УДК 621. 396. 367

Вишнівський В.В., д.т.н. *(Військ. інс.-т Київського націон. унів-ту імені Тараса Шевченка)*

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБРОБКИ СКЛАДНИХ І НЕСТАЦІОНАРНИХ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО МЕТОДУ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

Вишнівський В.В. Підвищення ефективності обробки складних і нестаціонарних сигналів на основі застосування альтернативного методу спектрального аналізу. Розглядаються обмеження класичного спектрального аналізу при обробці сигналів складної структури. Наведено основні положення альтернативного методу, що ґрунтується на використанні математичного апарата вейвлет-перетворень. Пропонується використовувати теорію вейвлетів у системах радіолокації з метою підвищення ефективності обробки сигналів.

Ключові слова: ОБРОБКА СИГНАЛІВ, РАДІОЛОКАЦІЯ, СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ, ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ

Вышневский В.В. Повышение эффективности обработки сложных и нестационарных сигналов на основе применения альтернативного метода спектрального анализа. Рассматриваются ограничения классического спектрального анализа при обработке сигналов сложной структуры. Приведены основные положения альтернативного метода, который основывается на использовании математического аппарата вейвлет-преобразований. Предлагается использовать теорию вейвлетов в системах радиолокации с целью повышения эффективности обработки сигналов.

Ключевые слова: ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ, РАДИОЛОКАЦИЯ, СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ, ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЕ

Vyshnivskyi V.V. The enhancement of efficiencyin the course of compound and nonstationary signals processingbasing on the implementation of an alternative spectral analysis method. Certain limitations of a classical spectral analysis are considered while processing signals of the compound structure. Basic guidelines of an alternative method, which is based on the usage of mathematical tools of wavelet transformations, are represented. The theory of wavelets is proposed to be used while working with radar-location systems with an aim to enhancethe effectiveness of signals processing.

Keywords: SIGNALS PROCESSING, RADAR-LOCATION, SPECTRAL ANALYSIS, WAVELET TRANSFORMATIONS

Вступ. В період після 2000 р. розвиток теорії й технології створення радіолокаційних засобів відмічається широким застосуванням методів спектрального оцінювання. Спектральний аналіз, як один з методів обробки сигналів, представляє математичну основу нових перспективних алгоритмів побудови цифрових систем добування інформації про характеристики цілей.

Методи спектрального оцінювання відрізняються широкою розмаїтістю математичних способів формування спектрального образа прийнятих ехо-сигналів залежно від галузі застосування радіолокаційної системи. Проте в останній час активно розвивається новий напрямок цифрової обробки сигналів – новітня інструментальна технологія застосування вейвлет-аналізу, що є певною альтернативною стосовно класичного спектрального аналізу. Так звані «вейвлети» стали дуже популярною темою багатьох наукових і інженерних дискусій. Вони представляють собою багатобічний інструмент із дуже великим математичним змістом і великими можливостями для застосування.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Інтерес до цієї теми обумовлений широким застосуванням для проведення спектрального аналізу методів перетворення Фур'є, а також їхнє використання в теорії інформації й обробці сигналів будь-якого застосування. Застосування вейвлет-перетворення (ВП) у системах обробки радіолокаційних сигналів дає можливість використовувати потужний математичний апарат методів локалізованого частотно-часового й прсторово-фазового аналізів багатомасштабних процесів.

Класичним методом частотного аналізу сигналів є перетворення Фур'є, суть якого можна виразити наступною формулою:

$$C(w) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} y(t)e^{-jwt}dt. \qquad \textbf{(1)}$$

Результатом перетворення Фур'є являється амплітудно-частотний спектр, по якому можна визначити присутність деякої частоти в досліджуваному сигналі. У випадку, коли не виникає питання про локалізацію часового положення частот, метод Фур'є дає гарні результати. Але при необхідності визначити часовий інтервал присутності частоти доводиться застосовувати інші методи.

Одним з таких методів є узагальнений метод Фур'є (локальне перетворення Фур'є). Цей метод складається з наступних етапів:

1) у досліджуваній функції створюється “вікно” – часовий інтервал, для якого функція $f(x_1)\neq 0$, і $f(x)=0$ для інших значень;

2) для цього “вікна” обчислюється перетворення Фур'є;

3) “вікно” зсувається і для нього також обчислюється перетворення Фур'є.

Пройшовши таким “вікном” уздовж усього сигналу, отримується деяка тривимірна функція, що залежить від положення “вікна” і частоти.

Даний підхід дозволяє визначити факт присутності в сигналі будь-якої частоти, і інтервал її присутності. Це значно розширює можливості методу в порівнянні із класичним перетворенням Фур'є, але існують і певні недоліки. Відповідно до принципу невизначеності Гейзенберга в цьому випадку не можна стверджувати про факт наявності частоти w_0 у сигналі в момент часу t_0. Можна лише визначити, що спектр частот (w_1,w_2) знаходиться в інтервалі (t_1, t_2). Причому розділення по частоті (за часом) залишається постійним незалежно від області частот (часу), у яких проводиться дослідження. Тому, якщо, наприклад, у сигналі істотною являється тільки високочастотна складова, то підвищити розділення можна тільки змінивши параметри методу. В якості методу, що не має подібного роду недоліків, був запропонований апарат вейвлет-аналізу [1].

Із можливих варіантів застосування технології ВП у системах радіолокаційного виявлення можна виділити питання, що пов'язані з підвищенням ефективності систем обробки сигналів в частотній області з явно вираженою нестаціонарністю, а також ехо-сигналів, огинаюча яких описується складною часовою функцією, що містить випадково розташовані локальні максимуми. Практичним прикладом такого виду сигналів є ехо-сигнали парної зосередженої цілі в межах імпульсного об’єму РЛС. Другим прикладом може служити відбитий надширокополосний сигнал, який забезпечує розділення елементів цілі для рішення завдання розпізнавання типів цілі.

Постановка завдання. Таким чином, проведений аналіз класичних методів спектрального аналізу для розділення парної зосередженої цілі, пачка відбитих сигналів якої має область стрибкоподібної зміни функції, приводить до наступного висновку: необхідно проводити пошук шляхів і нових методів спектральної обробки, що підвищують детальність портрета частотного образа ехо-сигналу.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо методику спектрального вейвлет-перетворення на рівні ідеологічної основи методу й ілюстрації його прикладних аспектів для подальшої розробки алгоритмів вейвлет-фільтрації.

Розрізняють дискретний і безперервний вейвлет-аналіз, апарат яких можна застосовувати як для безперервних, так і для дискретних сигналів.

Аналіз сигналу проводиться шляхом розкладання його по базисних функціях, що отримані з деякого прототипу шляхом стиснення, розтягування або зсуву (2). Функція-прототип називається аналізуючим (материнським) вейвлетом. Вейвлет-функція повинна задовольняти двом умовам:

1) Середнє значення (інтеграл по всій прямій) дорівнює 0.

2) Функція швидко убуває при $t\to\infty$.

Як правило, функція-вейвлет позначається буквою Ψ.

У загальному випадку вейвлет перетворення функції $f(t)$ виглядає наступним чином:

$$W(x,s)=\frac{1}{s}\int_{-\infty}^{+\infty}\psi^*(\frac{t-x}{s})f(t)dt. \qquad \textbf{(2)}$$

де t – вісь часу; x – момент часу; s – параметр, зворотний частоті; а (*) – означає комплексно-спряжене.

Головним елементом у вейвлет-аналізі є функція-вейвлет. Взагалі вейвлетом є будь-яка функція, що відповідає двом вищевказаним умовам. Найбільшою популярністю користується вейвлет Морле. Графік будь-якого вейвлета приблизно виглядає як вейвлет

Морле (рис. 1). Відмітимо, що вейвлет Морле комплексний. На рисунку зображені його дійсна й уявна складові.

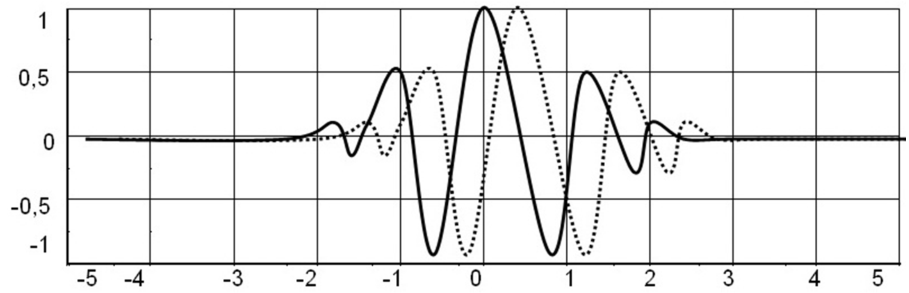

Рис. 1. Вейвлет Морле

Отже, у нас є деяка функція $f(t)$, що залежить від часу. Результатом її вейвлет-аналізу буде деяка функція $W(x, s)$, що залежить уже від двох змінних: від часу й від частоти (оберненопропорційно). Для кожної пари x і s процес обчислення вейвлет-перетворення наступний. *Функція* вейвлет розтягується в s разів по горизонталі й в $1/s$ разів по вертикалі. *Далі* він зсувається в точку x. *Отриманий* вейвлет позначається $\psi(x, s)$. *Проводиться* усереднення в околиці точки s за допомогою $\psi(x, s)$.

У результаті отримується цілком наочна картина, що ілюструє частотно-часові характеристики сигналу (рис. 2). По осі абсцис відкладається час, по осі ординат – частота (іноді розмірність осі ординат вибирається як $\log(1/s)$, де s – частота), а абсолютне значення вейвлет-перетворення для конкретної пари x і s визначає колір, яким даний результат буде відображений (чим в більшій мірі та чи інша частота присутня в сигналі в конкретний момент часу, тим темніше буде відтінок).

Рис. 2. Вейвлет-перетворення стаціонарного сигналу

Даний рисунок показує результати вейвлет-аналізу для сигналу, що представляє із себе накладення двох синусоїд різної частоти. Частотні характеристики даного сигналу не міняються в часі (сигнал стаціонарний), що добре видно на верхній частині рис. 2.

По рис. 3 зручно порівняти результати, які дають перетворення Фур'є й вейвлет-перетворення. Вихідний сигнал зображений на рис 3а. Як видно з рис. 3в перетворення Фур'є надає інформацію про той спектр частот, що є присутнім у сигналі в проміжку часу від 0 до 1 сек., при цьому нам невідомо коли саме та або інша частота реально була присутня в сигналі.

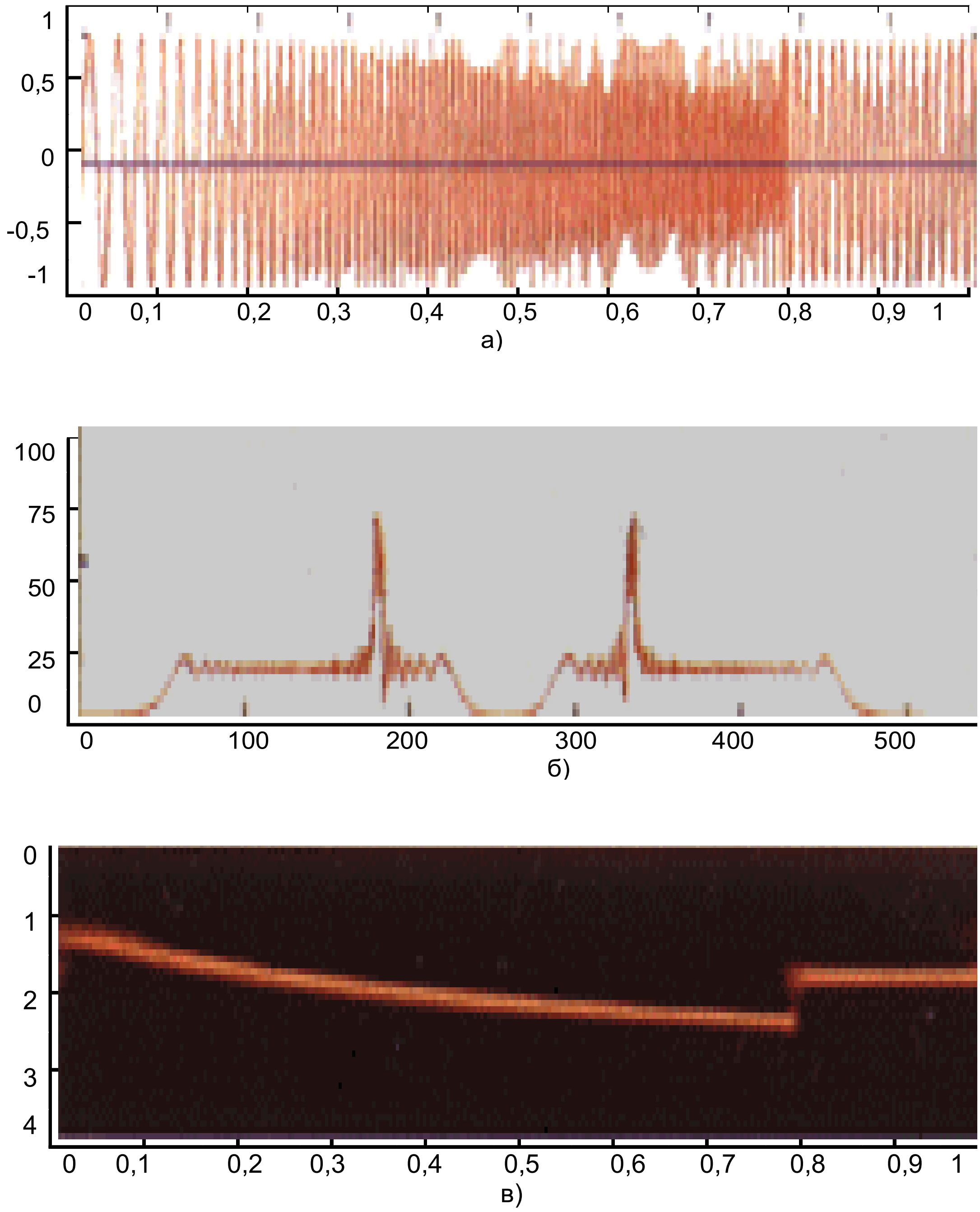

Рис. 3. Порівняння методів аналізу

У той же час вейвлет-перетворення (3б) дають вичерпну картину динаміки зміни частотних характеристик у часі. Все це вказує на те, що вейвлет-перетворення являється суттєво більш інформативним в порівнянні з перетворенням Фур'є.

Існує багато способів подання результатів вейвлет-перетворень. Вейвлет-спектр $W(a, b)$ представляє собою деяку поверхню в тривимірному просторі, способи візуалізації якої можуть бути різні. Для аналізу частотно-часового сигналу використовують:

1) карту проекцій ізорівнів або ізоліній функції $W(a, b)$ на площину (a, b), що дозволяє проводити аналіз зміни інтенсивності амплітуд вейвлет-перетворення на різних частотних масштабах і в часі;

2) карти ліній локальних екстремумів даних поверхонь, які називають скелетонами, дають можливість чітко виявляти структуру сигналу;

3) залежності коефіцієнтів вейвлет-перетворення для обраного масштабу перетворення від часу.

Наявність коефіцієнтів вейвлет-перетворення дозволяє також досліджувати енергетичні характеристики сигналу. Аналіз енергетичних характеристик сигналу ґрунтується на теоремі, яка являється аналогом теореми Парсеваля для перетворення Фур'є:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f_1(t) f_2(t) dt = C_\psi^{-1} \iint W_1(a,b) W_2^*(a,b) \frac{dbda}{a^2}. \qquad \textbf{(3)}$$

де $W_1(a, b)$, $W_2(a, b)$ – коефіцієнти вейвлет-перетворення функцій $f_1(t)$ і $f_2(t)$, відповідно.

Таким чином, існування аналога рівності Парсеваля дає можливість записати повну енергію сигналу E_f у просторі дійсних функцій через амплітуди вейвлет-перетворення:

$$E_f = \int_{-\infty}^{+\infty} f^2(t) dt = C_\psi^{-1} \iint W^2(a,b) \frac{dbda}{a^2}. \qquad \textbf{(4)}$$

З (4) видно, що величину $E_w(a, b)$=$W^2(a, b)$, що характеризує енергетичні рівні досліджуваного сигналу $f(t)$ у просторі (a, b), можна розглядати як локальну щільність енергії. Локальна щільність енергії E_b у точці b=t_0 (локальний енергетичний спектр), яка дозволяє проаналізувати часову динаміку передачі енергії сигналу по масштабах, має вигляд

$$E_b(a,t_0) = W^2(a,t_0). \qquad \textbf{(5)}$$

Величину
$$E_w(a) = \int W^2(a,b) db = \int E_w(a,b) db, \qquad \textbf{(6)}$$

що описує розподіл енергії сигналу по масштабах називають дисперсією вейвлет-перетворення або скалограмою.

Можна показати, виразивши дисперсію вейвлет-перетворення $E_w(a)$ через спектр енергії сигналу в просторі Фур'є $E_F(w) = \left|\hat{f}(w)\right|^2$, що дисперсія вейвлет-перетворення (6) представляє собою згладжений спектр потужності сигналу E_F:

$$E_w(a) = \int E_F(w) \left|\psi(aw)\right|^2 dw. \qquad (7)$$

Так як дана функція має кінцеву енергію, а використаний вейлет – нульове середнє значення, дисперсія вейвлет-перетворення $E_W(a)$ повинна наближатися до нуля на лівому і правому кінцях шкали масштабів. Отже, по теоремі Ролля, дана функція на зазначеному інтервалі має принаймні один максимум. Положення даних максимумів дисперсії вейвлет-перетворення, аналогічно максимумам спектра Фур'є $E_F(w)$, зв'язується із частотами й відповідними характерними складовими досліджуваного сигналу, що забезпечують основний внесок у його енергію. Відзначимо, що даний висновок справедливий для періодичних сигналів. Проте результати його експериментальної перевірки, що проведена з використанням різних вейвлетов і різними типами сигналів, показали, що він з достатньою точністю виконується й для неперіодичних сигналів [2].

Висновок. Практичне застосування методу вейвлет-аналізу ґрунтується на особливому трактуванню вейвлет-перетворення в частотній області й дозволяє використовувати добре розроблений апарат частотної фільтрації на основі швидкого вейвлет-перетворення. Суть підходу полягає в тому, що частотна область розбивається на дві складові: низькочастотну й високочастотну. Для такого розділення досить мати (для кожної вейвлет-функції) два фільтра: L_0 − низькочастотний, який дає частотний образ для апроксимації (грубе наближення) і H_i – високочастотний для деталізації.

Література

1. Чуи К. Введение в вейвлеты / К. Чуи. – М.: Мир, 2001.
2. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам / И. Добеши. –М.: Регулярная и хаотическая динамика, 2001.
3. Дьяконов В. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник / В. Дьяконов, И. Абраменкова. – Спб.: Питер, 2002.
4. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике / В.П. Дьяконов. – М.: Солон-Р, 2002.