

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ**

Іваненко Станіслав Андрійович

УДК 621.391

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

05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

**АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Безрук Валерій Михайлович,
Харківський національний університет
радіоелектроніки
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри інформаційно-мережної
інженерії

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Кобзев Анатолій Васильович,
Харківський національний університет
Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба,
провідний науковий співробітник Наукового
центру Повітряних Сил

кандидат технічних наук, доцент
Галкин Сергій Олександрович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
доцент кафедри «Інформатика та
інтелектуальна власність»

Захист відбудеться 06 червня 2019 року о 15-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03 в Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, Харків, пр. Науки, 14, к.13.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, Харків, пр. Науки, 14.

Автореферат розісланий травня 2019 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



В.М. Безрук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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, проблемними аспектами яких є:

- 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 радіоресурс є обмеженим і його використання є ефективним не на всіх доступних частотах.

Щоб підвищити ефективність його використання була розроблена технологія когнітивного радіо, згідно якої дозволяється використовувати незайняті ділянки спектру в ті моменти, коли вони не використовуються первинними користувачами, що мають право їх експлуатації на ліцензійній основі. Тому при експлуатації бездротових мереж необхідно контролювати завантаженість частотного ресурсу і проводити пошук частотних каналів, тимчасово незайнятих первинними ліцензійними користувачами. Така можливість появляється завдяки проведенню радіомоніторингу (РМ) у робочому діапазоні частот. Основним завданням радіомоніторингу в когнітивних радіомережах (КР) є виявлення сигналів у окремих частотних каналах і поділі робочого діапазону частот на «зайняті» та «вільні» смуги частот.

У процесі автоматизованого радіомоніторингу виникає необхідність застосування таких алгоритмів виявлення, характеристики яких були б стійкі щодо невідомих параметрів і властивостей виявляємих сигналів у частотних каналах. Тому завдання виявлення сигналів в КР є досить складним, так як на даний час в ефірі існує велика кількість радіовипромінювань з різними видами і параметрами модуляції. Однак мати відомості про всі джерела радіовипромінювань не представляється можливим, що не дає можливості використати відомі алгоритми виявлення, які потребують апріорних відомостей про характеристики сигналів. Тому актуальним є використання неklasичних методів виявлення невідомих сигналів в умовах апріорної невизначеності.

Також актуальною є задача розпізнавання сигналів при проведенні автоматизованого радіомоніторингу в КР. Вирішення даної задачі необхідне при визначенні приналежності виявленого сигналу до класу вторинних чи первинних

користувачів або визначенні появи нових сигналів для раніше невідомих радіовипромінювань. При цьому слід враховувати існування сигналів, яких немає в базі даних КР, і які можуть потрапляти на розпізнавання, що призводить до помилок віднесення таких сигналів до класу відомих. Тому класичні методи розпізнавання сигналів не можуть бути використані для цих цілей, оскільки вони потребують апріорних відомостей щодо всіх сигналів, які подаються на розпізнавання.

Вирішити задачу визначення незайнятих частотних каналів можливо із використанням методів виявлення та розпізнавання сигналів на основі виявлення зміни імовірнісних властивостей сигналів. Використання цих методів не потребує апріорних відомостей, щодо сигналів, які потрапляють на обробку.

Таким чином, актуальним є вирішення науково-прикладної задачі виявлення незайнятих частотних каналів при проведенні автоматизованого радіомоніторингу у КР з використанням нетрадиційних методів виявлення невідомих сигналів, а також методів розпізнавання заданих сигналів в умовах апріорної невизначеності.

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

Дисертаційні дослідження проводились відповідно до планів науково-технічної діяльності Харківського національного університету радіоелектроніки. Зокрема, матеріали дисертації було використано у звіті про науково-дослідну роботу “Розроблення нової інформаційної технології комплексного розпізнавання радіо випромінюючих об’єктів методами статистичної радіотехніки та штучного інтелекту” (№ ДР 0117U002528), у якій здобувач був співвиконавцем.

Мета і задачі дослідження.

Мета дослідження полягає у визначенні незайнятих частотних каналів в КР методами виявлення та розпізнавання сигналів в умовах апріорної невизначеності.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися такі задачі:

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

2. Розробка алгоритмів визначення незайнятих частотних 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. Вибір та дослідження методів селекції та розпізнавання заданих сигналів під час радіомоніторингу в КР.

6. Визначення оптимального часу сканування при використанні запропонованих алгоритмів виявлення.

7. Вироблення рекомендацій щодо процедур функціонування КР під час радіомоніторингу.

Об'єктом дослідження є процес визначення незайнятих частотних каналів при проведенні радіомоніторингу в КР.

Предметом дослідження є методи виявлення невідомих та розпізнавання заданих сигналів на основі зміни імовірнісних властивостей сигналів, які дозволяють розв'язати задачу визначення незайнятих частотних каналів у КР.

Методи дослідження. 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 визначення незайнятих частотних каналів в КР, які відрізняються використанням методів виявлення невідомих сигналів на фоні шуму в умовах апріорної невизначеності, що базуються на зміні імовірнісних властивостей спостережень. Запропоновані методи дозволяють підвищити ефективність визначення незайнятих частотних каналів у КР.

2. Отримали подальший розвиток методи виявлення невідомих сигналів, 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 у КР.

4. Вперше вирішена задача розпізнавання заданих сигналів при наявності невідомих сигналів під час радіомоніторингу в КР, відмінною особливістю якої є використання навчальних вибірок тільки для заданих сигналів. Використання запропонованих алгоритмів селекції і розпізнавання дозволяє уникнути помилок розпізнавання, коли невідомі сигнали можуть бути визначені як один із заданих сигналів.

5. Вперше запропоновано алгоритм визначення незайнятих частотних каналів та їх надання вторинним користувачам у КР з використанням неklasичних методів виявлення та розпізнавання сигналів в умовах апріорної невизначеності.

Практична значимість і реалізація результатів роботи.

Отримані у роботі результати можуть бути використані для удосконалення визначення незайнятих частотних каналів під час радіомоніторингу у когнітивних радіомережах в умовах апріорної невизначеності.

Це дозволяє підвищити ефективність результатів виявлення сигналів під час радіомоніторингу. Запропоновані методи виявлення та розпізнавання сигналів

реалізовані і перевірені із використанням SDR приймача на реальних сигналах і шумі, які діють в частотних каналах стандарту когнітивного радіо IEEE 802.22.

Практична значимість результатів роботи підтверджена актами впровадження.

Особистий внесок здобувача.

Основні наукові результати, які викладені в дисертації, отримані здобувачем самостійно або за його безпосередньої участі.

В роботі [1] здобувачем проведено аналіз методів, які використовуються під час радіомоніторингу в КР, обґрунтовується необхідність використання методів виявлення сигналів, які не потребують апіорних відомостей щодо виявлюваних сигналів. В роботі [2,3] проведено дослідження робочих характеристик алгоритмів виявлення невідомих сигналів у часовій та спектральних областях; отримані залежності показників виявлення від відношення сигнал-шум із використанням реальних сигналів. У [4] сформульована задача розпізнавання заданих сигналів за наявності класу невідомих сигналів під час проведення радіомоніторингу в КР. В роботі [5] автором виконаний порівняльний аналіз запропонованих алгоритмів виявлення, проведений багатокритеріальний вибір переважного варіанту алгоритму виявлення невідомих сигналів із використанням реальних сигналів з урахуванням сукупності показників якості. В роботах [6-8] автору належить вирішення задачі селекції і розпізнавання сигналів під час радіомоніторингу в діапазоні роботи КР із використанням реальних сигналів.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації доповідалися і обговорювалися на наукових конференціях і форумах: 3-я Международная научно-практическая конференция молодых ученых «Инфокоммуникации- сучасність та майбутнє» (Одеса, ОНАЗ, 17-18 октября 2013), 23-rd "International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo`2013), (Sevastopol, Crimea, Ukraine, September 8-13 2013), Первая международная научно-практическая конференция "Проблемы инфокоммуникаций. Наука и технологии. PIC S&T" – 2013" (Харьков, Украина 9-11 октября 2013), 20th International Conference On Microwaves, Radar And Wireless Communications " Mikon-2014 (Gdansk, Poland, June 16 – 18 2014), VII Міжнародна науково-практична конференція "Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій" (Запоріжжя, Україна, 17-19 вересня 2014), XIIth International Conference "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, TCSET"2014" (Lviv-Slavske, Ukraine, February 25 – March 1 2014), 19-й Международный молодежный форум «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И МОЛОДЕЖЬ В XXI веке» (Харьков, 20 – 22 апреля 2015), The Third International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications. Science and Technology» PICS&T-2016 (Kharkiv, October 4–6 2016),

Публікації.

За темою дисертації опубліковано 30 наукових праць: 7 статей у фахових виданнях України, 1 стаття у іноземному виданні; 22 тези доповідей у матеріалах науково-технічних конференцій та форумів.

Структура дисертаційної роботи.

Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновку і списку використаних джерел. Загальний обсяг становить 156 сторінок. Дисертація містить 47 рисунків і 7 таблиць. Список використаних джерел налічує 133 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, вказані цілі роботи, викладена структура дисертації. Охарактеризована наукова новизна і практична значимість. Наведено дані про особистий внесок автора в роботах, виконаних самостійно і в співавторстві, відомості про публікації за темою дисертації.

У першому розділі виконаний аналіз технології когнітивного радіо, розглянуті методи управління та забезпечення їх адаптивності. Наведено огляд відомих методів виявлення сигналів для визначення незайнятих частотних каналів у когнітивних радіомережах. Наведена класифікація способів отримання відомостей про радіоспектр.

Когнітивне радіо – 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. 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 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 «незайняті» смуги частот.

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. Мати відомості про всі джерела радіовипромінювання не представляється можливим.

Як показав аналіз, основним недоліком більшості алгоритмів виявлення сигналів є необхідність апріорних відомостей щодо їх параметрів, а також значний час обробки інформації.

Одним із шляхів подолання апіорної невизначеності є застосування алгоритмів, що використовують для виявлення та розпізнавання сигналів зміну статистичних властивостей сигналів. АВ синтезовані на основі даних ознак не вимагають апіорних відомостей щодо характеристик сигналів. Для їх роботи достатньо навчальних вибірок шуму.

У другому розділі розглянуті запропоновані спектральні методи виявлення невідомих сигналів, розглянута процедура вибору порогових значень вирішальної статистики для фіксованого значення хибної тривоги.

Розглянемо деякі із запропонованих методів виявлення невідомих сигналів. Інформація про імовірнісні характеристики сигналу відсутня. Необхідно вирішити завдання виявлення невідомого сигналу на тлі випадкового шуму, заданого навчальною вибіркою.

При обробці спостережень в аналізованому частотному каналі висуваються дві гіпотези: H^1 – діє сигнал на тлі шуму; H^0 – діє тільки шум. На вході приймача маємо вектор спостережень \vec{X} у часовій області. При поданні цього вектора у деякому ортонормованому базисі i в припущенні некорельованості координат вектора спектральних відліків $\vec{C} = X^T V$, і при прийнятті рішень за вибіркою $\{\vec{X}_r, r = \overline{1, v}\}$ об'ємом v реалізацій вирішальне правило виявлення невідомих сигналів має вид:

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

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

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:

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

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 \bar{X}_v меншого обсягу $v \ll n$.

Для отримання записів реалізацій шуму та сигналів була використана установка, що складається з комп'ютера і SDR приймача, реалізованого на базі DVB-T (рис.1) тюнера, який за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення (SDR#), дозволяє проводити запис сигналів з ефіру.

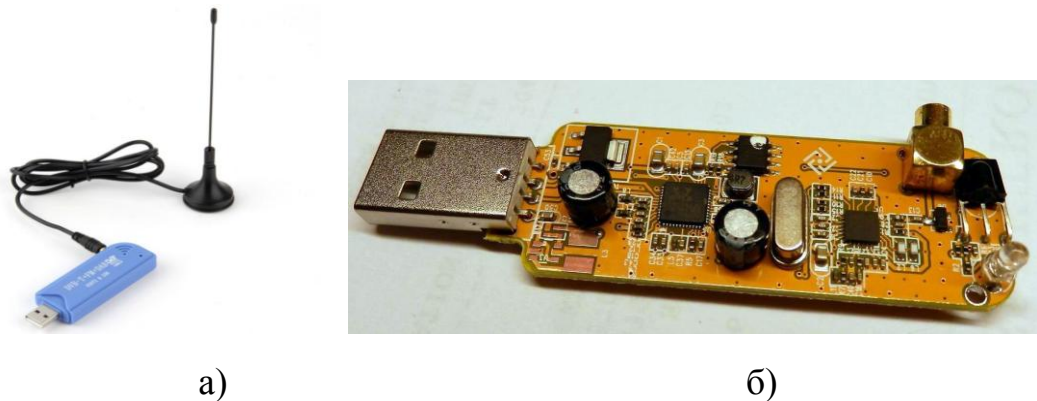


Рис. 1. DVB-T тюнер: а) зовнішній вид, б) внутрішній вид SDR пристрою

Результати дослідження показали, що в часовій області шум є некорельованим випадковим процесом і підпорядковується закону гаусового розподілу. 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 значущості становив 0.05, що підтверджує нульову гіпотезу про його однорідність.

Також були проведені дослідження статистичних характеристик шуму в разі представлення спостережень у гармонічному базисі Фур'є. Вибрано спектральне подання спостережень шуму у вигляді відліків амплітудного спектру. При цьому відліки амплітудного спектру підпорядковуються розподілу Райса, який за певних умов наближається до нормального розподілу. Як показують дослідження перехід у частотну область приводить до покращення характеристик виявлення невідомих

сигналів на фоні шуму, що особливо видно на менших значеннях ВСШ, не зважаючи на певне відхилення розподілу спостережень 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 спостережень «сигнал+шум» від «шуму» і таким чином покращуються результати виявлення сигналу. Отже у подальшому дослідження методів виявлення невідомих сигналів на фоні шуму проводились в спектральній області з використанням амплітудних спектрів спостережень.

На рис. 2. зображені отримані значення вирішальної статистики для вирішального правила (1). Розмірність блока ДПФ вибрана 512, кількість реалізацій для прийняття рішення $\nu=1$, кількість експериментів $N=1000$, $P_{(1/0)}=0.04$, $\Delta \approx 306$.

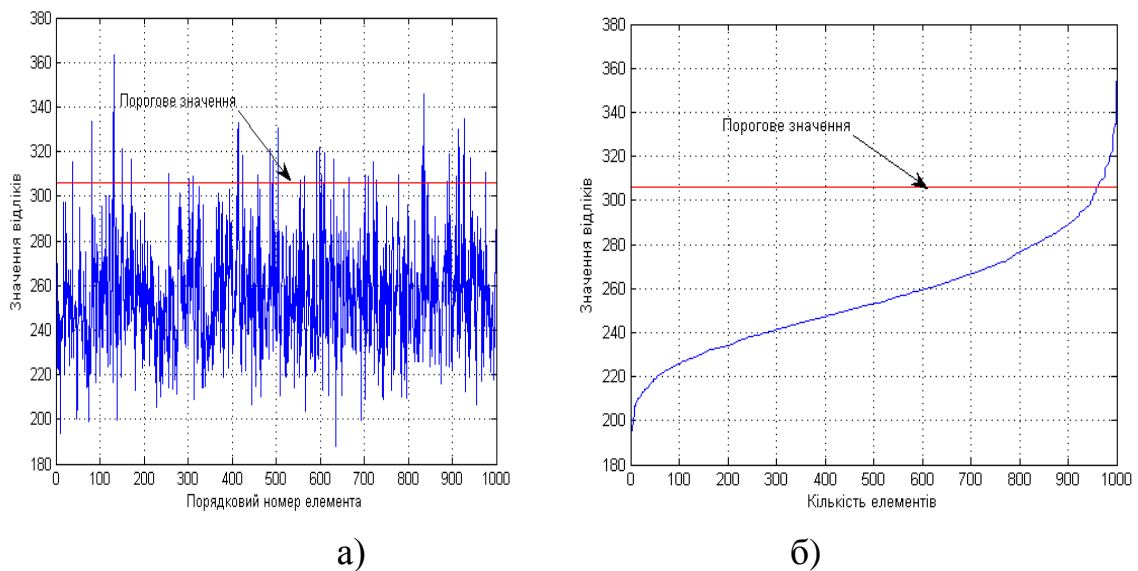
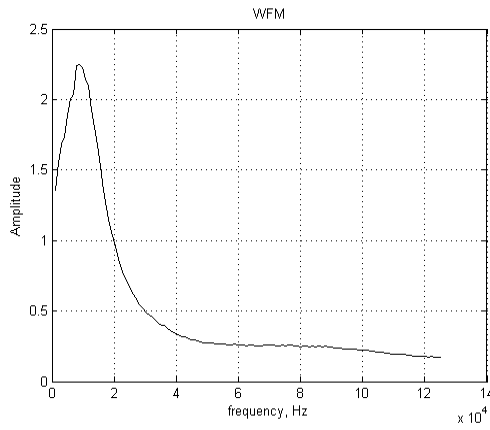


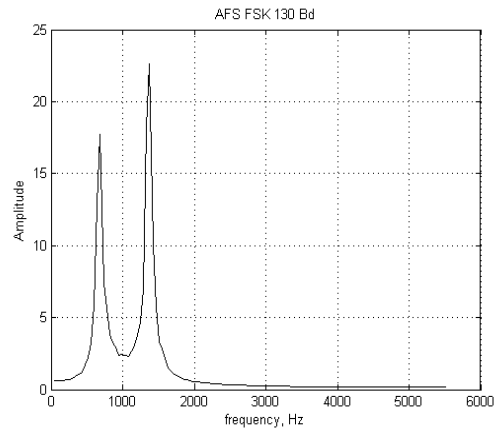
Рис. 2. Значення елементів вирішальної статистики (а); ранжовані значення вирішальної статистики (б)

У третьому розділі проведені дослідження робочих характеристик алгоритмів виявлення сигналів, реалізованих на основі запропонованих вирішальних правил. На рис. 3. зображені форми амплітудних спектрів сигналів, які розглядалися як невідомі сигнали, що з'являються на фоні шуму в аналізованому частотному каналі.

На рис. 4 наведені залежності оцінок ймовірності правильного виявлення невідомих сигналів від відношення сигнал-шум (SNR) для вирішального правила (1) та аналогічні залежності на рис. 5 для вирішального правила (2). При цьому вибрано значення $P_{(1/0)}=0.04$, а розмірність блоку ДПФ – 64. Для порівняння тут наведені отримані залежності для класичного енергетичного детектора (ED).

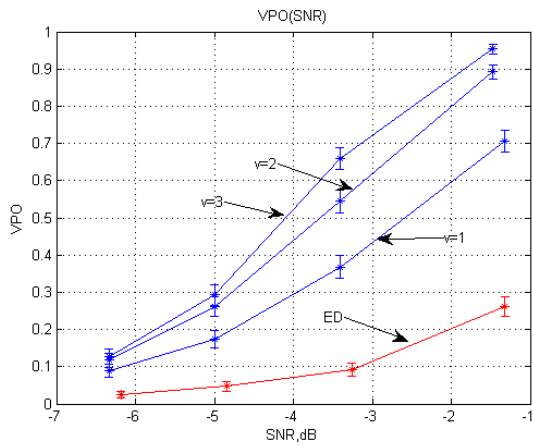


а)

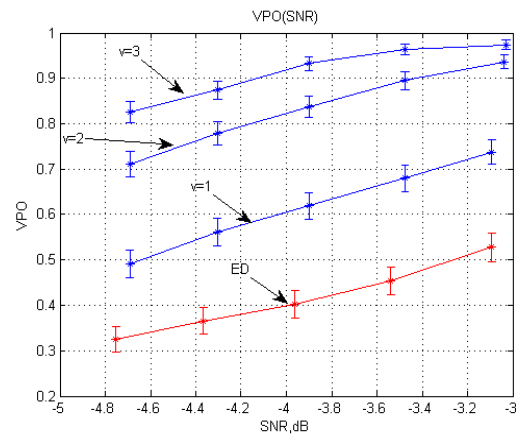


б)

Рис. 3. Амплітудні спектри сигналів: а) сигнал з широкосмуговою частотною модуляцією (WFM), б) сигнал з вузькосмуговою частотною маніпуляцією (FSK)

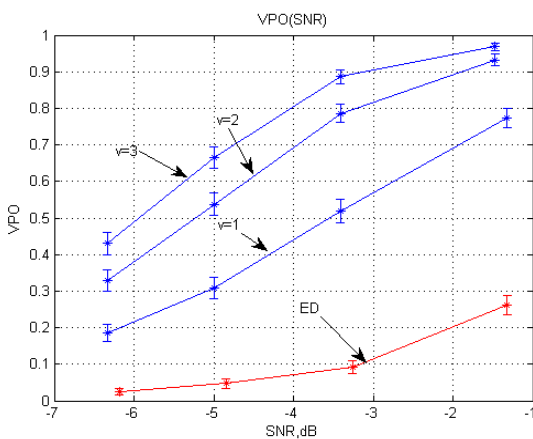


а)

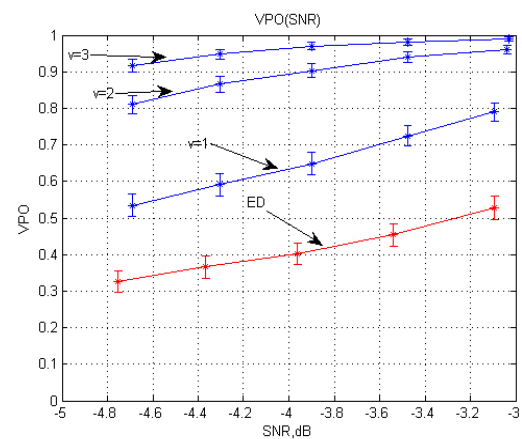


б)

Рис. 4. Залежності ймовірності правильного виявлення від ВСІШ для вирішального правила (1) (для сигналів WFM (а); FSK (б))



а)



б)

Рис. 5. Залежність ймовірності правильного виявлення від ВСІШ для вирішального правила (2) (для сигналів WFM (а); FSK (б))

У четвертому розділі розглянуто особливості вирішення задачі селекції і розпізнавання заданих сигналів за наявності невідомих сигналів. Дана процедура дозволить відрізнити сигнали первинних користувачів від вторинних, також вона може бути поєднана з радіоконтролем частот в цілому, який виконується на даний момент місцевими органами частотного регулювання. Для цього використовувалося наступне вирішальне правило:

$$\begin{aligned}
 H^1 : \sum_{j=1}^N \frac{(c_j - \mu_{jc}^i)^2}{(\sigma_{jc}^i)^2} &\leq \Delta_c^i; \quad i = \overline{1, M} \\
 \sum_{j=1}^N \frac{(c_j - \mu_{jc}^1)^2}{(\sigma_{jc}^1)^2} &\leq \sum_{j=1}^N \frac{(c_j - \mu_{jc}^k)^2}{(\sigma_{jc}^k)^2}, \quad k = \overline{1, M} \\
 H^0 : \sum_{j=1}^N \frac{(c_j - \mu_{jc}^i)^2}{(\sigma_{jc}^i)^2} &> \Delta_c^i, \quad i = \overline{1, M}
 \end{aligned} \tag{3}$$

де c_j – коефіцієнти розкладань вектора спостережень в базисі ДЕФ, μ_j^0 , $(\sigma_j^0)^2$ – оцінки математичних очікувань і дисперсій коефіцієнтів розкладань c_j , які оцінюються за навчальними вибірками заданих сигналів; 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 (3) отримано оцінки заданих сигналів на основі їх навчальних вибірок. Зауважимо, що у вирішальному правилі (3) не використовується інформація про параметри невідомих сигналів і отже не потрібні їх навчальні вибірки.

Під час дослідження були отримані реалізації 9 реальних сигналів, які спостерігались в діапазоні частот, регламентованому для роботи стандарту IEEE 802.22. Записи вибірок реалізацій сигналів проводилися з частотою дискретизації 250 кГц, і в смузі частот 125 кГц. На рис. 6 зображені амплітудні спектри 5 сигналів, що були вибрані в якості заданих сигналів. Вони отримані з усередненням за 100 реалізаціями і розмірності блоку ДПФ=512 відліків. Решта 4 сигнали розглядалися як невідомі.

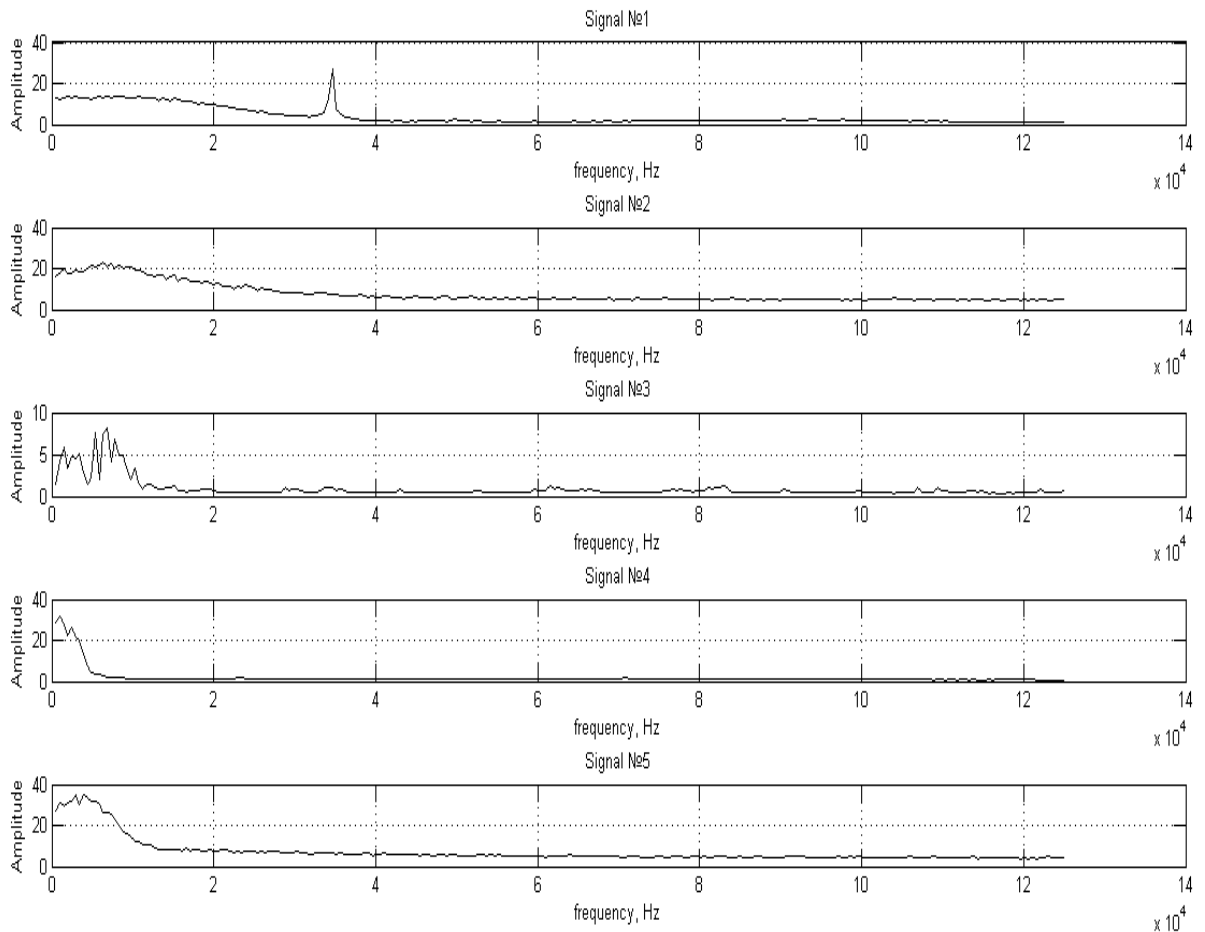


Рис.6. Усереднені амплітудні спектри заданих сигналів

У табл. 1 наведені результати досліджень у виді оцінок ймовірностей селекції та розпізнавання заданих сигналів $P(i/j)$ при спостереженні контрольних вибірок усіх 9 сигналів. Розмірність блоку ДПФ була обрана рівною 256.

Табл. 1. Результати селекції та розпізнавання заданих сигналів

	Сигнал (j), що подається на розпізнавання								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P(1/j)$	0.83	0	0	0	0	0	0	0	0
$P(2/j)$	0	0.84	0	0	0	0	0	0	0
$P(3/j)$	0	0.15	0.99	0	0	0	0	0	0
$P(4/j)$	0.02	0	0	0.97	0	0.04	0	0	0
$P(5/j)$	0	0	0	0	0.97	0	0	0	0
$P(0/j)$	0.15	0	0.01	0.03	0.03	0.96	1	1	1

У п'ятому розділі розглядається вирішення загальної задачі визначення незайнятих частотних каналів та надання їх вторинним користувачам в КР. Досліджується 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.

На рис. 7 зображена структура часового фрейму для КР із періодичним скануванням спектру. Кожен з фреймів включає один часовий слот для сканування і один часовий слот для передачі корисної інформації вторинними користувачами. Тривалість сканування позначається як τ , а тривалість фази передачі – T .

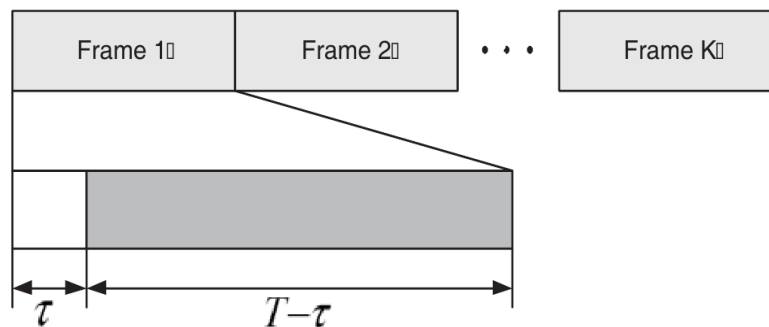


Рис. 7. Структура фрейму для КР з періодичним скануванням спектру

Тоді, використовуючи задану структуру часових рамок, досяжна вторинна пропускна здатність R_0 , коли частотний канал незайнятий первинним користувачем, визначається як:

$$R_0 = C_0 \Pr(H_0) \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) P_{(1/1)} \quad (4)$$

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 правильного виявлення та зменшення хибної тривоги, що в свою чергу приводить до підвищення ефективності визначення незайнятих частотних каналів. Проте це призводить до зменшення тривалості фази передачі даних вторинними користувачами і таким чином зменшує пропускну здатність вторинної мережі КР. Таким чином існує зв'язок між кількістю інтерференції для первинних користувачів і досяжною пропускною здатністю вторинної мережі КР в рамках тривалості фази сканування в структурі часового фрейму.

Якщо сигнал вторинного користувача є гаусовим, то пропускна здатність C_0 вторинної мережі під час відсутності первинного користувача може бути розрахована як

$$C_0 = \log_2(1 + \text{SNRs}) \quad (5)$$

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

За формулою (4) визначимо оптимальний час сканування з точки зору пропускної здатності для алгоритму виявлення невідомих сигналів заснованого на вирішальному правилі (2) при різних режимах функціонування: різній розмірності блоку ДПФ, різному $SNRs$, різній кількості вибірок v . Дослідження проводилися на широкосмуговому сигналі WFM зі смугою 125 кГц. Кількість експериментів $N=1000$, прийнято, що $Pr(H_0)=0,75$, $SNRs=20$ дБ, тривалість фрейму $T=100$ мс.

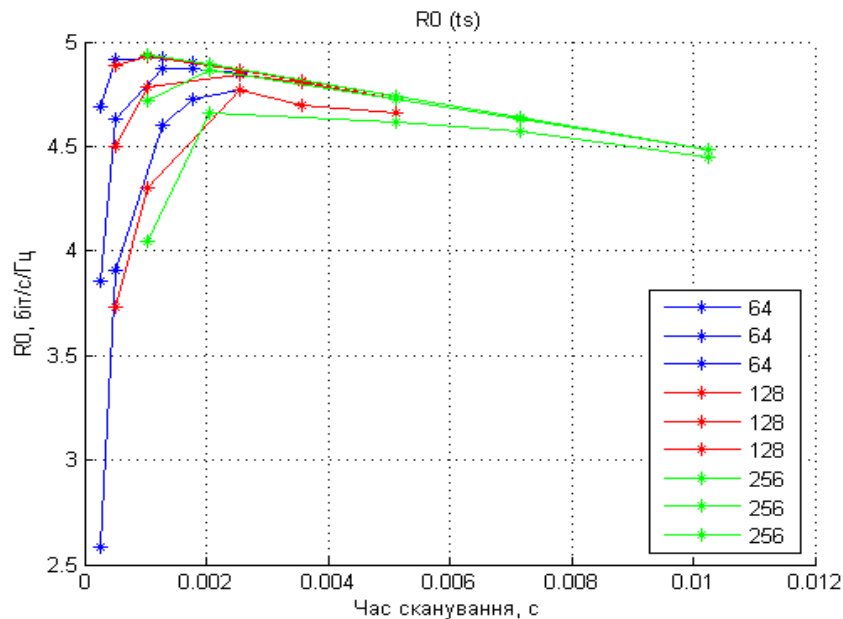


Рис. 8. Залежність нормованої досяжної пропускної здатності для вторинної мережі КР від часу сканування (v) при різних значеннях ВСШ та різних розмірностях ДПФ ($T = 100$ мс)

Результати досліджень (рис. 8) 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. Слід зазначити, що ефективність виявлення є досить близькою для розмірностей ДПФ від 64 до 256, при значенні ВСШ, яке дорівнює 1дВ. Проте при зменшенні ВСШ більш ефективним є використання менших значень розмірності ДПФ при більшій кількості реалізацій v , при загальній однакової тривалості фази сканування.

На рис. 9 показана блок-схема алгоритму визначення незайнятих частотних каналів та надання їх вторинним користувачам КР.

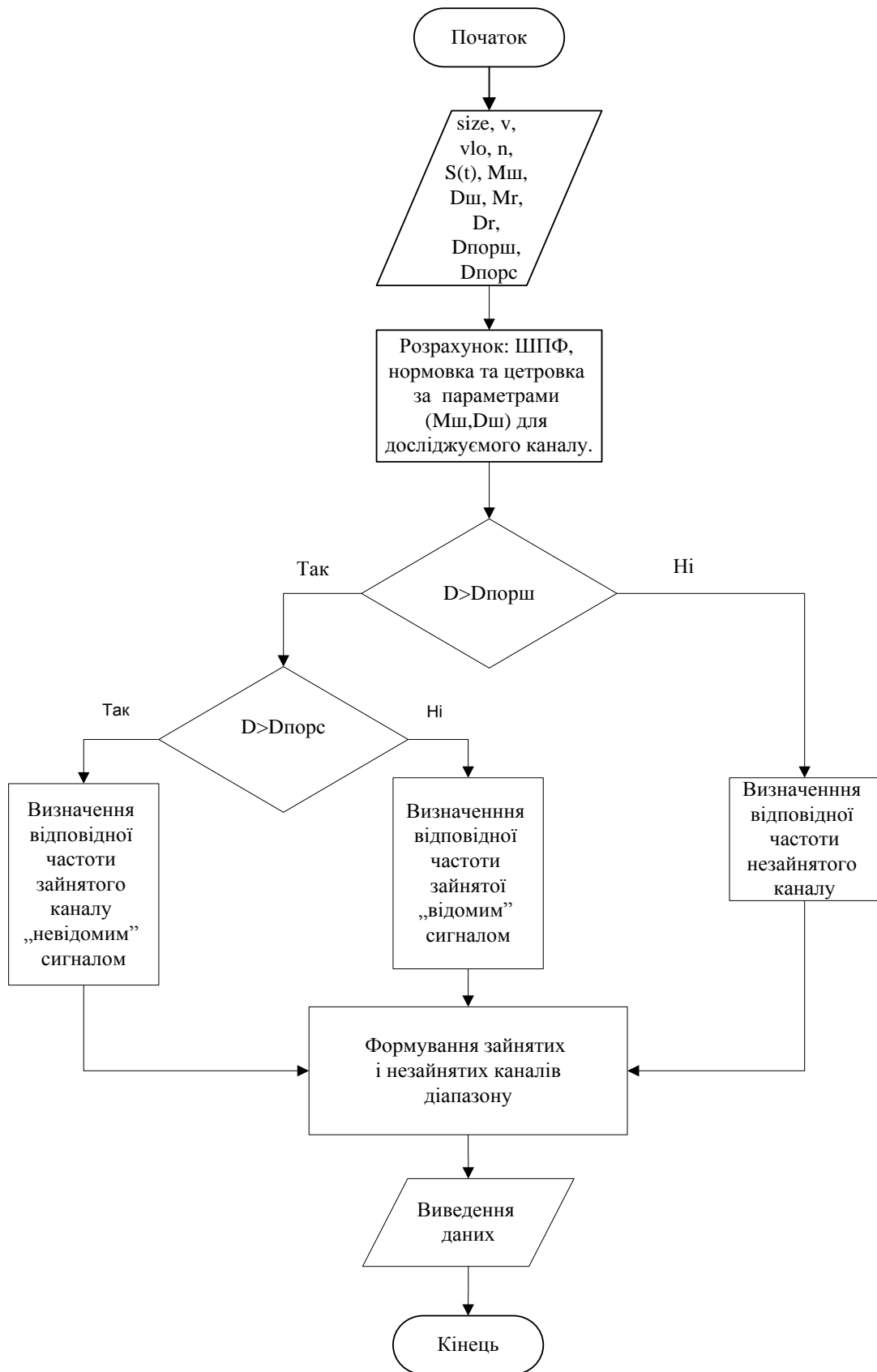


Рис. 9. Блок-схема алгоритму визначення незайнятих частотних каналів та надання їх вторинним користувачам КР на основі вирішального правила (1)

ВИСНОВКИ

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

При цьому отримані наступні результати роботи:

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

2. Запропоновані методи виявлення незайнятих каналів у КР із використанням методів виявлення невідомих сигналів, які базуються на зміні статистичних характеристик. Отримані результати досліджень підтверджують працездатність розглянутих алгоритмів виявлення невідомих сигналів. Для цих цілей були використані 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.

3. Дослідження робочих характеристик запропонованих методів виявлення, дозволяє зробити висновок, що їх застосування є ефективним при ВСШ в діапазоні від -7 дБ для сигналів, що досліджувалися.

4. Вирішена задача розпізнавання сигналів в КР. Її вирішення може бути необхідним при визначенні приналежності виявленого сигналу до класу вторинних або первинних користувачів або визначенні появи нових, раніше невідомих користувачів.

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

6. Отримані результати роботи були впроваджені при виконанні держбюджетної НДР, а також у навчальному процесі ХНУРЕ, що підтверджується відповідними актами впровадження.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ 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 "Microvave & 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 «UkrMiCo`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. Иваненко, В.М. Безрук, Калюжний М.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 «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. Иваненко, В.М. Безрук // Радиоэлектроника 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. Иваненко // Радиотехника: Всеукр. межвед. 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. Иваненко // 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. Іваненко 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.

АННОТАЦИЯ

Иваненко С. А. Определение незанятых частотных каналов в когнитивных радиосетях методами обнаружения и распознавания сигналов в условиях априорной неопределенности. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 - радиотехнические и телевизионные системы. - Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2019.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научной задачи определения незанятых частотных каналов в когнитивных радиосетях.

Проведен анализ существующих методов обнаружения первичных пользователей частотного ресурса. В результате анализа были выявлены определенные недостатки рассмотренных методов их использования для задач поиска незанятых частотных каналов в когнитивных радиосетях. В основном это обусловлено тем, что большинство из них требуют априорной информации относительно сигналов, которые необходимо выявить.

С целью решения задачи определения незанятых частотных каналов в когнитивных радиосетях предложено использование методов обнаружения изменений статистических свойств сигналов. Данные алгоритмы позволяют обнаруживать неизвестные сигналы с целью нахождения незанятых частотных каналов в условиях априорной неопределенности.

Исследованы рабочие характеристики и выполнен сравнительный анализ разработанных алгоритмов путем имитационного моделирования на ЭВМ с использованием реальных сигналов, работающих в диапазоне частот стандарта. Проведен анализ эффективности работы данных алгоритмов.

Осуществлен выбор оптимальных алгоритмов обнаружения сигналов по совокупности показателей качества методами многокритериальной оптимизации.

Найдено оптимальное время сканирования при обнаружении сигналов предложенными методами. Выработаны рекомендации по использованию алгоритмов обнаружения и распознавания сигналов во время сканирования спектра.

Ключевые слова: алгоритмы обнаружения неизвестных сигналов, когнитивная радиосеть, частотный ресурс, радиомониторинг, эффективность использования радиоспектру, сканирование, распознавание, априорная неопределенность.

АНОТАЦІЯ

Иваненко С.А. Визначення незайнятих частотних каналів у когнітивних радіомережах методами виявлення та розпізнавання сигналів в умовах апріорної невизначеності. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 - радіотехнічні та телевізійні системи. - Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2019.

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

Проведено аналіз існуючих методів виявлення первинних користувачів частотного ресурсу. В результаті аналізу були виявлені певні недоліки розглянутих методів щодо їх використання для задач визначення незайнятих частотних каналів у когнітивних радіомережах.

Наукова новизна отриманих результатів:

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.

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.

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

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 з відомих.

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

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

ABSTRACT

Ivanenko S.A. Determination of unoccupied frequency channels in cognitive radio networks by methods of detection and recognition of signals under a priori uncertainty. - Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical Sciences in the specialty 05.12.17 - radio and television systems. - Kharkiv national University of radio electronics, Kharkiv, 2019.

The dissertation work is devoted to solving the actual scientific problem of determining the unoccupied frequency channels in cognitive radio networks.

The analysis of existing methods for identifying the primary users of the frequency resource was performed. As a result of the analysis, certain drawbacks of the considered methods of determining the unoccupied frequency channels in cognitive radio networks were revealed.

Scientific novelty of the results:

New methods of detection of unoccupied frequency channels in cognitive radio networks are proposed, which differ in the use of methods of detection of unknown signals under a priori uncertainty and based on changes in the probabilistic properties of observations. The proposed methods make it possible to increase the efficiency of the definition of unoccupied frequency channels in cognitive radio networks.

There is a further development of methods of identification of unknown signals based on the change in the probabilistic properties of the observations. The distinguishing feature of these methods is the use of information only about the noise in the frequency channel and decision-making in the spectral region.

The performance characteristics of spectral methods for detecting unknown signals using real signals and noises in the cognitive radio frequency range are studied for the first time.

For the first time the problem of recognition of given signals in the presence of unknown signals during radio monitoring in cognitive radio networks is solved, the distinctive feature of which is the use of training samples only for given signals. The usage of the proposed selection and recognition algorithms avoids recognition errors when an unknown signal can be defined as one of known.

For the first time, an algorithm for determining unoccupied frequency channels for their provision to secondary users of cognitive radio networks using non-classical methods of signal detection and recognition under a priori uncertainty of spectrum scanning is proposed.

Keywords: algorithms for detection of unknown signals, cognitive radio network, frequency resource, radio monitoring, radiospectral efficiency, scanning, recognition, a priori uncertainty.