

М. В. Бугайов, С. В. Закіров, В. В. Клязника, Д. О. Гончаров

АВТОМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ ЗАВАНТАЖЕНОСТІ РАДІОЧАСТОТНОГО СПЕКТРА ТА СЕЛЕКЦІЯ СИГНАЛІВ

Постійне збільшення кількості радіоелектронних засобів призводить до зростання завантаженості радіочастотного спектра й ускладнення радіоелектронної обстановки. За таких умов для оперативного виявлення та селекції радіосигналів у системах радіомоніторингу необхідно використовувати автоматичні алгоритми. Метою статті є розроблення алгоритмів і рекомендацій щодо їх практичної реалізації для автоматизації процесу аналізу завантаженості радіочастотного спектра та селекції сигналів у широкому динамічному діапазоні за високої завантаженості смуги частот аналізу в умовах апріорної невизначеності щодо рівня шуму. Для досягнення поставленої мети було розроблено узагальнений алгоритм аналізу радіочастотного спектра, алгоритм оброблення в частотній області, алгоритм аналізу частотних каналів, а також наведено приклади аналізу ділянки спектра з високою завантаженістю та надано рекомендації щодо реалізації розроблених алгоритмів. Залежно від мінливості потужності шуму в смузі частот аналізу передбачено адаптивну зміну часового інтервалу його оцінювання, що зменшить обчислювальну складність. В умовах нерівномірного рівня шуму або широкого динамічного діапазону сигналів для аналізу частотних каналів запропоновано використовувати спеціальну тестову статистику для визначення їх заповненості. У ході експериментальних досліджень було проаналізовано записи у смугах частот 900 МГц, 1800 МГц та 2100 МГц. Встановлено, що розроблені алгоритми забезпечують правильне оцінювання завантаженості визначених ділянок радіочастотного спектра та селекцію сигналів за їх динамічного діапазону не менше 35 дБ і завантаженості до 92%. Запропоновані алгоритми не вимагають калібрування апаратури у разі коливань характеристик окремих елементів системи та зміни радіоелектронної обстановки і можуть бути реалізовані в наявних та перспективних автоматичних системах радіомоніторингу.

Ключові слова: радіочастотний спектр; завантаженість смуги частот; селекція сигналів; тестова статистика; частотний канал.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Сучасний етап розвитку техніки супроводжується постійним збільшенням кількості радіоелектронних засобів, що призводить до зростання завантаженості радіочастотного спектра (РЧС) та ускладнення радіоелектронної обстановки (РЕО) [1–3]. У таких умовах оперативне виявлення сигналів із заданими параметрами та пошук незайнятих частотних смуг у ручному та автоматизованому режимах стають малоефективними. Це пов'язано із розширенням смуг панорамного огляду сучасних радіоприймальних пристроїв і, як наслідок, зростанням імовірності одночасного приймання потужних і слабких сигналів в одній смузі частот, ускладненням частотно-часової структури радіосигналів та динамічною зміною РЕО.

© М. В. Бугайов, С. В. Закіров, В. В. Клязника, Д. О. Гончаров, 2023

Розглянуті фактори вимагають переходу до автоматичного аналізу завантаженості РЧС та селекції сигналів у системах радіомоніторингу. Тому розроблення автоматичних алгоритмів для аналізу РЧС і рекомендацій щодо їх реалізації є актуальним науково-прикладним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки спостерігається значне збільшення кількості наукових публікацій, присвячених розробленню автоматичних методів та алгоритмів аналізу РЧС. Зокрема, у [4] для аналізу спектра запропоновано використовувати технологію машинного навчання на основі методу опорних векторів. У [5] для визначення частотних меж сигналів рекомендують застосовувати вейвлет-перетворення. Для оцінювання рівня шуму та завантаженості РЧС у [6] описано нове рішення на основі байєсівського підходу, а в [7] запропоновано використовувати згортковий автокодувальник. Для одночасного виявлення та оцінювання параметрів кількох сигналів у [8] пропонують нейронну мережу з глибоким навчанням SigdetNet, на вхід якої подається енергетичний спектр з його подальшим логарифмічним перетворенням для підсилення сигналів. У [9] радять виявляти зайняті ділянки РЧС шляхом аналізу багатьох частотних каналів, на які розділена уся смуга пропускання приймача.

Ітеративні методи дозволяють визначати вільні ділянки РЧС в умовах динамічної зміни РЕО за невідомої потужності шуму, а динамічний діапазон сигналів, що можуть оброблятися, обмежується лише рівнем бічних пелюсток віконної функції. У [10–11] розглянуто ітеративні методи виявлення радіосигналів із використанням тестових статистик. У [12] запропоновано швидку реалізацію ітеративного алгоритму, а в [13] ітеративний алгоритм рекомендовано використовувати для оцінювання рівня шуму в умовах невідомого рівня завантаженості РЧС. Алгоритм із ітеративним пороговим обробленням значень тестової статистики та частотних відліків описано в [14]. Такий підхід забезпечує суттєве зменшення обчислювальної складності ітеративного алгоритму. Для виявлення вільних ділянок РЧС за його високої завантаженості у [15] запропоновано використовувати метод, що враховує властивості моди гістограми шумових частотних відліків.

Проте у розглянутих публікаціях не вирішено завдання автоматизації роботи запропонованих алгоритмів, зокрема адаптивної зміни їх параметрів в умовах складної та динамічної РЕО.

Формулювання завдання дослідження. Задано ділянку РЧС, у якій може розміщуватися декілька сигналів із невідомими частотно-часовими параметрами. Рівень шуму в заданій смузі частот є невідомим, практично однаковим на усіх частотах і може змінюватися в часі, причому швидкість переміни потужності шуму набагато менша за швидкість коливань рівнів сигналів. Необхідно автоматично оцінити рівень шуму, знайти частотні межі зайнятих ділянок РЧС та провести селекцію сигналів за шириною спектра та потужністю.

Метою статті є розроблення алгоритмів і рекомендацій щодо їх практичної реалізації для автоматизації процесу аналізу завантаженості РЧС та селекції сигналів у широкому динамічному діапазоні за високої завантаженості смуги частот аналізу в умовах апріорної невизначеності щодо рівня шуму.

Виклад основного матеріалу

1. Узагальнена блок-схема алгоритму автоматичного аналізу РЧС

Для визначення зайнятих ділянок РЧС необхідно постійно або періодично аналізувати визначену смугу частот [1]. На рис. 1 наведено узагальнену блок-схему алгоритму автоматичного аналізу РЧС. Спочатку із вхідного потоку відліків сигналу береться вибірка довжиною N (блок 1) і зберігається в буфер (блок 3). Для неї в блоці 5 розраховується вектор відліків спектральної щільності потужності (СЩП) P_{xx} на основі періодограми Уелча, а також обчислюється значення тестової статистики для даного вектора. Як тестову статистику використано коефіцієнт варіації вектора частотних відліків енергетичного спектра, що розраховується як відношення середньоквадратичного відхилення до середнього значення [12]. У разі перевищення значення тестової статистики заданого порога приймається рішення, що в смузі частот аналізу є сигнальні відліки (блок 6). Для їх виявлення необхідно оцінити рівень шуму P_{ξ} , розрахувати на основі цього значення поріг та провести порогове оброблення частотних відліків. Оскільки потужність шуму змінюється, як правило, набагато повільніше порівняно з потужністю сигналів, то його рівень доцільно оцінювати не постійно, а з деяким періодом Δt . Причому значення Δt рекомендовано змінювати в ході роботи алгоритму. На початку Δt доцільно обирати невеликим (10–60 с), оскільки невідома динаміка зміни рівня шуму в смузі частот у місці проведення вимірювань, та провести близько 10–30 вимірювань рівня шуму. Після цього потрібно розрахувати коефіцієнт варіації V для вимірюваних значень P_{ξ} . Якщо значення V не перевищує 0,1, то можна збільшувати інтервал Δt до 10 хв, а потім до однієї години. Обирати довший інтервал не рекомендовано, оскільки в разі зміни часу доби можливі значні коливання рівня фоновому шуму, особливо в містах. За $V > 0,1$ можна зменшити значення Δt до 1 с. Оцінювання рівня шуму необхідно обов'язково проводити під час переналаштування приймача на іншу смугу частот, а також для заміни окремих елементів радіочастотного тракту системи радіомоніторингу (антен, кабелів зниження, підсилювачів, фільтрів тощо).

У разі відсутності сигналів, якщо поточний час t_i перевищує тривалість оброблення попереднього буфера відліків сигналу t_{i-1} на величину Δt (блок 4), проводиться оцінювання рівня шуму (блок 2), це значення в подальшому використовується для розрахунку порога. При цьому обробляється наступний фрагмент сигналу – і дані в буфері оновлюються.

Якщо в поточний момент часу t_i було прийнято рішення про наявність у смузі частот аналізу сигналів (блок 6), то залежно від того, виконується чи ні умова $t_i \geq t_{i-1} + \Delta t$ (блок 7), може проводитися оцінювання рівня шуму на основі значень його потужності у вільних частотних каналах (блок 8) або визначення зайнятих каналів (блок 9) із використанням попередньої оцінки потужності шуму.

У блоці 10 проводиться селекція сигналів у виявлених частотних каналах. На даному етапі оброблення її доцільно здійснювати за двома параметрами: шириною смуги частотного каналу та максимальним рівнем потужності сигналу в ньому.

Ширина частотного каналу вимірюється на рівні порога. Хоча можливі й інші варіанти, наприклад, на рівні -3 дБ або -26 дБ від максимального рівня сигналу в каналі. Мінімальне та максимальне значення ширини смуги каналу, за якими здійснюється селекція для комплексного сигналу, можуть змінюватися в межах від 0 до значення частоти дискретизації.

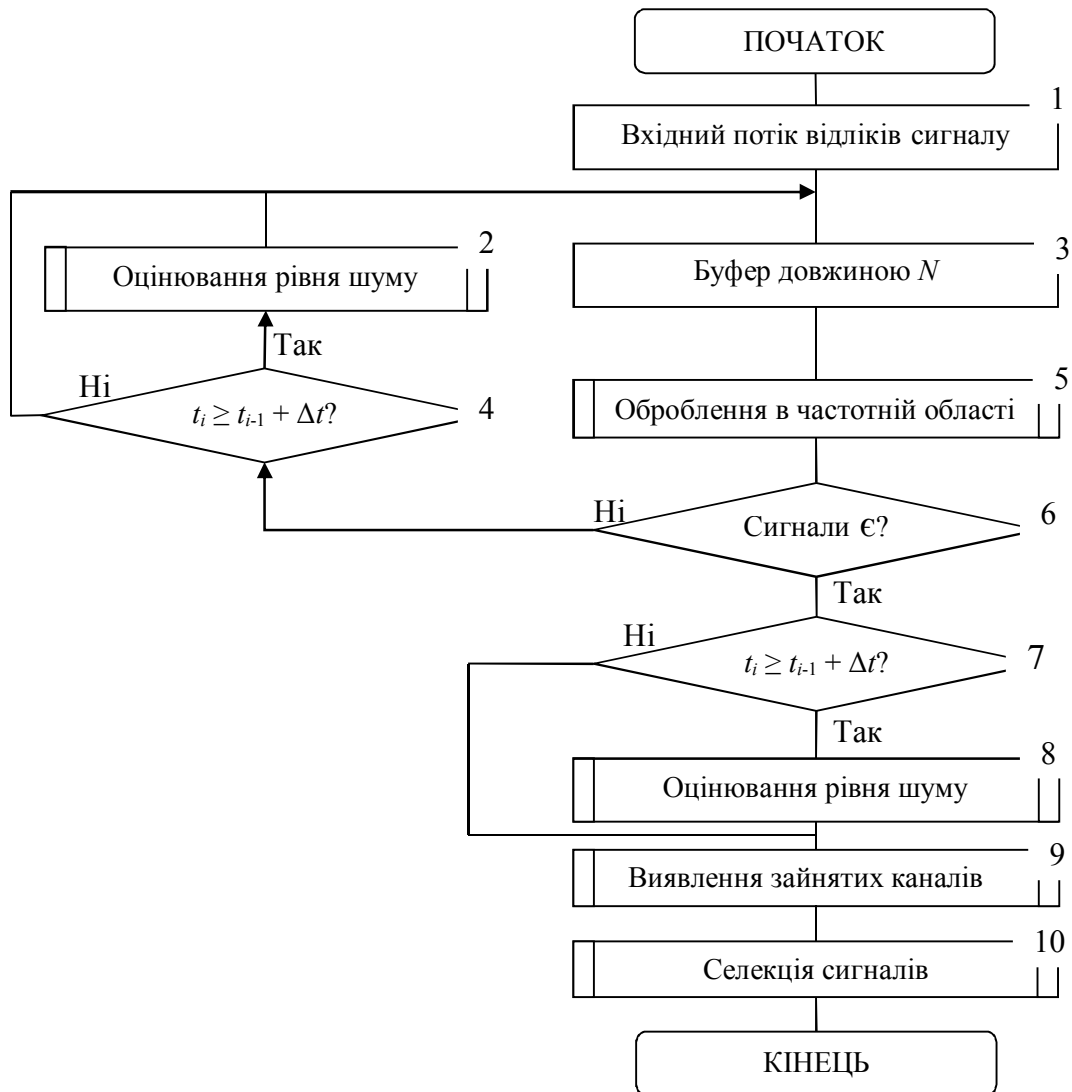


Рис. 1. Узагальнена блок-схема алгоритму автоматичного аналізу РЧС

У разі селекції сигналів за рівнем потужності мінімальне граничне значення доцільно обирати не менше рівня порога виявлення, а максимальне – не більше максимального значення потужності частотного відліку в смузі частот аналізу. Причому граничні значення потужностей доцільно задавати в децибелах. Вони будуть вказувати, на скільки децибел нижній поріг перевищує рівень шуму, а верхній менший за максимальний рівень сигналу в смузі частот аналізу.

Після виявлення та селекції за заданими параметрами частотних каналів можна реалізувати процедуру розпізнавання виду модуляції сигналів. Уточнення початку та закінчення сигналу у виявлених частотних каналах в межах буфера довжиною N відліків можна проводити із використанням запропонованого в [16] методу.

2. Алгоритм оброблення в частотній області

Оброблення в частотній області полягає в розрахунку СЦП, визначенні частотних меж сигналів та оцінюванні рівня шуму із використанням ітеративного алгоритму на основі тестових статистик [11, 13–14]. Блок-схему алгоритму оброблення в частотній області, що відповідає блокам 5 та 6 алгоритму автоматичного аналізу РЧС, наведено на рис. 2.

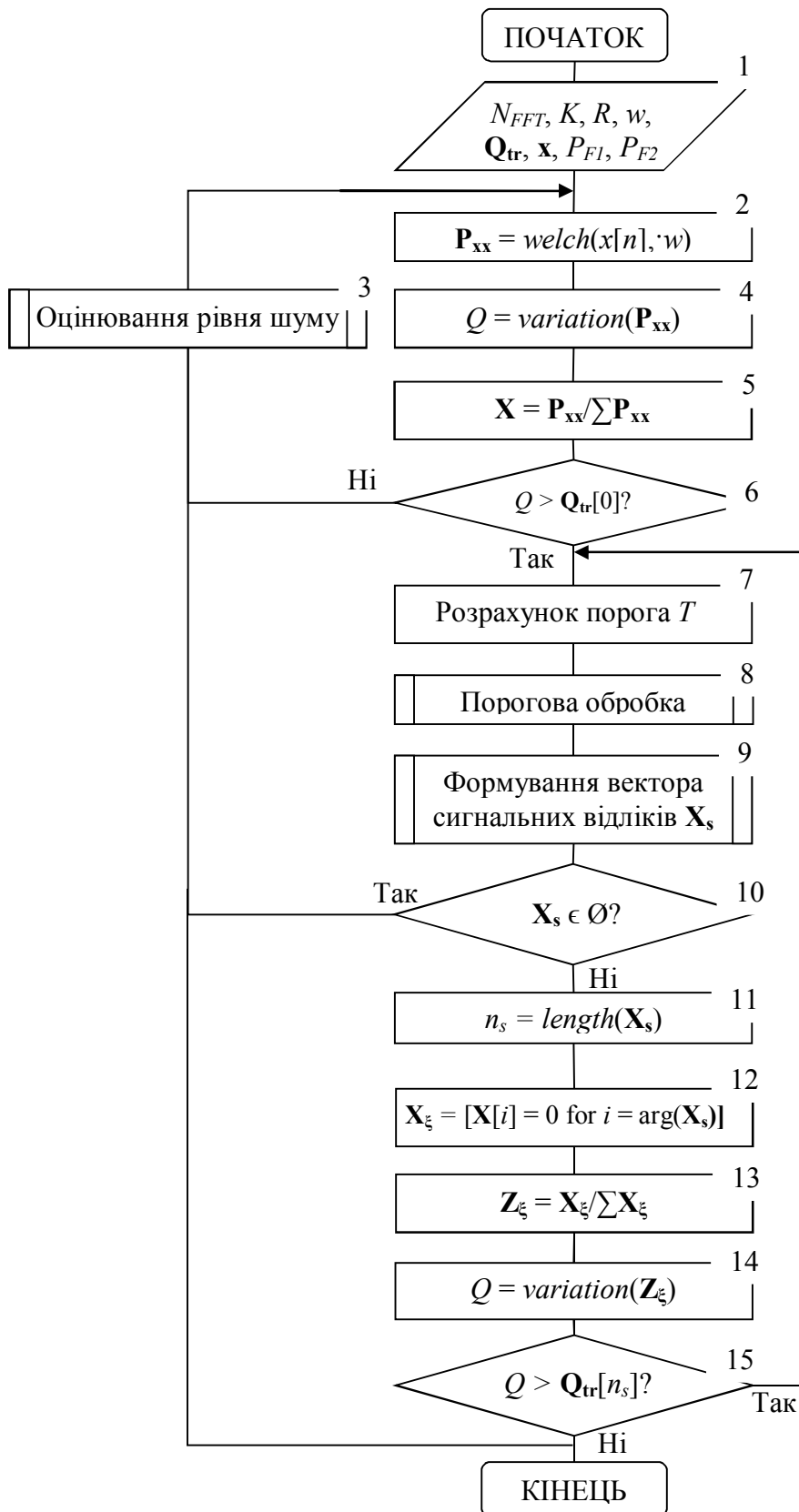


Рис. 2. Блок-схема алгоритму оброблення в частотній області

Вхідними даними алгоритму (блок 1) є параметри періодограми Уелча (довжина вікна швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) N_{FFT} , кількість фрагментів сигналу K , що накопичуються, кількість відліків сигналу R , які перекриваються, тип віконної функції w),

вектор порогових значень тестової статистики \mathbf{Q}_{tr} , вектор відліків прийнятого сигналу \mathbf{x} та два значення ймовірності хибної тривоги: P_{F1} визначає ймовірність хибного рішення щодо наявності або відсутності у смузі частот аналізу сигналів, яке приймається на основі порівняння розрахованого значення коефіцієнта варіації вектора СЦП із пороговим; значення P_{F2} визначає ймовірність хибного рішення щодо належності частотних відліків шуму, які перевищили поріг, до сигнальних.

Вектор \mathbf{Q}_{tr} має довжину N_{FFT} , а кожен його елемент є функцією від статистичних характеристик коефіцієнта варіації Q вектора відліків СЦП шуму, що розраховується за їх випадкового відкидання. Коефіцієнт варіації Q є інтегральною характеристикою, яка залежить від усіх значень елементів вибірки. У кожній вибірці енергетичного спектра шуму через його обмежену довжину і випадковість різна кількість відліків, що перевищують деякий поріг. Тому для різних вибірок значення коефіцієнта варіації може бути однаковим. Тобто залежність між імовірністю хибної тривоги P_{F1} та коефіцієнтом варіації Q є неоднозначною і не може бути отримана аналітично.

Відповідно до центральної граничної теореми, значення коефіцієнта варіації підпорядковані нормальному розподілу. Порогове значення коефіцієнта варіації для i -ї ітерації в [17] запропоновано розраховувати за таким виразом:

$$Q_{tr}(i) = m_Q(i) + \alpha(P_{F1})\sigma_Q(i), \quad (1)$$

де $m_Q(i)$ – середнє значення коефіцієнта варіації для i -ї ітерації;

$\sigma_Q(i)$ – значення середньоквадратичного відхилення коефіцієнта варіації для i -ї ітерації;

α – коефіцієнт, що визначається значенням P_{F1} .

Значення m_Q та σ_Q залежать від параметрів періодограми Уелча: N_{FFT} , K , R та типу віконної функції. Проте ця залежність від двох останніх параметрів є досить слабкою, і нею можна знехтувати. Зазначене спрощення є справедливим, оскільки варіації значень m_Q та σ_Q , у разі зміни R та типу вікна, набагато менші за їх середні значення.

Функціональну залежність $\alpha(P_{F1})$ у вигляді суми експоненти та нелінійного доданка наведено в [17]:

$$\alpha(P_{F1}) = a \exp(-b(P_{F1})^{0,25}) + c(P_{F1})^{0,65}, \quad (2)$$

де a , b , c – коефіцієнти, отримані в результаті апроксимації.

У табл. 1 надано значення коефіцієнтів a , b , c для деяких значень довжини вікна ШПФ. У ході зміни параметрів періодограми Уелча змінюватимуться статистичні характеристики коефіцієнта варіації, проте його розподіл буде наближено нормальним. Тому значення коефіцієнтів для розрахунку $\alpha(P_{F1})$ можна брати з табл. 1 для необхідного значення N_{FFT} та довільних параметрів періодограми Уелча.

На основі виразу (1) із використанням залежності (2) можна розрахувати вектор порогових значень коефіцієнта варіації \mathbf{Q}_{tr} .

Значення коефіцієнтів a, b, c

N_{FFT}	Значення коефіцієнтів		
	a	b	c
1024	4,6893	8,2741	-19,2004
2048	4,6013	9,8323	-30,8733
4096	4,5021	10,8626	-47,1718
8192	4,3881	12,2829	-69,8118

Оскільки потужність шуму на початковому етапі роботи алгоритму невідома, то в блоці 5 проводиться нормування вектора частотних відліків \mathbf{P}_{xx} до енергії. У разі перевищення розрахованим значенням Q порогового значення $\mathbf{Q}_{tr}[0]$ (блок 6) оброблення вектора відліків СЩП продовжується. У протилежному випадку вважається, що в прийнятій реалізації лише шум, тому проводиться оцінювання його рівня (блок 3) та оброблення наступного фрагмента прийнятої реалізації.

У блоці 7 розраховується значення порога T із використанням заданої ймовірності хибної тривоги P_{F2} . Розподіл щільності ймовірностей шумових відліків періодограми Уелча підпорядкований закону хі-квадрат із $2K$ ступенями свободи.

У разі оброблення комплексного сигналу значення порога T обчислюється як квантиль розподілу хі-квадрат рівня P_{F2} . Із використанням апроксимації Вілсона – Хілферті квантилів розподілу хі-квадрат [18] значення порога T можна розрахувати за таким виразом:

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

де

$$u = \frac{1,24 + 0,85H^{0,657}}{1 + 0,0001H^{-3} + \frac{2,38}{H}}, \quad H = -\ln \left(\frac{P_{F2}}{1 - P_{F2}} \right). \quad (4)$$

За наявності в смузі частот аналізу кількох сигналів із різними рівнями потужності, деякі слабкі сигнали можуть не перевищити вказаного порога і будуть пропущені на першій ітерації. Тоді значення порога T може розраховуватися кілька разів залежно від динамічного діапазону сигналів та завантаженості смуги частот аналізу.

Перевищення розрахованим значенням тестової статистики її порогового значення вказує лише на те, що в прийнятій реалізації є сигнальні відліки або із ймовірністю P_{F2} є не менше одного шумового відліку. Для визначення номерів сигнальних відліків у блоці 8 проводиться порівняння значень елементів вектора \mathbf{X} зі значенням порога T . У разі його перевищення в блоці 9 формується вектор сигнальних відліків \mathbf{X}_s . Через мінливість шуму у ході ітеративного порогового оброблення можлива така ситуація, коли жоден із частотних відліків не перевищує заданого порога T , а розраховане значення тестової статистики Q перевищить порогове $\mathbf{Q}_{tr}[n_s]$. У такому разі алгоритм зациклюється. Для уникнення подібної ситуації в блоці 10 здійснюється перевірка: чи були за цієї ітерації

виявлені сигнальні відліки. Якщо вектор \mathbf{X}_s порожній, то проводиться оцінювання рівня шуму й обробляється наступний фрагмент сигналу. У протилежному разі визначається кількість сигнальних відліків n_s (блок 11).

У блоці 12 формується вектор шумових відліків \mathbf{X}_ξ шляхом обнулення елементів вектора \mathbf{X} , які перевищили поріг T . У блоці 13 проводиться нормування до енергії та формується вектор \mathbf{Z}_ξ . У блоці 14 розраховується значення тестової статистики для вектора \mathbf{Z}_ξ , яке порівнюється з її пороговим значенням $\mathbf{Q}_{tr}[n_s]$ для виявленої кількості сигнальних відліків n_s . У разі перевищення даного порога вважається, що у векторі \mathbf{Z}_ξ ще є сигнальні відліки та процедура їх виявлення (блоки 7–15) повторюється. Інакше оцінюється рівень шуму L_ξ за таким виразом [13]:

$$L_\xi = \frac{1}{N_\xi} \sum_{k=1}^{N_\xi} \mathbf{X}_\xi(k), \quad (5)$$

де $N_\xi = N_{FFT} - n_s$ – кількість шумових відліків.

У подальшому значення L_ξ використовують для розрахунку порога для заданого значення ймовірності хибної тривоги P_{FI} .

3. Алгоритм аналізу частотних каналів

Рівень шуму в смузі частот аналізу через широкий динамічний діапазон сигналів і утворення п'єдесталу бічними пелюстками потужних сигналів може бути нерівномірним. У такому разі може виникати ситуація, коли кілька суміжних сигналів будуть виявлятися як один частотний канал, тому доцільно проводити додатковий аналіз для визначення деякого показника, що буде вказувати на заповненість каналу. Для цього будемо використовувати тестову статистику, яка є відношенням суми відліків СЦП в частотному каналі N_{ch} до добутку ширини каналу $\Delta_{N_{ch}}$ на максимальний рівень потужності в ньому, відповідно до такого виразу:

$$TS = \frac{\sum_{k \in N_{ch}} \mathbf{P}_{xx}(k)}{\Delta_{N_{ch}} \max_{k \in N_{ch}}(\mathbf{P}_{xx}(k))}. \quad (6)$$

Порівняння значення даної статистики з порогом γ_{TS} дасть змогу прийняти рішення про необхідність додаткового порогового оброблення. Експериментальним шляхом було встановлено, що за поріг доцільно обрати значення 0,1. На рис. 3 наведено блок-схему алгоритму аналізу частотних каналів. Вхідними даними алгоритму (блок 1) є порогове значення тестової статистики γ_{TS} та вектор значень меж частотних каналів \mathbf{CH} . У блоці 2 розраховуються значення тестової статистики для кожного з частотних каналів та порівнюються з порогом. Якщо в усіх частотних каналах значення тестової статистики перевищує поріг, то здійснюється вихід з алгоритму. У протилежному разі обчислюється значення динамічного діапазону D у визначених каналах (блок 3). У блоках 4–6 розраховується довжина вікна ковзаючого середнього L у відліках залежно від ширини частотного каналу. У блоці 7 визначаються значення допоміжних величин MAX, MEAN, MIN для розрахунку порога в каналах відповідно до таких виразів:

$$\begin{aligned}
 MAX &= \max(MA(\mathbf{P}_{xx}(\mathbf{CH}), L)); \\
 MEAN &= \text{mean}(MA(\mathbf{P}_{xx}(\mathbf{CH}), L)); \\
 MIN &= \min(MA(\mathbf{P}_{xx}(\mathbf{CH}), L)),
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

де $MA()$ – оператор розрахунку ковзаючого середнього.

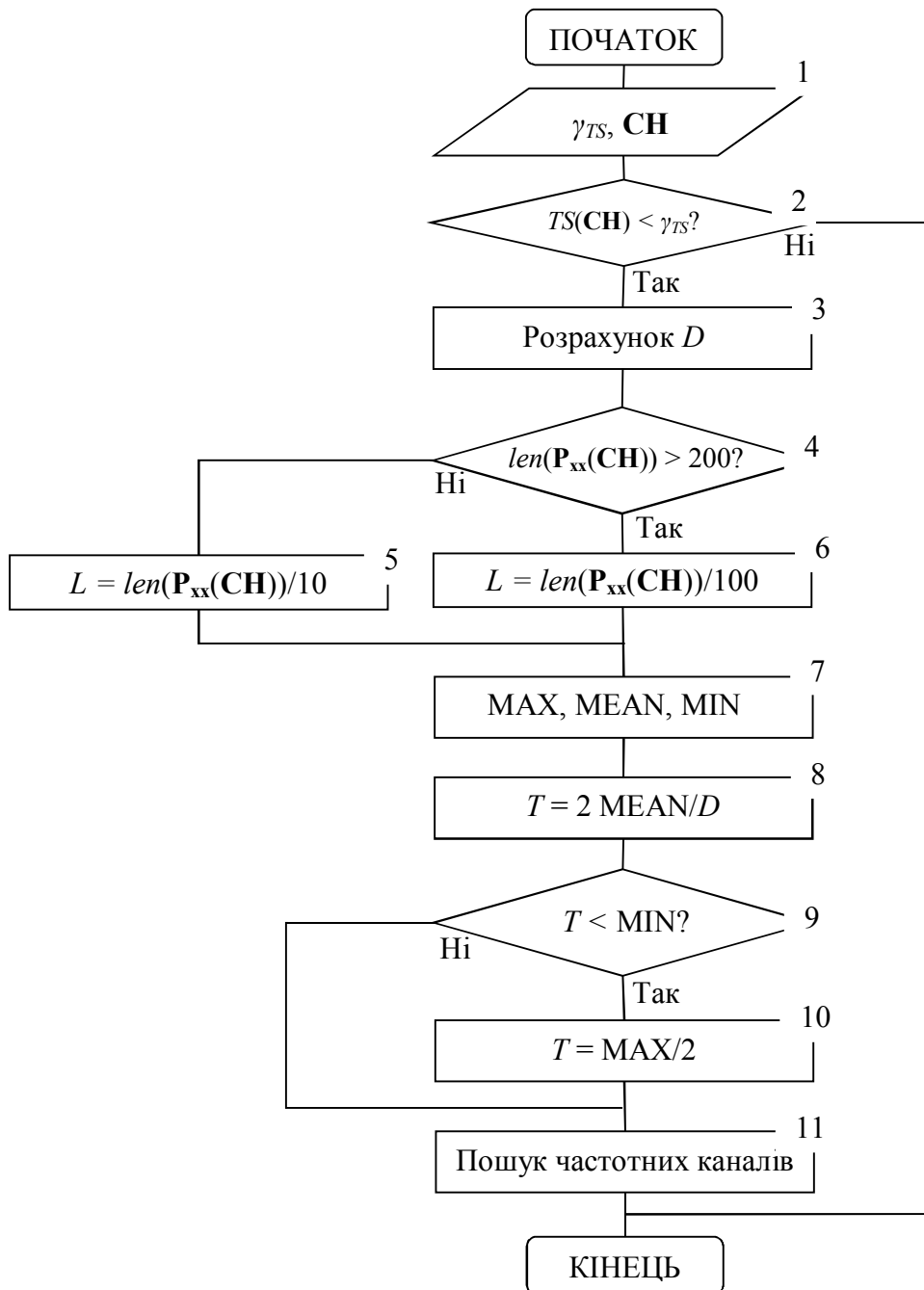


Рис. 3. Блок-схема алгоритму аналізу частотних каналів

У блоках 8–10 розраховується значення порога T , а в блоці 11 проводиться пошук частотних каналів із використанням цього порога для згладженої оцінки СЩП. Згладжування СЩП необхідне для зменшення її дисперсії.

Використання тестової статистики на заповненість частотного каналу дозволяє виявляти сигнали в умовах нерівномірного рівня шуму, що особливо актуально для

короткохвильового діапазону частот, а також у разі високої завантаженості та широкого динамічного діапазону сигналів, коли в потужного сигналу з'являється п'єдестал, що перевищує поріг.

4. Приклади аналізу РЧС та рекомендації

Для дослідження запропонованих алгоритмів використовувалися записані за допомогою HackRF One комплексні сигнали з частотою дискретизації 20 МГц у діапазонах частот, де спостерігається найвища завантаженість: 88–108 МГц (FM), 900 МГц (GSM, LTE), 600–700 МГц (DVB-T), 1800 МГц (GSM, LTE), 2100 МГц (WCDMA). Зокрема, у смузі частот 942–962 МГц присутні сигнали з різною шириною та формою спектра, динамічний діапазон становить близько 35 дБ, а завантаженість – близько 80%.

Для формування вектора порогових значень тестової статистики використовувалися значення m_Q та σ_Q для таких значень параметрів періодограми Уелча: $N_{FFT} = 512–16384$, $K = 1, 3, 5, 10, 15, 20, 30$, $R = N_{FFT}/2$, тип віконної функції – Хеммінга. Прямокутне вікно для аналізу РЧС в умовах апіорної невизначеності щодо динамічного діапазону сигналів через високий рівень бічних пелюсток і, як наслідок, маскування слабких сигналів застосовувати недоцільно. За $K = 1$ на спектрі сигналу практично неможливо розрізнити частотні канали. Для їх надійного виявлення рекомендовано обирати значення K , що дорівнює 20–30.

У табл. 2 наведено значення кількості виявлених каналів, завантаженість смуги частот 942–962 МГц та кількість ітерацій алгоритму оброблення в частотній області (рис. 2) для різних значень N_{FFT} та K за $P_{F1} = P_{F2} = 0,1$. Селекція сигналів шляхом їх фільтрації за шириною спектра на рівні порога проводилася для мінімальної ширини спектра 200 кГц.

Із наведеної таблиці видно, що в разі збільшення K оцінка рівня завантаженості наближається до реальної, а кількість ітерацій алгоритму може як зростати, так і зменшуватися, що пов'язано зі структурою спектра для заданого N_{FFT} .

Для зменшення дисперсії оцінок СЦП за великих N_{FFT} можна провести її згладжування з використанням вікна ковзаючого середнього. Проте такий підхід призведе до завищення оцінки рівня шуму, крім того, він потребує додаткових обчислювальних ресурсів. Тому рекомендовано для виявлення частотних каналів використовувати значення N_{FFT} не більше 4096, що забезпечить такий самий результат, як і більше значення N_{FFT} із додатковим згладжуванням СЦП. При цьому останній варіант потребує більшої кількості відліків сигналу для аналізу. Збільшення необхідної кількості відліків дорівнює відношенню довжин ШПФ. Крім того, велика кількість виявлених частотних каналів за великих N_{FFT} потребує додаткових обчислень у разі селекції сигналів за шириною спектра.

Оцінка рівня шуму практично дорівнює його реальному значенню вже за $K > 5$. Значення P_{F1} практично не впливає на оцінку рівня шуму. За низьких рівнів завантаженості смуги частот (менше 50%) оцінка рівня шуму практично не залежить від P_{F2} , а за високих – стає завищеною в разі зменшення P_{F2} . Так, коли зменшується P_{F2} від 0,1 до 10^{-5} , то зростання рівня шуму становить близько 2 дБ. Це пояснюється тим, що за таких умов деякі сигнальні відліки (особливо бічні пелюстки випромінювань) будуть віднесені до шумових, що призведе до завищення оцінки рівня шуму. Тому в умовах апіорної невизначеності щодо завантаженості ділянки РЧС рекомендовано обирати значення P_{F2} у межах 0,1–0,01, а шумові відліки відфільтрувати за шириною їх спектра.

Результати аналізу смуги частот 942–962 МГц

N_{FFT}	K	Без селекції сигналів			Фільтр 200 кГц	
		Кількість каналів	Кількість ітерацій	Завантаженість, %	Кількість каналів	Завантаженість, %
512	1	48	23	67	18	52
	5	27	15	79	13	71
	10	27	11	79	11	80
	30	16	11	88	12	85
1024	1	118	8	49	7	15
	5	50	19	79	14	73
	10	36	11	78	12	73
	30	25	20	87	12	84
4096	1	377	26	68	13	22
	5	178	18	74	10	56
	10	158	19	80	13	68
	30	116	15	85	10	74
16384	1	1742	6	43	3	4
	5	679	16	75	13	54
	10	557	20	79	12	61
	30	275	15	87	10	79

На рис. 4 наведено результати аналізу смуги частот 942–962 МГц для $N_{FFT} = 4096$ та $K = 30$. Для розрахунку СЩП необхідно 63488 відліків сигналу загальною тривалістю 3,2 мс. Завантаженість смуги частот без селекції сигналів становить 85%. За відкидання частотних каналів, ширина смуги яких менше 200 кГц, завантаженість зменшується до 75%. Кількість виявлених каналів при цьому становить 10. Маємо такі значення тестової статистики для каналів: 0,212; 0,395; 0,337; 0,048; 0,166; 0,172; 0,3; 0,331; 0,267; 0,022. Тому відповідно до наведеного на рис. 3 алгоритму в 4-му ($TS = 0,048$) та 10-му ($TS = 0,022$) частотних каналах проводився додатковий аналіз та виявлялися підканали.

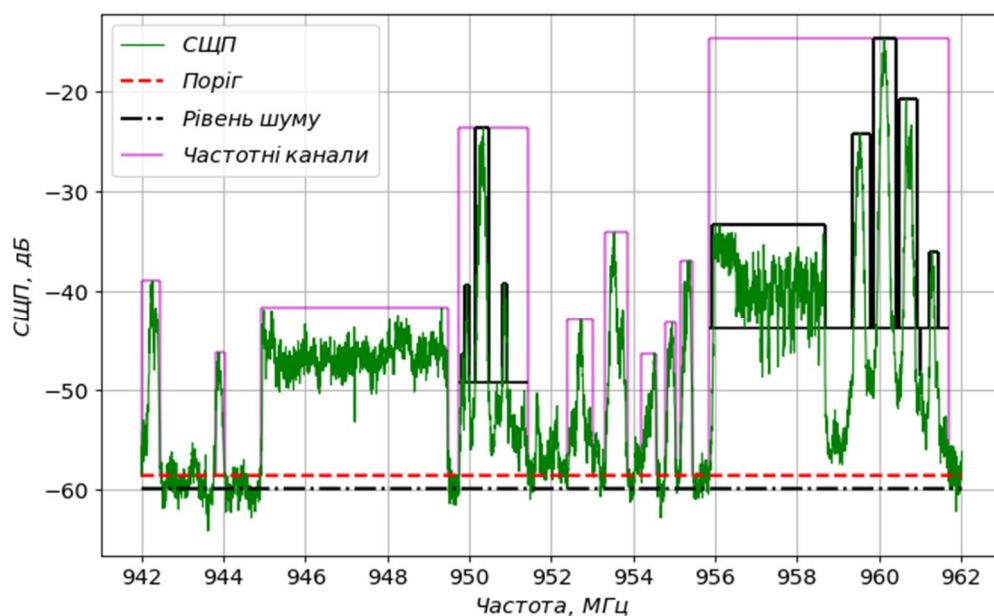


Рис. 4. Результати аналізу смуги частот 942–962 МГц

На рис. 5 наведено згладжену СЩП, нове значення порога та виділено частотні підканали в 4-му (а) й 10-му (б) каналах відповідно. Як бачимо, значення порога в кожному з каналів є різним.

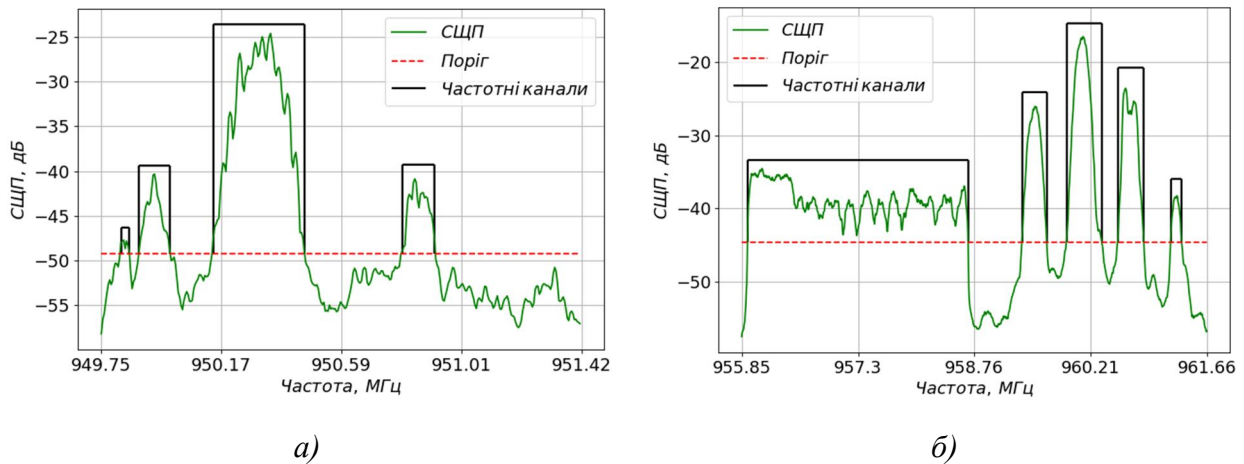


Рис. 5. Результати додаткового оброблення в 4-му (а) та 10-му (б) частотних каналах

Більші значення довжини ШПФ забезпечують краще розділення підканалів, проте потребують більших значень довжини вікна ковзаючого середнього.

Висновки. Наукова новизна запропонованого підходу до аналізу завантаженості РЧС полягає в автоматизації процесу оцінювання рівня шуму та селекції сигналів в умовах апіорної невизначеності щодо РЕО шляхом динамічної зміни параметрів алгоритмів оброблення сигналів. Розроблені алгоритми можуть бути реалізовані в наявних та перспективних автоматичних системах радіомоніторингу для оцінювання завантаженості РЧС та селекції сигналів, оскільки не вимагають калібрування апаратури в разі коливань характеристик окремих елементів системи та зміни РЕО. Достовірність отриманих результатів підтверджується даними експериментальних досліджень ділянок РЧС із використанням запропонованих алгоритмів.

Перспективи подальших досліджень у даному напрямку полягають у розробленні автоматичних алгоритмів розпізнавання сигналів у частотних каналах.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Captain K. M., Joshi M. V. Spectrum Sensing for Cognitive Radio. Fundamentals and Applications. CRC Press. 2022. 256 p. <https://doi.org/10.1201/9781003088554>
2. Liang Y.-C. Dynamic Spectrum Management. From Cognitive Radio to Blockchain and Artificial Intelligence. Springer, 2020. 180 p.
3. Elmasry F. G. Dynamic Spectrum Access Decisions. Local, Distributed, Centralized, and Hybrid Designs. JohnWiley & Sons Ltd., 2021. 728 p. <http://dx.doi.org/10.1002/9781119573784>
4. Arkwazee M., Ilyas M., Jasim A. D. Automatic Spectrum Sensing Techniques Using Support Vector Machine in Cognitive Radio Network // 2022 2nd Int. Conf. on Adv. in Elect., Com., Comm. and Sust. Techn. (ICAECT). Bhilai, India, 2022. P. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICAECT54875.2022.9807922>
5. Yakkati R. R., Tripathy R. K., Cenkeramaddi L. R. Radio Frequency Spectrum Sensing by Automatic Modulation Classification in Cognitive Radio System Using Multiscale Deep CNN // IEEE Sensors Journal. 2022. Vol. 22, № 1. P. 926–938. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3128395>

6. Sun M., Zhao C., Yan S., Li B. A Novel Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks With Noise Uncertainty // In IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017. Vol. 66, № 5. P. 4424–4429. <https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2596789>
7. Zheng Q., Wang H., Elhanashi A., Saponara S., Zhang D. An Intelligent Non-cooperative Spectrum Sensing Method Based on Convolutional Auto-encoder (CAE) // Applications in Electronics Pervading Industry, Environment and Society. ApplePies 2021 : Lecture Notes in Electrical Engineering. 2022. Vol. 866. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-95498-7_1
8. Lin M., Zhang X., Tian Y., Huang Y. Multi-Signal Detection Framework: A Deep Learning Based Carrier Frequency and Bandwidth Estimation. Sensors, 2022. Vol. 22. P. 1–19. <https://doi.org/10.3390/s22103909>
9. Quan Z. et al. Optimal Multiband Joint Detection for Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks // IEEE Transactions on Signal Processing. 2009. Vol. 57, No. 3. P. 1128–1140. <http://dx.doi.org/10.1109/tsp.2008.2008540>
10. Бугайов М. В. Узагальнений енергетичний детектор з ітеративним обробленням вузькосмугових сигналів у частотній області // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування. Київ : КПІ, 2019. № 78. С. 27–35. <https://doi.10.20535/RADAP.2019.78.27-35>
11. Бугайов М. В. Ітеративний метод виявлення радіосигналів на основі вирішуючих статистик // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування. Київ : КПІ, 2020. № 81. С. 11–20. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.18.11-20>
12. Buhaiov M. V. Fast spectrum sensing method for cognitive radio // Visnik NTUU KPI. Ser. Radiotekh., radioaparotobuduv. 2020. № 83. P. 41–46. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.83.41-46>
13. Buhaiov M. V. Iterative method for noise power estimating at unknown spectrum occupancy // Visnik NTUU KPI. Ser. Radiotekh., radioaparotobuduv. 2022. № 88. P. 42–49. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2022.88.42-49>
14. Бугайов М. В., Нагорнюк О. А., Шапар Р. В. Огляд аналізаторів радіочастотного спектра та пропозиції щодо динамічної реалізації енергетичного детектора // Технічна інженерія. 2021. № 2 (88), 95–102. [https://doi.org/10.26642/ten-2021-2\(88\)-95-102](https://doi.org/10.26642/ten-2021-2(88)-95-102)
15. Buhaiov M. V., Kliazyuka V. V., Kozyura I. V., Zavorodnii D. S. Method for spectrum holes detection based on mode analysis of spectral samples histogram // Radioelectronic and Computer Systems. 2022. № 4 (104). P. 108–116. <https://doi.org/10.32620/reks.2022.4.08>
16. Бугайов М. В. Метод визначення частотно-часових меж зайнятих ділянок радіочастотного спектра // XVI міжнар. наук.-техн. конф. «Перспективи телекомунікацій», (11–15 квітня 2022 р.). Київ : НТУУ КПІ, 2022. С. 109–111.
17. Buhaiov M. V. Threshold values of the coefficient of variation in iterative spectrum sensing algorithms // IEEE UkrMiCo-2021: International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, November 29 – December 3, 2021. P. 241–244. <https://doi.10.1109/UkrMiCo52950.2021.9716616>
18. Zar J. H. Approximations for the Percentage Points of the Chi-Squared Distribution // Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics). 1978. Vol. 27, No. 3. P. 280–290. <http://dx.doi.org/10.2307/2347163>

Стаття надійшла до редакції 14.04.2023.

REFERENCES

1. Captain, K. M., & Joshi M. V. (2022). *Spectrum Sensing for Cognitive Radio. Fundamentals and Applications*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003088554>
2. Liang, Y.-C. (2020). *Dynamic Spectrum Management. From Cognitive Radio to Blockchain and Artificial Intelligence*. Springer.
3. Elmasry, F. G. (2021). *Dynamic Spectrum Access Decisions. Local, Distributed, Centralized, and Hybrid Designs*. JohnWiley & Sons Ltd. <http://dx.doi.org/10.1002/9781119573784>
4. Arkwazee, M., Ilyas, M., & Jasim, A. D. (2022). Automatic Spectrum Sensing Techniques Using Support Vector Machine In Cognitive Radio Network. In *2nd Int. Conf. on Adv. in Elect., Com., Comm. and Sust. Techn. (ICAECT-2022)*. Bhilai, India. (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/ICAECT54875.2022.9807922>
5. Yakkati, R. R., Tripathy, R. K., & Cenkeramaddi, L. R. (2022). Radio Frequency Spectrum Sensing by Automatic Modulation Classification in Cognitive Radio System Using Multiscale Deep CNN. *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, № 1, 926–938. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3128395>
6. Sun, M., Zhao, C., Yan, S., & Li, B. (2017). A Novel Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks With Noise Uncertainty. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, № 5, 4424–4429. <https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2596789>
7. Zheng, Q., Wang, H., Elhanashi, A., Saponara, S., & Zhang, D. (2022). An Intelligent Non-cooperative Spectrum Sensing Method Based on Convolutional Auto-encoder (CAE). In: Saponara, S., De Gloria, A. (eds) *Applications in Electronics Pervading Industry, Environment and Society. ApplePies 2021. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 866. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-95498-7_1
8. Lin M., Zhang X., Tian Y., & Huang Y. (2022). Multi-Signal Detection Framework: A Deep Learning Based Carrier Frequency and Bandwidth Estimation. *Sensors*, vol. 22, 1–19. <https://doi.org/10.3390/s22103909>
9. Quan, Z. et al. (2009). Optimal Multiband Joint Detection for Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 57, No. 3, 1128-1140. <http://dx.doi.org/10.1109/tsp.2008.2008540>
10. Buhaiov, M. V. (2019). Uzahalnenyi enerhetychnyi detektor z iteratyvnym obroblenniam vuzkosmuhovykh syhnaliv u chastotnii oblasti [Generalized energy detector with iterative processing of narrowband signals in frequency domain]. *Visnyk NTUU KPI. Ser. Radiotekh. radioaparotobuduv*, № 78, 27–35. <https://doi.10.20535/RADAP.2019.78.27-35> [in Ukrainian].
11. Buhaiov, M. V. (2020). Iteratyvnyi metod vyivlennia radiosyhnaliv na osnovi vyrishuiuchykh statystyk [Iterative method of radiosignals detection based on decision statistics]. *Visnyk NTUU KPI. Ser. Radiotekh. radioaparotobuduv*, № 81, 11–20. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.18.11-20> [in Ukrainian].
12. Buhaiov, M. V. (2020). Fast spectrum sensing method for cognitive radio. *Visnik NTUU KPI. Ser. Radiotekh. radioaparotobuduv*, № 83, 41–46. <https://doi.10.20535/RADAP.2020.83.41-46>
13. Buhaiov, M. V. (2022). Iterative method for noise power estimating at unknown spectrum occupancy. *Visnik NTUU KPI. Ser. Radiotekh. radioaparotobuduv*, № 88, 42–49. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2022.88.42-49>
14. Buhaiov, M. V., Nahorniuk, O. A., & Shapar, R. V. (2021). Ohliad analizatoriv radiochastotnoho spektra ta propozytsii shchodo dynamichnoi realizatsii enerhetychnoho

detektora [Review of radio frequency spectrum analyzers and proposals for dynamic implementation of energy detector]. *Technical Engineering*, № 2 (88), 95–102. [https://doi.org/10.26642/ten-2021-2\(88\)-95-102](https://doi.org/10.26642/ten-2021-2(88)-95-102) [in Ukrainian].

15. Buhaiov, M. V., Kliazyuka, V. V., Kozyura, I. V., & Zavhorodnii, D. S. (2022). Method for spectrum holes detection based on mode analysis of spectral samples histogram. *Radioelectronic and Computer Systems*, № 4 (104), 108–116. <https://doi.10.32620/reks.2022.4.08>

16. Buhaiov, M. V. (2022). Metod vyznachennia chastotno-chasovykh mezh zainiatykh dilianok radiochastotnoho spektra [Method for determining occupied time-frequency spectrum regions]. In *XVI Intern. Sc. Conf. "Modern challenges in telecommunications"*. Kyiv, April 11–15, 2022. (pp. 109–111). Kyiv: NTUU KPI [in Ukrainian].

17. Buhaiov, M. V. (2022). Threshold values of the coefficient of variation in iterative spectrum sensing algorithms. In *IEEE UkrMiCo-2021: International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics*. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, November 29 – December 3. (pp. 241–244). <https://doi.10.1109/UkrMiCo52950.2021.9716616>

18. Zar J. H. (1978). Approximations for the Percentage Points of the Chi-Squared Distribution. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, Vol. 27, No. 3, 280–290. <http://dx.doi.org/10.2307/2347163>

M. V. Buhaiov, S. V. Zakirov, V. V. Kliazyuka, D. O. Honcharov

AUTOMATIC SPECTRUM SENSING AND SIGNAL SELECTION

Constant increasing of radio-electronic devices number leads to an increase of spectrum occupancy and complication of radio-electronic environment. In such conditions, it is necessary to use automatic algorithms for prompt detection and selection of radio signals in radio monitoring systems. The purpose of the article is to develop algorithms and recommendations for their practical implementation to automate the process of radio frequency spectrum occupancy analysis and signal selection in a wide dynamic range with high occupancy of analyzed frequency band in conditions of a priori uncertainty of noise level. To achieve the stated goal were developed generalized algorithm for radio frequency spectrum analysis, algorithm of frequency domain processing and algorithm for frequency channels analysis. Examples of spectrum bands analysis with high occupancy and recommendations for developed algorithms implementation were represented. Depending on variability of noise power in analyzed frequency band an adaptive change of estimation time interval is provided, which will reduce the computational complexity. In conditions of no uniform noise level or a wide dynamic range of signals, it is proposed to use special test statistics to determine fullness of analyzed frequency channels. In the course of experimental studies, the analysis of recordings in frequency bands of 900 MHz, 1800 MHz and 2100 MHz was carried out. It was established that the developed algorithms provide a correct estimation of radio frequency spectrum occupancy and selection of signals with a dynamic range of at least 35 dB and occupancy of up to 92%. Developed algorithms do not require calibration of the equipment in case of fluctuations in characteristics of separate system elements and changes in radio-electronic environment and can be implemented in existing and perspective automatic radio monitoring systems.

Keywords: radio frequency spectrum; spectrum occupancy; signal selection; test statistics; frequency channel.