
УДК 004.77:621.39

О.О. Можаяв¹, Н.Х. Раковська², В.В. Казімірова¹

¹ Національний технічний університет «ХПІ», Харків

² Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

ОПТИМІЗАЦІЯ ЗАСТОСУВАННЯ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕНЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАФІКУ МУЛЬТИСЕРВІСНИХ МЕРЕЖ

В статті було обчислено комплексні вейвлет-спектри модельних сигналів. Показано, що фазова характеристика, яка отримана з комплексного вейвлет-спектру, переважна при виявленні локальних особливостей сигналу навіть в разі відносної малості параметра, що характеризує особливість. Продemonстровано ефективність ДВП при аналізі сигналів з особливостями. На основі критерію мінімізації ентропії рекомендовано оптимальні вейвлети для кожної конкретної моделі сигналу.

Ключові слова: фрактальність, вейвлет-аналіз, модельний сигнал.

Вступ

Актуальність дослідження. Мультисервісні мережі передачі даних є найбільш поширеними в даний час мережами. Особливий інтерес при вивченні таких мереж викликають ті особливості телекомунікаційного трафіку, які були виявлені досить недавно, а саме властивості самоподібності або фрактальності. Моделюванню такого трафіку присвячено значну кількість робіт, але, в основному, ці моделі зачіпають тільки високочастотну складову трафіку: швидкі і часті зміни інтенсивності [1 – 4]. У теж час основні втрати і затримки передачі інформації найчастіше викликані досить низькочастотними, але дуже інтенсивними сплесками, які можна уявити, як відокремлену хвилю, що поширюється на тлі високочастотного стохастичного процесу [5, 6]. Особливості вейвлет-моделювання фрактального трафіку

розглядалися в статті [7], але при такому моделюванні не проводилася селекція низькочастотних коливань на тлі високочастотних, так як розглядався лише випадок низькочастотного спектра трафіку процесу передачі даних гетерогенних мереж, який був представимо у вигляді окремої хвилі - солітону.

Але, як відомо, трафік такої мережі можна представити у вигляді накладення високочастотних флуктуацій з відносно низькою інтенсивністю і низькочастотних, що відрізняються значною інтенсивністю.

До теперішнього часу такий комплексний аналіз трафіку не проводився і тому **актуальною метою** даної статті є оптимізація застосування вейвлет-перетворень для визначення характеристик трафіку мультисервісних мереж передачі інформації за рахунок використання базових функцій, які найбільш адекватні зміні трафікового процесу.

1. ДВП модельних сигналів

Вибір оптимального вейвлетного базису.

Особливу цікавість представляє дослідження можливості та доцільності використання ДАП для аналізу сигналів з особливостями. Це визначається, в першу чергу тим, що ДВП, у відмінності від АВП, дозволяє проводити не тільки розкладання сигналу, який аналізується $f(t)$, за базисом ортогональних чи біортогональних вейвлетів, але і відновлення цього сигналу по вейвлет-спектру. Більш того. Мається можливість відновляти сигнал тільки до визначеної частини вейвлет-спектру, а отже, і більш успішно вирішувати задачу виявлення сигналу на фоні перешкод. Необхідно також відмітити, що можливість відновлення сигналу $f(t)$ не є виключною прерогативою ДВП. Так, в випадку виконання для базисного вейвлета умови допустимості, наступного з теореми Кальдерона – Гроссмана – Морле. Існують зворотні НВП. Однак, внаслідок принципової надлишковості вейвлет-спектра НВП для відновлення сигналу треба провести значно більший об'єм обчислювань, ніж при ДВП. АВП зламу та похідної δ -функції представлені на рис. 1 та 2 відповідно.

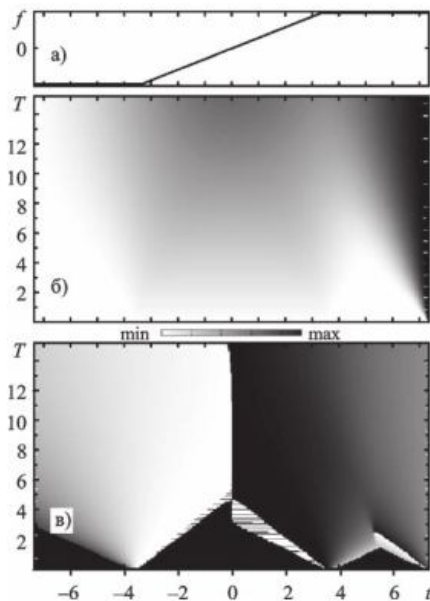


Рис. 1. АВП зламу: а – сигнал у часовій області, б – амплітудна характеристика $|\dot{W}f(a,b)|$ вейвлет-спектра АВП, в – фазова характеристика $\arg \dot{W}f(a,b)$ вейвлет-спектра АВП

В системі комп'ютерної математики MATLAB ДВП обчислюється за допомогою пірамідального алгоритму Малла. При цьому вейвлети задаються за допомогою відповідного набору частотних фільтрів. Коефіцієнти даних фільтрів однозначно визначені для кожного вейвлета на кожному з рівнів розкладання і реконструкції. Автором більшості вейвлетів є І. Добеши.

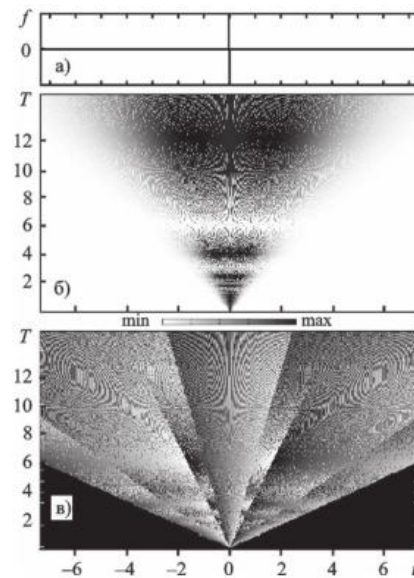


Рис. 2. АВП похідної δ -функції: а – сигнал у часовій області, б – амплітудна характеристика $|\dot{W}f(a,b)|$ вейвлет-спектра АВП, в – фазова характеристика $\arg \dot{W}f(a,b)$ вейвлет-спектра АВП

Важливо відзначити, що майже всі вони не мають аналітичного представлення і є результатами ітераційного процесу, який лежить в основі пірамідального алгоритму Малла. Оцінку оптимальності вибору вейвлетного базису при використанні ДВП будемо проводити за допомогою критерію мінімізації ентропії М вигляду

$$M = \exp \left(- \sum_{j,k} |d_{j,k}|^2 \ln |d_{j,k}|^2 \right)$$

де $d_{j,k}$ – коефіцієнти, які деталізують розкладання сигналу, що задаються співвідношенням:

$$d_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi_{j,k}(t) dt, \Psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \Psi(2^j t - k), j, k \in \mathbb{Z},$$

де \mathbb{Z} – множина цілих чисел. Мінімальне значення ентропії М складає 1.

АВП суми похідної δ -функції та гармонійного сигналу та вертикального перегину представлені на рис. 3 та 4 відповідно.

Результати розрахунків М для модельних сигналів з особливостями (f_1, \dots, f_{12}) наведені у табл. 1, 2.

Базис, заснований на вейвлеті Хаару (haar), виявився оптимальним для більшості аперіодичних моделей, що мають або розриви типу “стрибок”, або крапки з вертикально розташованою дотичною (імпульс кінцевої ширини f_2 , функція Хевісайда f_4 , похідна δ -функції f_8 , вертикальний перегин f_{10} , та шпиль f_{11}). Швидше за все, це пояснюється тим, що сам вейвлет haar багато в чому схожий з такими сигналами, оскільки має три розриви безперервності типу “стрибок”. Особливо слід зазначити, що похідна δ -функції у цьому базисі визначається всього лише одним коефіцієнтом ($M=1.00$).

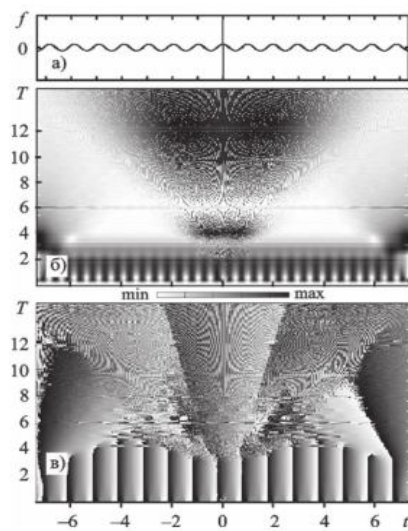


Рис. 3. АВП суми похідної δ -функції та гармонійного сигналу: а – сигнал у часовій області, б, в – амплітудна та фазова $\arg Wf(a,b)$ характеристики $|Wf(a,b)|$ вейвлет-спектра АВП відповідно

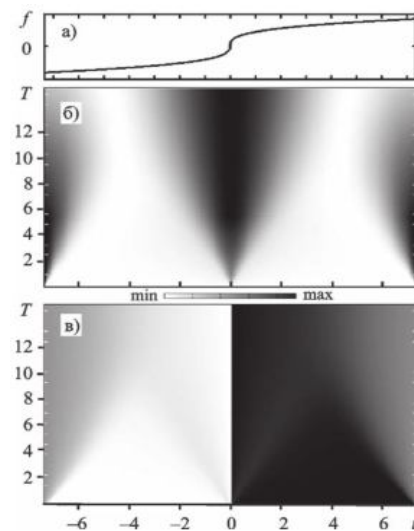


Рис. 4. АВП вертикального перегибу: а – сигнал у часовій області, б – амплітудна характеристика $|Wf(a,b)|$ вейвлет-спектра АВП, в – фазова характеристика $\arg Wf(a,b)$ вейвлет-спектра АВП.

Таблиця 1

Ентропія М моделей сигналів з особливостями $f_1(t) \dots f_6(t)$, які розкладені за допомогою ДВП за базисами вейвлетів Хаара, Добеши, Симлету, койфлетів, біортогональних вейвлетів та дискретного вейвлету Мейєра. Виділені значення ентропії для оптимальних вейвлетів в кожному стовпці

Вейвлети	Моделі сигналів з особливостями					
	$f_1(t)$	$f_2(t)$	$f_3(t)$	$f_4(t)$	$f_5(t)$	$f_6(t)$
Haar	4.00	8.62	61.63	2.00	64.64	74.43
Db2	3.63	9.51	11.26	2.83	44.70	47.56
Db3	3.89	9.06	12.85	2.01	48.02	47.22
Db4	4.62	12.28	13.03	2.02	40.37	42.32
Db5	7.71	17.56	16.12	2.45	37.05	34.77
Db6	7.94	14.83	19.60	2.64	35.07	38.06
Db7	9.89	14.51	22.39	2.76	32.96	35.06
Db8	10.07	19.89	24.94	3.04	31.10	31.95
Db9	9.86	23.06	26.95	3.46	29.42	31.57
Db10	9.55	23.48	30.41	3.81	30.35	32.47
sym2	3.63	9.51	11.64	2.83	44.70	47.56
Sym3	3.89	9.06	12.85	2.01	48.02	47.22
Sym4	5.19	9.63	12.72	4.84	20.60	29.07
Sym5	4.56	11.22	14.34	5.80	24.03	26.33
Sym6	7.37	11.33	16.39	6.72	27.48	21.74
Sym7	4.88	13.01	18.49	6.72	31.49	29.49
Sym8	5.82	12.73	20.38	8.68	36.05	21.04
Coif1	4.22	8.34	12.73	2.69	28.71	46.00
Coif2	4.96	10.09	16.44	4.83	28.10	33.25
Coif3	8.81	12.12	22.90	6.88	34.89	33.46
Coif4	6.21	14.42	29.49	8.92	32.18	34.06
Coif5	6.82	15.47	36.66	10.97	32.13	37.86
dmey	7.96	20.01	238.1	50.77	175.9	75.60
Bior3.1	7.24	5.98	3.41	4.88	2.29	2.56
Bior3.3	12.01	9.08	11.50	6.38	13.19	32.07
Bior3.5	8.74	14.32	18.94	7.60	23.37	33.82
Rbio3.1	5.80	11.60	113.1	4.36	136.0	136.5

Вейвлет Добеши другого порядку db2 показав кращий результат при розкладанні моделей, що мають розрив типу “нескінченний стрибок” на тлі гармонійної функції або константи (δ -функція Дірака f_1 , накладання δ -функції Дірака f_3 та її першої похідної f_9 на гармонійний сигнал). Мабуть, це пов'язано з

тим, що вейвлет db2, з одного боку, має яскраво виражену фрактальну структуру, а з іншого боку, є двохпелюстковим. Остання властивість дає можливість досить вдало розкласти гармонійні сигнали.

АВП шпиль та накладання шпиль на гармонійний сигнал представлені на рис 5 та рис. 6.

Таблиця 2

Ентропія M моделей сигналів з особливостями $f_7(t) \dots f_{12}(t)$, які розкладені за допомогою ДВП за базисами вейвлетів Хаара, Добеши, Симлету, койфлетів, біортогональних вейвлетів та дискретного вейвлету Мейєра. Виділені значення ентропії для оптимальних вейвлетів в кожному стовпці

Вейвлети	Моделі сигналів з особливостями					
	$f_7(t)$	$f_8(t)$	$f_9(t)$	$f_{10}(t)$	$f_{11}(t)$	$f_{12}(t)$
Haar	2.60	1.00	36.39	1.43	3.47	53.15
Db2	2.12	1.56	11.31	4.22	5.19	11.84
Db3	1.46	2.99	13.76	6.01	5.47	12.54
Db4	1.47	4.24	16.47	8.02	6.73	13.46
Db5	1.72	4.08	19.97	9.51	6.71	16.73
Db6	1.97	4.09	22.50	10.64	7.19	20.44
Db7	2.11	2.09	24.98	12.79	8.35	22.05
Db8	2.28	2.45	27.02	15.65	10.07	24.38
Db9	2.60	2.49	30.53	17.81	8.28	27.20
Db10	2.92	2.66	11.31	19.05	6.68	31.39
sym2	2.12	1.59	13.28	4.22	5.19	11.84
Sym3	1.46	2.99	12.86	6.01	5.47	12.54
Sym4	4.43	2.02	14.43	7.91	5.39	11.97
Sym5	5.46	1.51	16.45	9.61	6.55	13.99
Sym6	6.30	1.95	18.80	11.73	6.27	15.85
Sym7	6.20	3.44	20.54	13.03	6.85	19.23
Sym8	8.26	2.45	13.09	15.66	6.81	19.90
Coif1	2.31	2.27	16.65	5.77	4.10	11.13
Coif2	4.43	2.47	23.09	11.98	6.79	16.23
Coif3	6.44	2.63	29.70	18.01	8.56	22.90
Coif4	8.45	2.75	36.83	24.03	9.34	29.60
Coif5	10.46	2.80	234.3	30.05	10.07	36.89
dmey	50.39	3.18	4.12	101.7	24.82	229.4
Bior3.1	2.22	7.24	11.53	4.35	2.97	2.96
Bior3.3	4.05	4.06	19.38	7.29	3.81	10.86
Bior3.5	6.15	5.85	118.8	10.83	6.41	17.37
Rbio3.1	4.22	3.08	18.05	5.03	10.70	94.10

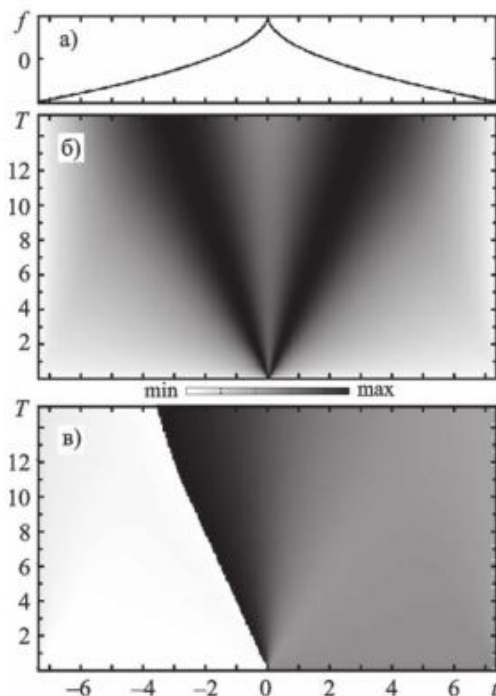


Рис. 5. АВП шпиль: а – сигнал у часовій області, б – амплітудна характеристика $|Wf(a,b)|$ вейвлет-спектра АВП, в – фазова характеристика $\arg Wf(a,b)$ вейвлет-спектра АВП

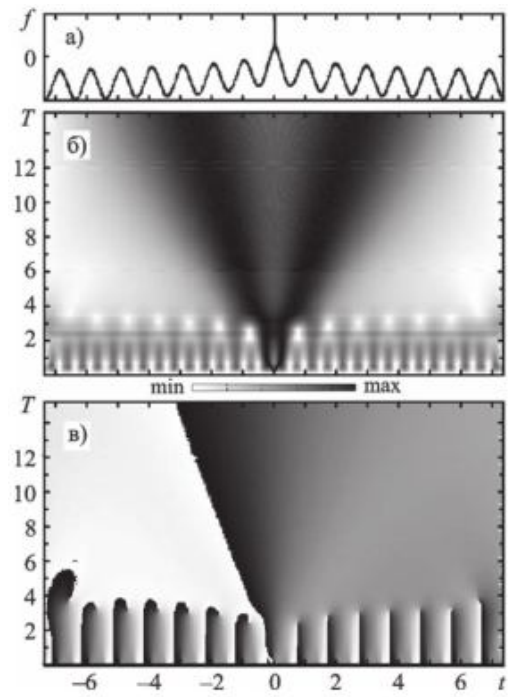


Рис. 6. АВП накладення шпиль на гармонійний сигнал: а – сигнал у часовій області, б, в – амплітудна та фазова $\arg Wf(a,b)$ характеристики вейвлет-спектра АВП відповідно

Для неперервної моделі f_7 , яка має два ізломи, найкращі результати показали вейвлети db3, sym3 та db4.

Для моделей f_5 та f_6 , які описують скачки фази і амплітуди гармонійного сигналу, найкращими виявляються відповідно вейвлети sym4 і sym8. Для накладення гармонійного сигналу на шпиль (модель 12) найбільш вдалим виявляється вейвлет coif1.

Також необхідно відзначити, що для ряду моделей ($f_2, f_3, f_5, f_6, f_9, f_{11}, f_{12}$) дуже добрі результати показує біортогональний вейвлет bior3.1. Його добре використовувати у випадку, якщо необхідно проводити лише розкладання сигналу, який аналізується по базису вейвлетів. Якщо ж потрібно також здійснювати відновлення сигналу по його вейвлет-спектру, то bior3.1 використовувати небажано. Це пов'язано з тим, що при відновленні використовується не сам вейвлет bior3.1, а зворотний йому біортогональний вейвлет rbi3.1, показники якого на один-два порядки гірші.

2. Відновлення сигналу по вейвлет- спектру

Відомо, що сигнал $f(t)$ може бути відновлений на n -ому рівні розкладання по своєму дискретному вейвлет-спектру за допомогою співвідношення:

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_{j_n,k} \varphi_{j_n,k}(t) + \sum_{j=j_n}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{j,k} \Psi_k(t),$$

де $\varphi_{j,k} = 2^{j/2} \varphi(2^j t - k)$, $\varphi(t)$ - скейлінг-функція, $a_{j,k}$ -

апроксимуючі коефіцієнти, $a_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \varphi_{j,k}(t) dt$.

Щоб став зрозумілим « n -й рівень розкладання», необхідно коротко нагадати головну ідею пірамідального алгоритму Малла.

Вона полягає в тому, що частотна область вейвлетів розбивається на низькочастотну та високочастотну складові. Частота, яка розділяє ці складові, дорівнює половині частоти дискретизації сигналу. Для їх розділення досить використовувати два фільтри: низькочастотний та високочастотний. Перший дає образ для апроксимації сигналу, який подається на вхід, другий – для його деталізації. Встановлено, що коефіцієнти цих фільтрів є апроксимуючі $a_{j,k}$ та деталізуючі $d_{j,k}$ коефіцієнти вейвлет-декомпозиції сигналу. Конкретний вид фільтрів визначається вейвлетом, який використовується. Оскільки, в смугу прозорості кожного фільтра попадає тільки одна половина всіх частотних компонентів, друга половина цих компонентів просто видаляється. Така операція називається децимацією та приводить до видалення половини відліків початкового сигналу. Складання отриманих на виходах обох фільтрів сигналів дає в точності вихідний сигнал. Це і є перший рівень розкладання.

АВП різкого стрибка фази гармонійного сигналу при $\Delta\varphi = \pi / 64$ та АВП різкого стрибка фази гармонійного сигналу при $\Delta\varphi = 0$ представлені на рис. 7 та 8.

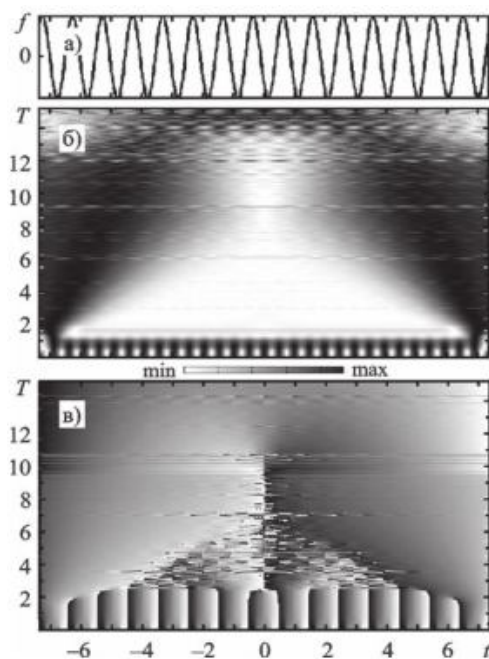


Рис. 7. АВП різкого стрибка фази гармонійного сигналу при $\Delta\varphi = \pi / 64$: а – сигнал у часовій області, б – амплітудна характеристика $|Wf(a,b)|$ вейвлет-спектра АВП, в – фазова характеристика $\arg Wf(a,b)$ вейвлет-спектра АВП

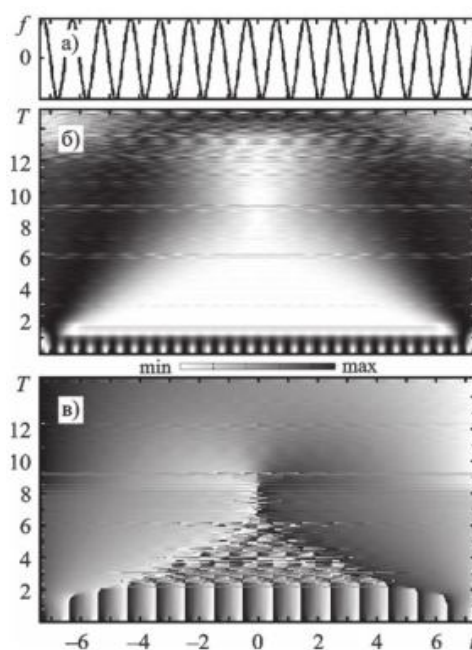


Рис. 8. АВП різкого стрибка фази гармонійного сигналу при $\Delta\varphi = 0$: а – сигнал у часовій області, б – амплітудна характеристика $|Wf(a,b)|$ вейвлет-спектра АВП, в – фазова характеристика $\arg Wf(a,b)$ вейвлет-спектра АВП

Низькочастотний фільтр можна знову розкласти за принципом на два фільтри та піддати децимації. Це другий рівень складності. Таким чином, може бути створена система вейвлет-фільтрів, які реалізують операцію розкладання сигналу того чи іншого рівня, а операція послідовного розбивання низькочастотних фільтрів та поступового огрубіння сигналу носить назву пірамідального алгоритму Малла.

Реальний сигнал, який аналізується $f(t)$ завжди виявляється заданий кінцевою кількістю крапок N . Тому максимальна кількість рівнів розкладання L_{\max} ($L_{\max} \in N$), N – множина натуральних чисел) також є обмеженою. Вона визначається співвідношенням $L_{\max} \log_2 N$.

Останнім, як спотворюється сигнал, що відновлюється, при відкиданні L перших рівней розкладання в його дискретному вейвлет-спектрі. Слід пам'ятати, що рівням з меншими номерами відповідають більш високочастотні компоненти. Мірою якості відновленого сигналу вважаємо функціонал $C[f, f_L]$, він визначається співвідношенням

$$C \equiv C[f, f_L] = \sqrt{A^2 + (B - 1)^2},$$

$$\text{де } A \equiv A[f, f_L] = \frac{\overline{(f_L(t) - f(t))^2}}{f^2(t)} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (f_L(t) - f(t))^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt},$$

$$B \equiv B[f, f_L] = \frac{\overline{f_L(t)f(t)}}{f^2(t)} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f_L(t)f(t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt}.$$

де, f – вихідний сигнал, f_L – відновлений сигнал з відкиданням L перших рівнів розкладання в дискретному вейвлет-спектрі сигналу f . Мінімальне значення функціоналу $C=0$ відповідає повністю відновленому сигналу.

3. Аналіз результатів

Для прикладу розглянемо відновлення сигналів f_3 та f_{12} , які розкладені за допомогою вейвлетів db2 та coif1 відповідно. Результати цього процесу наведені на. На них графіки згруповані парами за принципом: сигнал та нижче нього відповідний дискретний вейвлет-спектр. Сигнал, що аналізуємо $f(t)$ знаходиться в верхньому лівому куту кожного рисунку. Інші пари представляють з себе відновлені з відкиданням L перших рівнів розкладання сигналу $f_L(t)$. Пунктирною лінією для порівняння показаний початковий сигнал $f(t)$. На кожному графіці $f_L(t)$ показане також відповідне значення функціоналу $C[f, f_L]$.

З аналізу відновлення сигналів f_3 та f_{12} , які розкладені за допомогою оптимальних вейвлетів db2 та coif1 відповідно, встановлено, що для відновлення імпульсної перешкоди, яка накладена на гармонійний сигнал, потрібні практично всі існуючі в даному випадку рівні розкладання ($L=L_{\max}=10$) при чому

рівні з середніми номерами $L = 5 \dots 7$ відповідають за відновлення гармонійного сигналу, а з мінімальними номерами $L \approx 1 \dots 3$ – самій імпульсній перешкоді. Аналогічна ситуація спостерігається при аналізі накладення шпиль на гармонійний сигнал, хоча тут кількість необхідних для майже повного відновлення сигналу $C \approx 0.01$ рівнів розкладання виявляється меншим ($L=6$ з можливих $L_{\max}=10$).

Висновки

Аналітичним і чисельним шляхом обчислені комплексні вейвлет-спектри модельних сигналів. Показано, що фазова характеристика, яка отримана з комплексного вейвлет-спектру, переважна при виявленні локальних особливостей сигналу навіть в разі відносної малості параметра, що характеризує особливість. При аналізі сигналів з особливостями рекомендується спільне вживання НВП, ДВП і АВП, які добре доповнюють один одного.

Продемонстрована ефективність ДВП при аналізі сигналів з особливостями. На основі критерію мінімізації ентропії рекомендовані оптимальні вейвлети для кожної конкретної моделі сигналу.

Проведено відновлення модельних сигналів по їх дискретному вейвлет-спектру з врахуванням заданої кількості рівнів розкладання в базисі оптимального вейвлету.

Список літератури

1. Tutschku K. Traffic estimation and characterization for the design of mobile communication networks / K. Tutschku, T. Leskien, P. Tran-Gia // COST257TD(97)47, 1997. – 460 p.
2. Schuster H.G. Deterministic Chaos: An Introduction. VCH / H.G. Schuster. – New York, 1988. 2nd Edition. – 360 p.
3. Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов: Коллективная монография / Г.А. Кучук, А.А. Можжаев, Р.Э. Пащенко, К.М. Рук кас и др. – Х.: ЭкоПерспектива, 2006. – 360 с.
4. Можжаев О.О. Моделирование трафика телекоммуникационных сетей на базе масштабной инвариантности // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил / О.О. Можжаев. – Х.: ХУПС, 2006. – Вип. 6 (12). – С. 79-82.
5. Можжаев О.О. Моделирование телекоммуникационного трафика гетерогенной сети нелинейными динамическими системами / О.О. Можжаев // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2007. – Вип. 9(67). – С. 75-78.
6. Исследование поведения фазовой траектории телекоммуникационного трафика гетерогенной сети передачи данных / А.А. Можжаев, С.М. Порошин, В.Е. Кузьменко, М.А. Можжаев // Системы управления, навигации та зв'язку. – К., 2011. – Вип. 2(18). – С. 255-259.
7. В.В. Казімірова Особливості вейвлет-моделирования фрактального трафика мультисервисных сетей передачи информации / В.В. Казімірова // ЦНИИ УНУС, К., 2012.
8. Можжаев О.О. Передача информации у гетерогенных компьютерных сетях: Монография / О.О. Можжаев. – Х., НТУ «ХПИ», 2012. – 224 с.

Надійшла до редколегії 25.04.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.М. Порошин, Національний технічний університет «ХПИ», Харків.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕЙВЛЕТ- ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАФИКА МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЕЙ

А.А. Можаяев, Н.В. Раковская, В.В. Казиминова

В данной статье были вычислены комплексные вейвлет-спектры модельных сигналов. Показано, что фазовая характеристика, полученная из комплексного вейвлет-спектра, преобладающая при выявлении локальных особенностей сигнала даже в условиях относительной малости параметра, характеризующего особенность. Продемонстрирована эффективность ДВП при анализе сигналов с особенностями. На основе критерия минимизации энтропии рекомендовано оптимальные вейвлеты для каждой конкретной модели сигнала.

Ключевые слова: фрактальность, вейвлет-анализ, модельный сигнал.

OPTIMIZATION APPLICATION OF WAVELET- DEFINITION TRANSFORMATIONS FOR PERFORMANCE TRAFFIC MULTISERVICE NETWORKS

AA Mozhaev, N.H. Rakovskaya, V.V. Kazimirova

The complex wavelet-specter of model signals were calculated in this article. It is rotined that a phase-shift-frequency, got from a complex wavelet-specter prevailing at the exposure of local features of signal even in the conditions of relative triffle of parameter, characterizing a feature. Efficiency of DVP is shown at the analysis of signals with features. On the basis of criterion of minimization of энтропии optimum wavelet is recommended for every concrete model of signal.

Keywords: fractal, wavelet analysis, model signal.