УДК 621.396
© В. Сайко[1], 2012

ЗАСТОСУВАННЯ ПОДВІЙНОГО ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАВМИРАНЬ СИГНАЛІВ БЕЗДРОТОВИХ СИСТЕМ РАДІОЗВ'ЯЗКУ

Запропоновано модифікований метод дослідження структури сигналів із завмираннями мереж цифрового рухомого радіозв'язку – подвійний вейвлет-аналіз, в рамках якого виділені часові залежності миттєвих частот і миттєвих амплітуд сигналу (визначенні після одноразового вейвлет-перетворення) розглядаються в якості вихідних сигналів для повторного вейвлет-перетворення, які дозволяють детально досліджувати ефекти завмирань нестаціонарних багаточастотних сигналів.

A modified method for studying the structure of signals with fading networks of digital mobile radio – dual wavelet analysis, in which dedicated time depending instantaneous frequency and instantaneous amplitude of the signal (definition after a single wavelet transformation) are considered as output signals for re-wavelet transform that allow you to explore in detail the effects of fading stationary multifrequency signals.

1. ФОРМУЛЮВАННЯ ПРОБЛЕМИ

Практично в будь-якій радіосистемі бездротового зв'язку зустрічається задача вимірювання або оцінки параметрів сигналу. Вона характерна для будь-якої ситуації, коли інформація, що цікавить спостерігача, міститься в поточному значенні деякого сигнального параметра (амплітуди, частоти, початкової фази, запізнювання). Щоб одержати необхідну інформацію із прийнятого сигналу, спостерігач повинен виміряти або оцінити відповідний параметр. Тому, пошук нових інноваційних підходів, які дозволили б розвинути і застосувати методи аналізу структури сигналів систем рухомого радіозв'язку для дослідження динамічних їх змін в умовах багатопроменевого розповсюдження являється *актуальною науково-технічною задачею*. Однак необхідно відзначити, що завмирання як випадковий процес можливо розглядати стандартним підходом, тобто розглядати його як систему з повільно-мінливими параметрами. Тоді можна ввести в розгляд невеликі проміжки часу, протягом яких властивості сигналу змінюються незначно, і його можна розглядати як вибіркову функцію стаціонарного процесу, застосовуючи класичний апарат методів статистичної обробки. Такий підхід може застосовуватися на практиці, якщо нестаціо-

[1] Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

нарність асоціюється з низькочастотної областю спектра по відношенню до динамічних змін, що представляє інтерес для розробника, і сигнал, який аналізується, можна представити у вигляді суми або добутку вибіркової функції стаціонарного випадкового процесу і детермінованою функції, що описує зміни в часі середнього значення або дисперсії. Повільна стаціонарність може бути усунена шляхом фільтрації або на основі інших спеціальних прийомів. Якщо ж властивості вибіркової функції випадкового процесу встигають істотно помінятися навіть на порівняно коротких ділянках часу, що характерно при багатопроменевому розповсюдженні радіохвиль в системах цифрового радіозв'язку нового покоління CDMA2000, IEEE802.16e, LTE, то виникає потреба переходити від класичних методів аналізу часових рядів до спеціальних методик [1,2]. Відзначимо, що ефективних методів аналізу структури нестаціонарних випадкових процесів існує небагато. У числі відомих і популярних підходів це – метод аналітичного сигналу, який використовує перетворення Гільберта [3], метод аналізу флуктуацій щодо тренду (АФТ, в зарубіжній літературі використовується назва detrended fluctuation fyflysis) та вейвлети [4].

Перший з цих походів дозволяє ввести поняття миттєвої частоти, миттєвої амплітуди і миттєвої фази коливань для вузькосмугового випадкового сигналу; за його допомогою можна досліджувати зміни у часі цих характеристик. Метод аналітичного сигналу може успішно застосовуватися при вирішенні завдань вивчення взаємозв'язку випадкових процесів.

АФТ є новим методом дослідження ефектів тривалих кореляцій, які можливо застосовувати як до стаціонарних випадкових процесів (сигналів), так і до нестаціонарних. Головний принцип цього підходу полягає в переході від аналізованого сигналу до одновимірних «випадкових блукань». За допомогою даного підходу можна проводити спектрально-кореляційний аналіз, не обмежуючись тільки стаціонарним випадковим процесами. Більш того, в даний час АФТ розглядається в якості альтернативи класичного кореляційного аналізу, оскільки цей метод дозволяє точніше оцінювати скейлінгові характеристики в області тривалих кореляцій. Однак по своїм потенційним можливостям вейвлет-аналіз має суттєві переваги. З точки зору вивчення кореляційних властивостей випадкових сигналів на основі вейвлет-перетворень мультифрактальний формалізм [4] має не тільки ті ж можливостями, що і АФТ, але ще й ряд переваг. Для методу АФТ потрібно, по-перше, велика тривалість тимчасового ряду, по-друге, АФТ менш ефективний при аналізі кореляцій тимчасових інтервалів.

Але як і будь-якій інший метод цифрової обробки сигналів, вейвлети мають свої переваги, так і недоліки. Відомо, наприклад, що за

можливість проведення локалізованого спектрального аналізу, який дозволяє здійснювати розрахунок миттєвого спектру по дуже малим ділянкам сигналу, приходиться «розраховуватися» погіршенням спектрального розрізнення. *Метою даної роботи* є розробка методу оцінки глибини завмирань сигналу, який побудований на вейвлет-перетворенні.

2. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Безперервне вейвлет-перетворення сигналу *x(t),* визначеного у часовій області $-\infty < t < \infty$, має наступний вигляд:

$$W(a,b) = \omega(a)\int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) \qquad (1)$$

де $\omega(a)$ – вагова функція, а символом "*" позначена операція комплексного сполучення. Формула (5) допускає, що параметри α і b змінюються в діапазоні ($-\infty,\infty$), однак для першого з них зазвичай розглядають тільки позитивні значення (в даній статті ми також обмежимося розглядом тільки позитивних часових масштабів або частот). Безперервне вейвлет-перетворення може бути записано для дійсних базисів; в цьому випадку буде отриманий двовимірний масив коефіцієнтів $W(a,b)$, а операція комплексного спряження ігнорується. При використанні комплексних вейвлетів обчислюються двовимірні масиви значень модуля коефіцієнтів $|W(a,b)|$ і фази $\Phi(a,b)$:

$$|W(a,b)| = \sqrt{\mathrm{Re}\left[W(a,b)\right]^2 + \mathrm{Im}\left[W(a,b)\right]^2}\ , \qquad (2)$$

$$\Phi(a,b) = arctg\frac{\mathrm{Im}\left[W(a,b)\right]}{\mathrm{Re}\left[W(a,b)\right]}, \qquad (3)$$

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}}\int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)dt = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi^*_{a,b}(t)dt \qquad (4)$$

В якості вагової функції зазвичай використовується $\omega(a) = 1/\sqrt{a}$, що забезпечує збереження енергії при перемасштабіровані ψ *(t)* (на кожному масштабі вейвлети будуть характеризуватися постійною енергією). Але в деяких додатках доцільно використовувати $\omega(a)$=1/α, що зручно, наприклад, при вивченні властивостей самоподібності сигналу в термінах масштабної інваріантності коефіцієнтів вейвлет-перетворення, відповідних точок сингулярного поведінки.

Замість комплексних базисних функцій часто віддають перевагу аналітичним вейвлетам. Багато вейвлетів, включаючи функцію Морле, близькі до аналітичних функцій.

Щоб визначити коефіцієнти $\boldsymbol{W(a,b)}$ для різних пар значень параметрів α і b, потрібно:

- провести перемасштабування вейвлета $\boldsymbol{\psi}$ по горизонтальній і вертикальній осях;

- перемістити вейвлет в обрану точку $\boldsymbol{t^0 = t - b}$ і отримати функцію $\boldsymbol{\psi^*_{a,b}}$;

- провести усереднення сигналу *x (t)* за допомогою вейвлета $\boldsymbol{\psi^*_{a,b}}$, що грає роль часового вікна.

Визначення миттєвих частот і амплітуд випадкових сигналів із завмираннями. Результат перетворення (4) можна інтерпретувати, як поверхню коефіцієнтів $\boldsymbol{W(a,b)}$ у тривимірному просторі. Для наочного уявлення про особливості досліджуваного сигналу існують різноманітні варіанти візуалізації цієї поверхні. Один з них полягає в розгляданні її проекції на площину $\alpha\ b$ і зображенні інтенсивності амплітуд вейвлет-перетворення різними відтінками кольору (за аналогією з географічними картами). Такий спосіб дозволяє побачити, як проходить зміна в часі властивостей сигналу на різних масштабах, і дає повну інформацію про перетворення.

Інший спосіб візуалізації полягає в побудові картин ліній локальних екстремумів поверхні $\boldsymbol{W(a,b)}$ або так званого "скелетона". Відповідні лінії знаходяться шляхом визначення координат точок простору параметрів, в яких виконується наступне рівняння:

$$\frac{\boldsymbol{dW(a,b)}}{\boldsymbol{db}} = 0 \qquad (5)$$

Вважається, що даний скелетон містить основну інформацію про вейвлет-перетворення, не обтяжену зайвими деталями. Для ілюстрації розглянемо тестовий приклад – проведемо вейвлет-аналіз за допомогою картин вейвлет-коефіцієнтів для сигналу, наведеного на рис.1 (зверху) на основі вейвлет Хаара. Результатом вейвлет-аналізу заданого сигналу за допомогою картин вейвлет-коефіцієнтів являються наступні графіки (див. рис.1 зверху вниз):

– графік значень заданого сигналу;
– картини значень вейвлет-коефіцієнтів;
– проекції картини значень вейвлет-коефіцієнтів при фіксованому коефіцієнта α (проекція поверхні модулів коефіцієнтів $|\boldsymbol{W(a,b)}|$ на площину $\alpha\ b$);

– скелетон (картина ліній локальних екстремумів) картини значень коефіцієнтів вейвлетів.

Локальним особливостям (порушення гладкості) на картині вейвлет-коефіцієнтів відповідають вертикальні полоси, які виходять із точки, де знадиться особливість. Пікам сигналу відповідає згущення світлих ділянок вейвлет-картин значень коефіцієнтів, а впадинам згущення темних полос. Чим гостріше виражена особливість сигналу, тим сильніше вона виділяється на картині значень вейвлет-коефіцієнтів.

Ще один спосіб візуалізації найбільш важливої інформації про вейвлет – перетворення застосовується для визначення миттєвих характеристик (амплітуди, частоти, фази) динамічних процесів. Він часто називається побудовою "хребтів" (ridges) вейвлет-перетворення [4]. Хребти будуються для поверхні *E (a, b)* і визначаються за формулою

$$\frac{d(E(a,b)/a)}{da} = \frac{d(|W(a,b|^2/a)}{da} = 0 \qquad (6)$$

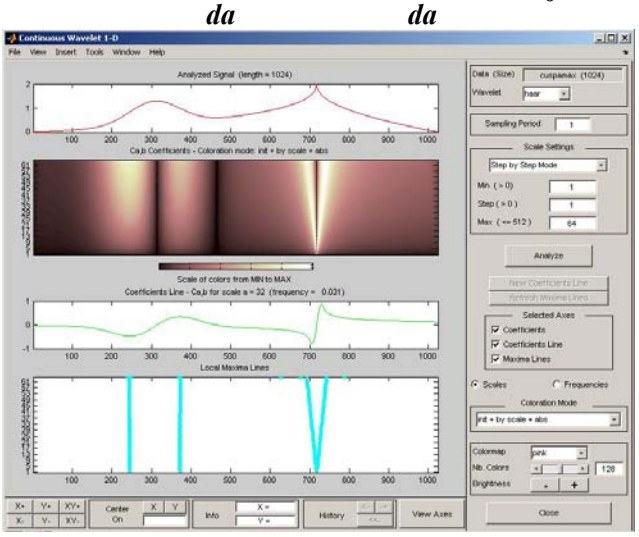


Рис. 1. Вейвлет-аналіз на основі вейвлет-твірної функції Хаара тестового сигнал

Замість поверхні E (a,b) зручно розглядати E (f, b), тобто здійснювати перехід до частотного представлення енергетичного спектру. У останньому випадку похідна в (6) обчислюється по f. Якщо виключити з розгляду точки, які відповідають дуже малим значенням $|W(a,b)|$, які на практиці можуть бути пов'язані із зашумлення сигналу, погрішністю обчислення і т.д. (поріг задається з урахуванням особливостей аналізованого сигналу і рівня шуму), то отримані хребти, зображені у

вигляді ліній на площині α b, відповідають миттєвим частотам ритмів сигналу, присутніх в аналізованому сигналі (рис. 2 а, б).

Це дуже зручний і наочний спосіб аналізу динамічних властивостей нестаціонарних багаточастотних сигналів із завмираннями, що забезпечує можливість відстежувати часову еволюцію кожного ритмічного процесу сигналу. Оскільки кожна точка хребта асоціюється з локальним енергетичним спектром, знаходження миттєвих частот сигналів із завмираннями одночасно забезпечує і визначення миттєвих амплітуд цих процесів (рис. 2 в).

Але коректність визначення миттєвих частот нестаціонарних багаточастотних режимів сигналів із завмираннями залежить не тільки від спектрального розрізнення вибраного вейвлета, але і від ступеня нестаціонарності: швидкі зміни статистичних характеристик сигналу призводять до виникнення ефектів інтерференції, які можуть бути помилково прийняті за зміну частоти сигналу. Тому аналіз таких сигналів повинен супроводжуватися додатковими дослідженнями з метою підтвердження коректності здійснених оцінок і правильної інтерпретації отриманих результатів. Відомі й інші способи визначення миттєвих частот і амплітуд сигналів; з цією метою традиційно застосовується метод аналітичного сигналу, який використовує перетворення Гільберта. Останнє має чітку фізичну інтерпретацію для вузькосмугових сигналів (у разі багаточастотних сигналів його застосовність менш очевидна). Зокрема, в роботі [5] порівнюються миттєві фази, обчислені на основі перетворення Гільберта і вейвлет-перетворення з базисною функцією Морле, і показується, що вони приблизно рівні. Необхідно відмітити, що на відміну від радіотехнічних схем для сигналів із завмираннями в природі характерна нестаціонарність, яка призводить до того, що характеристики сигналів багатопроменевих каналів не є постійними. Для вивчення глибини завмирань нестаціонарних сигналів мереж рухомого радіозв'язку в даній роботі пропонується інноваційний метод – подвійний вейвлет-аналіз.

3. МЕТОД ПОДВІЙНОГО ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗУ

Суть інноваційного метод. Як вже зазначалося, на відміну від класичного спектрального аналізу, заснованого на перетворенні Фур'є, вейвлет-перетворення забезпечує можливість вивчення часової еволюції спектральних піків (в термінах хребтів поверхні спектральної щільності потужності). Якщо необхідно виявити тільки сам факт наявності характерних частот ритмів сигналу, присутніх в ньому, то з цією метою може застосовуватися класичний аналіз. Але якщо потрібно проаналізувати зміни характеристик сигналу із завмираннями в часі, то

для вирішення цього завдання вейвлети є, безсумнівно, більш кращим математичним апаратом.

Постановка задачі. Припустимо, що аналізований сигнал із завмираннями містить два незалежних часових масштабів: швидкий ритм сигналу, що характеризується миттєвої частотою $f_1(t)$ і миттєвої амплітудою $a_1(t)$, і порівняно повільний ритм сигналу з характеристиками $f_2(t)$ і $a_2(t)$. При наявності модуляції частота швидкого ритму $f_1(t)$ та / або його амплітуда $a_1(t)$ змінюються відповідно до повільних динамічних процесів. Щоб проаналізувати, як відповідні зміни відбуваються в часі, пропонується наступний підхід.

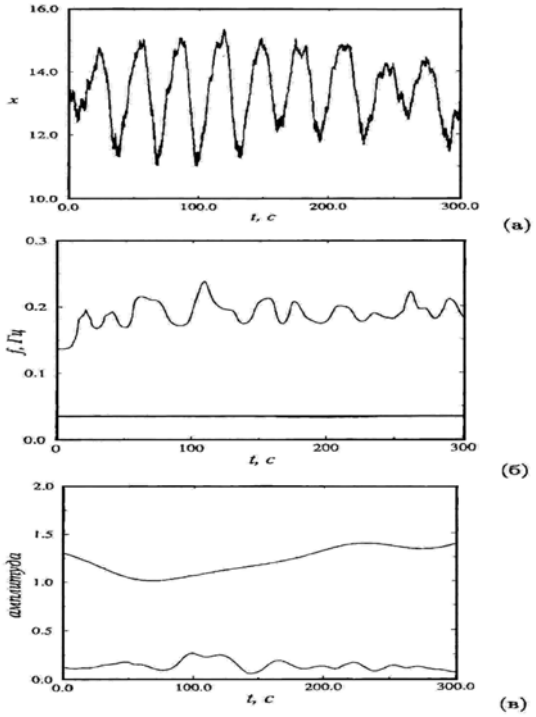


Рис. 2. Аналізований сигнал (а) і виділені за допомогою вейвлет-перетворення часові залежності миттєвих частот (б) і миттєвих амплітуд (в) ритмів сигналу із завмираннями

Етапи методу. Після обчислення безперервного вейвлет-перетворення та одержання поверхні $E(f, b)$ задаються частотні смуги в околиці середніх значень частот ритмів сигналу із завмираннями, які можуть бути визначені з усередненого енергетичного спектру. Ці смуги повинні вибиратися достатньо широкими, щоб допускати варіації

миттєвих характеристик, обумовлених можливою нестаціонарністю процесу. В межах кожної смуги проводиться процедура визначення миттєвих частот шляхом моніторингу точок, відповідних пікам локальних енергетичних спектрів, що дозволяє отримати часові залежності всіх миттєвих характеристик: $f_1(t)$, $a_1(t)$, $f_2(t)$ і $a_2(t)$. за аналогією з раніше розглянутими прикладами. На цьому закінчується перший етап.

На другому етапі пропонується розглядати виділені часові залежності $f_1(t)$ і $a_1(t)$як вихідні сигнали для ще одного (другого) вейвлет-перетворення, що дозволяє детально проаналізувати їх структуру і визначити глибину завмирання. Як і раніше проводиться розрахунок коефіцієнтів безпереривного вейвлет-перетворення, побудова поверхні щільності енергії та визначення її хребтів, розрахунок глобального енергетичного спектру. Оскільки процедурі безперервного вейвлет-перетворення піддаються сигнали, визначенні після одноразового застосування вейвлетів, даний метод було запропоновано назвати подвійним вейвлет-аналізом. Схожа ідея описана в роботі [6], автори якої використовували термінологію "вторинного" вейвлет-перетворення (secondary wavelet-transform). Застосовуючи метод подвійного вейвлет-аналізу до сигналів із завмираннями, можна спочатку чітко розпознати два незалежних ритмів сигналу, обчислити миттєву амплітуду (рис. 3 а) і частоту його швидкого ритму сигналу і, розглядати ці часові залежності як вихідні сигнали для ще одного вейвлет-перетворення, та оцінити характеристики сигналу багатопроменевих каналів -- глибину завмирання (рис. 3 б).

4. ВИСНОВКИ

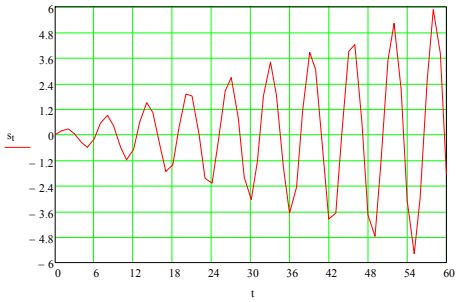
Після проведення цих розрахунків було виявлено ряд особливостей даного методу.

1. Як показали результати досліджень, вейвлет-спектрограми найбільш придатні для аналізу тонкої структури багатопроменевого сигналу, який має різки стрибки, переходи похідних через нуль і т. п.

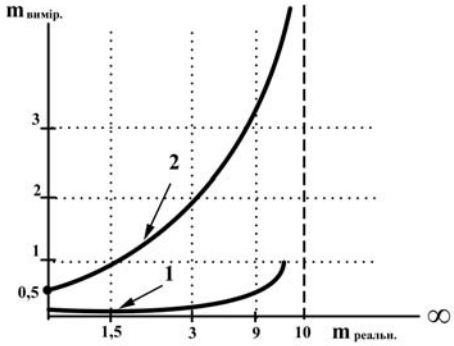
2. Вейвлет-аналіз має ефект усереднення, який виникає через те, що властивості сигналу в даний момент часу вивчаються всередині вікна кінцевої ширини, визначуваного базисної функцією (рис. 3б крива 1). Однак для запропонованого методу ефекти усереднення виявляються непринциповими, і завжди можливо визначити справжню глибину завмирання, помноживши результати подвійного вейвлет-аналізу на постійний множник (він становить приблизно 2,4 при обраному значенні параметра $f_o = 1$ вейвлета Морле).

3. Метод може показати "помилкові" ефекти слабких змін частот сигналу, яка має, принаймні, в 3-4 рази меншу глибину завмирань, чим істинна глибина завмирань (рис. 3б крива 2). Отже, отримавши резуль-

тати аналізу експериментальних даних, необхідно перевіряти, чи є визначенні характеристики порівнянними з можливими помилковими ефектами.



а)



б)

Рис. 3. Аналіз сигналу із завмираннями: а) Миттєва амплітуда швидкого ритму сигналу, обчислена за допомогою вейвлет-перетворення; б) Залежність обчислена за допомогою подвійного вейвлет-перетворення значень глибини завмирань $m_{вим.}$ від $m_{реальн}$

1. Сайко В.Г. Системи бездротового цифрового радіозв'язку нового покоління: монографія. / В.Г. Сайко. – К.: ПП "Золоті ворота", 2011. – 300 с. 2. Системи та мережі цифрового радіозв'язку: інженерно-технічний довідник / [Олійник В.Ф., Кривуца В.Г., Сайко В.Г., Булгач С.В.]. – Ніжин: ТОВ "Видавництво "Аспект-Поліграф", 2011. – 612 с. 3. Солонина А.И., Арбузов С.М. Цифровая обработка сигналов. Моделирование в MatLab. Санкт-Петербург БХВ-Петербург, 2008, – 816с. 4. Блаттер К. Вейвлет-анализ. Основы теории. М.: Техносфера, 2004, – 273с. 5. Quian Quiroga, Performance of different synchronization measures in real data: a case study on electroencephalographic signals // Phys. Rev. E. – 2002/ -- Vol. 65. – P. 041903. 6. Addison P.S. Secondary transform decoupling of shifted nonstationary signal modulation components: application to photoplethysmography // Int. J. Wavelets Multires. Inf. Proc. – 2004. – Vol. 2. – P. 43-57.