

УДК 621.396:004.93:519.22

Методика пошуку оптимального виду тестової статистики для задач аналізу радіочастотного спектра

Бугайов М. В.

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, м. Житомир, Україна

E-mail: karunen@ukr.net

Постійне зростання кількості радіоелектронних засобів зумовлює підвищення завантаженості радіочастотного спектра. З іншого боку постійно з'являються нові технології передавання даних та ускладнюється частотно-часова структура сигналів. Дані фактори призводять до значного ускладнення радіоелектронної обстановки, що змушує розробляти нові підходи до швидкого аналізу радіочастотного спектра. У більшості публікацій для прийняття рішення про наявність або відсутність сигналів у заданій смузі частот проводять деяке перетворення від сигналу з подальшим обчисленням тестової статистики. Проте не вказано з яких міркувань обрано саме такий вид тестової статистики і чи вона є оптимальною для заданого перетворення та форми спектра сигналу. Питання підбору оптимального виду тестової статистики є особливо актуальним при роботі в умовах невідомого і змінного рівня шуму, а також при широкому динамічному діапазоні сигналів. Тестова статистика повинна бути чутливою до викидів вибірки частотних відліків. Сутність методики полягає у формуванні набору тестових статистик та розрахунку значення показника ефективності у вигляді суми ймовірностей правильного виявлення для різних форм спектра сигналів із використанням даних статистик при різних відношеннях сигнал-шум та завантаженостях спектра. Максимальне значення показника ефективності відповідатиме оптимальному виду тестової статистики. У результаті досліджень встановлено, що для розділення відліків на сигнальні та шумові в частотній області найбільш доцільно використовувати коефіцієнт варіації. Перспективи подальших досліджень в даному напрямку варто зосередити на розробленні методів динамічного переходу між видами тестової статистики у процесі радіомоніторингу в залежності від зміни радіоелектронної обстановки.

Ключові слова: перетворення; тестова статистика; радіомоніторинг; форма спектра; завантаженість спектра

DOI: [10.20535/RADAP.2022.90.13-20](https://doi.org/10.20535/RADAP.2022.90.13-20)

Постановка проблеми

Стрімке впровадження бездротових інформаційних технологій [1–5], як у цивільній, так і у військовій сферах, потребує розвитку засобів контролю за пристроями та мережами передавання даних. Виявлення сигналів радіоелектронних засобів (РЕЗ) є однією з базових задач, що вирішуються системами радіомоніторингу. Такі системи повинні ефективно виявляти сигнали різних джерел радіовипромінювань, як вузькосмугові з фіксованим розподілом частот, так і сигнали систем цифрового пакетного радіозв'язку з динамічним частотно-часовим розподілом, що використовують для передавання інформації радіоімпульси малої тривалості [6]. Постійне зростання кількості РЕЗ, включаючи системи когнітивного радіо, зумовлює підвищення щільності потоку радіосигналів у заданій області простору. З іншого боку постійно з'являються нові технології

передавання даних, ускладнюється частотно-часова структура сигналів. Дані фактори призводять до ускладнення радіоелектронної обстановки, що змушує розробляти нові підходи до швидкого аналізу заданої ділянки частот в умовах високої завантаженості радіочастотного спектра (РЧС). Одним із перспективних напрямків вирішення даного завдання є удосконалення існуючих та розроблення нових математичних методів і алгоритмів оброблення сигналів.

1 Огляд останніх досліджень і публікацій

В останнє десятиліття значно зросла кількість публікацій, пов'язаних із аналізом РЧС. У більшості публікацій для прийняття рішення про наявність

або відсутність сигналів у заданій смузі частот використовують тестові статистики.

Ітеративні алгоритми оцінювання зайнятості РЧС запропоновано у роботах [7–12]. В даних роботах як поріг використано середнє значення відліків спектральної щільності потужності (СЩП) помножене на коефіцієнт, що визначається заданою ймовірністю хибної тривоги. Ті відліки, що не перевищили поріг, вважаються шумовими і поріг перераховується із їх використанням. Процес ітеративно повторюється, доки не залишиться нових відліків нижче порогу. Алгоритм не потребує інформації про сигнал та потужність шуму, має відносно низьку обчислювальну складність, проте потребує сортування відліків. У роботі [13] запропоновано ітеративний алгоритм виявлення зайнятих ділянок РЧС із використанням коефіцієнта варіації відліків СЩП як тестової статистики.

У [14–21] для оцінювання зайнятості визначеної ділянки частот запропоновано розраховувати емпіричну функцію розподілу для відліків шуму і порівнювати її з відповідною функцією для прийнятої реалізації із використанням порядкових статистик. У разі перевищення деякого порогу вважається, що сигнал виявлено. Поріг обирається на основі метода Монте-Карло.

У роботах [21–23] як тестові статистики обчислюють значення коефіцієнтів асиметрії та ексцесу сигналу і порівнюють їх з порогом. У [24, 25] тестова статистика розраховується із використанням асиметрії та ексцесу відліків енергетичного спектра.

У [26, 27] тестова статистика розраховується як відношення максимального і мінімального власних чисел коваріаційної матриці прийнятої реалізації сигналу або як відношення середнього арифметичного до середнього геометричного власних чисел. Такий підхід не потребує знання потужності шуму, значення порогу практично не залежить від довжини вибірки, а для виявлення сигналу потрібний малий об'єм вибірки (кілька сотень відліків). У [28] запропоновано ітеративний алгоритм виявлення сигнальних відліків шляхом поступового збільшення кількості відліків прийнятої реалізації, доки статистика не стане більшою порогу. Як тестову статистику використано відношення максимального до мінімального власних значень коваріаційної матриці. У [29] прийнятий сигнал розбивається на сегменти, для кожного з яких розраховується коваріаційна матриця. Після цього отримані матриці усереднюються. Результуюча матриця дорівнює сумі коваріаційних матриць сигналу та шуму (для випадку адитивного шуму). Тестова статистика – слід даної матриці. Через дію центральної граничної теореми розподіл щільності ймовірностей (РЩЙ) даної статистики нормальний. У [30] тестова статистика розраховується як відношення суми модулів усіх елементів кореляційної матриці до суми модулів її елементів на головній діагоналі. Якщо дана статисти-

стика більша одиниці, то вважається що в прийнятій реалізації є сигнал. У [31] тестова статистика утворюється із використанням власних чисел та інших статистик коваріаційної матриці. У [32] тестова статистика розраховується у вигляді абсолютного коваріаційного значення або коваріаційної норми Фробеніуса кореляційної матриці сигналу. Якщо в прийнятій реалізації лише шум, то недиагональні елементи матриці будуть практично нульовими. В іншому випадку деякі елементи поза головною діагоналлю будуть ненульовими.

У [33] тестова статистика розраховується як відношення максимального значення спектральної кореляційної функції до кореня із суми квадратів даної функції. У [34] тестова статистика розраховується у вигляді відношення різниці значень автокореляційної функції (АКФ) для нульової та одичної затримки до АКФ для нульової затримки. У [35] розраховується знакова циклічна АКФ (відліки сигналу пропущені через функцію sign). Тестова статистика утворена як квадрат норми вектора циклічної АКФ для заданої частоти і різних часових затримок. Запропонована послідовна реалізація детектора потребує меншу кількість відліків і забезпечує однакові характеристики виявлення в порівнянні зі звичайним циклостаціонарним детектором. У [36] розраховується циклічна АКФ і її значення порівнюються з порогом. Значення циклічної частоти пов'язане зі значеннями символічної швидкості та несучої частоти. Тестова статистика формується із використанням циклічної АКФ та її коваріаційної матриці. У [37, 38] розраховується тестова статистика у виді ентропії відліків СЩП. Методи на основі аналізу кореляційної матриці, ентропії та АКФ не потребують інформації про потужність шуму, проте не дозволяють визначати частотні межі сигналів.

У [39] запропоновано статистичний тест для визначення меж зайнятих смуг частот. Обирається прямокутне вікно в частотній області із шириною, що дорівнює половині ширини смуги найвужчого зайнятого частотного каналу. Тестова статистика побудована із використанням відношення енергій у двох суміжних вікнах. Для пошуку вільної опорної ділянки частот використано підхід на основі порівняння енергій. Запропонований метод не потребує знання рівня шуму. Точність визначення частотних меж каналів залежить від ширини вікна. Метод працює з практично прямокутними спектрами.

У [40] частотні відліки поділяються на суміжні частотні канали, ширина яких приблизно відповідає ширині спектра шуканого сигналу. Для кожного каналу розраховується енергетичний оператор Тігера-Кайзера. Тестова статистика розраховується як середнє значення оператора по відліках каналу. Енергетичний оператор Тігера-Кайзера має виграш приблизно 2 дБ порівняно з енергетичним детектором.

У [41] як тестову статистику використано суму центрованих та нормованих до середньоквадратичного відхилення (СКВ) значень спектральних відліків.

Із розглянутих робіт видно, що сутність запропонованих методів полягає в розрахунку деякого перетворення від сигналу з подальшим обчисленням тестової статистики. Розглянуті методи лише вказують з деякою ймовірністю чи є у прийнятій реалізації сигнал, проте не дозволяють визначити частотні межі зайнятих ділянок спектра. Також у роботах не вказано з яких міркувань обрано саме таку форму тестової статистики і чи вона є оптимальною для заданого перетворення та типу сигналу, що виявляється.

У [13] наведено узагальнений ітеративний алгоритм виявлення радіосигналів. Сутність методу полягає у застосуванні деякого перетворення до прийнятого сигналу з подальшим обчисленням значення тестової статистики. Після цього отримане значення порівнюється з пороговим. У разі перевищення порогу відкидається максимальне значення відліку (вважається сигнальним) з вибірки і знову розраховується тестова статистика. Процедура ітеративно повторюється доки не буде відкинута усіх сигнальних відліків. Також наведено загальний підхід до вибору оптимального виду тестової статистики. У [42] показано, що тестова статистика обирається відповідно до задачі, що вирішується, з урахуванням обчислювальної складності.

2 Постановка завдання дослідження

Метою роботи є розроблення та дослідження методики пошуку оптимального виду тестової статистики для виявлення радіосигналів у частотній області, формулювання рекомендацій щодо її реалізації в системах радіомоніторингу.

3 Виклад основного матеріалу дослідження

3.1 Структура каналу оброблення сигналу

Досить часто в задачах оброблення сигналів виникає необхідність прийняття рішення за значенням одного числа, яке обчислюється із використанням значень сигналу після деяких перетворень. Питання підбору оптимально виду тестової статистики є особливо актуальним при роботі в умовах невідомого і змінного рівня шуму, а також при широкому динамічному діапазоні сигналів. Вдало підібрана комбінація перетворення (оператора T_N) та тестової статистики (функціонала F) зможе забез-

печити оптимальне оброблення необхідного сигналу в заданій сигнально-задачовій обстановці (Рис. 1). Затакого представлення можна реалізувати практично будь-який вид оброблення сигналу. Причому таких каналів може бути декілька і працюватимуть вони паралельно. Після застосування оператора змінюється АКФ, СЩП та РЩІ досліджуваного сигналу. Перед та після оператора можливі додаткові перетворення сигналу.

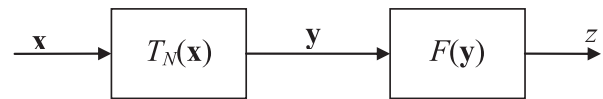


Рис. 1. Структура каналу оптимального оброблення сигналу

На вхід оператора подається вектор відліків вхідної сигнальної суміші $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ довжиною N . Після перетворення отримуємо новий вектор $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_N)$ такої ж довжини. Застосування функціонала F до вектора \mathbf{y} перетворює його у скаляр z .

У [43] для виявлення і визначення зовнішніх параметрів сигналів рекомендовано використовувати такі оператори: крос-кореляцію з опорним сигналом, СЩП, АКФ і циклічну АКФ, спектральну кореляційну функцію, гістограму миттєвої частоти, спектри простепенюваних комплексного сигналу та модуля сигналу. Для визначення внутрішніх параметрів рекомендовано використовувати такі перетворення: спектр миттєвої амплітуди, простепенюваний спектр миттєвої частоти, спектр переходу через нуль миттєвої частоти, простепенюваний спектр сигналу і його модуля, АКФ і циклічну АКФ, спектр вейвлет-перетворення Хаара, гістограму миттєвої частоти та фази, фазове сузір'я, глазкову діаграму. Вид оператора залежить від типу сигналу, що підлягає обробленню.

Основне призначення оператора – максимальне підвищення контрасту корисного сигналу s на фоні шуму ξ та інших сигналів для виділення його характерних ознак. Після оптимального оператора сигнальні та шумові відліки повинні бути максимально рознесені. В загальному випадку вибір оператора носить евристичний характер. Його вид можна обрати виходячи з апіорної інформації про кореляційні властивості сигналу.

Для виявлення сигналів оптимальний вид оператора із заданої множини можна знайти із такого рівняння:

$$T_{Nopt} = \arg \max_{T_N} (R_y - R_x), \quad (1)$$

де $R_y = y_{\max} - y_{\min}$, $R_x = x_{\max} - x_{\min}$.

Для інших задач оброблення сигналу можна сформулювати інший критерій вибору оптимального виду оператора. У даній роботі будемо розглядати оброблення сигналу в частотній області. Як

оператор будемо використовувати швидке перетворення Фур'є (ШПФ). Формально задача виявлення сигналів (зайнятих ділянок РЧС) у частотній області полягає у розбитті множини частотних відліків на підмножини шумових та сигнальних відліків. Проведення найкращої межі між відліками шуму та сигналу можна досягти шляхом використання оптимального виду тестової статистики.

Тестова статистика повинна бути чутливою до нерівномірностей (викидів) вибірки частотних відліків. Тому її оптимальний вид будемо шукати серед мір розсіяння, що характеризують ступінь мінливості кількісної ознаки у вибірці і показують наскільки сильно розкидані можливі значення частотних відліків. На практиці, в залежності від типу випадкової величини та особливостей вирішуваної задачі, використовуються різні міри розсіяння [44].

3.2 Формування набору тестових статистик

Сформуємо набір тестових статистик на основі чутливих до викидів мір розсіяння для подальшого вибору її оптимального виду при прийнятті рішення про наявність сигналу в прийнятій суміші. До даного набору включимо наведені нижче види статистик.

Розмах (range) є порядковою мірою розсіяння і обчислюється як різниця між найбільшим та найменшим із значень вибірки:

$$R = \max(\mathbf{y}) - \min(\mathbf{y}). \quad (2)$$

Це одна з найпростіших статистичних мір розсіяння. Розмах не враховує інформацію про характер розподілу результатів в інтервалі розсіяння, а також дуже чутливий до викидів, які можуть бути у вибірці.

Середнє абсолютне відхилення (MAD) містить інформацію про характер розподілу значень і є менш чутливим до викидів. Дана статистика показує наскільки далеко від центру розподілу в середньому знаходяться значення випадкової величини:

$$d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \bar{y}|. \quad (3)$$

Центральний момент порядку p (p^{th} CM):

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^p. \quad (4)$$

При $p = 2$ за виразом (4) обчислюється дисперсія (variance). Дисперсія зручна для математичних перетворень, оскільки дисперсія суми двох незалежних випадкових величин є сумою їх дисперсій.

Коефіцієнт варіації (coef. of var.):

$$RSD = \frac{\sigma_y}{\bar{y}}, \quad (5)$$

використовується для порівняння ступеня розсіяння випадкових величин різного роду, коли вони виражені в різних одиницях.

Ентропія Шеннона (entropy), що використовується як міра кількісної різноманітності вибірки. Для нормалізованого вектора \mathbf{y} (сума значень його елементів дорівнює 1) значення функціонала можна розрахувати за таким виразом:

$$H_1(\mathbf{y}) = - \sum_{i=1}^N (y_i \ln y_i). \quad (6)$$

Також для оцінювання зайнятості частотного каналу у проаналізованих роботах досить часто використовують коефіцієнти асиметрії (skew) та ексцесу (kurtosis).

3.3 Методика пошуку оптимального виду тестової статистики

Як показник ефективності тестової статистики оберемо здатність розрізнити вибірки шуму і суміші сигналу з шумом при різних значеннях відношення сигнал-шум (ВСП) q та різних завантажених смуги η , що обчислюється як відношення ширини спектра сигналу Δf до ширини смуги частот аналізу ΔP . Критерій вибору оптимального виду тестової статистики – максимальне значення показника ефективності.

При дослідженні розглянемо два типових види форми енергетичного спектра S сигналу, що найчастіше зустрічаються на практиці. До першого відносяться спектри, що мають практично прямокутну форму обвідної S_1 (OFDM, QAM, PSK після формуючого фільтра). Інший тип енергетичних спектрів S_2 має форму обвідної, що наближено можна описати функцією Гауса. Наближену до вказаної форму спектра має переважна більшість сигналів з аналоговими та цифровими видами модуляції, що використовуються в сучасних радіоелектронних системах.

Припускаючи, що значення тестової статистики монотонно змінюється при збільшенні ВСП і завантаженості смуги частот аналізу η , сутність методики визначення оптимального виду тестової статистики можна записати у вигляді послідовності наведених нижче операцій:

1. Задати межі зміни ВСП: q_{\min}, q_{\max} .
2. Задати межі зміни завантаженості смуги частот: η_{\min}, η_{\max} .
3. Для заданого виду тестової статистики F розрахувати значення квантиля γ рівня $1 - P_F$ для значень тестової статистики z для шуму, де P_F – задана ймовірність хибної тривоги. Для РЩЙ тестової статистики для шуму $p_{\xi}(z)$ значення γ можна знайти з такого рівняння:

$$P_F = \int_{\gamma}^{\infty} p_{S,\xi}(z) dz. \quad (7)$$

4. Для суміші сигналу з шумом для усіх значень ВСШ і зайнятостей розрахувати ймовірність правильного виявлення P_D для сигналу з формою спектра S_1 за таким виразом:

$$P_D(F, S_1, q, \eta) = \int_{\gamma}^{\infty} p_{s+\xi}(z) dz. \quad (8)$$

5. Розрахувати значення показника ефективності тестової статистики:

$$d_{F_1} = \int_{q_{\min}}^{q_{\max}} \int_{\eta_{\min}}^{\eta_{\max}} P_D(F, S_1, q, \eta). \quad (9)$$

6. Виконати розрахунки п. 3-5 для інших видів тестової статистики та іншої форми спектра сигналу S_2 .

7. Розрахувати загальний для двох форм спектра показник ефективності:

$$d_F = d_{F_1} + d_{F_2}. \quad (10)$$

8. Знайти оптимальний вид тестової статистики за таким критерієм:

$$F_{opt} = \arg \max_F (d_F). \quad (11)$$

Якщо передбачається робота по конкретних сигналах, що мають відому обвідну форму спектра S_1 чи S_2 , то у рівняння (11) необхідно підставити d_{F_1} або d_{F_2} відповідно.

3.4 Дослідження методики

Оцінки СЩП було розраховано із використанням періодограми Уелча з такими параметрами: довжина вікна ШПФ – 4096 точок, тип віконної функції – Хеммінга, перекриття між сусідніми вікнами – 2048 точок, кількість фрагментів сигналу для розрахунку спектра – 9.

ВСШ змінювалося від -30 дБ до 13 дБ з кроком 1 дБ. Значення ймовірності хибної тривоги було зафіксовано на рівні 0,01. Сигнал формувався з такими рівнями завантаженості: 1; 2; 3; 7; 14; 25; 39 та 52%. Для кожного значення ВСШ та рівня завантаженості ймовірність правильного виявлення розраховувалася за 10^4 реалізаціями СЩП.

На Рис. 2 наведено РЩЙ значень коефіцієнта варіації для шуму та суміші сигналу зі спектром типу S_2 з шумом для рівня завантаженості близько 14%.

З даного рисунку видно, що при збільшенні ВСШ СКВ тестової статистики та її середнє значення зростає.

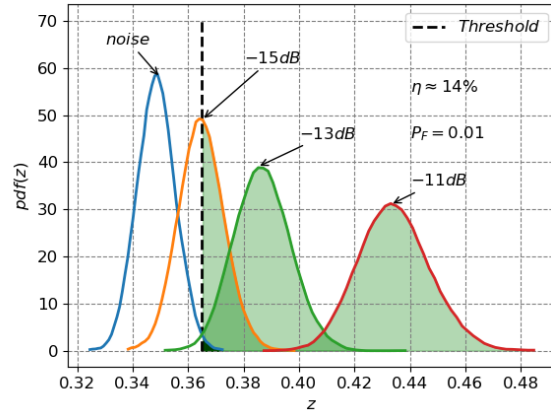


Рис. 2. РЩЙ коефіцієнта варіації для різних значень ВСШ

Розмах є нестійкою тестовою статистикою, оскільки навіть при незмінній енергії сигналу через мінливість його внутрішньої структури, що зумовлена інформаційним вмістом, максимальне значення СЩП може сильно змінюватися від реалізації до реалізації.

На Рис. 3а наведено залежність ймовірності правильного виявлення від значення ВСШ та рівня завантаженості для сигналу з формою спектра типу S_2 і тестової статистики у виді коефіцієнта варіації. На Рис. 3б наведено аналогічну залежність для сигналу з формою спектра типу S_1 і тестової статистики у виді коефіцієнта ексцеса.

З даних графіків видно, що при збільшенні завантаженості ймовірність правильного виявлення для заданого ВСШ зменшується для будь-якого виду тестової статистики та форми спектра сигналу.

На Рис. 4 наведено залежність показника ефективності від виду тестової статистики. З даного рисунку видно, що використання тестових статистик для виявлення сигналів є більш ефективним для непрямокутної обвідної форми їх спектра. Для заданих умов моделювання максимально можливе значення показника ефективності d_F складає 688. Для вирішення завдань аналізу РЧС в умовах апріорної невизначеності найбільш доцільно використовувати такі види тестових статистик: коефіцієнт варіації, дисперсію та центральні моменти 3-го і 4-го порядків.

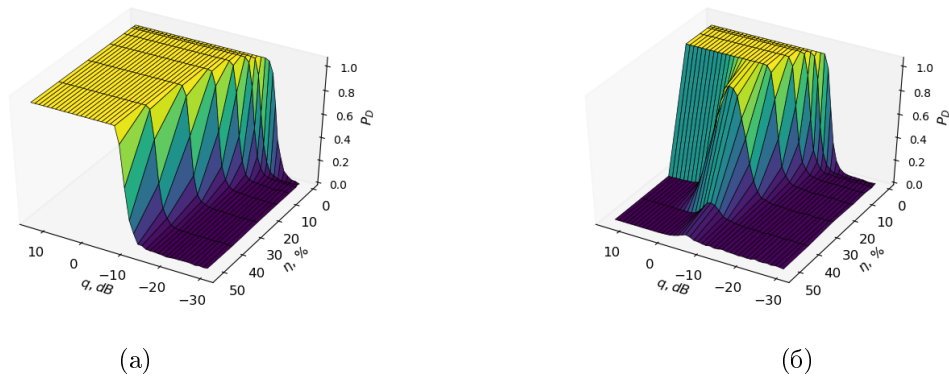


Рис. 3. Залежність $P_D(q, \eta)$ для форми спектра типу S_2 і коефіцієнта варіації (а) та форми спектра типу S_1 і коефіцієнта ексцеса (б)

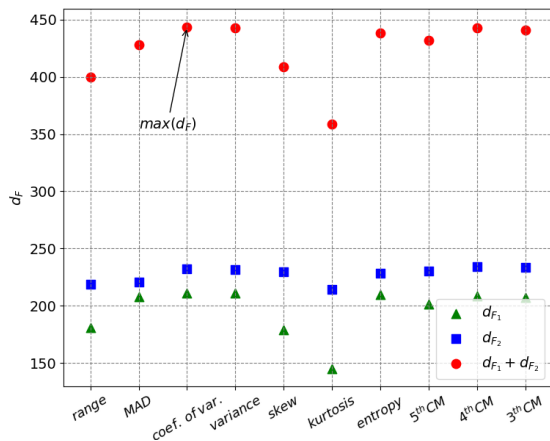


Рис. 4. Залежність показника ефективності від виду тестової статистики

Висновки

Розроблена методика дозволяє проводити пошук оптимального виду тестової статистики серед заданих для вирішення завдань аналізу радіочастотного спектра в умовах апріорної невизначеності форми спектра сигналів. У порівнянні з роботою [13] розглянуто більше видів тестових статистик, а також використано більш досконалий критерій вибору оптимальної статистики, що враховує ВСШ, рівень завантаженості смуги частот та форму спектра сигналу. У результаті досліджень встановлено, що для розділення відліків на сигнальні та шумові в частотній області найбільш доцільно використовувати коефіцієнт варіації. Перспективи подальших досліджень в даному напрямку варто зосередити на розробленні методів динамічного переходу між видами тестової статистики у процесі радіомоніторингу в залежності від зміни радіоелектронної обстановки.

References

- [1] Captain K. M., Joshi M. V. (2022). *Spectrum Sensing for Cognitive Radio. Fundamentals and Applications*. CRC Press, 256 p.
- [2] Elmasry F. G. (2021). *Dynamic Spectrum Access Decisions. Local, Distributed, Centralized, and Hybrid Designs*. John Wiley & Sons Ltd., 728 p.
- [3] Liang Y.-C. (2020). *Dynamic Spectrum Management. From Cognitive Radio to Blockchain and Artificial Intelligence*. Springer, 180 p. doi: 10.1007/978-981-15-0776-2.
- [4] Du Ke-Lin, Swamy N. S. (2010). *Wireless Communication Systems From RF Subsystems to 4G Enabling Technologies*. Cambridge University Press, 1020 p.
- [5] Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. Recommendation. ITU-R M.2083-0. (2015). *International Telecommunication Union*, Geneva, 21 p.
- [6] Rembovsky A. M., Ashikhmin A. V., Kozmin V. A., Smolskiy S. M. (2018). *Radio Monitoring: Automated Systems and Their Components*. Springer, 486 p. doi:10.1007/978-3-319-74277-9.
- [7] Vartiainen J., Lehtomaki J. J. and Saarnisaari H. (2005). Double-threshold based narrowband signal extraction. *2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference*, Vol. 2, pp. 1288-1292. doi: 10.1109/VETECS.2005.1543516.
- [8] Henttu P. and Aromaa S. (2002). Consecutive mean excision algorithm. *IEEE Seventh International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications*, Vol.2, pp. 450-454. doi: 10.1109/ISSSTA.2002.1048582.
- [9] Vartiainen J., Lehtomäki J., Saarnisaari H., and Juntti M. (2010). Analysis of the Consecutive Mean Excision Algorithms. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, Volume 2010, Article ID 459623, 13 p. doi:10.1155/2010/459623.
- [10] Vartiainen J. (2010). Concentrated signal extraction using consecutive mean excision algorithms. Dissertation. *University of Oulu*, Faculty of Technology, Department of Electrical and Information Engineering, 114 p.
- [11] Rembovskii A. M., Tokarev A. B. (2004). Avtomatizirovannii radiomonitring na osnove odnokanalnoi i dvukhkanalnoi obrabotki danihkh [Automated radio monitoring based on single-channel and dual-channel data processing]. *Vestnik MGTU [Bulletin of MSTU]*, No. 3(56), pp. 42-62. [In Rus.]

- [12] Bakker W. (2019). Automatic detection of outlandish signal behaviour in the spectrum of cellular networks. *University of Twente*, M. Sc. Thesis, The Netherlands, 68 p.
- [13] Buhaiov M. V. (2020). Iterative Method of Radiosignals Detection based on Decision Statistics. *Visnyk NTUU KPI Seriya - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, No. 81, pp. 11-20. DOI: 10.20535/RADAP.2020.81.11-20.
- [14] Rostami S., Arshad K., and Moessner K. (2012). Order-Statistic Based Spectrum Sensing for Cognitive Radio. *IEEE Communications Letters*, Vol. 16, Iss. 5, pp. 592-595. DOI: 10.1109/LCOMM.2012.030512.111887.
- [15] Jiang L., et al. (2019). Unilateral left-tail Anderson Darling test-based spectrum sensing with Laplacian noise. *IET Communications*, Vol. 13, Iss. 6, pp. 696-705. doi: 10.1049/iet-com.2018.5598.
- [16] Wang H., Yang E.-H., Zhao Z. and Zhang W. (2009). Spectrum sensing in cognitive radio using goodness of fit testing. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 8, No. 11, pp. 5427-5430. doi: 10.1109/TWC.2009.081586.
- [17] Zhang G., Wang X., Liang Y.-C. and Liu J. (2010). Fast and Robust Spectrum Sensing via Kolmogorov-Smirnov Test. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 58, No. 12, pp. 3410-3416. doi: 10.1109/TCOMM.2010.11.090209.
- [18] Kieu-Xuan T., Koo I. (2011). Cramer-von Mises test spectrum sensing for cognitive radio systems. *Wireless Telecommunication Symposium*, pp. 1-4. doi: 10.1109/WTS.2011.5960831.
- [19] Zhang J. (2002). Powerful goodness-of-fit tests based on the likelihood ratio. *J. R. Statist. Soc.*, Vol. 64, Iss. 2, pp. 281-294. doi: 10.1111/1467-9868.00337.
- [20] Teguig D., Le Nir V. and Scheers B. (2014). Spectrum sensing method based on goodness of fit test using chi-square distribution. *Electronics Letters*, Vol. 50, Iss. 9, p. 713-715. doi:10.1049/el.2014.0302.
- [21] Teguig D., Le Nir V., Scheers B., and Horlin F. (2014). Spectrum Sensing Method Based on the Likelihood Ratio Goodness of Fit Test under Noise Uncertainty. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol. 3 Iss. 9, pp. 488-494.
- [22] Marques L., and Carvalho F. (2020). Cooperative Spectrum Sensing Based on Skewness Statistical Tests. *XXXVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBRT 2020*, Florianópolis, SC. doi:10.14209/SBRT.2020.1570660124.
- [23] Subekti A., Sugihartono, Rachmana N. S. and Suksmono A. B. (2014). A Cognitive Radio Spectrum Sensing Algorithm to Improve Energy Detection at Low SNR. *Telkomnika*, Vol. 12, No. 3, pp. 717-724. doi: 10.12928/TELKOMNI-KA.v12i3.101
- [24] Denkovski D., Atanasovski V., and Gavrilovska L. (2012). HOS Based Goodness-of-Fit Testing Signal Detection. *IEEE Communications Letters*, Vol. 16, Iss. 3, pp. 310-313. doi: 10.1109/LCOMM.2012.010512.111830.
- [25] Subekti A., Sugihartono, Rachmana N. S. and Suksmono A. B. (2014). A HOS based Spectrum Sensing for Cognitive Radio in Noise of Uncertain Power. *2nd International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT)*, pp. 511-514. doi: 10.1109/ICoICT.2014.6914114.
- [26] Subekti A., Sugihartono, Rachmana N. S. and Suksmono A. B. (2014). A Jarque-Bera Test Based Spectrum Sensing for Cognitive Radio. *8th International Conference on Telecommunication Systems Services and Applications (TSSA)*, pp. 1-4. doi: 10.1109/TSSA.2014.7065944.
- [27] Lin F., et al. (2012). A Combination of Quickest Detection with Oracle Approximating Shrinkage Estimation and Its Application to Spectrum Sensing in Cognitive Radio. *MILCOM 2012 - IEEE Military Communications Conference*, pp. 1-6, doi: 10.1109/MILCOM.2012.6415682.
- [28] Zeng Y. and Liang Y.-C. (2009). Eigenvalue based Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 57, Iss. 6, pp. 1784-1793. doi: 10.1109/TCOMM.2009.06.070402.
- [29] Lin F., et al. (2012). Generalized FMD Detection for Spectrum Sensing under Low Signal-to-Noise Ratio. *IEEE Communications Letters*, Vol. 16, Iss. 5, pp. 604-607. doi: 10.1109/LCOMM.2012.030512.112164.
- [30] Lin F., Qiu R. C. and Browning J. P. (2015). Spectrum Sensing With Small-Sized Data Sets in Cognitive Radio: Algorithms and Analysis. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 64, Iss. 1, pp. 77-87. doi: 10.1109/TVT.2014.2321388.
- [31] Ciflikli C. and Ilgin F. Y. (2018). Covariance Based Spectrum Sensing with Studentized Extreme Eigenvalue. *Technical Gazette*, Vol. 25, No. 1, pp. 100-106. doi: 10.17559/TV-20161217120341.
- [32] Zeng Y. and Liang Y. (2007). Covariance Based Signal Detections for Cognitive Radio. *2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, pp. 202-207. doi: 10.1109/DYSPAN.2007.33.
- [33] Chen J., Gibson A. and Zafar J. (2008). Cyclostationary spectrum detection in cognitive radios. *IET Seminar on Cognitive Radio and Software Defined Radios: Technologies and Techniques*, pp. 1-5. doi: 10.1049/ic:20080398.
- [34] Pattanayak S., Venkateswaran P., and Nandi R. (2018). Autocorrelation based spectrum sensing technique for cognitive radio application. *EICE Communications Express*, Vol. 7, Iss. 11, pp. 415-420. doi: 10.1587/comex.2018XBL0107.
- [35] Lundén J., Kassam S. A. and Koivunen V. (2010). Robust Nonparametric Cyclic Correlation-Based Spectrum Sensing for Cognitive Radio. *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 58, Iss. 1, pp. 38-52. doi:10.1109/TSP.2009.2029790.
- [36] Po K. and Takada J. (2007). Signal Detection Method based on Cyclostationarity for Cognitive Radio. *Technical Report of IEICE*, SR2007-38, pp. 109-114.
- [37] Zeng Y. and Liang Y. (2009). Spectrum-Sensing Algorithms for Cognitive Radio Based on Statistical Covariances. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 58, Iss. 4, pp. 1804-1815. doi: 10.1109/TVT.2008.2005267.
- [38] Zhang Y. L., Zhang Q. Y. and Melodia T. (2010). A frequency-domain entropy-based detector for robust spectrum sensing in cognitive radio networks. *IEEE Communications Letters*, Vol. 14, Iss. 6, pp. 533-535. doi: 10.1109/LCOMM.2010.06.091954.
- [39] Bogale T. E., Vandendorpe L. and Le L. B. (2015). Wide-Band Sensing and Optimization for Cognitive Radio Networks With Noise Variance Uncertainty. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 63, Iss. 4, pp. 1091-1105. doi: 10.1109/TCOMM.2015.2394390.

- [40] Gautier M., Berg V. and Nogu et D. (2012). Wideband frequency domain detection using Teager-Kaiser energy operator. *7th International ICST Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM)*, pp. 332-337. doi: 10.4108/icst.crowncom.2012.248336.
- [41] Bezruk V. M., Ivanenko S. A. (2018). Selection and recognition of the specified radio signals in the SW band. *Information and Telecommunication Sciences*, No. 2, pp. 21-26. DOI:10.20535/2411-2976.22018.21-26.
- [42] Moon K. T., Stirling W. C. (2000). *Mathematical Methods and Algorithms for Signal Processing*. New Jersey: Prentice Hall Inc., 937 p.
- [43] Recommendation ITU-R SM.1600-3(09/2017). Technical identification of digital signals. *International Telecommunication Union*, Geneva, 25 p.
- [44] Kay S. M. (2013). *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Practical Algorithm Development*. New York: Prentice Hall, 475 p.

Method of Optimal Test Statistic Search for Spectrum Sensing

Buhaiov M. V.

The constant growth in the number of electronic devices leads to increasing of spectrum occupancy. In addition, new data transmission technologies are constantly used and time-frequency structure of signals become more complicate. These factors lead to a significant complication of

electronic environment, which leads to new approaches to fast spectrum sensing.

In most publications, to make a decision about the presence or absence of signals in a given frequency band, some transform is taken from the signal, followed by the calculation of test statistics. However, it is not indicated for what reasons this type of test statistics was chosen and whether it is optimal for a given transform and type of signal spectrum shape.

Problem of choosing the optimal type of test statistics is especially actual when working in conditions of unknown and variable noise power, as well as with a wide dynamic range of signals. Test statistics should be sensitive to spectrum outliers. The essence of the proposed method is forming a set of test statistics and calculating the value of coefficient of efficiency as the sum of detection probabilities for different spectrum shapes using these statistics for different signal-to-noise ratios and spectrum occupancy. The maximum value of the coefficient of efficiency will correspond to the optimal type of test statistics.

As a result of the research, it was found that to separate frequency samples into signal and noise, it is advisable to use coefficient of variation. Prospects of further research in this direction should be focused on development of methods for dynamic transition between types of test statistics in process of radio monitoring, depending on changes in the electronic environment.

Keywords: transform; test statistic; radiomonitoring; spectrum shape; spectrum occupancy