, QPSK, QAM, OFDM, ін), демодуляція, вирівнювання, стиснення і відновлення, аналіз спектра. Нові типи модуляції і пов'язані з ними процедури, мають загальний термін «форма сигналу». Змінивши програмне забезпечення, радіо перенастроюється на іншу частоту і протокол передачі [79].

Приймач і передавач когнітивного радіо – це SDR-пристрій з швидким частотним відгуком і великим набором видів сигналу. Загальна структура модуля КР показана на малюнку [80]:

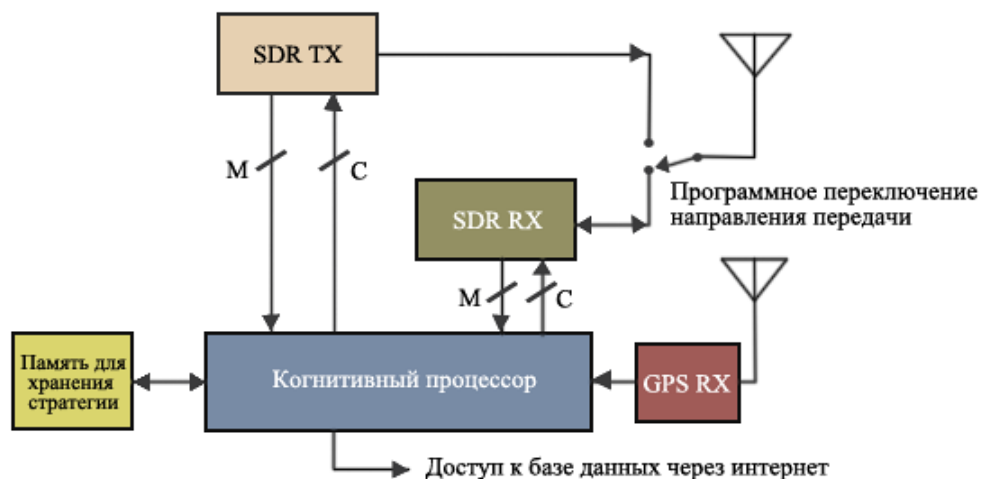


Рис. 1.2. Загальна структура модуля КР

Окремий когнітивний процесор виконує специфічні для когнітивного радіо функції, проводячи моніторинг статусу і параметрів вхідних сигналів (М) в приймачі і передавачі. Рішення приймаються на основі цих та інших сигналів, наприклад, за даними з інструкцій стратегії, які зберігаються в модулі пам'яті і визначають принципи роботи при різних умовах. На основі прийнятого рішення надсилаються керуючі команди (С) на радіо [78], [80].

КР можна розглядати як програму, яка стежить за SDR і в міру необхідності вносить корективи в його роботу.

Когнітивний передавач також дає інструкції програмно визначаємому радіо щодо робочої частоти, модуляції, рівня потужності, протоколів та інших параметрів, а також виробляє настроювання автоматично.

Когнітивні приймачі можна класифікувати наступним чином:

- робота може бути заснована на політиці стратегій, коли є встановлений набір можливостей (форм сигналу і процедур); при цьому користувач вибирає одну або кілька попередньо встановлених жорстко прописаних функцій, які записуються виробником або завантажуються по бездротовому каналу;
- повністю конфігуроване радіо, яке може бути переналаштовано в процесі роботи під нові додатки або умови зв'язку.

1.3 Аналіз методів виявлення незайнятих частотних каналів під час радіомоніторингу в когнітивних радіомережах

У стандарті IEEE 802.22 для отримання відомостей про радіоспектри використовуються два основних методи: геолокаційні бази даних (пасивний) та радіомоніторинг (активний) [72].

На рис.1.3 зображена базова класифікація методів отримання відомостей про радіоспектри для когнітивного радіо.

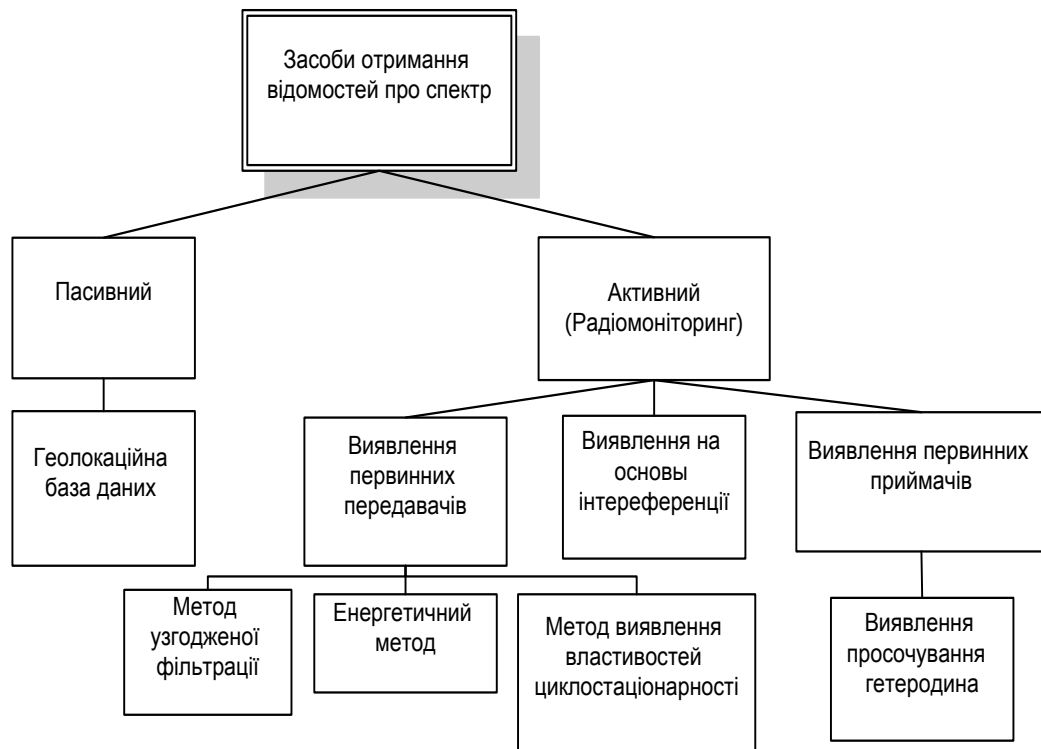


Рис. 1.3. Класифікація способів отримання відомостей про радіоспектр.

При пасивному способі інформація про радіоспектр приймається ззовні, наприклад, від первинних комунікаційних систем, від сервера, від централізованої бази даних, або зумовлених налаштувань політики функціонування [6].

При цьому використовується інформація про розташування когнітивних пристроїв у поєднанні з базою даних ліцензованих передавачів, що дозволяє визначити, які канали локально доступні для їх повторного використання. Геолокація дозволяє визначити регіон розміщення і за базою даних визначити, які канали зайняті в конкретній місцевості, а також вибрати оптимальний маршрут для передачі пакетів інформації. В рамках специфікації передбачається застосовувати супутникове або наземне позиціонування.

Активний спосіб отримання інформації заснований на РМ. Моніторинг спектру в системі КР являє собою спостереження за ефіром в широкому

діапазоні частот з метою отримання інформації про наявність вільних в даний момент смуг частот, доступних для користувачів КР. Для стандарту IEEE 802.22 смуга огляду становить 54-862 МГц [72].

Весь процес моніторингу спектру можна розділити на два етапи. На першому етапі вирішується завдання виявлення. Другий етап включає в себе аналіз зайнятих смуг частот та оцінювання їх положення на частотній осі, а також їх розпізнавання.

Моніторинг спектру може бути здійснений кооперативним або одиночним способом.

При одиночному способі виявлення користувач КР може виявляти сигнал первинного передавача (ПП) за його власними спостереженнями і аналіз отриманих даних проводиться незалежно від інших користувачів. У той час як кооперативний спосіб виявлення використовує дані, отримані від багатьох користувачів для виявлення ПП.

Більш того метод кооперативного виявлення дозволяє подолати багатопроменеве поширення і ефект затінення, що збільшує його ефективність. Існує два методи для реалізації кооперативного способу виявлення: централізований і розподілений. При централізованому методі базова станція відповідає за збір всієї інформації від інших користувачів КР для виявлення ПП.

Кооперативний метод моніторингу спектру значно покращує статистику помилок, навіть якщо використовується невелика кількість незалежних скануючих одиниць [81], [82]. У разі кооперативного виявлення розподіл інформації серед користувачів когнітивного радіо та комбінування результатів від різних вимірювань є досить складним завданням [83].

Кооперативне зондування спектру грає дуже важливу роль у дослідженні КР, завдяки його здатності покращувати результати сканування, особливо з урахуванням явищ загасання, затінення і шумовий невизначеності [3].

На рис. 1.4 ілюстровано багатопроменеве загасання, затінення і невизначеність виявлення приймального пристрою [3].

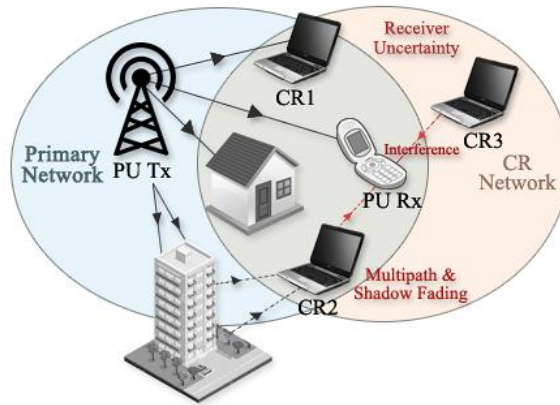


Рис. 1.4. Ефекти, які виникають під час поширення радіохвиль в міських умовах

КР1(CR1) і КР2(CR2) розташовані всередині зони покриття первинного передавача (PU TX), в той час як, КР3(CR3) знаходиться поза зоною покриття. Через множинні ослаблені копії сигналу ПП, і перегородження сигналу ПП будинком, КР2 відчуває багатопроменеве ослаблення і ослаблення за рахунок затінення, таким чином сигнал від ПП-а може бути виявлений неправильно. Більш того, КР3 має проблеми через невизначеність виявлення приймального пристрою через те, що він не має відомостей передачі ПП і про існування первинного радіоприймача (PU RX). В результаті передача від КР3 може привести до виникнення перешкоди прийому первинному приймачу (PU RX). Якщо користувач КР, більш за інших за рівнем спостерігає потужний сигнал ПП, наприклад як КР1 на малюнку, він може поділитися результатами спостережень з кожним користувачем КР [73]. На практиці, кооперативний метод зондування спектру не застосовується у більшості випадків, але коли це можливо, то може бути отримано значне поліпшення характеристик. Прикладом тому є проблема прихованого сайту, яка може бути істотно знижена, при цьому збільшується

швидкість роботи, зменшується ймовірність помилкових тривог і збільшується точність виявлення сигналу. Значними вимогами до кооперативного методу сканування спектра є: контроль каналу, синхронізація системи і відповідна географічна протяжність кооперуємих вузлів.

Процедура РМ проходить в обов'язковому порядку при ініціалізації нового обладнання в мережі. Крім того, сканування частот відбувається періодично при роботі системи. Управління скануванням здійснюється базовою станцією, яка не тільки посиляє керуючі команди, але і сама сканує спектр.

При цьому існують різні алгоритми сканування, які визначають пороговий рівень сигналу в каналі, час сканування, діапазон, ймовірність виявлення, ймовірність помилкової тривоги.

Базова станція може розподіляти навантаження між абонентами при скануванні частотного спектру. Якщо основна базова станція довго "мовчить", то тоді абонентське обладнання шукає сигнали від іншої сусідньої станції і в разі успішного пошуку підключається до неї. Така система дозволяє актуально підтримати інформацію про стан радіоканалу у всій зоні покриття базової станції і при необхідності своєчасно міняти робочі частотні канали. Реєстрація і відстеження користувачького обладнання необхідні для ефективної організації частотного простору і швидкого підключення нових абонентів до мережі. Механізм спільного співіснування систем передбачає організацію спектра так, щоб стандарт не вносив перешкоди у роботу ліцензійних користувачів, а також організовував внутрішньосистемне ранжування абонентів в робочій смузі [50].

Найбільш важливим і складним завданням для будь-якої системи моніторингу є швидке виявлення, ідентифікація та визначення параметрів сигналу, який у свою чергу може бути короткочасним, низькорівневим і стрибкоподібним (ППРЧ).

З підвищенням несучої частоти збільшуються втрати при поширенні сигналу між передавачем і приймачем системи моніторингу, що ускладнює

виявлення потрібного сигналу через зниження відношення сигнал/шум (SNR) на приймачі. Крім того, розширення займаної смуги сигналу призводить до зниження спектральної щільності потужності на приймачі, знову ускладнюючи детектування сигналу.

1.3.1 Інтерференційний метод виявлення незайнятих частотних каналів

Одним з основних завдань КР є запобігання виникненню інтерференції в приймальних пристроях первинних користувачів. Інтерференція виникає в радіоприймальних пристроях первинних користувачів. При централізованому методі вона регулюється і контролюється в передавачах згідно з місцем розташування кожного передавального пристрою і випромінюваної потужності.

Принцип роботи інтерференційного методу зображений на рис.1.5 [84].

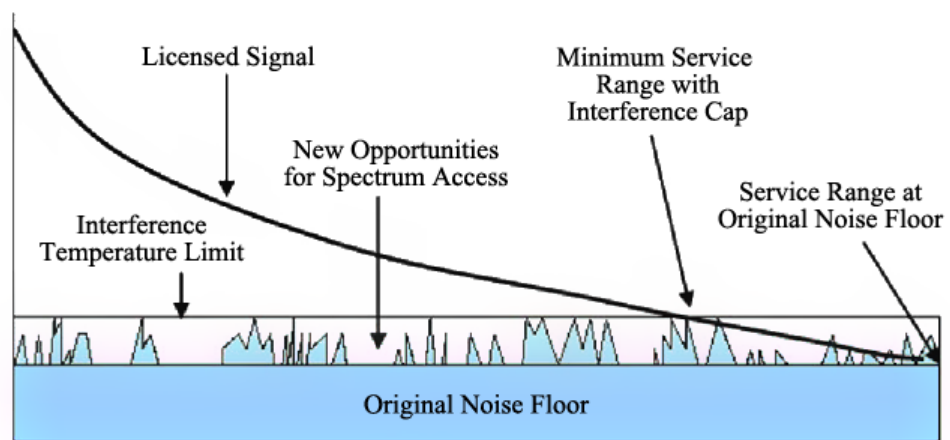


Рис. 1.5. Використання інтерференційного запасу для передачі сигналів вторинних користувачів

Для його роботи відбувається вимірювання потужності інтерференції в оточенні вторинного користувача, яка потім перетворюється в шумову температуру. Обмеження шумової температури розраховується, як сума порогової чутливості в первинній системі і запас інтерференції, яка визначається як максимальне позитивне зміна рівня шуму. Порівнюючи

виміряну шумову температуру і обмеження шумової температури, визначається різниця шумової температури, яка може бути додатково заповнена сигналом користувача когнітивного радіо.

Робота методу є схожою з UWB технологією, коли користувачам КР дозволено співіснувати і передавати інформацію безперервно з первинними користувачами, використовуючи низьку потужність випромінювання, обмежену рівнем шумової температури, і таким чином інтерференції для первинних користувачів не виникає.

1.3.2 Методи виявлення сигналів первинних радіоприймачів

Найбільш важлива і невирішена задача при проведенні моніторингу спектра проблема невизначеності виявлення первинних радіоприймачів [85]. З використанням місцевих спостережень, користувачі КР не можуть уникнути інтерференції первинним радіоприймачам через відсутність інформації про їх місцезнаходження. Кооперативний метод моніторингу є більш ефективним для пом'якшення проблеми невизначеності виявлення приймального пристрою.

В літературі [85] описаний спосіб виявлення первинних радіоприймачів при якому відбувається вимірювання рівня потужності просочування гетеродина на антенний вхід. Основними недоліками методу є мала відстань виявлення і великий час вимірювань для необхідної точності, а також необхідність побудови великої мережі сенсорів, які беруть участь у прийнятті рішень вторинними користувачами про зайнятість частотного ресурсу.

1.3.3 Методи виявлення первинних радіопередавачів

У даному методі виявлення сигналів первинних користувачів здійснюється за сигналами, які випромінюють їх передавачі, їх приймають користувачі КР з допомогою своїх приймальних пристроїв.

Завдання детектування ПП може бути сформульоване як перевірка бінарних гіпотез:

$$H^1: x(t) = S(t) + \xi(t) \quad (1.1)$$

$$H^0: x(t) = 0 + \xi(t) \quad (1.2)$$

– де H^0 відповідає гіпотезі про відсутність сигналу первинного користувача, H^1 – сигнал, був переданий первинним користувачем, $x(t)$ – прийнятий сигнал, $S(t)$ – переданий сигнал, $\xi(t)$ – адитивний білий гаусовий шум з нульовим математичним очікуванням дисперсією σ^2 .

При перевірці бінарних гіпотез можуть бути допущені помилки двох типів. Ці помилки називаються «помилка першого роду» і «помилка другого роду». Помилка першого роду відбувається, якщо приймається гіпотеза H^1 , коли виконується гіпотеза H^0 . Імовірність здійснення помилки першого роду часто називається «помилковою тривоною» $P_{(1/0)}$. У задачах радіомоніторингу ймовірність помилкового виявлення є важливим параметром, так як помилкові виявлення призводять до пропуску вільних ділянок спектра. Помилка другого роду відбувається, якщо приймається гіпотеза H^0 , коли виконується гіпотеза H^1 . Помилка другого роду носить назву «пропуск цілі». $P_{(0/1)}$.

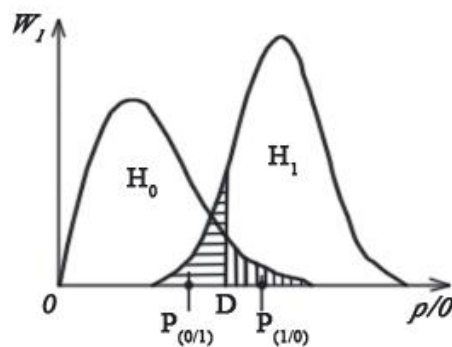


Рис. 1.6. Густина розподілу ймовірностей гіпотез щодо виявлення сигналу

Пропуск цілі призводить до того, що виникають колізії з первинними користувачами. Когнітивні радіомережі повинні задовольняти обмеженням помилкової тривоги і пропуску цілі. Методи виявлення представляють компроміс між двома типами помилок. Однак, слід враховувати той факт, що робота детектора заснована на усереднених значеннях, тобто ймовірність виникнення помилок зменшується із збільшенням числа вибірок. Обидва обмеження можуть бути задоволені вибором досить великого числа вибірок. З точки зору виконання, бажано мати такі алгоритми, поріг спрацьовування яких може бути задано аналітично, і властивості яких можуть бути аналітично проаналізовані. На практиці, ймовірність виявлення, і кількість вибірок, необхідних для досягнення заданої ймовірності виявлення, має визначатися переважно експериментально через велику кількість факторів, що впливають на це значення: помилки синхронізації, загасання в каналі, невизначеність потужності шуму.

При цьому в сучасному ефірі працює велика кількість радіозасобів, що в свою чергу призводить до апіорної невизначеності на етапі виявлення [86].

Традиційні моделі параметричної невизначеності сигналу (повністю відомий сигнал, сигнал з невідомою фазою і флюктуючої амплітудою, невідомим часом приходу, невідомою частотою) дають добре наближення при описі роботи виявлювачів в радіолокаційних і радіонавігаційних приймачах, в приймачах радіосистем передачі інформації. Але для засобів РМ в КР найчастіше характерний граничний випадок обмеженості апіорних даних щодо виявлюваних сигналів – це повна їх відсутність [87]. Рішення задачі пошуку вузькосмугових радіосигналів, що мають, як правило, високе відношення сигнал/шум, може здійснюватися на основі відносно простих статистичних моделей спостережуваних сигналів, що вимагають мінімуму апіорних відомостей. Виявлення широкосмугових сигналів на фоні перешкод в умовах часткової або повної апіорної невизначеності являє собою істотну проблему [7].

Алгоритми виявлення бувають точкові і інтервальні. Відмінністю алгоритмів точкового типу [88], [89], [7] є той факт, що вони ґрунтуються на

прийнятті рішення за кожним спектральним коефіцієнтом спостережуваного процесу окремо. В аналізованій смузі частот кожна складова спектрограми (амплітуда), порівнюється з порогом виявлення, який розраховується залежно від заданої ймовірності помилкової тривоги. У разі перевищення порогу приймається рішення про наявність сигналу на відповідній частоті, в іншому випадку приймається рішення про відсутність сигналу. Таким чином, аналізується вся смуга частот.

При використанні інтервальних алгоритмів виявлення рішення приймається на основі декількох спектрограм одночасно [23]. При цьому ширина інтервалу відповідає найменшій очікуваній смузі сигналу.

Незважаючи на певні відмінності, і той і інший тип алгоритмів використовують в якості вихідних даних відліки спектру спостережуваного процесу. Тому початковим для виявлення сигналів є розрахунок спектрограми. Другим етапом виробляють оцінку потужності шуму, оскільки вона є апіорно невизначеним параметром. Для цього можуть бути використані оцінки по мінімуму згладженого енергетичного спектра [90], оцінки на основі виключення максимальних складових, інші оцінки [91].

Оцінка потужності шуму проводиться в більшості алгоритмів виявлення, що використовують в якості інформативної ознаки відмінність рівнів сигналу і шуму. Ефективність даної оцінки безпосередньо впливає на величину ймовірності помилкової тривоги. А значення ймовірності помилкової тривоги є гарантією правильного виявлення сигналу.

Вихідними даними алгоритмів виявлення є послідовність випадкових величин, які можуть приймати значення «0» і «1». Дана послідовність «0» і «1» і відповідні їм частоти використовуються для подальшого аналізу зайнятих смуг частот.

При виявленні передавачів кожен термінал КР повинен мати можливість незалежного визначення присутності або відсутності первинного користувача в заданій ділянці спектра.

Як вже зазначалося, завдання моніторингу спектра КР відрізняється істотною апіорною невизначеністю, оскільки не лише значення параметрів сигналів, які виявляються, але і закони їх розподілу апіорі невідомі. Залежно від наявності і характеру апіорної інформації про статистичні характеристики оброблюваних входних впливів розрізняють параметричну і непараметричну невизначеність.

1.3.4 Енергетичний метод виявлення сигналів

Якщо КР не має основної інформації про сигнал первинного користувача, проте відома потужність випадкового гаусового шуму, можна використовувати енергетичний детектор [73].

Енергетичне виявлення – найбільш простий спосіб аналізування спектру завдяки його малій обчислювальної складності і простоті реалізації. Це найбільш універсальний метод, так як приймачу не потрібно ніяких даних про сигнал первинного користувача. Сигнал виявляється шляхом порівняння сигналу з виходу енергетичного детектора з порогом, який залежить від рівня шуму. Основною проблемою при використанні енергетичного методу є вибір порога виявлення первинних користувачів. При використанні цього методу неможливо відрізнити перешкоди від первинних користувачів, через це він має низькі характеристики виявлення при малому відношенні «сигнал-шум». Даний метод не розрізняє потужність сигналу і потужність шуму.

Ймовірність виявлення і ймовірність помилкової тривоги є важливими факторами для виявлення на основі енергетичного методу. Так само характеристики енергетичного детектора залежать від фактора невизначеності потужності шуму. Даний метод неефективний в разі, коли енергія сигналу розподіляється на широку смугу частот (CDMA). Вибір порога складний, так як він є функцією зміни фонових перешкод і шуму.

Для енергетичного детектора, справедлива наступна статистика:

$$D = \sum_{n=1}^N X(n)^2 \quad (1.3)$$

При виконанні гіпотези H^0 , тестова статистика D – випадкова величина, функція щільності ймовірності якої є розподілом хі-квадрат з $2N$ ступенями свободи для випадку з комплексною величиною, або з N ступенями свободи для випадку реальних (речових) величин [71-73].

1.3.5 Метод узгодженої фільтрації

Узгоджений фільтр – лінійний фільтр, розроблений для забезпечення максимального відношення «сигнал-шум» на його виході для заданого сигналу [74-76].

Даний фільтр є оптимальним для каналу в якому діє АБГШ, якщо заздалегідь відомий сигнал первинного користувача. Це означає, що КР повинна мати апріорну інформацію про сигнал первинного користувача, наприклад: тип модуляції, форму імпульсу і формат пакета інформації. Таким чином, якщо КР не має таких апріорних відомостей, то виявити сигнал ПП дуже складно.

Узгоджена фільтрація досить поширена тому, що в більшості випадків для мереж зв'язку ця узгодженість досягається шляхом введення пілот-сигналів, преамбул, синхронізації або введенням кодів сигнал первинних користувачів.

Сигнал, прийнятий КР, подається на вхід узгодженого фільтра в суміші сигналу з шумом. Узгоджений фільтр виконує згортку послідовності. В кінцевому результаті сигнал з виходу узгодженого фільтра порівнюється порогом λ для прийняття рішення присутній первинний користувач чи ні.

Експериментальні вимірювання характеристик для узгодженої фільтрації при виявленні пілот-сигналу помилки синхронізації були проведені в [98], [99].

Обмеженням застосування цього методу в КР є той факт, що КР повинна володіти відомостями про всі сигнали первинних користувачів.

Перевагою методу є той факт, що апріорне знання вимагає мінімуму значень вихідної вибірки, дозволяючи здійснити виявлення досить швидко.

До недоліків можна віднести необхідність застосування певного виду приймального пристрою для кожного класу первинних користувачів, що робить даний метод непрактичним для більш широкого застосування в когнітивних радіомережах.

1.3.6 Метод виявлення властивостей циклостаціонарності

Даний метод виявлення заснований на вихідній надмірності, яка властива сигналу [7].

Коли переданий сигнал промодульований синусоїдальною послідовністю, циклічним префіксом (OFDM), або кодом (CDMA) виникає явище циклостаціонарності. Цей факт використовується в виявлювачі даного типу, вимірювання проводиться за допомогою спектральної кореляційної функції.

Якщо сигнал ПП проявляє сильні властивості циклостаціонарності, то він є періодичною функцією часу з деяким періодом. Модульовані сигнали найчастіше пов'язані з несучими синусоїдальні форми, імпульсними послідовностями, кодами або циклічними префіксами, які призводять до вбудованої періодичності.

Навіть коли дані є в широкому сенсі стаціонарним випадковим процесом, ці модульовані сигнали характеризуються циклостаціонарністю, також як їх статистики, математичне очікування і автокореляція проявляють періодичність.

Ця періодичність вводиться навмисне, щоб приймач міг її використовувати для оцінки фази несучої сигналу синхронізації імпульсів. Коли ми не маємо даних про форму сигналу первинних користувачів, що є в

реальних умовах роботи, метод виявлення на основі властивостей циклостаціонарності є кращим. Даний метод забезпечує кращі характеристики виявлення, ніж енергетичне виявлення, при низькому значенні «сигнал-шум», завдяки його здатності пригнічувати шуми, і більшу надійність при шумовій невизначеності. Це відбувається тому, що шум є випадковою величиною, і не проявляє жодних періодичних властивостей [100]

При цьому схема модуляції первинного користувача може бути легко визначена. Циклостаціонарний метод сканування набагато складніший, ніж енергетичний, що призводить до значних матеріальних витрат при реалізації [101], [102].

До недоліків методу можна віднести велику обчислювальну складність і значний час спостереження.

1.3.7 Кореляційний метод

Коли відома структура сигналу, може бути використаний метод виявлення, який використовує кореляцію прийнятого сигналу з відомою його відповідністю В [103] показано, що даний метод краще енергетичного методу щодо надійності і збіжності в часі.

Кореляційний приймач має ряд переваг в порівнянні з іншими приймачами виявлення, що дозволяє отримати найкраще значення відносини сигнал-шум. Із зазначеного, а також з результатів аналізу даних в випливає, що даний приймач вимагає апріорних відомостей для виявлення сигналу.

Даний недолік відводить даному приймачу роль ідеалізованої моделі приймача виявлення в теорії оптимальної обробки сигналів. Як зазначається у [104] отримані результати слід розглядати як теоретичну верхню межу для характеристик виявлення.

1.3.8 Моніторинг спектру на основі непараметричних алгоритмів

У разі параметричної апріорної невизначеності відомі щільності розподілу ймовірностей мають невідомі параметри (наприклад, математичне очікування і дисперсія для гаусівського розподілу), які можуть змінюватися в часі випадковим чином. Для забезпечення стійкого до зовнішніх умов функціонування алгоритми повинні здійснювати попередню оцінку невідомих параметрів шуму за додатковою (навчальною) вибіркою з подальшим використанням цих оцінок для нормування вхідних сигналів виявлювача або для управління порогом виявлення. Такі виявники отримали назву адаптивних, а також виявників з постійною ймовірністю помилкового виявлення або з постійним рівнем помилкових тривог [105], [106].

Слід зазначити, що завдання адаптації виявлення дуже ускладнюється, коли невідомо кілька параметрів або вид функцій розподілу, які беруть участь у задачі виявлення сигналів. Тому такі виявлювачі сигналів досить складно реалізуються для роботи в реальному масштабі часу [25]. А при невідомому розподілі шуму невідомий спосіб і якість адаптації [107].

Для подолання такої апріорної невизначеності статистична теорія синтезу оптимальних алгоритмів рекомендує адаптивний метод, згідно з яким замість невідомих величин слід використовувати їх максимально правдоподібні оцінки. Однак при практичній реалізації систем моніторингу спектру одним з важливих факторів є швидкодія. Тому для завдань КР має сенс розгляд квазіоптимальних алгоритмів, які ціною незначного зниження точності дозволяють істотно зменшити обчислювальну складність обробки і проводити моніторинг спектра в реальному масштабі часу.

1.3.9 Моніторинг спектру на основі непараметричних алгоритмів

Розв'язанням задачі виявлення сигналів в умовах непараметричної апріорної невизначеності може бути застосування непараметричних алгоритмів виявлення. Більшість описаних у відкритій літературі алгоритмів виявлення,

заснованих на непараметричних критеріях (знаковий, Ван-дер-Вадена, Гаєка, Севиджа, Віллоксона), дозволяють виявляти сигнали на тлі перешкод, мають симетричний вигляд функції розподілу.

Вони незначно поступаються в ефективності виявлення оптимальним алгоритмам, заснованим на непараметричних критеріях Ван-дер-Вадена, Левіна-Кушніра, Гаєка, володіючи при цьому меншою обчислювальною складністю, можуть застосовуватися для виявлення постійного сигналу на тлі шуму з симетричним розподілом.

Непараметричними виявниками називаються пристрої виявлення сигналів, які здатні підтримувати заданий рівень помилкової тривоги в тих випадках, коли розподіл перешкоди $w(x)$ належить до деякого параметричного сімейства розподілів W . Непараметричний це сімейство називається тому, що включає розподіл, які не можуть бути описані за допомогою кінцевого числа параметрів. Як приклад сімейства W можна назвати сукупність всіх розподілів з нульовою медіаною. Зрозуміло, що до складу W можуть входити і параметричні розподіли з відомою щільністю ймовірності, якщо вони володіють загальною ознакою цього сімейства.

Непараметричні детектори на відміну від адаптивних не формують оцінок параметрів, що визначають форму розподілу перешкоди. Їм не потрібен час для адаптації під перешкоду, отже, довжина реалізації вхідного процесу, на основі якої виносяться рішення про наявність або відсутність сигналу цілі, може бути менше. Непараметричні алгоритми, як правило, мають підвищену стійкість своїх характеристик виявлення до зміни виду і параметрів розподілу перешкоди. Іншими словами, ймовірність правильного виявлення в схемі непараметричного пристрою може бути значно вище, ніж у параметричного виявника, оптимального для певного розподілу перешкоди $w_1(x)$, коли фактичний розподіл перешкоди відрізняється від $w_1(x)$.

Недоліком непараметричних виявників є їх великі втрати щодо сигнал/перешкода, ніж у адаптивних виявників, що є платою за універсальність їх застосування [108].

Клас непараметричних виявників включає в себе велику кількість різноманітних пристроїв, що істотно відрізняються за принципом дії. До них відносяться фазові корелятори з попереднім обмеженням вхідного сигналу, коректори збігу полярностей, знаковий виявник і велика група рангових пристроїв виявлення. Рангові непараметричні виявники сигналів, засновані на використанні статистичних рангових критеріїв, в свою чергу поділяються на одновибіркові і двовибіркові. Цей поділ здійснюється відповідно до того, потрібно чи ні ранговому виявнику додаткова інформація про перешкоду, одержувана у вигляді допоміжної (опорної) вибірки.

В залежності від того, як формується рангова статистика (функція рангового вектора, порівнювана з порогом вирішального пристрою) рангові алгоритми (критерії) можуть бути лінійними або нелінійними. До лінійних відносяться одновибірковий і двовибірковий критерії Вілкоксона (перший носить назву знаково-рангового, другий – Манна-Уїтні), Ван дер Вардена, Фішера-Іейтса, медіанний і деякі інші. Нелінійними ранговими є критерії Колмогорова-Смірнова, Реньи, Крамера-Мізеса, τ -тест Кендалла і ін. Нелінійні критерії складніше в реалізації, але в деяких випадках більш ефективні, ніж лінійні.

Існує також особлива група перемішаних рангових алгоритмів, що відрізняється дещо більшими значеннями втрат у пороговому сигналі в порівнянні з чисто ранговими, але значно простіше реалізовані. До них відноситься узагальнений знаковий алгоритм [108].

При непараметричній апріорної невизначеності невідомо вираз для щільності розподілу ймовірностей перешкоди і суміші сигналу з завадою, а про відмінність цих розподілів є тільки відомості загального характеру (наприклад, відмінності у зсуві, масштабі та ін). У цьому випадку стійкі алгоритми виявлення базуються на алгоритмах перевірки непараметричних статистичних гіпотез [87-89].

Одержувані при цьому непараметричні алгоритми виявлення (головним чином, знакові і рангові) володіють незалежністю (інваріантністю)

ймовірності помилкової тривоги від щільності розподілу ймовірностей перешкоди.

При відхиленні справжніх розподілів від розрахункових ефективність непараметричних алгоритмів в порівнянні з фіксованою параметричної різко зростає. Тому застосування непараметричної обробки особливо доцільно, як з точки зору стабілізації ймовірності помилкової тривоги, так і з точки зору ефективності (ймовірності) виявлення в тому випадку, коли розподіл перешкоди відмінний від нормального.

Використання непараметричних алгоритмів обробки представляється доцільним і в разі виявлення сигналу на фоні нормальної перешкоди невідомої інтенсивності. У виявниках спостерігається помітна і критична залежність умовної ймовірності помилкової тривоги від потужності перешкоди, коефіцієнта посилення приймача і порогового рівня виявлення. Крім того, що реально існують перешкоди, відмінні від нормальної моделі, в ряді випадків треба відмовлятися і від її гаусової моделі, яка традиційно вважається нормальною.

Основним недоліком даного типу виявлювачів є той факт, що для обчислення статистики непараметричного тесту необхідно зробити досить великий обсяг логічних і алгебраїчних операцій, який особливо великий при малих ВСШ, коли величина ця може бути близько сотень і тисяч. Тому робота таких непараметричних виявників в реальному масштабі часу досить складна [110], [112].

1.3.10 Алгоритм виявлення сигналів на основі виявлення зміни ймовірнісних властивостей сигналів

Виявлення зміни властивостей (розладки) випадкових сигналів є інтенсивно зростаючим напрямком математичної статистики, яка знаходить широке застосування в технічній та медичній діагностиці, геофізиці, радіолокації і інших задачах обробки сигналів [34], [91-93].

У цих термінах може також розглядатися близька за змістом задача в області РК – задача виявлення нових радіовипромінювань (РВ) в частотному каналі, який аналізується. При цьому до появи нового РВ спостерігається тільки станційна перешкода з відомими імовірнісними властивостями. Після появи нового невідомого РВ в аналізованому частотному каналі імовірнісні властивості спостережуваного сигналу змінюються, що і дозволяє виявити появу нових сигналів.

Таким чином, має місце задача виявлення нового сигналу з невідомими імовірнісними властивостями на тлі перешкоди з відомими імовірнісними властивостями або отриманими за заданою навчальною вибіркою. Це окремий випадок задачі розпізнавання в умовах підвищеної апіорної невизначеності, яка детальніше буде розглянута в наступних розділах. Складність таких «некласичних» задач обробки сигналів породжує різноманіття підходів і методів їх вирішення. У роботі [32] виконано узагальнення такої задачі на випадок багатоальтернативного виявлення. При вирішенні задачі використана імовірнісна модель у вигляді ортогональних розкладів випадкових сигналів, що призводить до спектральних методів виявлення та розпізнавання сигналів в умовах апіорної невизначеності [15].

1.4 Висновки по розділу 1

1. КР дозволяє підвищити ефективність використання спектру. Його функціонування потребує використання ефективних алгоритмів виявлення з пошуку незайнятих частотних каналів.

2. Для сучасних радіозасобів різного призначення характерним є функціонування при тих чи інших рівнях апіорної невизначеності щодо сигналів, які треба виявляти. Реально апіорні відомості зводяться лише до часткового знання законів розподілу сигналів і перешкод, і обмеженого числа їх параметрів. Таким чином, при проектуванні треба вирішувати задачі виявлення сигналів, коли їх статистичні характеристики заздалегідь можуть бути невідомі

або піддаватися змінам. Алгоритми виявлення, які використовуються для моніторингу спектра в КР, повинні ефективно виявляти сигнали, що займають різну смугу частот, в умовах апріорної невизначеності.

3. Вибір методу виявлення є компромісним. При цьому характеристики первинних користувачів виступають в ролі визначального фактора при виборі методу виявлення. Для зменшення перешкод первинним користувачам КР повинна відстежувати можливі варіанти використання радіоспектру і здійснювати передбачення з його використанню в наступний момент часу. Виходячи з того, що КР постійно виконує РМ і має можливість навчатися, інформація про історію використання спектра може використовуватися для передбачення майбутнього стану радіоспектру.

6. Враховуючи описані особливості задачі моніторингу спектра КР і проведений порівняльний аналіз існуючих алгоритмів виявлення, можна говорити, що в даний час потрібна розробка нових універсальних алгоритмів виявлення радіосигналів апріорно невизначеної форми у широкому діапазоні частот. Для цих цілей найбільш перспективними є алгоритми виявлення засновані на виявленні зміни імовірнісних властивостей сигналів, які не вимагають апріорних відомостей про виявлювані сигнали.

7. Також актуальною є вирішення задачі розпізнавання сигналів при проведенні радіомоніторингу в когнітивних радіомережах. Рішення даної задачі може бути необхідним при визначенні приналежності виявленої сигналу до класу вторинних або первинних користувачів або визначенням появи нових, раніше невідомих випромінювань. При цьому слід враховувати, що в ефірі можуть бути сигнали, яких немає в базі даних управління когнітивної радіомережею, і такі сигнали можуть потрапляти на розпізнавання, що може призводити до помилки і віднесення даного сигналу до класу відомих.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ ВИЯВЛЕННЯ НЕВІДОМИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ ЗАВДАНЬ РАДІОМОНІТОРИНГУ

2.1 Аналіз методів виявлення невідомих сигналів на основі зміни імовірнісних властивостей

В даному розділі розглядаються алгоритми виявлення невідомих сигналів, які використовують статистичні відомості лише про шум.

Припустимо, що випадкові сигнали, що спостерігаються на інтервалі часу $(0, T)$, представляються кінцевовимірними векторами статистик $\mathbf{x}$. При переході від одного інтервалу спостереження до наступного статистичні властивості сигналів можуть різко змінюватися.

Введемо дві гіпотези: H^0 – гіпотезу про спостереження сигналу до зміни його властивостей; H^1 – гіпотезу про спостереження сигналу зі зміненими властивостями. Ймовірності гіпотез відповідно P_0 і P_1 , причому $(P_0 + P_1 = 1)$. Щільність розподілу статистик сигналу при справедливості гіпотези H^0 є гаусівською $N(\bar{\mathbf{X}} / \bar{\boldsymbol{\mu}}^0, \mathbf{R}^0)$ з невідомими середнім вектором $\bar{\boldsymbol{\mu}}^0$ і кореляційною матрицею $\mathbf{R}^0$. При цьому задається n навчальних вибірок $\{\bar{\mathbf{X}}_r^0, r = \overline{1, n}\}$, яка отримана до зміни властивостей сигналу і може бути використана для оцінювання середнього вектору $\bar{\boldsymbol{\mu}}^0$, та матриці $\mathbf{R}^0$. Щільність розподілу статистик сигналу після зміни його властивостей невідома і відсутня можливість отримання відповідної вибірки сигналу для оцінювання його імовірнісних властивостей.

При обробці спостережень в аналізованому частотному каналі висуваються дві гіпотези: H^1 – діє сигнал на тлі шуму; H^0 – діє тільки шум. Вважається, що шум описується багатовимірною щільністю розподілу

$W(\vec{X} / \alpha^0)$, представлена L -мірним вектором дискретних відліків спостережень $\vec{X}$, α^0 – невідомий векторний параметр щільності розподілу. Задається n навчальних вибірок шуму $\{\vec{X}_r^0, r = \overline{1, n}\}$, яка може бути використана для оцінювання невідомого параметра α^0 . Інформація про імовірнісні характеристики сигналу відсутня. Необхідно вирішити завдання виявлення невідомого сигналу на тлі випадкового шуму, заданого навчальною вибіркою.

Для вирішення сформульованої задачі виявлення невідомого сигналу може бути використано наступне вирішальне правило [6]:

$$\begin{aligned} H^1: & W(\vec{X} / \alpha^0) < \lambda \\ H^0: & W(\vec{X} / \alpha^0) \geq \lambda \end{aligned} \quad (2.1)$$

де λ - деяке порогове значення, обирає з умови забезпечення заданої ймовірності помилкової тривоги.

Для зазначених умов вирішальне правило виявлення невідомих сигналів на тлі шуму може бути зведено до порівняння з порогом махаланобісової відстані вектора $\vec{X}$ до еталону і визначається наступними співвідношеннями:

$$H^1: (\vec{X} - \vec{\mu}^0)^T (\mathbf{R}^0)^{-1} (\vec{X} - \vec{\mu}^0) > \Delta^0 \quad (2.2a)$$

- приймається гіпотеза про дію невідомого сигналу на фоні шуму;

$$H^0: (\vec{X} - \vec{\mu}^0)^T (\mathbf{R}^0)^{-1} (\vec{X} - \vec{\mu}^0) \leq \Delta^0 \quad (2.2b)$$

- приймається гіпотеза про дію тільки шуму.

Тут $\vec{\mu}^0, \mathbf{R}^0$ – приймається гіпотеза про дію тільки шуму, Δ – деяке порогове значення, обирає з умови забезпечення заданої ймовірності помилкової тривоги. Оцінки невідомих параметрів шуму $\vec{\mu}^0, \mathbf{R}^0$

визначаються за його навчальною вибірці $\{\vec{X}_r^0, r = \overline{1, n}\}$.

Для випадку, коли відліки спостережень $\vec{X}$ є некорельованими, кореляційна матриця $\mathbf{R}^0$ стає діагональною і вирішальне правило (2.2) спрощується і зводиться до порівняння з порогом евклідових відстаней спостережень до еталона.

У разі подання спостережень $\vec{X}$ у деякому ортонормованому базисі і в припущенні некорельованості координат вектора спектральних відліків $\vec{C} = \mathbf{X}^T \mathbf{B}$, вирішальне правило виявлення невідомих сигналів має вид:

$$\begin{aligned} H^1: \sum_{j=1}^N \frac{(c_j - \mu_j^0)^2}{(\sigma_j^0)^2} &> \Delta^0; \\ H^0: \sum_{j=1}^N \frac{(c_j - \mu_j^0)^2}{(\sigma_j^0)^2} &\leq \Delta^0, \end{aligned} \quad (2.3)$$

де c_j - спектральні відліки спостережень; $\mu_j^0, (\sigma_j^0)^2$ - оцінки математичних очікувань і дисперсій спектральних відліків; N - розмірність спектрального представлення спостережень; Δ^0 - деяке порогове значення, обране з умови забезпечення заданої ймовірності помилкової тривоги.

Якщо для прийняття рішень пред'являється вибірка спостережень $\{\vec{X}_r, r = \overline{1, v}\}$ об'ємом v реалізацій, вирішальне правило (2.3) приймає такий вид:

$$\begin{aligned} H^1: \sum_{r=1}^v \sum_{j=1}^N \frac{(c_{jr} - \mu_j^0)^2}{(\sigma_j^0)^2} &> \Delta_v^0; \\ H^0: \sum_{r=1}^v \sum_{j=1}^N \frac{(c_{jr} - \mu_j^0)^2}{(\sigma_j^0)^2} &\leq \Delta_v^0. \end{aligned} \quad (2.4)$$

При забезпеченні відповідних нормувань, що призводять до рівності дисперсій в спектральному поданні сигналів, може бути використано більш просте вирішальне правило:

$$\begin{aligned} H^1: \sum_{r=1}^v \sum_{j=1}^N (c_{jr} - \mu_j^0)^2 &> \Delta_v^0; \\ H^0: \sum_{r=1}^v \sum_{j=1}^N (c_{jr} - \mu_j^0)^2 &\leq \Delta_v^0. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Для випадку прийняття рішень з вибірки спостережень $\{\vec{X}_r, r = \overline{1, v}\}$, представлених в деякому ортонормованому базисі, вирішальне правило виявлення невідомих сигналів базується на порівнянні близькості оцінок енергетичного спектру спостережень до еталону:

$$\begin{aligned} H^1: \sum_{j=1}^N (G_j - G_j^0)^2 &> \Delta_G^0; \\ H^0: \sum_{j=1}^N (G_j - G_j^0)^2 &\leq \Delta_G^0. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Тут еталон $G_j^0 = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n c_{jr}^2, j = \overline{1, N}$ - це оцінки координат енергетичного

спектру шуму, знайдені за навчальною вибіркою обсягом n реалізацій;

$G_j = \frac{1}{v} \sum_{r=1}^v c_{jr}^2, j = \overline{1, N}$ - поточні оцінки координат енергетичного спектру

спостережень, отримані за вибіркою спостережень $\vec{X}_v$ меншого обсягу $v \ll n$.

2.2 Дослідження статистичних характеристик шуму

Моніторинг спектру передбачає одночасне спостереження за апріорно невідомою кількістю джерел радіовипромінювань. У зв'язку з цим спостережуваний процес слід розглядати як сукупність радіосигналів, що спостерігаються спільно в смузі частот шириною ΔF на тлі адитивного нормального білого шуму $\xi(t)$ з невідомою амплітудою. Невідоме число M радіосигналів $S_m(t)$, спектри котрих, мають невідому форму, зосереджені в смугах частот шириною $\Delta f_m < \Delta F$ (рис. 2.1).

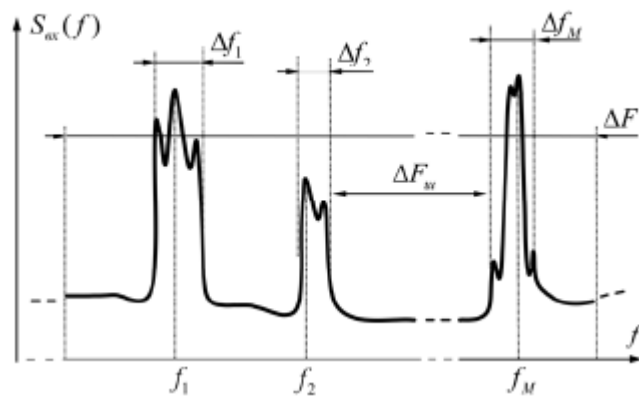


Рис. 2.1. Спектр спостережуваного процесу

Таким чином, спостережуваний процес має вигляд:

$$S_{\text{BX}}(t) = \xi(t) + \sum_{m=1}^M S_m(t, \Delta f_m) \quad (2.7)$$

При розгляді в якості спостережуваної вибірки сукупності відліків спостережуваного в часі процесу $S_{\text{BX}}(k)$, взятих з інтервалом дискретизації T , отримуємо, що кожен часовий відлік залежить складним чином від параметрів всіх присутніх сигналів. Цей факт ускладнює процес виявлення сигналів.

Полегшує рішення поставленої задачі перехід в частотну область, тому в якості вектора спостережуваних координат будемо використовувати відліки амплітудного спектру процесу $S_{\text{BX}}(k)$:

$$X(n) = c(n) = \{x_n, n = \overline{1, N}\}, \quad (2.8)$$

отриманих за допомогою дискретного перетворення Фур'є (ДПФ):

$$c(n) = \sum_{k=0}^{N-1} S_{\text{BX}}(k) e^{-j2\pi nk/N}. \quad (2.9)$$

Тут k і n – номери відліків у часовій та спектральній областях, T – інтервал дискретизації, N – розмір вибірки ДПФ.

Розглянемо випадок, коли аналізований процес $S_{\text{BX}}(t)$ не містить сигнальних компонент і отриманий в результаті дискретизації лише нормального шуму $\xi(t)$. Послідовність $\xi(k)$ будемо вважати стаціонарної, що володіє нульовим математичним очікуванням і ефективним значенням σ_ξ . Інтервал дискретизації T обраний так, що відліки $S_{\text{BX}}(k)$ можна вважати некорельованими один з одним.

У цьому випадку реальна і уявна частини перетворення (1.3) визначатимуться виразами:

$$\psi_1 = \text{Re}\{c(n)\} = \sum_{k=0}^{N-1} S_{\text{BX}(r)}(k) \cdot \cos(2\pi \frac{nk}{N}), \quad (2.10)$$

$$\psi_2 = \text{Im}\{c(n)\} = \sum_{k=0}^{N-1} S_{\text{BX}(r)}(k) \cdot \sin(2\pi \frac{nk}{N}) \quad (2.11)$$

Величини ψ_1 , ψ_2 виявляються незалежними нормальними випадковими величинами з нульовим математичним очікуванням і

дисперсією $D_{\psi} = 0,5\sigma_{\xi}^2$, при всіх n , за винятком $n = 0$ и $n = N/2$, при котрих $\psi_1 \equiv 0$, а ψ_2 володіє подвоєною дисперсією $D_{\psi} = 0,5\sigma_{\xi}^2$ [35].

Реальна і уявна частини ДПФ нормальної дискретної послідовності ψ_1 , ψ_2 незалежні один від одного. Це можна показати, визначивши взаємну кореляцію відліків ДПФ:

$$\begin{aligned} m\{c(n) \cdot c(m)\} &= m\left\{\sum_{k=0}^{N-1} \xi(r)\xi(k) \cdot e^{-j2\pi nr/N} \cdot e^{-j2\pi nk/N}\right\} = \\ &= \sigma_{\xi}^2 \sum_{k=0}^{N-1} e^{-j2\pi(m+n)k/N} = \begin{cases} \sigma_{\xi}^2, \{n+m=0, n+m=N\} \\ 0, \{n+m \neq 0, n+m \neq N\} \end{cases} \end{aligned} \quad (2.12)$$

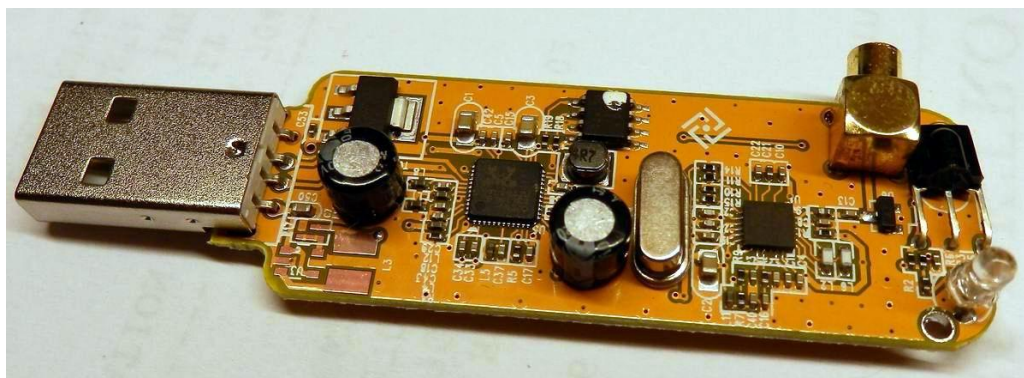
Нульове значення взаємної кореляції підтверджує, що спектральні відліки різних частот є один по відношенню до одного незалежними випадковими величинами. Випадок, відповідний ситуації $n+m=0, n+m=N$ є наслідком властивості ДПФ, згідно з яким відліки ДПФ з номерами n та $(-n)$, а також n та $(N-n)$ є комплексно-сполученими величинами.

Таким чином, спектральні відліки усередненого енергетичного спектру (2.8) будуть представляти собою незалежні випадкові величини, які підпорядковуються центральному χ^2 (хі-квадрат) – розподілу [7].

Оскільки вирішальні правила виявлення невідомих сигналів засновані на певних припущеннях про імовірнісні властивості шуму, були проведені дослідження цих властивостей. Для отримання запису шуму була використана установка, що складається з комп'ютера і SDR приймача, реалізованого на базі DVB-T тюнер, який за допомогою спеціалізованого ПЗ (SDR#), дозволяє проводити запис сигналів з ефіру. Такий тюнер здатний забезпечити прийом радіовипромінювань в діапазонах частот від 24 МГц до 1710 МГц і візуалізувати спектри сигналів з різними типами модуляцій: AM, FM, WFM, NFM, CW, SSB. [78].



а)



б)

Рис. 2.2. DVB-T тюнер: а) зовнішній вигляд лабораторної установки, б) внутрішній вигляд SDR пристрою

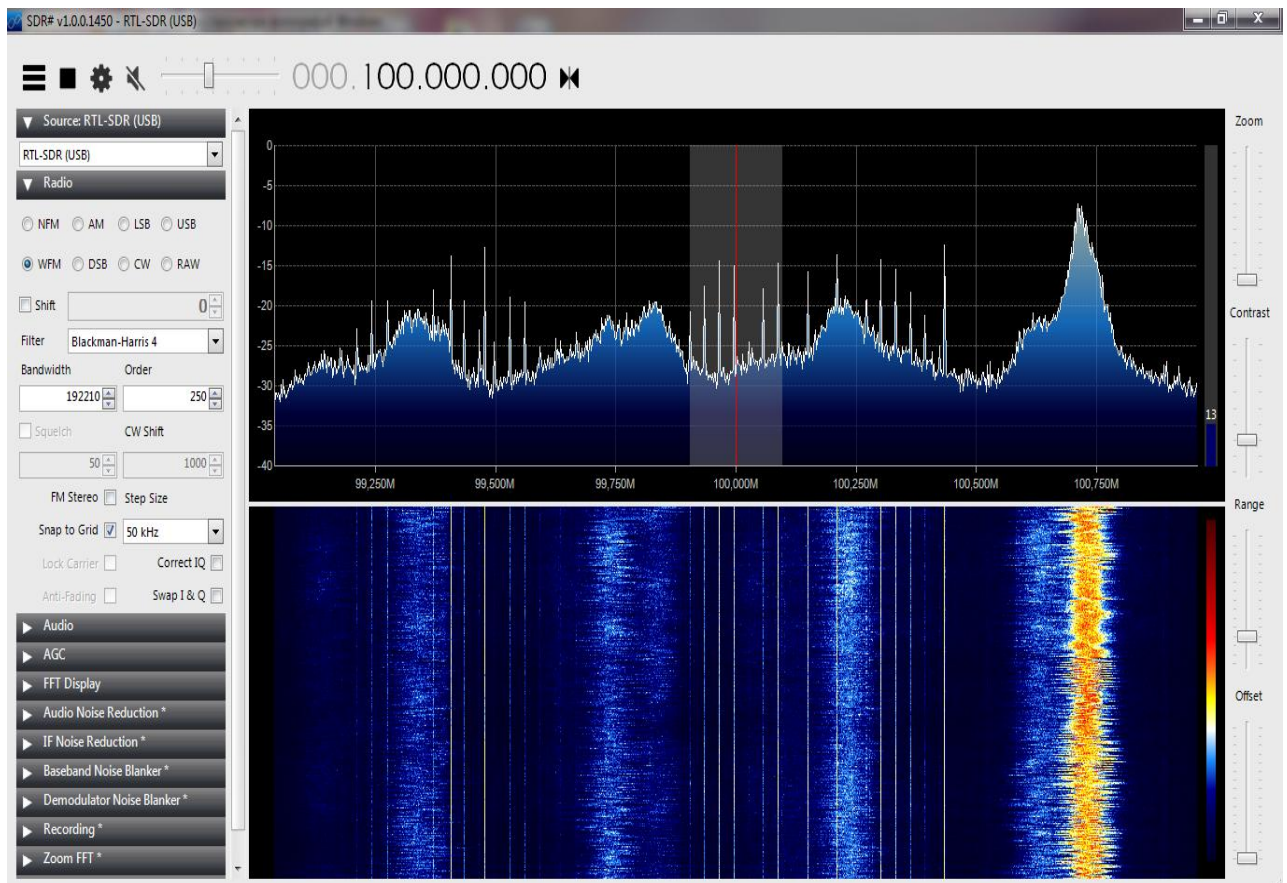


Рис. 2.3. Інтерфейс програми SDR#

За допомогою даної установки проводився запис в оцифрованому вигляді вибірок шуму, що діє в заданих частотних каналах.

Отримані навчальні та контрольні вибірки реалізацій сигналів і шуму, що спостерігаються в частотних каналах зі смугою 125 кГц в діапазоні частот стандарту IEEE 802.22. Була обрана частота дискретизації рівна 250 кГц. В результаті була записана 1000 реалізацій по 256 часових відліків.

За отриманими вибірками шуму побудована гістограма розподілів його вибірових значень у часовій області (рис. 2.4), А також знайдені оцінки його кореляційної функції (рис. 2.5). За аналізом отриманих результатів можна зробити припущення про гаусів розподіл вибірових значень шуму, а також про їх некорельованість. Близькі результати були отримані за вибірками шуму, що діє і в інших частотних каналах.

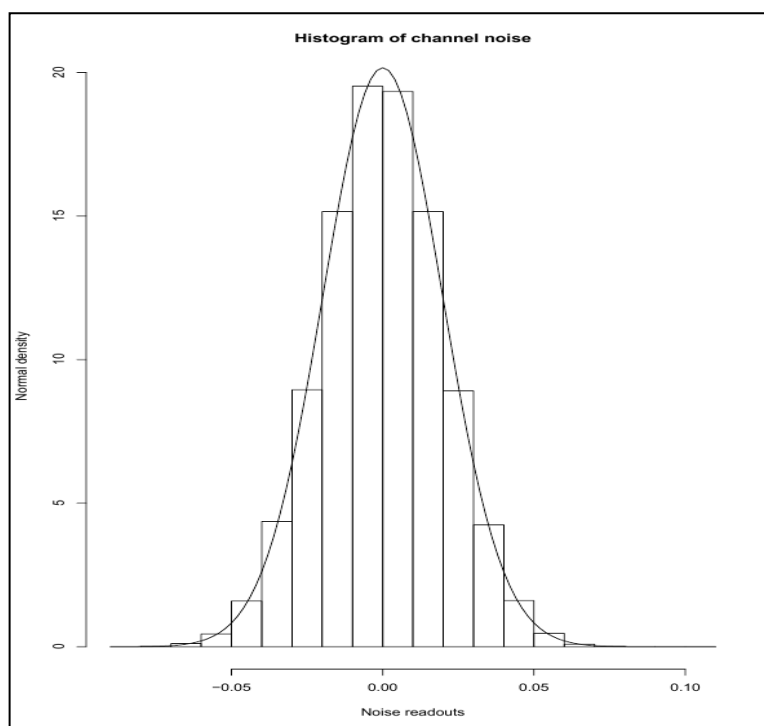


Рис. 2.4. Гістограма розподілів вибіркових значень шуму в частотному каналі у часовій області

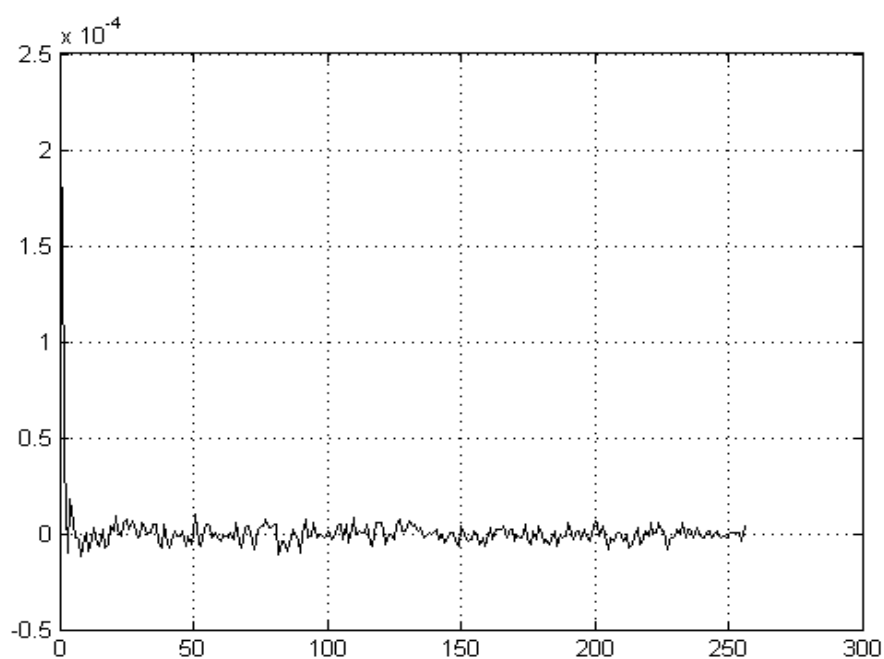


Рис. 2.5. Оцінка кореляційної функції шуму частотному каналі у часовій області

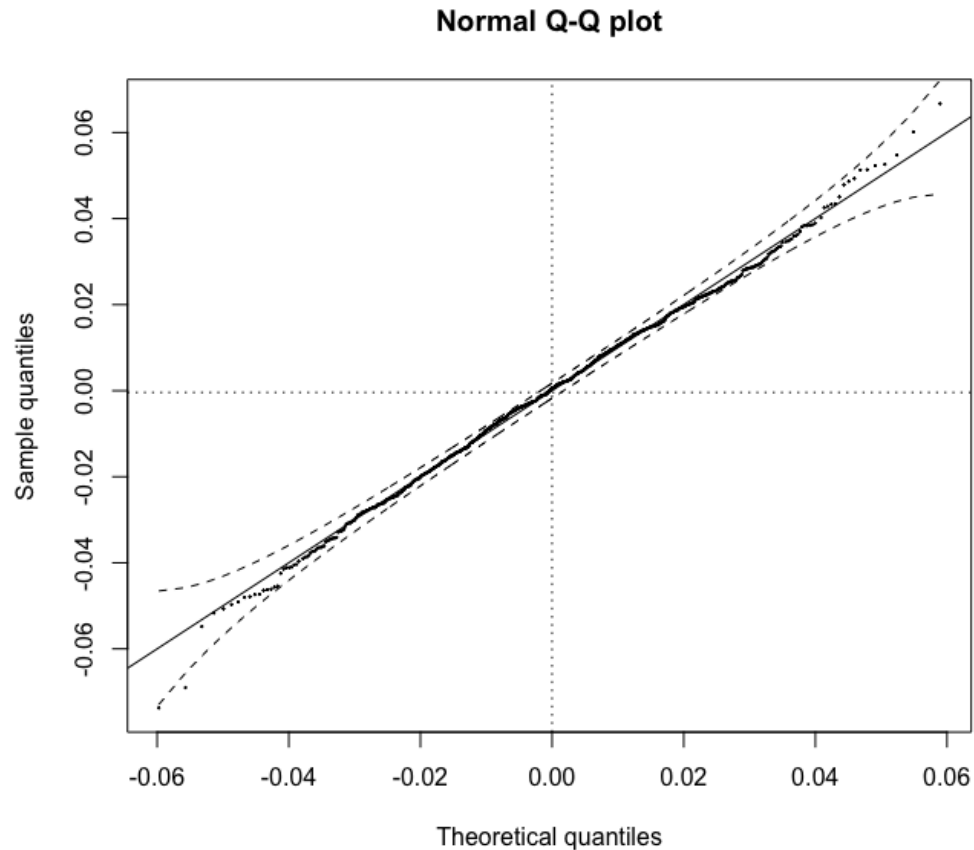


Рис. 2.6. Нормований графік QQ – розподілу відліків шуму частотному каналі у часовій області

Як видно з рис.2.4 відліки в часовій області запису є АБГШ, і підпорядковуються закону нормального розподілу. Крім гістограм, ще однією перевіркою на нормальність розподілу є побудова Q-Q графіка, або графік «Квантиль-Квантиль». Даний графік дозволяє порівняти розподіл досліджуваної змінної з теоретичним нормальним розподілом, результати наведені на рис.2.6.

Додатково було проведено тест на однорідність розподілів відліків шуму. Для цих цілей був використаний критерій Колмогорова-Смирнова для перевірки гіпотези про приналежність розподілів вибірок шуму одному і тому ж розподілу. Рівень довіри становив 0.05. При цьому була підтверджена нульова гіпотеза, і таким чином підтверджено, що шум є однорідним (рис.2.7).

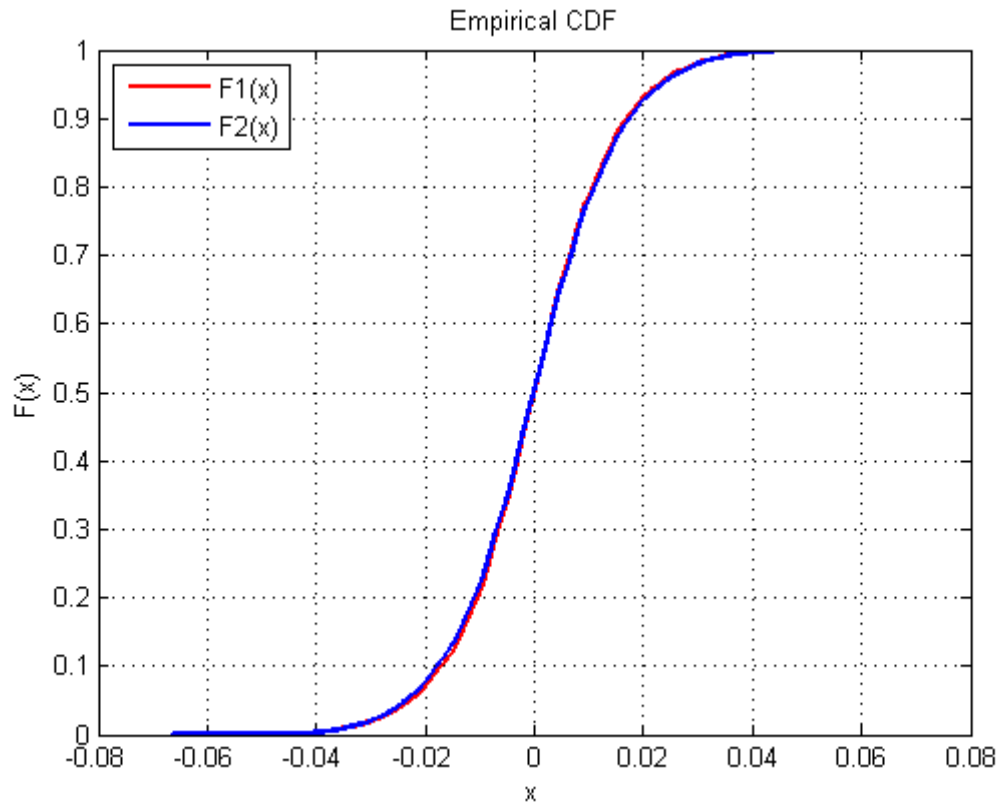


Рис. 2.7. Графіки емпіричних функцій розподілу відліків шуму у частотному каналі у часовій області

Також були проведені дослідження статистичних характеристик шуму в разі представлення спостережень в ортонормованому базисі дискретних експоненційних функцій (ДЕФ). При цьому розглядалося спектральне подання спостережень шуму у вигляді відліків амплітудного спектру.

Якщо врахувати, що при переході в область амплітудного спектру значення відліків розраховується як:

$$c_j = \sqrt{\text{Re}(x_j)^2 + \text{Im}(x_j)^2}, \quad (2.13)$$

де c_j - відліки амплітудного спектру, Re , Im – реальна та уявна частина ДПФ відповідно.

При цьому відліки амплітудного спектру підпорядковуються розподілу Райса (рис.2.8), який за певних умов наближається до нормального розподілу [116].

Як показують дослідження проведені в [36] перехід у частотну область приводить до покращення характеристик виявлення невідомих сигналів, що особливо видно на менших значеннях ВСШ, не зважаючи на певне відхилення від нормального розподілу.

Цей факт можна пояснити тим, що відліки більшості сигналів у часовій області мають нормальний розподіл і на малих ВСШ вони мало відрізняються від власне шуму.

При переході у спектральну область сигнал локалізується і тим самим збільшується відмінність суміші «сигнал+шум» від шуму і таким чином покращуються результати виявлення.

Отже подальшу роботу запропонованих методів виявлення невідомих сигналів будемо проводити в області амплітудного спектру.

2.3 Визначення порогових значень вирішальної статистики в алгоритмах виявлення невідомих сигналів в частотних каналах

Вибір порогових значень Δ^0 , для вирішальних правил описаних вище, відбувається наступним чином:

1. За навчальною вибіркою шуму проводиться знаходження еталонних значень.
2. Для знаходження значень вирішальної статистики, беруться відліки шуму і підставляються у вирішальні правила.
3. Отримані значення вирішальної статистики ранжуються.
4. Виходячи із заданої ймовірності помилкової тривоги $P_{(1/0)}$, поріг Δ^0 дорівнює значенню порядкової статистики з номером n , який вибирається з умови $1 - \frac{n}{N} \geq P_{(1/0)}$, де N кількість проведених випробувань.

На рис.2.8-рис.2.9 зображені отримані значення вирішальної статистики для правила (2.4). Розмірність блока ДПФ=512, кількість

реалізацій для прийняття рішення $\nu=1$, кількість експериментів $N=1000$, $P_{(1/0)}=0.04$, $\Delta \approx 306$.

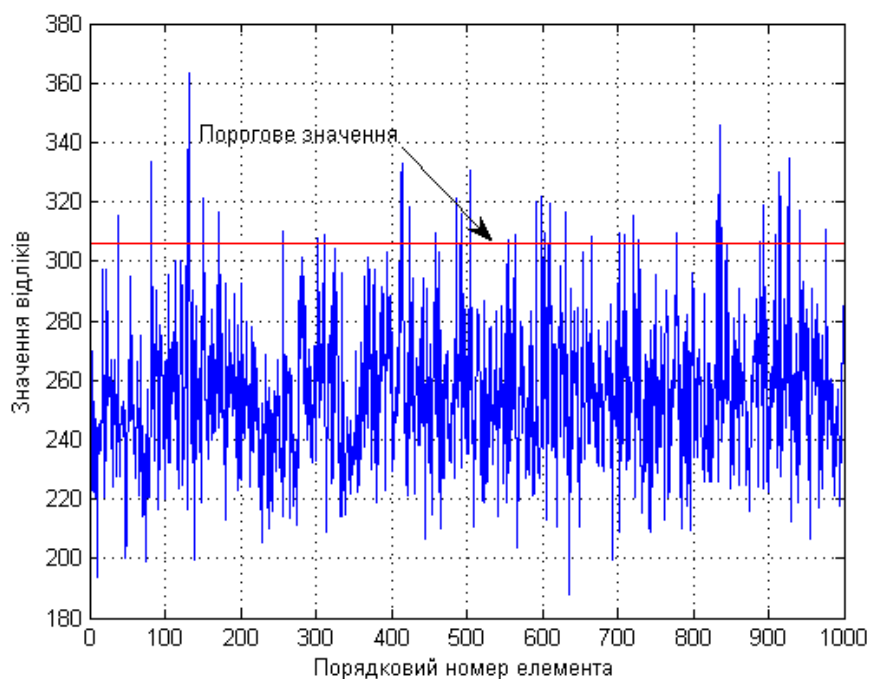


Рис. 2.8. Значення елементів вирішальної статистики

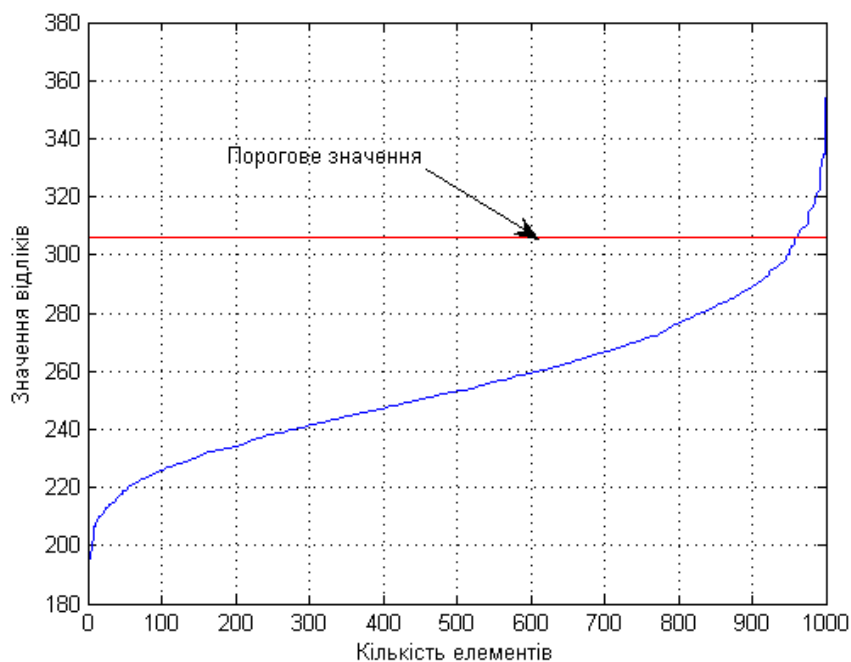


Рис. 2.9. Ранжовані значення вирішальної статистики

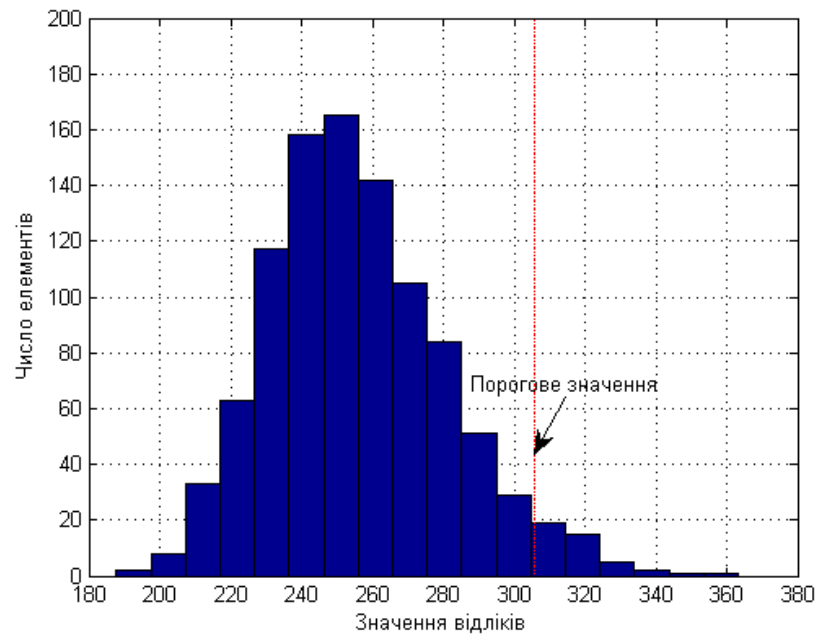


Рис. 2.10. Гістограма розподілення значень вирішальної статистики

Подібні результати були отримані для вирішальних статистик, які отримані в результаті використання інших запропонованих правил виявлення.

Для виявлення залежності між значенням порогу та кількістю реалізацій v , що пред'являються для прийняття рішень при різних розмірах блоку ДПФ для вирішальних правил (2.4) та (2.6) були отримані дані, які зведені у табл.2.1 та табл. 2.2 і рис.2.11 та рис.2.12.

Таблиця 2.1 – Залежність порогу від кількості реалізацій v при різних значеннях блоку ДПФ ($N=1000$) для вирішального правила (2.4).

ДПФ \ v	$v=1$	$v=2$	$v=3$	$v=4$	$v=5$
64	48.1769	87.6719	126.2725	165.3653	203.8739
128	87.4767	162.7555	236.4467	308.6251	381.0082
256	161.8800	305.2915	444.6467	579.4109	708.5478
512	305,9	581,9	841,7	1098,8	1357

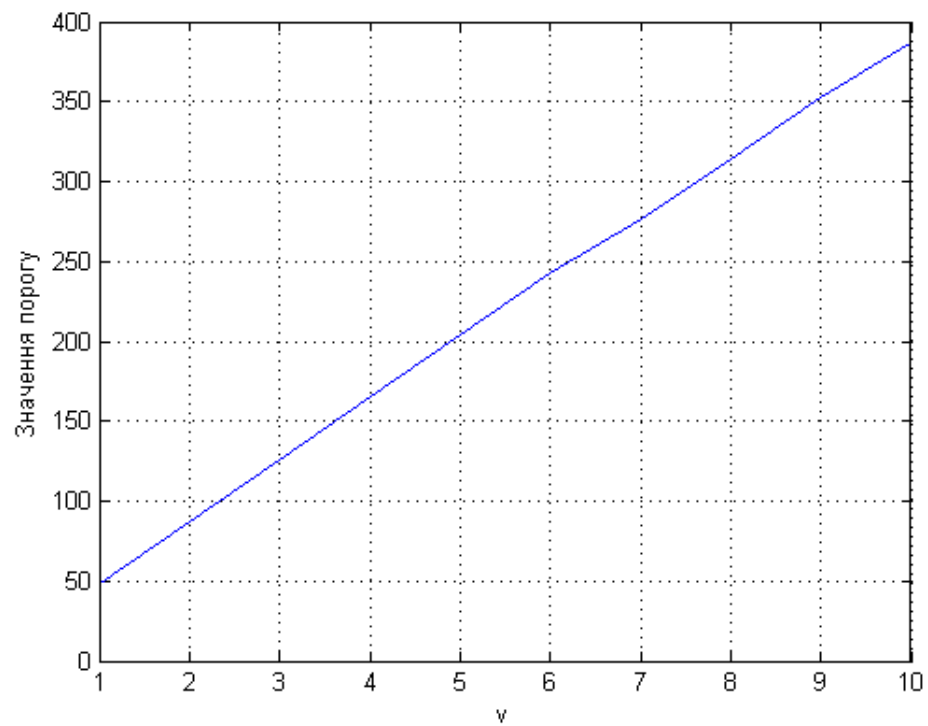


Рис.2.11. Залежність значення порогу від кількості реалізацій v для вирішального правила (2.4), ДПФ=64, $N=1000$

Таблиця 2.2 – Залежність порогу від кількості реалізацій v при різних значеннях блоку ДПФ ($N=1000$) для вирішального правила (2.6).

ДПФ \ v	v=1	v=2	v=3	v=4	v=5
64	1.8455	0.7282	0.4745	0.3482	0.2772
128	11.1717	5.0645	3.1098	2.3134	1.7309
256	79.2813	32.9229	20.3599	14.8846	10.9300
512	503.6122	218.3568	129.5732	92.7045	71.5623

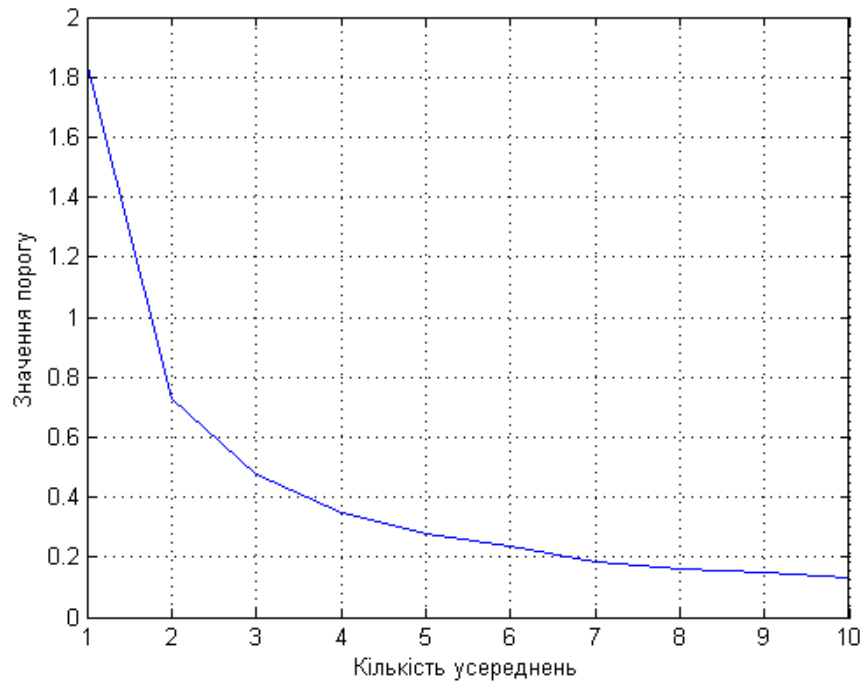


Рис. 2.12. Залежність значення порогу від кількості усереднень v для вирішального правила (2.6), ДПФ=64, $N=1000$

2.4 Висновки по розділу 2

1. У даному розділі проаналізовані методи, які дозволяють виявляти зміну імовірностних характеристик сигналів.

2. Для отримання контрольних записів відліків шуму була створена та використана установка, яка складається з комп'ютера і SDR приймача, реалізованого на базі DVB-T тюнер, який за допомогою спеціалізованого ПЗ (SDR#), дозволяє проводити запис сигналів з ефіру. Такий тюнер здатний забезпечити прийом радіовипромінювань в діапазонах частот від 24 МГц до 1710 МГц і візуалізувати спектри сигналів з різними типами модуляцій: AM, FM, WFM, NFM, CW, SSB.

3. Отримані навчальні та контрольні вибірки реалізацій сигналів і шуму, що спостерігаються в частотних каналах зі смугою 125 кГц в діапазоні частот стандарту IEEE 802.22. Була обрана частота дискретизації рівна 250 кГц. В результаті була записана 1000 реалізацій шуму.

4. Оцінені статистичні властивості шуму, який діє в частотних каналах діапазону КР, були проведені тест на нормальність (рис. 2.4, рис. 2.6), оцінка кореляційної функції (рис. 2.5.) та тест на однорідність за критерієм Колмогорова-Смірнова (рис. 2.7). Результати показали, що відліки цього шуму є некорельованою однорідною гаусовою випадковою величиною. При переході у частотну область відбувається покращення характеристик виявлення невідомих сигналів, що особливо видно на менших значеннях ВСШ, не зважаючи на певне відхилення від нормального розподілу. Це факт можна пояснити тим, що відліки більшості сигналів у часовій області мають нормальний розподіл і на малих ВСШ вони мало відрізняються від власне шуму. При переході у спектральну область сигнал локалізується і тим самим збільшується відмінність суміші «сигнал+шум» від шуму і таким чином покращуються результати виявлення.

5. Детально розглянута процедура вибору порогових значень та отримані дані (рис.2.8-2.12, табл.2.1-2.2) вирішальної статистики для алгоритму, який базується на вирішальному правилі (2.5). Для інших вирішальних правил були отримані аналогічні залежності.

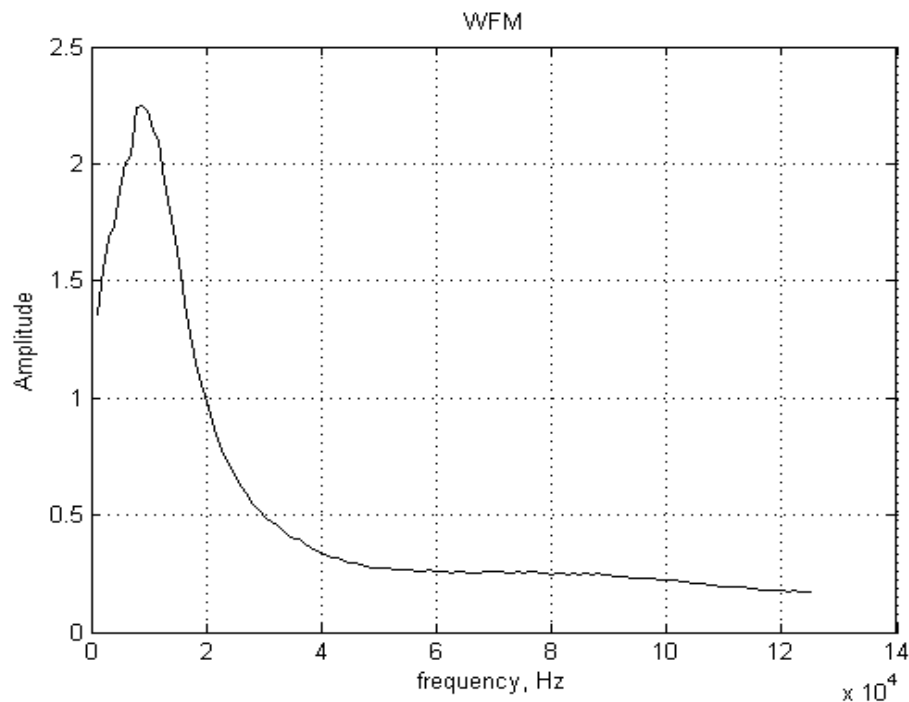
6. Визначено, що залежність зміни значення порогу від кількості реалізацій v , які подаються на обробку є нелінійними (рис.2.11-2.12)

РАЗДЕЛ 3

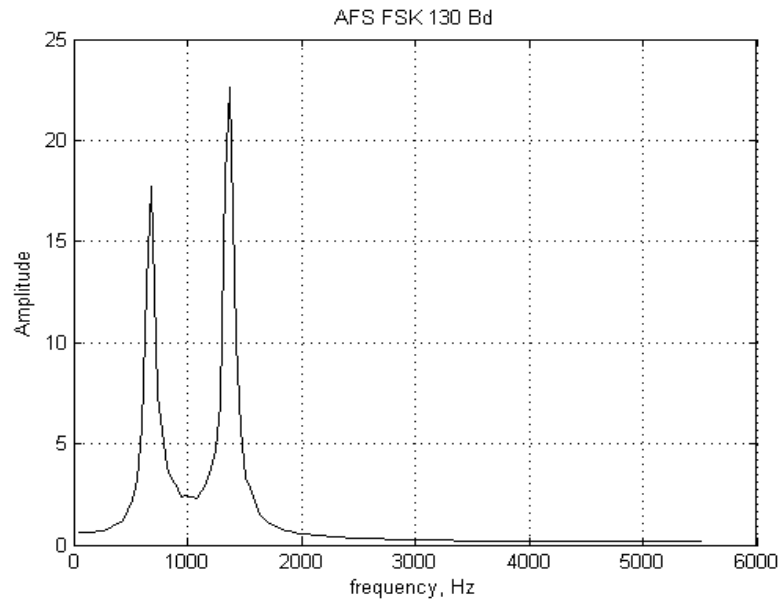
ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ ВИЯВЛЕННЯ НЕВІДОМИХ СИГНАЛІВ ШЛЯХОМ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НА ЕОМ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕАЛЬНИХ СИГНАЛІВ І ШУМУ

3.1 Вибір умов проведення експерименту з дослідження алгоритмів виявлення

Для проведення досліджень робочих характеристик алгоритмів виявлення, реалізованих на основі вирішальних правил (2.2-2.7), була використана SDR установка, яка була розглянута в попередньому розділі. За її допомогою в діапазоні частот, відведеного для роботи стандарту IEEE.802.22, були отримані вибірки спостережень різних сигналів і шуму. На рис. 3.1 зображена форми спектру сигналів, які розглядалися як невідомі сигнали, що з'являються на тлі шуму в аналізованому частотному каналі.



a)



б)

Рис. 3.1. Амплітудні спектри сигналів: а) сигнал з широкосмуговою частотною модуляцією WFM, б) сигнал з вузькосмуговою частотною маніпуляцією (FSK)

Алгоритми виявлення були програмно реалізовані в середовищі MATLAB, яке є зручним для обробки великих обсягів даних в матричній формі, в якій і представлені спостереження сигналів.

Навчальні вибірки реалізацій шуму, що діє в обраному частотному каналі, використовувалися для отримання порогових значень, використовуваних для роботи алгоритмів. Контрольні вибірки реалізацій сигналів використовувалися для отримання оцінок ймовірностей правильного виявлення сигналів на тлі шуму в частотному каналі.

Для визначення таких характеристик виявлення як ймовірність правильного виявлення $P_{(1/1)}$ від співвідношення сигнал-шум SNR при фіксованій ймовірності помилкової тривоги, а також ймовірності правильного виявлення $P_{(1/1)}$ від ймовірності хибної тривоги $P_{(1/0)}$ скористаємося оцінкою необхідних ймовірностей через частоту появи

відповідних подій в ході проведення імітаційного моделювання роботи алгоритмів.

Нехай P – невідома ймовірність події, що цікавить нас A , а $\tilde{P}$ – частота цієї події при n дослідах, що розглядається як випадкова величина-функція випадкових результатів дослідів, що розглядається як випадкова величина-функція випадкових результатів дослідів.

Щоб дослідити частоту $\tilde{P}$ як оцінку ймовірності події, скористаємося наступними формулами для математичного очікування і дисперсії частоти:

$$\begin{aligned} M\tilde{P} &= p, \\ D\tilde{P} &= \frac{pq}{n}, \\ q &= 1 - p. \end{aligned} \tag{3.1}$$

З цих виразів видно, що математичне очікування частоти події дорівнює його ймовірності, а дисперсія частоти прямує до нуля при необмеженому збільшенні числа дослідів n . Отже, частота події сходиться до його ймовірності при $n \rightarrow \infty$. Що відповідає теоремі Якова Бернуллі. Дотримуючись даної теореми, частота події є незміщеною оцінкою її ймовірності [117].

З теореми Якова Бернуллі випливає, що при будь-яких $\varepsilon, \delta > 0$ при всіх досить великих числах дослідів має місце нерівність:

$$P(|\tilde{P} - p| \geq \varepsilon) < \delta. \tag{3.2}$$

В силу довільності ε та δ слід, що при досить великому числі дослідів n отримання відхилення частоти від ймовірності, що перевершує за абсолютною величиною довільно мале наперед задане число ε , можна вважати неможливою подією, що є підставою використання частоти в якості оцінки ймовірності події.

Внаслідок випадковості результатів дослідів неможливо встановити досить вузькі межі помилки оцінювання, з яких оцінка не виходила б з них з повною гарантією. Тому виникає задача визначення за результатами дослідів таких меж, з яких помилка оцінки не виходила б із заданою ймовірністю. Враховуючи той факт, що частота події $\tilde{P}$ приймається за його ймовірність p , можна встановити за результатами дослідів таку межу відхилень $\tilde{P}$ від p , яку модуль помилки $|\tilde{P} - p|$ не перевершував би із заданою ймовірністю α . Ця межа буде також випадковою в силу випадковості результатів дослідів. Таким чином, мова йде про знаходження такого випадкового інтервалу, який із заданою ймовірністю α містив би невідоме значення ймовірності p .

Для наближеного розрахунку значень довірчого інтервалу, скористаємося наступним – при великому числі дослідів n ($n \geq 100$) визначення довірчих інтервалів для p спрощується в силу того, що розподіл випадкової величини оцінки ймовірності при досить великому n та p не дуже близькою до нуля і одиниці, дозволяє вважати, що відносна частота розподілена приблизно за нормальним законом. Це дає можливість для великих n користуватися нормальною функцією розподілу замість точної біноміальної для наближеного визначення довірчих інтервалів для ймовірності. Розрахувати верхні і нижні значення інтервалів можна за допомогою наступних виразів:

$$\begin{aligned} a_{\alpha}(p) &= \tilde{P} - \varepsilon_{\alpha} \sqrt{\tilde{P}(1 - \tilde{P}) / n}; \\ b_{\alpha}(p) &= \tilde{P} + \varepsilon_{\alpha} \sqrt{\tilde{P}(1 - \tilde{P}) / n}, \end{aligned} \quad (3.3)$$

де ε_{α} визначено наступним виразом

$$2\Phi(\varepsilon_{\alpha}) = \alpha \quad (3.4)$$

Практично ε_{α} визначається з таблиці значень для функції Лапласа за заданою кількістю проведених дослідів і заданим коефіцієнтом довіри α .

Виходячи з вищевикладеного, для отримання значення необхідних імовірнісних характеристик алгоритмів виявлення кількість дослідів приймемо $n = 1000$.

Дана кількість експериментів дозволить істотно зменшити дисперсію отриманої оцінки і дозволити спрощеним способом отримувати довірчі інтервали:

$$\begin{aligned} a_{\alpha}(p) &= \tilde{P} - 1.96 * \sqrt{\tilde{P}(1 - \tilde{P}) / n}; \\ b_{\alpha}(p) &= \tilde{P} + 1.96 * \sqrt{\tilde{P}(1 - \tilde{P}) / n}, \end{aligned} \quad (3.5)$$

Оцінки $P_{(1/1)}$ є результатом розрахунку $P_{(1/1)} = n_1 / n$, де n_1 - число дослідів, в яких прийняті правильні рішення про виявлення сигналу, n - загальне число дослідів.

3.2 Дослідження робочих характеристик алгоритмів виявлення невідомих сигналів методом імітаційного моделювання на ЕОМ

Для отримання робочих характеристик запропонованих алгоритмів виявлення, методом імітаційного моделювання, використовувалися контрольні вибірки реалізацій сигналів і шуму обсягом у 1000 реалізацій тривалістю $L=64$ часових відліків для сигналів, зображених на рис. 3.2.

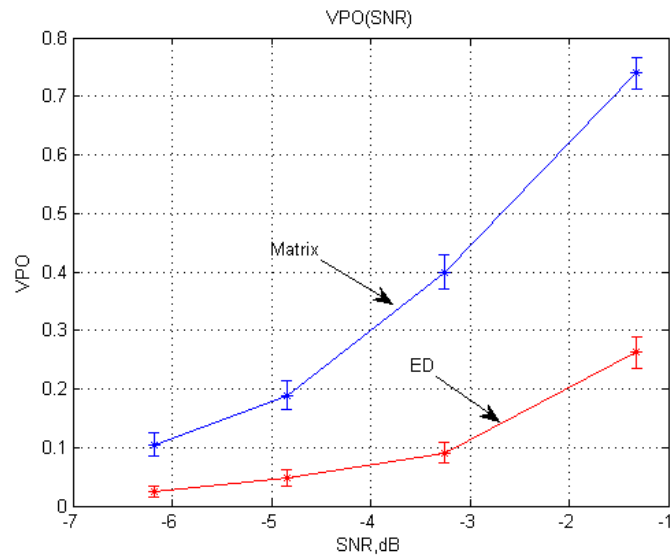
Так само для порівняння був використаний найпростіший метод виявлення невідомих сигналів, відомий як енергетичний детектор:

$$\begin{aligned} H^1: \sum_{j=1}^N c_j^2 &> \Delta^0; \\ H^0: \sum_{j=1}^N c_j^2 &\leq \Delta^0, \end{aligned} \quad (3.8)$$

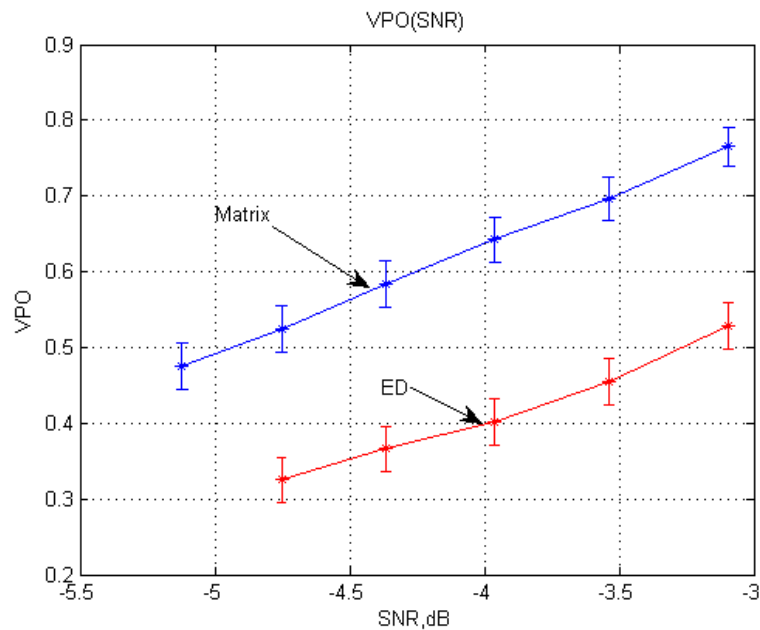
де Δ^0 – деяке порогове значення, яке визначається з умови забезпечення заданої ймовірності помилкової тривоги.

В результаті отримані залежності ймовірності правильного виявлення невідомого сигналу $P_{(1/1)}$ від відношення сигнал-шум SNR при фіксованій ймовірності помилкової тривоги $P_{(1/0)}$. На рис. 3.3 такі залежності наведені для вирішального правила (2.2) для випадку подання спостережень в базисі ДЕФ і при фіксованій ймовірності помилкової тривоги $P_{(1/0)} = 0.04$.

Введемо означення для сигналів, зображених на рис.3.2: для сигналу (а) – сигнал №1; б) для сигналу (б)– сигнал №2.

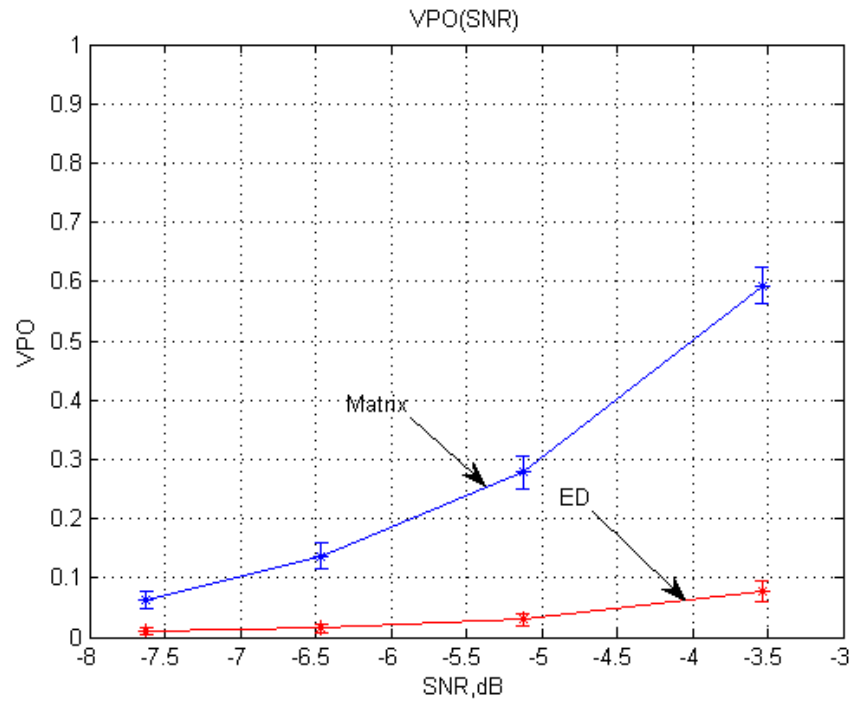


а)

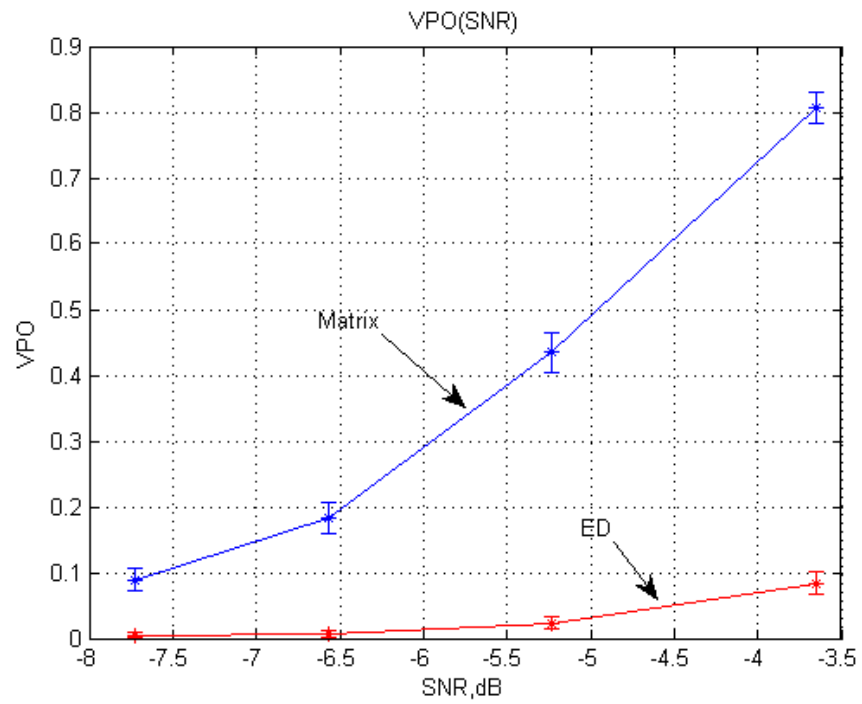


б)

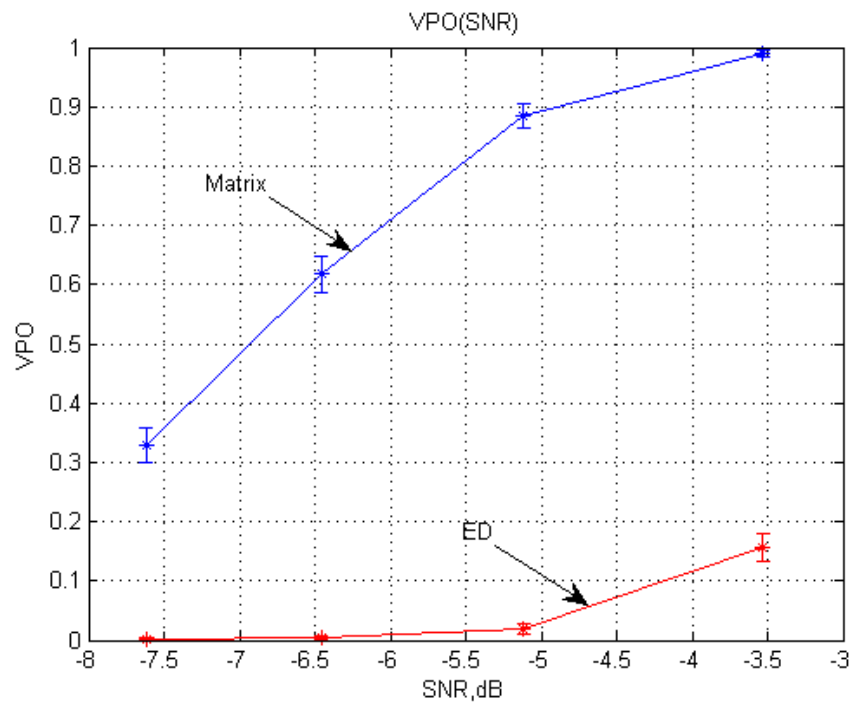
Рис.3.2. Залежність ймовірності правильного виявлення сигналів від ВСШ для вирішального правила (2.2)-Matrix та (3.8)-ED при $P_{(1/0)} = 0,04$: а) сигнал №1; б) сигнал №2



а)



б)



в)

Рис.3.5. Залежність ймовірності правильного виявлення від ВСШ для вирішального правила (2.2)-Matrix та (3.8)-ED для сигналу №1 (при $P_{(1/0)} = 0,04$) для розмірностей блоку ДПФ: а) 128, б) 256, в) 512

Для цього ж вирішального правила також отримані залежності правильного виявлення сигналу $P_{(1/1)}$ від ймовірності хибної тривоги $P_{(1/0)}$ при різних ВСШ (рис. 3.5). Ці залежності показують, як може проводитися обмін між собою значень цих показників якості.

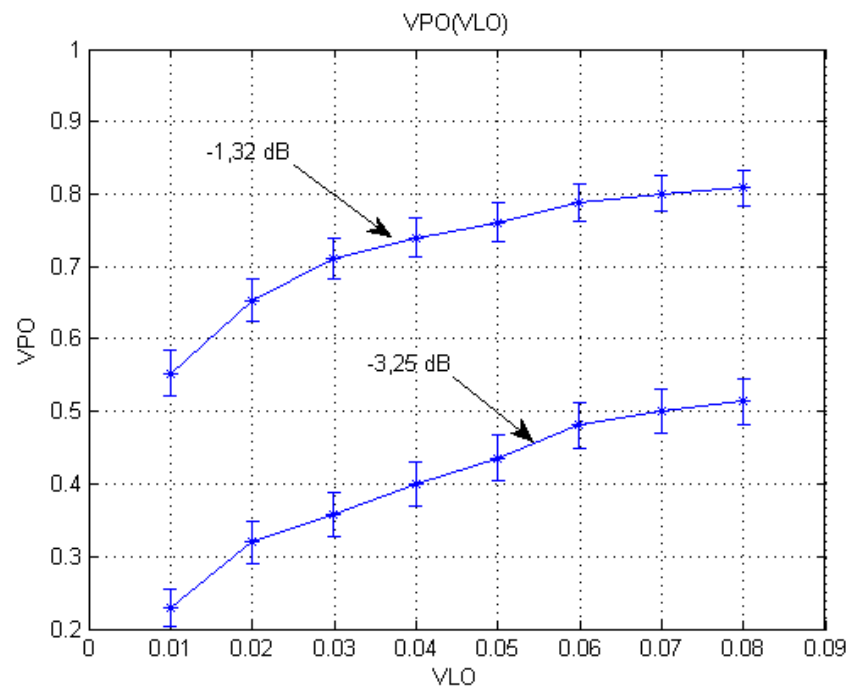
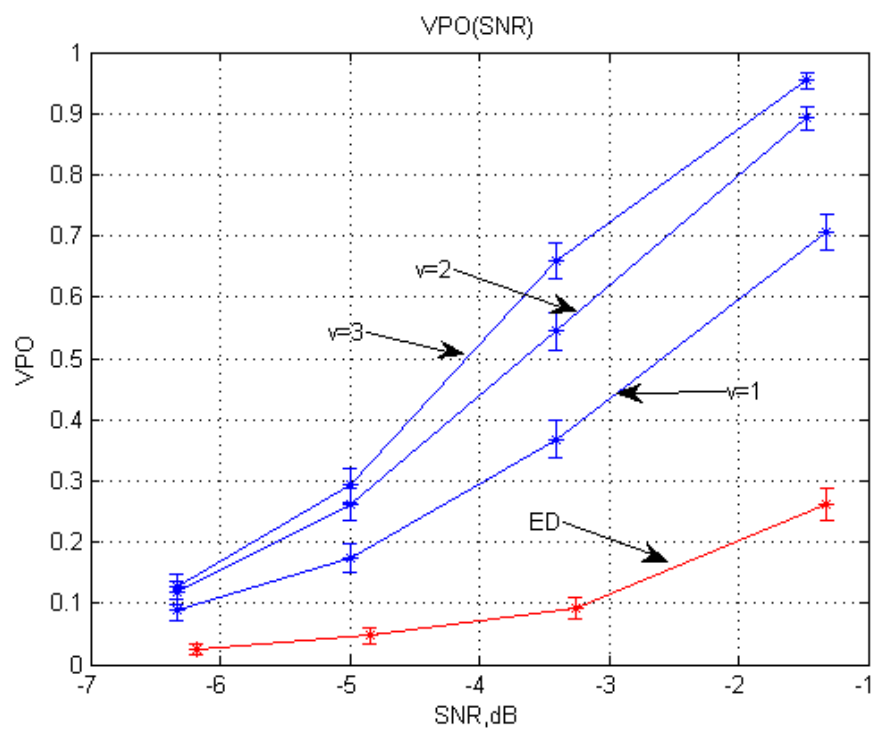
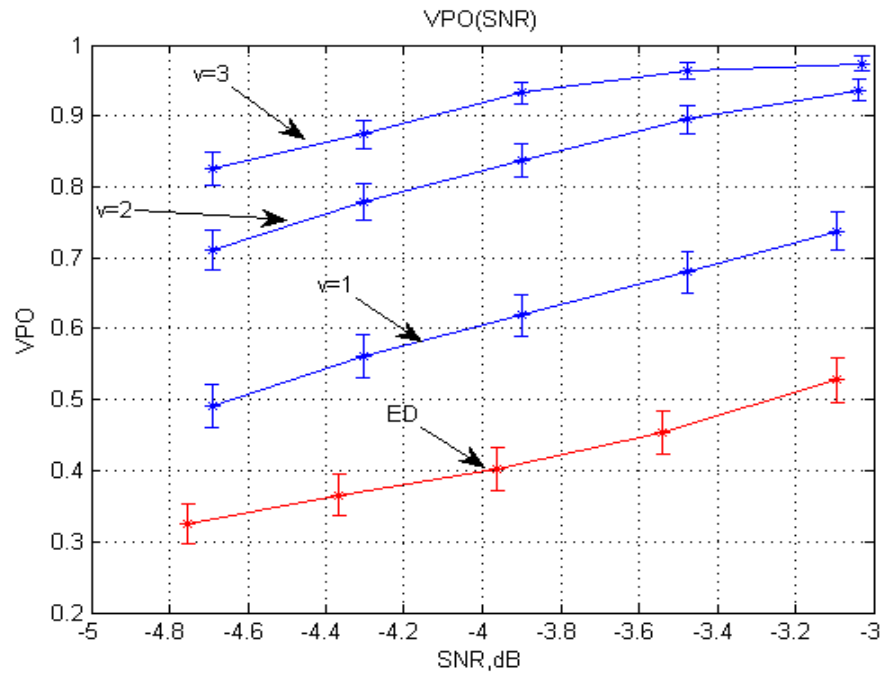


Рис. 3.6. Залежність ймовірності правильного виявлення сигналу від ймовірності помилкової тривоги для різних ВСШ для вирішального правила (2.2) ($\nu = 1$) та сигналу №1



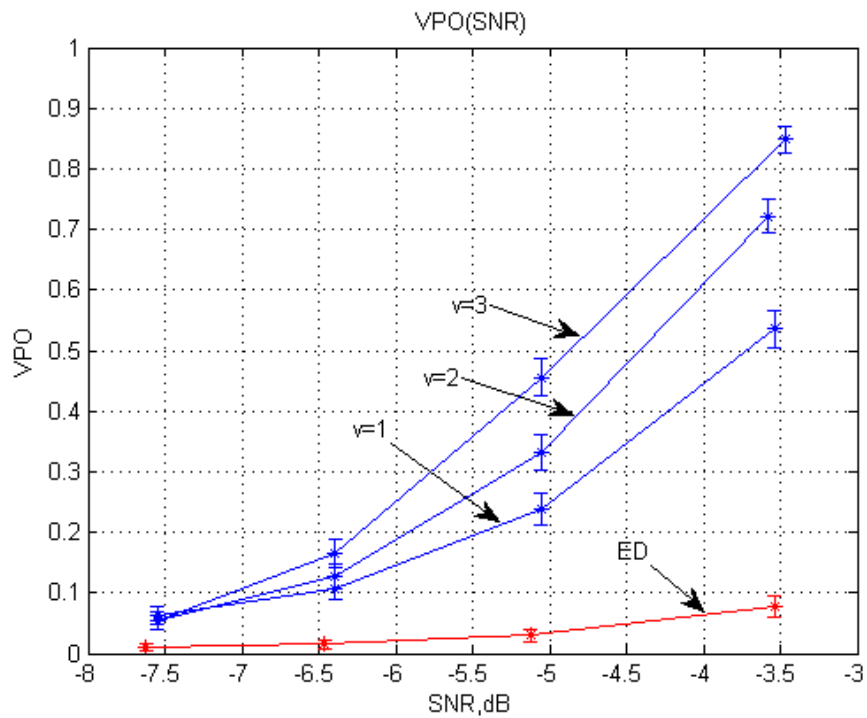
a)



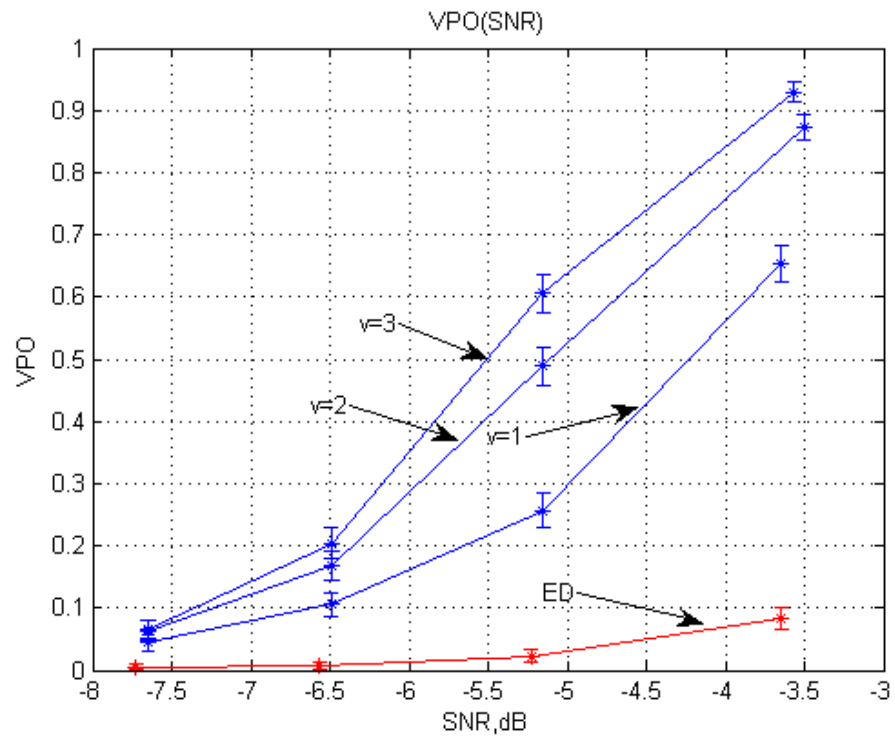
б)

Рис. 3.7. Залежність ймовірності правильного виявлення сигналів від ВСШ для вирішального правила (2.4) и (3.8)-ED при $P_{(1/0)} = 0,04$: а) сигнал №1; б)

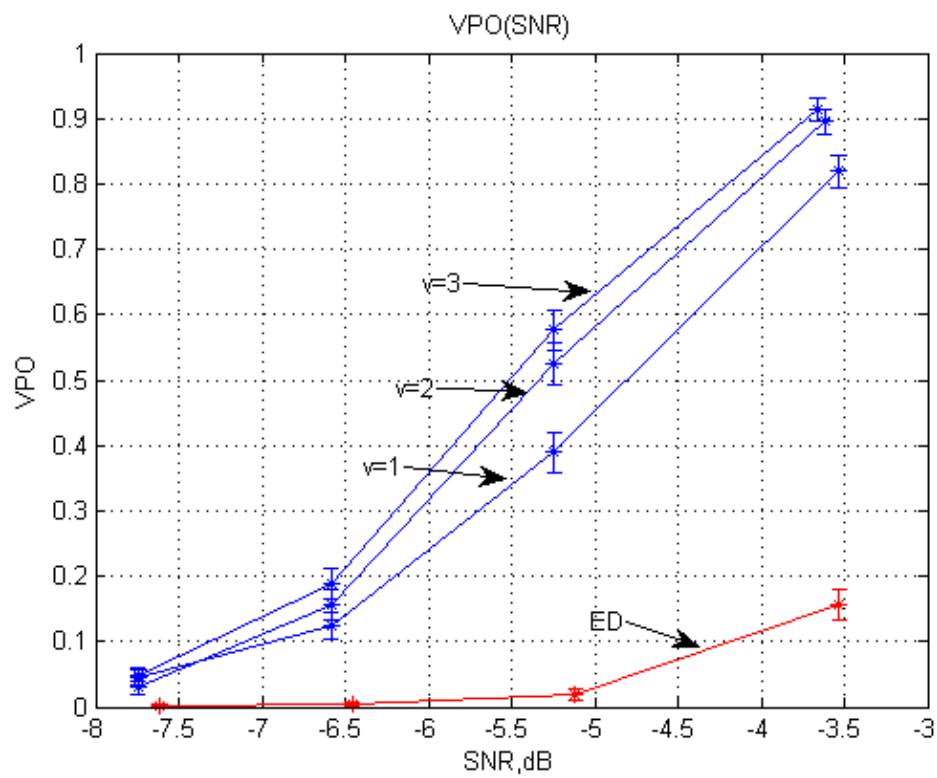
сигнал №2



а)



б)



в)

Рис.3.8. Залежність ймовірності правильного виявлення від ВСШ для вирішального правила (2.4) і (3.8)-ED для сигналу №1 (при $P_{(1/0)} = 0,04$) для розмірностей блоку ДПФ: а) 128, б) 256, в) 512

Видно, що зростання ймовірності правильного виявлення невідомого сигналу може бути забезпечено як при зростанні ВСШ, так і зростанні числа реалізацій V , які пред'являються на обробку.

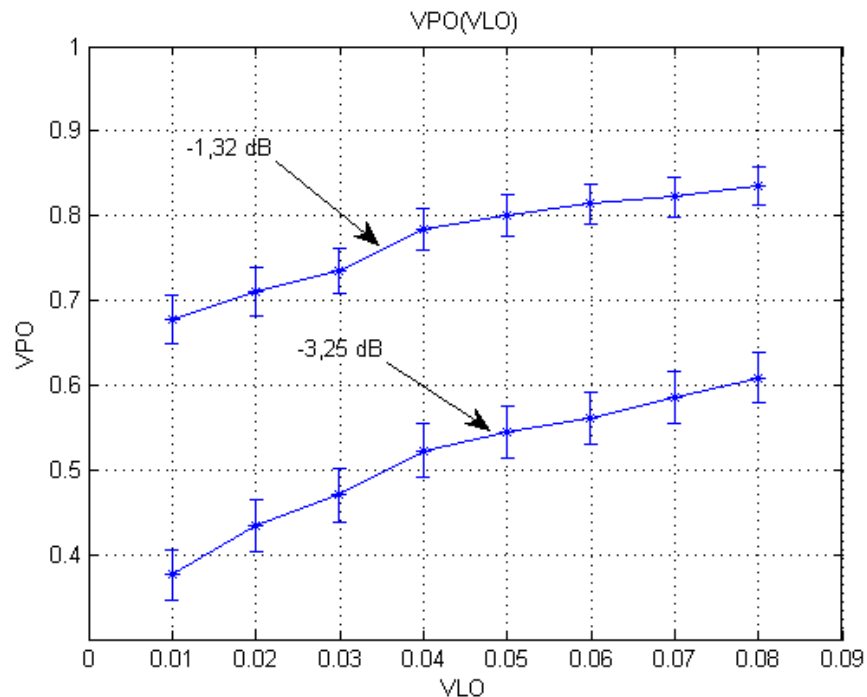
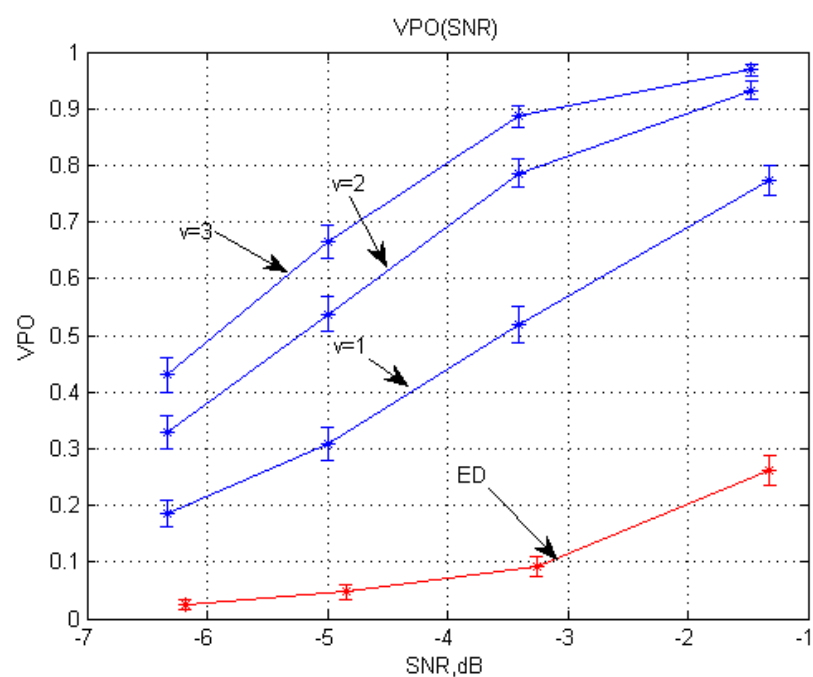
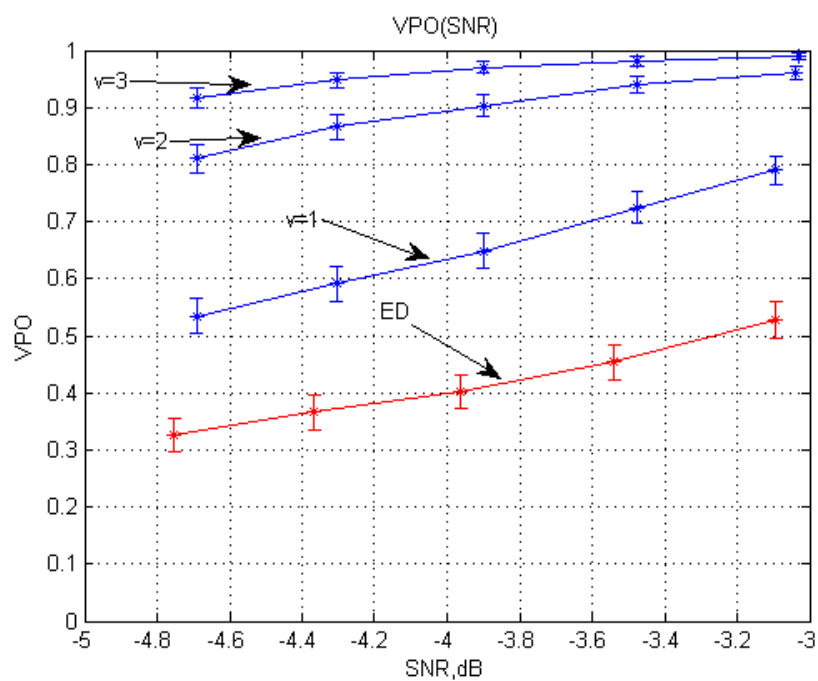


Рис. 3.9. Залежність ймовірності правильного виявлення сигналу від ймовірності помилкової тривоги для різних ВСШ для вирішального правила (2.4) ($v = 1$) і сигналу №1

Аналогічні залежності отримані для вирішального правила виявлення сигналів (2.6) для випадку подання спостережень оцінками координат енергетичного спектру спостережень в базисі ДЕФ при різному обсязі вибірки реалізацій V , за якими знаходилися поточні оцінки енергетичного спектру (рис. 3.10).

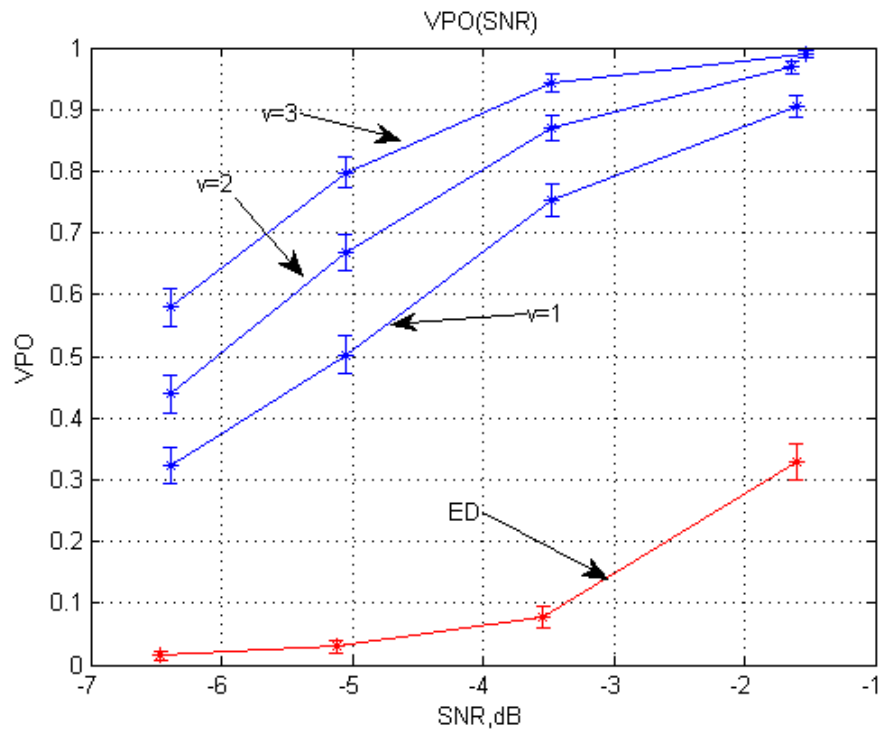


а)

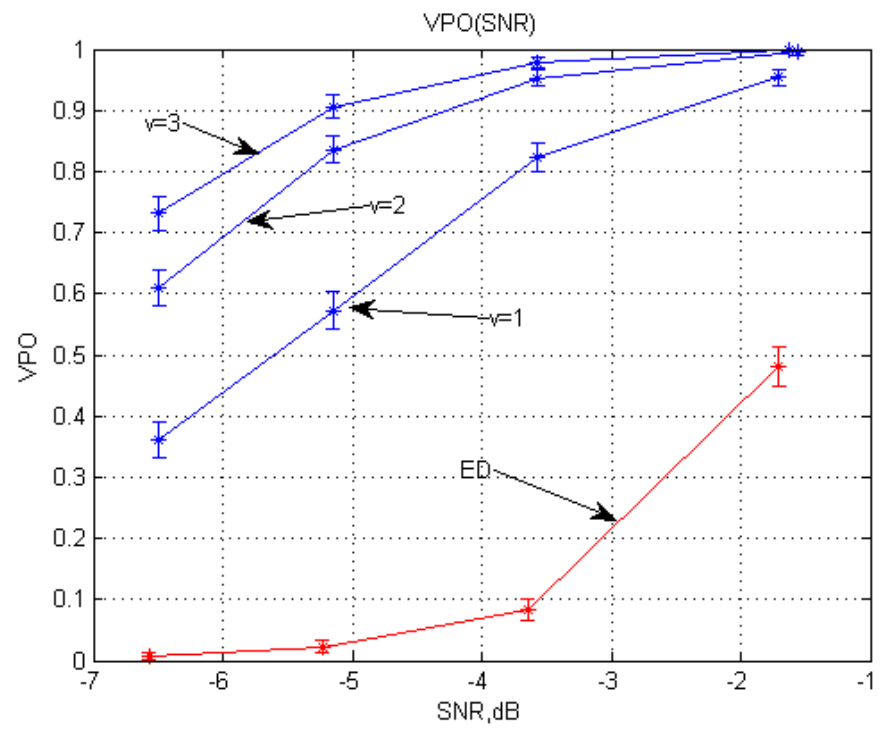


б)

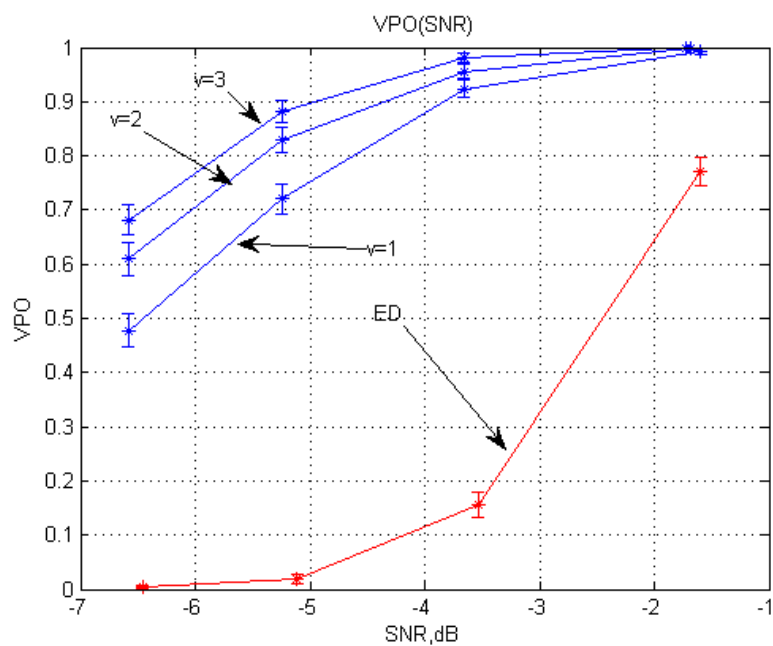
Рис. 3.10. Залежність ймовірності правильного виявлення від ВСШ для вирішального правила (2.6) і (3.8)-ED: а) сигнал №1; б) сигнал №2 (при ДПФ= 64, $P_{(1/0)} = 0,04$)



a)



b)



в)

Рис.3.1. Залежність ймовірності правильного виявлення від ВСШ для вирішального правила (2.6) і (3.8) для сигналу №1 при $P_{(1/0)} = 0,04$ для розмірностей блока ДПФ: а) 128, б) 256, в) 512

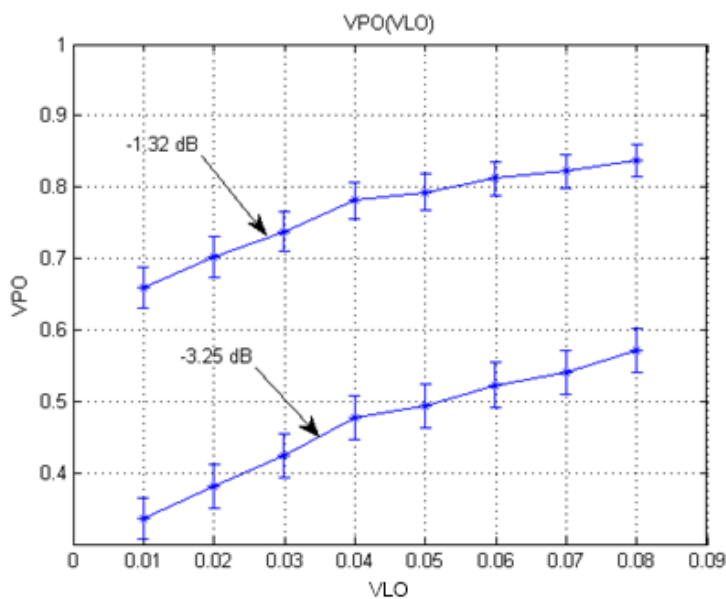


Рис. 3.12. Залежність ймовірності правильного виявлення сигналу №1 від ймовірності помилкової тривоги для різних ВСШ для вирішального правила (2.6) (ДПФ =64, $v = 1$)

На рис. 3.13 и рис. 3.14 наведені характеристики залежності правильного виявлення від ВСШ узгодженого фільтру і циклостационарного детектора [118], які можуть бути використані для приблизного порівняння з отриманими характеристиками запропонованих методів виявлення.

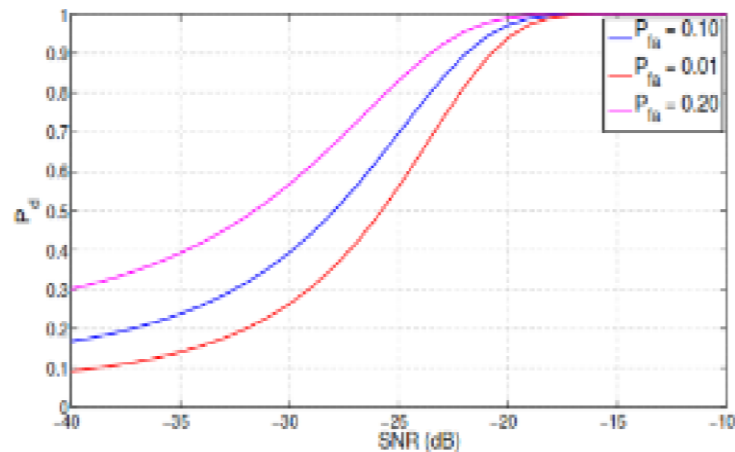


Рис. 3.13. Залежність імовірності правильного виявлення від ВСШ для узгодженого фільтра при різних ймовірностях хибної тривоги для розмірності блока ДПФ = 1024

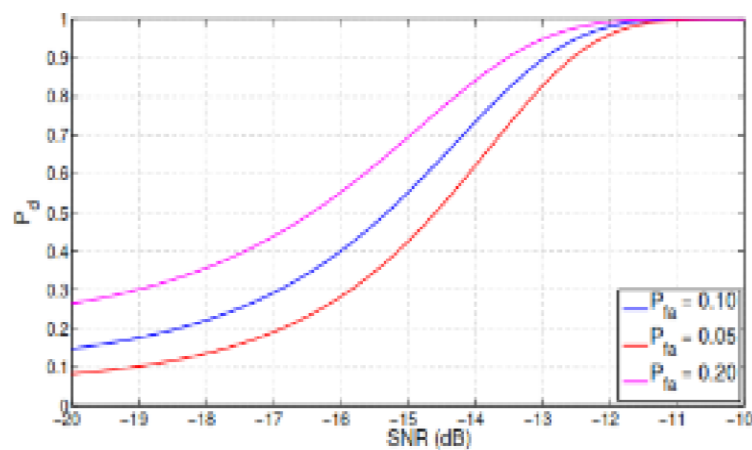


Рис. 3.14. Залежність імовірності правильного виявлення від ВСШ для циклостационарного детектора при різних ймовірностях хибної тривоги для розмірності блока ДПФ = 1024

З наведених вище рисунків можна зробити певний висновок, що узгоджений фільтр та циклостационарний детектор мають кращі показники виявлення відносно досліджуємих методів при менших ВСШ, проте для

узгодженого фільтра потребується достатній об'єм апіорної інформації, а циклостаціонарний детектор потребує деякого часу для розрахунку автокореляційних послідовностей.

3.3. Оцінювання показників якості алгоритмів виявлення невідомих сигналів за сукупністю показників якості

Найважливішою задачею під час роботи КР є уникнення колізій із первинними користувачами.

Важливим параметром під час моніторингу спектру є інтервал часу сканування.

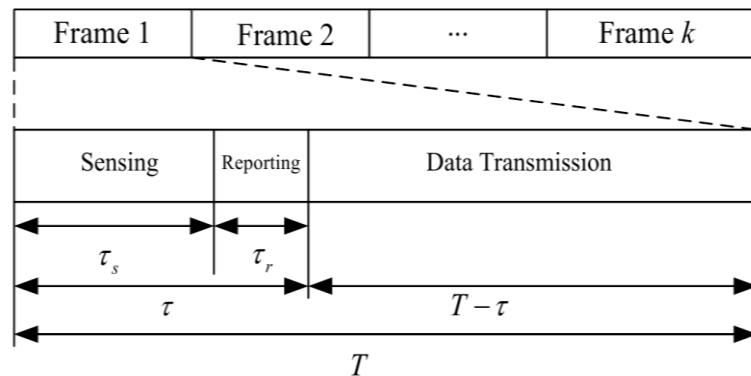


Рис.3.15. Структура часового фрейму у КР

На рис. 3.15 зображена структура фрейму для застосування у когнітивному радіо, яка складається з двох фаз: періодичного сканування спектру і вторинної передачі даних [119]. Фаза сканування тривалістю τ і фаза передачі даних тривалістю $T - \tau$. На рис. 3.15 часовий інтервал сканування позначений як τ_s . Також затримка звітності, позначена як τ_r , яка розглянута для випадків коли результати сканування необхідно передати іншим абонентам КР або базовій станції. Зазвичай час сканування і затримка звітності підсумовуються і позначаються як один загальний інтервал сканування τ . Як правило, чим довше тривалість часу сканування, тим більш точним стає результат алгоритму виявлення сигналів і, отже, тим нижче

можливість утворення інтерференції для первинних користувачів. Зі зрозумілих причин фаза передачі і фаза сканування спектра не можуть бути налаштовані незалежно один від одного. Якщо фаза сканування матиме малу тривалість існує велика ймовірність пропуску вільної ділянки спектру. Якщо ж тривалість цієї фази збільшити, то зменшується корисний час на передачу користувачами КР [2].

Саме тому для вибору оптимального алгоритму виявлення були взяті два якісних показники ймовірність правильного виявлення та швидкодія.

3.4 Вибір оптимальних алгоритмів виявлення невідомих сигналів за сукупністю показників якості методами багатокритеріальної оптимізації

Розглянемо приклад вирішення зазначеної задачі виявлення спектральними методами при багатокритеріальної оптимізації алгоритмів з урахуванням сукупності показників якості виявлення, швидкодії, а також витрат на проектування і реалізацію.

Контрольні вибірки реалізацій сигналу і шуму були використані для знаходження оцінок показників якості для різних типів алгоритмів виявлення невідомих сигналів. Оцінки ймовірностей пропуску сигналів $P_{(0/1)}$ були отримані шляхом статистичних випробувань як відношення числа дослідів n_0 , в яких алгоритмом були прийняті неправильні рішення про відсутність сигналу, за умови пред'явлення реалізації суміші сигналу з шумом, до загального числа дослідів n : $P_{(0/1)} = n_0 / n$. Тут n дорівнює обсягу контрольної вибірки з 1000 реалізацій адитивної суміші сигналу і шуму.

Інформація про структуру досліджених алгоритмів виявлення невідомих наведена в табл. 3.1.

Табл. 3.1. Інформація про структуру виявників

Тип алгоритм виявлення	Базис, в якому представлені спостереження	Вирішальне правило
1	Базис ДЕФ	(2.2)
2		(2.4)
3		(2.5)
4		(2.6)
5		(3.8)

Показник швидкодії роботи алгоритмів виявлення визначається часом, необхідним для прийняття рішення алгоритмом виявлення, а також необхідною тривалістю спостереження, за яким приймається рішення. У разі практичної реалізації алгоритмів виявлення з допомогою високопродуктивних обчислювальних засобів показник швидкодії в основному визначається необхідною тривалістю спостережень, яка залежить від тривалості однієї реалізації спостереження T , а також від обсягу вибірки реалізацій, яка використовується для прийняття рішень $T_H = \nu T$. При цьому тривалість однієї реалізації спостереження T визначається обраною частотою дискретизації спостереження і кількістю дискретних відліків L в одній реалізації спостереження $T = \frac{1}{f_d} L$. За час T формується спектральні відліки спостереження у вигляді амплітудного спектру в базисі ДЕФ, що отримується з використанням дискретного перетворення Фур'є. В алгоритмах виявлення сигналів використовувалася половина неповторюваних спектральних відліків амплітудного спектру $N = L / 2$.

Отримані в результаті досліджень оцінки показника швидкодії для кожного варіанту алгоритму виявлення наведені в нормованому вигляді $k_1 = T_H / T_{H\max}$ у табл. 3.3. Там же наведено значення показника якості

виявлення невідомих сигналів у вигляді оцінки ймовірності пропуску сигналів $k_2 = P_{(0/1)}$ для 33 варіантів алгоритмів виявлення невідомих сигналів. Дослідження проведені для сигналу, зображеного на рис. 3.3 (а).

Табл. 3.2. Результати роботи виявлювачів

Детектор Тип	№	ДПФ	v	t, мкс	$P_{(1/1)}$
1	1	64	1	256,00	0,740
	2	128	1	512,00	0,902
	3	256	1	1024,00	0,977
2	4	64	1	256,00	0,734
	5		2	512,00	0,927
	6		3	768,00	0,965
	7	128	1	512,00	0,894
	8		2	1024,00	0,964
	9		3	1536,00	0,990
	10	256	1	1024,00	0,954
	11		2	2048,00	0,991
	12		3	3072,00	0,998
3	13	64	1	256,00	0,706
	14		2	512,00	0,892
	15		3	768,00	0,954
	16	128	1	512,00	0,879
	17		2	1024,00	0,958
	18		3	1536,00	0,987
	19	256	1	1024,00	0,945
	20		2	2048,00	0,991
	21		3	3072,00	0,998
4	22	64	1	256,00	0,784
	23		2	512,00	0,935
	24		3	768,00	0,970
	25	128	1	512,00	0,907
	26		2	1024,00	0,967
	27		3	1536,00	0,989
	28	256	1	1024,00	0,953
	29		2	2048,00	0,995
	30		3	3072,00	0,999
5	34	64	1	256,00	0,262
	35	128	1	512,00	0,330
	36	256	1	1024,00	0,481

Як бачимо, значення показників якості виявлення невідомих сигналів і показників швидкодії алгоритмів пов'язані між собою і є суперечливими (антагоністичними). Це означає, що при переході від одного варіанта алгоритму виявлення до іншого один показник якості поліпшується, а інший показник якості погіршується. Тому для порівняльного аналізу і вибору кращого варіанту алгоритму виявлення невідомих сигналів слід використовувати основні положення теорії багатокритеріальної оптимізації [120].

Був використаний ординалістичний підхід до порівняння варіантів алгоритмів і безумовний критерій переваги при багатокритеріальному виборі кращого алгоритму виявлення з деякої безлічі допустимих варіантів $x \in X$, представлених у критеріальному просторі Y векторних оцінок показників якості $\vec{k}(x) = (k_1, k_2)$. Рішення задачі багатокритеріальної оптимізації зводиться до виділення підмножини Парето-оптимальних варіантів на множині допустимих варіантів X . Для випадку, коли безліч допустимих варіантів X є дискретним і має кінцеву потужність, включення варіантів $x^{(0)}$ у підмножину Парето $x^{(0)} \in P(X)$ має місце тоді і тільки тоді, коли не існує інших домінуючих варіантів $x \in X$, для яких виконується векторне нерівність $\vec{k}(x) \geq \vec{k}(x^{(0)})$ у критеріальному просторі Y .

Згідно з наведеним визначенням формалізована процедура знаходження підмножини Парето-оптимальних оцінок в критеріальному просторі Y , які відповідають недомінуємих варіантів алгоритмів виявлення сигналів, визначається наступним співвідношенням [9,10]

$$P(Y) = \left\{ \vec{k}(x^{(0)}) \in Y : \nexists \vec{k}(x) \in Y : \vec{k}(x) \geq \vec{k}(x^{(0)}) \right\}.$$

Парето згідно з цією процедурою, виключаються безумовно гірші оцінки, а отже, і відповідні їм безумовно гірші варіанти алгоритмів з множини допустимих варіантів X .

Знайдені Парето-оптимальні варіанти алгоритмів виявлення сигналів $x^{(o)} \in P_f(X)$ є незрівнянними між собою за сукупністю показників швидкодії і якості виявлення. Тому в принципі будь-який варіант алгоритму виявлення $x^{(o)}$ з підмножини Парето може бути використаний для вирішення завдання виявлення невідомих сигналів, оптимального з урахуванням сукупності показників якості. Для звуження підмножини Парето до єдиного кращого варіанту алгоритму виявлення можна використовувати певний умовний критерій переваги, заснований на використанні деякої додаткової інформації про переваги між собою Парето-оптимальних варіантів алгоритмів виявлення з урахуванням сукупності показників якості. З цією метою можуть застосовуватися різні методи, які базуються на основних положеннях теорії корисності, теорії нечітких множин, теорії лексографічних відносин [120], [121].

З використанням наведеної методології багатокритеріального вибору з 33 допустимих варіантів було виділено підмножина Парето, що включає сім варіантів алгоритмів виявлення (табл. 2 вони відзначені знаком "+"). Всі інші варіанти алгоритмів виявлення є безумовно гіршими.

Табл. 3.3. Результати вибору підмножини Парето-оптимальних алгоритмів виявлення невідомих сигналів

Тип	№	Розмірність ДПФ L	ν	k_1	k_2	P
1	1	64	1	0,083	0,260	-
	2	128	1	0,167	0,098	-
	3	256	1	0,333	0,023	+
2	4	64	1	0,083	0,266	-
	5		2	0,167	0,073	-
	6		3	0,250	0,035	-
	7	128	1	0,167	0,106	-
	8		2	0,333	0,036	-
	9		3	0,500	0,010	+
	10	256	1	0,333	0,046	-
	11		2	0,667	0,009	-
	12		3	1,000	0,002	-
3	13	64	1	0,083	0,294	-
	14		2	0,167	0,108	-
	15		3	0,250	0,046	-
	16	128	1	0,167	0,121	-
	17		2	0,333	0,042	-
	18		3	0,500	0,013	-
	19	256	1	0,333	0,055	-
	20		2	0,667	0,009	-
	21		3	1,000	0,002	-
4	22	64	1	0,083	0,216	+
	23		2	0,167	0,065	+
	24		3	0,250	0,030	+
	25	128	1	0,167	0,093	-
	26		2	0,333	0,033	-
	27		3	0,500	0,011	-
4	28	256	1	0,333	0,047	-
	29		2	0,667	0,005	+
	30		3	1,000	0,001	+
5	31	64	1	0,083	0,738	-
	32	128	1	0,167	0,670	-
	33	256	1	0,333	0,519	-

При виборі єдиного кращого варіанту алгоритму виявлення серед Парето-оптимальних варіантів використаний результуючий показник якості у вигляді

$$k_p = d_1 k_1 + d_2 k_2 \quad (3.9)$$

де k_1, k_2 – показники швидкодії і якості виявлення сигналів; d_j – вагові коефіцієнти, що визначають відносну важливість окремих показників якості.

Для випадку $d_1 = d_2 = 0,5$ з підмножини Парето-оптимальних варіантів алгоритмів обраний єдиний кращий варіант алгоритму виявлення № 23, відповідний $\min k_p$. Це алгоритм виявлення невідомих сигналів за оцінками енергетичного спектру спостережень в базисі ДЕФ, який визначається вирішальним правилом (2.6), при розмірності спостережень $L = 64$, обсязі вибірки реалізацій, за якими знаходяться поточні оцінки енергетичного спектру спостережень $v = 2$. При цьому забезпечується виявлення невідомих сигналів на тлі заданого шуму з ймовірністю правильного виявлення $P_{(1/1)} = 0,935$ при ймовірності хибної тривоги $P_{(1/0)} = 0,04$. Для прийняття рішення потрібна загальна тривалість спостережень, рівна $T_H = 512$ мкс.

Висновки по розділу 3

1. Отримані результати досліджень підтверджують працездатність розглянутих алгоритмів виявлення невідомих сигналів. За допомогою вибірок реальних сигналів і шуму і проведених експериментів отримані робочі характеристики запропонованих алгоритмів виявлення. Для цих цілей були використані два сигнали зі смугами спектру 3 кГц та 150 кГц відповідно. Ефективність виявлення приблизно однакова для обох сигналів. Для порівняння також отримані робочі характеристики для енергетичного детектора за тих же самих умов. Додатково отримані залежності імовірності

правильного виявлення $P_{(1/1)}$ від відношення «сигнал-шум» для різних значень розмірності блоку ДПФ. Також побудовані графіки залежностей імовірності правильного виявлення $P_{(1/1)}$ від імовірності хибної тривоги $P_{(1/0)}$, при фіксованих значеннях відношення сигнал шум.

2. Для розглянутих сигналів отримана ефективність виявлення невідомих сигналів запропонованими алгоритмами в 2-7 разів більше відносно класичного енергетичного детектора при відношенні «сигнал-шум» - 3 дБ.

3. Видно, що зростання ймовірності правильного виявлення невідомого сигналу може бути забезпечено як при зростанні розмірності блоку ДПФ, так і зростання числа реалізацій, що пред'являються на обробку. Оптимальним з точки зору ефективності виявлення та часових затрат є значення $\nu = 2 - 3$.

4. Порівнюючи отримані результати виявлення сигналів для вирішальних правил (2.4) і (2.6), можна зробити висновок, що вирішальне правило (2.6) володіє більш високою ймовірністю правильного виявлення при більш низьких значеннях ВСШ.

5. Дослідження робочих характеристик алгоритмів, які реалізовані на основі методів виявлення зміни статистичних властивостей сигналів, дозволяє зробити висновок, що їх застосування є ефективним при ВСШ в діапазоні від -7 дБ для сигналів що досліджувалися. При менших значеннях ВСШ (від -23дБ до -13дБ) та володінні апіорною інформацією щодо сигналів, які необхідно виявити, може бути рекомендований узгоджений фільтр, а при можливості більших часових затрат можна рекомендувати циклостаціонарний детектор.

6. Використовуючи багатокритеріальний підхід до обрання оптимального алгоритму виявлення за сукупністю показників якості була використана теорія корисності. Обраними показниками були швидкодія та імовірність правильного виявлення сигналів.

7. В результаті багатокритеріального вибору для випадку $d_1 = d_2 = 0,5$ був обраний єдиний переважний варіант алгоритму виявлення під № 23 в табл.3.2. Це алгоритм виявлення невідомих сигналів за оцінками енергетичного спектру спостережень в базисі ДЕФ, який визначається вирішальним правилом (2.6), при розмірності спостережень $L = 64$, обсязі вибірки реалізацій, за якими знаходяться поточні оцінки енергетичного спектру спостережень $v = 2$.

8. Отримані значення показників якості виявлення невідомих сигналів, які прийнятні для вирішення практичних завдань радіомоніторингу в когнітивних радіомережах.

РОЗДІЛ 4

РОЗПІЗНАВАННЯ СИГНАЛІВ В КОГНІТИВНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ ПРИ НАЯВНОСТІ КЛАСУ НЕВІДОМИХ СИГНАЛІВ

4.1. Постановка задачі розпізнавання сигналів в задачах радіомоніторингу

В даному розділі розглядається задача розпізнавання сигналів при проведенні радіомоніторингу в когнітивних радіомережах. Рішення даної задачі може бути необхідним при визначенні приналежності виявленої сигналу до класу вторинних або первинних користувачів або визначенням появи нових, раніше невідомих випромінювань. При цьому слід врахувати той факт, що в ефірі можуть бути сигнали, яких немає в базі даних управління когнітивної радіомережею, і такі сигнали можуть потрапляти на розпізнавання, що може призводити до помилки і віднесення даного сигналу до класу відомих.

З метою контролю за використанням радіочастотного ресурсу проводиться автоматизований радіомоніторинг (РМ). Радіомоніторинг представляє складну задачу просторово-спектрально-часової обробки радіовипромінювань (РВ), що існують в широкому діапазоні частот [9]. Для спрощення рішення здійснюється її декомпозиція на ряд відносно самостійних завдань обробки, зокрема, виявлення РВ, існуючих в окремих частотних каналах, селекція і розпізнавання заданих видів РВ, виявлення невідомих РВ, розпізнавання видів і оцінювання параметрів модуляції невідомих РВ. Ці задачі зводяться до обробки відповідних їм сигналів на виході скануючих радіоприймальних комплексів. При цьому, в результаті аналізу спостережень у кожному частотному каналі, приймається рішення про дію або суміші сигналу з шумом, або тільки шуму, що фактично являє собою завдання виявлення сигналу на фоні шуму.

4.2 Методи розпізнавання сигналів при наявності класу невідомих сигналів

Таким чином, існує необхідність не лише визначення незайнятих частотних каналів, але і розпізнавання сигналів, з точки зору того, до якого класу користувачів відноситься, виявлений сигнал: класу первинних або вторинних користувачів, або до іншого заданого класу сигналів. Селекція сигналів може дозволити організовувати пріорітезацію на отримання доступу до середовища передачі, таким чином буде забезпечений

Так само можливий такий варіант, коли виявляється сигнал не належить ні до одного з класів відомих сигналів, тобто бути апріорно невідомих. Слід зазначити, що дана процедура може бути поєднана з радіоконтролем частот в цілому, який виконується на даний момент місцевими органами частотного регулювання [7]. При цьому слід врахувати той факт, що в ефірі можуть бути сигнали, яких немає в базі даних управління когнітивною радіомережею, і такі сигнали можуть потрапляти на розпізнавання.

При цьому відомі підходи не враховують того факту, що на розпізнавання можуть потрапити сигнали, дані про яких відсутні, що в свою чергу може призвести до помилок розпізнавання, коли невідомий сигнал може бути віднесений до відомих.

Таким чином, дослідження методів розпізнавання сигналів в когнітивних радіомережах в умовах підвищеної апріорної невизначеності є актуальною задачею.

4.3 Дослідження методів розпізнавання заданих сигналів із використанням реальних сигналів

Зазвичай вважається, що число перевірочних гіпотез M дорівнює числу

розпізнаваних сигналів. Але через дії перешкод і багатьох інших неконтрольованих факторів, що спостерігаються в частотних каналах, сигнали носять випадковий характер з апріорі невідомими статистичними характеристиками. Апріорна невизначеність зазвичай долається з використанням навчальних вибірок заданих сигналів. Однак при РМ на обробку надходять багато невідомих сигналів. Внаслідок цього спостережуваний сигнал може не належати до числа заданих класів і повинен бути віднесений до $(M+1)$ -му, не заданому в статистичному сенсі класу сигналів. Причому його навчальні вибірки з ряду причин не можуть бути отримані. Це ускладнює рішення задач виявлення та розпізнавання сигналів при РМ в КР і визначає актуальність використання спеціальних методів виявлення та розпізнавання сигналів в умовах апріорної невизначеності, які відрізняються від відомих методів [122].

У математичній статистиці близькі умови прийняття рішень розглядалися для завдань перевірки простої гіпотези проти складної альтернативи [113]. Відомі також подібні завдання класифікації аномальних спостережень [34], виявлення сигналів з використанням t -статистики Стюдента [123], а також виявлення сигналів із застосуванням небайесовського критерію оптимальності, що забезпечує задану вірогідність правильного виявлення при мінімізації власної області сигналів [11], [32]. Для задач розпізнавання сигналів пропонуються підходи, що дозволяють у деяких випадках будувати вирішальні правила розпізнавання без використання навчальних вибірок $(M+1)$ -го сигналу [15], [16], або алгоритми, нечутливі до статистичних характеристик сигналів і завад і не потребують для їх побудови знання навчальних вибірок сигналів [124].

Розглянемо процедуру розпізнавання. Вважається, що спостереження в частотному каналі представляються L -вимірним вектором дискретних відліків $\vec{X}$. Задаються $(M+1)$ -а гіпотези, котрі можуть бути зроблені у відношенні спостерігаємих сигналів: $H^i, i = \overline{1, M}$ – для заданих сигналів, H^0 –

для невідомих сигналів, об'єднаних в $(M+1)$ -й клас. Припустимо, що задані навчальні вибірки M сигналів $\{i = \overline{1, M}\}$, а навчальна вибірка для $(M+1)$ -го сигналу ($i=0$) відсутня або є недостатньою. Такі вихідні дані для розпізнавання сигналів можуть бути визначені терміном «підвищена апріорна невизначеність» [32], [15].

Щільності ймовірності заданих сигналів $W(\vec{x} | \vec{\alpha}^i), i = \overline{1, M}$ задані з точністю до випадкових векторних параметрів $\vec{\alpha}^i, i = \overline{1, M}$, а для $(M+1)$ -го класу щільність ймовірності невідома. Задано також апріорні ймовірності гіпотез $P(H^i) = P_i$, при цьому $\sum_{i=0}^M P_i = 1$. Припускається також, що задані навчальні вибірки реалізацій M сигналів $\{\vec{x}_r^i, r = \overline{1, n_i}; i = \overline{1, M}\}$, а навчальна вибірка для $(M+1)$ -го класу сигналів ($i=0$) відсутня.

У рамках сформульованої неklasичної задачі розпізнавання показник якості розпізнавання сигналів характеризується середнім ризиком, який визначається співвідношенням (4.1):

$$R = \sum_{l=0}^M \sum_{\substack{i=0 \\ l \neq i}}^M c_{li} P_i P(G^l / i) = \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^M c_{li} P_i P(G^i / i) + \sum_{i=1}^M c_{0i} P_i P(G^0 / i) + P_0 \sum_{l=0}^M c_{l0} P(G^l / 0), \quad (4.1)$$

де c_{li} - функція втрат; $P(G^l / i)$ - ймовірність помилки в разі прийняття рішення на користь l -го сигналу при дії i -го сигналу.

Нерандомізоване вирішальне правило розпізнавання здійснює розбиття вибіркового простору сигналів на $(M+1)$ -ну область, яка не перетинається. З урахуванням цього у виразі (4.1) перший доданок – це складова середнього ризику за рахунок переплутування M заданих сигналів між собою, другий доданок – за рахунок віднесення заданих сигналів до $(M+1)$ -го класу невідомих сигналів, третій доданок – за рахунок віднесення сигналів з $(M+1)$ -го класу до M заданих сигналів.

Для сформульованої неklasичної задачі селекції і розпізнавання заданих сигналів при наявності невідомих сигналів може бути використано наступне вирішальне правило [8]:

якщо виконуються нерівність:

$$H^0 : \max_{l=1, M} \{P_l W(\bar{x} / \bar{\alpha}^l)\} < \lambda, \quad (4.2a)$$

то приймається гіпотеза H^0 про дію невідомих сигналів;
при виконанні умов:

$$H^i : \max_{l=1, M} \{P_l W(\bar{x} / \bar{\alpha}^l)\} \geq \lambda, \quad (4.2б)$$

$$P_i W(\bar{x} / \bar{\alpha}^i) \geq P_l W(\bar{x} / \bar{\alpha}^l), \quad l = \overline{1, M}, \quad l \neq i, \quad (4.2в)$$

приймається гіпотеза H^i про дію i -го заданого сигналу.

Тут порогове значення λ визначається з умови забезпечення заданої ймовірності правильного розпізнавання заданих сигналів.

У вирішальному правилі (4.2) не використовується інформація про щільність розподілу $(M+1)$ -го класу сигналів і не потрібна його навчальна вибірка. Постановка і рішення розглянутої задачі розпізнавання – це формалізація вимоги змістовного характеру про необхідність розпізнати M заданих сигналів і віднести в $(M+1)$ -й клас невідомі сигнали, інформація про які відсутня.

Згідно з цим правилом рішення на користь i -го заданого сигналу приймається в два етапи: при виконанні хоча б однієї з нерівностей (4.2a), а також при виконанні системи нерівностей (4.2б). Коли виконуються нерівності (4.2в), рішення приймається на користь невідомих сигналів з $(M+1)$ -го класу.

Для вирішення задачі селекції і розпізнавання може бути використано наступне вирішальне правило:

$$\begin{aligned}
H^1: \sum_{j=1}^N \frac{(c_j - \mu_{jc}^i)^2}{(\sigma_{jc}^i)^2} &\leq \Delta_c^i; \quad i = \overline{1, M} \\
\sum_{j=1}^N \frac{(c_j - \mu_{jc}^1)^2}{(\sigma_{jc}^1)^2} &\leq \sum_{j=1}^N \frac{(c_j - \mu_{jc}^k)^2}{(\sigma_{jc}^k)^2}, \quad k = \overline{1, M} \\
H^0: \sum_{j=1}^N \frac{(c_j - \mu_{jc}^i)^2}{(\sigma_{jc}^i)^2} &> \Delta_c^i, \quad i = \overline{1, M}
\end{aligned} \tag{4.3}$$

де c_j – коефіцієнти розкладань вектора спостережень в базисі ДЕФ, $\mu_j^0, (\sigma_j^0)^2$ – оцінки математичних очікувань і дисперсій коефіцієнтів розкладань c_j , які оцінюються за навчальними вибірками; N – розмірність спектрального представлення спостережень; Δ_c^0 – деякі порогові значення, обрані з умови забезпечення заданої ймовірності правильного розпізнавання заданих сигналів.

При невідомих параметрах вирішального правила (4.3) необхідно отримати їх оцінки на основі навчальних вибірок заданих сигналів.

Зауважимо, що у вирішальних правилі (4.3) не використовується інформація про параметри невідомих сигналів і отже не потрібні їх навчальні вибірки.

Для вирішення задачі розпізнавання були отримані реалізації 9 реальних сигналів, які функціонували в діапазоні частот, регламентованому для роботи стандарту IEEE 802.22. Записи сигналів отримані за допомогою лабораторної установки, яка описана у розділі 2. Записи сигналів проводилися з частотою дискретизації 250 кГц, і відповідно в смузі частот 125 кГц. На рис.4.1 і рис.4.2 зображені амплітудні спектри цих сигналів, побудовані з усередненням по 100 реалізацій і розмірності блоку ДПФ=512 відліків.

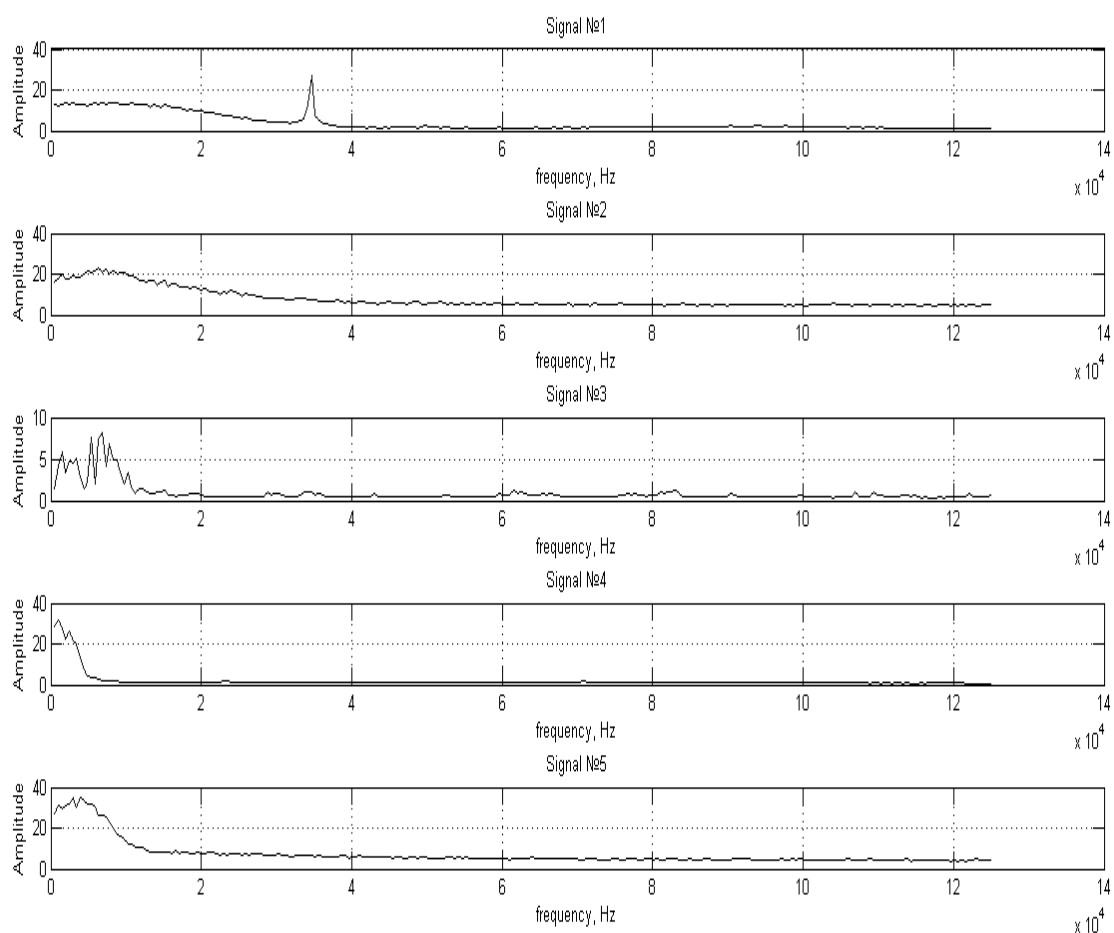


Рис. 4.1. Усереднені амплітудні спектри відомих сигналів

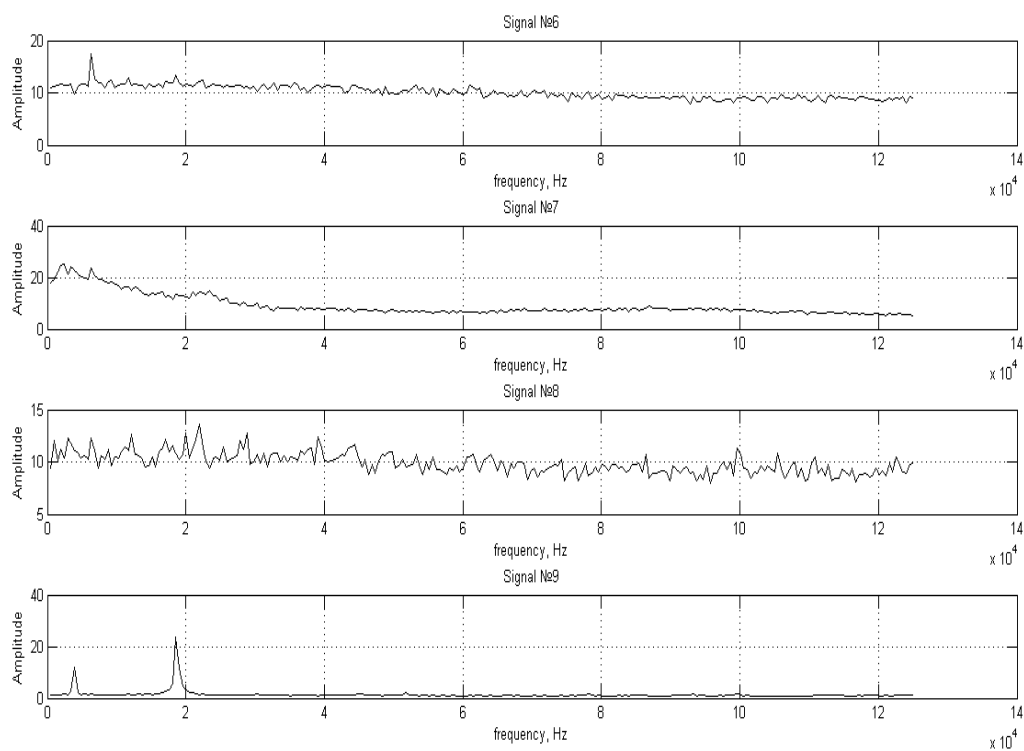


Рис. 4.2. Усереднені амплітудні спектри невідомих сигналів

На рис.4.1 зображені сигнали, які були використані як відомі, для цього їх вибірки надходили на вхід системи розпізнавання на етапі навчання. На рис. 4.2 зображені сигнали, які були використані в якості невідомих, тобто їх реалізації не використовувалися на етапі навчання.

Обчислена оцінка кореляційної функції спектрального представлення сигналів (рис.4.3 - рис.4.6), дає підставу використовувати вирішальні правила (4).

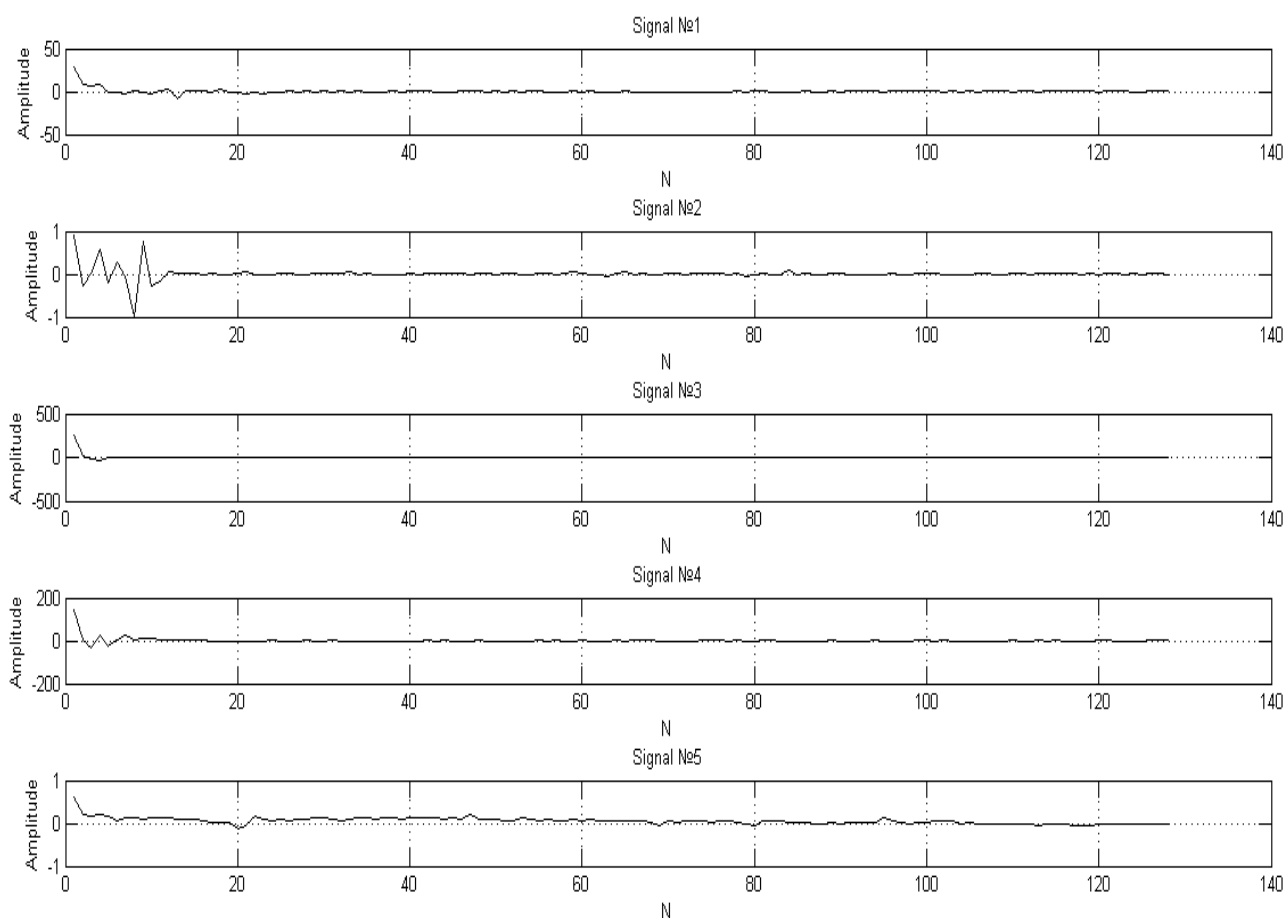


Рис. 4.3. Вид кореляційних функцій відомих сигналів (ДПФ=256)

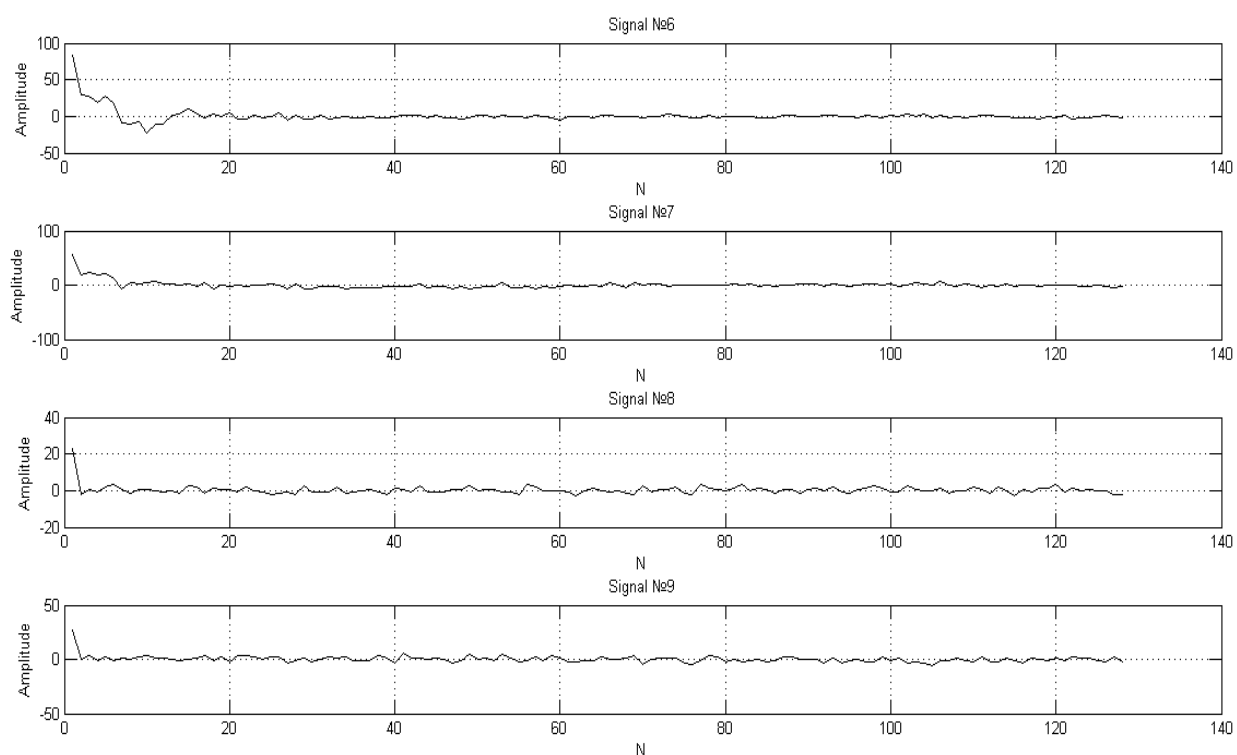


Рис. 4.4. Вид кореляційних функцій невідомих сигналів (ДПФ=256)

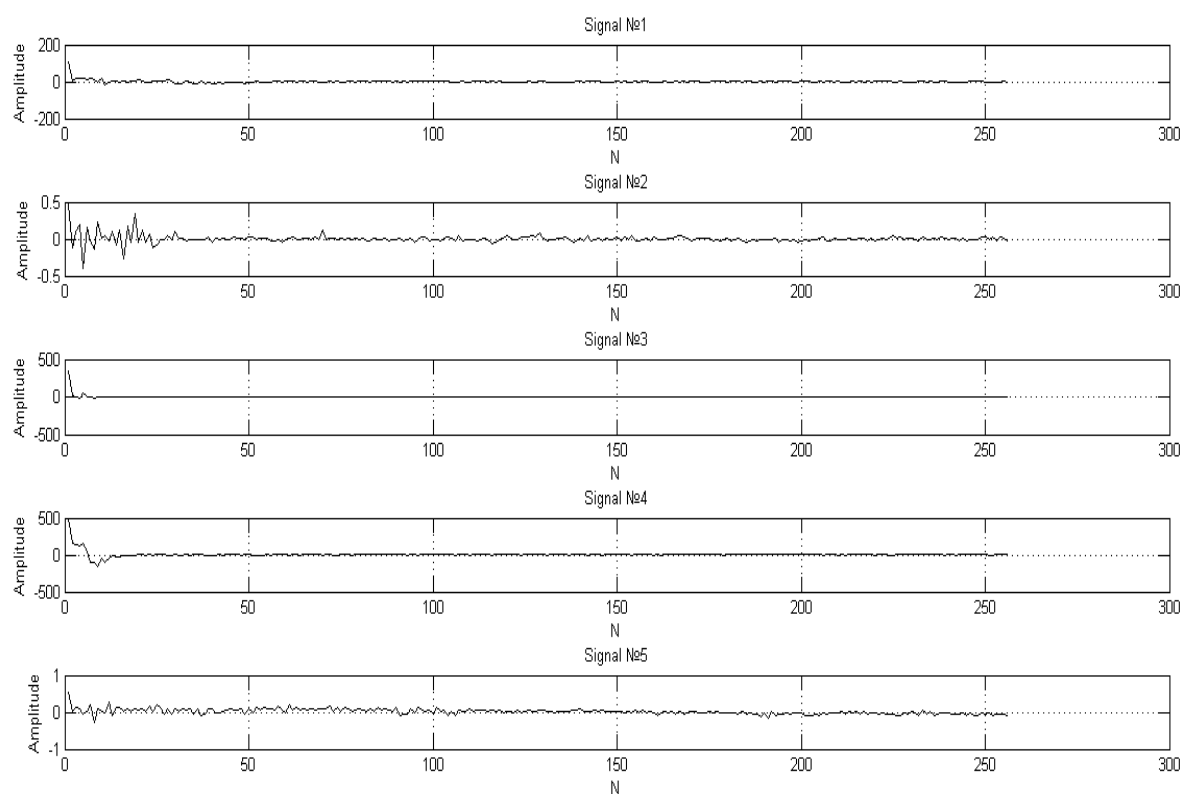


Рис. 4.5. Вид кореляційних функцій відомих сигналів (ДПФ=512)

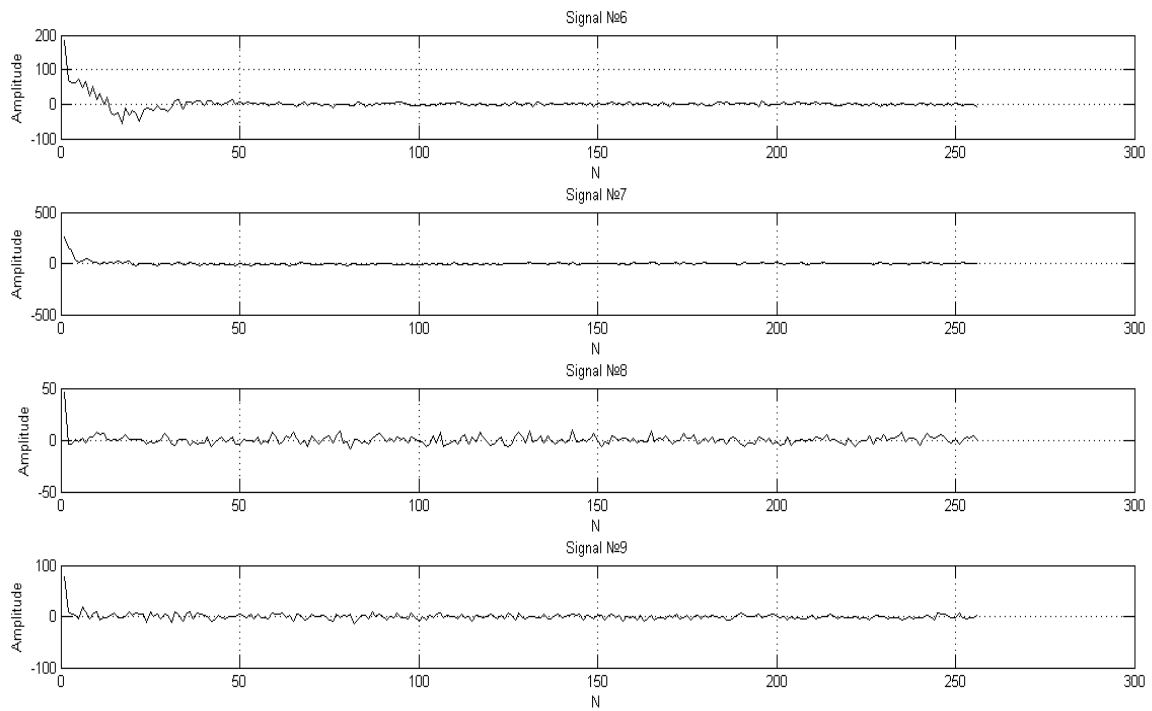


Рис. 4.6. Вид кореляційних функцій невідомих сигналів (ДПФ=512)

Навчальні вибірки реалізацій сигналів використовувалися для оцінювання невідомих параметрів вирішального правила на етапі навчання. Контрольні вибірки реалізацій сигналів і шуму використовувалися для отримання оцінок ймовірностей правильного розпізнавання сигналів. Граничні значення Δ_c^0 вибиралися з умови забезпечення заданих ймовірностей правильного розпізнавання заданих сигналів. У робочому режимі пред'являлися реалізації спостережень сигналів шляхом статистичних випробувань з використанням контрольних вибірок реалізацій заданих і невідомих сигналів були отримані оцінки ймовірності правильного і помилкового розпізнавання заданих і невідомих сигналів у вигляді відношення числа правильно чи помилково віднесених реалізацій до загального числа пред'явлених реалізацій відповідних сигналів.

В якості заданих сигналів використовувалися сигнали № 1-5, інші чотири сигнали представляли $(M+1)$ -й клас невідомих сигналів. Оцінювалися такі показники якості розпізнавання:

– імовірність помилкових рішень про дію невідомих сигналів з $(M+1)$ -го класу за умови пред'явлення заданих сигналів;

– імовірність помилкових рішень про дію заданих сигналів за умови пред'явлення невідомих сигналів з $(M+1)$ -го класу.

Процедура виявлення відбувається в кілька етапів:

- спочатку подаються вибірки сигналів, які потрібно розпізнавати, на навчання;

- далі відбувається процедура визначення параметрів $\mu_j^0, (\sigma_j^0)^2$;

- розрахунок порогів, виходячи із заданої ймовірності пропуску сигналу;

- розрахунок ймовірності $P(i/)$, де $i \in (1, m)$ приналежності відліку до відомого сигналу (еталону) відбувається за таких умов: він має не перевищувати поріг даного еталону; якщо відлік менше порогів декількох еталонів, то даний відлік відносять до того еталону, до якого менша евклідова відстань.

- розрахунок ймовірності приналежності до класу невідомих сигналів $P(0/)$ проводиться наступним чином: аналізована реалізація сигналу належить до класу невідомих, якщо значення її вирішальної статистики перевищує всі пороги за всіма відомими сигналами;

Результати роботи вирішального правила селекції і розпізнавання (4.3) зведені у табл. 4.1.

Табл. 4.1. Результати селекції та розпізнавання сигналів

Ймовірність розпізнавання сигналу за заданим сигналом/ класом сигналів	№ сигналу								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Розмірність блоку ДПФ, n	512								
P(1/)	0.83	0	0	0	0	0	0	0	0
P(2/)	0	0.69	0	0	0.27	0	0	0	0
P(3/)	0	0	0.87	0	0	0	0	0	0
P(4/)	0	0	0	1	0	0	0	0	0
P(5/)	0	0	0	0	0.86	0	0	0	0
P(0/)	0.17	0.1	0.13	0	0.04	1	0.98	1	1
Розмірність блоку ДПФ, n	256								
P(1/)	0.81	0	0	0	0	0	0	0	0
P(2/)	0	0.87	0	0	0.05	0	0	0	0
P(3/)	0	0	0.91	0	0	0	0	0	0
P(4/)	0	0	0.01	0.99	0	0	0	0	0
P(5/)	0	0	0	0	0.87	0	0	0	0
P(0/)	0.19	0.08	0	0	0.13	1	1	1	1
Розмірність блоку ДПФ, n	128								
P(1/)	0.94	0	0	0	0	0	0	0	0
P(2/)	0.05	0.87	0	0	0.08	0	0	0	0
P(3/)	0	0	0.93	0	0	0	0	0	0
P(4/)	0	0	0.09	0.91	0	0	0	0	0
P(5/)	0	0	0	0	0.89	0	0	0	0
P(0/)	0	0.03	0	0	0.03	1	0.81	1	0.82
Розмірність блоку ДПФ, n	64								
P(1/)	0.95	0	0	0	0	0	0	0	0
P(2/)	0.11	0.52	0	0	0.36	0	0	0	0
P(3/)	0	0	0.94	0	0	0	0	0	0
P(4/)	0	0	0.18	0.82	0	0	0	0	0
P(5/)	0	0	0	0.	0.82	0	0	0	0
P(0/)	0.01	0.22	0	0.02	0.1	0.98	0.56	1	0.24

На основі результатів табл. 4.1 отримані узагальнені значення складових ймовірностей помилкових рішень при вирішенні задачі розпізнавання заданих сигналів при наявності невідомих сигналів згідно зі співвідношенням (4.1). Зокрема, наведемо усереднені ймовірності помилкових рішень при розмірності блоку ДПФ=256:

- про дію невідомих сигналів з (M+1)-го класу за умови пред'явлення

$$\text{заданих сигналів} - P((M+1)/i) = \sum_{i=1}^M \frac{P(0/i)}{M} = 0.08;$$

- про дії заданих сигналів за умови пред'явлення невідомих сигналів в

$$\text{кількості } T \text{ з } (M+1)\text{-го класу невідомих сигналів } P(i/(M+1)) = \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^T \frac{P(i/l)}{T * M} = 0;$$

- про переплутування заданих сигналів між собою –

$$P(i/(M+1)) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \frac{P(i/j)}{M^2} = 0.012.$$

В результаті досліджень було встановлено, що на якість розпізнавання найбільший вплив мають кореляційні зв'язки між реалізаціями і нестационарність сигналів, які в свою чергу залежать від того, які ділянки сигналу потрапляють на навчання і розпізнавання. При цьому вирішальна ступінь впливу того чи іншого фактора може змінюватися в залежності від поведінки самого сигналу. Наприклад, на рис.5.5 видно, що ділянка а та ділянка б, належать одному і тому ж джерелу відрізняються за статистичними характеристиками, і якщо навчання системи відбувалося на ділянці а, а на розпізнавання потрапляє ділянка б, то це може значно погіршити результати розпізнавання. Іншими словами, описані явища залежать від часу спостереження, яке в свою чергу залежить від розмірності блоку ДПФ, кількості реалізацій, а також частоти дискретизації.

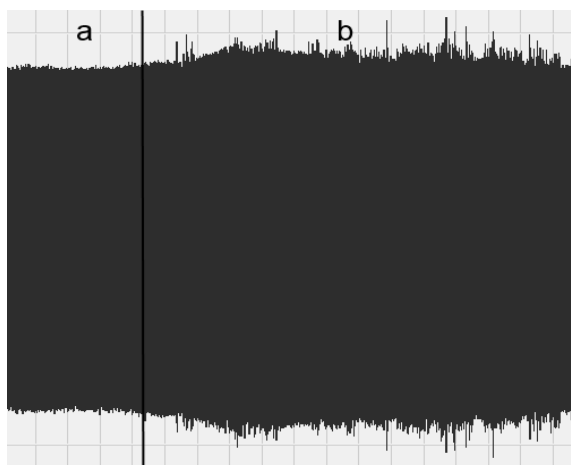


Рис. 4.7. Вид сигналу в часовій області з нестационарними характеристиками

З одного боку, збільшення розмірності блоку ДПФ є необхідним з точки зору отримання необхідної кількості інформаційних ознак, з якими працює вирішальне правило (гармоніки сигналу). Що може спостерігатися за загальною тенденцією ймовірностей правильного розпізнавання і віднесення сигналів до класу невідомих. Наприклад, при розмірності блоку 64 відліку спостерігається переплутування сигналів між собою і низька ймовірність правильного віднесення невідомих сигналів №7 і №9 до класу невідомих. Таким чином, збільшення розмірності n є необхідним, з точки зору роздільної здатності, однак із зростанням розмірності блоку ДПФ так само може статися і зміна кореляційних зв'язків між реалізаціями сигналу (рис.4.3 і рис.4.4), що може негативно позначитися на ймовірності розпізнавання, за рахунок розширення кореляційної функції, що видно на прикладі сигналів №2 при переході від розмірності блоку ДПФ з 256 до 512. До того ж, подальше збільшення блоку ДПФ не призводить до отримання додаткової кількості інформації про структуру сигналу. З цієї точки зору, при тому ж незмінному загальній кількості відліків, більш раціонально збільшити кількість реалізацій, що надходять на навчання. Таким чином, є якийсь оптимум щодо співвідношення кількості реалізацій до розмірності блоку ДПФ, при якому результати виявлення будуть найкращими. Більш того, вибір вищезазначених

розмірностей може істотно впливати на кореляційні зв'язки між відліками сигналу і на його стаціонарність в цілому, що повинно враховуватися.

Як видно з рис.4.3 і рис.4.5 вплив кореляційних зв'язків на результати розпізнавання має місце бути, що дає припущення використання вирішальне правило (2.2) більш доцільним, як враховує ці зв'язки. Однак, враховуючи той факт, що обсяг даних, який був використаний для розпізнавання, а саме 100 реалізацій і кількість відліків в діапазоні від 64 до 512, то можна констатувати факт про неможливість застосування правила (2.2), в силу того, що для його роботи потрібно розрахунок зворотної коваріаційної матриці, яка внаслідок того виду даних, який є для роботи, є виродженою, що в свою чергу призводить до гірших результатів розпізнавання порівняно з вирішальним правилом (2.4) при інших рівних умовах. При цьому вплив нестаціонарності (рис.4.7) часом буває більш істотним, ніж кореляційних зв'язків між відліками.

Висновки по розділу 4

1. Розпізнавання сигналів в когнітивних радіомережах є актуальною задачею. Рішення даної задачі може бути необхідним при визначенні приналежності виявленої сигналу до класу вторинних або первинних користувачів або визначенням появи нових, раніше невідомих випромінювань. Дана процедура може бути поєднана з радіоконтролем частот в цілому, який виконується на даний момент місцевими органами частотного регулювання. При цьому слід врахувати той факт, що в ефірі можуть бути сигнали, яких немає в базі даних управління когнітивної радіомережею, і такі сигнали можуть потрапляти на розпізнавання, що може призводити до помилки і віднесення даного сигналу до класу відомих.

2. Розглянуто некласичні методи селекції та розпізнавання статистично заданих сигналів за наявності невідомих сигналів. Дані методи засновані на

описі спостережень, діють в частотному каналі, імовірнісною моделлю у вигляді ортогональних розкладів.

3. Наводяться результати роботи методу розпізнавання, який отримані шляхом імітаційного моделювання на вибірках 9-ти реальних сигналів, характерних для завдань обробки при автоматизованому РМ в когнітивних радіомережах, котрі не використовують інформації щодо невідомих сигналів.

4. Отримані результати свідчать про те що, запропонований метод розпізнавання може бути використаний для задачі селекції та розпізнавання у КР.

5. Під час експерименту оптимальною розмірністю блока – ДПФ= 128-256 часових відліків. Подальше збільшення кількості відліків не приводить до суттєвих покращень результатів роботи алгоритму. При ДПФ=64 були переплутування сигналів.

6. В результаті досліджень було встановлено, що на якість розпізнавання найбільший вплив мають кореляційні зв'язки між відліками реалізацій і нестационарність сигналів у часі, які в свою чергу залежать від того, які ділянки сигналу потрапляють на навчання і розпізнавання. При цьому вирішальна ступінь впливу того чи іншого фактора може змінюватися в залежності від поведінки самого сигналу.

7. Усереднені імовірності помилкових рішень при розмірності блоку ДПФ 256:

- щодо дії невідомих сигналів з (M+1)-го класу за умови подання заданих

$$\text{сигналів} - P((M+1)/i) = \sum_{i=1}^M \frac{P(0/i)}{M} = 0.08;$$

- щодо дії заданих сигналів за умови подання невідомих сигналів у

$$\text{кількості } T \text{ з } (M+1)\text{-го класу невідомих сигналів } P(i/(M+1)) = \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^T \frac{P(i/l)}{T * M} = 0;$$

- щодо переплутування заданих сигналів між собою -

$$P(i/(M+1)) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \frac{P(i/j)}{M^2} = 0.012. .$$

РОЗДІЛ 5

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АЛГОРИТМІВ ВИЯВЛЕННЯ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ СИГНАЛІВ В КОГНІТИВНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ

5.1 Визначення оптимального часу сканування частотних каналів

В даному розділі розглянемо обмін між основними показниками якості: якістю сканування, яка визначається імовірністю правильного виявлення сигналу, часом сканування та досяжною пропускною здатністю вторинної мережі КР при різних умовах роботи. Використовуючи метод (2.6) визначимо оптимальний час сканування з максимальною пропускною здатністю, при якій первинний користувач є максимально захищеним від інтерференції з боку вторинних користувачів.

На рис 5.1 зображена структура часового фрейму для КР із періодичним скануванням спектру. Як вже було зазначено раніше, кожен з фреймів один слот для сканування і один слот для передачі корисної інформації. Тривалість сканування позначається як τ , а тривалість фази передачі – T .

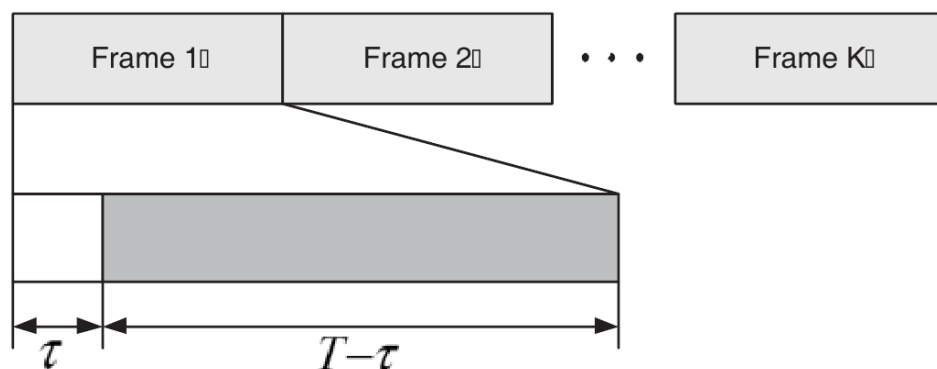


Рис.5.1. Структура фрейму для КР з періодичним скануванням спектру

Нехай C_0 – пропускна здатність вторинної мережі, коли вона працює під час відсутності первинних користувачів, та C_1 – пропускна здатність вторинної мережі, коли вона працює в присутності первинних користувачів.

Для заданого діапазону частот визначимо $P(H_1)$ як імовірність активності первинного користувача, та $P(H_0)$ – імовірність того, що первинний користувач неактивний.. Таким чином $P(H_1) + P(H_0) = 1$.

В процесі роботи КР можливі два випадки роботи:

1. Первинний користувач відсутній і не було хибної тривоги, тоді досяжна пропускна здатність – $\frac{T-\tau}{T}C_0$.

2. Первинний користувач присутній і був пропуск цілі, тоді досяжна пропускна здатність буде – $\frac{T-\tau}{T}C_1$.

Таким чином імовірність випадку 1 знаходиться як $(1 - P_{(0/1)}(\Delta, \tau))P(H_0)$, а для випадку 2 – $(1 - P_{(1/0)}(\Delta, \tau))P(H_1)$.

Тоді досяжні пропускні досяжності вторинної мережі КР в обох випадках розраховуються як:

$$R_0 = \frac{T-\tau}{T}C_0(1 - P_{(0/1)}(\Delta, \tau))P(H_0) \quad (5.1a)$$

$$R_1 = \frac{T-\tau}{T}C_1(1 - P_{(1/0)}(\Delta, \tau))P(H_1) \quad (5.1b)$$

Таким чином сумарна пропускна здатність може бути визначена як:

$$R(\tau) = R_0(\Delta, \tau) + R_1(\Delta, \tau). \quad (5.2)$$

В такому випадку задача оптимізації може бути сформульована наступним чином:

$$\max_{\tau} R(\tau) = R_0(\Delta, \tau) + R_1(\Delta, \tau) \quad (5.3)$$

Оскільки однією з основних задач КР є уникнення створенню інтерференції первинним користувачам. То алгоритми виявлення мають

високу імовірність правильного виявлення, таким чином друга складова (5.3) $R_1(\Delta, \tau)$ буде значно менше ніж перша $R_0(\Delta, \tau)$. Тому вираз (5.3) можна записати як:

$$\frac{\max}{\tau} \tilde{R}(\tau) = R_0(\Delta, \tau) \quad (5.4)$$

Тоді, використовуючи задану структуру часових рамок, досяжна вторинна пропускна здатність R_0 , коли первинний канал вільний, визначається як [125]:

$$R_0 = C_0 \Pr(H_0) \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) P_{(1/1)} \quad (5.5)$$

де C_0 пропускна здатність вторинної мережі під час відсутності первинного користувача, $\Pr(H_0)$ – процент незайнятості радіоканалу первинним користувачем. Збільшення часу сканування приводить до збільшення ймовірності виявлення та зменшення хибної тривоги, в свою чергу це приводить до підвищення використання незайнятих частотних каналів [126], [127].

Проте це призводить до зменшення корисної фази вторинної передачі даних і таким чином зменшує пропускну здатність вторинної мережі КР [125]. Таким чином існує нероздільний зв'язок між кількістю інтерференції для первинних користувачів і досяжною пропускну здатністю вторинної мережі КР в рамках тривалості фази сканування в структурі часового фрейму [128-132].

Якщо сигнал вторинного користувача є гаусовим, то пропускна здатність C_0 може бути розрахована як

$$C_0 = \log_2(1 + \text{SNRs}) \quad (5.6)$$

При передачі інформації відношення сигнал шум для вторинної мережі визначається як $\text{SNRs} = P_s/N_0$, де P_s – прийнята потужність сигналу вторинного користувача та, N_0 – потужність шуму.

За допомогою формули (5.1) визначимо оптимальний час сканування з точки зору пропускної здатності для алгоритму виявлення невідомих сигналів (2.6) при різних режимах функціонування: різній розмірності блоку ДПФ, різному SNRs , різній кількості вибірок v .

Дослідження проводилися на широкосмуговому сигналі (рис.3.1 (а)). Кількість експериментів $N=1000$, прийнято, що $\text{Pr}(H_0)=0,75$, $\text{SNRs}=20$ дБ, тривалість фрейму $T=100$ мс.

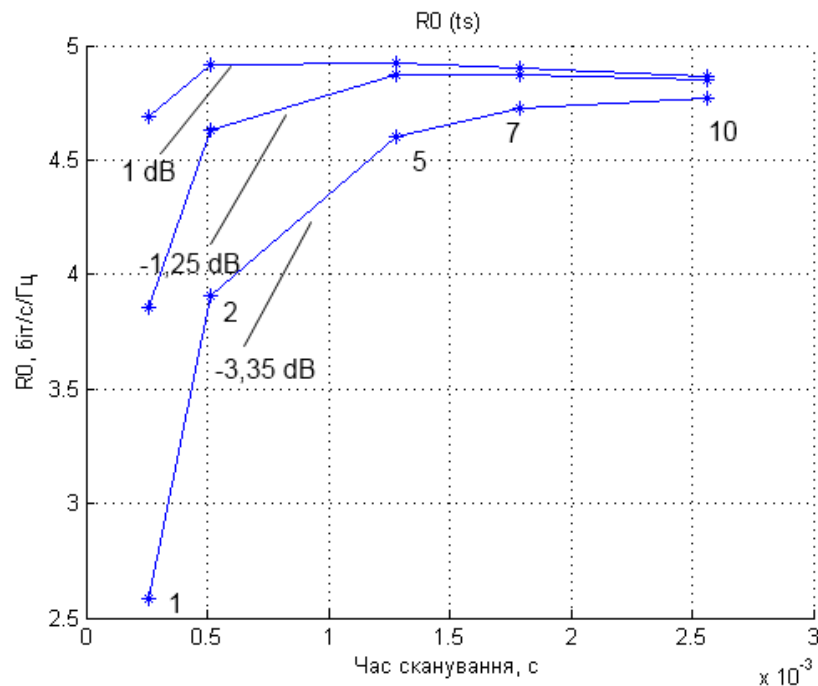


Рис.5.2. Залежність досяжної пропускної здатності для вторинної мережі КР від часу сканування (v) при різних значеннях ВСШ ($T = 100$ мс, ДПФ=64)

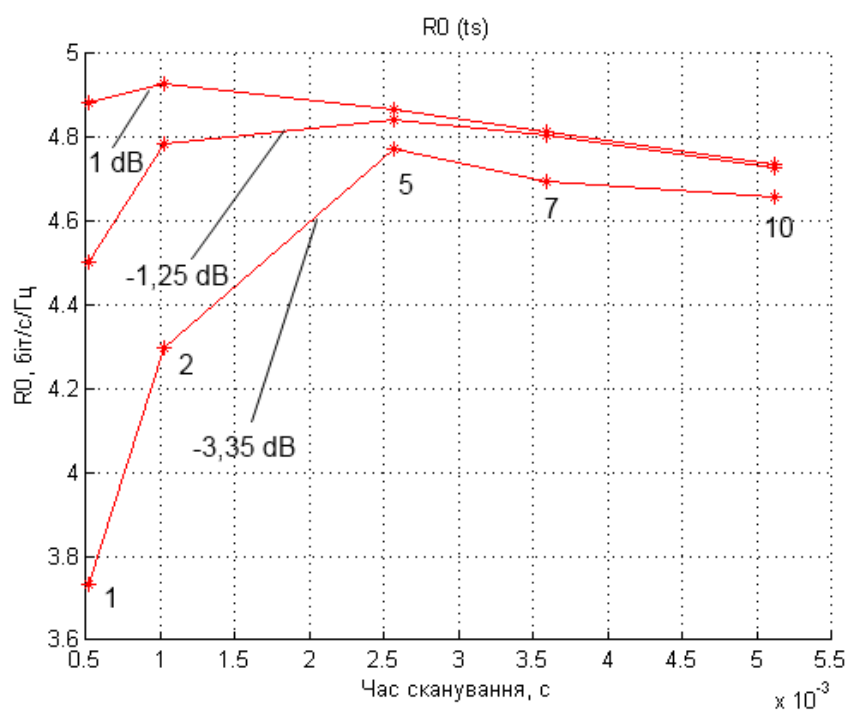


Рис.5.3. Залежність досяжної пропускної здатності для вторинної мережі КР від часу сканування (v) при різних значеннях ВСШ ($T = 100$ мс, ДПФ=128)

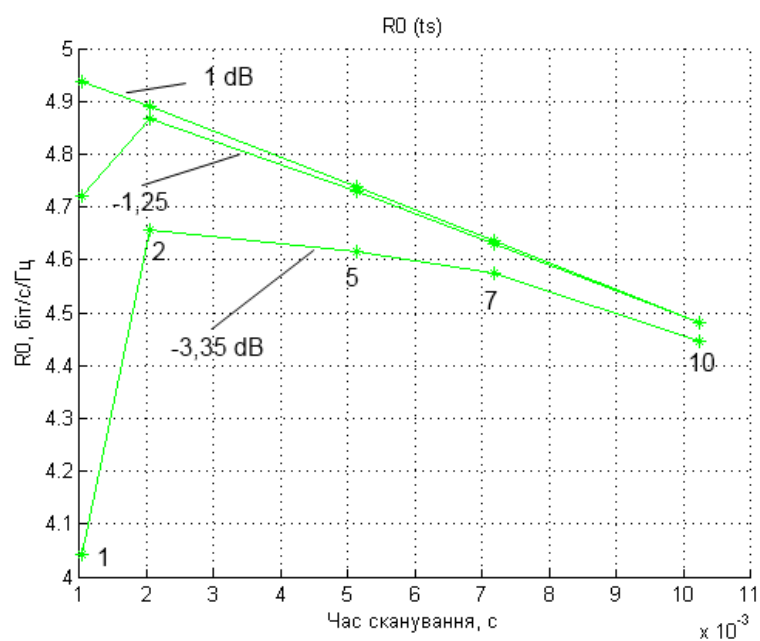


Рис.5.4. Залежність досяжної пропускної здатності для вторинної мережі КР від часу сканування (v) при різних значеннях ВСШ ($T = 100$ мс, ДПФ=256)

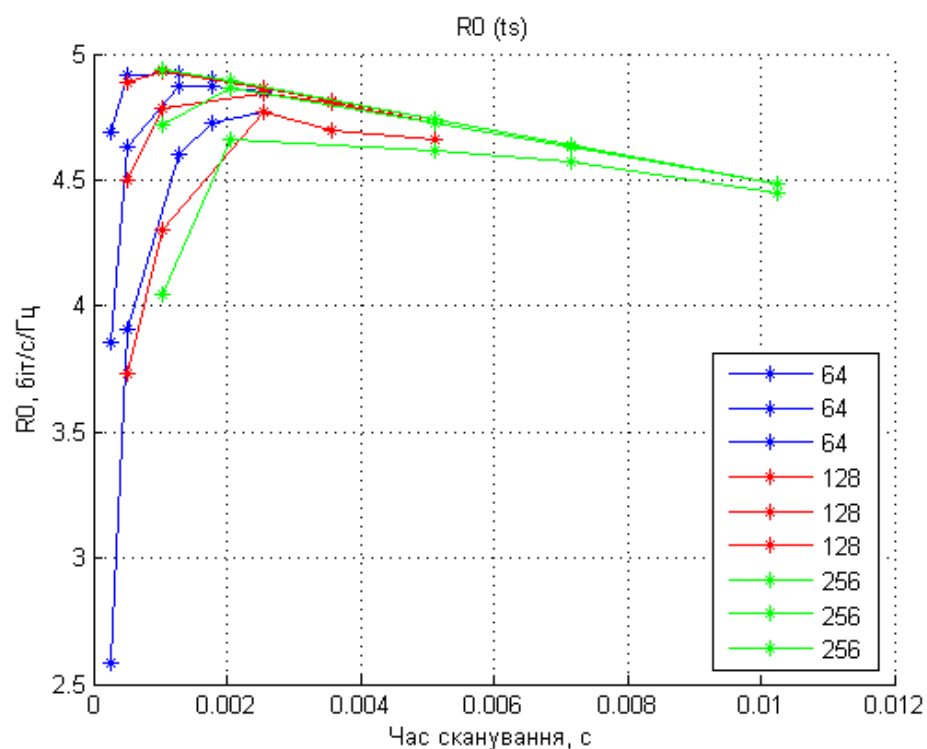


Рис.5.5. Залежність досяжної пропускної здатності для вторинної мережі КР від часу сканування (ν) при різних значеннях ВСШ та різних розмірностях ДПФ ($T = 100$ мс)

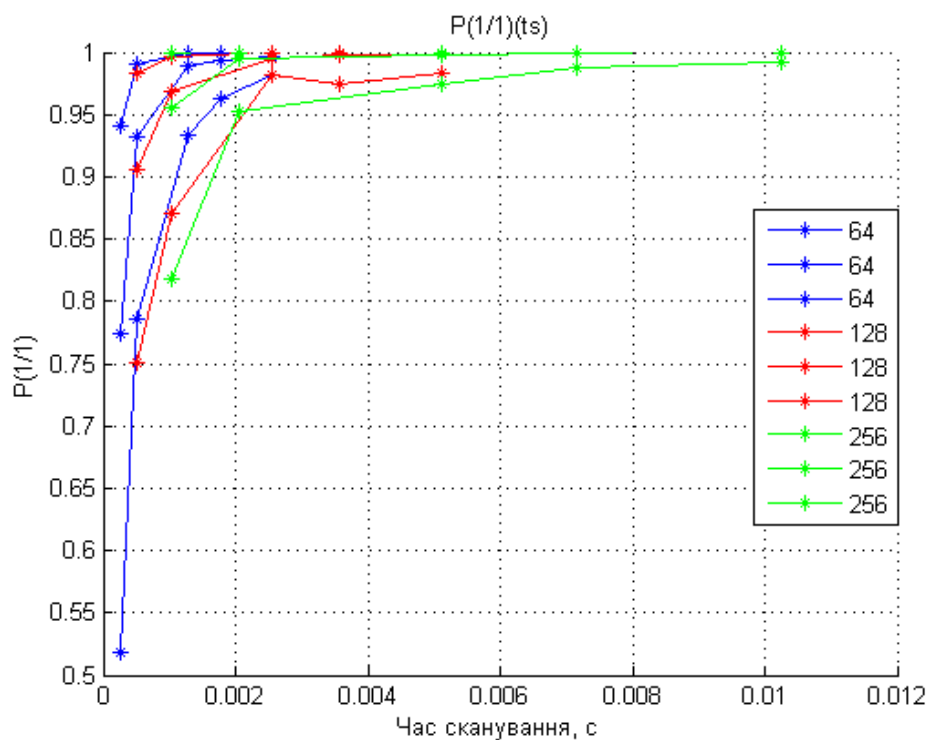


Рис.5.6. Залежність імовірності виявлення при різних значеннях ВСШ від часу сканування (ν) при різних розмірностях ДПФ ($T = 100$ мс)

Результати досліджень (рис.5.2-рис.5.4) показують, що для розмірностей ДПФ від 64 до 256 оптимальний час сканування складає від 1-2,5 мс в діапазон ВСШ від 1 дБ до -3,35 дБ. При зниженні ВСШ оптимальний час сканування збільшується приблизно в 2 рази на кожні 2 дБ.

Початковий зріст пропускної спроможності в діапазоні від 0,2-1 мс пояснюється тим, що зростає значення імовірності правильного виявлення. Подальший спад пояснюється зростанням тривалості фази сканування при сталій імовірності правильного виявлення (рис.5.6).

Слід зазначити, що ефективність виявлення є досить близькою для розмірностей ДПФ від 64 до 256, при значенні ВСШ, яке дорівнює 1dB. Проте при зменшенні ВСШ більш ефективним є використання менших значень розмірності ДПФ при більшій кількості реалізацій v , які подаються на обробку, при загальній однаковій тривалості фази сканування (рис.5.5).

5.2 Особливості використання алгоритмів виявлення невідомих сигналів в КР при кооперативному скануванні спектру

Кооперативне сканування спектру дозволяє використовувати множину користувачів КР для підвищення результатів сканування мережі при виявленні первинних користувачів. Використання такого виду сканування дозволяє побороти такі небажані явища при розповсюдженні сигналів як, наприклад, затухання сигналів при розповсюдженні в радіоканалі, в цьому випадку просторове рознесення користувачів КР допомагає подолати негативні явища багатопроменевого згасання або затінення [133].

Під час кооперативного сканування спектру, місцеві дані сканування від множини абонентів КР, які розподілені по території, передають дані до центру збору для прийняття рішення. Такий підхід дозволяє підвищити достовірність результуючого рішення щодо результатів сканування.

Під час кооперативного методу сканування складається з двох фаз: самого сканування та передачі даних. Фаза сканування – кожен абонент КР незалежно сканує спектр. Після обробки результатів сканування передаються за спеціальними каналами у вирішальний центр. За типом передачі інформації до центру розрізняють дві схеми передачі: ортогональну та неортогональну.

Ортогональна схема передачі інформації зображена на рис.5.7

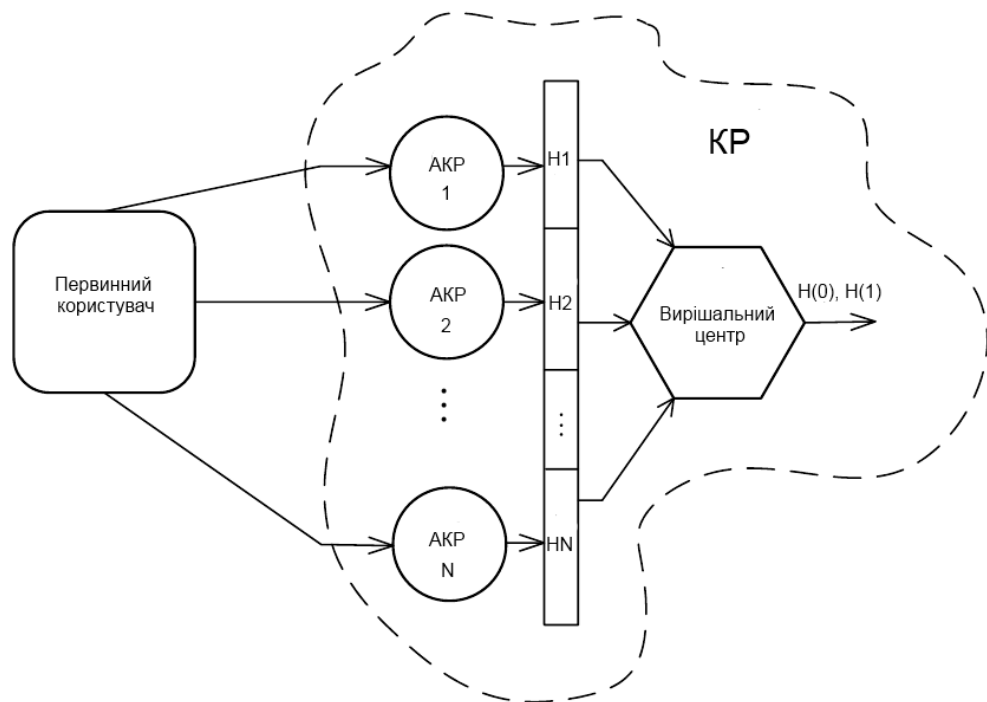


Рис.5.7. Кооперативний метод сканування спектру із ортогональною схемою передачі інформації

У цьому типі передачі інформація передається за незалежними ортогональними каналами.

Неортогональна схема передачі зображена на рис.5.8.

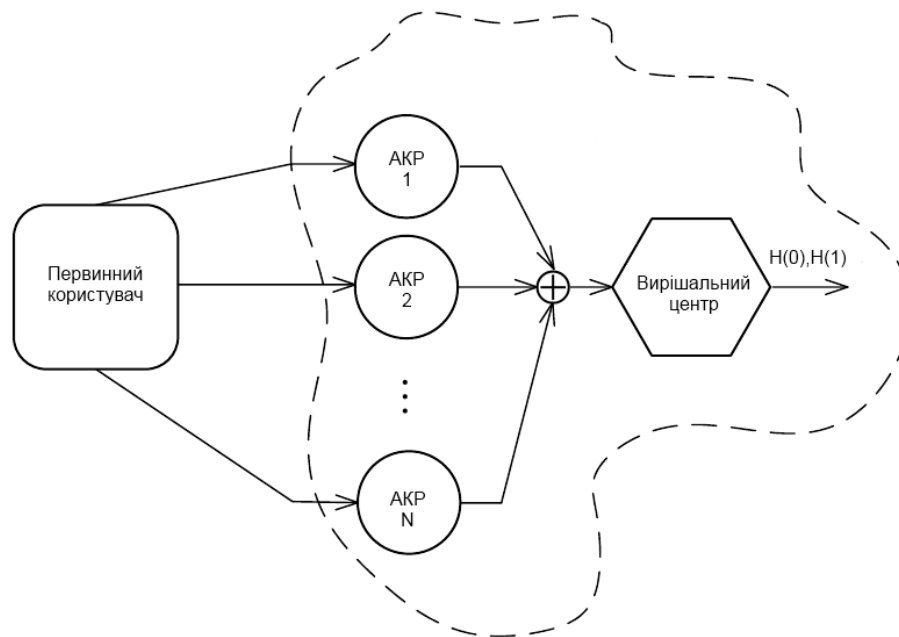


Рис.5.7. Кооперативний метод сканування спектру із неортогональною схемою передачі спостережень

В цій схемі сигнальні вектори передаються одночасно у вирішальний центр. Таким чином досягається більша ефективність за смугою передачі завдяки меншій кількості каналів передачі. До недоліків такої схеми можна віднести той факт, що час передачі збільшується відносно ортогональної схеми, а час на фазу передачі зменшується – досяжна пропускна спроможність вторинної мережі зменшується.

Внаслідок виникаючих перешкод у неортогональній схемі кооперативне сканування з ортогональною передачею перевершує неортогональну передачу, за рахунок потреби в більшій кількості частотних ресурсів.

Розглянемо варіант підвищення швидкодії кооперативного сканування спектру. Як було розглянуто вище, пропускна спроможність мережі може бути підвищена при зменшенні тривалості часу фази сканування при сталій імовірності виявлення сигналів.

Розглядаючи структуру вирішальних правил (2.4)-(2.6). можна побачити, що для виявлення сигналу можуть бути використані декілька

реалізацій, що дозволяє підвищити імовірність виявлення сигналу. Як показали дослідження такий підхід дозволяє зменшити час фази сканування на менших розмірностях блоку ДПФ при сталій імовірності правильного виявлення.

Таким чином, до всіх переваг кооперативного сканування спектру додається також підвищення якості виявлення сигналів через особливість роботи запропонованих методів, за менший проміжок часу сканування, завдяки паралельному отриманню реалізацій сканування. Даний підхід може бути реалізований при близькому географічному розташуванні абонентських пристроїв КР, що зображено на рис.5.7.

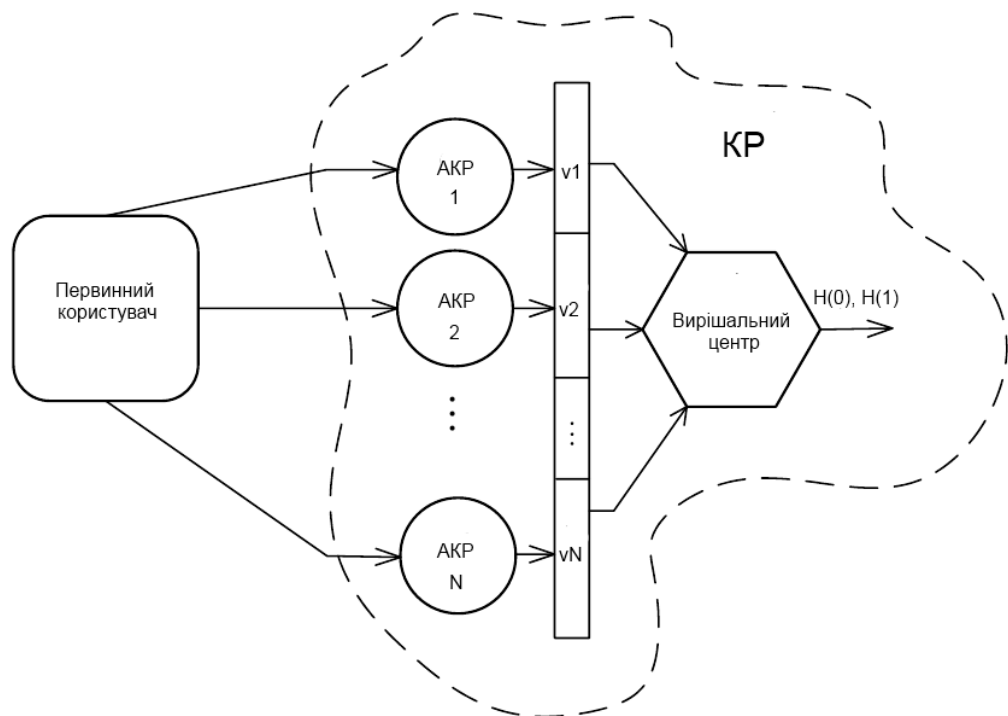


Рис.5.8. Кооперативний метод сканування спектру із ортогональною схемою передачі спостережень для вирішальних правил типу (2.4.-2.6)

Розрахувати виграш за часом при кооперативному методі сканування спектру відносно індивідуального методу сканування для ортогональної схеми передачі спостережень можна наступним чином:

$$\Delta_t = \frac{\tau_c * V}{\tau_{\Pi}} \quad (5.7)$$

де τ_c – час сканування для отримання однієї реалізації; V – кількість реалізацій для прийняття рішення (кількість терміналів кооперативного сканування); τ_{Π} – час на передачу однієї реалізації.

5.3 Процедури функціонування когнітивних радіомереж з використанням алгоритмів виявлення невідомих сигналів та розпізнавання заданих під час радіомоніторингу

Процес пошуку незайнятих каналів може бути представлений у вигляді потоку заявок на отримання каналів для користування в центр когнітивної радіомережі, яка постійно проводить моніторинг спектру і містить перелік актуальних незайнятих частот для використання. Розглянемо схему алгоритму, який дозволяє сформувати такий список частот.

На рис. 5.9 показана блок-схема алгоритму роботи КР під час сканування спектру із використанням запропонованих методів. Даний алгоритм описує процедуру пошуку незайнятих частотних каналів, а також фіксує зайняті частотні канали та тип користувачів, які їх займають. Вважається, що система КР має відомості щодо шуму та сигналів первинних та вторинних користувачів.

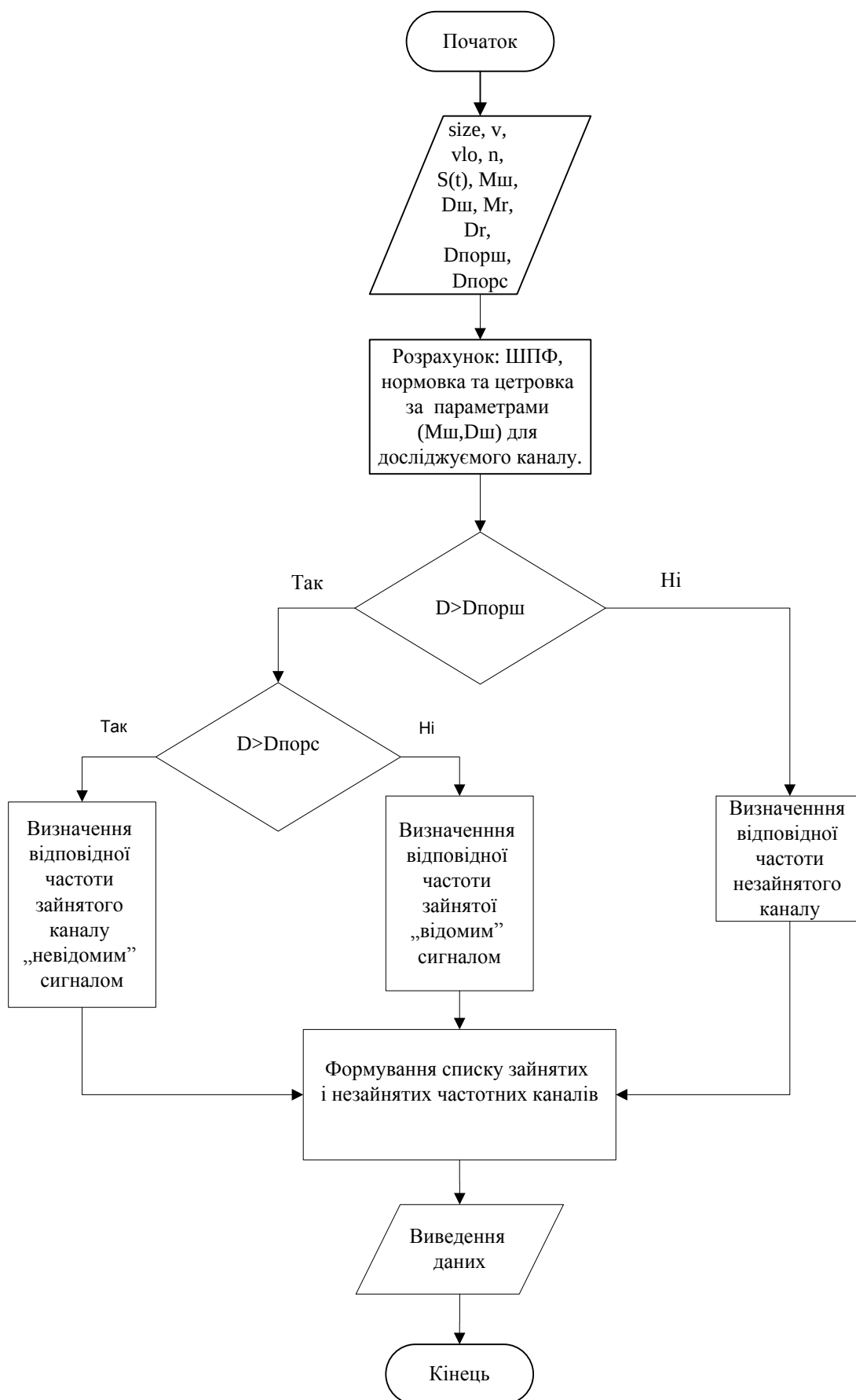


Рис. 5.9. Блок-схема алгоритму визначення незайнятих частотних каналів в КР на основі вирішального правила (2.4)

Структурні елементи блок-схеми виконують наступні операції:

1. Розрахунок спектру реалізації $S(t)$ спостережуваної полоси частот.
2. Центрування та нормування $S(n)$ за параметрами $M_{ш}$ (математичне очікування відліків реалізацій шуму) та $D_{ш}$ (дисперсія відліків реалізацій шуму).
2. Розрахунок параметрів вирішальної статистики (D) за гармонійними складовими спектру сигналу, що спостерігається в у частотному каналі.
3. Порівняння значення вирішальної статистики із пороговим значенням для шуму D з $D_{порш}$, яке розраховано за умов для заданої розмірності блоку n та ймовірності хибної тривоги ν_{lo} .
4. Якщо $D > D_{порш}$ – канал «зайнятий», перейти до процедури вирішення приналежності сигналу до класу «відомих» чи «не відомих» сигналів; якщо $D < D_{порш}$ – визначити даний частотний канал як «незайнятий».
5. Провести поетапно процедуру центрування та нормування за параметрами M_c та D_c для кожного з відомих сигналів первинних та вторинних користувачів та розрахувати вирішальну статистику за кожним з сигналів.
6. Якщо $D < D_{порс}$ – це «відомий» сигнал, визначити даний частотний канал як зайнятий цим сигналом; якщо $D > D_{порс}$ всіх сигналів – цей канал зайнятий «невідомим» сигналом.
7. Формується список «зайнятих» і «незайнятих» частотних каналів для використання у КР із зазначенням типів виявлених користувачів.

Висновки по розділу 5

1. Досліджено обмін між основними показниками якості алгоритмів виявлення: якістю сканування, яка визначається імовірністю правильного виявлення сигналу, часом сканування та досяжною пропускну здатністю вторинної мережі КР при різних умовах роботи.

2. Збільшення часу сканування приводить до збільшення ймовірності виявлення та зменшення хибної тривоги, в свою чергу це приводить до підвищення використання незайнятих частотних каналів. Проте це призводить до зменшення корисної фази вторинної передачі даних і таким чином зменшує пропускну здатність вторинної мережі КР

3. Використовуючи метод (2.6) визначено оптимальний час сканування з максимальною пропускну здатністю. Для сигналу смугою 150 кГц при розмірностях ДПФ від 64 до 256 оптимальний час сканування складає від 1-2,5 мс в діапазон ВСШ від 1 дБ до -3,35 дБ. При зниженні ВСШ оптимальний час сканування збільшується приблизно в 2 рази на кожні 2 дБ. Для кількості експериментів $N=1000$, $Pr(H_0)=0,75$, $SNRs=20$ дБ, тривалості фрейму $T=100$ мс отримані залежність досяжної пропускну здатності для вторинної мережі КР від часу сканування (v) при різних значеннях ВСШ.

4. Ефективність виявлення є досить близькою для розмірностей ДПФ від 64 до 256, при значенні ВСШ, яке дорівнює 1dB. Проте при зменшенні ВСШ більш ефективним є використання менших значень розмірності ДПФ при більшій кількості реалізацій v , які подаються на обробку, при загальній однаковій тривалості фази сканування

5. Запропоновано варіант підвищення швидкодії кооперативного сканування спектру із використанням запропонованих методів виявлення.

Розрахований виграш за часом $\Delta_t = \frac{\tau_c * v}{\tau_{\Pi}}$

6. Наведена загальна структура алгоритму пошуку незайнятих частотних каналів з селекцією і розпізнаванням виявлених користувачів спектру.

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

В роботі вирішена актуальна науково-прикладна задача виявлення незайнятих частотних каналів у когнітивних радіомережах із використанням неklasичних методів виявлення та розпізнавання сигналів, що дозволяє вирішувати цю задачу в умовах підвищеної апіорної невизначеності при відсутності інформації про сигнали, які необхідно виявити, а також розпізнавання заданих сигналів при наявності невідомих сигналів.

1. Когнітивне радіо дозволяє підвищити ефективність використання спектру. Його функціонування потребує пошуку незайнятих частотних каналів. Для сучасних радіозасобів різного призначення характерним є функціонування при тих чи інших рівнях апіорної невизначеності щодо сигнальної обстановки. Реально апіорні відомості зводяться лише до часткового знання законів розподілу сигналів і перешкод, обмеженого числа їх параметрів.

2. Таким чином, при проектуванні актуально вирішення задачі виявлення сигналів на фоні шумів, коли їх статистичні характеристики заздалегідь можуть бути невідомі або піддані змінам, а отримання відомостей про них є ускладненим, в силу наявності великого обсягу видів і типів випромінювань.

3. Проведений порівняльний аналіз існуючих алгоритмів виявлення, показав, що в даний час потрібна розробка нових універсальних алгоритмів виявлення радіосигналів апіорно невизначеної форми у широкому діапазоні частот. Для цих цілей перспективними є алгоритми виявлення засновані на виявленні зміни імовірнісних властивостей сигналів, які не вимагають апіорних відомостей про виявлені сигнали.

4. Запропоновані методи виявлення незайнятих каналів у КР із використанням методів виявлення невідомих сигналів, які базуються на виявленні зміни статистичних характеристик. Отримані результати досліджень підтверджують працездатність розглянутих алгоритмів виявлення невідомих сигналів. Для цих цілей були використані два сигнали зі смугами спектру 3 кГц та 150 кГц відповідно. Для розглянутих сигналів

отримана ефективність виявлення невідомих сигналів запропонованими алгоритмами в 2-7 разів більше відносно класичного енергетичного детектора при відношенні «сигнал-шум» - 3 дБ. Оптимальним з точки зору ефективності виявлення та часових затрат є значення $\nu = 2 - 3$.

5. Дослідження робочих характеристик алгоритмів, дозволяє зробити висновок, що їх застосування є ефективним при ВСШ в діапазоні від -7 дБ для сигналів що досліджувалися. При менших значеннях ВСШ (від -23дБ до -13дБ)та володінні апріорною інформацією щодо сигналів, які необхідно виявити може бути рекомендований узгоджений фільтр, а при можливості більших у декілька разів часових затрат можна рекомендувати циклостаціонарний детектор.

6. В результаті багатокритеріального вибору для випадку $d_1 = d_2 = 0,5$ був обраний єдиний переважний варіант алгоритму виявлення № 23 в табл.3.2.

7. Вирішена задача розпізнавання сигналів в КР. Її рішення може бути необхідним при визначенні приналежності виявленої сигналу до класу вторинних або первинних користувачів або визначенням появи нових, раніше невідомих випромінювань. Дана процедура може бути поєднана з радіоконтролем частот в цілому, який виконується на даний момент місцевими органами частотного регулювання. При цьому слід врахувати той факт, що в ефірі можуть бути сигнали, яких немає в базі даних управління когнітивної радіомережею, і такі сигнали можуть потрапляти на розпізнавання, що може призводити до помилки і віднесення даного сигналу до класу відомих.

8. Розглянуто некласичні методи селекції та розпізнавання статистично заданих сигналів за наявності невідомих сигналів. Дані методи засновані на описі спостережень, діють в частотному каналі, імовірнісною моделлю у вигляді ортогональних розкладів. Наведено результати роботи методу розпізнавання, який отримані шляхом імітаційного моделювання на вибірках 9-ти реальних сигналів, характерних для завдань обробки при

автоматизованому РМ в когнітивних радіомережах, котрі не використовують інформації щодо невідомих сигналів.

9. Під час експерименту оптимальна розмірність блока – ДПФ= 128-256 часових відліків. Подальше збільшення кількості відліків не приводить до суттєвих покращень результатів роботи алгоритму. Розраховано усереднені імовірності помилкових рішень.

10. В результаті досліджень було встановлено, що на якість розпізнавання найбільший вплив мають кореляційні зв'язки між реалізаціями і нестационарність сигналів, які в свою чергу залежать від того, які ділянки сигналу потрапляють на навчання і розпізнавання.

11. Досліджено обмін між основними показниками якості алгоритмів виявлення: якістю сканування, яка визначається імовірністю правильного виявлення сигналу, часом сканування та досяжною пропускну здатністю вторинної мережі КР при різних умовах роботи.

12. Збільшення часу сканування приводить до збільшення ймовірності виявлення та зменшення хибної тривоги, в свою чергу це приводить до підвищення використання незайнятих частотних каналів. Проте це призводить до зменшення корисної фази вторинної передачі даних і таким чином зменшує пропускну здатність вторинної мережі КР

13. Для методу виявлення за оцінками енергетичного спектру визначено оптимальний час сканування з максимальною пропускну здатністю. Для кількості експериментів $N=1000$, $Pr(H_0)=0,75$, $SNRs=20$ дБ, тривалості фрейму $T=100$ мс отримані залежність досяжної пропускну здатності для вторинної мережі КР від часу сканування (ν) при різних значеннях ВСШ. Для розмірностей ДПФ від 64 до 256 оптимальний час сканування складає від 1-2,5 мс в діапазон ВСШ від 1 дБ до -3,35 дБ. При зниженні ВСШ оптимальний час сканування збільшується приблизно в 2 рази на кожні 2 дБ.

14. Ефективність виявлення є досить близькою для розмірностей ДПФ від 64 до 256, при значенні ВСШ, яке дорівнює 1dB. Проте при зменшенні

ВСШ більш ефективним є використання менших значень розмірності ДПФ при більшій кількості реалізацій v , які подаються на обробку, при загальній однаковій тривалості фази сканування. Запропоновано варіант підвищення швидкодії кооперативного сканування спектру із використанням запропонованих методів виявлення

15. Наведена загальна структура алгоритму пошуку незайнятих частотних каналів з селекцією і розпізнаванням виявлених користувачів спектру у КР.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вишневский В. М. Энциклопедия Wi MAX: Путь к 4G /В.М. Вишневский, С.Л. Портной, И.В. Шахнович / – М.: Техносфера. – 2009. 472с.
2. Кокотов О. В., Бондаренко А. В. Общие принципы построения когнитивных радиосистем / О. В. Кокотов, А. В. Бондаренко / – Киев: Украинский государственный центр радиочастот. – 2010. С. 64-65.
3. Mitola J. et al. Cognitive radio: making software radios more personal // IEEE personal communications. – 1999. – Т. 6. – №. 4. – С. 13-18.
4. Mitola Iii J. Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications // Mobile Networks and Applications. – 2001. – Т. 6. – №. 5. – С. 435-441.
5. Haykin S. et al. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications // IEEE journal on selected areas in communications. – 2005. – Т. 23. – №. 2. – Р. 201-220.
6. Дятлов А.П., Кульбикаян Б.Х., Корреляционная обработка широкополосных сигналов в автоматизированных комплексах радиомониторинга. – Москва: Горячая линия – Телеком, 2010. – 332с
7. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства. – М.: Горячая линия-Телеком., 2006. – 492 с.
8. Безрук В. М., Певцов Г. В. Теоретические основы проектирования систем распознавания сигналов для автоматизированного радиоконтроля. Харьков: Коллегиум, 2007. – 430с.
9. Конахович Г. Ф., Бабак В. П., Фисенко В. М. Специальный радиомониторинг. – Киев : Додэка-XXI, 2007. – 384 с.
10. Богданович В.А., Вострецов А.Г. Теория устойчивого обнаружения, различения и оценивания сигналов. – Москва: Физматлит, 2004 316 с.

11. Сенини. А.Г. Распознавание случайных сигналов. – Новосибирск: Наука, 1974. – 76 с.
12. Козьмин В. А. Обнаружение узкополосных сигналов в широкополосных системах радиомониторинга // Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. XVII Междунар. НТК. Воронеж: ВГТУ. – 2011. – С. 2522.
13. Сосулин Ю.Г. Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов // Монография. – Москва: Советское радио, 1978. – 320 с.
14. Шевченко М. Е., Чемаров А. О. Обнаружение и оценивание параметров источников радиоизлучения в широкой полосе обзора // – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ. – 2011.
15. Омельченко. В.А., Основы спектральной теории распознавания сигналов, – Харьков: Вища шк, 1983. – 156 с.
16. Омельченко. В.А., Распознавание случайных сигналов в условиях априорной неопределенности. – Харьков: ХПИ, 1979. – 100 с.
17. Helstrom C. W. Statistical Theory of Signal Detection: International Series of Monographs in Electronics and Instrumentation. – Elsevier, 2013. – Т. 9.
18. Poor H. V. An introduction to signal detection and estimation. – Springer Science & Business Media, 2013. – 410 p.
19. Рембовский А.М., Автоматизированный радиомониторинг на основе одноканальной и двухканальной обработки данных / А.М. Рембовский, А.Б. Токарев // Вестник МГТУ. – 2004 – №3(56), – С. 42-62
20. Kumar A., Bharti M. R., Jain S. K. An adaptive and efficient local spectrum sensing scheme in cognitive radio networks //International Journal in. Computer Applications. – 2013. – Т. 72. – №. 23. – С. 38-45.
21. Yucek T., Arslan H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications // IEEE communications surveys & tutorials. – 2009. – Т. 11. – №. 1. – С. 116-130.
22. Богданович В.А. Применение принципа инвариантности при спектральном анализе с помощью ДПФ / В.А. Богданович, Ё.Ю. Бородич // Докл. АН ВШ РФ. – 2006. – №. 1. – С. 74-83.

23. Богданович В.А. Разработка и исследование интервального алгоритма обнаружения, инвариантного к распределению энергии сигнала по частоте / В.А. Богданович, Ё.Ю. Бородич.// Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2006: Материалы VIII международной конференции, Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2006. Т.4. – С. 13-19.
24. Радзиевский В. Г., Сирота А. А. Теоретические основы радиоэлектронной разведки. – Закрытое акционерное общество Издательство Радиотехника, 2004. – 432с.
25. Ширман Я.Д. Лосев Ю.И., Минервин Н.Н. и др. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. М.: ЗАО «МАКВИС», 1998. – 828 с.
26. Haykin S., Thomson D. J., Reed J. H. Spectrum sensing for cognitive radio //Proceedings of the IEEE. – 2009. – Т. 97. – №. 5. – С. 849-877.
27. Wax M., Kailath T. Detection of signals by information theoretic criteria // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – 1985. – Т. 33. – №. 2. – С. 387-392.
28. Хмелев С.Л., Трушков А.О. Обнаружение сигналов в широком частотномдиапазоне на основе вейвлет-преобразования от спектральной плотности мощности // Докл. 16-й междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2014». – Москва. – 2014. – Т. 1. – С. 726-730.
29. Arslan H., Cognitive Radio, Software Defined Radio, and Adaptive Wireless Systems // Ser. Signals and Communication Technology, I. edition., 2007 – 470 p.
30. Yue W. J. et al. Combined energy detection and one-order cyclostationary feature detection techniques in cognitive radio systems //The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications. – 2010. – Т. 17. – №. 4. – С. 18-25.

31. Yue W., Zheng B., Meng Q. Cyclostationary property based spectrum sensing algorithms for primary detection in cognitive radio systems //Journal of Shanghai Jiaotong University (Science). – 2009. – Т. 14. – №. 6. – С. 676.
32. Либенсон М.Н. Нелинейный статистический метод распознавания многих классов // Проблемы случайного поиска. Рига: ИК АН Латвии, 1978. – Вып.6. – С.299-317.
33. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов. – М.: Мир, 1976. – 755 с.
34. Айвазян С.А., Бежаева З.И., Староверов О.Л. Классификация многомерных наблюдений. – М.: Статистика, 1974. – 239 с.
35. Иваненко С.А. Обнаружение незанятых частотных каналов в когнитивных радиосетях. / С.А. Иваненко, В.М. Безрук // Радиоэлектроника и информатика: научн.-техн. журн. – 2017 г. – №1(76) – С. 4–8.
36. Иваненко С.А. Исследования методов обнаружения неизвестных сигналов / В.М. Безрук, С.А. Иваненко // Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – 2017. – Вып. 191. – С. 167–172.
37. Иваненко С.А. Обнаружение неизвестных сигналов в когнитивных радиосетях / С.А. Иваненко, В.М. Безрук // Information and Telecommunication Sciences – 2018. – Вып. 1. – С. 5–10.
38. Безрук В.М. Обнаружение и распознавание сигналов в условиях повышенной априорной неопределенности в задачах радиомониторинга /В.М. Безрук, С.А. Иваненко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава. – 2018. - Вып. 2(48). – С. 135–141. DOI:10.26906/SUNZ.2018.2.135
39. Безрук В.М. Сравнительный анализ алгоритмов обнаружения неизвестных сигналов с учетом совокупности показателей качества / В.М. Безрук, С.А. Иваненко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи.–2018. – Вып. 2(86) – С. 67–74. DOI: 10.32620/reks.2018.2.07
40. Ivanenko S.A. Signal recognition when conducting radio monitoring in cognitive radio networks / S.A Ivanenko., V.M. Bezruk // Sciences of Europe (Praha, Czech Republic). – 2018. – VOL 2, No 29, – P. 59–65.

41. Bezruk V. Selection and recognition of the specified radio signals in the sw band / V. Bezruk, S. Ivanenko // Information and Telecommunication Sciences. – 2018. – №. 2. – С. 21–26. DOI: 10.20535/2411-2976.22018.21-26

42. 30. Иваненко С.А. Обнаружение и распознавание сигналов в условиях априорной неопределенности при автоматизированном радиомониторинге / С.А. Иваненко, В.М. Безрук // Радиоэлектроника и информатика: научн.- техн. журн. – 2018. – №3(82). – С. 8–12.

43. Иваненко С.А. Оптимизация при планировании сетей 4G / С.А. Иваненко, В.М. Безрук // 3-я Международная научно-практическая конференция молодых ученых «Інфокомунікації- сучасність та майбутнє», Одеса, ОНАЗ, 17-18 октября 2013. – С. 38–39.

44. Ivanenko S.A. Planning and Optimization of Networks 4G / S.A. Ivanenko, V.M. Bezruk // 23-rd "International Crimean Conference" "Microvave & Telecommunication Technology" (CriMiCo`2013), (Sevastopol, Crimea, Ukraine, September 8-13 2013. – P. 500–501.

45. Безрук В.М. Многокритериальная оптимизация проектных решений при планировании сетей LTE / В.М. Безрук, С.А. Иваненко, Д.В. Чеботарёва // Первая международная научно-практическая конференция "Проблемы инфокоммуникаций. Наука и технологии. PIC S&T' – 2013", Харьков, Украина 9-11 октября 2013. – С. 87–89.

46. Bezruk V. Multicriteria Optimization in Planning of Mobile Communication Networks / V. Bezruk, D. Chebotareva, S. Ivanenko, M. Jo // 20th International Conference On Microwaves, Radar And Wireless Communications " Mikon-2014, Gdansk, Poland, June 16 – 18 2014. – P. 633–640.

47. Безрук В.М. Методы многокритериальной оптимизации в планировании сетей мобильной связи / В.М. Безрук, С.А. Иваненко, Д.В. Чеботарёва // VII Міжнародна науково-практична конференція "Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій", Запоріжжя, Україна, 17-19 вересня 2014. – С. 74–75.

48. Bezruk V.M. Multicriteria Choice of Optimal Design Decisions When Planning of LTE Networks / V.M. Bezruk, D.V. Chebotareva, S.A. Ivanenko // XIIth International Conference “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, TCSET”2014”, Lviv-Slavske, Ukraine, February 25 – March 1 2014. – P. 53–55.

49. Иваненко С.А. Анализ эффективности антенных систем mimo при различных видах модуляции в рамках многокритериальной оптимизации сетей LTE / С.А. Иваненко, В.М. Безрук // 19-й Международный молодежный форум «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И МОЛОДЕЖЬ В XXI веке», Харьков, 20 – 22 апреля 2015. – С. 147–148.

50. Ivanenko S.A. Methods of Detecting of Unknown Signals in Cognitive Radio Network / S.A. Ivanenko, V.M. Bezruk // The Third International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications. Science and Technology» PICS&T-2016, Kharkiv, October 4–6 2016. – P. 65–66.

51. Иваненко С.А. Методы обнаружения незанятых частотных каналов в когнитивных радиосетях / С.А. Иваненко, В.М. Безрук // IEEE Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки «УкрМіКо’2016/UkrMiCo’2016», Київ, 11-15 вересня 2016. – С. 385-387.

52. Иваненко С.А. Применение коротких рамочных антенн с целью повышения качественных характеристик приёма в когнитивных радиосетях / С.А. Иваненко, В.М. Безрук // 20-й Юбилейный алгоритмы и антенна международный молодежный форум «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И МОЛОДЕЖЬ В XXI веке» Харьков, 19 – 21 апреля 2016. – С. 39–40.

53. Иваненко С.А. Обнаружение и распознавание радиоизлучений при автоматизированном радиомониторинге заданных частотных диапазонов / С.А. Иваненко, В.М. Безрук // V-а Міжнародна науково-практична конференція «Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах», Чернівці, 3-5 листопада 2016. – С. 67–68.

54. Иваненко С.А. Методы обнаружения незанятых частотных каналов в когнитивных радиосетях / С.А. Иваненко, В.М. Безрук // 2-я Международная научно-техническая конференция «Проблемы электромагнитной совместимости перспективных беспроводных сетей связи» ЭМС-2016, Харьков, 24-25 мая 2016. – С. 23–24.

55. Bezruk V. Multicriteria Choos of Mobile Communication Networks / V. Bezruk, D. Chebotareva, S. Ivanenko // 2-nd IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies « AICT-2017», Lviv, July 4–7 2017. – P. 1-2.

56. Волошина Е.Ю. Применение SDR технологии в задачах радиомониторинга / Е.Ю. Волошина, С.А. Иваненко // 21-й Международный молодежный форум «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И МОЛОДЕЖЬ В XXI веке», Харьков, 25 – 27 апреля 2017. – С. 147–148.

57. Дмитренко І.В. Оптимізація зони покриття мережі WI-FI / І.В. Дмитренко, С.А. Иваненко // 21-й Международный молодежный форум «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И МОЛОДЕЖЬ В XXI веке», Харьков, 25 – 27 апреля 2017. –С. 151–152.

58. Малявіна К.В. Застосування SDR технології у системах супутникового зв'язку / К.В. Малявіна, С.А. Иваненко // 21-й Международный молодежный форум «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И МОЛОДЕЖЬ В XXI веке», Харьков, 25 – 27 апреля 2017. – С. 169–170.

59. Дмитренко І.В. Розробка магнітної рамкової антени для задач радіомоніторингу короткохвильового діапазону // І.В. Дмитренко, С.А. Иваненко // 22-й Международный молодежный форум «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И МОЛОДЕЖЬ В XXI веке», Харьков, 17-20 апреля 2018. – С. 54-55.

60. Дмитренко І.В. Дослідження методів узгодження магнітної рамкової антени в короткохвильовому діапазоні // І.В. Дмитренко, С.А. Иваненко // XII Міжнародна науково-практична конференція магістрів та аспірантів, Харків, 17-19 квітня 2018. – С. 176–177.

61. Дмитренко І.В. Покращення зони покриття мережі WI-FI за допомогою антени Харченко / І.В. Дмитренко, С.А. Іваненко // VI-й Міжнародний Радіоелектронний Форум «ПРИКЛАДНА РАДІОЕЛЕКТРОНІКА. СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ» МРФ-2017 Харків, 24 - 26 жовтня 2017. – С. 228–231.

62. Іваненко С.А. Исследование алгоритмов обнаружения неизвестных сигналов в когнитивных радиосетях / С.А. Іваненко, В.М. Безрук // VI-й Міжнародний Радіоелектронний Форум «ПРИКЛАДНА РАДІОЕЛЕКТРОНІКА. СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ» МРФ-2017 Харків, 24 - 26 жовтня 2017. – С. 225–227.

63. Ivanenko S., Bezruk V. Methods of Signal Detecting in Automated Radiomonitoring / S. Ivanenko, V. Bezruk // The Second International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2017). – Odessa, September 11-15 2017. – P. 374–376.

64. Ivanenko S., Methods for the Detection and Recognition of Signals in Conditions of a Priori Uncertainty/ S. Ivanenko, V. Bezruk //The Third International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics «УкрMiCo'2018/ UkrMiCo'2018», Odessa, September 10–14 2018. – P. 1-5.

65. Комашинский В. И., Максимов А. В. Системы подвижной радиосвязи с пакетной передачей информации. Основы моделирования. – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 238 с.

66. Wyglinski A. M., Nekovee M., Hou T. (ed.). Cognitive radio communications and networks: principles and practice. – Academic Press, 2009. – 736 p.

67. Cordeiro C. et al. IEEE 802.22: the first worldwide wireless standard based on cognitive radios //First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. – Ieee, 2005. – P. 328-337.

68. C. Ramming, "Cognitive Networks", Proc. DARPA-Tech Symposium, Mar. 2004. – P. 9-11.
69. Дусматов Д.Х. Когнитивное радио – новая беспроводная технология в недалеком будущем / Д.Х. Дусматов, Ж.К. Назирханов // АК ТТЕ, 2009г № 2(9)
70. Сайт IEEE 802. [Электронный ресурс] www.ieee802.org/22/
71. Сайт МИНКОМ связи России. [Электронный ресурс] <http://minsvyaz.ru>
72. Stevenson C. R. et al. IEEE 802.22: The first cognitive radio wireless regional area network standard //IEEE communications magazine. – 2009. – Т. 47. – №. 1. – P. 130-138.
73. Akyildiz I. F. et al. NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey //Computer networks. – 2006. – Т. 50. – №. 13. – P. 2127-2159.
74. Cabric D., Mishra S. M., Brodersen R. W. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios //Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2004. – Ieee, 2004. – Т. 1. – P. 772-776.
75. Matinmikko M. et al. Cognitive radio: An intelligent wireless communication system //VTT Technical Research Centre of Finland, Tech. Rep. – 2008.
76. Ghasemi A., Sousa E. S. Spectrum sensing in cognitive radio networks: requirements, challenges and design trade-offs //IEEE Communications magazine. – 2008. – Т. 46. – №. 4. – С. 32-39.
77. Марпл.-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М. : Мир, 1990. – 584 с.
78. Communications, SDR And CR Boost Wireless. [Электронный ресурс] www.electronicdesign.com.

79. Jondral F. K. Software-defined radio: basics and evolution to cognitive radio //EURASIP journal on wireless communications and networking. – 2005. – Т. 2005. – №. 3. – С. 275-283.
80. Joel Kirshman. Optimize SDR performance. [В Интернете] www.eetimes.com.
81. Mishra S. M. et al. Cooperative sensing among cognitive radios //Icc. – 2006. – Т. 6. – С. 1658-1663.
82. Ghasemi A., Sousa E. S. Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments //First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. – IEEE, 2005. – С. 131-136.
83. Harada H. Research and development on cognitive and software radio technologies-Devices and hardware platform //General assembly of URSI. – 2008.
84. Smitha K. G., Vinod A. P. Cluster based power efficient cooperative spectrum sensing under reduced bandwidth using location information //AEU-International Journal of Electronics and Communications. – 2012. – Т. 66. – №. 8. – С. 619-624.
85. Force F. C. C. S. P. T. Report of the spectrum efficiency working group //http://www.fcc.gov/sptf/files/SEWGFfinalReport_1.pdf. – 2002.
86. Ширман Я. Д., Манжос В. Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М. Радио и связь 1981. – 416 с.
87. А. И. Куприянов, П. Б. Петренко, М. П. Сычев. Теоретические основы радиоэлектронной разведки. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 381 с.
88. Шахтарин, Б. И. Обнаружение сигналов: учебное пособие. – М. : Гелиос АРВ, 2006. – 488 с.
89. Радзиевский В. Г., Уфаев В. А. Первичная обработка сигналов в цифровых панорамных обнаружителях–пеленгаторах / В. Г. Радзиевский, В. А. Уфаев // Радиотехника. – 2003. – №. 7. – С. 26 -31.

90. Токарев А. Б. Исследование статистических характеристик минимального значения сглаженного энергетического спектра сигналов //Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8. – №. 11. – С. 106-109.
91. Токарев А. Б. Сравнительный анализ двух квазиоптимальных оценок интенсивности шума, используемых при панорамном обнаружении радиосигналов //Радиотехника. – 2013. – №. 3. – С. 120-124.
92. Urkowitz H. Energy detection of unknown deterministic signals //Proceedings of the IEEE. – 1967. – Т. 55. – №. 4. – С. 523-531.
93. Ye Z., Memik G., Grosspietsch J. Energy detection using estimated noise variance for spectrum sensing in cognitive radio networks //2008 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. – IEEE, 2008. – С. 711-716.
94. De P., Liang Y. C. Blind sensing algorithms for cognitive radio //2007 IEEE Radio and Wireless Symposium. – IEEE, 2007. – С. 201-204.
95. Ma J., Li G. Y., Juang B. H. Signal processing in cognitive radio //Proceedings of the IEEE. – 2009. – Т. 97. – №. 5. – С. 805-823.
96. Cabric D., Mishra S. M., Brodersen R. W. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios //Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2004. – Ieee, 2004. – Т. 1. – С. 772-776.
97. Sonnenschein A., Fishman P. M. Radiometric detection of spread-spectrum signals in noise of uncertain power //IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 1992. – Т. 28. – №. 3. – С. 654-660.
98. Cabric D., Tkachenko A., Brodersen R. W. Spectrum sensing measurements of pilot, energy, and collaborative detection //MILCOM 2006-2006 IEEE Military Communications conference. – IEEE, 2006. – С. 1-7.
99. Cabric D. Addressing feasibility of cognitive radios //IEEE Signal Processing Magazine. – 2008. – Т. 25. – №. 6. – С. 85-93.

100. Wang P., Akyildiz I. F. On the origins of heavy-tailed delay in dynamic spectrum access networks //IEEE Transactions on Mobile Computing. – 2012. – Т. 11. – №. 2. – С. 204-217.
101. Pawelczak P. et al. Cognitive radio: Ten years of experimentation and development // IEEE Communications Magazine. – 2011. – Т. 49. – №. 3. – С. 90-100.
102. Agee B. G., Schell S. V., Gardner W. A. Spectral self-coherence restoral: A new approach to blind adaptive signal extraction using antenna arrays //Proceedings of the IEEE. – 1990. – Т. 78. – №. 4. – С. 753-767.
103. Tang H. Some physical layer issues of wide-band cognitive radio systems //First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. – IEEE, 2005. – С. 151-159.
104. Тихонов В. И. Оптимальный приём сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
105. Бакулев П. А. Обработка сигналов с постоянным уровнем ложных тревог / П. А. Бакулев, Ю. А. Басистов, В. Г. Тугуши // Изв. высш. учебн. заведений. Радиоэлектроника. – 1989. – Т. 32. – №. 4. – С. 14–15.
106. Бакулев П. А. Радиолокационные системы. – М. : Радиотехника, 2004. – 320 с.
107. Акимов П. С. и др. Обнаружение радиосигналов / Под ред // АА Колосова. – М.: Радио и связь, 1989. – 288 с.
108. Бруханский А. В. Непараметрические обнаружители сигналов. Учебное пособие к лабораторной работе // Кафедра. – 1998. – Т. 401. –21 с.
109. Мазанько И.П. О флуктуациях в газовых оптических усилителях и генераторах..// Радиотехника и электроника – 1968. – № 3 – Т. 13.
110. Хансен В. Характеристики обнаружения некоторых непараметрических ранговых критериев и их применение в радиолокации // «Зарубежная радиоэлектроника» – 1971. – № 4. – С. 38–54.
111. Сколник М. (ред.). Справочник по радиолокации: В 4-х т. – Сов. радио, 1976.

112. Никитенок В. И., Кравцов В. А. . Авт. Изобретение «Ранговый обнаружитель». № 598409 СССР, 21.11.1977 г.
113. Айвазян С.А., Бежаева З.И., Староверов О.Л. Классификация многомерных наблюдений. – М.: Статистика, 1974. – 239 с.
114. М. Басевиль, А. Банвениста. Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем. – М. : Мир, 1989. – 278 с.
115. Сосулин Ю.Г. Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов. – М. : Сов. радио, 1978. – 320 с.
116. Башаринов А.Е., Флейшман Б.С. Методы статистического последовательного анализа и их радиотехнические приложения. – М.: Советское радио, 1962. — 352 с.
117. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика. [ред.] Главная редакция физико-математической литературы Е.Ю. Ходан. М : Наука, 1979. – 496 с.
118. Luis Miguel Gato Diaz, Liset Martnnez Marrero, Jorge Torres GymeZ PERFORMANCE COMPARISON OF SPECTRUM SENSING TECHNIQUES FOR COGNITIVE "Informatica 2016" 16th International Convention and Fair/ Havana, Cuba : , 14-18 MARCH 2016. –7 p.
119. Liang Y. C. et al. Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks //2007 IEEE International Conference on Communications. – IEEE, 2007. – С. 5330-5335.
120. Ногин В. Д. Принятие решений в многокри-териальной среде: количественный подход. –М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 176 с.
121. Безрук В.М., Чеботарёва Д.В., Скорик Ю.В. Многокритериальный анализ и выбор средств телекоммуникаций. – Харьков : СМИТ, 2017. – 267 с.
122. Weber C., Peter M., Felhauer T. Automatic modulation classification technique for radio monitoring //Electronics Letters. – 2015. – Т. 51. – №. 10. – С. 794-796.

123. Акимов П.С., Бакут П.А., Богданович В.А. и др. Теория обнаружения сигналов. – М. : Радио и связь, 1984. – 440 с.
124. Н.А. Фефелов. Распознавание образов при наличии нового класса // Отбор и обработка информации – 1988 – Вып.2, – С.84-89.
125. Liang Y. C. et al. Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks //2007 IEEE International Conference on Communications. – IEEE, 2007. – С. 5330-5335.
126. Mishra S. M. et al. Cooperative sensing among cognitive radios //IEEE Icc. – 2006. – Т. 6. – С. 1658-1663.
127. Gardner W. A. Exploitation of spectral redundancy in cyclostationary signals //IEEE Signal processing magazine. – 1991. – Т. 8. – №. 2. – С. 14-36.
128. J. Mitola, “Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio,” PhD. diss., Royal Inst. Technol. (KTH), Stockholm.
129. IEEE 802.22 Wireless RAN, “Functional requirements for the 802.22 WRAN standard, IEEE 802.22- 05/0007r46,” Oct. 2005.
130. Y.-C. Liang, et al., “System description and operation principles for IEEE 802.22 WRANs,” [Online]. Available: <http://www.ieee802.org/22/>.
131. Simon M. K., Alouini M. S. A unified approach to the performance analysis of digital communication over generalized fading channels //Proceedings of the IEEE. – 1998. – Т. 86. – №. 9. – С. 1860-1877.
132. Hillenbrand J., Weiss T. A., Jondral F. K. Calculation of detection and false alarm probabilities in spectrum pooling systems //IEEE Communications letters. – 2005. – Т. 9. – №. 4. – С. 349-351.
133. Yiu S., Schober R. Nonorthogonal transmission and noncoherent fusion of censored decisions //IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2009. – Т. 58. – №. 1. – С. 263-273.

ДОДАТОК А

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-методичної
роботи

Харківського національного
університету радіоелектроніки

д.т.н., проф.  І.В. Рубан

"21"  2018 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи Коляденка Олексія Вадимовича за темою "Методи забезпечення електромагнітної сумісності при когнітивному розподілі ресурсів в мережах мобільного зв'язку", представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

Комісія у складі:

голови – д.т.н., проф., проф. ІКІ Лошаков В.А.;

членів – д.т.н., проф. ІКІ Лемешко О.В.;

к.т.н., доц. каф. ІКІ Токар Л.О.

склала даний акт у тому, що результати дисертаційної роботи
Коляденка О. В., а саме:

1. Метод забезпечення електромагнітної сумісності при розподілі просторово-часового ресурсу в мережах мобільного зв'язку, який засновано на вирішенні задачі просторово-часового доступу абонентських станцій до базової станції;

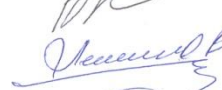
2. Метод кластеризації ресурсів, побудований на математичному апараті нейронних мереж Кохонена;

використано у навчальному процесі кафедри інфокомунікаційної інженерії ХНУРЕ в курсі лекцій та на практичних заняттях дисципліни «Теорія електричного зв'язку».

Голова комісії

Члени комісії

 В.А. Лошаков

 О.В. Лемешко

 Л.О.Токар

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-методичної
роботиХарківського національного
університету радіоелектроніки

д.т.н., проф. І.В. Рубан

" 28 " 2017 р.



АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи Коляденка Олексія Вадимовича за темою "Методи забезпечення електромагнітної сумісності при когнітивному розподілі ресурсів в мережах мобільного зв'язку", представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

Комісія у складі:

голови – д.т.н., проф., проф. каф. ІКІ Агеєва Д.В., наукового керівника
НДР № 308 "Нитка-3";членів – к.т.н., доц. каф. ІКІ Мельникова Л.І. відповідального виконавця
НДР № 308 "Нитка-3";– к.т.н., проф. каф. ІКІ Пастушенко М.С., виконавця НДР № 308
"Нитка-3" склала даний акт у тому, що результати дисертаційної роботи
Коляденка О.В., а саме:

1. Рекомендації з вибору алгоритму виявлення сигналів первинних користувачів в залежності від сигнально-завадової обстановки і ступеня апіорної невизначеності;

2. Метод забезпечення електромагнітної сумісності при розподілі частотно-часового ресурсу в мережах мобільного зв'язку, який складається з алгоритму з повторним використанням частот і алгоритму, заснованому за критерії гарантованої якості зв'язку;

використано у НДР № 308 "Нитка-3" (№ ДР 0116U0000662), яка виконується за держзамовленням в Харківському національному університеті радіоелектроніки.

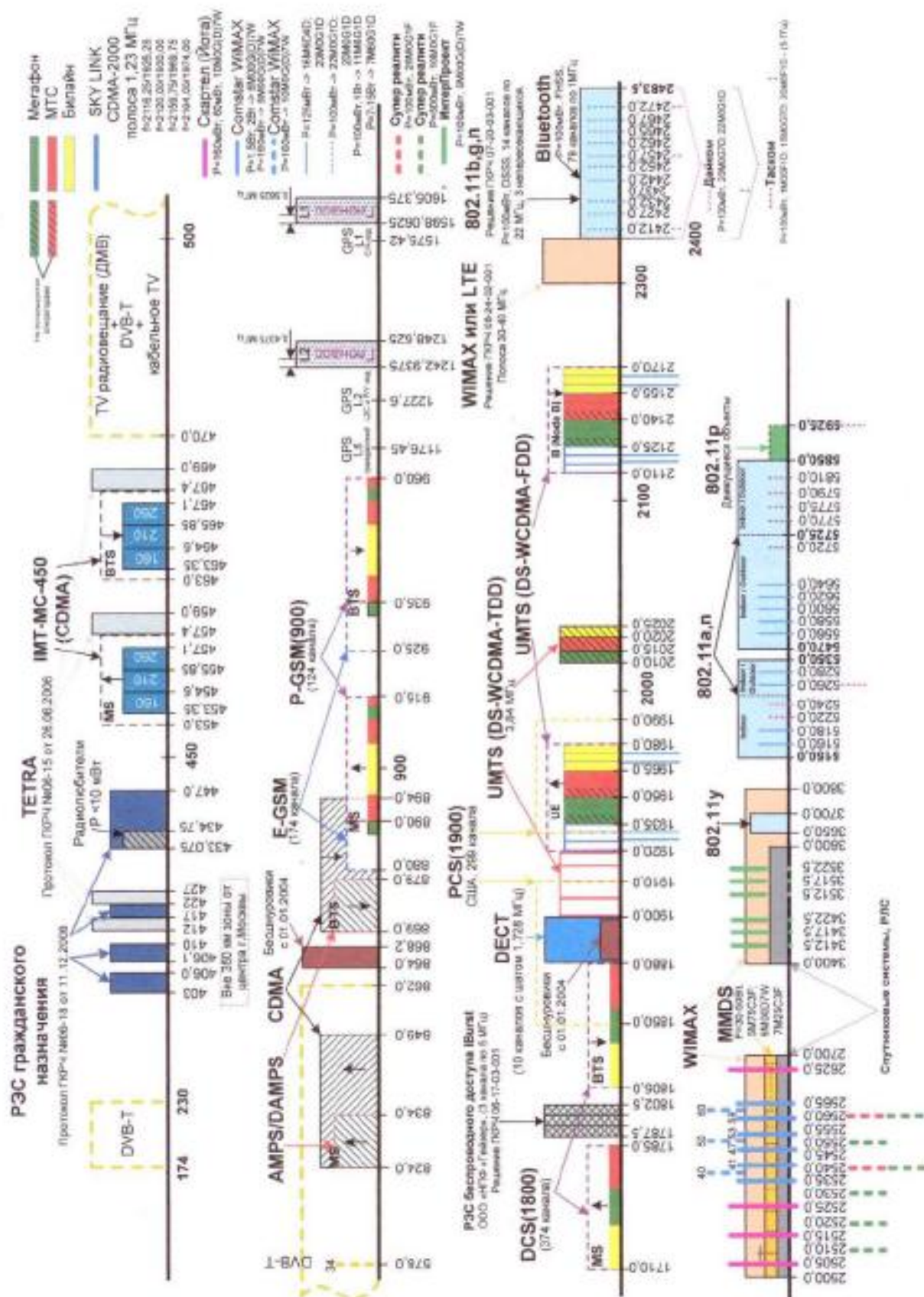
Голова комісії

Д.В. Агеєв

Члени комісії

Л.І. Мельникова

М.С. Пастушенко



ДОДАТОК В
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА
ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Иваненко С.А., Оптимизация при планировании сетей 4G / С.А. Иваненко, В.М. Безрук // 3-я Международная научно-практическая конференция молодых ученых «Инфокоммуникації- сучасність та майбутнє», Одеса, ОНАЗ, 17-18 октября 2013. - С. 38-39.
2. Ivanenko S.A., Planning and Optimization of Networks 4G / S.A. Ivanenko, V.M. Bezruk // 23-rd "International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo`2013), (Sevastopol, Crimea, Ukraine, September 8-13 2013. - P. 500-501.
3. Безрук В.М., Многокритериальная оптимизация проектных решений при планировании сетей LTE / В.М. Безрук, С.А. Иваненко, Д.В. Чеботарёва // Первая международная научно-практическая конференция "Проблемы инфокоммуникаций. Наука и технологии. PIC S&T' – 2013", Харьков, Украина 9-11 октября 2013. - С. 87-89.
4. Bezruk V., Multicriteria Optimization in Planning of Mobile Communication Networks / V. Bezruk, D. Chebotareva, S. Ivanenko, M. Jo // 20th International Conference On Microwaves, Radar And Wireless Communications "Mikon-2014, Gdansk, Poland, June 16 – 18 2014. - P. 633-640.
5. Безрук В.М., Методы многокритериальной оптимизации в планировании сетей мобильной связи / В.М. Безрук, С.А. Иваненко, Д.В. Чеботарёва // VII Міжнародна науково-практична конференція "Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій", Запоріжжя, Україна, 17-19 вересня 2014. - С. 74-75.
6. Bezruk V.M., , Multicriteria Choice of Optimal Design Decisions When Planning of LTE Networks / V.M. Bezruk, D.V. Chebotareva, S.A. Ivanenko // XIIth International Conference "Modern Problems of Radio

Engineering, Telecommunications and Computer Science, TCSET'2014", Lviv-Slavske, Ukraine, February 25 – March 1 2014. - P. 53-55.

7. Иваненко С.А., Анализ эффективности антенных систем mimo при различных видах модуляции в рамках многокритериальной оптимизации сетей LTE / С.А. Иваненко, В.М. Безрук // 19-й Международный молодежный форум «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И МОЛОДЕЖЬ В XXI веке», Харьков, 20 – 22 апреля 2015. - С. 147-148.

8. Ivanenko S.A., Methods of Detecting of Unknown Signals in Cognitive Radio Network / S.A. Ivanenko, V.M. Bezruk // The Third International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications. Science and Technology» PICS&T-2016, Kharkiv, October 4–6 2016. – P. 65–66.

9. Иваненко С.А., Методы обнаружения незанятых частотных каналов в когнитивных радиосетях / С.А. Иваненко, В.М. Безрук // IEEE Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки «УкрМіКо'2016/UkrMiCo'2016», Київ, 11-15 вересня 2016. - С. 385-387.

10. Иваненко С.А., Применение коротких рамочных антенн с целью повышения качественных характеристик приёма в когнитивных радиосетях / С.А. Иваненко, В.М. Безрук // 20-й Юбилейный алгоритмы и антенна международный молодежный форум «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И МОЛОДЕЖЬ В XXI веке» Харьков, 19 – 21 апреля 2016. С. 39-40.

11. Иваненко С.А., Обнаружение и распознавание радиоизлучений при автоматизированном радиомониторинге заданных частотных диапазонов / С.А. Иваненко, В.М. Безрук // V-а Міжнародна науково-практична конференція «Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах», Чернівці, 3-5 листопада 2016. С. 67-68.

12. Иваненко С.А., Методы обнаружения незанятых частотных каналов в когнитивных радиосетях / С.А. Иваненко, В.М. Безрук // 2-я Международная научно-техническая конференция «Проблемы

электромагнитной совместимости перспективных беспроводных сетей связи» ЭМС-2016, Харьков, 24-25 мая 2016. С.23-24.

13. Волошина Е.Ю., Применение SDR технологии в задачах радиомониторинга / Е.Ю. Волошина, С.А. Иваненко // 21-й Международный молодежный форум «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И МОЛОДЕЖЬ В XXI веке», Харьков, 25 – 27 апреля 2017. С. 147-148.

14. Дмитренко І.В., Оптимізація зони покриття мережі WI-FI / І.В. Дмитренко, С.А. Иваненко // 21-й Международный молодежный форум «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И МОЛОДЕЖЬ В XXI веке», Харьков, 25 – 27 апреля 2017. С. 151-152.

15. Малявіна К.В., Застосування SDR технології у системах супутникового зв'язку / К.В. Малявіна, С.А. Иваненко // 21-й Международный молодежный форум «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И МОЛОДЕЖЬ В XXI веке», Харьков, 25 – 27 апреля 2017. С. 169-170.

16. Дмитренко І.В., Розробка магнітної рамкової антени для задач радіомоніторингу короткохвильового діапазону // І.В. Дмитренко, С.А. Иваненко // 22-й Международный молодежный форум «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И МОЛОДЕЖЬ В XXI веке», Харьков, 17-20 апреля 2018. С. 54-55.

17. Дмитренко І.В., Дослідження методів узгодження магнітної рамкової антени в короткохвильовому діапазоні // І.В. Дмитренко, С.А. Иваненко // XII Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів, Харків, 17-19 квітня 2018. С. 176-177.

18. Волошина О.Ю., Дослідження алгоритму виявлення невідомих сигналів у когнітивних радіомережах // О.Ю. Волошина, С.А. Иваненко // XII Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів, Харків, 17-19 квітня 2018. 2 с.

19. Дмитренко І.В., Покращення зони покриття мережі WI-FI за допомогою антени Харченко / І.В. Дмитренко, С.А. Иваненко // VI-й Міжнародний Радіоелектронний Форум «ПРИКЛАДНА

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА. СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ» МРФ–2017 Харків, 24 - 26 жовтня 2017. С. 228-231.

20. Іваненко С.А., Исследование алгоритмов обнаружения неизвестных сигналов в когнитивных радиосетях / С.А. Іваненко, В.М. Безрук // VI-й Міжнародний Радіоелектронний Форум «ПРИКЛАДНА РАДІОЕЛЕКТРОНІКА. СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ» МРФ–2017 Харків, 24 - 26 жовтня 2017. С. 225-227.

21. Ivanenko S., Bezruk V. Methods of Signal Detecting in Automated Radiomonitoring // The Second International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2017). - Odessa, September 11-15 2017. P. 374–376.

22. Ivanenko S., Methods for the Detection and Recognition of Signals in Conditions of a Priori Uncertainty/ S. Ivanenko, V. Bezruk //The Third International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics «УкрМіКо'2018/ UkrMiCo'2018» , Odessa, September 10–14 2018. P. 1-5.

23. Іваненко С.А., Обнаружение незанятых частотных каналов в когнитивных радиосетях / С.А. Іваненко, В.М. Безрук // Радиоелектроника и информатика: научн.-техн. журн. - 2017. - №1(76). – С. 4–8.

24. Іваненко С.А., Исследования методов обнаружения неизвестных сигналов / В.М. Безрук, С.А. Іваненко // Радиотехника: Всеукр. міжвед. научн.-техн. сб.- 2017. – Вып. 191. – С. 167–172.

25. Ivanenko S. Detection of unknown signals in cognitive radio networks / S. Ivanenko, V. Bezruk, // Information and Telecommunication Sciences. – 2018. - Вып. 1. – P. 5–10 DOI: 10.20535/2411-2976.12018.5-10

26. Безрук В.М., Обнаружение и распознавание сигналов в условиях повышенной априорной неопределенности в задачах радиомониторинга /В.М. Безрук, С.А. Іваненко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава. – 2018. - Вып. 2(48). – С. 135–141. DOI:10.26906/SUNZ.2018.2.135

27. Безрук В.М. Сравнительный анализ алгоритмов обнаружения неизвестных сигналов с учетом совокупности показателей качества / В.М. Безрук, С.А. Иваненко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи.–2018. – Вып. 2(86) – С. 67–74. DOI: 10.32620/reks.2018.2.07

28. Ivanenko S.A. Signal recognition when conducting radio monitoring in cognitive radio networks / S.A Ivanenko., V.M. Bezruk // Sciences of Europe (Praha, Czech Republic). – 2018. – VOL 2, No 29, – P. 59–65.

29. Bezruk V. Selection and recognition of the specified radio signals in the sw band / V. Bezruk, S. Ivanenko // Information and Telecommunication Sciences. – 2018. – №. 2. – С. 21–26. DOI: 10.20535/2411-2976.22018.21-26

30. Иваненко С.А. Обнаружение и распознавание сигналов в условиях априорной неопределенности при автоматизированном радиомониторинге / С.А. Иваненко, В.М. Безрук // Радиоэлектроника и информатика: научн.-техн. журн. – 2018. – №3(82). – С. 8–12.