

Огляд аналізаторів радіочастотного спектра та пропозиції щодо динамічної реалізації енергетичного детектора

На сьогоднішній день основним підходом до організації моніторингу радіочастотного спектра є повністю автоматичний безперервний аналіз заданого діапазону частот. Переважна більшість програмних продуктів світових лідерів, що спеціалізуються на розробленні засобів радіомоніторингу, має відкриту архітектуру, що дозволяє користувачам реалізовувати власні модулі оброблення сигналів. Тому вдосконалення програмно-алгоритмічного забезпечення існуючих аналізаторів спектра дозволить підвищити ефективність виявлення зайнятих ділянок частот та формування приймальних каналів.

У роботі для виявлення частотних каналів запропоновано використовувати динамічний енергетичний детектор у частотній області. Динамічність детектора полягає у послідовному формуванні порогу виявлення залежно від значення тестової статистики. Як тестову статистику використано коефіцієнт варіації частотних відліків. Сутність запропонованого методу полягає у розрахунку коефіцієнта варіації із використанням відліків спектральної щільності потужності прийнятого сигналу, порівняно з її граничним значенням, у разі перевищення якого розраховується поріг для розділення частотних відліків на сигнальні та шумові. Надалі процедура повторюється, доки не будуть виявлені усі сигнальні відліки. Для забезпечення роботи алгоритму необхідно задати лише параметри періодограми Уелча, вектор порогових значень тестової статистики та ймовірність хибної тривоги. Програмна реалізація запропонованого підходу дозволить виявляти та визначати частотні межі сигналів у широкому динамічному діапазоні, за невідомих значень завантаженості смуги частот аналізу та потужності шуму. Зростання швидкодії розробленого алгоритму, порівняно з аналогічними, залежить від рівня зайнятості радіочастотного спектра, динамічного діапазону сигналів і довжини швидкого перетворення Фур'є та може становити десятки разів.

Ключові слова: аналізатор спектра; динамічний метод; енергетичний детектор; поріг; радіочастотний спектр; тестова статистика.

Актуальність теми. Основними підходами до організації моніторингу радіочастотного спектра (РЧС) є повністю автоматичний безперервний аналіз заданого діапазону частот. На сьогоднішній день із усіх засобів вимірювань для радіомоніторингу найчастіше використовуються аналізатори спектра на основі швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), що пов'язано зі значним зростанням продуктивності елементної бази і удосконаленням алгоритмів оброблення сигналів. Такі аналізатори спектра мають високе розділення за частотою, дозволяють обробляти вибірки сигналу в реальному масштабі часу, здатні аналізувати безперервні та імпульсні сигнали, виділяти слабкі сигнали на фоні більш потужних.

До світових лідерів, що спеціалізуються на розробленні засобів радіомоніторингу, зокрема програмного забезпечення для аналізу РЧС, належать такі компанії: Rohde & Schwarz, Keysight Technologies, Anritsu, TCI International, CRFS, LS Telecom, DECODIO, COMINT Consulting, CommsAudit. Переважна більшість програмних продуктів цих компаній має відкриту архітектуру, що дозволяє користувачам реалізовувати власні модулі оброблення сигналів. Тому вдосконалення програмно-алгоритмічного забезпечення існуючих аналізаторів спектра дозволить підвищити ефективність виявлення сигналів відомих і невідомих стандартів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Розробленню та дослідженню методів виявлення зайнятих ділянок частот у широкосмугових системах радіомоніторингу присвячено значну кількість наукових публікацій. Під час розробки сучасних алгоритмів аналізу РЧС на основі енергетичного детектора досить часто використовують ітеративні методи. У [1–2] показано, що такі алгоритми є ефективнішими порівняно з класичними. Крім того, досить часто під час виявлення сигналів і оцінювання зайнятості спектра використовують тестові статистики [3]. У [4] для встановлення факту зайнятості визначеної ділянки частот як тестову статистику використано енергію прийнятої реалізації. Недоліком запропонованого підходу є те, що оцінку енергії шуму, за якою розраховують поріг прийняття рішення, формують із прийнятої реалізації, а для цього необхідно знати, де знаходяться незайняті ділянки спектра. У [5] для оцінювання зайнятості РЧС та розпізнавання виду модуляції сигналів запропоновано алгоритм, що базується на використанні коефіцієнта ексцесу та кумулянт вищих

порядків. Як поріг виявлення сигналів використано стандартне відхилення коефіцієнта ексцесу прийнятої реалізації сигналу. Недоліком підходу є те, що він потребує оцінювання потужності шуму. У [6] для оцінювання зайнятості спектра використовують значення ентропії коефіцієнтів вейвлет-перетворення та власні числа коваріаційної матриці для таких коефіцієнтів. У [7] запропоновано виявляти активні канали на основі порогової обробки спектральної щільності потужності (СПЦП). Проте для розрахунку порогу необхідно знати потужність сигналу та шуму, а також динамічний діапазон сигналів у заданій смузі частот. У [8–9] запропоновано як тестову статистику для виявлення сигналів у частотній області використовувати коефіцієнт варіації. Для розділення сигнальних і шумових відліків використано ітеративну процедуру. У [10] наведено швидкий алгоритм реалізації ітеративної процедури.

У розглянутих роботах не показано, чи реалізовано запропоновані методи у сучасних аналізаторах спектра, та якою буде їх ефективність при роботі в реальній сигнальній обстановці, особливо в широкодіапазонних сценаріях.

Метою статті є огляд існуючих аналізаторів РЧС та формулювання пропозицій щодо динамічної реалізації енергетичного детектора, що дасть змогу підвищити ефективність виявлення зайнятих ділянок частот та формування приймальних каналів.

Викладення основного матеріалу.

Аналіз існуючих аналізаторів радіочастотного спектра. Розглянемо підходи до аналізу РЧС, що найчастіше реалізуються у програмних інструментах провідних компаній світу.

Rohde & Schwarz

Багатоканальна система технічного аналізу сигналів SA120 [11] призначена для автоматичного виявлення, класифікації, демодуляції та декодування радіокомунікаційних безперервних та імпульсних сигналів. SA120 підтримує як ручну обробку і аналіз окремих сигналів, так і повністю автоматичне розпізнавання і оброблення сигналів у широких смугах частот.

Високопродуктивний енергетичний детектор працює на основі аналізу форми спектра шляхом порівняння із шаблонами, що підвищує ефективність пошуку і розпізнавання сигналів. Рішення алгоритму порівняння форм спектра засновані на багатьох критеріях у межах комплексної матриці рішень, яка дозволяє надійно оцінювати схожість між вхідними сигналами і наборами опису форми. Такий детектор за секунду здатний проаналізувати більше 100 спектрів. Детектор включає базу даних спектральних форм. Шаплони в цій базі можуть бути визначені користувачем як типи сигналів із відповідними параметрами, або попередньо визначені як загальні типи сигналів. Для підвищення надійності детектора алгоритм попередньо обробляє декілька різних екземплярів спектра (близько 30) однієї категорії сигналів, враховуючи зашумлені спектри та спектри в умовах замирань. Вони використовуються для навчання спектрального детектора і наповнення бібліотеки шаблонів спектрів. Поріг для виявлення автоматично адаптується до потужності шуму в заданому частотному діапазоні. Спектр сигналу обчислюється на основі алгоритму ШПФ.

На вимогу користувача потужний класифікатор автоматично визначає технічні параметри сигналів (тип модуляції, систему передачі або коду, якщо вони належать до відомих) і передає дані вимірювань для демодуляції і декодування до рівня змісту (з використанням потужної бібліотеки демодуляторів і декодерів). Якщо тип сигналу розпізнано, отримані з нього дані зберігаються. Сигнали, що класифіковані як невідомі, можна записувати в цифровому вигляді (у смугах 10, 20, 40 або 80 МГц) для більш поглибленого аналізу за допомогою інструменту GX410 AMLAB. Щоб не втратити початок сигналу, особливо при ручному записі, передбачено буфер, у якому міститься фрагмент останніх відліків вхідного сигналу тривалістю секунди, хвилини або навіть години (залежно від об'єму запам'ятовуючого пристрою). Система забезпечує паралельну демодуляцію і декодування до 32 каналів в ультракороткохвильовому і до 128 каналів у короткохвильовому діапазонах частот, а також демодуляцію передачі з програмною перебудовою робочої частоти (ППРЧ) в реальному масштабі часу в смузі до 80 МГц.

Програмне забезпечення (ПЗ) SA120 має модульну структуру і володіє властивістю масштабованості та може одночасно працювати з багатьма приймачами. SA120 має відкритий інтерфейс з можливістю інтегрування розроблених користувачем власних модулів оброблення сигналів, написаних на мовах програмування C або MATLAB.

ПЗ GX410 [12] є системою для технічного аналізу складних видів сигналів (виявлення, класифікація, демодуляція, декодування), враховуючи імпульсні та ППРЧ (зі швидкістю перебудови до 3000 стрибків за секунду). Може працювати в онлайн-режимі та із записами сигналів, в ручному та автоматичному режимах. GX410 містить потужний класифікатор AMMOS для розпізнавання величезної кількості цифрових та аналогових видів передач, база даних яких постійно розширюється. GX410 містить модулі для виявлення короткотривалих сигналів з ППРЧ та для їх автоматичного аналізу, класифікації та рекомбінації.

Keysight Technologies

ПЗ Signal Surveyor 4D [13] призначене для моніторингу спектра і виконання зовнішнього та внутрішнього аналізу сигналів відповідно до рекомендацій ITU-R SM.1600. ПЗ має автоматизовані

засоби виявлення і класифікації сигналів, функції запуску і вимірювання маски спектра, базу даних SQL для довгострокової реєстрації і аналізу, вбудований інструмент запису спектра, гнучкі режими аналізу широкодіапазонного спектра, запису I/Q сигналів.

Для виявлення випромінювань в одному або кількох радіодіапазонах поріг обирається із таких варіантів: Level (рівень), Auto (авто), Environmental (efir), Point Average (середнє у вибірці), Segment Average (середнє в сегменті) і File (файл). У випадку перевищення порогу виконується запис параметрів випромінювання в базу архівних даних (Energy History Database, EHD). У кожному записі міститься більше 20 точно вимірних зовнішніх параметрів, пов'язаних із виявленим випромінюванням. База EHD використовується як проміжне сховище, де отримані дані підлягають подальшій обробці. ПЗ Surveyor 4D може використовувати фільтри попередньої і постобробки Energy History, які дозволяють або забороняють запис даних у базу EHD. Фільтр постобробки Age Post Filter видаляє записи із EHD, якщо випромінювання на цій частоті відсутнє протягом заданого часу. Фільтр Age починає відлік секунд після того, як рівень випромінювання стане нижче заданого граничного значення. По закінченні заданого часу запис видаляється. Для попередньої обробки сигналів найчастіше використовується універсальний детектор сигналів (Universal Signal Detector, USD), який для виділення і класифікації сигналів використовує такі характеристики та інструменти: частотний план, смуговий фільтр, широкосмуговий детектор форми спектра.

ПЗ SnapView завантажується разом із Surveyor 4D і дозволяє відтворювати знімки частотного спектра і сигналів у форматі I/Q. SnapView забезпечує швидку і просту оцінку змін характеристик сигналу в часі. Вбудована в Surveyor 4D база даних PostgreSQL дозволяє оцінити тенденції і зміни у використанні РЧС. Візуалізатор SQL дозволяє створювати схеми, діаграми, графіки і таблиці на основі спектральних даних за тривалі періоди часу.

ПЗ 89601B VSA здійснює глибокий векторний аналіз аналогових і цифрових сигналів. В нього входять інструменти для аналізу і демодуляції, представлення сигналів у часовій і частотній областях. Опція ASD надає бібліотеки для програмування користувачем нових прикладних функцій, процесів і драйверів всередині Surveyor 4D. Опція MR1 забезпечує аналіз внутрішніх параметрів сигналу, враховуючи визначення формату модуляції, девіації частоти і символної швидкості. Опція USD використовує простий графічний інтерфейс, що не потребує програмування і дозволяє створювати користувацькі детектори сигналів. Така опція дозволяє вимірювати основні зовнішні параметри сигналів, що були виявлені: смугу, частоту і форму спектра, за якими проводиться класифікація. Для подальшої класифікації сигналу використовується вузькосмуговий аналізатор USD, що досліджує внутрішні параметри сигналу. Модуль NBR дозволяє записувати одночасно до восьми каналів зі смугою 156 кГц або один канал у смузі до 1,5 МГц. Опція UTP забезпечує виявлення та захват мовних частотно-модульованих сигналів у спектрі і їх фільтрацію на фоні інших сигналів. VSA89600 дозволяє обробляти більше 75 стандартів і типів модуляцій, враховуючи радіокомунікаційні та радіолокаційні сигнали.

Anritsu Corporation

ПЗ Anritsu Vision Software [14] використовується для віддаленого управління аналізаторами РЧС Anritsu серії MS2710xA (9 кГц – 6 ГГц): модель MS27101A (1 вхід) модель MS27102A (1 або 2 входи) модель MS27103A (12 або 24 входи). Vision Acquire використовує багатопотоковість для одночасної обробки спектрів від багатьох віддалених аналізаторів. Обробка спектрів полягає у їх порівнянні із заданим шаблоном та зберіганні протягом визначеного періоду (до кількох місяців).

TCI International

ПЗ Scorpio Spectrum Monitoring [15] побудоване на основі використання методів, запропонованих Міжнародним союзом електров'язку. ПЗ має клієнт-серверну архітектуру, дозволяє обробляти сигнали з аналоговими та цифровими видами модуляції, враховуючи векторний аналіз сигналів, демодуляцію та аналіз бітових потоків. При швидкому скануванні радіочастотного спектра миттєва смуга аналізу може становити до 40 МГц, зменшуючись до 1,5 МГц за високої навантаженості смуги, а також за широкого динамічного діапазону сигналів. У смузі частот 40 МГц можливе виявлення сигналів із розширенням спектра та ППРЧ, враховуючи короткотривалі (менше 2 мс). Спектр сигналу розраховується на основі методу ШПФ. Поріг для виявлення сигналів розраховується динамічно. Опція Spectrum Surveyor забезпечує ведення бази даних спектрів для подальшого оброблення та візуалізації.

CRFS

ПЗ Rfeye DeepView [16] призначене для роботи із пристроєм запису Rfeye SenS Portable і дозволяє аналізувати записи 16-бітних I/Q сигналів тривалістю кілька днів у реальному масштабі часу у смузі до 100 МГц. ПЗ забезпечує виявлення вузькосмугових, широкосмугових, імпульсних та сигналів з ППРЧ, а при використанні додаткового ПЗ також створення баз даних сигналів, демодуляцію та дешифрування радіокомунікаційних сигналів.

ПЗ Rfeye Site забезпечує аналіз РЧС із використанням шаблонів, а також запис квадратурних сигналів. Класифікація сигналів здійснюється із використанням технології машинного навчання, що дозволяє підвищити її точність, а також обробляти нові типи сигналів.

LS Telecom

ПЗ Central Monitoring Software [17] комплексу радіомоніторингу LS OBSERVER забезпечує перегляд частотно-часового відображення заданої смуги частот у реальному масштабі часу, аналіз РЧС із використанням шаблонів, демодуляцію та прослуховування аналогових сигналів, запис квадратур.

DECODIO

ПЗ Decodio RED [18] є основним програмним компонентом Spectrum Monitoring System і забезпечує основну обробку сигналів та виділення ознак у смузі частот до 200 МГц. Для розширення робочої смуги частот може використовуватися кілька приймачів.

Виділення вузькосмугових сигналів, їх демодуляція та декодування виконується із використанням технології програмно-визначеного радіо. Максимальна кількість каналів визначається лише продуктивністю процесора. Для типового сучасного комп'ютера в реальному масштабі часу може оброблятися до 512 каналів. Для виокремлення різних ознак сигналу може використовуватися обробка в часовій і частотній областях, зокрема простепенюваних сигналів, а також проводиться автокореляційна обробка і розраховується кепстр.

Decodio RED поєднує ручний та автоматичний аналіз сигналів. Крім стандартних аналогових сигналів, можлива також демодуляція та декодування таких протоколів: TETRA, Tetrapol, DMR, dPMR, NXDN, P25 і D-STAR. Доступні також модулі для дешифрування. Для візуалізації даних, сформованих Decodio RED, використовується ПЗ Decodio BLUE, яке відіграє роль сервера та бази даних.

COMINT Consulting

ПЗ Krypto500 [19] забезпечує виявлення, оцінювання параметрів, класифікацію та ідентифікацію (база даних містить більше 400 модемів) радіосигналів у короткохвильовому діапазоні в смузі до 48 кГц. При цьому одночасно можуть оброблятися кілька сотень каналів. ПЗ містить великий набір інструментів для спектрального та параметричного аналізу, синхронізації та криптоаналізу, підтримує більше ніж 400 типів приймачів. ПЗ Krypto1000 виконує аналогічні до Krypto500 функції і містить набір демодуляторів і декодерів для сигналів із шириною смуги більше 48 кГц.

У результаті проведеного огляду можна виокремити основні підходи до побудови ПЗ аналізаторів РЧС:

- багатоканальний аналіз сигналів у широкодіапазонних сценаріях;
- поєднання ручної та повністю автоматичної обробки;
- реалізація рекомендацій ІТУ щодо обробки сигналів;
- наявність потужної бібліотеки ознак і шаблонів сигналів, яка поповнюється під час роботи системи;
- інтелектуальний збір і аналіз даних;
- відкритий інтерфейс з можливістю інтегрування розроблених користувачем власних модулів.

Динамічна реалізація енергетичного детектора. Статичні в часі методи аналізу працюють, як правило, з фіксованими значеннями порогів, що забезпечує добрі показники якості роботи в одній сигнальній обстановці і незадовільні в іншій. У цій роботі динамічність енергетичного детектора в частотній області полягає у послідовному формуванні порогу виявлення залежно від значення тестової статистики. Запропонований підхід дозволить виявляти та визначати частотні межі сигналів у широкому динамічному діапазоні при невідомих значеннях завантаженості смуги частот аналізу та потужності шуму. Сутність запропонованого методу полягає у формуванні тестової статистики із використанням відліків СЦП прийнятого сигналу, порівняно з її граничним значенням, у разі перевищення якого розраховується поріг для розділення частотних відліків на сигнальні та шумові. Надалі процедура повторюється, доки не будуть виявлені усі сигнальні відліки. Тестова статистика має бути чутливою до нерівномірностей СЦП. У [9] показано, що цій вимозі найкраще відповідає коефіцієнт варіації. Тому в нашій роботі будемо використовувати саме її.

На рисунку 1 наведено алгоритм роботи динамічного енергетичного детектора в частотній області. Вхідними даними алгоритму (блок 1) є довжина фрагмента сигналу N , що обробляється, довжини ШПФ N_{FFT} , кількість відліків сигналу R , що перекриваються, тип віконної функції w , вектор порогових значень тестової статистики Q_{tr} , відліки прийнятої реалізації $x[n]$ та ймовірність хибної тривоги P_F . Вектор Q_{tr} має довжину N_{FFT} , а кожен його елемент є коефіцієнтом варіації нормованого до енергії вектора СЦП шуму при послідовному відкиданні максимального відліку. Відповідно до центральної граничної теореми розподіл щільності ймовірностей (РЩЙ) тестової статистики є асимптотично нормальним.

Розрахунок вектора СЦП X проводиться на основі періодограми Уелча (блок 2). Для уникнення необхідності оцінювання невідомої потужності шуму у блоці 3 проводиться нормування вектора частотних відліків до енергії. Значення варіації Q вектора нормованих частотних відліків Z розраховується у блоці 4. При перевищенні розрахованим значенням Q порогового значення $Q_{tr}[0]$ (блок 5) оброблення вектора відліків СЦП продовжується. В протилежному випадку вважається, що у прийнятій реалізації лише шум, і проводиться оброблення наступного фрагмента прийнятої реалізації.

У блоці 6 проводиться розрахунок значення порога T із використанням заданої ймовірності хибної тривоги P_F . РЩЙ шумових відліків періодограми Уелча підпорядкований закону χ^2 -квадрат з $2K$ ступенями свободи, де K – кількість сегментів сигналу, що розраховується за таким виразом:

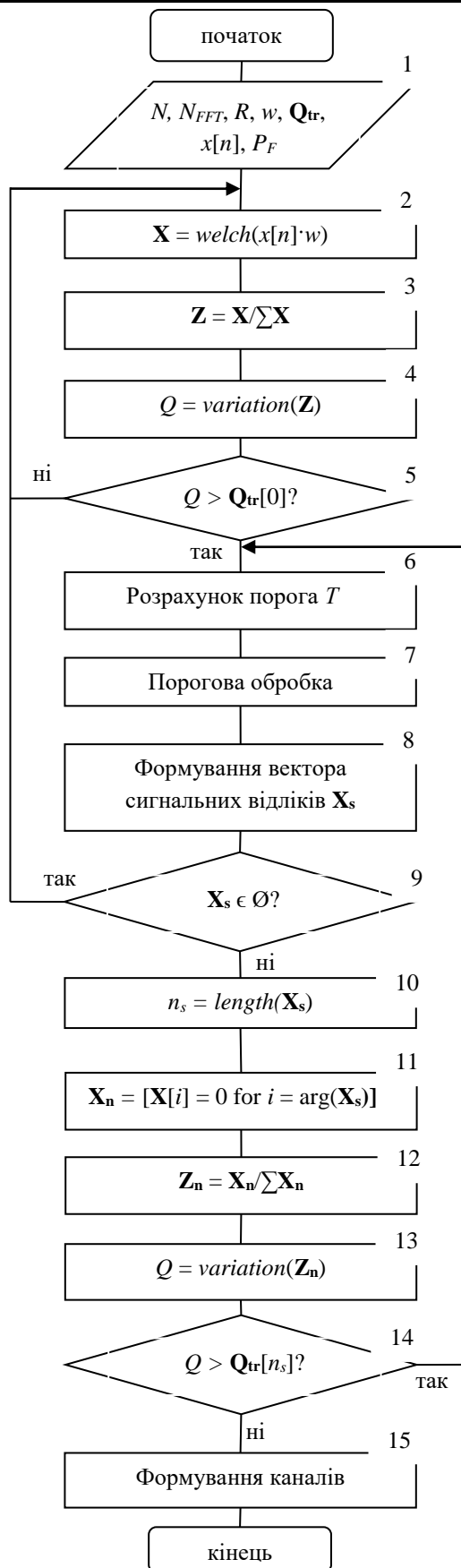


Рис. 1. Блок-схема алгоритму роботи динамічного енергетичного детектора

$$K = \frac{N}{N_{FFT} - R} - 1. \quad (1)$$

У разі оброблення комплексного сигналу значення порога T обчислюється як квантиль розподілу χ^2 -квадрат рівня P_F . Із використанням апроксимації Вілсона – Хілферті квантилів розподілу χ^2 -квадрат [20, с. 45] значення порога T можна розрахувати за таким виразом:

$$T = \frac{1}{N_{FFT} - n_s} \left(1 - \frac{1}{8,64K} + u \sqrt{\frac{1}{8,64K}} \right)^3, \quad (2)$$

де

$$u = \frac{1,24 + 0,85H^{0,657}}{1 + 0,0001H^{-3} + \frac{2,38}{H}}, \quad (3)$$

$$H = -\ln \left(\frac{P_F}{1 - P_F} \right).$$

За наявності у смузі частот аналізу кількох сигналів із різними рівнями потужності деякі слабкі сигнали можуть не перевищити цей поріг і будуть пропущені. У такому випадку значення порога T може розраховуватися кілька разів залежно від динамічного діапазону сигналів та завантаженості смуги частот.

Перевищення розрахованими значеннями тестової статистики її порогового значення вказує лише на те, що у прийнятій реалізації є сигнальні відліки або із ймовірністю P_F є не менше одного шумового відліку. Для визначення номерів сигнальних відліків у блоці 7 проводиться порівняння значень елементів вектора \mathbf{X} зі значенням порога T і у разі його перевищення у блоці 8 формується вектор сигнальних відліків \mathbf{X}_s . Пороги T і $\mathbf{Q}_{tr}[n_s]$ мають бути такими, щоб забезпечувати приблизно однакове значення P_F . Через мінливість шуму при ітеративному пороговому обробленні можлива така ситуація, коли жоден із частотних відліків не перевищує заданий поріг T , а розраховане значення тестової статистики Q перевищить порогове $\mathbf{Q}_{tr}[n_s]$. У такому випадку алгоритм зациклюється. Для уникнення подібної ситуації у блоці 9 здійснюється перевірка: чи були за даної ітерації виявлені сигнальні відліки. Якщо вектор \mathbf{X}_s виявиться порожнім, то здійснюється обробка наступного фрагмента сигналу. В протилежному випадку визначається кількість сигнальних відліків n_s (блок 10). Порогове значення тестової статистики розраховується за таким виразом:

$$\mathbf{Q}_{tr}[n_s] = u \cdot \text{std}(\mathbf{Q}_n[n_s]) + \text{mean}(\mathbf{Q}_n[n_s]), \quad (4)$$

де u – квантиль стандартного нормального розподілу, що розраховується відповідно до виразу (3);

$\text{std}(\cdot)$, $\text{mean}(\cdot)$ – вибіркові середньоквадратичне відхилення та середнє відповідно;

$\mathbf{Q}_n[n_s]$ – вектор значень тестової статистики для шуму для ітерації з номером n_s .

У блоці 11 формується вектор шумових відліків \mathbf{X}_n шляхом обнулення елементів вектора \mathbf{X} , які перевищили поріг T . У блоці 12 проводиться аналогічна до блоку 3 операція нормування до енергії і формується вектор \mathbf{Z}_n . У блоці 13 розраховується значення тестової статистики для вектора \mathbf{Z}_n , яке порівнюється з її пороговим значенням $Q_{tr}[n_s]$ для заданої кількості сигнальних відліків n_s . У разі перевищення цього порога вважається, що у векторі \mathbf{Z}_n ще є сигнальні відліки і процедура виявлення сигнальних відліків (блоки 6–14) повторюється. На виході алгоритму (блок 15) формуються частотні канали, в яких здійснюється подальша обробка сигналів.

Для перевірки працездатності запропонованого алгоритму було сформовано дві моделі сигнальної обстановки. У першій в смузі частот аналізу розміщувалися сигнали з модуляцією QAM-16 з різними тривалостями інформаційних символів та немодульовані гармонічні коливання. Відношення сигнал – шум (ВСШ) для кожного сигналу моделювалося як випадкова величина з рівномірним розподілом у діапазоні від -10 до 20 дБ. Загальна завантаженість при цьому складала близько 20 %. У другій сигнальній обстановці один широкосмуговий сигнал займав близько 70 % усієї смуги частот.

Параметри динамічного енергетичного детектора: довжина ШПФ – $N_{FFT} = 2048$, довжина фрагмента сигналу, що обробляється – $N = 8N_{FFT}$, кількість відліків сигналу, що перекриваються – $R = 0,5N_{FFT}$, тип віконної функції Хеммінга, ймовірність хибної тривоги – $P_F = 10^{-3}$. Тип сигналу – комплексний.

На рисунку 2, а наведено результати роботи динамічного енергетичного детектора при завантаженості смуги частот аналізу 20 %. Як бачимо, алгоритм безпомилково виявив та визначив частотні межі усіх частотних каналів. На рисунку 2, б показано результати роботи алгоритму для сигналу, що займає більшу частину смуги частот аналізу.

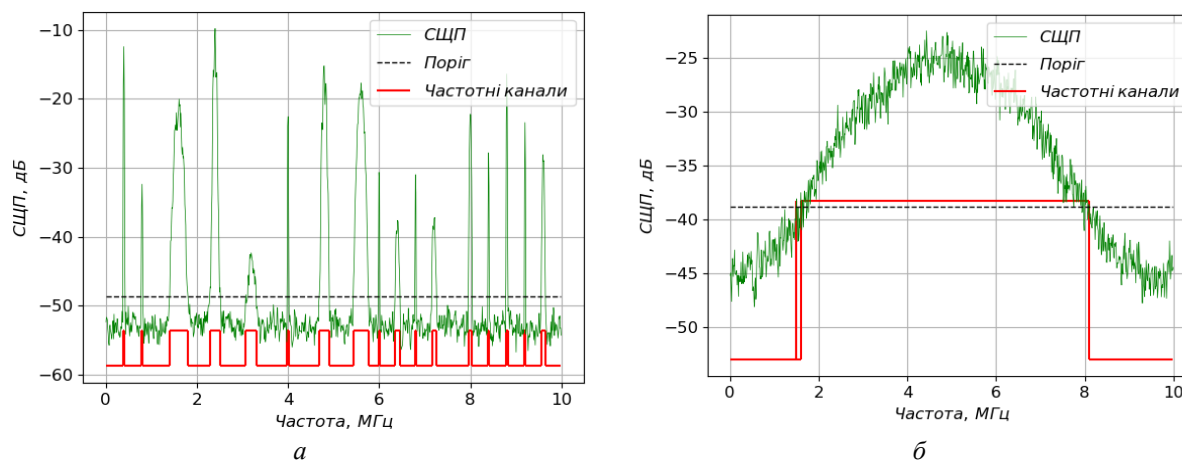


Рис. 2. Результати роботи динамічного енергетичного детектора при завантаженості смуги 20 % (а) та 65 % (б)

Запропонований алгоритм дає змогу швидше виявляти частотні канали, ніж описаний у [10] метод. Зростання швидкодії залежить від рівня зайнятості РЧС, динамічного діапазону сигналів і довжини ШПФ та може становити десятки–сотні разів. Під час експерименту було встановлено, що 15 ітерацій, як правило, достатньо для виявлення усіх частотних каналів у будь-якій сигнальній обстановці. Проте через використання подвійної порогової обробки різномісних величин втрати у ВСШ становитимуть у середньому 1–2 дБ порівняно з [10].

При підвищенні завантаженості смуги частот аналізу, розширенні динамічного діапазону сигналів та збільшенні довжини ШПФ кількість ітерацій для виявлення зайнятих частотних каналів збільшується. Динамічний діапазон, у якому розроблений метод забезпечує коректне виявлення усіх сигналів, визначається максимальним рівнем бічних пелюсток віконної функції.

Використання розробленого методу під час виявлення зайнятих ділянок РЧС не потребує оцінювання потужності шуму при визначенні порогу. У [21] показано, що невизначеність у значенні потужності шуму близько 2 дБ призводить до втрат у ВСШ близько 6 дБ. Тому реалізація та використання розробленого алгоритму дасть змогу використовувати різні радіоприймальні пристрої без їх додаткового калібрування за рівнем шуму.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Наукова новизна запропонованого динамічного енергетичного детектора полягає у використанні коефіцієнта варіації та ітеративного розрахунку порога для розділення сигнальних і шумових відліків у частотній області. Достовірність отриманого наукового положення підтверджується збігом результатів теоретичних і експериментальних досліджень. Використання розробленого динамічного алгоритму дозволить виявляти та визначати частотні межі

сигналів у широкому динамічному діапазоні при невідомих значеннях завантаженості смуги частот аналізу та потужності шуму, що забезпечить підвищення ефективності виявлення зайнятих ділянок частот. Запропонований алгоритм може бути програмно реалізований як окреме програмне забезпечення або як інструмент для вже існуючих аналізаторів спектра. Перспективи подальших досліджень у цьому напрямі полягають у визначенні аналітичних залежностей значень порогів від значень параметрів динамічного алгоритму та у дослідженні його ефективності.

Список використаної літератури:

1. A Novel Iterative Discrete Estimation Algorithm for Low-Complexity Signal Detection in Uplink Massive MIMO Systems / *H.Feng et al.* // *Electronics*. – 2018. – Vol. 8. – P. 1–13. DOI:10.3390/electronics80.
2. *Vartiainen J.* Double-threshold based narrowband signal extraction / *J.Vartiainen, J.Lehtomaki, H.Saarnisaari* // *IEEE 61st Vehicular Technology Conference*. – 2005. – 5 p. DOI: 10.1109/VETECS.2005.1543516.
3. *Бугайов М.В.* Алгоритм виявлення акустичних сигналів БПЛА / *М.В. Бугайов* // *Вісник ЖДТУ. Серія : Технічні науки*. – Житомир : ЖДТУ, 2015. – № 74 (3). – С. 46–53.
4. *Hu X-L.* Statistical Properties of Energy Detection for Spectrum Sensing by Using Estimated Noise Variance / *X-L. Hu, P-H. Ho, L.Peng* // *Journal of Sensors and Actuator Networks*. – 2019. – № 8 (28). – P. 1–22. DOI:10.3390/jsan8020028.
5. *Bozovic R.* Spectrum Sensing Based on Higher Order Cumulants and Kurtosis Statistics Tests in Cognitive Radio / *R.Bozovic, M.Simic* // *Radioengineering*. – 2019. – Vol. 28, № 2. – P. 464–472. DOI: 10.13164/re.2019.0464.
6. *Negi B.S.* Enhancing Entropy Based Spectrum Sensing using Eigen Value Decomposition in Cognitive Radio Networks / *B.S. Negi, O.Singh, C.Khairman* // *International Journal of Engineering Research and Technology*. – 2019. – Vol. 12, № 7. – P. 1008–1013.
7. *Ahmad B.I.* Reliable wideband multichannel spectrum sensing using randomized sampling schemes / *B.I. Ahmad, A.Tarczynski* // *Signal Processing*. – 2010. – P. 2232–2242.
8. *Бугайов М.В.* Узагальнений енергетичний детектор з ітеративним обробленням вузькосмугових сигналів у частотній області / *М.В. Бугайов* // *Вісник НТУУ «КПІ». Серія : Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. – Київ : КПІ, 2019. – № 78. – С. 27–35. DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2019.78.27-35>.
9. *Бугайов М.В.* Ітеративний метод виявлення радіосигналів на основі вирішуючих статистик / *М.В. Бугайов* // *Вісник НТУУ «КПІ». Серія : Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. – Київ : КПІ, 2020. – № 81. – С. 11–20. DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.18.11-20>.
10. *Buhaiov M.V.* Fast spectrum sensing method for cognitive radio / *M.V. Buhaiov* // *Visnyk NTUU KPI. Seriya : Radiotekhnika. Radioaparotobuduvannia*. – 2020. – № 83. – P. 41–46. DOI: 10.20535/RADAP.2020.83.41-46.
11. R&S CA120 Multichannel signal analysis software. Automatic detection, classification, demodulation and decoding [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.rohde-schwarz.com/products/aerospace-defense-security/online-signal-analysis/rs-ca120-multichannel-signal-analysis-software_63493-52993.html.
12. R&S®GX410 Signal analysis software. Offline analysis of frequency agile short-time emissions [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.rohde-schwarz.com/products/aerospace-defense-security/technical-signal-analysis/rs-gx410-signal-analysis-software_63493-9553.html.
13. Signal Surveyor 4D [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.keysight.com/us/en/software/application-sw/spectrum-monitoring-software/signal-surveyor-4d.html>.
14. Vision MX280001A Software [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://dl.cdn-anritsu.com/en-us/test-measurement/files/Brochures-Datasheets-Catalogs/Brochure/11410-00876J.pdf>.
15. TCI SCORPIO SPECTRUM MONITORING SOFTWARE [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.tcibr.com/tci-scorprio-spectrum-monitoring-software/>.
16. DeepView – RF Spectrum Analyzer software [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.crfs.com/product/software/deepview/>.
17. LS OBSERVER. Automated spectrum monitoring, direction finding and geolocation system [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.lstelcom.com/en/solutions-in/spectrum-monitoring/ls-observer/>.
18. Decodio RED [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.decodio.com/products/red>.
19. Krypto500. Narrowband Signals Analysis and Decoding Suite [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.comintconsulting.com/krypto500>.
20. *Кобзарь А.И.* Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / *А.И. Кобзарь*. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
21. *López-Benítez M.* Performance of Spectrum Sensing for Cognitive Radio based on Field Measurements of Various Radio Technologies / *M.López-Benítez, F.Casadevall, C.Martella* // *European Wireless Conference*. – 2010. – P. 969–977. DOI: 10.1109/EW.2010.5483510.

References:

1. Feng, H. et al. (2018), «A Novel Iterative Discrete Estimation Algorithm for Low-Complexity Signal Detection in Uplink Massive MIMO Systems», *Electronics*, Vol. 8, pp. 1–13, doi:10.3390/electronics80.
2. Vartiainen, J., Lehtomaki, J. and Saarnisaari, H. (2005), «Double-threshold based narrowband signal extraction», *IEEE 61st Vehicular Technology Conference*, 5 p, doi: 10.1109/VETECS.2005.1543516.
3. Bugajov, M.V. (2015), «Algoritm vyjavlennja akustychnyh sygnaliv BPLA», *Visnyk ZhDTU, Serija Tehnichni nauky, ZhDTU, Zhytomyr*, No. 74 (3), pp. 46–53.

4. Hu, X.-L., Ho, P.-H. and Peng, L. (2019), «Statistical Properties of Energy Detection for Spectrum Sensing by Using Estimated Noise Variance», *Journal of Sensors and Actuator Networks*, No. 8 (28), pp. 1–22, doi:10.3390/jsan8020028.
5. Bozovic, R. and Simic, M. (2019), «Spectrum Sensing Based on Higher Order Cumulants and Kurtosis Statistics Tests in Cognitive Radio», *Radioengineering*, Vol. 28, No. 2, pp. 464–472, doi: 10.13164/re.2019.0464.
6. Negi, B.S., Singh, O. and Khairnan, C. (2019), «Enhancing Entropy Based Spectrum Sensing using Eigen Value Decomposition in Cognitive Radio Networks», *International Journal of Engineering Research and Technology*, Vol. 12, No. 7, pp. 1008–1013.
7. Ahmad, B.I. and Tarczynski, A. (2010), «Reliable wideband multichannel spectrum sensing using randomized sampling schemes», *Signal Processing*, pp. 2232–2242.
8. Bugajov, M.V. (2019), «Uzagal'nenyj energetychnyj detektor z iteratyvnym obroblennjam vuz'kosmugovyh sygnaliv u chastotnij oblasti», *Visnyk NTUU «KPI»*, Serija Radiotekhnika. Radioaparotobuduvannja, KPI, Kyi'v, No. 78, pp. 27–35, doi: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2019.78.27-35>.
9. Bugajov, M.V. (2020), «Iteratyvnyj metod vyjavlennja radiosygnaliv na osnovi vyrishujuchyh statystyk», *Visnyk NTUU «KPI»*, Serija Radiotekhnika. Radioaparotobuduvannja, KPI, Kyi'v, No. 81, pp. 11–20, doi: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.18.11-20>.
10. Buhaiiov, M.V. (2020), «Fast spectrum sensing method for cognitive radio», *Visnyk NTUU KPI, Serija Radiotekhnika. Radioaparotobuduvannja*, No. 83, pp. 41–46, doi: 10.20535/RADAP.2020.83.41-46.
11. R&S CA120 Multichannel signal analysis software. Automatic detection, classification, demodulation and decoding, [Online], available at: https://www.rohde-schwarz.com/products/aerospace-defense-security/online-signal-analysis/rs-ca120-multichannel-signal-analysis-software_63493-52993.html
12. R&S®GX410 Signal analysis software. Offline analysis of frequency agile short-time emissions, [Online], available at: https://www.rohde-schwarz.com/products/aerospace-defense-security/technical-signal-analysis/rs-gx410-signal-analysis-software_63493-9553.html
13. Signal Surveyor 4D, [Online], available at: <https://www.keysight.com/us/en/software/application-sw/spectrum-monitoring-software/signal-surveyor-4d.html>
14. Vision MX280001A Software, [Online], available at: <https://dl.cdn-anritsu.com/en-us/test-measurement/files/Brochures-Datasheets-Catalogs/Brochure/11410-00876J.pdf>
15. TCI SCORPIO SPECTRUM MONITORING SOFTWARE, [Online], available at: <https://www.tcibr.com/tci-scorprio-spectrum-monitoring-software/>
16. DeepView – RF Spectrum Analyzer software, [Online], available at: <https://www.crfs.com/product/software/deepview/>
17. LS OBSERVER. Automated spectrum monitoring, direction finding and geolocation system, [Online], available at: <https://www.lstelcom.com/en/solutions-in/spectrum-monitoring/ls-observer/>
18. Decodio RED, [Online], available at: <https://www.decodio.com/products/red>
19. Krypto500. Narrowband Signals Analysis and Decoding Suite, [Online], available at: <https://www.comintconsulting.com/krypto500>
20. Kobzar', A.I. (2006), *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov*, FIZMATLIT, M., 816 p.
21. López-Benítez, M., Casadevall, F. and Martella, C. (2010), «Performance of Spectrum Sensing for Cognitive Radio based on Field Measurements of Various Radio Technologies», *European Wireless Conference*, pp. 969–977, doi: 10.1109/EW.2010.5483510.

Бугайов Микола Вікторович – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С.П. Корольова.

<http://orcid.org/0000-0003-0899-9843>.

Наукові інтереси:

– математичні методи і алгоритми оброблення сигналів.

E-mail: karunen@ukr.net.

Нагорнюк Олександр Анатолійович – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С.П. Корольова.

<http://orcid.org/0000-0002-7680-7201>.

Наукові інтереси:

– цифрова обробка та розпізнавання сигналів.

E-mail: nahorniuk@i.ua.

Шапар Роман Вікторович – старший науковий співробітник науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С.П. Корольова.

<http://orcid.org/0000-0002-2600-8081>.

Наукові інтереси:

– радіотехнічні системи.

E-mail: romshap2007@ukr.net.

Стаття надійшла до редакції 27.08.2021.