

УДК 621.391.8+621.396.96+621.396.663
DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2024.3\(43\).57-66](https://doi.org/1034169/2414-0651.2024.3(43).57-66)

В. Г. КОЗЛОВ, кандидат технічних наук
<http://orcid.org/0000-0002-7708-6143>

А. О. КРУТИХ
<https://orcid.org/0009-0001-9766-0683>

А. О. ПОПОВ, кандидат технічних наук, доцент
<https://orcid.org/0000-0002-8560-617X>

В. В. ТВЕРДОХЛІБОВ, кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
<https://orcid.org/0000-0002-6802-9796>
(Центральний науково-дослідний інститут
озброєння та військової техніки Збройних Сил
України, м. Київ)

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ РОЗПІЗНАВАННЯ ВИДІВ ДИСКРЕТНОЇ МОДУЛЯЦІЇ РАДІОСИГНАЛІВ НА ОСНОВІ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗУ

Стверджується, що прийом сигналів в системах радіоелектронної розвідки, радіочастотного моніторингу характеризується умовами значної апіорної невизначеності по відношенню як до характеристик сигналів джерел радіовипромінювань, так і відносно характеристик завадових сигналів. Стисло розглядаються відомі методи розпізнавання видів дискретної модуляції, при цьому вказуються їх недоліки та переваги. Показується, що метод розпізнавання видів дискретної модуляції, заснований на вейвлет-аналізі сигналів, не потребує для своєї реалізації значної кількості апіорної інформації стосовно частотно-часових характеристик сигналів, які підлягають технічному аналізу. Наводяться результати застосування запропонованого методу розпізнавання сигналів, які отримані шляхом імітаційного моделювання. Наводяться основні критерії розпізнавання сигналів, що застосовуються в алгоритмі обробки сигналів, який реалізує даний метод.

Ключові слова: розпізнавання сигналів, дискретна модуляція, квадратурні складові сигналу, кумулянт, вейвлет-аналіз, вейвлет-перетворення, апіорна невизначеність, радіоелектронна розвідка, радіочастотний моніторинг.

ВСТУП

Швидкі темпи поширення радіоелектронних засобів (РЕЗ) у всіх сферах людської діяльності, а також триваючий технічний прогрес в галузі створення засобів передачі інформації, що функціонують на принципі колективного використання окремих ділянок діапазону частот і застосування сигналів зі складними видами дискретної модуляції, приводять до істотного ускладнення

радіоелектронної обстановки з великим навантаженням робочих діапазонів частот і високою динамікою її зміни в просторі та часі. У цих умовах ефективність радіоелектронної розвідки та/або радіочастотного моніторингу функціонування високомобільних радіоелектронних об'єктів, до яких відносяться, в тому числі, безпілотні літальні апарати, залежить від якості вирішення завдань пошуку джерел радіовипромінювання (ДРВ), спостереження за ними, технічного аналізу та розпізнавання сигналів, що обумовлює необхідність постійного вдосконалювання швидкодійних засобів та комплексів радіоелектронної розвідки (РЕР), радіочастотного моніторингу та/або радіо-, радіотехнічного контролю (РРТК).

При веденні радіочастотного моніторингу, РРТК або РЕР через дію шуму та багатьох інших неконтрольованих факторів сигнали в частотних каналах носять випадковий характер з апіорі невідомими статистичними характеристиками. Апіорна невизначеність може долатися з використанням навчальних вибірок, які можуть бути отримані для заданих сигналів і шуму. Однак при РРТК і РЕР на обробку надходить також множина невідомих сигналів, для яких відсутня можливість отримати навчальні вибірки. Це ускладнює розв'язання задач виявлення та розпізнавання сигналів і визначає актуальність застосування спеціальних методів розпізнавання сигналів в умовах підвищеної апіорної невизначеності, які відрізняються від класичних методів та зазвичай застосовуються в напрямках радіочастотного моніторингу, РРТК та РЕР [1–14].

Перспективні методи автоматичного розпізнавання виду дискретної модуляції радіосигналу можна умовно розділити на три основні групи за типом використовуваних для розв'язання задачі ознак: за формою сигнального сузір'я, за статистичними параметрами сигналу, які використовуються, а також за структурними ознаками сигналу.

У відомих статистичних методах розпізнавання образів подолання апіорної невизначеності стосовно статистичних характеристик сигналів може здійснюватися з використанням навчальних вибірок реалізацій сигналів [1–6]. Крім того, зазвичай припускається, що число M гіпотез, які перевіряються, дорівнює числу класів сигналів, які підлягають розпізнаванню. Однак, у реальних задачах РРТК і РЕР виникають ситуації, коли спостережуваний сигнал може не належати до заданих класів сигналів і повинен бути віднесений до $(M+m)$ -го не заданого в імовірнісному змісті класу невідомих сигналів. При цьому навчальні вибірки сигналів з $(M+m)$ -го класу в силу їх різноманітності або взагалі не можуть бути отримані, або не є представницькими. Такі неklasичні завдання розпізнавання, які виникають при РРТК і РЕР, відносяться до завдань розпізнавання сигналів в умовах суттєвої апіорної невизначеності [6–12].

При радіомоніторингу частотних діапазонів часто виникає необхідність із усієї множини аналізованих ДРВ виділити деякі відомі раніше ДРВ, для яких можуть бути отримані навчальні вибірки сигналів. Розв'язання такої задачі являє собою задачу селекції та розпізнавання заданих сигналів при наявності невідомих сигналів. Зокрема, для радіомоніторингу засобів зв'язку, передачі

інформації та радіолокації відповідні РЕЗ випромінюють радіосигнали з енергетичними спектрами, які характеризуються наявністю яскраво виражених екстремумів.

В умовах зростаючого навантаження радіодіапазонів при веденні РРТК і РЕР важливим завданням є розпізнавання видів модуляції для нових виявлених ДРВ. Це більш складна задача розпізнавання в порівнянні з вище розглянутою задачею розпізнавання заданих ДРВ з фіксованими видами та параметрами модуляції. Складність обумовлена тим, що тут розпізнаванню підлягають класи сигналів – радіосигнали з певним видом модуляції та різними можливими значеннями параметрів модуляції. Розпізнавання видів модуляції радіосигналів при РРТК і РЕР у реальних умовах ускладнюється через випадковий характер переданих повідомлень, вплив завад, а також появи радіосигналів з новими невідомими раніше видами модуляції, для яких відсутні необхідні апріорні відомості.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Дослідження загальних питань розпізнавання образів викладені в роботах [1–5]. Загальні питання побудови підсистем виявлення та розпізнавання сигналів у засобах та комплексах радіочастотного моніторингу, РЕР і РРТК розглядаються в роботах [6–14]. Відомі методи аналізу та оцінювання частотного спектру суміші сигналів добре представлені в багатьох виданнях [15–19]. Основні методи розпізнавання дискретних видів модуляції сигналів досліджуються у роботах [20–30], при цьому методи розпізнавання видів дискретної модуляції на основі форми сигнального сузір'я розглянуто у роботах [21, 22], методи розпізнавання з використанням кумулянтів представлені в роботі [25], алгоритми класифікації сигналів з дискретною модуляцією наведено у роботах [26, 27, 29], питання розпізнавання видів дискретної модуляції на основі вейвлет-перетворення викладено у роботі [30]. Теоретичні питання вейвлет-аналізу викладені у роботах [31–47].

В той же час, в наукових періодичних виданнях небагато уваги приділяється застосуванню методів розпізнавання сигналів у широкосмугових радіоелектронних системах, якими є засоби та комплекси РЕР і РРТК, за винятком окремих робіт, наприклад, [20, 26, 27].

Метою роботи є, по-перше, постановка та вирішення задачі розпізнавання видів дискретної модуляції радіосигналів на основі методу вейвлет-аналізу, а по-друге, визначення методологічних основ для обґрунтування основних вимог до підсистеми технічного аналізу перспективного комплексу РЕР та/ або РРТК.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Основним на сьогоднішній день підходом до розпізнавання PSK-сигналів (PSK – phase shift keying) є побудова сигнальних сузір'їв [20, 21]. При такому підході інформативною ознакою є миттєва кутова фаза сигналу та відповідно форма сигнального сузір'я або гістограми розподілу миттєвих фаз. Якість розпізнавання по сигнальному сузір'ю багато в чому залежить від характеристик приймача і якості каналів зв'язку (що можна в першому наближенні охарактеризувати через

співвідношення сигнал/шум (ССШ) у системі), тому центральна проблема такого підходу полягає у відновленні сузір'я, що використовує, як правило, алгоритми на основі методу «fuzzy c-means» [21, 23]. Ці алгоритми належать до класу ітеративних алгоритмів кластеризації та дозволяють розпізнавати сигнали з фазовою та амплітудно-фазовою модуляцією (quadrature amplitude modulation – QAM) при надзвичайно низьких значеннях ССШ: аж до 5 дБ.

Обмеженням даного методу є необхідність синхронізації по несучій і тактовій частотах, а також вимога апріорного знання максимальної кількості вузлів сузір'я. У роботі [22] запропоновано розвиток даного методу за рахунок використання карт Кохонена, що самоорганізуються, – одного з варіантів кластеризації багатовимірних векторів. Перевага вдосконаленого підходу – усунення вимоги стосовно апріорного знання максимальної кількості вузлів сузір'я.

Розвитком методів навчання на основі карт Кохонена є метод навчання з непараметричною адаптацією (PLSOM – parameter-less self-organizing maps). У роботі [24] показано, що алгоритм PLSOM забезпечує більшу стійкість навчання, ніж класичний алгоритм SOM (self-organizing maps), через більш слабку залежність числа знайдених при навчанні кластерів від числа нейронів у карті.

Крім того, при використанні для відновлення сигнального сузір'я карт Кохонена із алгоритмом навчання PLSOM відсутня необхідність апріорного знання максимальної кількості кластерів (кількості фазових позицій). У роботі [24] показано, що алгоритм забезпечує розпізнавання сигналів із цифровою фазовою модуляцією аж до значень ОСШ порядку 3 дБ при граничному відносному розладнанні по несучій частоті реєструємих радіосигналів до $\sim 10^{-3}$.

Задачу розпізнавання виду дискретної модуляції радіосигналу можна вирішувати як задачу розпізнавання класів радіосигналів з відомими видами модуляції при наявності класу сигналів з невідомими видами модуляції. При цьому, загальний вид алгоритму розпізнавання заданих сигналів може бути конкретизований з урахуванням опису класів радіосигналів із заданими видами модуляції імовірнісною моделлю у вигляді сумішей розподілів.

Рішення про види модуляції приймається по реалізаціях радіосигналів у вигляді послідовностей відліків квадратурних складових сигналу

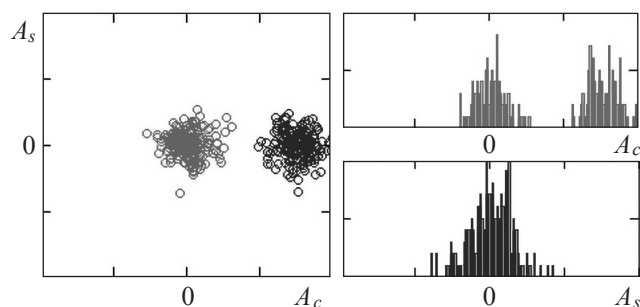
$$(A_c(i), A_s(i)), i = 0, 1, \dots, I - 1,$$

отриманих з виходу цифрового радіоприймального пристрою. Дослідження проведені для радіосигналів з різними видами модуляції (рис. 1–5). Сигнали спостерігалися на фоні завади у вигляді гауссівського білого шуму. Ці проєкції відліків квадратурних складових визначають характерні області для кожного виду модуляції. По кожній з координат наведені гістограми розподілів значень квадратурних складових сигналів.

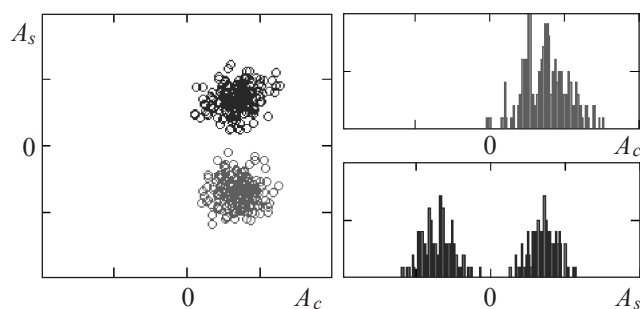
З аналізу змісту поставленого завдання розпізнавання видів модуляції радіосигналів випливає, що придатною імовірнісною моделлю для опису сигналів з різними

видами модуляції може служити модель у вигляді суміші розподілів і відповідне розв'язувальне правило. При цьому в припущенні незалежності відліків квадратурних складових імовірнісні властивості сигналів визначаються сумішами гауссівських розподілів відліків квадратурних складових.

На рис. 1. показані проекції відліків радіосигналів з амплітудною маніпуляцією (ASK – amplitude shift keying) у координатах квадратурних складових (A_c , A_s) і гістограми розподілів. На рис. 2. показані проекції відліків радіосигналів із частотною маніпуляцією (BFSK – binary frequency shift keying) у координатах квадратурних складових (A_c , A_s) і гістограми розподілів.



Р и с . 1. Проекції відліків радіосигналів з амплітудною маніпуляцією у координатах квадратурних складових (A_c , A_s) і гістограми розподілів



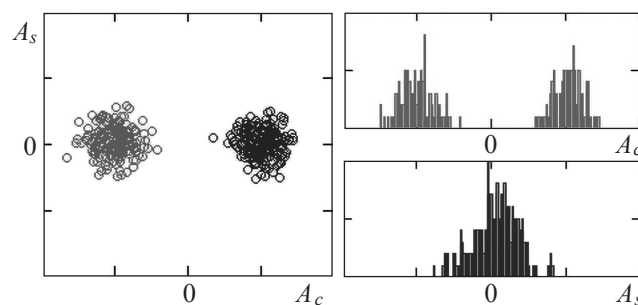
Р и с . 2. Проекції відліків радіосигналів з частотною маніпуляцією у координатах квадратурних складових (A_c , A_s) і гістограми розподілів

На рис. 3. показані проекції відліків радіосигналів з фазовою маніпуляцією (BPSK – binary phase shift keying) у координатах квадратурних складових (A_c , A_s) і гістограми розподілів. На рис. 4. показані проекції відліків радіосигналів із квадратурною фазовою маніпуляцією (QPSK – quadrature phase shift keying) у координатах квадратурних складових (A_c , A_s) і гістограми розподілів.

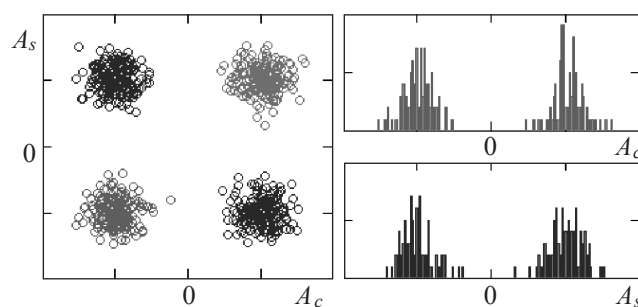
На рис. 5. показані проекції відліків радіосигналів з 16-позиційною квадратурною амплітудно-фазовою маніпуляцією (QAM-16 – quadrature amplitude modulation) у координатах квадратурних складових (A_c , A_s) і гістограми розподілів.

Розпізнавання виду модуляції сигналів, показаних на рис. 1–5, здійснюється на підставі результатів виміру математичних очікувань (середніх) розподілів квадратурних складових (A_c , A_s) відповідно до табл. 1.

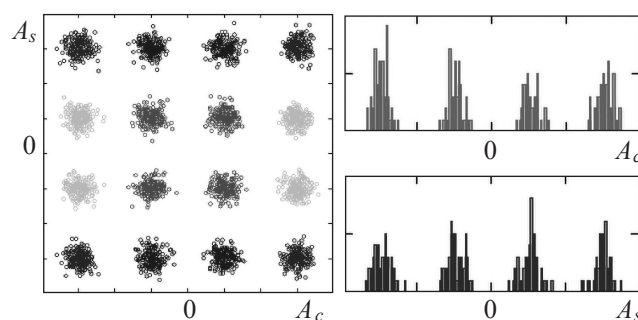
В окрему групу методів розпізнавання видів цифрової модуляції сигналів можна виділити методи, що використовують у якості ознак розпізнавання кумулянти



Р и с . 3. Проекції відліків радіосигналів з фазовою маніпуляцією у координатах квадратурних складових (A_c , A_s) і гістограми розподілів



Р и с . 4. Проекції відліків радіосигналів з квадратурною фазовою маніпуляцією у координатах квадратурних складових (A_c , A_s) і гістограми розподілів



Р и с . 5. Проекції відліків радіосигналів з квадратурною амплітудно-фазовою маніпуляцією у координатах квадратурних складових (A_c , A_s) і гістограми розподілів

Т а б л и ц я 1. Критерії розпізнавання виду модуляції сигналів на підставі результатів вимірювання математичних очікувань (МО) розподілів квадратурних складових (A_c , A_s)

сигнал	значення МО A_c	значення МО A_s
ASK	0, a	0
BFSK	b	$-a$, a
BPSK	$-a$, a	0
QPSK	$-a$, a	$-a$, a
QAM-16	$-3a$, $-a$, a , $3a$	$-3a$, $-a$, a , $3a$

розподілу ймовірностей досліджуваного процесу. Відмінною рисою даних ознак є стійкість до умов априорної

невизначеності стосовно несучої частоти сигналу при розв'язанні задачі розпізнавання.

Використанню кумулянтів різного порядку для розпізнавання видів модуляції радіосигналів присвячена досить велика кількість робіт [25, 26]. Кумулянтном випадкової величини називають коефіцієнт розкладання логарифма її характеристичної функції в ряд Маклорена:

$$\ln \Phi(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{C_k (j \cdot x)^k}{k!},$$

де $j = \sqrt{-1}$.

Кумулянти C_1, C_2, C_3, C_4 називають середнім значенням, дисперсією, асиметрією та ексцесом випадкової величини відповідно, причому зв'язок між цими кумулянтами та моментами E_k випадкової величини можна представити як

$$E_1 = C_1; \quad E_2 = C_2 + C_1^2; \quad E_3 = C_3 + 3C_1C_2 + C_1^3.$$

Розкладання логарифма характеристичної функції $\Phi(x, y)$ для сукупності двох випадкових величин у ступеневий ряд визначає кумулянти двовимірного імовірного розподілу, що описує статистичні зв'язки між зазначеними величинами:

$$\ln \Phi(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{C_{nm} (j \cdot x)^n (j \cdot y)^m}{n!m!},$$

де порядком кумулянту C_{nm} називають суму індексів $n+m$. Також укажемо, що спільними кумулянтами називаються кумулянти, для яких n та m відмінні від 0, причому для двовимірного гауссівського розподілу відмінні від 0 тільки кумулянти 1-го та 2-го порядків, а якщо всі спільні кумулянти рівні 0, випадкові величини є статистично незалежними. Перший спільний кумулянт C_{11} описує кореляцію випадкових величин.

Основну ідею методу розпізнавання видів модуляції з використанням кумулянтів високого порядку можна сформулювати в такий спосіб: спільні кумулянти випадкової комплексної величини та величини, яка з нею спряжена, будуть характеризувати статистичний зв'язок між зареєстрованим і дзеркально відображеним розподілом миттєвої фази сигналу

$$C_{22} = \text{cum}[x, x, \bar{x}, \bar{x}];$$

$$C_{22} = E_{22} - (E_{20})^2 - 2(E_{11})^2;$$

$$E_{22} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [x^2 \cdot (\bar{x})^2].$$

Можна показати, що одні види модуляції доцільно розпізнавати з використанням кумулянтів 4-го порядку, інші – 2-го і т.д. Результати аналізу представлених у [25] даних показують, що з використанням кумулянту C_{22} можна впевнено виділити сигнали FSK, PSK-2 і PAM (pulse amplitude modulation), з використанням C_{20} – PSK-2, PAM, QAM-16, а за допомогою кумулянту C_{40} – PSK-2, PSK-4, PAM. Таким чином, розв'язання задачі з розпізнавання типів модуляції з використанням кумулянтів високих порядків вимагає добору відповідних кумулянтів і конкретних правил розрізнення за

результатами експертного аналізу значень кумулянтів для різних видів модуляції сигналів.

Розберемо деякі найцікавіші з погляду повноти розпізнавання видів модуляції методи розпізнавання видів модуляції сигналів з використанням кумулянтів високого порядку, серед яких слід виділити ієрархічну схему розпізнавання M-PSK, M-QAM і M-PAM видів модуляції [25–28]. Найбільш успішно, як показали результати моделювання у [29], цей метод розпізнає чотири класи сигналів PSK-8, QAM-16, PAM-4 і BPSK, використовуючи для цього розв'язувальне правило, де критерієм є величина кумулянту $|C_{40}|$:

$$|C_{40}| < 0.34 \Rightarrow \text{PSK-8};$$

$$0.34 \leq |C_{40}| < 1.02 \Rightarrow \text{QAM-16};$$

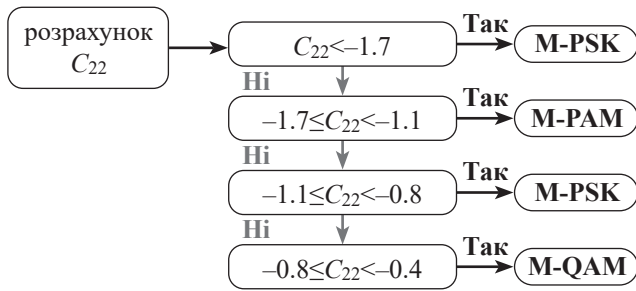
$$1.02 \leq |C_{40}| < 1.68 \Rightarrow \text{PAM-4};$$

$$1.68 \leq |C_{40}| \Rightarrow \text{BPSK}.$$

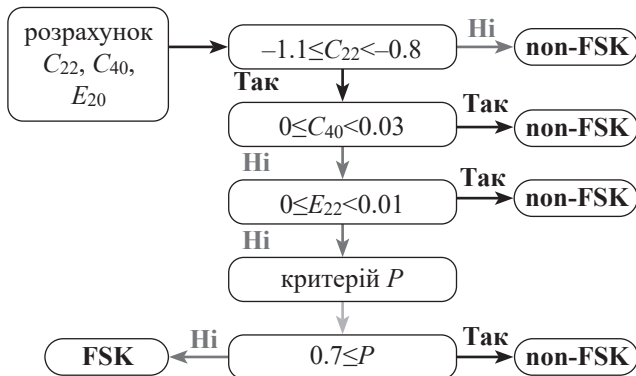
Для 4-класової задачі при ССШ = 10 дБ і сигналі тривалістю 100 символів правильно розпізнається більш 95 % зразків контрольної вибірки. Якщо збільшити тривалості сигналів до 250 символів, то можна досягти практично повністю правильного розпізнавання видів модуляції PSK-8, QAM-16, PAM-4 і BPSK. Запропонований в [25] метод розпізнавання для 4 видів модуляції досліджувався на стійкість до відносного розладу по несучій частоті. Чисельний експеримент проводився для сигналів тривалістю 250 символів, ССШ = 20 дБ, причому відносне розладання по несучій частоті становив близько 8 %. Виявилося, що розв'язувальне правило при наявності розладу по несучій частоті не дозволяє розрізнити сигнали з модуляцією PSK-8, QAM-16 і BPSK. Проведені авторами статті [25] дослідження дозволили синтезувати алгоритм розпізнавання сигналів PSK, QAM і PAM, представлений на рис. 6, що є інваріантним до якості синхронізації приймача по несучій частоті сигналу.

Недолік розробленого алгоритму полягає у відсутності в розпізнаваному наборі частотної модуляції (FSK): значення обраного для використання як критерію розв'язувального правила кумулянту C_{22} для FSK- і PSK-сигналів перебувають в одній області. Розв'язання проблеми розрізнення FSK-сигналів полягає в спільному застосуванні кумулянтного аналізу та методу оцінки розподілу різниці миттєвих фаз. Використання кумулянту C_{22} дозволяє відрізнити FSK- і PSK-сигнали від сигналів з модуляцією PAM і QAM. Виходячи з результатів, наведених в [26–29], із загального класу FSK- і PSK-сигнали з використанням C_{40} і E_{20} можливо виділення сигналів з модуляцією PSK-8 (значення даних показників для цього типу модуляції близькі до нуля). З суміші сигналів FSK і PSK-2,4, що залишилися, можна виділити сигнали FSK з використанням методу оцінки розподілу різниці миттєвих фаз за критерієм P [25]. Алгоритм, що дозволяє відрізнити FSK-сигнали від сигналів інших типів модуляції, представлений на рис. 7.

На відміну від розглянутих вище алгоритмів, розпізнавання сигналів з довільними видами модуляції може



Р и с . 6. Алгоритм розпізнавання видів модуляції, інваріантний до синхронізації приймача по несучій частоті сигналу



Р и с . 7. Алгоритм розпізнавання FSK-сигналів

здійснюватися на основі дискретного вейвлет-перетворення $DWT_x(u, s)$ сигналу $x(t_j)$, який представляється своїми відліками $x = (x_0, x_1, \dots, x_{J-1})$, $x(t_j) = x(\Delta t \cdot j) = x_j$, при цьому вейвлет-перетворення $DWT_x(u, s)$ визначається наступним виразом [31–47]:

$$DWT_x(u, s) = \sum_{j=0}^{J-1} (x_j \cdot \bar{\psi}(j; u, s)) = \sum_{j=0}^{J-1} x_j \sqrt{s \cdot \Delta f} \cdot \bar{\psi}(s \cdot \Delta f \cdot (j - u) \cdot \Delta t) \quad ; \quad (1)$$

$$\psi(j; u, s) = \sqrt{s \cdot \Delta f} \cdot \psi(s \cdot \Delta f \cdot (j - u) \cdot \Delta t), \quad (1a)$$

де $x(t_j) = x(\Delta t \cdot j) = x_j$; $j = 0, 1, \dots, J-1$; u – індексний параметр часового зсуву, $u = 0, 1, \dots, J-1$; s – індексний параметр зміни частотного масштабу, $s = 0, 1, \dots, S-1$; $J, S \in \mathbb{N}$; $\mathbb{N}$ – множина натуральних чисел; символ « $\bar{\psi}$ » позначає комплексно спряжену величину; Δt – інтервал дискретизації часових відліків сигналу; Δf – інтервал дискретизації по частоті; $t_j = \Delta t \cdot j \in T_{sp}$; T_{sp} – інтервал обробки сигналів; $\Delta t \cdot (J-1) = \Delta T_{sp}$ – розмір інтервалу обробки сигналів.

Результати вейвлет-перетворень $DWT_x(u, s)$ сигналів на основі співвідношення (1) здійснювалися з використанням функції Морле такого виду:

$$\psi(j; u, s) = 2\pi \Delta f \cdot s \cdot \cos[C \cdot (2\pi \Delta f \cdot s) \Delta t (j - u)] \cdot \exp[-(2\pi \Delta f \cdot s \cdot \Delta t (j - u))^2 / 2] \quad , \quad (2)$$

де $C = \text{const}$.

Усі результати вейвлет-перетворень $DWT_x(u, s)$ сигналів приводяться у формі контурних графіків двовимірних функцій.

Розпізнавання сигналів на основі вейвлет-аналізу здійснюється за таким алгоритмом:

0) виконується дискретизація безперервного сигналу:

$$x(t) \rightarrow \{x(t_j)\} = \{x(\Delta t \cdot j)\} = \{x_j\};$$

1) обчислюється вейвлет-перетворення $X(u, s) = DWT_x(u, s)$ (1) дискретного сигналу $x(t_j)$:

$$x(t_j) \xrightarrow{DWT_x} X(u, s);$$

2) обчислюється позитивна частина $X_+(u, s)$ вейвлет-перетворення $X(u, s)$ відповідно до співвідношення:

$$X_+(u, s) = \max[X(u, s), q \cdot \max[X(u, s)]] - q \cdot \max[X(u, s)] \quad , \quad (3)$$

де $0 < q < 1$;

3) на інтервалі обробки сигналів T_{sp} формуються відрізки (лінії) $\{l_k(u)\}$, $k = 0, 1, \dots, K-1$, такі що:

$$l_k(u): s = a^k(u - u_0^k) + s_0^k; \quad (4)$$

$$a^k = \frac{s_1^k - s_0^k}{u_1^k - u_0^k}; \quad (5a)$$

$$u_0^{k-1} < u_1^{k-1} \leq u_0^k < u_1^k \leq u_0^{k+1} < u_1^{k+1}, \quad (5b)$$

де a^k – кутовий коефіцієнт прямої (відрізка) $l_k(u)$; u_0^k, u_1^k – координати початку та кінця k -го відрізка (лінії) на осі часу;

при цьому локальні максимуми $\max_{\{u_k\}}[X(u, s)]$ двовимірної функції $X_+(u, s)$ належать цим відрізкам (лініям):

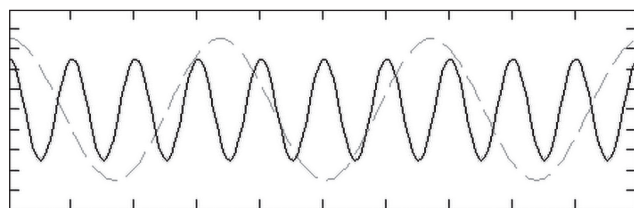
$$\max_{\{u_k\}}[X(u_k, s)] \in l_k(u), \quad (6)$$

де $u_k \in [u_0^k, u_1^k]$ – координата k -го локального максимуму функції $X_+(u, s)$;

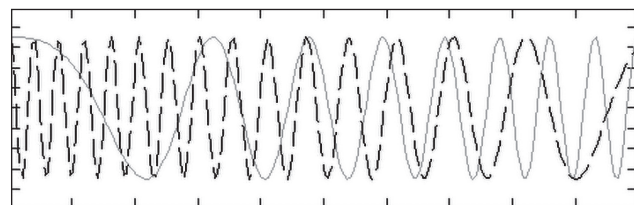
4) класифікація сигналу здійснюється на основі аналізу взаємного розташування та характеристик відрізків (ліній) $\{l_k(u)\}$ (4), що містять локальні максимуми $\max_{\{u_k\}}[X(u, s)]$ двовимірної функції $X_+(u, s)$ відповідно до табл. 2.

На рис. 8 а, б показані пари адитивно взаємодіючих сигналів: гармонійних і лінійно-частотно модульованих (ЛЧМ) відповідно. На рис. 9 а, б показані позитивні частини $X_+(u, s)$ (3) вейвлет-перетворень $X(u, s)$ (1) суми двох гармонійних та суми двох ЛЧМ сигналів, зображених на рис. 8 а, б відповідно. Лінії, які містять локальні максимуми $\max_{\{u_k\}}[X(u, s)]$ двовимірної функції $X_+(u, s)$ на різних миттєвих частотах сигналів, показаних на рис. 8, зображені штрихом і штрих-пунктиром відповідно.

Кутові коефіцієнти a^k (5a) прямих (відрізків) $l_k(u)$, які відповідають позитивним частинам $X_+(u, s)$ (3) вейвлет-перетворень $X(u, s)$ (1) сигналів, зображених на рис. 9 а, б, рівні нулю, більше та менше нуля відповідно, дозволяють розпізнати навіть ті сигнали, які перебувають в адитивній суміші один з одним.

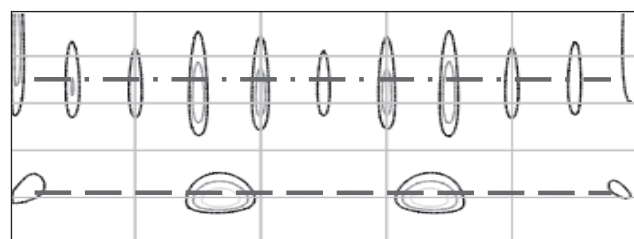


а)

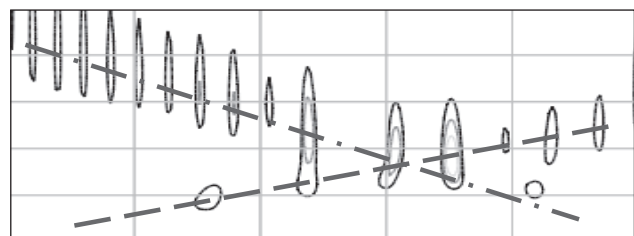


б)

Р и с . 8. Осцилограми сигналів: а) пара гармонійних сигналів; б) пара ЛЧМ сигналів



а)



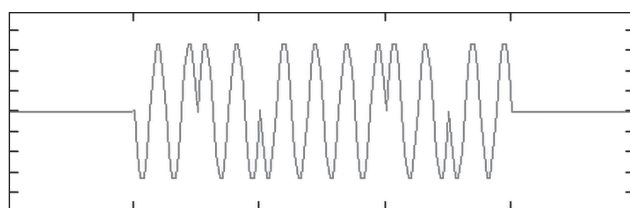
б)

Р и с . 9. Розпізнавання вейвлет-перетворень сигналів: а) суми двох гармонійних сигналів; б) суми двох ЛЧМ сигналів

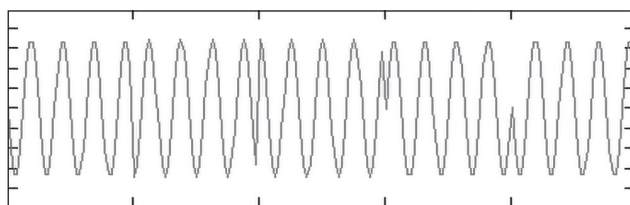
На рис. 10 а, б показані фазоманіпульований радіоімпульс і безперервний сигнал із квадратурною фазовою маніпуляцією відповідно.

На рис. 11 а, б показані позитивні частини $X_+(u, s)$ (3) вейвлет-перетворень $X(u, s)$ (1) сигналів, зображених на рис. 10 а, б відповідно. Лінії, які містять локальні максимуми $\max_{\{u_k\}}[X(u, s)]$ двовимірної функції $X_+(u, s)$ на різних частотах локальних максимумів, зображені штрихом і штрих-пунктиром відповідно. Локальні мінімуми (максимуми), які відповідають більш високим частотам, обумовлені стрибками фази сигналів і показані знаком «х».

Кутові коефіцієнти a^k (5а) прямих (відрізків) $l_k(u)$, які відповідають позитивним частинам $X_+(u, s)$ (3) вейвлет-перетворень $X(u, s)$ (1) сигналів, зображених на рис. 10 а, б, дорівнюють нулю та перебувають на одному рівні (на одній частоті), що дозволяє віднести ці сигнали до класу сигналів з постійною несучою.

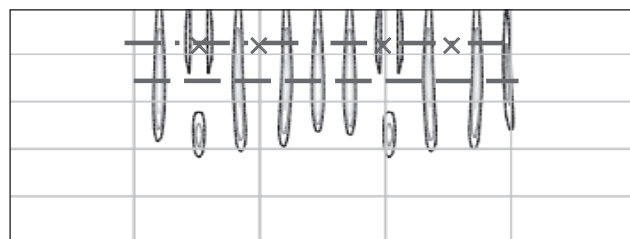


а)

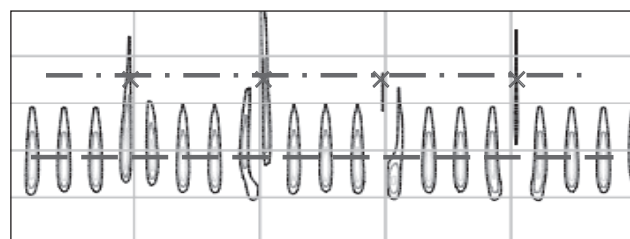


б)

Р и с . 10. Осцилограми сигналів: а) фазоманіпульований радіоімпульс; б) безперервний сигнал із квадратурною фазовою маніпуляцією



а)



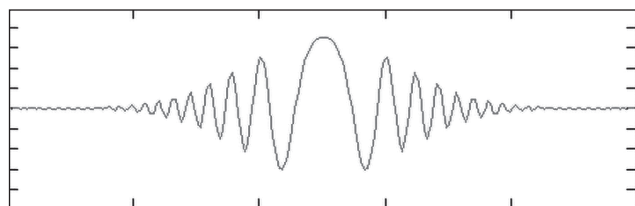
б)

Р и с . 11. Розпізнавання вейвлет-перетворень сигналів: а) фазоманіпульованого радіоімпульсу; б) безперервного сигналу із квадратурною фазовою маніпуляцією

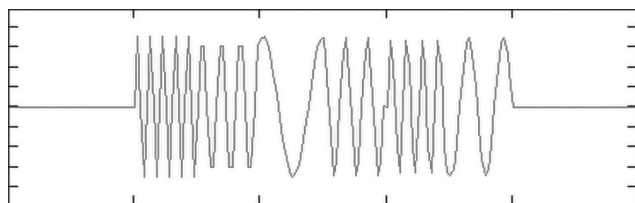
На рис. 12 а, б показані ЛЧМ радіоімпульс із V-образною модуляцією, а також радіоімпульс із частотною маніпуляцією та безперервною фазою дискретів відповідно.

На рис. 13 а, б показані позитивні частини $X_+(u, s)$ (3) вейвлет-перетворень $X(u, s)$ (1) сигналів, зображених на рис. 12 а, б відповідно. Лінії (відрізки), які містять локальні максимуми $\max_{\{u_k\}}[X(u, s)]$ двовимірної функції $X_+(u, s)$ на різних частотах локальних максимумів, зображені штрихом.

Кутові коефіцієнти a^k (5а) відрізків $l_k(u)$, які відповідають позитивним частинам $X_+(u, s)$ (3) вейвлет-перетворень $X(u, s)$ (1) сигналу, показаного на рис. 12 а, одночасно є більше та менше нуля, причому за модулем є



а)



б)

Р и с . 12. Осцилограми сигналів: а) ЛЧМ радіоімпульс з V-образною модуляцією; б) радіоімпульс із частотною маніпуляцією

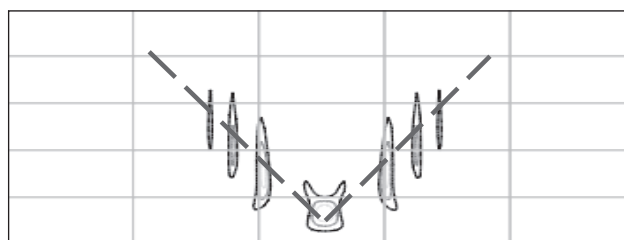
однаковими, що дозволяє класифікувати даний сигнал як ЛЧМ сигнал з V-подібною модуляцією. Куткові коефіцієнти a^k (5а) відрізків $l_k(u)$, які відповідають позитивним частинам $X_+(u, s)$ (3) вейвлет-перетворення $X(u, s)$ (1) сигналу, показаного на рис. 12б, дорівнюють нулю, однак ці відрізки рівної довжини знаходяться на різних рівнях (частотах), що дозволяє класифікувати даний сигнал як сигнал із частотною маніпуляцією.

Розпізнавання сигналів на основі вейвлет-перетворення $X(u, s)$ (1) здійснюється відповідно до табл. 2 з використанням чотирьох параметрів: числа відрізків (ліній); значення куткових коефіцієнтів $\{a^k\}$ відрізків; значення частот $\{s^k\}$ відрізків; періоду $T(s)$ проходження локальних максимумів.

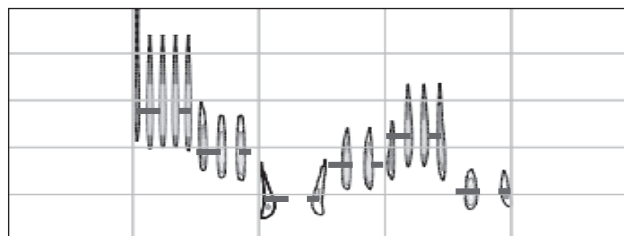
Узагальнюючи отриману в ході вейвлет-аналізу інформацію, можна виділити основні критерії розпізнавання сигналів, які застосовуються в алгоритмі обробки сигналів та зведені в табл. 2.

Т а б л и ц я 2. Критерії розпізнавання сигналів на основі результатів вейвлет-аналізу

Вид сигналу	Число відрізків (ліній) $l_k(u)$	Значення куткових коефіцієнтів $\{a^k\}$ відрізків	Значення частот $\{s^k\}$ відрізків	Період $T(s)$ проходження локальних максимумів
пара гармонійних сигналів	2	$a^1 = a^2 = 0$	$s^1, s^2 = \text{const}$ $s^1 \neq s^2$	$T(s^k) = \text{const}$
пара ЛЧМ сигналів	2	$a^1 \neq a^2$	$s^1, s^2 = \text{var}$	$T(s^k) = \text{var}$
фазоманіпульований радіоімпульс	2	$a^1 = a^2 = 0$	$s^1, s^2 = \text{const}$ $s^1 < s^2$	$T(s^1) = \text{const};$ $T(s^2) = \text{var};$ $s^1 < s^2$
безперервний сигнал із квадратурною фазовою маніпуляцією	2	$a^1 = a^2 = 0$	$s^1, s^2 = \text{const}$ $s^1 < s^2$	$T(s^1) = \text{const};$ $T(s^2) = \text{const};$ $s^1 < s^2; T(s^1) < T(s^2)$
ЛЧМ радіоімпульс із V- подібною модуляцією	2	$a^1 \neq a^2; a^1 = -a^2$	$s^1, s^2 = \text{var}$	$T(s^k) = \text{var}$
радіоімпульс із частотною маніпуляцією	дорівнює числу дискрет	$\{a^k = 0\}$	$s^k = \text{var}$	$T(s^k) = \text{var}$



а)



б)

Р и с . 13. Розпізнавання вейвлет-перетворень сигналів: а) ЛЧМ радіоімпульс з V-подібною модуляцією; б) радіоімпульс із частотною маніпуляцією

Розглянуті в статті методи розпізнавання сигналів дозволяють зробити такі висновки.

ВИСНОВКИ

1. Метод розпізнавання видів дискретної модуляції, заснований на вейвлет-аналізі сигналів, не потребує для своєї реалізації значної кількості апіорної інформації стосовно частотно-часових характеристик сигналів, які підлягають технічному аналізу. Ця обставина дозволяє застосовувати цей метод по відношенню до широкого класу сигналів як з дискретною, так і з безперервною модуляцією, про що свідчать результати застосування запропонованого методу, які отримані шляхом імітаційного моделювання. Основним недоліком запропонованого методу є високі вимоги до обчислювальних ресурсів системи обробки сигналів.

2. У якості перспективних методів розпізнавання видів модуляції сигналів РЕЗ передачі інформації слід вказати методи розпізнавання на основі кумулянтів розподілу суміші сигналу та завад (шумів), а також на основі вейвлет-аналізу сигналів.

3. У якості універсального методу розпізнавання сигналів РЕЗ (як РЕЗ радіолокації, так і РЕЗ передачі інформації) для наступної реалізації в перспективних комплексах (станціях) радіочастотного моніторингу, радіоелектронної розвідки, радіо-, радіотехнічного контролю та радіоелектронної боротьби слід розглядати метод розпізнавання сигналів на основі вейвлет-аналізу.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. М.: Высшая школа. 1977. 222 с.
2. Горелик А.Л., Скрипник В.А. Методы распознавания. М.: Высшая школа. 1984. 208 с.
3. Watanabe, S. (2014). Methodologies of Pattern Recognition. Academic Press.
4. Мерков А.Б. Распознавание образов. Введение в методы статистического обучения. М.: Едиториал УРСС. 2011.
5. Загоруйко Н.Г. Методы распознавания и их применение. М.: Сов. Радио. 1972. 208 с.
6. Безрук В.М., Певцов Г.В. Теоретические основы проектирования систем распознавания сигналов для автоматизированного радиоконтроля. Харьков: Коллегиум. 2007. 430 с.
7. Терентьев А.В., Коротков В.Ф. Радиотехническая разведка: Теория и практика обработки радиолокационных сигналов. СПб.: Медиапапир. 2021. 346 с.
8. Радиомониторинг: задачи, методы, средства; под ред. А.М. Рембовского. М.: Горячая линия - Телеком, 2012. 640 с.
9. Радзиевский В.Г. Теоретические основы радиоэлектронной разведки. М.: Радиотехника. 2004. 432 с.
10. Слободянюк П.В., Благодарний В.Г., Ступак В.С. Довідник з радіомоніторингу. Ніжин: ТОВ «Вид-во "Аспект-Поліграф"». 2008.
11. Смирнов Ю.А. Радиотехническая разведка. М.: Воениздат. 2001.
12. Wiley, R.G. ELINT: The Interception and Analysis of Radar Signals. Artech House. 2006.
13. Poisel, R.A. Electronic Warfare Receivers and Receiving Systems. Artech House. 2014. 832 p.
14. Куприянов А.И., Петренко П.Б., Сычев М.П. Теоретические основы радиоэлектронной разведки. М.: МГТУ. 2010.
15. Marple, S.L. (1987). Digital Spectral Analysis with Applications. Prentice Hall, Englewoods Cliffs, New Jersey.
16. Kay, S.M. (1988). Modern Spectral Estimation, Theory and Application. Prentice Hall, Englewoods Cliffs, New Jersey.
17. Haykin, S. Advances in Spectrum Analysis and Array Processing. Vol. 1, 2, 3. Prentice Hall, Englewoods Cliffs, New Jersey, 1991, 1995.
18. Naidu, P.S. (1996). Modern Spectrum Analysis of Time Series. CRC Press, Boca Raton, Florida.
19. Stoica, P. & Moses, R. (2005). Spectral Analysis of Signals. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
20. Weber, C., Peter, M. & Felhauer, T. (2015). Automatic modulation classification technique for radiomonitoring. Electronics Letters. Vol. 51. №. 10. Pp. 794–796.
21. Mobasser, B.G. (2000). Digital modulation classification using constellation shape. Signal processing. No 80. Pp. 251–277.
22. Аджемов С.С., Стогов А.А., Терешонок М.В. и др. Алгоритм распознавания вида цифровой модуляции сигнала по форме фазового созвездия с использованием самоорганизующихся карт Кохонена. Т-Comm – Телекоммуникации и транспорт. 2011. № 11. С. 4–6.
23. Kohonen, T. (2001). Self-Organizing Maps. Springer. 502 p.
24. Методы распознавания видов цифровой модуляции сигналов в когнитивных радиосистемах/ Аджемов С.С., Кленов Н.В., Терешонок М.В., Чиров Д.С. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физика, Астрономия. 2015. № 6, С. 19–27.
25. Swami, A. & Sadler, B.M. (2000). Hierarchical Digital Modulation Classification Using Cumulants. IEEE Transactions on Communications. Vol. 48. No 3. Pp. 416–429.
26. Zhechen, Z. & Nandi, A.K. (2005). Automatic Modulation Classification. Principles: Algorithms and Applications. Brunei Univ. London. 194 p.
27. Dobre, A., Abdi, A., Bar-Ness, Y. & Su, W. Survey of Automatic Modulation Classification Techniques: Classical Approaches and New Trends. IET Communications. May, 2007.
28. Hatzichristos, G. (2001). Classification of Digital Modulation Types in Multipath Environments. Electrical Engineer thesis. Naval Postgraduate School.
29. Azzouz, E.E. & Nandi, A.K. (1996). Automatic Modulation Recognition of Communication Signals. Kluwer Academic Publishers.
30. Hong, L. & Ho, K.C. (1999). Identification of digital modulation types using wavelet transform. IEEE MILCOM.
31. Chui, C.K. (1992). An Introduction to Wavelets. Academic Press, New York.
32. Meyer, Y. (1992). Wavelets and Operators. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
33. Meyer, Y. & Roques, S. (editors). (1993). Progress in wavelet analysis and applications. In Proc. of Int. Conf. «Wavelets and Applications». Frontieres, Toulouse. France.
34. Daubechies, I. (1992). Ten Lectures on Wavelets. CBMS-NSR Series in Appl. Math. SIAM.
35. Frazier, M.W., Heil, C., Feichtinger, H.G., Coifman, R.R., Jawerth, B. et al. (1994). Wavelets: Mathematics and Applications. CRC Press.
36. Holschneider, M. (1995). Wavelets: An Analysis Tool. Oxford Mathematical Monographs, Clarendon Press, Oxford.
37. Hernandez, E. & Weis, G.A. (1996). A First Course of Wavelets. CRC Press.
38. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлет-преобразования. СПб.: ВУС. 1999. 208 с.
39. Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразования. Новосибирск: НГТУ. 2003. 104 с.
40. Hlawatsch, F. & Auger, F. (2008). Time-Frequency Analysis: Concepts and Methods. ISTE Ltd and John Wiley and Sons, Inc.
41. Mallat, S. (2009). A Wavelet Tour of Signal Processing. The Sparse Way. 3^d ed. Academic Press.

42. Heil, C., Walnut, D.F. & Daubechies, I. (2009). *Fundamental Papers in Wavelet Theory*. Princeton Univ. Press.
43. Debnath, L. (2011). *Wavelet Transforms and Their Applications*. Birkhauser.
44. Resnikoff, H.L. & Wells, R.O. (2012). *Wavelet Analysis*. Springer.
45. Walnut, D.F. (2013). *An Introduction to Wavelet Analysis*. Birkhauser.
46. Sundararajan, D. (2015). *Discrete Wavelet Transform. A Signal Processing Approach*. Wiley.
47. Mehra, M. (2018). *Wavelets Theory and its Applications*. Springer.

REFERENCES

1. Tu, J. & Gonzalez, R. (1977). *Pattern Recognition Principles*. M.: Vysshaia shkola. 222 p.
2. Gorelik, A.L. & Skripnik, V.A. (1984). *Recognition Methods*. M.: Vysshaia shkola. 208 p.
3. Watanabe, S. (2014). *Methodologies of Pattern Recognition*. Academic Press.
4. Markov, A.B. (2011). *Pattern Recognition: Introduction into Statistical Learning Methods*. M.: Editorial URSS.
5. Zagoruyko, N.G. (1972). *Recognition Methods and Their Application*. M.: Sov. Radio. 208 p.
6. Bezruk, V.M. & Pevtsov, G.V. (2007). *Fundamentals of Developing Signal Recognition Systems for Automatic Radiofrequency Monitoring*. Kharkiv: Kollegium. 430 p.
7. Terentiev, A.V. & Korotkov, V.F. (2021). *Electronic Intelligence: Theory and Practice of Radar Signal Processing*. StPb.: Mediapapir. 346 p.
8. Rembovskiy, A.M. (2012). *Radiofrequency Monitoring: Problems, Methods and Means*; ed. M.: Hot Line – Telecom. 640 p.
9. Radzievskiy, V.G. (2004). *Fundamentals of Electronic Intelligence*. M.: Radiotekhnika. 432 p.
10. Slobodyanyuk, P.V., Blagodarny, V.G. & Stupak, V.S. (2008). *Radiofrequency Monitoring Handbook*. Nizhin: LLC Vyd-vo «Aspect-Polygraph».
11. Smirnov, Yu.A. (2001). *Electronic Intelligence*. M.: Voenizdat.
12. Wiley, R.G. *ELINT: The Interception and Analysis of Radar Signals*. Artech House. 2006.
13. Poisel, R.A. *Electronic Warfare Receivers and Receiving Systems*. Artech House. 2014. 832 p.
14. Kupriyanov, A.I., Petrenko, P.B. & Sychev, M.P. (2010). *Fundamentals of Electronic Intelligence*. M.: MG TU.
15. Marple, S.L. (1987). *Digital Spectral Analysis with Applications*. Prentice Hall, Englewoods Cliffs, New Jersey.
16. Kay, S.M. (1988). *Modern Spectral Estimation, Theory and Application*. Prentice Hall, Englewoods Cliffs, New Jersey.
17. Haykin, S. *Advances in Spectrum Analysis and Array Processing*. Vol. 1, 2, 3. Prentice Hall, Englewoods Cliffs, New Jersey, 1991, 1995.
18. Naidu, P.S. (1996). *Modern Spectrum Analysis of Time Series*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
19. Stoica, P. & Moses, R. (2005). *Spectral Analysis of Signals*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
20. Weber, C., Peter, M. & Felhauer, T. (2015). Automatic modulation classification technique for radiomonitoring. *Electronics Letters*. Vol. 51. №. 10. Pp. 794–796.
21. Mobasseri, B.G. (2000). Digital modulation classification using constellation shape. *Signal processing*. No 80. Pp. 251–277.
22. Adjemov, S.S., Stogov, A.A., Tereshonok, M.V. et al. (2011). Digital modulation signal recognition algorithm based on Kohonen Self-Organizing Maps. *T-Comm – Telecommunications and Transport*. No 11. Pp. 4–6.
23. Kohonen, T. (2001). *Self-Organizing Maps*. Springer. 502 p.
24. Adjemov, S.S., Klenov, N.V., Tereshonok, M.V. & Chirov, D.S. (2015). Digital modulation signal recognition algorithm for cognitive radio-systems. *Moscow Univ. Vestnik. Seria 3. Physics, Astronomy*. № 6. Pp. 19–27.
25. Swami, A. & Sadler, B.M. (2000). Hierarchical Digital Modulation Classification Using Cumulants. *IEEE Transactions on Communications*. Vol. 48. No 3. Pp. 416–429.
26. Zhechen, Z. & Nandi, A.K. (2005). *Automatic Modulation Classification. Principles: Algorithms and Applications*. Brunei Univ. London. 194 p.
27. Dobre, A., Abdi, A., Bar-Ness, Y. & Su, W. Survey of Automatic Modulation Classification Techniques: Classical Approaches and New Trends. *IET Communications*. May, 2007.
28. Hatzichristos, G. (2001). *Classification of Digital Modulation Types in Multipath Environments*. Electrical Engineer thesis. Naval Postgraduate School.
29. Azzouz, E.E. & Nandi, A.K. (1996). *Automatic Modulation Recognition of Communication Signals*. Kluwer Academic Publishers.
30. Hong, L. & Ho, K.C. (1999). Identification of digital modulation types using wavelet transform. *IEEE MILCOM*.
31. Chui, C.K. (1992). *An Introduction to Wavelets*. Academic Press, New York.
32. Meyer, Y. (1992). *Wavelets and Operators*. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
33. Meyer, Y. & Roques, S. (editors). (1993). *Progress in wavelet analysis and applications*. In Proc. of Int. Conf. «Wavelets and Applications». Frontières, Toulouse. France.
34. Daubechies, I. (1992). *Ten Lectures on Wavelets*. CBMS-NSR Series in Appl. Math. SIAM.
35. Frazier, M.W., Heil, C., Feichtinger, H.G., Coifman, R.R., Jawerth, B. et al. (1994). *Wavelets: Mathematics and Applications*. CRC Press.
36. Holschneider, M. (1995). *Wavelets: An Analysis Tool*. Oxford Mathematical Monographs, Clarendon Press, Oxford.
37. Hernandez, E. & Weis, G.A. (1996). *A First Course of Wavelets*. CRC Press.
38. Vorobiev, V.I. & Gribunin, V.G. (1999). *Wavelet-Transform: Theory and Practice*. SPb.: Izd-vo VUZ. 208 p.
39. Yakovlev, A.N. (2003). *Introduction into Wavelet Transform*. Novosibirsk: NGTU. 104 p.
40. Hlawatsch, F. & Auger, F. (2008). *Time-Frequency Analysis: Concepts and Methods*. ISTE Ltd and John Wiley and Sons, Inc.
41. Mallat, S. (2009). *A Wavelet Tour of Signal Processing. The Sparse Way*. 3rd ed. Academic Press.
42. Heil, C., Walnut, D.F. & Daubechies, I. (2009). *Fundamental Papers in Wavelet Theory*. Princeton Univ. Press.
43. Debnath, L. (2011). *Wavelet Transforms and Their Applications*. Birkhauser.

44. Resnikoff, H.L. & Wells, R.O. (2012). Wavelet Analysis. Springer.
45. Walnut, D.F. (2013). An Introduction to Wavelet Analysis. Birkhauser.
46. Sundararajan, D. (2015). Discrete Wavelet Transform. A Signal Processing Approach. Wiley.
47. Mehra, M. (2018). Wavelets Theory and its Applications. Springer.

**Kozlov V.H., Krutyh A.O., Popov A.O.,
Tverdochlebov V.V.**

RADIOFREQUENCY SIGNAL DIGITAL MODULATION RECOGNITION METHOD BASED ON WAVELET-ANALYSIS

It is stipulated that signal receiving environment surrounding the systems of electronic intelligence, electronic support measures and radiofrequency monitoring are characterized by severe prior uncertainty conditions with respect to both parameters and properties of the signals received from emission sources and parameters and properties of interference signals. Known methods of digital modulation recognition are considered in brief, so that both their advantages and disadvantages are discussed. We discuss automatic modulation classification technique for radiomonitoring; digital modulation classification using constellation shape; digital modulation signal recognition algorithm based on Kohonen Self-Organizing Maps; digital modulation classification using cumulants (semi-invariants). We consider recognition of digital modulation types using wavelet transform. It is shown that methods of signal digital modulation recognition based on wavelet-analysis of the signals does not require for its realization huge quantity of prior information concerning time-frequency characteristics of the signals that are subject to analyze. We discuss the results of exploiting the proposed signal recognition method that are obtained by simulation. We show main criteria of signal recognition that are used in signal processing algorithm realizing this method. We make a conclusion that as a universal, multi-purpose signal recognition method for its further realization in perspective state-of-the-art electronic intelligence, electronic support measures and radiofrequency monitoring systems one should consider the proposed method based on wavelet-analysis.

Keywords: signal recognition, digital modulation, quadrature components of a signal, semi-invariant, wavelet-analysis, wavelet-transform, prior uncertainty, electronic intelligence, radiofrequency monitoring.

Відомості про авторів:

Козлов Вадим Геннадійович

кандидат технічних наук, докторант науково-організаційного відділу Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<http://orcid.org/0000-0002-7708-6143>

Крутих Андрій Олексійович

старший науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0009-0001-9766-0683>

Попов Андрій Олексійович

кандидат технічних наук, доцент
провідний науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-8560-617X>

Твердохлібов Володимир Віталійович

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
начальник науково-дослідного управління
Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-6802-9796>

Information about the authors:

Kozlov Vadym

Candidate of Technical Sciences
Scientific Research Management of Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0002-7708-6143>

Krutyh Andriy

Senior Researcher
Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0001-9766-0683>

Popov Andrey

Candidate of Technical Sciences
Leading Researcher
Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8560-617X>

Tverdochlebov Vladimir

Candidate of Technical Sciences
Senior Researcher
Chief of Scientific Research Management of Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6802-9796>

Стаття надійшла до редколегії 19.06.2024.