

## ЗАСТОСУВАННЯ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЦИФРОВИХ СИГНАЛІВ

Розглянута можливість застосування вейвлет-перетворення для проведення спектрального аналізу оцифрованих радіотехнічних сигналів. Показано, що використання вейвлет-спектру дозволяє визначити час початку змін частоти сигналу.

*Ключові слова:* цифровий сигнал, вейвлет-перетворення, радіотехнічний сигнал, спектральний аналіз, частота.

**Постановка проблеми.** Передові, у технологічному відношенні, країни приділяють значну увагу створенню і вдосконаленню засобів радіотехнічного моніторингу (РМ) [1, 2]. При здійсненні РМ застосовуються пасивні засоби виявлення, приймання і аналізу випромінювань. Велика кількість радіоелектронних засобів і систем зумовлює складність їх контролю. Таким чином, гостро постає проблема створення нових засобів РМ, модернізації існуючих та впровадження нових методів аналізу та обробки сигналів.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** На даний час набувають поширення алгоритми обробки сигналів [3–16] з використанням вейвлет-перетворення (ВП). Можливість використання ВП для завдань обробки цифрових сигналів досліджується в таких публікаціях:

у [3, 5] проведено вибір оптимальних базисних функцій для обробки зображень;

у [4, 13, 14] розглянуто основи теорії та приклади використання ВП для обробки цифрових даних;

у [9] розроблено методику стиснення цифрової інформації з використанням ВП;

у [10] приклад застосування ВП для обробки цифрових радіосигналів.

Таким чином, на основі проведеного аналізу останніх публікацій можна зробити висновок, що питання застосування ВП, особливо для аналізу радіотехнічних сигналів, на сьогодні є недостатньо вивчені.

**Формулювання завдання дослідження.** Традиційно основним аналізом сигналів був спектральний аналіз, який проводять за допомогою перетворення Фур'є (ПФ). З практичної точки зору ПФ має деякі обмеження і недоліки. Воно має добру локалізацію у частотній області, але не має локалізації у часовій. Частина недоліків долається за допомогою віконного ПФ, недоліком якого є фіксоване вікно, відповідно, воно має фіксовану роздільну здатність у часі й по частоті для всієї площини перетворення, яке не адаптовано до складних сигналів.

Метою статті є проведення досліджень що до можливості застосування вейвлет-перетворення для аналізу оцифрованих радіотехнічних сигналів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Вейвлет-перетворення – це подання сигналу у вигляді узагальненого ряду чи інтегралу Фур'є по системі базисних функцій, які сконструйовані з материнського (вихідного) вейвлета за рахунок операцій зсуву у часі та змінами часового масштабу. Коефіцієнти ВП можуть бути основою аналізу сигналів і побудови цифрових фільтрів для їх обробки.

Основна ідея ВП сигналу полягає у його розбитті на дві складові: грубу (апроксимуючу) та тонку (деталізуючу) – з наступним їх дробленням. ВП сигналу  $W(a,b)$  проводиться за сімейством функцій  $\psi((t-b)/a)$  які створені з однієї функції  $\psi(t)$  за допомогою переносів  $b$  й розтяжінь  $a$  у часі. Розподіл  $(a,b)$  дає інформацію про відносний вклад компонент різного масштабу у часі і називається спектром коефіцієнтів ВП.

Безперервний сигнал  $S(t)$  визначається дискретною послідовністю своїх миттєвих значень  $i=0, 1, 2, \dots, N$ , які вибираються через інтервали часу  $\Delta t$ . Таким чином, дискретизований з кроком  $\Delta t$  сигнал можна визначити [4]:

$$S(t) = \{S_i\} = \sum_{i=0}^N S(i\Delta t) \cdot \delta(t - i\Delta t),$$

де  $\delta(t)$  – дельта-функція.

На відміну від безперервних вейвлетів, дискретні мають деякі особливості:

у практичних обчисленнях їх конкретна форма не виписується [4], а використовуються тільки значення коефіцієнтів функціональних рівнянь;

вейвлет-базис задається за допомогою ітераційного алгоритму, що, у свою чергу, робить можливими швидкі числові розрахунки локальних характеристик на різних масштабах. ВП для дискретного, заданого через рівні інтервали часу  $\Delta t$  вхідного сигналу може бути розраховане [7] за виразом

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{i=0}^N S(i) \sum_i \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt.$$

Спектр  $W(a,b)$  одномірного сигналу є поверхністю у трьохмірному просторі. Способи візуалізації цієї інформації можуть бути різні [6]. При застосуванні математичного апарату ВП частотна та часова інформація закладена у вейвлет-спектрі, оскільки спектральні компоненти у вейвлетному базисі є функціями двох змінних-масштабу та зсуву (переміщення) [6]. Це означає, що вейвлети дозволяють виявити не тільки частотні особливості будь-якого сигналу, але й визначити час їх появи. Крім того, завдяки масштабуванню, тривалість базисної функції завжди узгоджена з тривалістю сигналу.

З точки зору цифрової обробки сигнал являє собою послідовність вимірів з відповідним кроком. Майже 80% сигналів які використовуються на даний час є складні сигнали з лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ) та кодо-фазовою маніпуляцією (КФМ).

На рис. 1 подано сигнал, який складається з суми двох синусоїд (рис. 1а - подання сигналу в часовій області). При використанні ПФ до сигналу (рис. 1б) чітко виділяються дві частоти, а при використанні ВП (рис. 1в) можна виділити дві структури з різними частотами. Спосіб представлення спектру як на рис. 1в носить назву скейлограма. Значення вейвлет-коефіцієнтів надає інформацію про подібність обраного вейвлета до сигналу на визначеному проміжку часу.

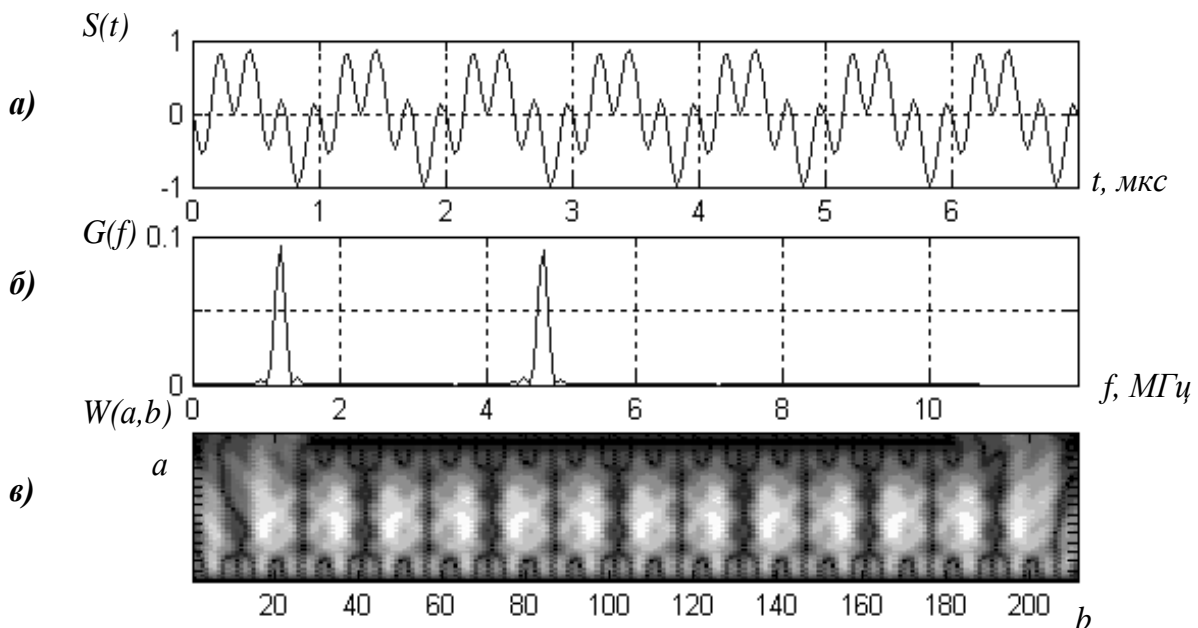


Рис. 1. Цифровий сигнал, який складається з суми двох синусоїд: а – представлення в часовій області; б – представлення в частотній області при використанні перетворення Фур'є; в – представлення за допомогою вейвлет-спектру

На рис. 2а подано сигнал у часовій області зі зміною частоти в ньому. При використанні ПФ (рис. 2б) спектри сигналів не відрізняються від спектрів сигналу на рис. 1б, а при використанні ВП можливо не тільки розрізнити два сигналу, але й визначити час, коли пройшла зміна частоти в сигналі. Максимальне значення вейвлет-коефіцієнтів у кольоровій шкалі визначено білим, мінімальне – чорним. Перші рівні вейвлет-коефіцієнтів надають більш детальну інформацію про час зміни частоти. Визначити частоти в сигналі можливо через перерахунок у час параметру  $\{b\}$ . Цей приклад дозволяє зробити висновок, що у сигналі з частотною маніпуляцією можливо визначити час зміни частоти.

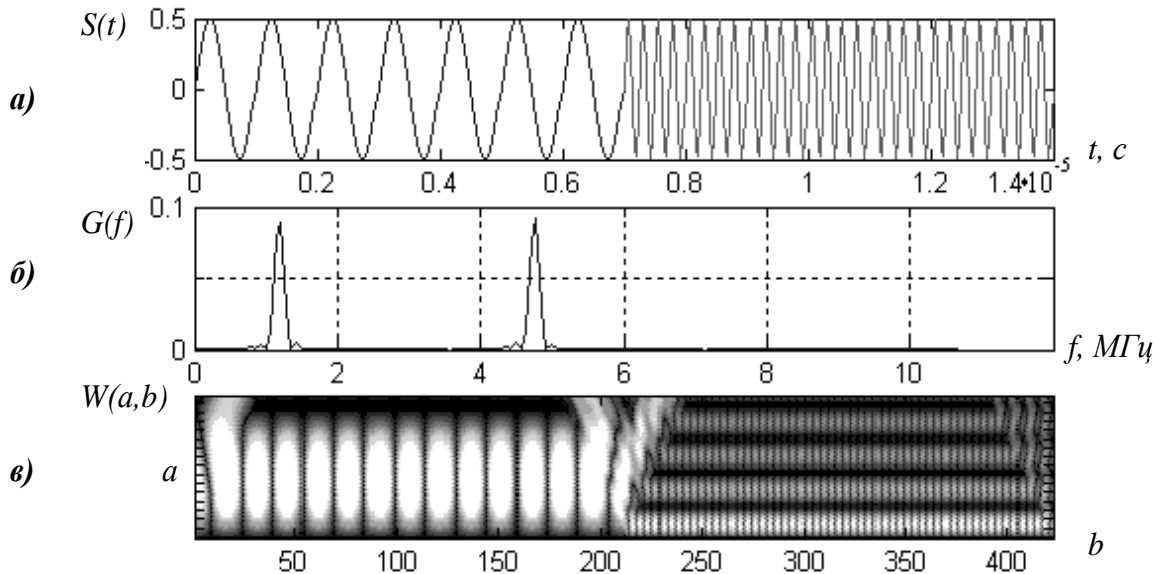


Рис. 2. Цифровий сигнал зі зміною частоти: а – представлення в часовій області; б – представлення в частотній області при використанні перетворення Фур'є; в – представлення за допомогою вейвлет-спектру

На рис. 3 та 4 представлено ЛЧМ сигнали з різною функцією девіації частоти (спадаючою та наростаючою частотою). Їх Фур'є спектри представлено на рис. 3б, 4б. Аналіз цих спектрів показує в якому частотному діапазоні змінюється сигнал.

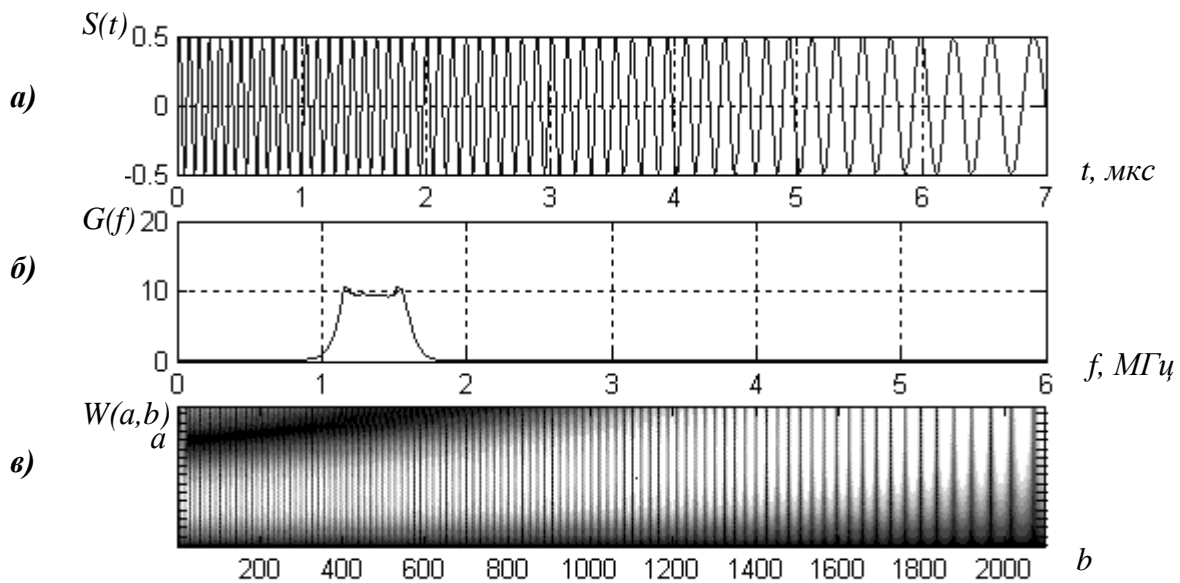


Рис. 3. ЛЧМ сигнал з спадаючою частотою: а – представлення в часовій області; б – представлення в частотній області при використанні перетворення Фур'є; в – представлення за допомогою вейвлет-спектру

Аналіз сигналів показав, що є якісні розбіжності у вейвлет-спектрах різних сигналів. Ці розбіжності зберігаються при зміні основних параметрів сигналів.

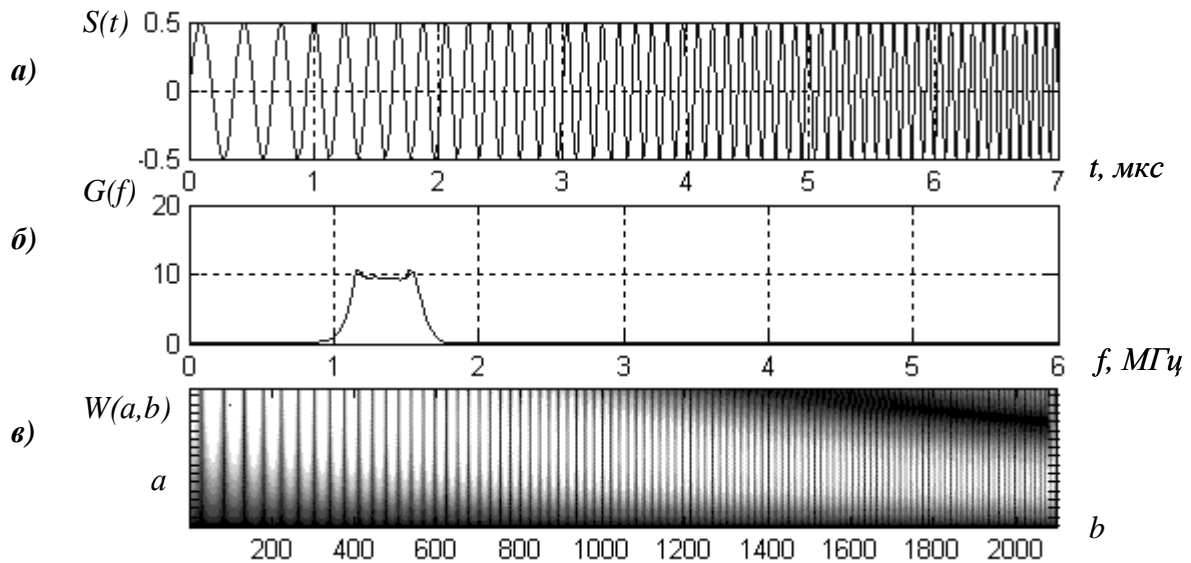


Рис. 4. ЛЧМ сигнал з наростаючою частотою: а – представлення в часовій області; б – представлення в частотній області при використанні перетворення Фур'є; в – представлення за допомогою вейвлет-спектру

На рис. 5а показано КФМ сигнал у часовій області, Фур'є та вейвлет-спектри перетворення подані відповідно на рис. 5б, 5в. Картина вейвлет-коефіцієнтів при зміні параметрів КФМ сигналу є стійкою, як й у ЛЧМ сигналу. Зміна ж закону кодування проявляється у вейвлет-спектрі якісно і чітко, що дає змогу отримати інформацію про сигнал (кількість дискрет, їх тривалість).

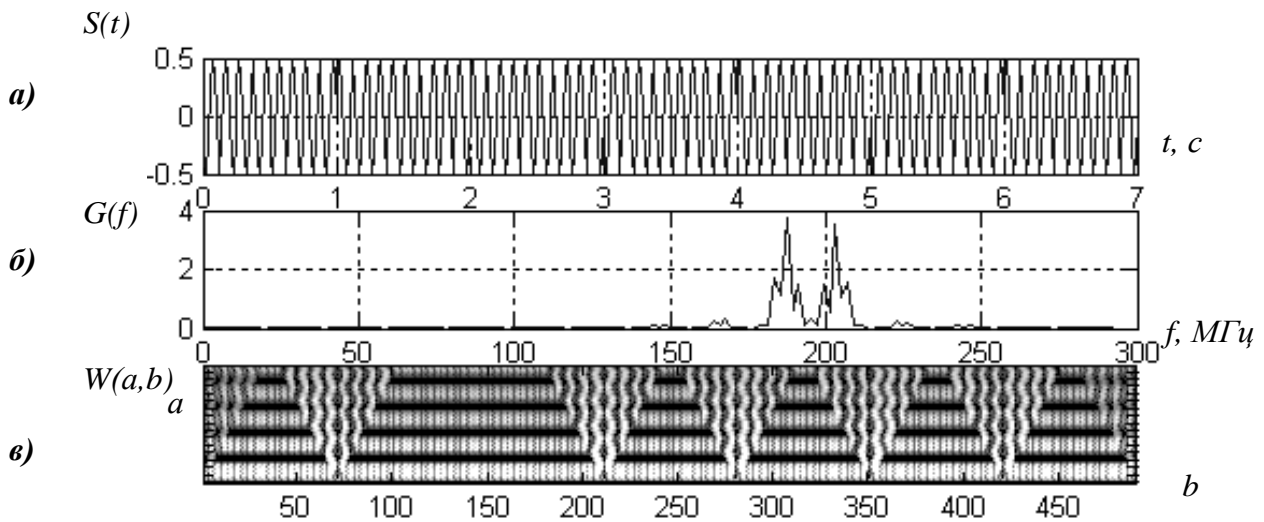


Рис. 5. КФМ сигнал: а – представлення в часовій області; б – представлення в частотній області при використанні перетворення Фур'є; в – представлення за допомогою вейвлет-спектру

Перші рівні вейвлет-спектра дають змогу більш точно визначити час проходження частотних змін сигналу, а останні рівні надають, більш детальну інформацію про подібність дискрет сигналу базовій вейвлет функції.

За допомогою коефіцієнтів ВП можливо визначити закон кодування КФМ сигналу. Аналіз сигналів показав, що вейвлет-спектри цих сигналів мають якісні відмінності, які не

змінюються при зміні параметрів сигналу. Аналіз проводився при використанні вейвлета Добечі.

**Висновки.** Таким чином, наведені приклади визначили відмінність ВП від ПФ та можливість використання першого для аналізу сигналів з різними видами модуляції. Крім того, ВП можна використовувати для класифікації сигналів. Необхідно наголосити на тому, що ВП не замінює апарат спектрального аналізу і найкраща якість розв'язання задач аналізу та класифікації сигналів буде досягнута при їх комплексному застосуванні. Усі розрахунки та моделювання проведено за допомогою універсальної інтегрованої системи комп'ютерної математики MATLAB 7.7. У подальших наукових дослідженнях планується розглянути можливість автоматизації процесу класифікації радіотехнічних сигналів.

### Список використаних джерел

1. Хорошко В. О. Пошук та локалізація радіозакладних пристроїв : навчальний посібник / В. О. Хорошко, О. Д. Азаров, Максименко Г. О., Яремчук Ю. Є ; ВНТУ. – Вінниця, 2007. – 333 с.
2. Бартків Н. І. Методи та локалізація джерел несанкціонованого випромінювання / Н. І. Бартків, І. М. Коротєєв // Захист інформації. – 2009. – № 3. – С. 68–73.
3. Иванов М. А. Применение вейвлет-преобразований в кодировании изображений / М. А. Иванов // Новые информационные технологии в науке и образовании. – 2004. – №24. – С. 157–175.
4. Д'яконов В., Авраменкова І. Обработка сигналов и изображений / В. Д'яконов, І. Авраменкова // Специальный справочник. – Спб.: Питер, 2002. – 608 с.
5. Кобелев В.Ю. Выбор оптимальных вейвлетов для обработки сигналов и изображений / В. Ю.Кобелев, А. В. Ласточкин // Труды 2-й международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применения». – М., 1999 – Т.2. – С. 514 – 518.
6. Яковлев А. Н. Введение в вейвлет-преобразование / А. Н. Яковлев // Учебное пособие. – Новосибирск: изд-во НГТУ, 2003. –104 с.
7. Проценко М. М. Методика вибору вейвлет-функції для обробки цифрових сигналів / М. М. Проценко // Вісник ЖДТУ. – Житомир, ЖДТУ, 2009. – №49. – С.97-100.
8. Проценко М. М. Вейвлет-перетворення та його застосування для обробки сейсмічних даних / М. М. Проценко, М. В. Коваленко // Вісник ЖІТІ.-2003. – №24. – С. 82–86.
9. Проценко М. М. Методика стиснення цифрової інформації за допомогою вейвлет- перетворення / М. М. Проценко, М. В. Коваленко // Збірник наукових праць. – Житомир: ЖВІРЕ, 2003.-Вип.6. – С. 11–17.
10. Проценко М. М. Застосування пакетного вейвлет-перетворення для обробки радіотехнічних сигналів / М. М. Проценко // Збірник наукових праць ЖВІ НАУ. – Житомир, ЖВІ НАУ, 2009. – № 2. – С.183-188.
11. Яковлев А. Н. Основы вейвлет-преобразования сигналов / А. Н. Яковлев // Учебное пособие. – М.: САЙНС – ПРЕСС, 2003. – 80 с.
12. Грабар І. Г. Застосування вейвлет-перетворення функції вібросигналу в технічній діагностиці механізмів з ударними навантаженнями / І. Г. Грабар, В. Ф. Запольский, В. К Захаров., М. Б. Кришевский // Вісник ЖІТІ. –2002. –№23. – С. 16–21.
13. Дремін І. М. Вейвлеты и их использование/ І. М. Дремін, О. В.Иванов, В. А. Нечитайло // УФН №5. – 2001. – С. 465–501.
14. Астафьева Н. В. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения / Н. В. Астафьева // УФН №11. –1996. – С. 1145–1170.
15. Левкович-Маслюк Л. И. Дайджест вейвлет-анализа в двух формулах и 22 рисунках / Л. И. Левкович-Маслюк // КомпьюТерра №8, 2008. – 236 с.
16. Проценко М. М. Вейвлет-перетворення та його застосування для стиснення сейсмічних сигналів / М. М. Проценко // SNTK 2003: Збірник тез. – Макарів – 1, 2003. – С. 26–27.

Надійшла: 25.01.2018

Рецензент: д.т.н. Вишнівський В.В.