

MEANS OF TELECOMMUNICATIONS ЗАСОБИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

УДК 681.3.06:519.248.681

DOI:10.30837/rt.2024.3.218.09

І.Є. АНТИПОВ, д.-р техн. наук, О.М. НІКІТІН

ВИЯВЛЕННЯ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ ЗА ОСОБЛИВОСТЯМИ ЇХ СПЕКТРА

Стаття присвячена покращенню енергетичного виявлення широкосмугових сигналів. Запропоновано новий спосіб виявлення, заснований на симетрії спектра ШСС.

Актуальність та постановка задачі

Широкосмугові сигнали знаходять широке застосування в умовах завад у різних системах зв'язку, включаючи Code Division Multiple Access, радіонавігацію та радіолокацію. Вони також використовуються для прихованої передачі інформації та керуючих сигналів, що робить їх важливими у сфері оборони, безпеки та захисту інформації. Тому виявлення цих сигналів є важливим завданням, важливим є не тільки сам факт виявлення, але й його швидкість.

Для виявлення слабких сигналів і сигналів з розподіленим спектром застосовується енергетичне виявлення. Принцип роботи енергетичного виявлення полягає в накопиченні енергії в окремих частотних смугах в інтеграторі. Цей метод вважається класичним, з ним порівнюють за ефективністю та швидкодією всі нові запропоновані методи. Безперечними перевагами енергетичного виявлення є простота реалізації та універсальність. Але цей метод не дозволяє визначити параметри сигналу, крім того, чим слабкіший сигнал, тим більше часу потрібно для його виявлення. Незважаючи на можливі обмеження по точності, енергетичний метод забезпечує баланс між продуктивністю та достатньою ефективністю в більшості сценаріїв моделювання.

Як альтернатива енергетичному виявленню у роботах [2 – 3] пропонуються інші методи виявлення ШСС. Коротко розглянемо їх.

Так, у роботі [2] розглянуто алгоритм виявлення шумоподібних сигналів на основі інваріантного і нелінійного перетворення порядкових статистик спектральних відліків адитивної суміші сигналу і шуму. В процесі аналізу відбувається дискретизація вхідної суміші, обчислення базового перетворення Фур'є, а потім послідовність нелінійних перетворень, що дозволяють виділити «викиди» у спектрі. Як стверджують автори [2], «введення нелінійного перетворення над спектральними відліками дозволило забезпечити компактність і сепарабельність сигнальних відліків відносно шумових (тобто максимізувати відстань між ними). Мірою розрізнення є різниця середніх значень сигнальних і шумових порядкових статистик». Такий метод дозволяє скоротити час, витрачений на виявлення джерела радіовипромінювання у порівнянні з енергетичним виявленням.

У роботі [3] запропоновано метод цифрового спектрального аналізу ШСС, який заснований на розділенні масиву досліджуваного сигналу на ряд підпослідовностей. Ці підпослідовності піддаються БПФ. Згідно з [3] «аналіз ефективності запропонованого методу підтвердив, що вдається підвищити продуктивність спектрального аналізу ШСС у 2–4,6 рази, при кількості відліків 2^{38} », зі зменшенням кількості відліків збільшується продуктивність, «а саме, дорівнює 2–3,4 рази для кількості відліків 2^{20} ».

Кожен з розглянутих методів у певних випадках має переваги перед енергетичним виявленням за швидкодією та ефективністю, але має і обмеження по сферах застосування. Також можна сказати, що виявлення ШСС – важливе наукове завдання.

У роботі пропонується розглянути метод виявлення ШСС, заснований на особливостях їх спектрів, який дозволяє не тільки його виявити, але й точно визначити його центральну частоту.

Суть методу

Розглянемо енергетичний спектр фазоманіпульованого ШСС. Згідно з [1] спектральна густина потужності модулюючої послідовності представляє собою вираз

$$|S_{PM}(\omega)| = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n a_i a_k \cos((i-k)\omega t_0)}. \quad (1)$$

Спектр одиночного імпульсу, з набору яких складається модулююча послідовність, має вигляд

$$S_1(\omega) = A_0 \frac{\sin(0,5\omega t_0)}{0,5\omega}. \quad (2)$$

При перенесенні сигналу на частоту, ω_0 спектр буде представляти собою досить складну функцію частоти, яку можна записати у вигляді

$$|S_{PM}(\omega)| = A_0 \left| \frac{\sin(0,5(\omega - \omega_0)t_0)}{0,5(\omega - \omega_0)} \right| \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n a_i a_k \cos[(i-k)(\omega - \omega_0)t_0]} \quad (3)$$

Як приклад графік для 11-елементної послідовності показаний на рис. 1.

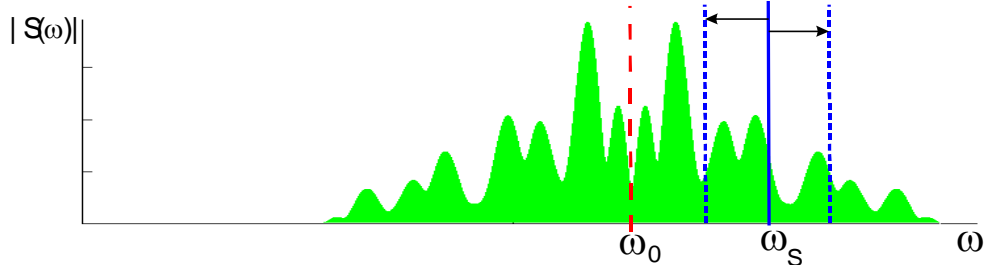


Рис. 1. Представлення енергетичного спектра фазоманіпульованого (ФМ) ШСС

Звернемо увагу на особливості даного спектра. Він являє собою періодичну згаслою функцію частоти. Чим більше база сигналу, тим більш розподіленим виявляється спектр. Але ми звертаємо увагу на його симетрію відносно середньої частоти. Ця симетрія може бути записана як:

$$S_{PM}(\omega_0 - \Delta\omega) = S_{PM}(\omega_0 + \Delta\omega), \quad (4)$$

де $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ – різниця між поточною частотою ω та середньою частотою спектра ω_0 . Симетрія відрізняє ФМ ШСС сигнал від шуму та більшості перешкод. Підставивши різницю $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ в (4), можна отримати

$$S_{PM}(\omega) = S_{PM}(2\omega_0 - \omega). \quad (5)$$

Але через шум та перешкоди ні центральна частота, ні симетрія, навіть сам ФМ ШСС, можуть бути візуально не помітні на екрані спектроаналізатора. Розглянемо суму добутоків лівої та правої частин спектра відносно деякої випадково обраної частоти ω_S :

$$\Pi(\omega_S) = \int_{-\infty}^{\infty} |S(\omega_S + \omega)| |S(\omega_S - \omega)| d\omega. \quad (6)$$

Виконавши перетворення, аналогічне (4), (5), отримаємо

$$\Pi(\omega_S) = \int_{-\infty}^{\infty} |S(\omega)| |S(2\omega_S - \omega)| d\omega. \quad (7)$$

Тепер врахуємо симетрію. Підставимо (5) в перший добуток підінтегрального виразу (7). Тоді

$$\Pi(\omega_S) = \int_{-\infty}^{\infty} |S(2\omega_0 - \omega)| |S(2\omega_S - \omega)| d\omega. \quad (8)$$

Для обчислення екстремуму виразу (7) потрібно взяти його похідну за ω_S . Навіть у загальному випадку обчислення такого виразу є досить складною задачею, тому ми скористаємося аналогією. Відомо, що вираз для кореляційної функції

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)f(x-\tau)dx, \quad (9)$$

досягає максимуму, коли $x = x - \tau$, тобто коли $\tau = 0$. Виходячи з цього, припустимо, що і вираз (7) досягає максимуму коли $\omega_0 = \omega_S$. Тобто, функція (6) досягає максимуму тоді, коли перемноження спектральних відліків відбувається симетрично відносно центральної частоти спектра. Далі можна зробити припущення, що властивість максимуму $\Pi(\omega_S)$ зберігається і при додаванні до шумоподібного ФМ сигналу білого Гаусівського шуму, оскільки він має рівномірну спектральну щільність. Після чого було зроблено друге припущення – дана властивість дозволить виявляти ШСС на фоні шуму, причому не тільки виявляти, але й одразу ж визначати його центральну частоту.

Отже, був запропонований метод виявлення ШСС, що базується на симетрії його спектра, і полягає в тому, що необхідно перебрати всі значення f_S в інтересуючій полосі частот і знайти максимум функції (1). Однак залишається певне обурення, що вплив шуму може "розмити" максимум цієї функції, роблячи його менш помітним.

Алгоритм практичної реалізації

Розглянемо, як має виглядати алгоритм, що реалізує запропонований метод.

1. Виконання БПФ для вхідного сигналу. Формування масиву $S[\omega]$.
2. Вибір початкової та кінцевої частот $\omega_{\min} + d\omega$ та $\omega_{\max} - d\omega$, у межах яких здійснюватиметься пошук, а також крок частоти $d\omega$ (рис. 2).
3. Розділення масиву $S[\omega]$ на праву та ліву частини відносно частоти ω_{\min} (рис. 3).
4. Знаходження суми добутоків лівої та правої частин. Запис отриманого результату в масив $\Pi[\omega]$ (рис. 4).
5. Повторення дій п. 3 та 4 над масивом $S[\omega]$ з кроком $d\omega$ до частоти ω_{\max} .
6. Вибір максимального значення масиву $\Pi[\omega]$ (рис. 5).
7. Визначення відповідної йому частоти ω_0 .

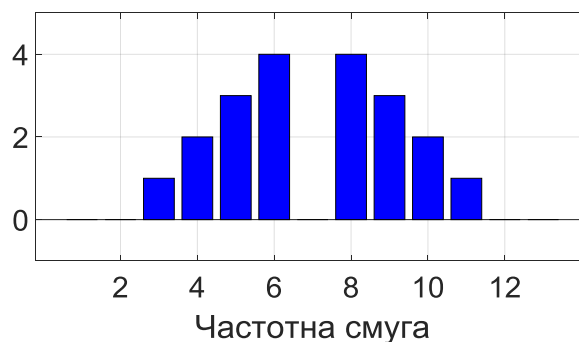


Рис. 2. Представлення масиву $S[\omega]$

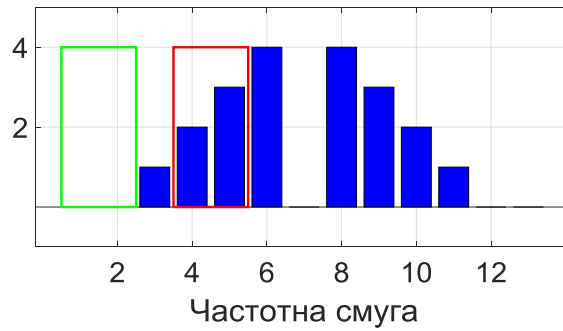


Рис. 3. Сумування масиву $S[\omega]$

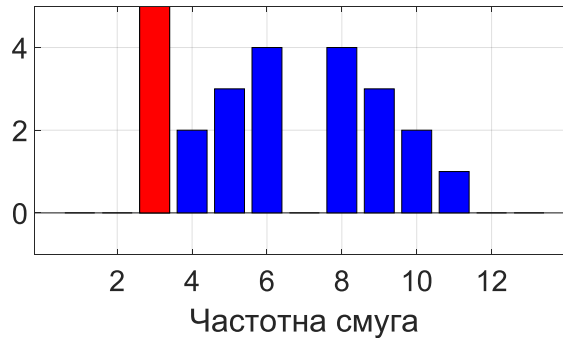


Рис. 4. Занесення нових даних до масиву $\Pi[\omega]$ (червона лінія)

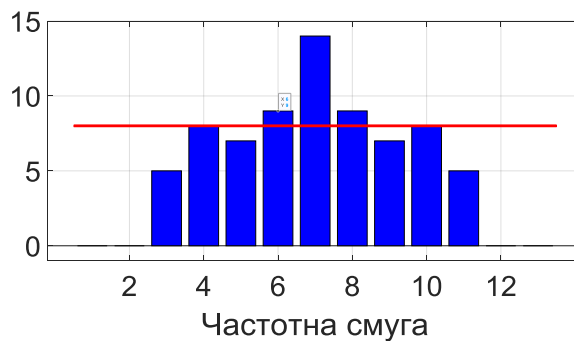


Рис. 5. Заповнення масиву $\Pi[\omega]$, та вибір максимального значення (червона лінія – поріг виявлення)

Моделювання

Для перевірки реалізованості і практичної ефективності запропонованого методу та його алгоритму була розроблена математична модель, що дозволяє формувати ФМ ШСС з різною базою, змішувати його з шумом у заданому співвідношенні та проводити обчислення відповідно до (1). Модель була реалізована у вигляді програми в середовищі MatLab. В моделі було створено дві складові: формування суміші та її подальший аналіз.

1. Формування суміші сигналу та шуму, до складу якої входять: джерело інформації, даний сигнал постійно змінюється після кожного аналізу суміші, для відтворення реальних умов передачі інформації (рис. 6), кодування сигналу та подальша фазова модуляція (рис. 7, де показана лише частина сигналу) і суміш отриманого сигналу з шумом (рис. 8).

2. Аналіз отриманої суміші, яка включала смуговий фільтр (рис. 9), квадратурний детектор (рис. 10), інтегратор (рис. 11).

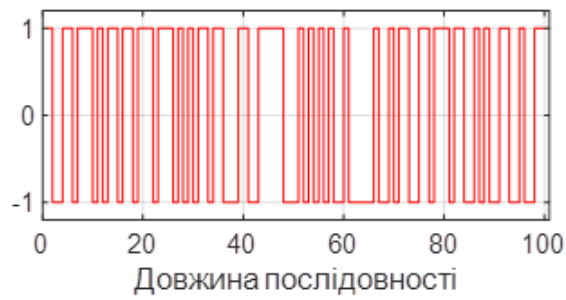


Рис. 6. Закодована послідовність

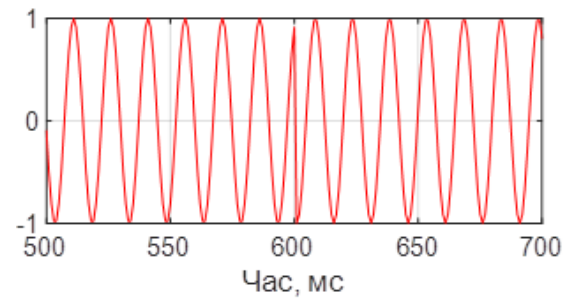


Рис. 7. Фазова модуляція

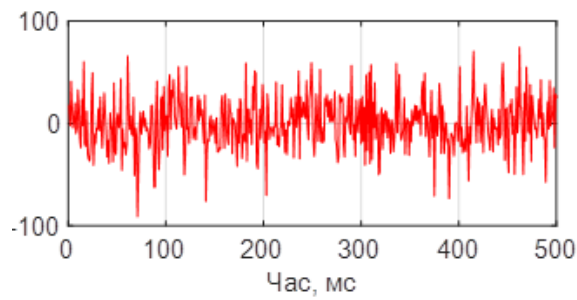


Рис. 8. Суміш корисного сигналу і шуму

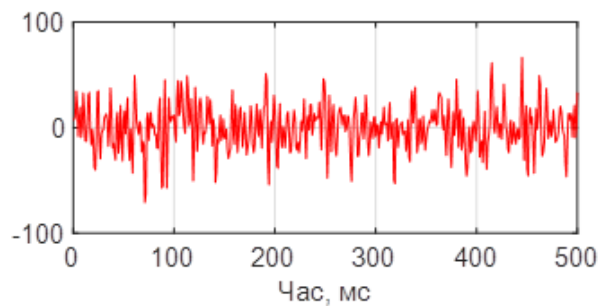


Рис. 9. Реалізація полосового фільтру

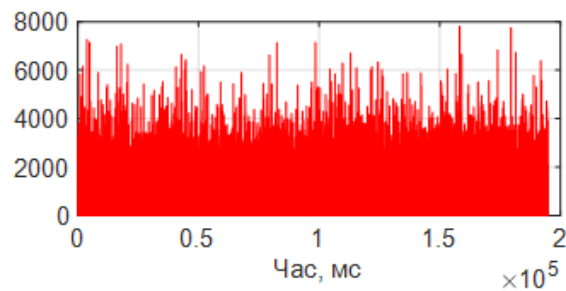


Рис. 10. Реалізація квадратурного детектору

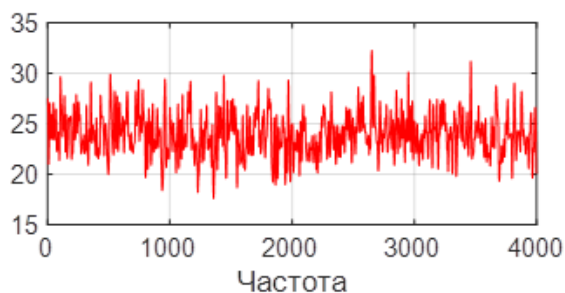


Рис. 11. Реалізація інтегрування за новим методом

Моделювання було виконано для постійної модулюючої послідовності, яка забезпечувала базу 13. При цьому інформаційний сигнал неперервно змінювався, що забезпечувало природню динаміку спектра. Також моделювалося різне співвідношення сигнал/шум. Для оцінки ефективності запропонованого методу моделювання було також виконано для традиційного енергетичного виявлення. Результати моделювання наведено на рис. 12 – 15. Синім кольором показано результати енергетичного накопичення, червоним – запропонований метод.

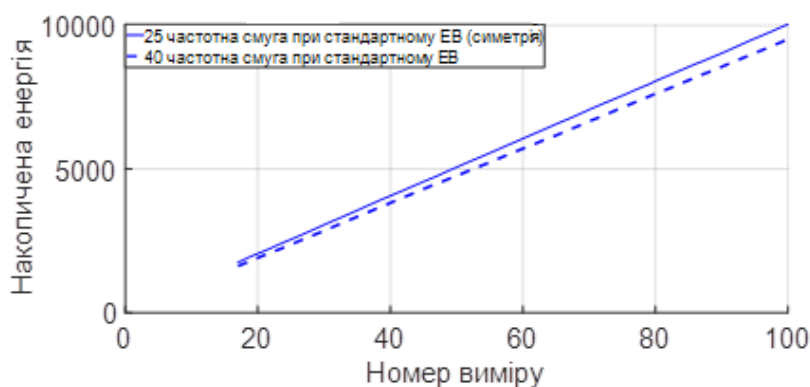


Рис. 12. Результати вимірів за стандартним енергетичному накопиченні при співвідношенням С/Ш 0.4 (суцільна лінія частотна смуга із корисним сигналом, пунктирна із шумом)

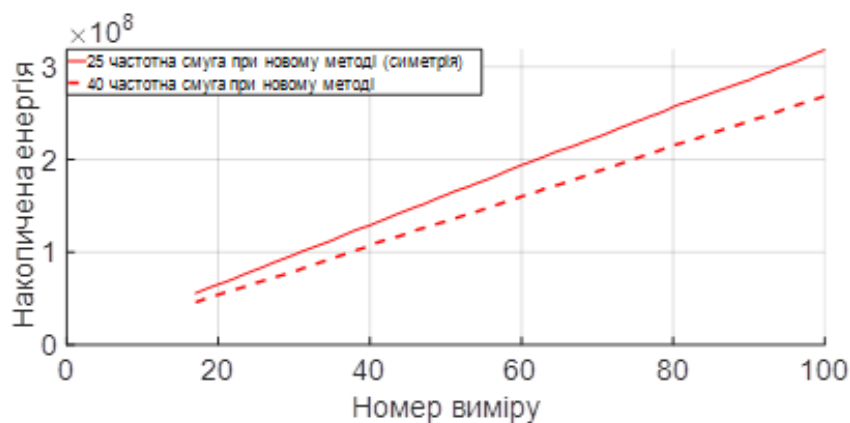


Рис. 13. Результати вимірів при новому методі за співвідношенням С/Ш 0.4 (суцільна лінія частотна смуга із корисним сигналом, пунктирна із шумом)

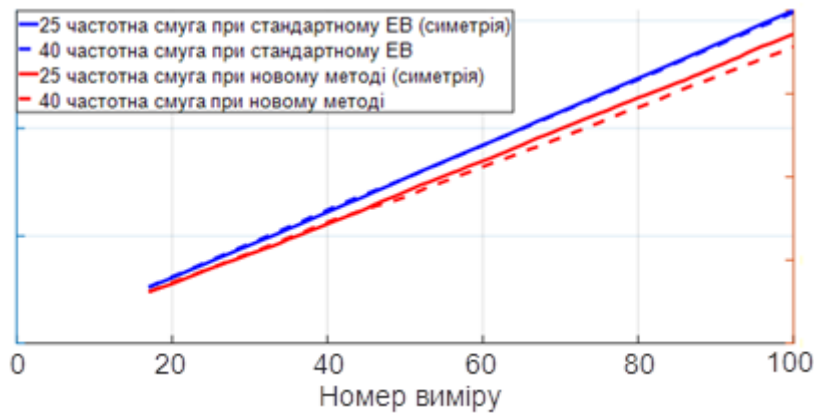


Рис. 14. Порівняння результатів обох методів (синя лінія – стандартне енергетичне накопичення, червона новий метод) при співвідношенні C/N 0.2

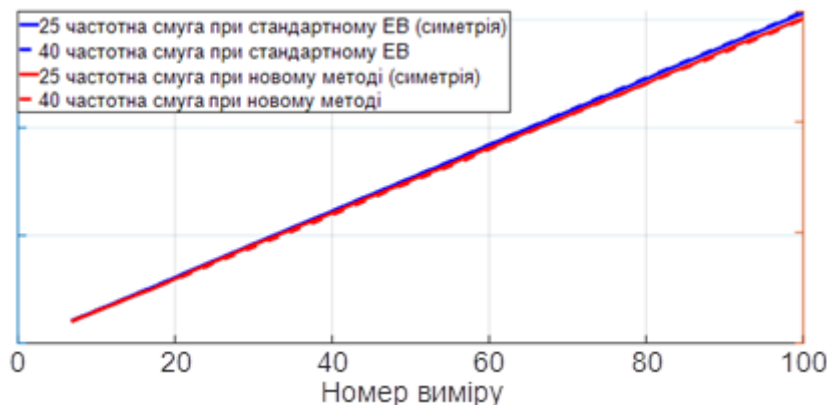


Рис. 15. Порівняння результатів обох методів (синя лінія – стандартне енергетичне накопичення, червона – новий метод) при співвідношенні C/N 0.2

Пунктирні лінії відповідають полосам частот, де присутній виключно шум, а суцільна – полосам із ШСС. На рис. 12 представлено результати вимірювання стандартного методу, а на рис. 13 – результати нового методу. З даних рисунків видно, що новий метод починає виділяти корисний сигнал з шумом сильніше порівняно зі стандартним методом. Як видно на рис. 14, метод, заснований на симетрії спектра, раніше починає виділяти ШСС з шумом (47 вимірювань) порівняно з енергетичним виявленням (65 вимірювань). Таким чином, ефективність запропонованого методу на 38,3 % вище, ніж просте енергетичне накопичення. На рис. 15 обидва методи вже не можуть виділити корисний сигнал з шумом після 250 вимірювань (різниця між шумом і корисним сигналом мінімальні), проте варто зауважити, що новий метод більш стійкий до шуму порівняно зі стандартним методом. При стандартному методі корисний сигнал втрачається в шумі після 100 вимірювань, у той час як новий метод все ще намагається виділити корисний сигнал.

Висновки

Отже, у цій роботі:

- розроблено новий метод виявлення ФМ ШСС, заснований на симетрії його спектра, що також дозволяє визначати його центральну частоту;
- запропоновано алгоритм, що реалізує зазначений метод, на основі якого може бути створена комп'ютерна програма;
- розроблено модель прийому та обробки ФМ ШСС в умовах шуму, яка дозволяє порівняти класичний метод енергетичного виявлення з запропонованим методом;

- результати моделювання показали, що запропонований метод швидше виявляє сигнал та може виявляти сигнал при більш тривалих накопиченнях порівняно зі стандартним енергетичним накопиченням;

- під час моделювання було виявлено, що цей метод більш чутливий до перших 100 – 120 вимірювань і може знадобитися до 8 – 15 вимірювань для виявлення сигналу у цей період вимірювань.

Список літератури:

1. Максименко Г. Алгоритм виявлення шумоподібних сигналів, сформованих на основі псевдовипадкових послідовностей // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. 2000. С. 107–113.
2. Бортник Г.Г., Васильківський М.В., Коваленко А.В. Цифровий метод спектрального аналізу широко-смугових сигналів // Вісник Хмельницького нац. ун-ту. 2019. Т. 273, №3. С. 92–96.
3. Стеклов В.К., Беркман Л.Н. Теорія електричного зв'язку // Техніка. 2006. С. 552.
4. Amos G., Matlab an introduction with Applications fourth edition // United States, 2010. 430 p.
5. Дробик О.В., Кідалов В.В., Коваль В.В., Костік Б.Я. та інші. Цифрова обробка аудіо- та відеоінформації у мультимедійних системах. Київ : Наук. думка, 2008. 144 с.
6. The MathWorks, Inc. Matlab App Building // United States, release 2023b, 2023. 512 p.
7. The MathWorks, Inc. Matlab Progaming Fundamentals // United States, release 2022b, 2022. 1560 p.
8. Плющ О.Г., Савченко А.С. Дослідження використання широкосмугових сигналів для покращення характеристик адаптивних антенних решіток при багатопроменевому розповсюдженні // Наукоємні технології. 2022. Т. 53, №1. С. 31–40.
9. Слободянюк В.В. Метод підвищення роздільної здатності широкосмугових сигналів по частоті і доплера на фоні адитивного шуму з невідомою щільністю розподілу у імовірностей // Системи обробки інформації. 2023. Вип. 1, №172. С. 83–91.
10. Слободян М.О., Таранчук А.А., Гавронський В.Є. Генерування широкосмугових хаотичних сигналів для прихованої передачі інформації в телекомунікаційних системах // Вісник Хмельницького нац. ун-ту. 2020. Т. 1, № 4. С. 192–197.
11. Палівода В.С., Хоменко П.В., Березанський Д.О. Перспективи застосування радіостанцій з широкосмуговою адаптивною мережевою формою сигналу в збройних силах України // Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення, застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку, автоматизації та кібербезпеки в операції об'єднаних сил. 2020. С. 217–218.
12. Кувшинов О.В., Шишацький А.В., Лютов В.В., Жук О.Г. Аналіз шляхів підвищення скритності широкосмугових систем військового радіозв'язку // Зб. наук. пр. Харк. нац. ун-ту Повітряних Сил. 2017. Т. 50, №1. С. 24–28.
13. Певцов Г.В., Яцуценко А.Я., Трофименко Ю.В., Карлов Д.В., Остапова А.М. Енергетичне виявлення радіосигналів в умовах радіоперешкод // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2011. Т. 5, №1. С. 73–77.

Надійшла до редколегії 11.09.2024

Відомості про авторів:

Антіпов Іван Євгенійович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри КРiCTЗi, Україна; email: ivan.antipov@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9754-4412>

Нікітін Олександр Миколайович – Харківський національний університет радіоелектроніки, магістр кафедри КРiCTЗi, Україна; email: oleksandr.nikitin@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9332-4414>