

Методи та Засоби Трійкових Симетричних Перетворень для Цифрової Обробки Інформації

Артем Ізмайлов
кафедра комп'ютерних наук та інформаційних систем
Прикарпатський національний університет
Івано-Франківськ, Україна
aiartefact@gmail.com

Methods and Devices of Symmetric Ternary Transforms for Digital Information Processing

Artem Izmailov
dept. of Computer Science and Information Systems
Precarpathian National University
Ivano-Frankivsk, Ukraine
aiartefact@gmail.com

Анотація—На основі трійкових симетричних функцій синтезовано відповідні дискретні ортогональне та вейвлет-перетворення. Для застосування синтезованих методів для цифрової обробки інформації запропоновано засоби відповідних перетворень. Доведено ефективність застосування запропонованих засобів для зменшення обсягу пам'яті для зберігання даних у системах цифрової обробки інформації у прикладних галузях.

Abstract—Orthogonal and wavelet transforms are basic methods for processing of the digital data. Properties of these methods depend on function systems they are based on. At the same time, existing transforms do not always satisfy rising demands for data processing quality. Therefore, synthesis of the new transforms is an actual problem of digital information processing. This paper deals with the discrete orthogonal and wavelet transforms synthesized on the basis of symmetric ternary functions. In order to apply their advantages in digital information processing, the respective devices were introduced. These devices were applied in systems for processing of the high correlated data (gas accounting and transmission control; control of the drilling process for oil and gas wells). Application of the introduced devices allowed to reduce the amount of memory required for data storage up to 20% depending on data type.

Ключові слова—цифрова обробка інформації; дискретне ортогональне перетворення; дискретне вейвлет-перетворення; трійкові симетричні функції

Keywords—digital information processing; discrete orthogonal transform; discrete wavelet transform; symmetric ternary functions

I. ВСТУП

Розвиток науки і техніки зумовив появу нових задач у різних галузях економіки, управління, виробництва та зв'язку. Для розв'язання цих задач застосовано технічні системи, які функціонують під управлінням комп'ютерних систем. Функціонування таких систем пов'язане з обробкою цифрових даних, яка забезпечена застосуванням методів та засобів цифрової обробки інформації (ЦОІ) [1–5].

Основними методами обробки цифрових даних є ортогональні та вейвлет-перетворення, в основі яких лежать системи функцій, якими визначено властивості відповідних перетворень [1–5]. У зв'язку з розширенням переліку прикладних галузей ЦОІ, існуючі перетворення не завжди задовольняють вимоги щодо якості результатів обробки даних [1–7]. Цим зумовлена актуальність синтезу нових перетворень та удосконалення існуючих.

Актуальним завданням ЦОІ є зменшення обсягу пам'яті для зберігання даних [1, 3]. Одним із підходів до розв'язання цього завдання є застосування ортогональних та вейвлет-перетворень [1–5]. При цьому підході зберігають не самі дані, а коефіцієнти перетворення, частина з яких рівна нулю або близька до нуля. Такі коефіцієнти відкидають, а при відновленні даних – замінюють нулями [1–5].

Аналіз останніх досліджень вказує на те, що трійкові симетричні функції (ТСФ) раніше не застосовувались у якості основи ортогональних та вейвлет-перетворень [2,

6, 7]. При цьому, доведено ефективність застосування трійкового симетричного кодування, породженого ТСФ, у системах ЦОІ, яке забезпечило приріст ефективності в межах 25÷30% за критерієм інформаційної потужності кодової матриці у порівнянні з відомими кодовими системами [8, 9]. Відповідно, застосування трійкового симетричного кодування у системах ЦОІ зменшує обсяг пам'яті для зберігання даних. Цим зумовлена актуальність аналізу ефективності застосування ТСФ у якості базису ортогональних та вейвлет-перетворень.

Метою дослідження є зменшення обсягу пам'яті для зберігання корельованих даних шляхом розробки методів та засобів цифрової обробки інформації на основі трійкових симетричних перетворень.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в успішному синтезі методів та засобів дискретних ортогонального та вейвлет-перетворень на основі системи ТСФ та їх застосуванні у системах ЦОІ корельованих даних, що дозволило зменшити обсяг пам'яті для зберігання даних у таких системах.

II. ТРІЙКОВЕ СИМЕТРИЧНЕ ОРТОГОНАЛЬНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ

В основі трійкових симетричних перетворень лежить система ТСФ. При цьому, у зв'язку з недоліками цієї системи [10, 11] застосовується система ортогоналізованих добутоків ТСФ. На основі функцій цієї системи безпосередньо синтезовано трійкове симетричне ортогональне перетворення (ТСОП), яке обчислюється у вигляді

$$Y = T_n X, \quad (1)$$

де Y – вектор коефіцієнтів перетворення, T_n – матриця перетворення розміру n , X – вектор вхідних даних.

Матриця T_n у виразі (1) є ортогональною, що забезпечено множенням матриці значень системи ортогоналізованих добутоків ТСФ на нормуючі множники, уведені у [11]. Матриця ТСОП розміру 9 T_9 має наступний вигляд

$$T_9 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -\sqrt{3/2} & -\sqrt{3/2} & -\sqrt{3/2} & 0 & 0 & 0 & \sqrt{3/2} & \sqrt{3/2} & \sqrt{3/2} \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & -\sqrt{2} & -\sqrt{2} & -\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ -3/2 & 0 & 3/2 & 0 & 0 & 0 & -3/2 & 0 & 3/2 \\ 3/2 & 0 & -3/2 & 0 & 0 & 0 & -3/2 & 0 & 3/2 \\ 0 & 0 & 0 & -3/\sqrt{2} & 0 & 3/\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & -\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & -\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ -\sqrt{3/2} & \sqrt{3} & -\sqrt{3/2} & 0 & 0 & 0 & \sqrt{3/2} & -\sqrt{3} & \sqrt{3/2} \\ 1/2 & -1 & 1/2 & -1 & 2 & -1 & 1/2 & -1 & 1/2 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

У зв'язку з ортогональністю матриць вигляду (2) обернене ТСОП обчислюється у вигляді

$$X = (T_n)^T Y, \quad (3)$$

де $(T_n)^T$ – транспонована матриця перетворення розміру n .

Матриці виду T_n допускають обчислення матриць старших порядків на основі молодших. На основі цієї властивості розроблено швидкий метод реалізації перетворень (1) та (3), який наведено у [11]. Зазначений швидкий метод ТСОП застосовано для створення засобу ТСОП, структурна схема якого наведена на рис. 1.

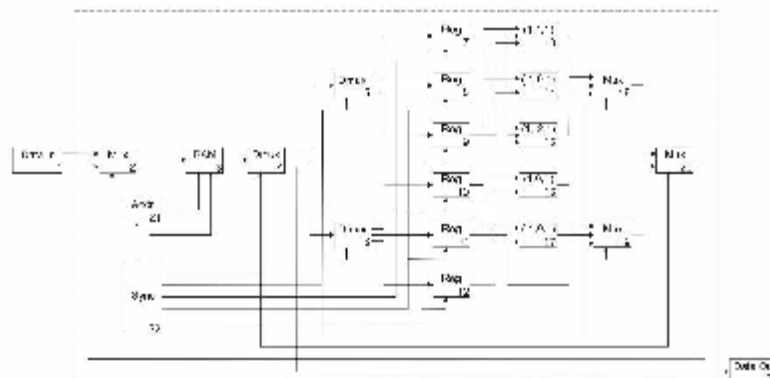


Рис. 1. Структурна схема засобу ТСОП

Засіб ТСОП (рис. 1) складається з інформаційного входу 1, мультиплексорів 2, 18-20, блоку пам'яті 3, демультіплексорів 4-6, регістрів пам'яті 7-12, операційного блоку $(x_0+x_1)+x_2$ 13, операційних блоків $(-x_0+x_1)$ 14, 17, операційного блоку $(x_0+x_1)-2x_2$ 15, операційного блоку (x_0+x_1) 16, генератора адрес 21, блоку синхронізації 22 та інформаційного виходу 23. Для спрощення процедури синтезу та моделювання роботи запропонованого засобу, його реалізовано засобами ПЛІС. Така реалізація передбачає, також, спрощення імплементації засобу ТСОП у системах ЦОІ.

III. ТРИЙКОВЕ СИМЕТРИЧНЕ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ

Властивості функцій системи ортогоналізованих добутків ТСФ вказують на те, що їх можна застосувати у якості вейвлет-функцій для синтезу відповідного дискретного трійкового симетричного вейвлет-перетворення (ТСВП) [10]. При цьому, у такому перетворенні, зважаючи на особливості побудови системи ТСФ, застосовано два материнські вейвлети та одну масштабну функцію [12]. Першим материнським вейвлетом визначено функцію, значення якої наведено у другому рядку матриці (2), другим – функцію у третьому рядку матриці (2), а у якості масштабної функції визначено одиничну функцію (перший рядок матриці (2)).

Дискретне ТСВП у обчислювальних засобах реалізовано у фільтровій формі із застосуванням операцій згортки та трійкової децимації (проріджування). Для позначення цієї операції та оберненої до неї уведено відповідні оператори

$$\downarrow_3 [X], \quad (4)$$

де X – дискретний вхідний набір даних довільної скінченної довжини,

$$\uparrow_3 [X]. \quad (5)$$

Оператор (4) з вхідного набору даних X залишає кожен третій елемент, відкидаючи решту, а оператор (5) – після кожного елемента вхідного набору даних X додає два нульових елементи. Із застосуванням операторів (4) та (5) пряме дискретне ТСВП у згортковій формі записано у вигляді

$$\begin{aligned} a_{j+1} &= \downarrow_3 [a_j * h^*], d1_{j+1} = \downarrow_3 [a_j * g1^*], \\ d2_{j+1} &= \downarrow_3 [a_j * g2^*], \end{aligned} \quad (6)$$

де a_j – послідовність апроксимуючих коефіцієнтів, одержаних на j -ій ітерації алгоритму ТСВП, $d1_j$ – послідовність деталізуючих коефіцієнтів, одержаних на j -ій ітерації алгоритму ТСВП, які відповідають першому материнському вейвлету, $d2_j$ – послідовність деталізуючих коефіцієнтів, одержаних на j -ій ітерації алгоритму ТСВП, які відповідають другому материнському вейвлету, $*$ – операція згортки, h^* , $g1^*$, $g2^*$ – дискретні фільтри

декомпозиції, які двоїсті до фільтрів відновлення, наведених у таблиці 1.

TABLE 1. КОЕФІЦІЕНТИ ДИСКРЕТНИХ ФІЛЬТРІВ ВІДНОВЛЕННЯ ДЛЯ ТСВП

Позначення фільтру	Коефіцієнти фільтру	Функція, якій відповідає фільтр
$h[n]$	$\left\{ \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}} \right\}$	Масштабна функція
$g1[n]$	$\left\{ -\frac{1}{\sqrt{2}}, 0, \frac{1}{\sqrt{2}} \right\}$	Перший материнський вейвлет
$g2[n]$	$\left\{ \frac{1}{\sqrt{6}}, -\sqrt{\frac{2}{3}}, \frac{1}{\sqrt{6}} \right\}$	Другий материнський вейвлет

У термінах операторів (4) та (5) обернене дискретне ТСВП у згортковій формі записано у вигляді

$$a_j = \uparrow_3 [a_{j+1}] * h + \uparrow_3 [d1_{j+1}] * g1 + \uparrow_3 [d2_{j+1}] * g2, \quad (7)$$

де h , $g1$, $g2$ – дискретні фільтри відновлення (табл. 1).

У загальному випадку, у виразах (6) та (7) індекс $j \in Z$, однак, у практиці ЦОІ приймають $j \in N_0$, причому, у якості послідовності апроксимуючих коефіцієнтів a_0 (початкове наближення) покладають послідовність значень вхідного набору даних X [2, 5, 6].

На основі виразів (6) та (7) реалізовано процедуру обчислення ТСВП у відповідному апаратно-програмному засобі. Апаратна складова запропонованого засобу реалізована за допомогою мікроконтролера, а програмна – у вигляді додатку для встановлення на робочу станцію, до якої підключено апаратну складову. Така організація запропонованого засобу ТСВП спрощує його інтеграцію у системи ЦОІ, зокрема аналіз та зберігання результатів перетворення.

IV. ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАСОБІВ ТРИЙКОВИХ СИМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ

Дослідження ефективності застосування ТСОП для зменшення автокореляції вхідних даних з метою їх ущільнення вказали на максимальну перевагу цього перетворення за заданим критерієм у порівнянні з перетвореннями Уолша-Адамара та Хаара (як найбільш близьких за властивостями та областю застосування) у випадку високих ($>0,7$) значень автокореляції. Звідси випливає, що одним із застосувань запропонованого засобу ТСОП є системи обліку та контролю параметрів передачі газу, оскільки, вони оперують даними з високим рівнем автокореляції. Зокрема, оцінено ефективність застосування запропонованого засобу у якості компонента пристроїв, які архівують значення отриманих показників [13]. Застосування засобу ТСОП дозволило знизити значення автокореляції архівованих даних і збільшити ступінь їх ущільнення. Результати оцінки приросту кількості даних для зберігання у пристроях обліку та контролю параметрів передачі газу наведено у таблиці 2 та обчислено за наступною формулою

$$\left(\frac{T}{S} - 1\right) \cdot 100\% . \quad (8)$$

де S – кількість записів у архіві без застосування ТСОП, T – кількість записів у архіві із застосуванням ТСОП.

TABLE II. ПРИРІСТ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗБЕРІГАННЯ ДАНИХ ПРИСТРОЯМИ ОБЛІКУ ТА КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕДАЧІ ГАЗУ

№	Шифр пристрою	Тип запису	S	T	Приріст ефективності зберігання даних, %
1	ОЕ-22ЛА	Добовий	64	77	20,3125
2	ТЕМР-ОЕ	Добовий	126	153	21,4286
3		Зміна стану лічильника	540	657	21,6667
4		Зміна у конфігурації лічильника	128	155	21,0938

Результати проведеного аналізу ефективності (табл. 2) застосування запропонованого засобу ТСОП у якості компонента пристроїв обліку та контролю параметрів передачі газу, вказали на підвищення ефективності зберігання даних в середньому на 20%.

Запропонований засіб ТСВП застосовано у якості компонента пристрою реєстрації інформації комплексу засобів наземного контролю і керування процесом буріння нафтових і газових свердловин СКУБ-М2 [14]. Цей пристрій забезпечує ведення архіву даних, які пов'язані з циклічними процесами у буровому обладнанні і допускають ущільнення шляхом відкидання близьких до нуля коефіцієнтів вейвлет-перетворення.

Для оцінювання ефективності запропонованого засобу здійснено порівняння значень критерію середньої абсолютної похибки у відсотках MAPE (mean absolute percentage error) відновлення даних (9) [3] за частиною коефіцієнтів перетворення, одержаних для ТСВП (ST), вейвлета Хаара (haar), вейвлета Добеші 4-го порядку (db4) та біортогонального вейвлета з параметрами 2.6 (bior2.6) при відновленні послідовностей значень технологічного параметра моменту механічного лівого (табл. 3)

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{|X(i) - X_r(i)|}{X(i)} \cdot 100\% , \quad (9)$$

де N – кількість відліків у векторі вхідних даних X , $X(i)$ – вхідні дані, $X_r(i)$ – відновлені після ущільнення дані.

TABLE III. СЕРЕДНІ ЗНАЧЕННЯ MAPE ДЛЯ РІЗНИХ ВЕЙВЛЕТІВ ПРИ ВІДКИДАННІ 30% КОЕФІЦІЄНТІВ ПЕРЕТВОРЕННЯ

№	Вейвлет	Середнє значення MAPE, %
1	ST	3,2359
2	haar	4,0129
3	db4	3,4910
4	bior2.6	3,9712

З даних у таблиці 3 випливає, що застосування засобу ТСВП забезпечило наступний приріст ефективності за критерієм мінімальної похибки відновлення (9): у порівнянні з haar – 20%, db4 – 8%, bior2.6 – 18,5%.

ВИСНОВКИ

Застосування ТСОП та ТСВП забезпечило приріст ефективності ущільнення корельованих даних у системах ЦОІ на рівні 8÷20%. Одержані показники вказують на відповідне підвищення ефективності використання пам'яті у таких системах, що рівнозначно зменшенню обсягу пам'яті для зберігання даних при незмінному рівні функціональності. При цьому, однак, досягнутий результат забезпечений втратами частини інформації у межах допустимого значення похибки відновлення даних, яке для проаналізованих систем складає 5%. Подальші дослідження полягають у розширенні функціоналу запропонованих засобів та їх застосуванні у системах ЦОІ відмінних від проаналізованих.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Э. Айфичер, Б. Джервис. Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е издание: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 992 с.
- [2] P.S. Addison, The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance (Second Edition) / P.S. Addison, CRC Press, 2016, P. 446.
- [3] Д. Сэломон, Сжатие данных, изображений и звука / Д. Сэломон; пер. с англ. В.В. Чепыжова. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с.
- [4] N. Ahmed, K.R. Rao, Orthogonal Transforms for Digital Signal Processing, Springer-Verlag, 1975.
- [5] И. Добеши, Десять лекций по вейвлетам: Пер. с англ. / И. Добеши. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 464 с.
- [6] A. Thompson, The Cascading Haar Wavelet Algorithm for Computing the Walsh–Hadamard Transform / A. Thompson // IEEE Signal Processing Letters. – July 2017. – Vol. 24, No. 7. – P. 1020-1023. doi: 10.1109/LSP.2017.2705247
- [7] S. Prasad, Information Fusion in the Redundant-Wavelet-Transform Domain for Noise-Robust Hyperspectral Classification / S. Prasad, W. Li, J.E. Fowler, L.M. Bruce // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – September 2012. – Vol. 50, No. 9. – P. 3474-3486. doi: 10.1109/TGRS.2012.2185053
- [8] A. Izmailov, "Effectiveness analysis of bases and function systems used in digital information processing," in Materiały 52 Konferencji Studenckich Kół Naukowych Pionu Hutniczego, Kraków, 2015.
- [9] B. Hayes, Computing science. Third base. A reprint from American Scientist, the magazine of Sigma Xi, the Scientific Research Society, vol. 89, Nr. 6. November–December 2001, pp. 490-494
- [10] A. Izmailov, L. Petryshyn, "Symmetric ternary functions and their application in orthogonal transforms," 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kiev, 2017, P. 836-841. doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100364
- [11] А.В. Измайлов, Л.Б. Петришин, "Цифрова обробка інформації в розосереджених системах управління із застосуванням швидкого ортогонального перетворення на основі трійкових симетричних функцій," Системи обробки інформації, № 3 (154), сс. 79-89, 2018.
- [12] А.В. Измайлов, Л.Б. Петришин, "Дискретне трійкове симетричне вейвлет-перетворення та його застосування для цифрової обробки інформації у розподілених системах управління," в Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання: матеріали статей Міжнародної науково-практичної конференції, Івано-Франківськ, 2018. – сс. 152-155.
- [13] "ТОВ СЛОТ – Каталог продукції," ТОВ СЛОТ, 2018. [Online]. Available: <http://www.slot.if.ua/catalog/>. [Accessed 11 October 2018].
- [14] "Івано-Франківське СКБ ЗА. Каталог продукції. СКУБ-М2.," Івано-Франківське СКБ ЗА, 2018. [Online]. Available: http://skbza.if.ua/cat_5ua.htm. [Accessed 11 October 2018].