Ідентифікація радіочастотного каналу передачі даних в частотній області на основі рядів Вольтерра

В.Д. Павленко, В.О. Сперанський

Інститут комп'ютерних систем
Одеський національний політехнічний університет
65044, Україна, Одеса, пр. Шевченка, 1
pavlenko_vitalij@mail.ru

Анотація

В роботі представлено ефективну методику експериментальних досліджень неперервного каналу зв'язку телекомунікаційної системи з метою ідентифікації його амплітудно–частотних характеристик (АЧХ) на основі моделей Вольтерра. Методика основана на використанні інтерполяційного методу ідентифікації нелінійної динамічної системи шляхом побудови лінійних комбінацій відгуків системи, що досліджується, на тестові полігармонічні сигнали з різними амплітудами. Розроблені апаратно–програмні засоби, які реалізують методику ідентифікації, використовуються для побудови інформаційної моделі радіочастотного каналу зв'язку УКХ–діапазону у вигляді АЧХ першого та другого порядків.

1. Вступ

Для ефективного використання каналу зв'язку потрібно враховувати технічні умови використання каналу зв'язку (КЗ). Зміни умов під час передавання даних у цифрових КЗ можуть приводити до зниження швидкості аж до повного переривання передачі, а в аналогових КЗ можуть приводити до появлення як нелінійних спотворень так і шуму у сигналах, що приймаються.

Було розроблено нові методи та допоміжні засоби, які дозволяють автоматизувати вимірювання та контроль характеристик КЗ. Також вони допомагають побудувати інформаційну модель нелінійного динамічного об'єкту, яким є КЗ. Таким чином вирішується задача ідентифікації.

Метою цієї роботи є ідентифікація неперервного КЗ в частотній області використовуючи модель Вольтерра, а саме визначення його багаточастотних характеристик використовуючи дані експерименту типу «вхід–вихід». Для проведення експерименту використовуються полігармонічні сигнали та інтерполяційний метод для визначення коефіцієнтів моделі.

2. Ідентифікація динамічних систем у частотній області і моделі Вольтерра

У звичайному випадку співвідношення "вхід–вихід" для нелінійної динамічної системи (НДС) може бути представлена за допомогою інтегро–степеневих рядів Вольтерра [2, 3]. У роботі пропонується інтерполяційний метод для ідентифікації НДС, який базується на апараті рядів Вольтерра [4]. В цьому методі для розділення відгуку цієї системи на парціальні складові $\hat{y}_n(t)$ використовується n–кратне диференціювання вихідного сигналу по параметру–амплітуді A тестових впливів [5]. Якщо на вхід системи подати тестовий сигнал виду $ax(t)$, де $x(t)$ — довільна функція; $|a|\le 1$ — масштабний коефіцієнт, то для виділення парціальної складової n–го порядку $\hat{y}_n(t)$ з вимірюваного відгуку НДС $y[ax(t)]$ необхідно знайти n–ну частинну похідну відгуку по амплітуді a при $a=0$

$$\hat{y}_n(t)=\int_0^t \underset{n\ разів}{\ldots} \int_0^t w_n(\tau_1,\ldots,\tau_n)\prod_{r=1}^{n} x(t-\tau_r)d\tau_r = \\ =\frac{1}{n!}\frac{\partial^n y[a\,x(t)]}{\partial a^n}\bigg|_{a=0}. \tag{1}$$

Парціальні складові відгуків $\hat{y}_n(t)$ обчислюються за допомогою тестових впливів та процедури (1). На основі цих парціальних складових визначаються діагональний і піддіагональні перетини ядер Вольтерра.

Отримано формули для чисельного диференціювання при використанні центральних різниць для рівновіддалених вузлів $y_r = y[rhx(t)],\ r=-r_1,-r_1+1,\ldots,r_2$ з кроком різницевої сітки по амплітуді $h=\Delta a$. Для визначення ядер Вольтерра першого порядку обчислюється перша похідна при $r_1=r_2=1$ або $r_1=r_2=2$ відповідно

$$y_0'=y'(0)=\frac{1}{2h}(-y_{-1}+y_1), \\ y_0'=\frac{1}{12h}(y_{-2}-8y_{-1}+8y_1-y_2). \tag{2}$$

Для визначення ядер Вольтерра другого порядку обчислюється друга похідна при $r_1=r_2=1$ або $r_1=r_2=2$, відповідно

$$y_0''=y''(0)=\frac{1}{h^2}(y_{-1}+y_1), \\ y_0''=\frac{1}{12h^2}(-y_{-2}+16y_{-1}+16y_1-y_2). \tag{3}$$

В таблиці 1 показані амплітуди тестових сигналів $a_{Ni}^{(k)}$, та відповідні до них коефіцієнти $c_{Ni}^{(k)}$, де k – порядок ядра Вольтера, що оцінюється; i – порядковий номер експерименту ($i=1,2,\ldots,N$); N – кількість інтерполяційних вузлів або кількість експериментів ідентифікації.

Таблиця 1: Амплітуди і відповідні їм коефіцієнти для інтерполяційного методу

Порядок ядра, k	Кількість експериментів, N	$a_1^{(k)}$	$a_2^{(k)}$	$a_3^{(k)}$	$a_4^{(k)}$	$a_5^{(k)}$	$a_6^{(k)}$	$c_1^{(k)}$	$c_2^{(k)}$	$c_3^{(k)}$	$c_4^{(k)}$	$c_5^{(k)}$	$c_6^{(k)}$
1	2	–1	1					–0,5	0,5				
	4	–1	–0,5	0,5	1			0,0833	–0,6667	0,6667	–0,0833		
	6	–1	–0.67	–0,33	0,33	0,67	1	–0,0167	0,15	–0,75	0,75	–0,15	0,0167
2	2	–1	1					1	1				
	4	–1	–0,5	0,5	1			–0,0833	1,3333	1,3333	–0,0833		
	6	–1	–0.67	–0,33	0,33	0,67	1	0,0111	–0,15	1,5	1,5	–0,15	0,0111

У [6] було показано, що під час визначення багатовимірних передатних функцій нелінійних систем необхідно враховувати обмеження, що накладаються на вибір частот тестового полігармонічного сигналу, які забезпечують нерівність комбінаційних частот у гармоніках вихідного сигналу [7].

Описаний метод було перевірено на нелінійному тестовому об’єкті[8].

Результати процедури ідентифікації у вигляді АЧХ та ФЧХ першого порядку, які були отримані для моделі, з кількістю експериментів N=4 (рис. 1).

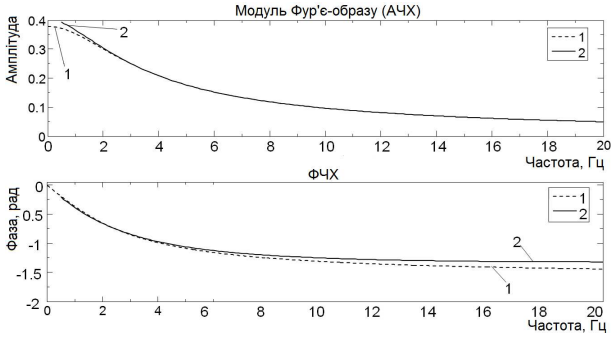

Рисунок 1: АЧХ та ФЧХ першого порядку для тестового об’єкту: еталонні значення, отримані за допомогою аналітичних виразів (1), значення оцінки АЧХ з N=4 (2).

Результати процедури ідентифікації у вигляді АЧХ та ФЧХ другого порядку, які були отримані для моделі, з кількістю експериментів N=2 та N=4 (рис. 2).

3. Методика та апаратно–програмні засоби ідентифікації радіочастотного КЗ

У межах експерименту було виконано дослідження каналу зв’язку УКХ–діапазону. Головною метою була ідентифікація багаточастотних характеристик, які показують нелінійні та динамічні властивості КЗ, для чого було використано модель Вольтерра у вигляді полінома другої степені. Фізичні властивості КЗ характеризуються передатними функціями $W_1(j2\pi f)$ та $W_2(j2\pi f_1, j2\pi f_2)$ − Фурье–відображеннями вагових функцій $w_1(t)$ та $w_2(t_1, t_2)$.

Метод ідентифікації реалізовано на базі комп'ютера IBM PC за допомогою розробленого програмного забезпечення в середовищі Matlab, що дозволяє забезпечити зручну взаємодію з Multimedia API Windows. Програмні засоби дозволяють: автоматизувати процес формування тестових сигналів із заданими параметрами — амплітудами і частотами; передавати та приймати сигнали через вихідний і вхідний тракт звукової карти комп'ютера; проводити сегментацію файлу відгуків на фрагменти, відповідні до реакцій досліджуваного КЗ на тестові полігармонічні впливи з різними амплітудами.

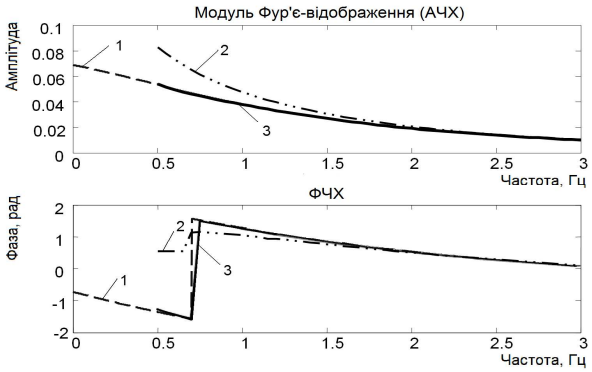

Рисунок 2: Піддіагональні перетини АЧХ та ФЧХ другого порядку для тестового об’єкту: значення, отримані за допомогою аналітичних виразів (1), значення оцінки перетину з N=2 (2), N=4 (3)

В експериментальних дослідженнях були використані дві ідентичні УКХ–радіостанції S.P.RADIO A/S, RT2048VHF (діапазон робочих частот 154,4−163,75 МГц) та IBM PC–сумісний комп’ютер зі звуковими картами Creative Audigy 4. Послідовно визначались АЧХ першого та другого порядку. Була обрана кількість експериментів для даного методу ідентифікації N=4. Структурні схеми процедури ідентифікації – визначення АЧХ першого та другого порядку для КЗ відповідно на рис. 3 та 4.

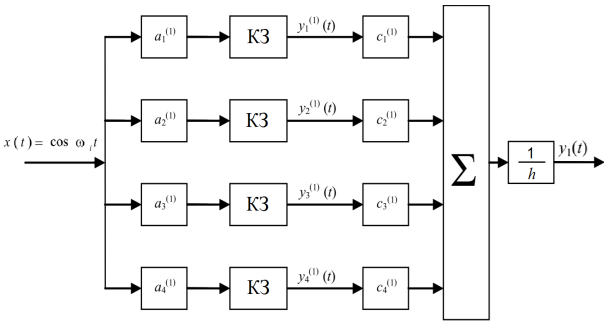

Рисунок 3: Структурна схема ідентифікації з використанням моделі Вольтерра 1ro порядку в частотній області, кількість експериментів N=4: a_1=–2h, a_2=–h, a_3=h, a_4=2h; c_1=–1/12, c_2=–2/3, c_3=2/3, c_4=1/12.

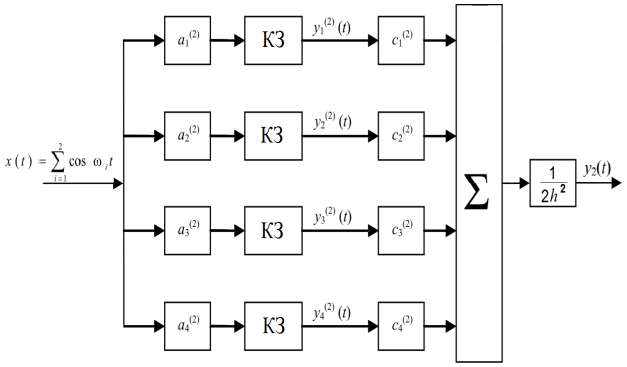

Рисунок 4: Структурна схема ідентифікації з використанням моделі Вольтерра 2го порядку в частотній області, кількість експериментів N=4: a_1=–2h, a_2=–h, a_3=h, a_4=2h; c_1=1/12, c_2=4/3, c_3=4/3, c_4=–1/12.

Відгуки КЗ $y[a_i x(t)]$ на тестові сигнали $a_i x(t)$ складають групу сигналів, кількість яких співпадає з кількістю проведених експериментів для кожної точки характеристики N (N=4, рис. 5). У кожній наступній групі частота сигналів збільшується на величину обраного у програмі кроку.

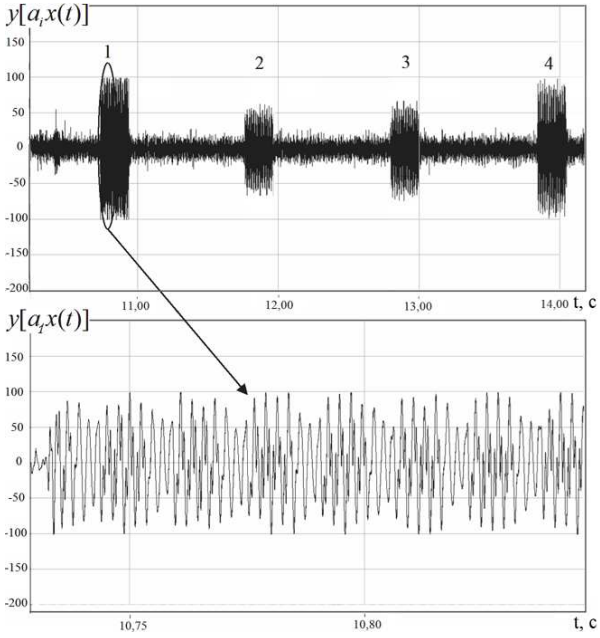

Рисунок 5: Група сигналів, яка була прийнята з КЗ, амплітуди: –1 (1); –1/2 (2); 1/2 (3); 1 (4); N=4

Максимальна амплітуда, яка була використана під час експерименту зі звуковими картами A=0,25V (було визначено експериментально). Використовуваний діапазон частот визначався смугою пропущення звукової карти 20…20000 Гц, згідно з паспортними даними виробника. Частоти тестових сигналів вибиралися із цього діапазону з урахуванням обмежень [7]. Для проведення експерименту були обрані наступні значення параметрів: початкова частота f_s =125 Гц; кінцева частота f_e =3125 Гц; крок змінювання частоти Δf=125 Гц; для визначення АЧХ другого порядку зсув між частотами $\delta f = f_2 - f_1$ поступово збільшувався з 201 до 3401 Гц с кроком 100 Гц.

З прийнятих сигналів – відгуків кожної групи формувалась виважена сума $y_1(t)$ та $y_2(t)$ (рис. 3 та 4). При n=1 і n=2 отримуємо парціальну складову відгуку КЗ $y_1(t)$ і $y_2(t)$ відповідно Для кожної парціальної складової відгуку знаходиться перетворення Фур'є (використовується швидке перетворення Фур'є) і з отриманих спектрів виділяються тільки інформативні гармоніки, амплітуди яких являють собою значення шуканих характеристик АЧХ першого й другого порядків.

АЧХ першого порядку $|W_1(j2\pi f)|$ отримана, виділяючи в спектрі парціальної складової відгуку КЗ $y_1(t)$ на тестовий сигнал $x(t)=A/2(\cos 2\pi ft)$ гармоніку із частотою f.

АЧХ другого порядку $|W_2(j2\pi f, j2\pi(f+\delta f))|$, де $f_1=f$ та $f_2=f+\delta f$ отримана шляхом виділення гармонічних складових з сумарною частотою f_1+f_2 з спектру парціального відгуку КЗ $y_2(t)$ на тестовий сигнал $x(t)=(A/2)(\cos 2\pi f_1 t+\cos 2\pi f_2 t)$.

Для згладжування вихідних даних експерименту використовувалось вейвлет–шумознижування [9]. Результати, які були отримані після цифрової обробки даних експериментів (“Coiflet” вейвлет–шумознижування) для АЧХ першого та другого порядків, представлені на рис. 6–8.

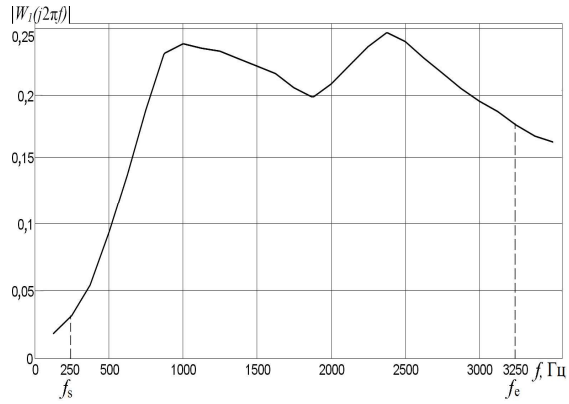

Рисунок 6: АЧХ першого порядку після процедури вейвлет–шумознижування “Coiflet” 2[ro] рівня

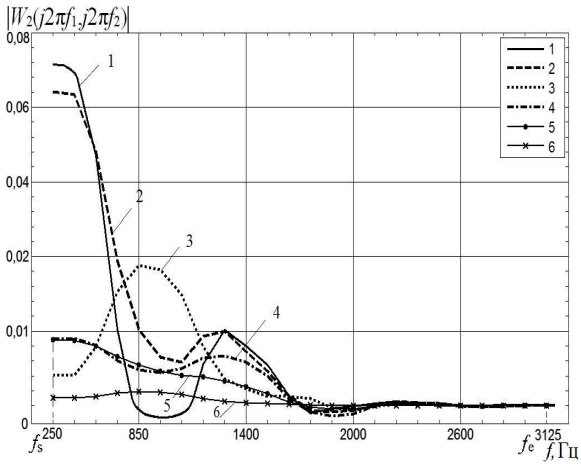

Рисунок 7: Піддіагональні перетини АЧХ другого порядку після процедури вейвлет–шумозниження

“Coiflet” 2го рівня на різних тестових частотах: 201 (1), 401 (2), 601 (3), 801 (4), 1001 (5), 1401 (6) Гц

Поверхню, зображену на рис. 8, побудовано з піддиагональних перетинів, які було отримано з серій послідовних експериментів з різними величинами зсуву δf між тестовими частотами полігармонічного сигналу.

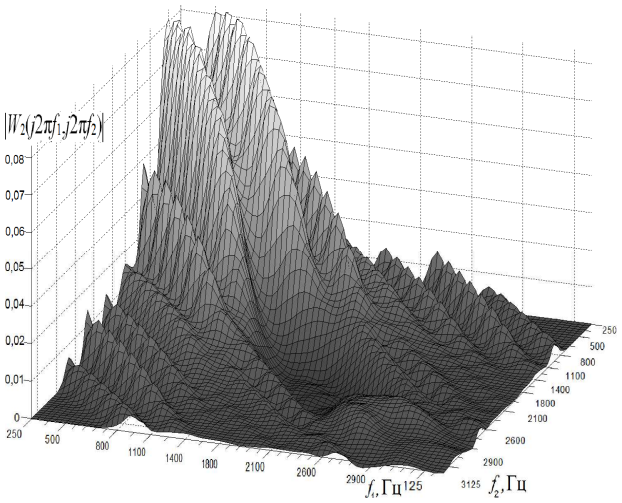

Рисунок 8: Поверхня, побудована з серій АЧХ другого порядку після процедури вейвлет–шумознижування “Coiflet” 3го рівня

4. Висновок

Проаналізовано метод ідентифікації нелінійних динамічних систем, який базується на моделі Вольтерра з використанням полігармонічних тестових сигналів. Для виділення відгуків об’єкту на парціальні складові використано метод, який базується на композиції лінійних відгуків на тестові сигнали з різними амплітудами.

Було визначено нові значення амплітуд тестових сигналів і вони значно підвищують точність ідентифікації у порівнянні з амплітудами і коефіцієнтами, які використовувались у [10]. Точність ідентифікації нелінійної частини для тестового об’єкту виросла майже у 10 разів, середньоквадратична похибка отриманих характеристик відносно аналітично отриманих виразів не перебільшує 5%.

Для побудови інформаційної моделі Вольтерра у вигляді АЧХ першого та другого порядків для радіоканалу УКХ–діапазону використовувалась апаратна схема, яка була описана у [4] та новий інтерполяційний метод ідентифікації.

Отримані результати показують значну нелінійність КЗ і це призводить до пошкоджень сигналів у пристроях передавання даних, знижують важливі показники телекомунікаційних систем: точність відтворення сигналів, пропускну здатність каналу, шумозахищеність.

5. Література

[1] Giannakis, G.B. and Serpedin, E. “A bibliography on nonlinear system identification and its applications in signal processing, communications and biomedical engineering”, *Signal Processing – EURASIP, Elsevier Science B.V.*, 81(3): 533-580, 2001.

[2] Westwick, D.T. *Methods for the Identification of Multiple–Input Nonlinear Systems*, Departments of Electrical Engineering and Biomedical Engineering, McGill University, Montreal, Quebec, Canada, 1995.

[3] Doyle, F.J, Pearson, R.K., Ogunnaike, B.A. *Identification and Control Using Volterra Models*. Published Springer Technology & Industrial Arts, p. 314, 2001.

[4] Pavlenko, V.D. and Speranskyy, V.O. “Identification of Nonlinear Dynamical Systems Using Volterra Model with Interpolation Method in Frequency Domain”, *Electrotechic and Computer Systems*. – 2012. – № 05 (81). – p. 229–234.

[5] Schetzen, M. *The Volterra and Wiener Theories of Nonlinear Systems*. Wiley & Sons, New York, 1980.

[6] Павленко, В.Д., Сперанский, В.А. “Автоматизированная система контроля каналов связи телекоммуникационных систем” – *В сб.: “Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации и их внедрение на российских предприятиях”: Труды международной научно–практической конференции, Москва, 4–8 апреля 2011 г.* – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2011. – С. 1023.

[7] Павленко, В.Д., Исса, С.И.М., “Ограничения выбора частот тестовых полигармонических сигналов для идентификации нелинейной системы”, *Тр. Одес. политехн. ун–та*. — Одесса, 2009.—Вып. 1 (31). — С. 107 — 113.

[8] Pavlenko, V.D., Speranskyy, V.O., Ilyin, V.I., Lomovoy, V.I., “Modified Approximation Method for Identification of Nonlinear Systems Using Volterra Models in Frequency Domain”, *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Circuits, Systems, Signal and Telecommunications. Harvard, Cambridge, USA. January 25-27, 2012*. - Published by WSEAS Press, 2012. P. 423-428

[9] Goswami, J.G. and Chan., A.K., *Fundamentals of Wavelets: Theory, Algorithms, and Applications*, Publishing John Wiley&Sons, Inc., p. 447, 1999.

[10] Данилов, Л.В., Матханов, П.Н., Филиппов, Е.С.. *Теория нелинейных электрических цепей*, Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.