

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ інфокомунікацій \_\_\_\_\_  
(повна назва)

Кафедра \_\_\_\_\_ інформаційно-мережної інженерії \_\_\_\_\_  
(повна назва)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_

Дослідження непараметричних алгоритмів виявлення незайнятих

частотних каналів в мережах когнітивного радіо

(тема)

Виконав:  
студент 2 курсу, групи \_\_\_\_\_ ІМІМ-19-2 \_\_\_\_\_

Спеціальності \_\_\_\_\_ 172 Телекомунікації та \_\_\_\_\_  
радіотехніка \_\_\_\_\_  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми: \_\_\_\_\_ освітньо-наукова \_\_\_\_\_  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма \_\_\_\_\_ Інформаційно-  
мережна інженерія \_\_\_\_\_  
(повна назва освітньої програми)

\_\_\_\_\_ Пономарьов А.К. \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Керівник \_\_\_\_\_ проф. Безрук В.М. \_\_\_\_\_  
(посада, прізвище та ініціали)

Допускається до захисту  
Зав. кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_ Безрук В.М. \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

2021 р.

Не містить відомостей, заборонених до відкритого публікування

Студент \_\_\_\_\_ Пономарьов А.К.

Керівник \_\_\_\_\_ Безрук В.М.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ інфокомунікацій \_\_\_\_\_  
Кафедра \_\_\_\_\_ інформаційно-мережної інженерії \_\_\_\_\_  
Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_  
Спеціальність \_\_\_\_\_ 172 Телекомунікації та радіотехніка \_\_\_\_\_  
(код і повна назва)  
Тип програми \_\_\_\_\_ освітньо-наукова \_\_\_\_\_  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)  
Освітня програма \_\_\_\_\_ Інформаційно-мережна інженерія \_\_\_\_\_  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові \_\_\_\_\_ Пономарьову Андрію Костянтиновичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи \_\_\_\_\_ Дослідження непараметричних алгоритмів виявлення незайнятих частотних каналів в мережах когнітивного радіо

затверджені наказом по університету від "12" березня 2021 року № 350 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 25 травня 2021р.

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_ Провести аналіз непараметричних алгоритмів виявлення, таких як: двовибірковий знаковий, одновибірковий знаково-ранговий, енегетичний детектор. На базі проведеного аналізу розглянути, який алгоритм є найефективнішим. Провести симуляцію роботи детектору Вілкоксона та енергодетектора для перевірки зайнятості каналу зв'язку.

4. Перелік питань, які потрібно опрацювати в роботі

Вступ

1 Мета, задачі та аналіз технології когнітивного радіо

2 Моніторинг спектра

3 Непараметричні алгоритми виявлення сигналу

4 Практична реалізація алгоритму Вілкоксона

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів)

Слайди у форматі Power Point (назва, розподілення спектру частот, когнітивне радіо, моніторинг спектра, аналіз спектра, алгоритми виявлення, порівняння алгоритмів виявлення, пороговий алгоритм, G-критерій знаків, алгоритм знакового критерію, T-критерій Вілкоксона, алгоритм знаково-рангового критерію, реалізація алгоритму на базі тесту Вілкоксона у програмному середовищі MATLAB, результати реалізації алгоритмів, висновки).

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Ознайомлення із завданням. Уточнення ТЗ.	12.03.2021	
2	Підбір літератури за темою роботи.	15.03-16.03.21	
3	Виконання розділу 1	17.03-27.03.21	
4	Виконання розділу 2	28.03-07.04.21	
5	Виконання розділу 3	08.04-19.04.21	
6	Виконання розділу 4	20.04-07.05.21	
7	Оформлення пояснювальної записки	08.04-10.05.21	
8	Оформлення презентаційного матеріалу, підготовка до захисту в ЕК	11.05-20.05.21	

Дата видачі завдання 12 березня 2021р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

проф. Безрук В.М.  
(посада, прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 71 с., 26 рис., 2 табл., 3 додатка, 27 джерел

Об'єкт роботи – непараметричні алгоритми детектування сигналу.

Мета роботи – розглянути непараметричні алгоритми виявлення сигналу в каналі зв'язку та реалізувати деякі з них, провести аналіз ефективності двох алгоритмів.

В роботі було розглянуто такі непараметричні алгоритми виявлення, як: двовибірковий знаковий, одновибірковий знаково-ранговий, енергетичний детектор. На основі отриманих результатів можна вважати, що найефективнішим з розглянутих алгоритмів є знаково-ранговий алгоритм Вілкоксона. Основним недоліком критерію є те, що у порівнянні з аналогічними параметричними він програє у ефективності, але значно виграє у простоті та підходить для вирішення поставленою задачі. В роботі було реалізовано симуляцію роботи детектору Вілкоксона та енергодетектора для перевірки зайнятості каналу зв'язку. Показано, що енергетичний детектор сильно поступається за параметром імовірності правильного виявлення сигналу в каналі при рівних значеннях сигнал/шум у суміші в каналі.

МЕРЕЖА КОГНІТИВНОГО РАДІО, НЕПАРАМЕТРИЧНІ КРИТЕРІЇ,  
ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ДЕТЕКТОР, АЛГОРИТМИ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛУ,  
ВІЛЬНІ ЧАСТОТНІ КАНАЛИ

## THE ABSTRACT

Explanatory note: 71 p., 26 fig., 2 tabl., 3 app, 27 sources.

The object of work – non-parametric signal detection algorithms.

The purpose of the work is to consider non-parametric algorithms for signal detection in the communication channel and to implement some of them, to analyze the effectiveness of the two algorithms.

The paper considers such non-parametric detection algorithms as: two-sample sign, one-sample sign-rank, energy detector. Based on the results obtained, we can assume that the most efficient of the considered algorithms is the sign-rank Wilcoxon algorithm. The main disadvantage of the criterion is that in comparison with similar parametric it loses in efficiency, but significantly wins in simplicity and is suitable for solving the problem. The simulation of the Wilcoxon detector and the energy detector to check the occupancy of the communication channel was implemented. It is shown that the energy detector is much inferior to the parameter of the probability of correct detection of the signal in the channel at equal values of signal / noise in the mixture in the channel.

COGNITIVE RADIO NETWORK, NON-PARAMETRIC CRITERIA,  
ENERGY DETECTOR, SIGNAL DETECTION ALGORITHMS, FREE  
FREQUENCY CHANNELS

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
1 МЕТА, ЗАДАЧІ ТА АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ КОГНІТИВНОГО РАДІО	11
2 МОНІТОРИНГ СПЕКТРА	22
2.1 Аналіз проблеми моніторингу спектра	22
3 НЕПАРАМЕТРИЧНІ АЛГОРИТМИ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛУ	25
3.1 G-Критерій знаків	26
3.2 T-Критерій Вілкоксона	29
3.3 Енергетичний детектор	30
4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ ВІЛКОКСОНА	34
ВИСНОВКИ	41
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	42
ДОДАТОК А	45
ДОДАТОК Б	51
ДОДАТОК В	62

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- CRS – Cognitive Radio System – когнітивна радіосистема;
- IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers – Інститут інженерів з електротехніки та електроніки;
- ITU-T – International Telecommunication Union - Telecommunication sector – Міжнародного союзу телекомунікацій;
- FSK – Frequency Shift Keying – частотна маніпуляція;
- MIMO – Multiple Input Multiple Output – системи зв'язку з рознесеними передавальними і приймальними антенами;
- OFDM – Orthogonal frequency-division multiplexing – мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів;
- OODA – Observe Orient Decide Act – спостерігати, орієнтуватися, вирішувати, діяти;
- SDR – Software-Defined Radio – програмоване радіо;
- STBC – Space-Time Block Code – просторово-часовий блоковий код;
- Wi-Fi – Wireless Fidelity – технологія бездротової локальної мережі;
- WIMAX – Worldwide Interoperability for Microwave Access – технологія бездротового широкопasmового доступу;
- WLAN – Wireless Local Area Network – бездротова локальна мережа;
- WRAN – Wireless Regional Area Network – бездротова регіональна мережа;
- ABE – асимптотична відносна ефективність;
- АГБШ – адитивний гаусівський білий шум;
- SNR – Signal -to-Noise Ratio – відношення сигнал/шум;
- ВЧ – висока частота;
- ДВЧ – дуже високі частоти;
- ДПФ – дискретне перетворення Фур'є;
- КР – когнітивне радіо;
- УВЧ – ультрависокі частоти;
- ШПФ – швидке перетворення Фур'є.

## ВСТУП

В даний час відбувається швидкий розвиток систем радіопередачі даних. Постійно зростаючі вимоги до швидкості та обсягу переданої інформації спонукають розробників таких систем використовувати широкосмугові канали зв'язку. У той же час зростає потреба в більш ефективному використанні спектру для забезпечення доступу до інформаційних ресурсів для нових користувачів.

Сьогодні розподіл смуг частот між операторами зв'язку здійснюється на підставі відповідних ліцензій Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сфері зв'язку та інформатизації (НКРЗІ). Ліцензовані діапазони можуть використовуватись лише операторами, яким вони призначені. Однак кінцевими ресурсами є діапазони радіочастот, в яких здатні працювати сучасні системи мобільного зв'язку. Дослідження показують [1], що використання цього ресурсу не ефективно на всіх доступних частотах. Одним із підходів до вирішення цієї проблеми є концепція когнітивного радіо.

Когнітивне радіо (КР) – це бездротова інтелектуальна система зв'язку, здатна аналізувати навколишнє середовище та пристосовуватися до нього через навчання, реагувати на зміни в навколишньому середовищі, змінюючи власні параметри в режимі реального часу з метою підвищення ефективності використання спектральних ресурсів [2].

Використання систем когнітивного радіо згідно первісної ідеї дозволяє радіоінтерфейсу передавача і приймача змінювати свої фізичні параметри, що дозволяє передавати дані за зміненим радіоканалом для забезпечення кращого якості обслуговування. Однак, сучасне поняття «когнітивне радіо» не обмежується тільки радіоінтерфейсом, воно може бути застосовано в області телекомунікацій з властивими даному поняттю основними завданнями дослідження. Відмінною рисою систем КР є їх здатність виявляти та динамічно використовувати незайняті смуги радіочастот для доступу абонентів до мережі КР. Ця можливість досягається автономним моніторингом радіочастотного спектра у всьому робочому діапазоні радіочастот, який може коливатися від одиниць МГц до декількох ГГц і залежно від стандарту використовує когнітивні функції.

В даний час питання розробки дослідження алгоритмів, призначених для використання в системах когнітивного радіо, знаходяться в стадії дослідження.

Сучасні стандарти бездротової передачі даних комбінують в собі вузькосмугові і широкосмугові сигнали, що використовують різні види модуляцій [3], що не дозволяє створити єдину модель для статистичного опису всіх типів використовуваних сигналів, тому особливу увагу при розробці АТ для систем КР слід звернути на непараметричні методи виявлення.

У цій магістерській роботі завдання полягає у аналізі теоретичних положень побудови систем когнітивного радіо та принципів їх роботи, реалізації непараметричного алгоритму визначення сигналу в когнітивних радіомережах та порівняння його з іншими методом моніторингу спектру.

## 1 МЕТА, ЗАДАЧІ ТА АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ КОГНІТИВНОГО РАДІО

Через швидкий розвиток бездротових телекомунікаційних систем, таких як стільниковий та супутниковий зв'язок, локальні мережі Wi-Fi та WIMAX, існує проблема відсутності діапазону частот. Тобто виділений та ліцензований частотний спектр перевантажений у певних смугах частот, тоді як неліцензовані частоти використовуються недостатньо або взагалі не використовуються. Вирішенням цієї проблеми може стати динамічне управління радіочастотним спектром, яке завдяки інтелектуальному керуванню під час озвучення радіопростору здатне самостійно і за короткий проміжок часу перемикається між тимчасово незайнятими ліцензованими частотами («білі плями») [4].

Підхід до побудови когнітивної радіосистеми, яку також називають інтелектуальним радіо, є передовою технологією, що забезпечує ефективне використання радіочастотного спектру. Відмінними рисами когнітивного радіо є здатність усіх трансиверів адаптивно приймати і передавати сигнал при зміні радіочастот, а також при зміні типу модуляції, типу кодування та інших параметрів системи [5,6,7].

Комп'ютерна система, що використовується в когнітивній радіосистемі, повинна збирати інформацію про радіосередовище та розробляти різні стратегії, засновані на інформації, доступній для роботи системи зв'язку. Когнітивна система радіозв'язку під час навчання повинна враховувати особливості смуги частот, що використовуються, та прийнятні конфігурації існуючого обладнання. Когнітивні радіостанції мають можливість динамічно визначати та використовувати частотний діапазон для доступу до мережі.

Спочатку передбачалося, що когнітивне радіо буде своєрідним продовженням програмованого радіо (SDR – Software-Defined Radio), але в даний час час є значною частиною дослідницької роботи, визначеної щодо когнітивного радіо, що розпізнає (зчитує) радіочастотний спектр, зокрема в теледіапазонах. Для подальшої роботи необхідно розуміти відмінності між когнітивною системою (CRS – Cognitive Radio System) та програмним радіо (SDR), для цього можна відкрити звіт Міжнародного союзу телекомунікацій ITU-R (ITU-T) SM.2152: Радіопристрій з програмованими параметрами (SDR):

радіопередавач та/або радіоприймач із використанням технології, що дозволяє програмному забезпеченню встановлювати або змінювати робочі параметри радіочастоти, включаючи, зокрема, діапазон частот, тип модуляції або вихідну потужність, за винятком змін в робочих параметрах, що використовуються у звичайній заздалегідь визначеній роботі попередніх налаштувань радіо відповідно до специфікації або системного стандарту.

Когнітивна радіосистема (CRS): радіосистема, яка використовує технологію, що дозволяє системі отримати знання про своє робоче та географічне середовище, встановлені правила та внутрішній стан; динамічно та автономно регулювати експлуатаційні параметри та протоколи відповідно до набутих знань для досягнення заздалегідь встановлених цілей; і вчитися на результатах.

За визначенням, це когнітивна система (CRS), а не програмований пристрій (SDR) виконує функції збору інформації, враховує задані правила та динамічно регулює необхідні параметри [8].

Особливості когнітивних радіосистем представлені на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Особливості когнітивних радіосистем

При взаємодії з радіосистемою для когнітивної системи найважливішими критеріями є налаштування трансиверів (тип модуляції, її параметри, діапазон частот, тощо) та аналіз результатів вимірювань. Основна проблема, яку необхідно вирішити при розробці когнітивних радіосистем, є завданням багатокритеріальної оптимізації. Ці завдання в когнітивних радіосистемах повинні вирішуватися в режимі онлайн для постійно мінливого

радіосередовища. Для вирішення проблеми моніторингу навколишнього середовища повинна існувати пізнавальна радіосистема, що буде доповнена датчиками, які забезпечують інформацію щодо навколишньої середовища [10].

Принцип роботи когнітивного радіо.

У зв'язку з тим, що система повинна вирішувати задачі багатокритеріальної оптимізації в реальному часі, когнітивний блок повинен включати безліч цільових функцій, методи їх аналізу та алгоритми оптимізації цих цільових функцій в залежно від характеристик радіосистеми. Отже таким чином когнітивна одиниця повинна мати наступну функціональність: здатність спостерігати за радіосередовищем, адаптуватися до постійно мінливого середовища, планувати дії, приймати рішення, вчитися та власно діяти.

На рис.1.2 описана спрощена модель КР та призначення блоків системи [10].

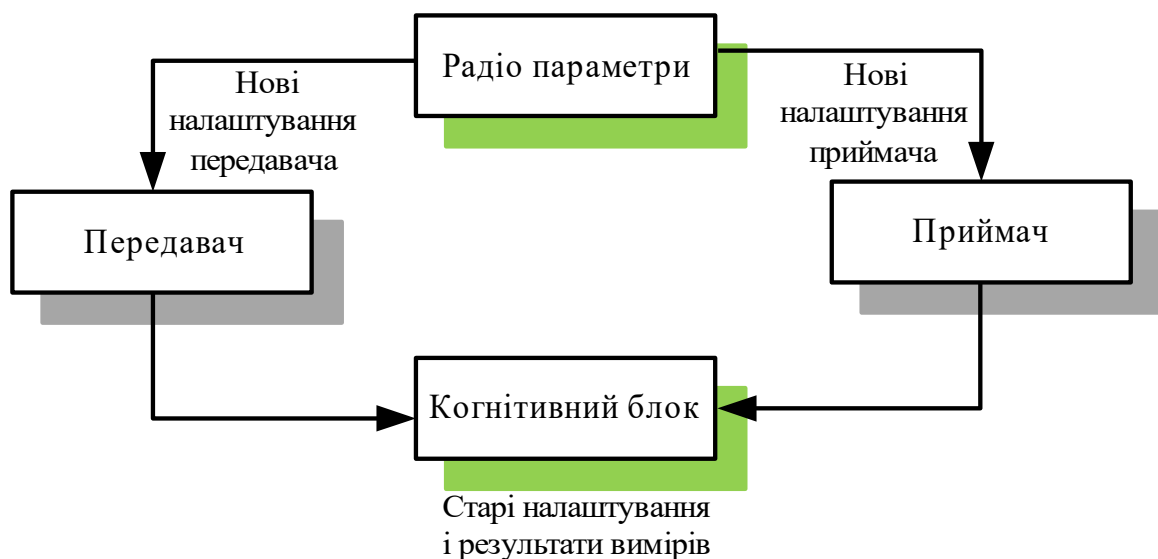


Рисунок 1.2 – Спрощена модель когнітивної радіосистеми

Формально когнітивне радіо визначається як радіо, яке може переконфігурувати параметри трансивера на основі взаємодії з навколишнім середовищем [11]. Таким чином визначаються дві основні характеристики когнітивного радіо, які представлені на рис. 1.3.

Як показано на рис. 1.4, когнітивність дозволяє використовувати тимчасово незайняті смуги спектру, які називаються «спектральними дірами» або «білими плямами» [10].

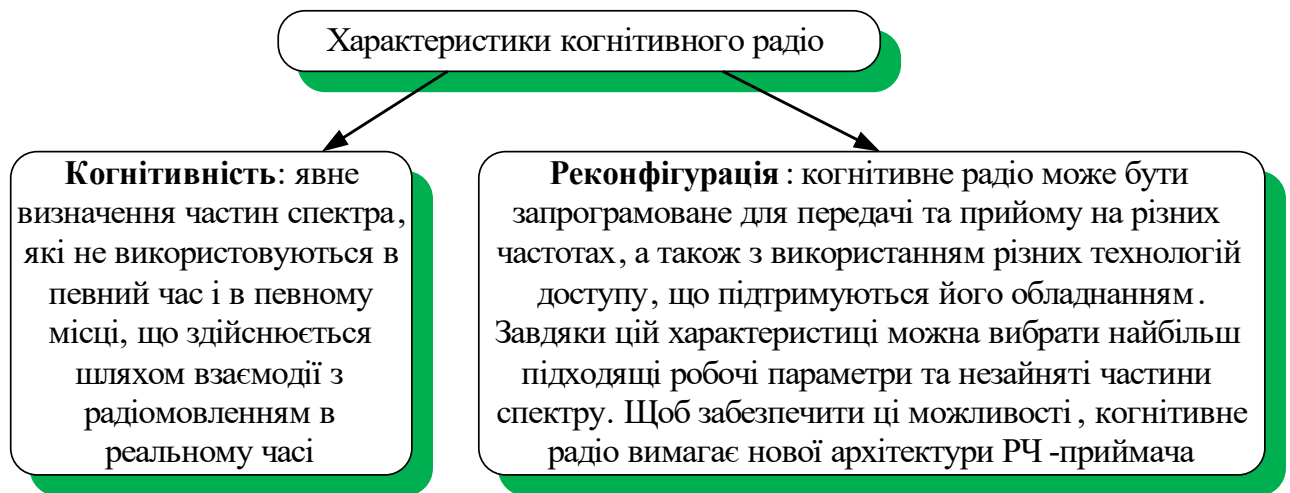


Рисунок 1.3 – Дві основні характеристики когнітивного радіо

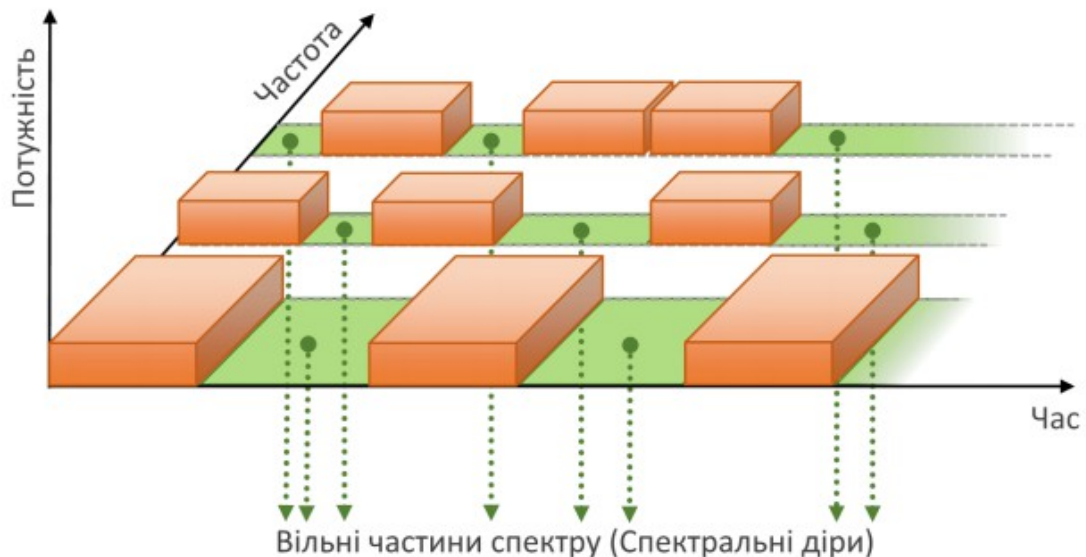


Рисунок 1.4 – Концепція вибору вільних частин спектра

Отже, найкращий діапазон спектру можна вибрати для спільного використання з іншими користувачами та працювати без втручання в роботу ліцензованих користувачів.

На рис. 1.5 радіочастотний інтерфейс приймає сигнал, підсилює його, зміщує та подає на аналого-цифрове (А/D) перетворення.

В блоці обробки основного діапазону сигнал модулюється або демодулюється. Кожен компонент може бути налаштований за допомогою шини управління для адаптації до змінного середовища РЧ.

Останньою особливістю когнітивного приймача є широкосмуговий РЧ-інтерфейс, який може одночасно сканувати в широкому діапазоні частот. Ця функція головним чином пов'язана з технологіями радіочастотного обладнання, такими як широкосмугова антена, підсилювач потужності, адаптивний фільтр [12].

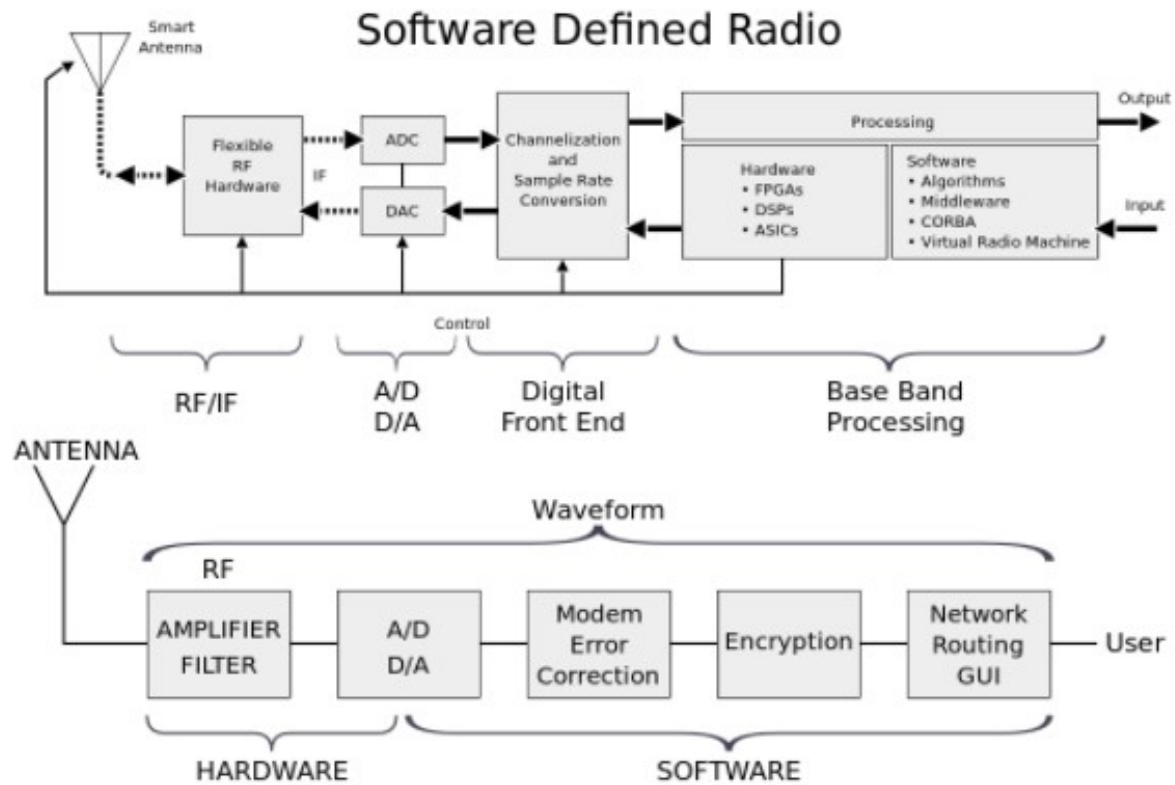


Рисунок 1.5 – Блок-схема прийомо-передавача SDR

Бездротове обладнання КР має бути налаштоване на будь-яку частину широкого спектру. Однак, оскільки приймач КР приймає сигнали від різних передавачів, що працюють на різних рівнях потужності, діапазонах частот і місцях розташування, радіочастотний інтерфейс повинен мати можливість виявляти слабкий сигнал у широкому динамічному діапазоні, що є головною проблемою у проектуванні КР трансиверів [14].

На рис. 1.6. видно, що радіосистема КР, як і SDR, має програмно-конфігуративну платформу, але на відміну від SDR, КР має когнітивний модуль [15].

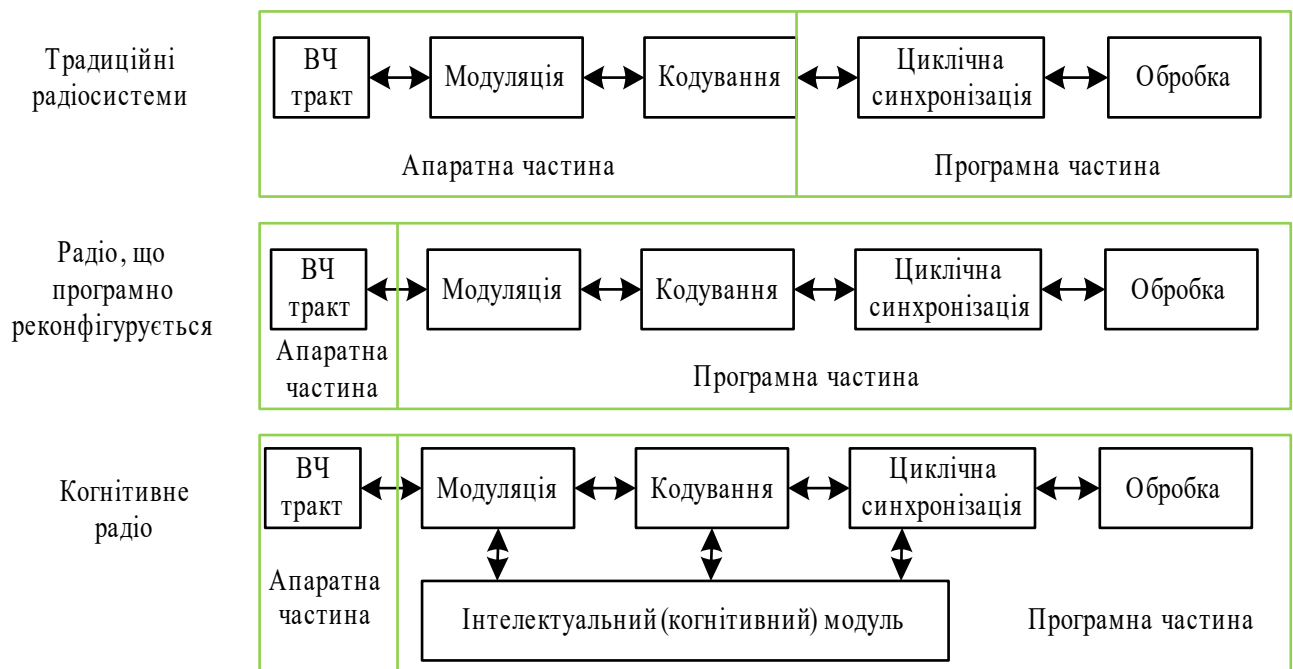


Рисунок 1.6 – Модель системи когнітивного радіо в порівнянні з іншими

Властивість когнітивності по відношенню до радіосистеми, означає її здатність вирішувати завдання моніторингу спектру, виявлення незайнятих частотних смуг, аналіз параметрів радіоканалу, оцінки переданої по каналу інформації, прогноз стану радіоканалу, контроль рівня потужності випромінювання і керування процесом динамічного доступу до спектру.

#### Структура систем КР.

Для здійснення своїх функцій КР повинно мати деяке обладнання, що складається з елементів, що відповідають за формування та обробку радіосигналів (радіоплатформа з можливістю переконфігурації) представлено на рис. 1.7.

На рис. 1.8. представлена структурна схема КР з її функціональними блоками [10].

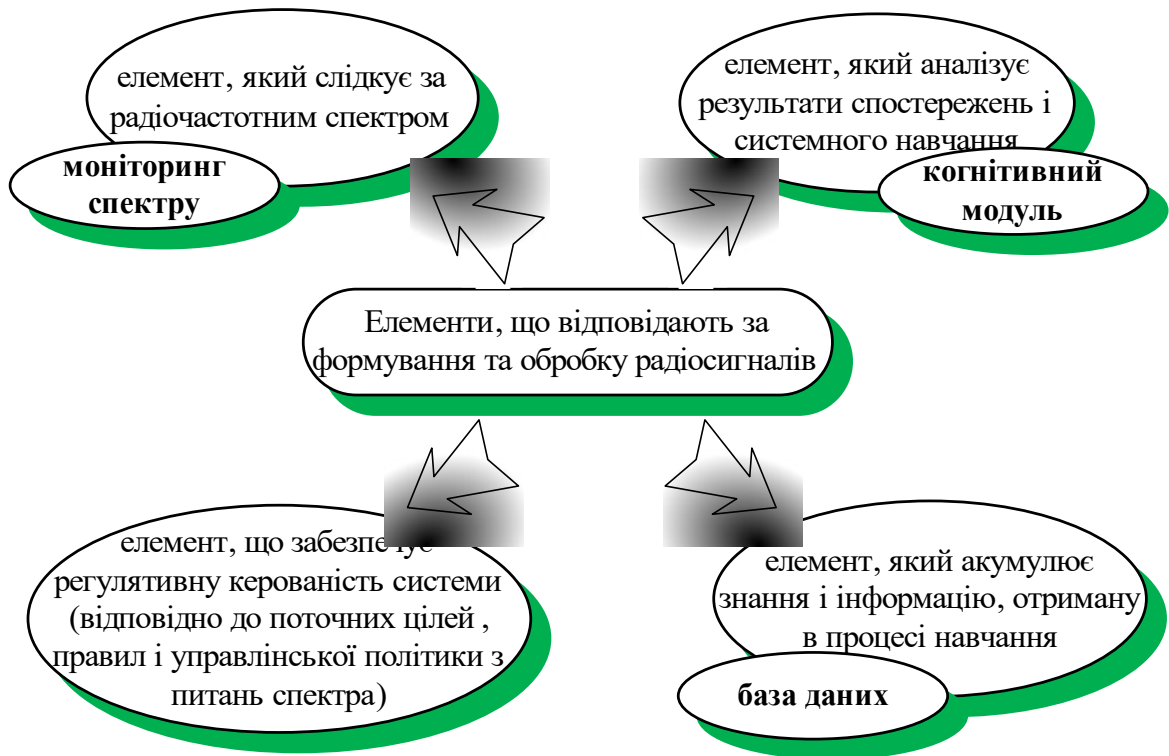


Рисунок 1.7 – Елементи, що відповідають за формування та обробку радіосигналів

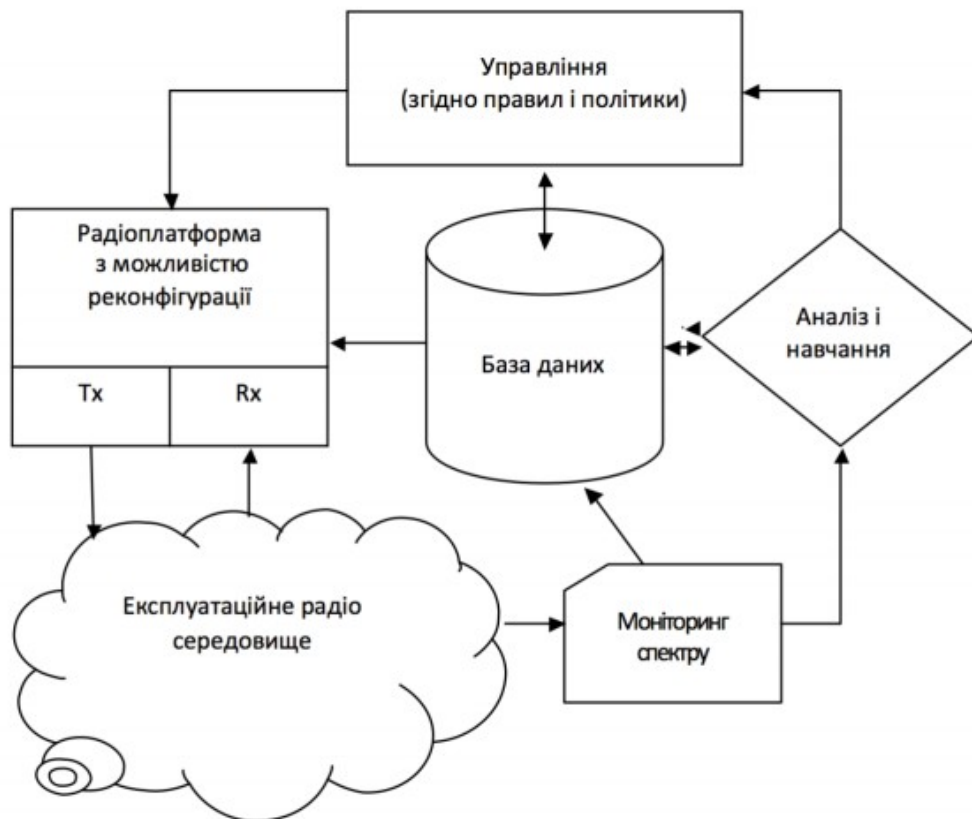


Рисунок 1.8 – Функціональна структурна схема КР

З метою структурно-логічного опису принципів функціонування системи КР, використовується поняття «цикли пізнання». Такий цикл може бути представлений у вигляді кібернетичної моделі OODA (Observe – спостерігати, Orient – орієнтуватися, Decide – вирішувати, Act – діяти) [16].

Ця модель передбачає багаторазові ітерації циклу дій (рис. 1.9), який формується чотирма послідовними взаємодіючими процесами: спостереження, орієнтація, рішення, виконання. Практично, цикл має розвиток ситуації по спіралі, і на кожному етапі взаємодіє з операційним середовищем даних.

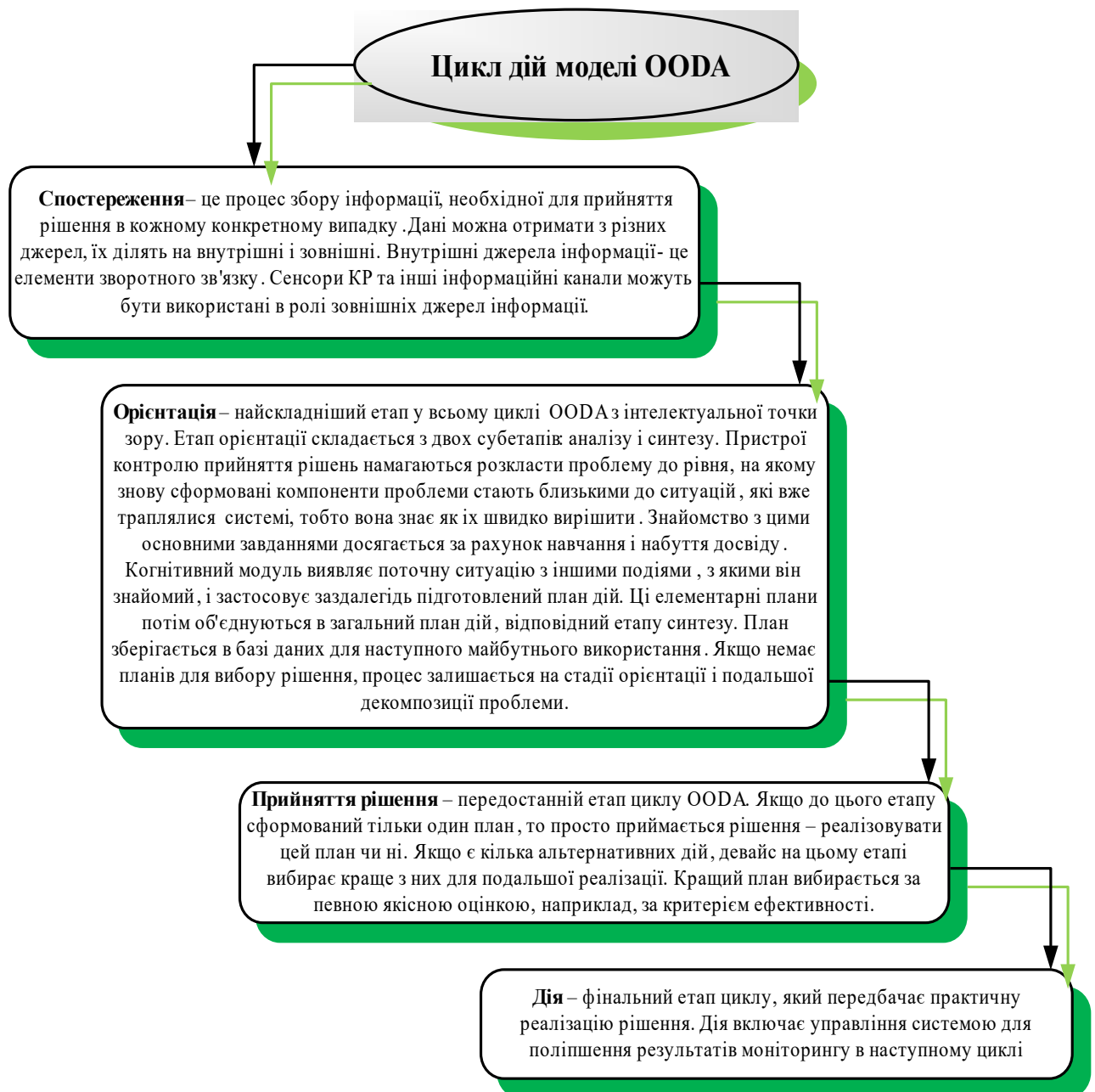


Рисунок 1.9 – Цикл дій моделі OODA

## Стандарти КР.

Когнітивні радіосистеми описані в ряді стандартів. Із затверджених в даний час стандартів IEEE 802.22 мають практичне застосування, IEEE 1900.4, IEEE 802.11af, IEEE 802.15.4m, IEEE 802.19. IEEE 802.22 [A1.6] стандарт безпроводного зв'язку, відомий як «Порожній простір», передбачає використання вільного спектрального простору в ДВЧ/УВЧ діапазоні частот телевізійних (54-862 МГц) для передачі даних. Сімейство стандартів IEEE 1900 визначає концепцію динамічного доступу до спектра.

Розглядається кілька підходів до реалізації когнітивних радіосистем, зокрема, на основі бази даних геолокації та на основі спектрального зондування (здатність когнітивних систем самостійно аналізувати навколишнє електромагнітне середовище). Існуюча система бродкасту може слугувати прикладом успішного використання цього діапазону для охоплення великих територій. Однак є недолік використання ДВЧ/УВЧ: нижчі частоти (довші хвилі) потребують більших антенних систем. Окрім широко використовуваних систем аналогового та цифрового телебачення, асортимент офіційно присвоюється радіозв'язку державних служб, міністерств і відомств, а також комерційним службам (таксі тощо). У цьому діапазоні також працюють бездротові мікрофони тощо.

На рис. 1.10 показане сімейство стандартів систем бездротового зв'язку з дальністю їх дії та пропускнуою здатністю [15].

Розробники відзначають, що IEEE 802.22 WRAN – одна з перших специфікацій, яка повністю використовує когнітивні технології в радіозв'язку. Таким чином, стандарт дозволяє ефективно використовувати наявний діапазон робочих частот без необхідності отримання дозволів на їх використання, а також підвищує захист мереж спеціального призначення і дозволяє досягти швидкості передачі даних до 22 Мбіт/с із покриттям площа до 100 км [15].

Стандарт IEEE 802.11af – оцінюється як найбільш перспективний, оскільки в його розробці беруть активну участь виробники апаратного обладнання. Як очікується, сертифікація пристроїв, за даним стандартом, почнеться вже в поточному році. При цьому, питання роботи даних пристроїв з базою даних, для реалізації механізму геолокації, знаходяться поза рамками стандарту.

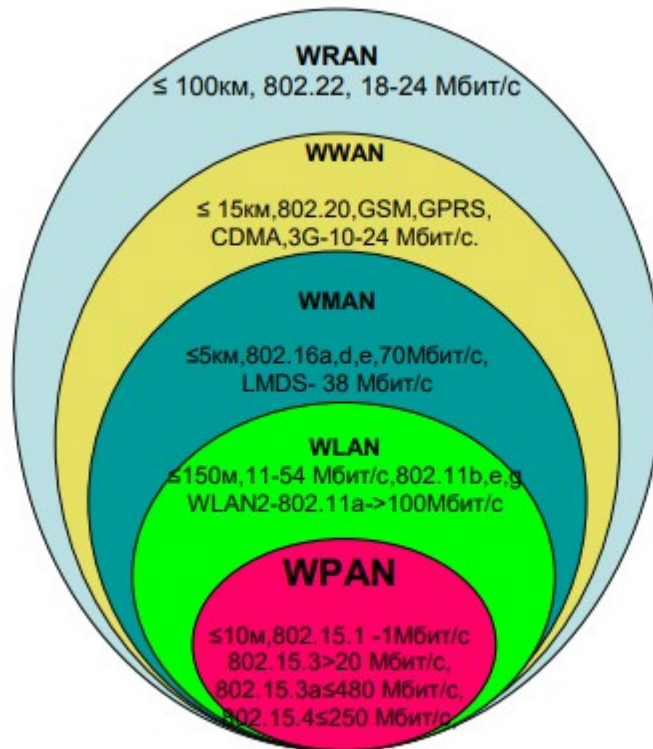


Рисунок 1.10 – Порівняльні характеристики систем безпроводного доступу

Порівняння частотного діапазону та дальності охоплення бездротових стандартів групи IEEE 802.11 представлено на рис. 1.11.

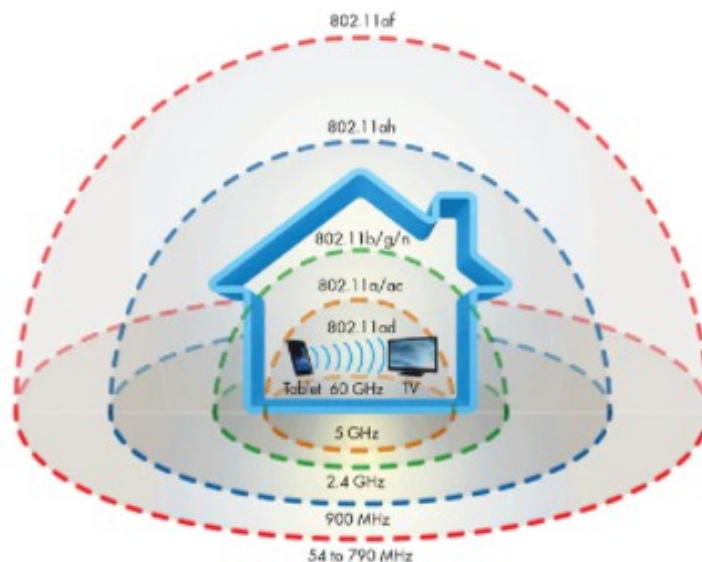


Рисунок 1.11 – Порівняння частотного діапазону та дальності охоплення бездротових стандартів групи IEEE 802.11

Робоча група IEEE 802.11 вже сформувала стандарти, орієнтовані на телевізійний простір (TVWS) в дуже високочастотному (УКВ) діапазоні та нижньому кінці діапазону надвисоких частот (УВЧ) від 54 до 790 МГц. У лютому 2014 року було затверджено поправку IEEE Std 802.11af -2013, що дозволяє працювати бездротовій локальній мережі (WLAN) в TVWS. Як продукт застарілого аналогового телебачення, цифрового телебачення та бездротового мікрофона, цей стандарт вимагає когнітивно-радіофункцій, які обмежують перешкоди для цих "основних" користувачів.

Крім того, IEEE 802.11af використовує багато останніх методів оперативного вдосконалення, прийнятих найновішими стандартами IEEE 802.11, таких як багатовхідний багатовихідний (MIMO), ортогональне мультиплексування з розподілом частоти (OFDM) і зв'язок каналів. Зокрема, IEEE 802.11af пропонує можливість зв'язати до чотирьох каналів шириною від 6 до 8 МГц, які можуть бути сформовані в один або два суміжні блоки. До чотирьох потоків MIMO може бути реалізовано як в режимі багатокористувацького (MU-MIMO), так і в просторово-часовому блоковому коді (STBC) [17].

## 2 МОНІТОРИНГ СПЕКТРА

### 2.1 Аналіз проблеми моніторингу спектра

Основною проблемою вибору каналу для передачі в багатоканальній системі є обґрунтованість цього вибору. Там, де доступні та контрольовані альтернативні канали передачі, необхідно оцінювати не тільки теперішній стан, а також перспективу майбутнього, яка в свою чергу, може залежати від зовнішніх факторів. Необхідність вибору перспективного каналу зумовлена насамперед тим, що перехід між каналами займає певний час, і передача в цей момент не буде здійснена. Занадто часті стрибки між каналами можуть призвести до великих втрат, ніж робота на каналі з високою ймовірністю зайняття [8].

На рис 2.1 наведений приклад використання незайнятих сегментів спектру за допомогою методів моніторингу. Моніторинг спектра в системі КР – це спостереження за радіо на широкому діапазоні частот з метою отримання інформації про доступність діючих діапазонів частот, доступних для користувачів КР. Зокрема, як вже зазначалося, для стандарту IEEE 802.22 смуга пропускання становить 54–862 МГц [20].

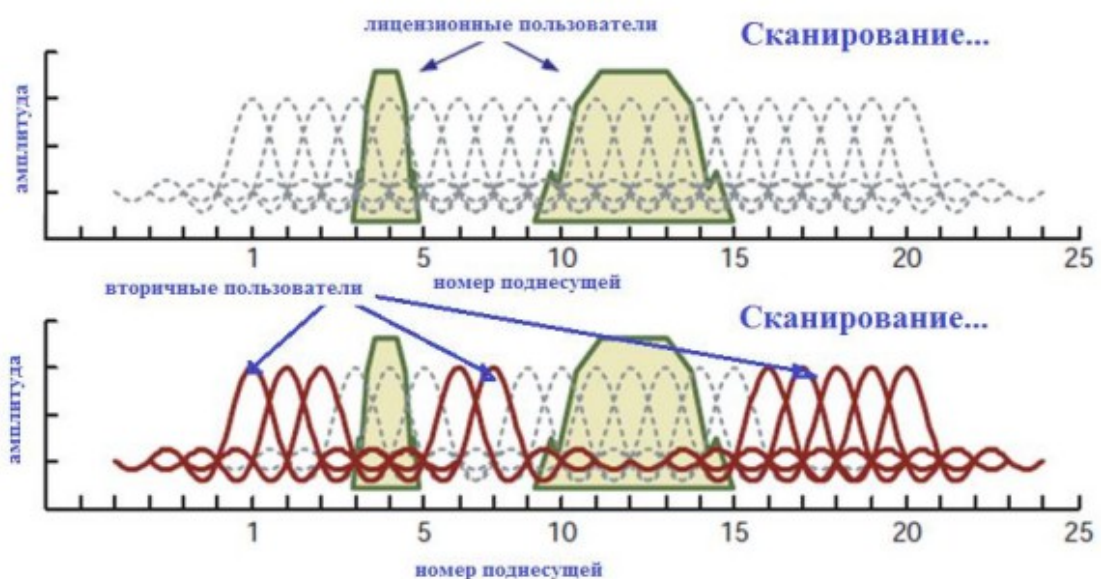


Рисунок 2.1 – Використання моніторингу та зайняття незайнятих частот в каналі за допомогою OFDM

Процес моніторингу спектра можна розділити на два етапи. На першому вирішується проблема виявлення. Другий етап відповідає за аналіз зайнятих смуг частот та оцінку їх положення на осі частот.

Ділянки спектра, доступні для експлуатації, також визначаються, беручи до уваги інтервали захисту, визначені конкретною реалізацією системи КР. У цій роботі пропонуються алгоритми, які більшою мірою відносяться до стадії виявлення.

На рис. 2.2 демонструється узагальнена структурна схема моніторингу спектра з вхідними та вихідними параметрами, що були оброблені блоком аналізу [10].

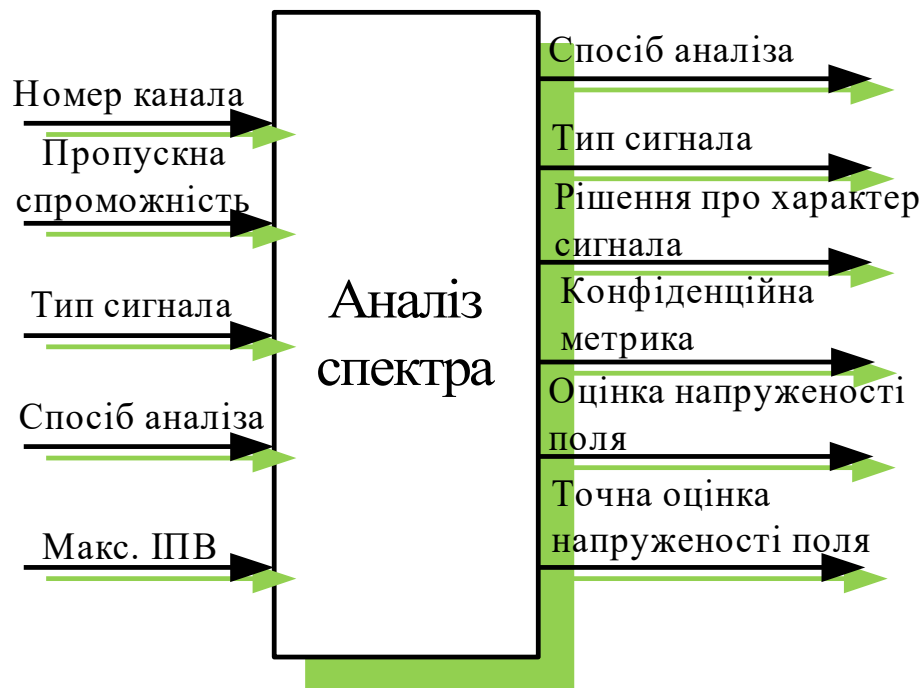


Рис 2.2 – Узагальнена структурна схема моніторингу спектра

Моніторинг спектру в КР здійснюється в широкому діапазоні частот і залежно від стандарту, що використовує когнітивні функції. Діапазон може коливатися від одиниць МГц до декількох ГГц. У таких широких діапазонах частот існує багато джерел радіовипромінювання з різними параметрами сигналу. Наприклад, сигнали можуть мати пропускну здатність одиниць від кГц до десятків МГц, і їх розташування на осі частот залежить від різних факторів.

Таким чином, врахування апіорної інформації про параметри сигналів при спостереженні за спектром є складною задачею через великий обсяг необхідних даних.

Виходячи з вищесказаного, можна зробити висновок, що алгоритми виявлення, що використовуються для моніторингу спектру на КР, повинні ефективно виявляти як вузькосмугові, так і широкосмугові сигнали в умовах непараметричної апіорної невизначеності [18].

Як уже зазначалось, проблема спостереження спектра в КР характеризується значною апіорною невизначеністю, оскільки апіорі невідомі не лише значення параметрів виявлених сигналів, але й закони їх розподілу.

У процесі автоматизованого радіомоніторингу необхідно використовувати такі алгоритми виявлення, характеристики яких були б стійкі до невідомих параметрів і властивостей сигналів, які виявляються в частотних каналах. Тому завдання виявлення сигналів в КР достатньо складне, так як в даний час в середовищі присутня велика кількість радіовипромінь з різними типами і параметрами модуляції. Однак неможливо отримати інформацію про всі джерела радіовипромінювання, що унеможливує використання відомих алгоритмів виявлення, які потребують апіорної інформації про характеристики сигналів [21].

Рішенням проблеми виявлення сигналу в умовах непараметричної апіорної невизначеності може бути використання непараметричних алгоритмів виявлення.

### 3 НЕПАРАМЕТРИЧНІ АЛГОРИТМИ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛУ

Непараметричні алгоритми детектування сигналу базуються на статистичних непараметричних критеріях (тестах). У загальному сенсі статистичний критерій є деяким математичним правилом, відповідно до якого приймається або відхиляється та чи інша статистична гіпотеза з заданим рівнем значущості. Побудова критерію є вибором відповідної функції від результатів спостережень, яка служить для виявлення заходів розбіжностей між емпіричними значеннями і гіпотетичними.

Задля роботи із різноманітними статистичними критеріями повинні бути сформовані нульова ( $H_0$ ) та альтернативна ( $H_1$ ) гіпотези. У якості основної (нульової) гіпотези зазвичай висувають гіпотезу про відсутність статистично значущих відмінностей. Конкуруючою гіпотезою буде альтернативна гіпотеза про існування цих відмінностей. Якщо вдасться знайти достатні аргументи проти нульової гіпотези ( $H_0$ ), то вона буде відхилена, тобто визнана помилковою. Отже, істинною буде вважатися альтернативна гіпотеза ( $H_1$ ). Інакше кажучи, перевірка статистичної гіпотези – це оцінка сили аргументів проти основної гіпотези. Також необхідно задати рівень значущості, який буде на практиці являти нам вірогідність помилки першого роду (імовірність помилкового виявлення сигналу).

Існує багато різних статистичних критеріїв і для кожного з них є детерміновані умови застосування. Важливо вибрати правильний статистичний критерій, який буде підходити для перевірки сформованої нульової гіпотези. В іншому випадку зроблені висновки можуть виявитися некоректними та може бути допущена систематична помилка. В залежності від того як формується рангова статистика (функція рангового вектору, що порівнюється з порогом вирішального пристрою) рангові алгоритми можуть бути лінійними та нелінійними. Лінійні: одновибірковий та двохвибірковий критерії Вілкоксона (знако-ранговий та Манна-Уїтні), Ван дер Вардена, Фішера-Іейтса, медіанний та декілька інших. Нелінійні: Колмогорова-Смірнова, Ренї, Крамера-Мізеса та ін. [23].

Непараметричні критерії (другий і третій рядки в табл. 3.1) працюють з рангами та частотами. Для їх обчислення параметри нормального розподілу (середнє арифметичне, дисперсія) не потрібні. Тому такі критерії використовують для порівняння груп спостереження описово, а також кількісно, розподіл яких не відповідає нормальному. Крім того, використання непараметричних критеріїв рекомендується при порівнянні груп невеликих кількостей, оскільки в малих групах важко довести нормальність розподілу ознаки [26].

Таблиця 3.1 – Статистичні критерії та умови використання

Ознака		Дизайн дослідження			
		дві незв'язні групи	дві зв'язні групи	три і більше незв'язних груп	вивчення зв'язку ознак
1. Кількісна, розподіл нормальний (параметричні критерії)		t-критерій Стьюдента	парний t-критерій Стьюдента	критерій Фішера (F) (дисперсійний аналіз)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• регресійний аналіз</li> <li>• коефіцієнт кореляції Пірсона (r)</li> </ul>
непараметричні критерії	2. Кількісна, розподіл не відповідає нормальний або описова порядкова	критерій Манна-Уїтні (U)	критерій Вілкоксона (W)	критерій Краскела-Уолліса (H)	коефіцієнт рангової кореляції Спірмена ( $\rho$ )
	3. Описова номінативна	критерій Пірсона ( $\chi^2$ )	критерій Мак-Немара	критерій Пірсона ( $\chi^2$ )	коефіцієнт спряженості

### 3.1 G-Критерій знаків

Тест знаків призначений для виявлення найбільш характерного в досліджуваній групі напрямку зсуву обраного показника. Якщо виявиться, що зрушення є значним, критерій дозволяє встановити його напрямок (зростання, спадання). Зручність критерію полягає в тому, що він застосовний до показників, виміряних за будь-якою шкалою (не обов'язково кількісною, але й порядковою). Фіксуються знаки відмінностей між кожною парою

спостережень, статистика тесту являє собою кількість випадків, коли зустрічається найменш частий знак. Якщо це менше ніж отримане критичне значення відхиляється нульова гіпотеза про те, що дві медіани популяції рівні. Розглянемо двохвибірковий знаковий тест. На практиці критерій знаків зазвичай застосовують у ситуації, коли існує вибірка:

$$\begin{aligned} X_1^n &= (X_1, \dots, X_{1n}), \\ X_2^n &= (X_2, \dots, X_{2n}), \end{aligned} \quad (3.1)$$

вибірки є зв'язними  $X_{1i} \text{ № } X_{2i}$ . Необхідно перевірити нульову гіпотезу, яка говорить про те, що компоненти вибірок незалежні та мають однаковий закон розподілу, та альтернативну [24]:

$$\begin{aligned} H_0 : F_\xi(X_1^n, X_2^n) &= F(X_1^n)F(X_2^n), \\ H_1 : F_\xi(X_1^n, X_2^n) &\text{ № } F(X_1^n)F(X_2^n), \end{aligned} \quad (3.2)$$

де  $F(x)$  – деяка функція розподілу. або виходячи з параметру вірогідності, гіпотези можна описати так:

$$\begin{aligned} H_0 :: P(X_1 > X_2) &= \frac{1}{2}, \\ H_1 :: P(X_1 > X_2) &\text{ № } \frac{1}{2}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Тоді статистику тесту можна описати як:

$$G(X_1^n, X_2^n) = \mathbf{e} \left[ \sum_{i=1}^n \mathbb{1}_{\{X_{1i} > X_{2i}\}} \right]. \quad (3.4)$$

Оголосимо змінну  $u_i, i = \overline{1, n}$ , що детермінує знаки  $x_i, i = \overline{1, n}$ , як функцію одиничного стрибка.

$$\begin{aligned} u_i &= 1, & i > 0, \\ u_i &= 0, & i < 0. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Тоді у контексті виявлення сигналу умову перевірки присутності сигналу в каналі можна описати через

$$H_1 : Y_n(x) = \prod_{i=1}^n u(s_i, x_{i \text{пор}}) \geq C, \quad (3.6)$$

де  $s_i = s(t_i)$ ,  $x_i = x(t_i)$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $t_i \in (0, T)$ ,  $(0, T)$  – інтервал спостереження,  $C_{\text{пор}}$  – поріг детектування, що визначається рівнем значущості тесту. Якщо умова (3.6) виконуються, то приймається рішення, що сигнал в каналі присутній і навпаки.

Умови застосування критерію знаків:

– спостереження в двох зразках слід проводити парами, по одному з кожного розподілу;

– кожна з пари спостережень повинна проводитися за однакових умов, але необов'язково, щоб різні пари проводились за однакових умов.

Знаковий детектор, що реалізує алгоритм (3.6) знаходить число додатних відліків у вхідній реалізації та за перевищенням межі  $C_{\text{пор}}$ , що залежить від рівня значущості (ймовірність помилкового виявлення) виносить рішення про наявність сигналу в каналі.

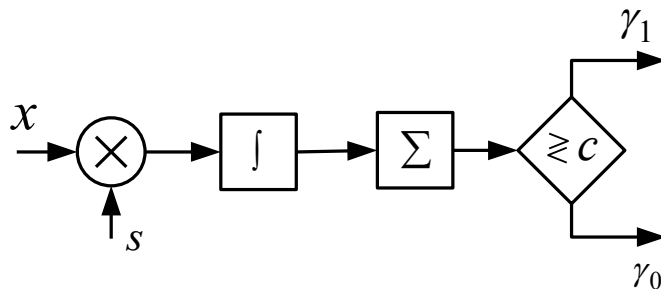


Рисунок 3.1 – Схема знакового детектора детермінованого сигналу

### 3.2 Т-Критерій Вілкоксона

Критерій Вілкоксона використовується при порівнянні показників, отриманих для однієї і тієї ж групи досліджуваних у двох різних умовах. Підтвердження достовірності їх зміни в середньому по групі здійснюється інтенсивністю окремих змін (і не тільки в їх напрямку, як у критерії ознак). У цьому розділі буде розглядатися одновибірковий знако-ранговий критерій Вілкоксона [28]. Це потужний, універсальний метод, оскільки його можна використовувати як для якісних ознак, що виміряні за шкалою порядку, так і для кількісних. Дає змогу виявити не тільки зміни у групі даних, але й напрямки цих змін.

Розглянемо вибірку вибірки  $X = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*\}$  елементів групи  $X$ .

Отже маючи дві вибірки даних формуються гіпотези:

$$\begin{aligned} H_0: M &= M_0, \\ H_1: M &\neq M_0, \end{aligned} \quad (3.7)$$

де  $M_0$  – медіана розподілу до деякого впливу,  $M$  – медіана розподілу після деякого впливу. Для перевірки нульової гіпотези необхідно відцентрувати вибірку  $X = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*\}$ :

$$x_i = x_i - M_0, i = \overline{1, n}. \quad (3.8)$$

Після цього вибірка сортується у порядку зростання. Таким чином, рангом  $R_i^+$  абсолютної величини елемента  $m$  буде положення його в варіаційному ряду. Так само, як і для знакового тесту, оголосимо змінну  $\varphi_i, i = \overline{1, n}$ , що детермінує знаки  $x_i, i = \overline{1, n}$ , як функцію одиничного «стрибка».

$$\begin{aligned} \varphi_i &= 1, x_i \geq 0, \\ \varphi_i &= 0, x_i < 0. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Далі вираховується статистика Т-критерію:

$$T^+ = \mathbf{e} \sum_{i=1}^n R_i^+ \varphi_i, \quad (3.10)$$

що дорівнює сумі додатних знакових рангів. Рішення щодо відкидання нульової гіпотези формується тоді, коли

$$H_1 : T^+ = \mathbf{e} \sum_{i=1}^n R_i^+ \varphi_{inbp} C, \quad (3.11)$$

де  $C_{nop}$  – деякий поріг що обирається у відповідності до  $\alpha$  (імовірність помилкового виявлення).

Умови застосування критерію Вілкоксона:

- нижня межа критерію:  $n_{1,2} > 5$ ;
- критерій може бути застосованим тільки в разі порівняння двох зв'язних рядів вимірювань. Аналогом Т-критерію Вілкоксона для порівняння трьох і більше пов'язаних сукупностей є критерій Фрідмана.

Знаково-ранговий алгоритм, що реалізує (3.10) порівнює суму абсолютних рангів  $R_i^+$  додатних вибірок з межею  $C_{меж}$ , за перевищенням якої вноситься рішення про наявність сигналу в каналі.

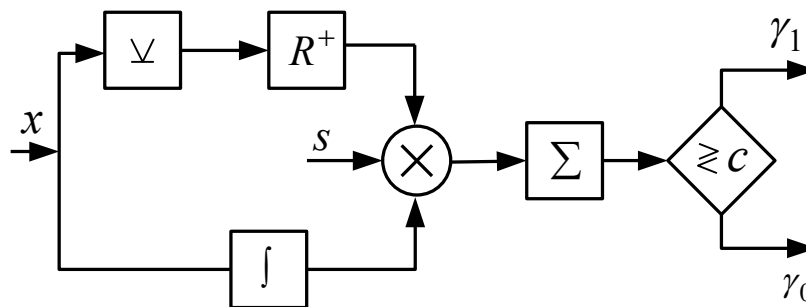


Рисунок 3.2 – Схема знаково-рангового детектора детермінованого сигналу

### 3.3 Енергетичний детектор

Енергетичний детектор – некогерентний пристрій детектування, що вимірює енергію прийнятого сигналу під час спостереження, порівнює рівень отриманої енергії з заданим пороговим значенням і на цій підставі визначає

наявність або відсутність невідомого сигналу. Цей спосіб виявлення сигналу мабуть самий простий. На відміну від інших детекторів, він не вимагає апріорних знань важливої інформації про виявлені сигнали [29]. Детектор енергії може бути описаний як задача перевірки бінарної гіпотези:

$$\begin{aligned} H_0: y[n] &= w[n], \\ H_1: y[n] &= s[n] \Delta h[n] + w[n], \\ x[n] &= s[n] + w[n], \end{aligned} \quad (3.12)$$

де  $y[n]$  – сигнал, що спостерігається,  $s[n]$  – інформаційний сигнал,  $w[n]$  – адитивний гауссівський білий шум (АГБШ);  $h[n]$  – імпульсна характеристика каналу,  $x[n]$  – прийнятий сигнал з урахуванням каналних ефектів у відсутності шуму. Відповідна тестова статистика може бути представлена так:

$$T(y) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |y[n]|^2, \quad (3.13),$$

де  $N$  – довжина послідовності, що спостерігається.

Основною частиною детектора енергії є алгоритм вибору меж енергії, базуючись на якій приймається рішення щодо наявності або відсутності сигналу в каналі. Вибір порогового значення  $z_{nor}$  залежить від заданої імовірності помилкової тривоги  $\alpha$ . Якщо значення (3.13) буде перевищувати порогове значення  $z_{nor}$ , це буде означати присутність сигналу в каналі.

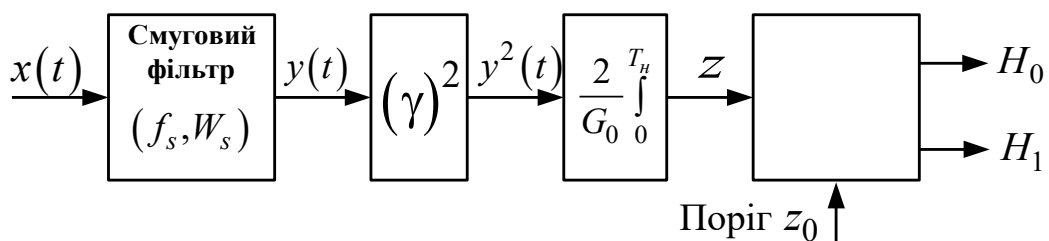


Рисунок 3.3 – Схема широкопasmового енергетичного детектора

Переваги та недоліки непараметричних алгоритмів виявлення представлені на рис. 3.4.



Рисунок 3.4 – Переваги та недоліки непараметричних алгоритмів виявлення

Детектори на основі тесту Вілкоксона є найпотужнішими порівняно з алгоритмами, заснованими на знаковій статистиці. Вони трохи поступаються за ефективністю виявлення до оптимальних алгоритмів, заснованих на непараметричних критеріях Ван дер Вардена, Левіна-Кушніра, Гаєка, маючи значно меншу обчислювальну складність, можуть бути використані для виявлення постійного сигналу на тлі шуму з симетричним розподілом [22]. Відповідно до критерію Неймана-Пірсона непараметричні детектори можна порівнювати за своїми детекторними характеристикам один з одним, а також з

оптимальними детекторами для кожного з можливих розподілу шуму. Кількісним показником для порівняння якості виявлення є коефіцієнт асимптотичної відносної ефективності – АВЕ [25]. Значення АВЕ для критерію Віллоксона при детектуванні постійного позитивного сигналу на тлі гаусової перешкоди в порівнянні з оптимальним для цього випадку лінійним становить 0,955 [26]. Таким чином, детектор Віллоксона в цьому випадку практично не поступається оптимальному.

Виходячи з вищеприписаного, у даній роботі буде реалізуватися цей алгоритм.

#### 4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ ВІЛКОКСОНА

Для реалізації алгоритму виявлення Вілкоксона було застосовано програмне середовище MATLAB, оскільки воно має широкий інструментарій для роботи з сигналами та симуляції реальних процесів. Симуляція перевірки наявності сигналу у каналі зв'язку була проведена з використанням FSK сигналу (рис. 4.1) та сигналом адитивного гаусівського білого шуму (рис. 4.2) у якості перешкоди. При частотній маніпуляції значенням «0» і «1» інформаційної послідовності відповідають певні частоти синусоїдального сигналу при незмінній амплітуді.

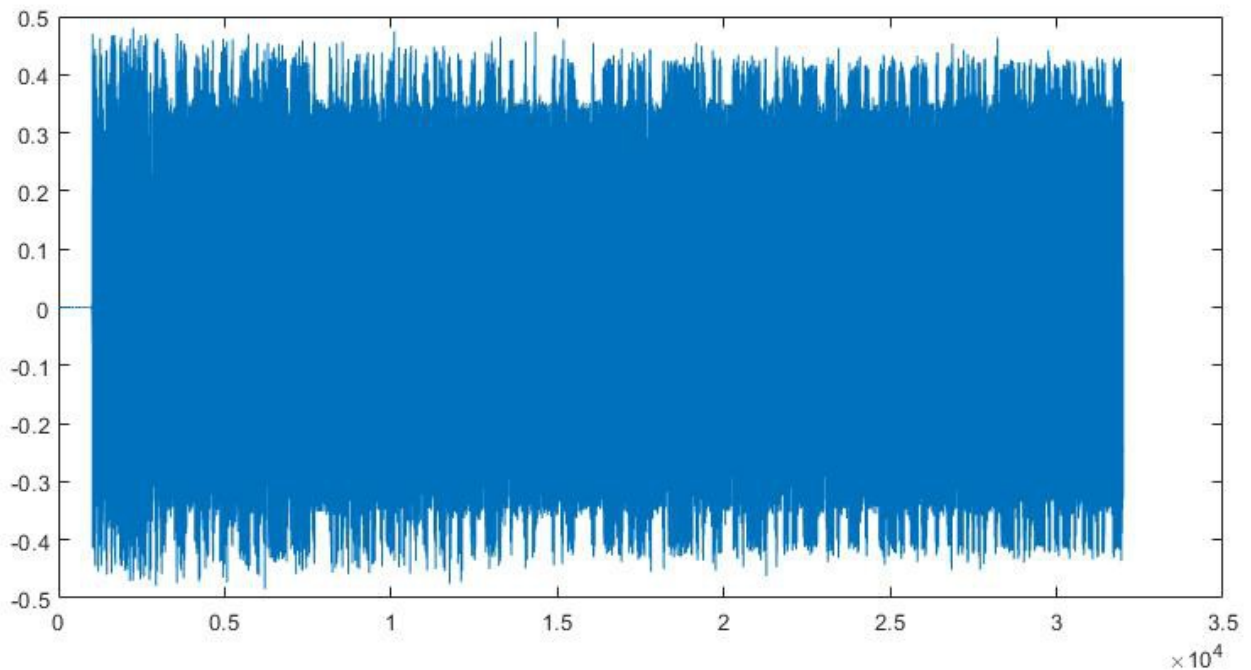


Рисунок 4.1 – Амплітудно-частотна характеристика сигналу FSK

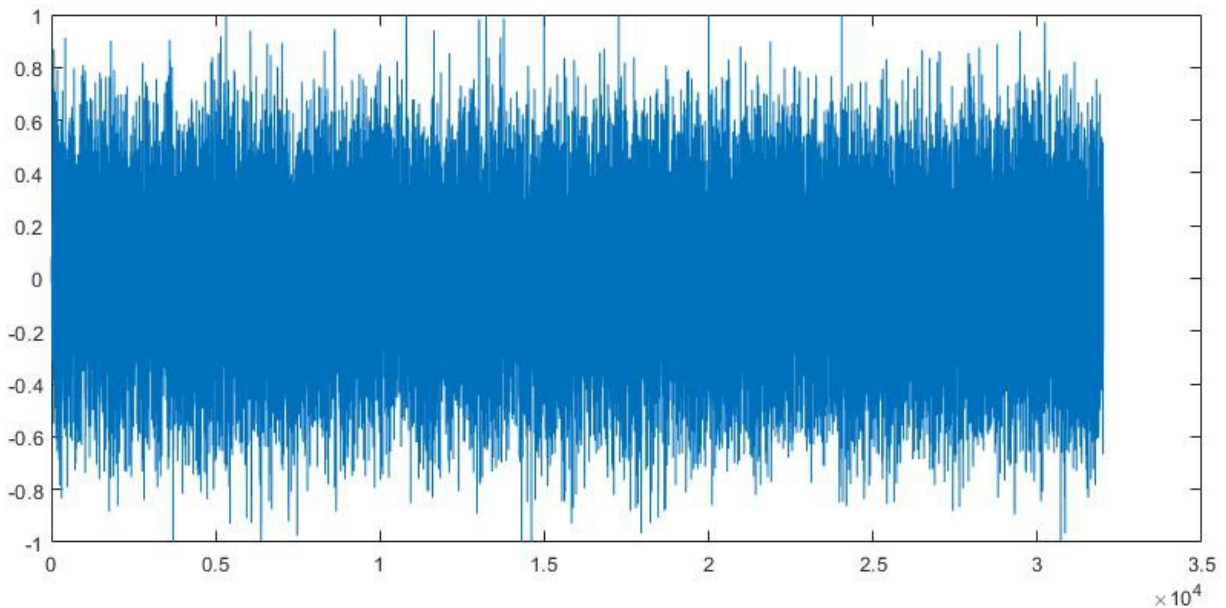


Рисунок 4.2 – Амплітудно-частотна характеристика сигналу АГБШ

Так як нам необхідно знаходити вільні частотні канали, то для інформативності досліду сигнали з часового простору треба перевести у спектральний. Оскільки сигнал представляється у цифровому форматі даних, для перетворення нам підходить ШПФ (швидке перетворення Фур'є) (рис. 4.3), що є пришвидшеним варіантом ДПФ (дискретне перетворення Фур'є). ДПФ – це одне з перетворень Фур'є, що широко застосовується у алгоритмах цифрової обробки сигналів, а також в інших областях, пов'язаних з аналізом частот в дискретному (оцифрованому аналоговому) сигналі.



Рисунок 4.3 – Фізичний сенс ШПФ

ДПФ вимагає в якості входу дискретну функцію. Такі функції зазвичай створюються шляхом дискретизації (вибірki значень з безперервних функцій).

Далі була розрахована потужність сигналу, за теоремою Парсеваля потужності та енергії у часовій та спектральній областях співпадають.

Опис дискретного виду теореми Парсеваля для енергії виглядає так [27]:

$$\sum_{n=0}^{N-1} |x(n)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X(k)|^2. \quad (4.1)$$

Повна спектрограма сигналу FSK представлена на рис. 4.4.

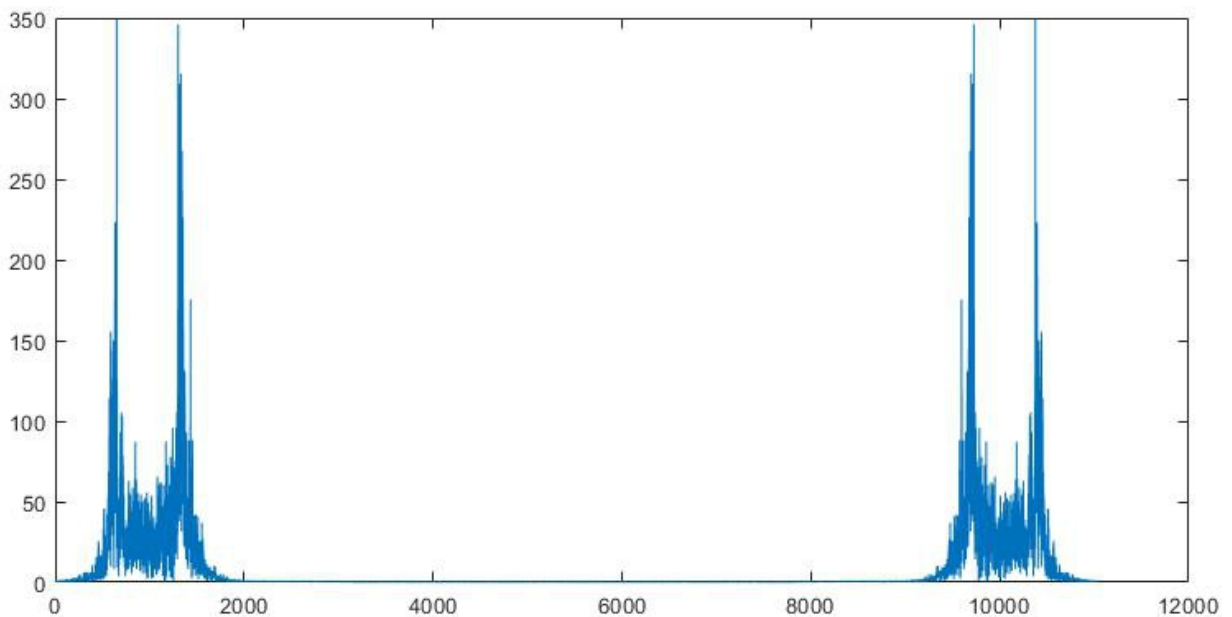


Рисунок 4.4 – Повна спектрограма сигналу FSK

При переведенні сигналу з часового простору у частотний за допомогою ДПФ спектр дублюється у «від'ємній» частоті. Тому спектр було приведено до початку відліку координат та «відрізано» зайву частину спектру, так як вона не несе інформації і є надлишковою.

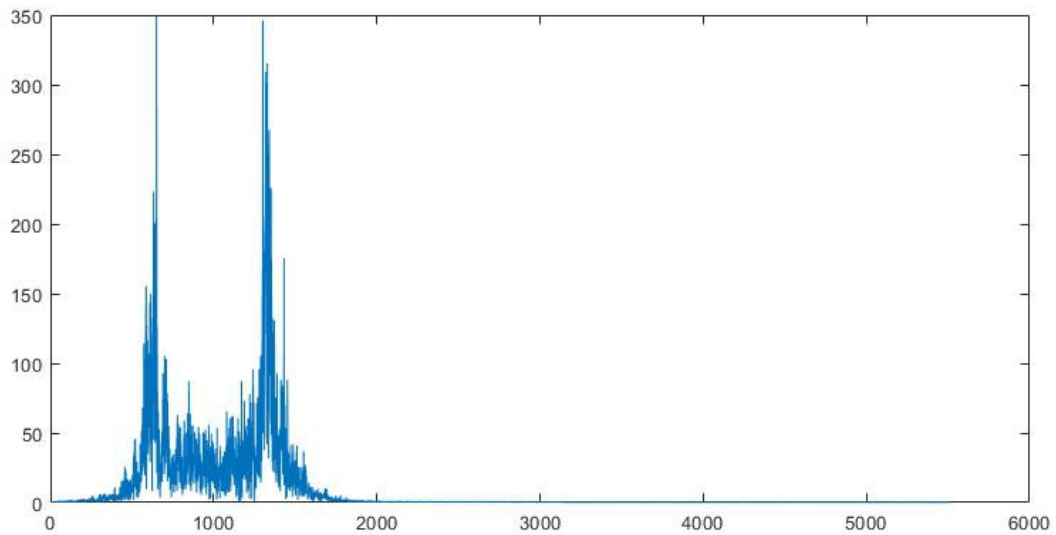


Рисунок 4.5 – Спектрограма сигналу FSK з корисною інформацією

Аналогічні маніпуляції (вимірювання потужності, приведення до спектрального представлення, відділення інформативної частини даних) було проведено з сигналом АГБШ. Так як у реальності чистого сигналу у каналі зв'язку майже не буває, для досліду потрібно відтворити ситуацію, коли у каналі сигнал є зашумленим. Рівень зашумлення може відрізнятись, в залежності від якості каналу, зовнішніх параметрів та ін., тому було прийнято рішення отримати шум різної потужності, аби суміш мала різне значення SNR (рис. 4.6 - 4.8).

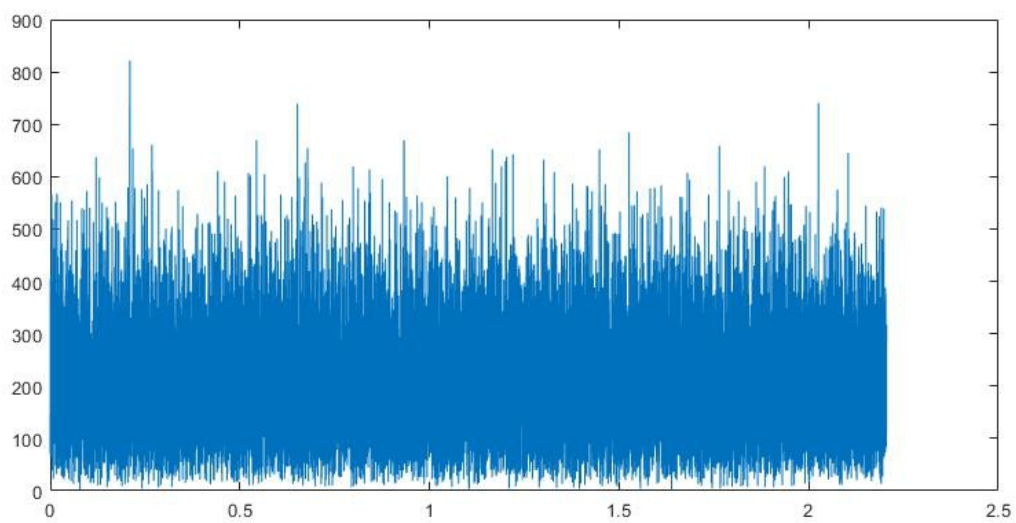


Рисунок 4.6 – Спектрограма сигналу АГБШ для відношення сигнал/шум на рівні -4.3 дБ

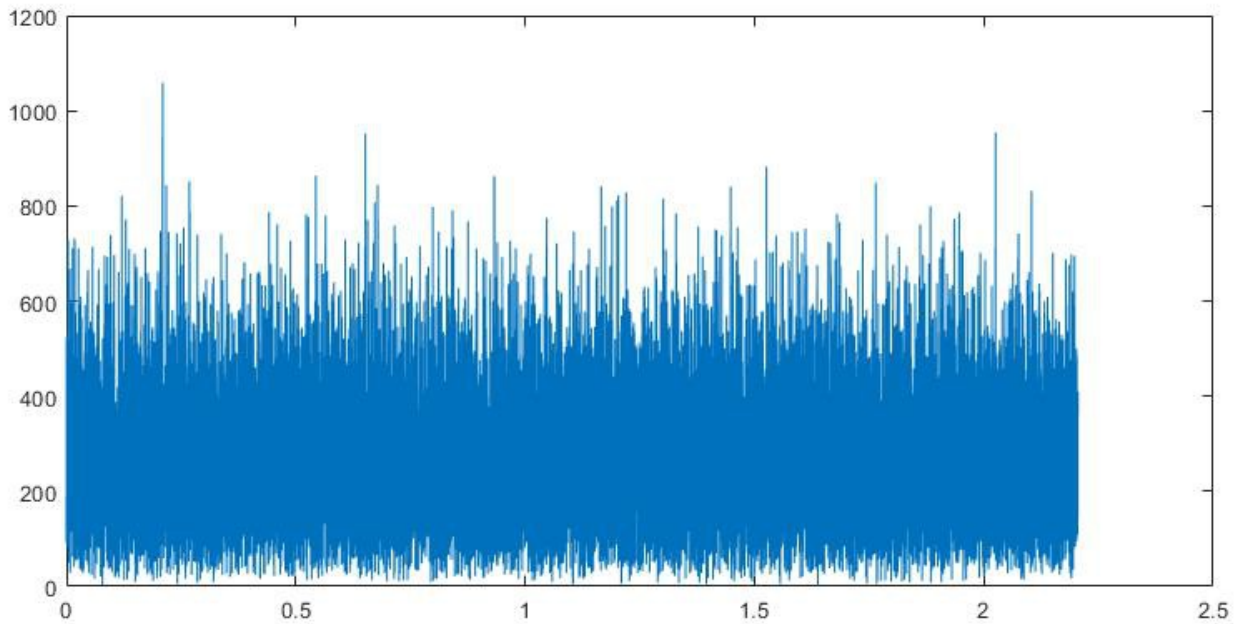


Рисунок 4.7 – Спектрограма сигналу АГБШ для відношення сигнал/шум на рівні  $-6.5$  дБ

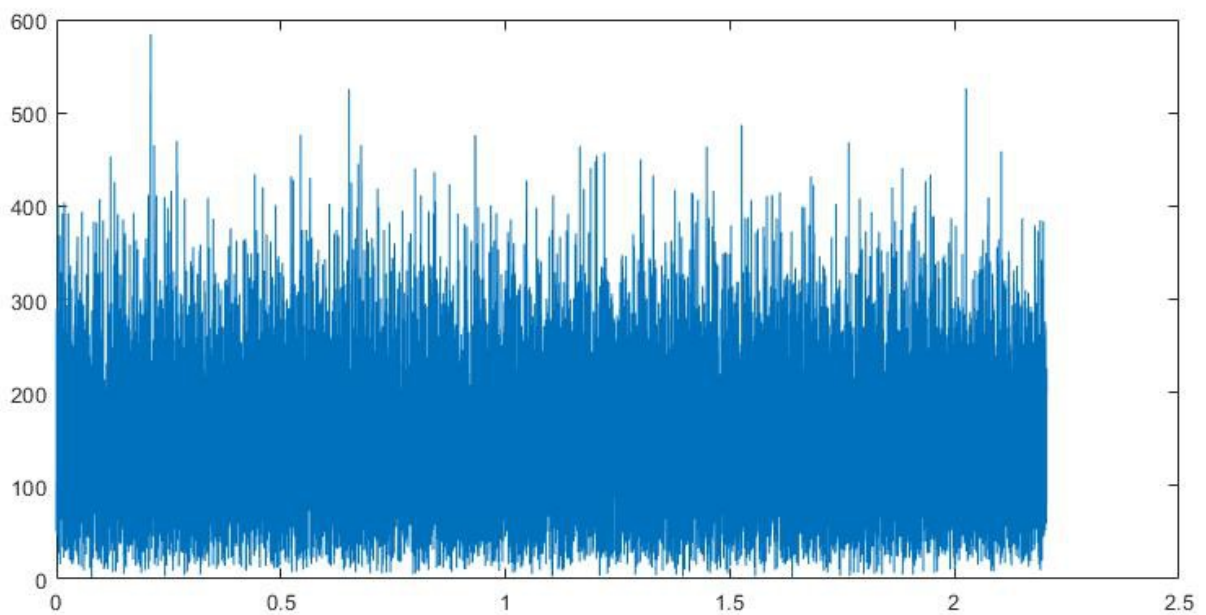


Рисунок 4.8 – Спектрограма сигналу АГБШ для відношення сигнал/шум на рівні  $-1.3$  дБ

Розділяючи/множачи матрицю шуму на деяке скалярне значення та за допомогою раніше здобутої інформації щодо потужності сигналу, були отримані зразки шуму, які б формували суміш сигналу та шуму з різними значеннями SNR (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Вирахувані потужності сигналів

Потужність шуму в абс. значеннях	Значення SNR для суміші	Потужність сигналу в абс. значенні	Потужність шуму у імовірному каналі в абс. значенні
0.5222	0.7	0.6246	5.3474
0.8556	-1.3		
1.6919	-4.3		
2.0888	-5.2		
2.8107	-6.5		
4.4525	-8.5		

Усі дані для тесту Вілкоксона були сформовані. Отже наступним кроком є власне проведення тесту. Задля цього була використана вбудована функція середовища MATLAB для знаково-рангового тесту Вілкоксона. Спочатку сформований з шуму вектор середніх значень ітеративно порівнювався з кожною реалізацією сигналу (32 значення). Це дає деяку базову вірогідність правильного виявлення за умови чистого сигналу в каналі. Після цього з вектором середніх значень шуму вже порівнювалися суміші з різним SNR. У якості постійного шуму в каналі використовувалося значення шуму. Таким чином були отримані залежності правильного виявлення зайнятості каналу (наявності сигналу на тлі шуму) від значення параметру сигнал/шум.

Порівняльний аналіз роботи тесту Вілкоксона проводився із енергетичним детектором. Для кожного дискретного значення реалізації АГБШ було вираховано його значення енергії та прогумоване між собою. Таким чином було 1000 значень енергій сигналу, що являють собою загальну енергію реалізацій. Далі проводилося ранжування цих значень за зростанням і обирався поріг енергії за яким детектор і буде видавати кінцеву оцінку щодо присутності чи відсутності сигналу в каналі. Так як порівнюються алгоритми за рівнем значущості  $\alpha = 0,05$ , що відповідає значенню імовірності помилкового виявлення, пороговим значенням детектора було вибране 950-те за порядком значення із вектора енергій, це буде означати вірогідність правильного виявлення на рівні 95%, тобто для цього випадку значення  $\alpha$  для експерименту зберігається. Оскільки завданням є отримати залежність імовірності правильного детектування від SNR, то для кожної суміші з різною потужністю

шуму було визначено порогове значення енергії перешкоди, перевищуюче яке детектор би сигналізував про наявність сигналу в каналі. Таким чином були отримані результати для двох методів виявлення сигналу на тлі шуму.

Таблиця 4.2 – Врахувані імовірності виявлення сигналів для різних SNR

Значення SNR для суміші	Імовірність вірного виявлення детектором за алгоритмом Вілкоксона	Імовірність вірного виявлення енергетичним детектором
0.7	1	0.137
-1.3	1	0.1
-4.3	0.969	0.075
-5.2	0.961	0.071
-6.5	0.714	0.068
-8.5	0.117	0.061

На рис 4.9 можна бачити наскільки детектор на основі тесту Вілкоксона (синій) ефективніший за енергетичний детектор (червоний).

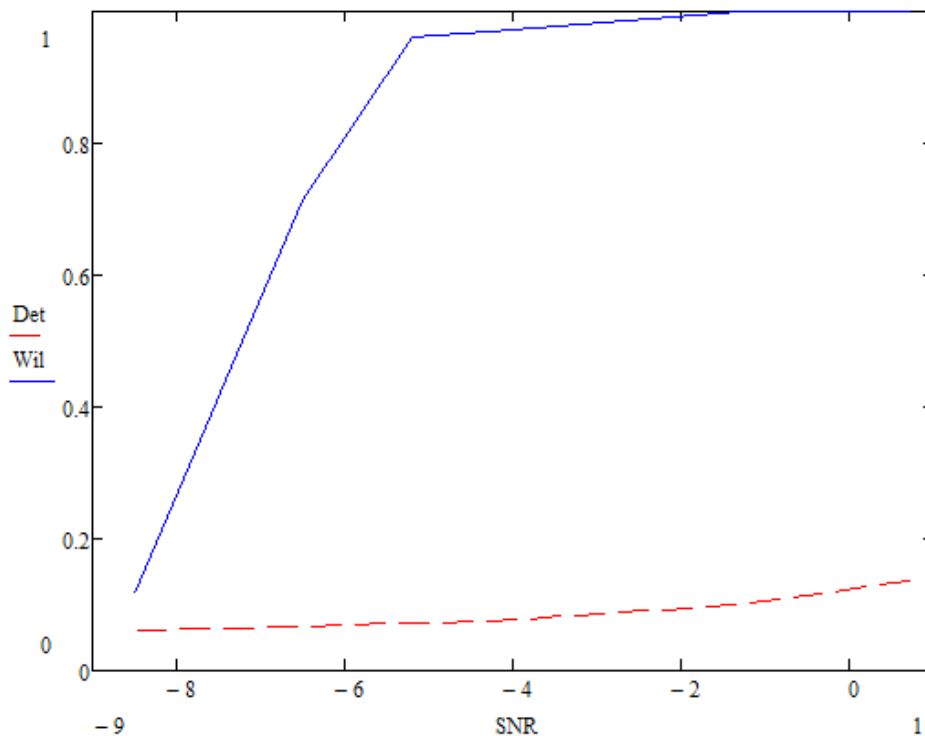


Рисунок 4.9 – Графік залежності імовірності вірного виявлення сигналу в каналі від SNR

## ВИСНОВКИ

Завдання на кваліфікаційну роботу виконано в повному обсязі.

Оскільки проблема спостереження спектра в КР характеризується значною апріорною невизначеністю, так як апріорі невідомі значення параметрів виявлених сигналів та закони їх розподілу, то для цих умов непараметричні алгоритми являють собою один за кращих методів моніторингу спектра в мережах когнітивного радіо.

У проведеній роботі розкриті механізми роботи декількох непараметричних алгоритмів детектування сигналу в каналі, що власне й означає виявлення параметру зайнятості частотного каналу у радіомережі. Найефективнішим з розглянутих алгоритмів був непараметричний знаково-ранговий критерій Вілкоксона.

В середовищі MATLAB була виконана реалізація детектору вільних частотних каналів на базі одновибіркового знаково-рангового тесту Вілкоксона та енергетичного детектора. Як видно з рис. 4.9, навіть при низькому значенні сигнал/шум в каналі зв'язку детектор Вілкоксона має більшу імовірність правильного розпізнавання наявності сигналу. Та чим більше стає SNR, тим стрімкіше зростає імовірність виявлення зайнятості каналу. Але порівняно із детектором Вілкоксона, енергодетектор має набагато простішу реалізацію.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Богданович В.А., Вострецов А.Г. Теория устойчивого обнаружения, различения и оценивания сигналов. М.: Физматлит, 2004. – 316 с.
2. Haykin S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications / S.Haykin // Selected Areas in Communications, IEEE Journal. 2005. Vol. 23. P. 201 - 202.
3. Рекомендация МСЭ-R М.1801-1 Стандарты радиointерфейса для систем широкополосного беспроводного доступа подвижной службы, включая мобильные и кочевые применения, действующих на частотах ниже 6 ГГц. 04/2010
4. У.Р. Збежховська, УДК 621.391 DOI: 10.30748/nitps.2019.34.11, с. 79
5. Бузов А. Л. Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем. Учебное пособие / А.Л. Бузов // Под ред. д.т.н., проф. М.А. Быховского. — М.: Эко-Трендз, 2006. — С.376
6. Гурьянов І.О. Когнітивне радіо: нові підходи до забезпечення радіочастотним ресурсом перспективних радіотехнологій // І.О. Гурьянов / «Електросвязь». – 2012. – № 8. – С.5-8.
7. Стенин А.В, Разработка и исследование моделей когнитивного радио, 11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи, 2018, с 9, с. 25
8. Янишин В.Б. Моделі та алгоритми управління радіочастотним спектром в когнітивних радіомережах, УДК 621.391, с 29-31, с. 34-36,
9. И.И. Сопронюк, В.П. Лысечко, Е.А. Ухова, Метод мониторинга спектра в когнитивных радиосетях на основе использования информационного критерия Акайке, ISSN 1681-7710, с. 108-110
10. Mitola J. Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio / Mitola J. // Doctor of Technology, Royal Inst. Technol. (KTH), Stockholm, Sweden, 2000.
11. Akyildiz I.F. A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks / Akyildiz I.F., Lee W.-Y., Vuran M. C., Shantidev M. // IEEE Communications Magazine, vol. 46, April 2008. - P. 40-48.

12. Axell E. Optimal and sub-optimal spectrum sensing of OFDM signals in known and unknown noise variance / E. Axell, E. G. Larsson // IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 29, pp. 290-304, Feb. 2011.

13. Tevfik Y. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications / Tevfik Y., Huseyin A. // IEEE Communications Surveys & Tutorials, Volume 11, Issue 1, pp. 116 - 130, 2009.

14. . Масесов Н.А. Панченко И.В. Бондаренко Л.А. Малых В.В., УДК 621.396, Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ” № 1 – 2013, с. 49-50

15. Atapattu S. Performance of an Energy Detector over Channels with Both Multipath Fading and Shadowing / S. Atapattu, C. Tellambura, and H. Jiang // IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 9, No. 12, 2010, pp. 3662–3670.

16. Анализ и оценка мировых тенденций развития радиотехнологий и систем связи [Электронный ресурс] – URL: <https://digital.gov.ru/uploaded/files/kontseptsiya-radiokontrolya-prilozhenie-1.pdf>

17. Стоянов Д. Д., Розробка і дослідження алгоритмів виявлення сигналів в когнітивних радіомережах, Ярославль, 2014. с. 25-30, с.36

18. Непараметрические обнаружители сигналов: учебное пособие к лабораторной работе / сост. А.В. Бруханский. Кафедра 401 МАИ, 1998. 21 с.

19. Фонов А.Ю., Исследование методов формирования сигналов в системах широкополосного радиодоступа на базе архитектуры sdr, Белгород 2016, с.

20. Іваненко С.А., Визначення незайнятих частотних каналів у когнітивних радіомережах методами виявлення та розпізнавання сигналів в умовах апріорної невизначеності, Харків, 2019. – 1-2 с

21. Теория обнаружения сигналов / П.С. Акимов, П.А. Бакут, В.А.Богданович и др.; под ред. П.А. Бакута. М.: Радио и связь, 1984. 440 с"

22. А.В. Бруханский, Непараметрические обнаружители сигналов, Москва, 1998, – 5 с.

23. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. радио, 1969. – 752 с.

24. Пономарьов А.К. Непараметричні алгоритми виявлення сигналу. критерій Віллоксона. Науковий керівник – Штих Інна Анатоліївна // Пріоритетні напрямки та вектори розвитку світової науки: матеріали I Міжнародної студентської наукової конференції (Т. 2), м. Миколаїв, 21 травня,

2021 р. / Молодіжна наукова ліга. — Вінниця: Європейська наукова платформа, 2021 – 62-64 с.

25. П.С. Акимов, Ф.Ф. Евстратов, С.И. Захаров и др.; под ред. А.А. Колосова. М. Обнаружение радиосигналов. Радио и связь, 1989. – 288 с.

26. Ивченко Г.И., Медведев Ю.И, Математическая статистика Учеб. Пособия для ВТУ-вузов – М.:Высш. Шк., 1984, – 119-120 с.

27. Вадутов О.С., Электроника. Математические основы обработки сигналов, Москва, 2016, –с. 123

28. Пономарьов А.К. Дослідження непараметричних алгоритмів виявлення незайнятих частотних каналів в мережах когнітивного радіо. Науковий керівник – проф. Безрук Валерій Михайлович // 25-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті». Зб. Матеріалів форуму. Т.4. – Харків: ХНУРЕ. 2021. – 108-109 с.