

Застосування Трійкового Симетричного Ортогонального Перетворення для Діагностування та Контролю Параметрів Процесів і Середовищ

Артем Ізмайлов

кафедра комп'ютерних наук та інформаційних систем
Прикарпатський національний університет імені В. Стефаника
Івано-Франківськ, Україна
artem.v.izmailov@gmail.com

Application of Symmetric Ternary Orthogonal Transform for Diagnostics and Monitoring of Parameters of Processes and Environments

Artem Izmailov

dept. of Computer Science and Information Systems
Vasyl Stefanyk Precarpathian National University
Ivano-Frankivsk, Ukraine
artem.v.izmailov@gmail.com

Анотація—У роботі запропоновано засіб дискретного трійкового симетричного ортогонального перетворення. За допомогою запропонованого засобу досліджено ефективність застосування перетворення у системах обліку та контролю параметрів передачі газу для зменшення обсягів пам'яті, необхідних для зберігання даних. Доведено, що запропоноване перетворення забезпечує кращі показники ущільнення даних у таких системах, у порівнянні з ортогональними перетвореннями Уолша та Хаара.

Abstract—In this paper the device for discrete symmetric ternary orthogonal transform was introduced. The proposed device was used to perform the effectiveness analysis of application of the described transform in systems of gas accounting and transmission control in order to reduce the amount of memory required for data storage. It was proved that the introduced transform ensures better data compression in such systems in comparison with Walsh and Haar orthogonal transforms.

Ключові слова—цифрова обробка інформації; дискретне ортогональне перетворення; трійкові симетричні функції; зменшення обсягів пам'яті

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

I. ВСТУП

Стрімкий розвиток різних галузей економіки зумовив необхідність у створенні комп'ютеризованих систем діагностування та контролю параметрів процесів і середовищ, у яких застосовуються компоненти цифрової обробки інформації [1 – 9]. Ефективність функціонування таких компонентів безпосередньо пов'язана із ефективністю перебігу відповідних економічних, у тому числі виробничих, процесів, що забезпечує актуальність досліджень, пов'язаних із удосконаленням існуючих та розробкою нових методів та засобів цифрової обробки інформації (ЦОІ).

Актуальним завданням ЦОІ є ущільнення даних, що у випадку систем діагностування та контролю параметрів процесів та середовищ забезпечує ефективне використання доступних обсягів пам'яті для зберігання даних, які у більшості випадків не перевищують значень відповідних показників для мобільних пристроїв [1 – 6, 8].



Інформаційні системи та технології ІСТ-2019

Секція 4.

Розпізнавання образів, цифрова обробка зображень і сигналів.

Ефективне використання пам'яті забезпечує підвищення точності процесів моніторингу стану обладнання та середовища за рахунок зберігання більшої кількості даних, на основі яких здійснюється моніторинг [1 – 3, 5, 6]. Одним із способів ущільнення даних є застосування декореляційних властивостей ортогональних перетворень (ОП) [2 – 4, 6]. При цьому, зниження рівня кореляції вхідних даних забезпечує нерівномірність розподілу їх енергії між коефіцієнтами перетворення, що забезпечує близькість до нуля частини коефіцієнтів [2 – 4, 6]. Такі коефіцієнти покладаються рівними нулю, що призводить до незначних втрат інформації у випадку відновлення послідовності вхідних даних за відповідними їм коефіцієнтами перетворення [2 – 4, 6]. Регулюванням порогових значень коефіцієнтів, які відкидаються, досягають допустимих значень похибок відновлення у залежності від області застосування [2, 4, 6].

Аналіз останніх досліджень у галузі ортогональних перетворень вказує на те, що дослідження щодо застосування ортогонального перетворення на основі трійкових симетричних функцій у системах діагностування та контролю параметрів процесів і середовищ не проводились [3 – 7]. Водночас, доведена ефективність застосування трійкового симетричного ортогонального перетворення для ущільнення даних на основі його декореляційних властивостей [8, 9]. Для запропонованого перетворення успішно синтезовано відповідне швидке перетворення, яке забезпечує його ефективну імплементацію у засобах ЦОІ [7].

Метою дослідження є оцінювання ефективності застосування засобів дискретного трійкового симетричного ортогонального перетворення для зменшення обсягів пам'яті, необхідних для зберігання даних, у комп'ютеризованих системах діагностування та контролю параметрів процесів і середовищ.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в успішному проведенні оцінки ефективності застосування

$$T_9 = \frac{1}{\sqrt{9}} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -\sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & -\sqrt{2} & -\sqrt{2} & -\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ -3/2 & 0 & 3/2 & 0 & 0 & 0 & -3/2 & 0 & 3/2 \\ 3/2 & 0 & -3/2 & 0 & 0 & 0 & -3/2 & 0 & 3/2 \\ 0 & 0 & 0 & -3/\sqrt{2} & 0 & 3/\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & -\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & -\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ -\sqrt{3}/2 & \sqrt{3} & -\sqrt{3}/2 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3} & \sqrt{3}/2 \\ 1/2 & -1 & 1/2 & -1 & 2 & -1 & 1/2 & -1 & 1/2 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

У загальному випадку, для реалізації перетворення (1) (прямий метод обчислення) необхідно $N(N-1)$ операцій додавання/віднімання та N^2 операцій множення двох елементів, що еквівалентно прямому обчисленню матричного добутку у виразі перетворення. У зв'язку з цим, у роботі [7] запропоновано швидкий метод обчислення ТСОП.

засобів дискретного трійкового симетричного ортогонального перетворення для зменшення обсягів пам'яті, необхідних для зберігання даних, у комп'ютеризованих системах діагностування та контролю параметрів процесів і середовищ, яка становить 44÷66% у порівнянні з існуючими засобами та в залежності від типу даних.

II. ДИСКРЕТНЕ ТРІЙКОВЕ СИМЕТРИЧНЕ ОРТОГОНАЛЬНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ

Дискретне трійкове симетричне ортогональне перетворення (ТСОП) задане наступним виразом [7]

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

де $Y = [Y(0), Y(1), \dots, Y(N-1)]^T$ – N -компонентний вектор коефіцієнтів ТСОП, $N=3^n$, $n=0,1,\dots$, T_N – матриця перетворення розміру $N \times N$, $X = [X(0), X(1), \dots, X(N-1)]^T$ – N -компонентний вектор дискретних значень вхідного набору даних, для якого здійснюється перетворення.

Матриця ТСОП T_N побудована на основі матриці значень ортогоналізованих добуток трійкових симетричних функцій (інформацію щодо цієї системи функцій можна знайти у [8]), кожен з рядків якої помножений на відповідний нормуючий коефіцієнт (інформацію щодо вказаних коефіцієнтів можна знайти у [7]) з метою ортогоналізації матриці перетворення. З урахуванням властивості ортогональності матриць T_N обернене ТСОП визначене у наступному вигляді [7]

$$X = (T_N)^T Y. \quad (2)$$

Матриця перетворення T_9 ТСОП розміру 9 задана наступним виразом

Метод швидкого ТСОП передбачає множення результатів операцій додавання/віднімання на відповідні коефіцієнти, які задані наступним аналітичним виразом

$$C_N(i-1) = (T_N)_i^k, \quad k = \underset{j \in \text{NZ}(N,j)}{\text{argmin}} \left\{ |(T_N)_i^j| \right\}, \quad (4)$$



де $(T_N)_i^j$ – елемент матриці ТСОП T_N , який знаходиться у i -ому рядку та j -ому стовпці, $NZ(N,i)$ – множина номерів стовпців ненульових елементів i -ого рядка матриці T_N , $i=1,2,\dots,N$.

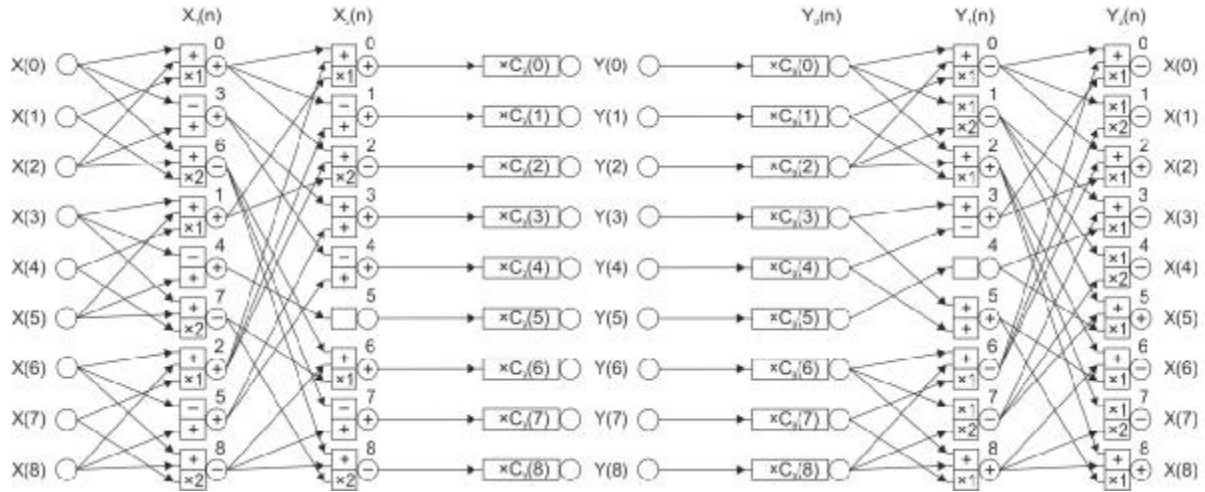


Рис. 6. Схема швидкого ТСОП розміру $N=9$, реалізованого за принципом divide-and-conquer

У схемі перетворення, наведеній на рисунку 1, застосовано операційні блоки, які представлені на рисунках 2-10.

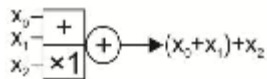


Рис. 7. Операційний блок, який реалізує функцію $f(x_0, x_1, x_2) = (x_0 + x_1) + x_2$

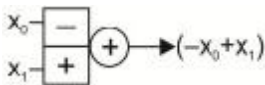


Рис. 8. Операційний блок, який реалізує функцію $f(x_0, x_1) = -(x_0 + x_1)$

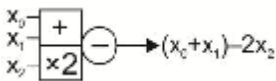


Рис. 9. Операційний блок, який реалізує функцію $f(x_0, x_1, x_2) = (x_0 + x_1) - 2x_2$

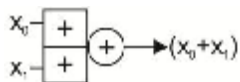


Рис. 10. Операційний блок, який реалізує функцію $f(x_0, x_1) = (x_0 + x_1)$



Рис. 11. Операційний блок, який реалізує функцію $f(x_0) = (x_0)$ (повторювач)



Рис. 12. Операційний блок, який реалізує функцію $f(x_0) = (\alpha x_0)$ (помножувач на константу)

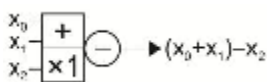


Рис. 13. Операційний блок, який реалізує функцію $f(x_0, x_1, x_2) = (x_0 + x_1) - x_2$

Застосування коефіцієнтів (4) дозволило мінімізувати кількість операцій множення у схемі перетворення (1). Схема реалізації швидкого ТСОП розміру 9 (на основі матриці перетворення (3)) наведена на рисунку 1.

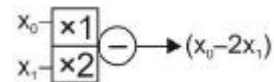


Рис. 14. Операційний блок, який реалізує функцію $f(x_0, x_1) = (x_0 - 2x_1)$

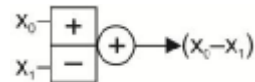


Рис. 15. Операційний блок, який реалізує функцію $f(x_0, x_1) = (x_0 - x_1)$

Наведені операційні блоки (рис. 2-10) спрощують імплементацію схеми на рисунку 1 у засобах ЦОІ. При цьому, наведена схема у випадку реалізації засобами ПЛІС (програмована логічна інтегральна схема) забезпечує максимальну швидкість при обчисленні ТСОП і може, з деяким наближенням, бути застосована у системах із ЦОІ на основі ОП у режимі реального часу.

Проте, з точки зору апаратних затрат, наведена схема (рис. 1) є надлишковою і, особливо, у випадку масштабування на більші розміри перетворення, потребує додаткових фінансових затрат на потужніші моделі ПЛІС. Це спонукає до пошуку компромісного варіанту між апаратними затратами (кількістю обчислювальних блоків) та швидкістю для систем ЦОІ, у яких реалізація ТСОП не є процесом, реалізованим у реальному часі. Наприклад, у системах, у яких здійснюється діагностування значень параметрів процесів і середовищ, отриманих на протязі проміжків часу, які вимірюються десятками хвилин, задача ефективного зберігання накопичених для аналізу даних потребує першочергового вирішення, у порівнянні із задачею підвищення швидкості процесів ЦОІ. Для таких систем запропоновано структуру засобу ТСОП, яка у випадку реалізації на ПЛІС, забезпечує нижчу швидкість у порівнянні з реалізацією на основі схеми швидкого перетворення (рис. 1), але, водночас, вимагає суттєво



нижчих, у порівнянні з останньою, апаратних затрат на реалізацію.

Аналіз схеми швидкого ТСОП, наведеної на рисунку 1, вказав на те, що для реалізації перетворення (1) застосовуються лише дві групи операційних блоків. Це група, яка складається з блоків на рисунках 2-4 та група, яка складається з блоків на рисунках 3, 5 та 6. Додатковими елементами, які потребують введення, у порівнянні зі схемою на рисунку 1, є система комутації між кожною із груп обчислювальних блоків та запам'ятовуючий пристрій для зберігання результатів проміжних обчислень. Уведення вказаних компонентів істотно не підвищує апаратної складності засобу ТСОП і не зменшує ефекту вивільнення апаратних ресурсів за рахунок зменшення кількості обчислювальних блоків. Реалізація оберненого перетворення забезпечується зміною комутації виходів та входів для відповідних груп та зміною схеми перемикавання потоку даних між ними.

Структурну схему засобу ТСОП, реалізованого за схемою на основі двох груп обчислювальних блоків наведено на рисунку 11.

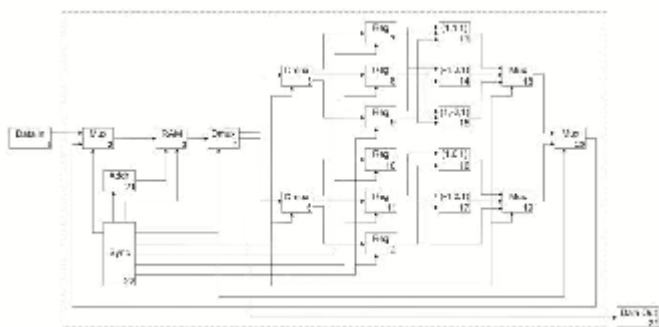


Рис. 16. Структурна схема засобу ТСОП, реалізованого на основі двох груп обчислювальних блоків

У якості компонентів запропонованого засобу використано оперативний запам'ятовуючий пристрій (3), регістри пам'яті (7-12), мультиплектори (2, 18-20), демultipлектори (4-6), генератор адрес (21), блок синхронізації (22) та операційні блоки: $f(x_0, x_1, x_2) = (x_0 + x_1) + x_2$ (13), $f(x_0, x_1) = (-x_0 + x_1)$ (14, 17), $f(x_0, x_1, x_2) = (x_0 + x_1) - 2x_2$ (15), $f(x_0, x_1) = (x_0 + x_1)$ (16).

Розмір перетворення у запропонованому засобі визначено рівним 9. При цьому, його можна змінити шляхом зміни структури та алгоритму роботи генератора адрес і блоку синхронізації.

Запропонований засіб забезпечує застосування декореляційних властивостей ТСОП [9] для зменшення обсягів пам'яті, необхідних для зберігання даних. На його основі оцінено ефективність застосування ТСОП у системах діагностування та контролю параметрів процесів і середовищ, у яких процеси ЦОІ не потребують виконання у режимі реального часу.

III. ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ТРИКОВОГО СИМЕТРИЧНОГО ОРТОГОНАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ

Для порівняння ефективності застосування ТСОП для зменшення обсягів пам'яті, необхідних для зберігання даних, застосовано ОП Уолша та Хаара, як такі, що мають подібну структуру породжуючих функцій [2, 4, 9, 10]. Результати досліджень декореляційних властивостей ТСОП вказали на залежність ступеня декореляції від довжини вхідного вектора, причому, спостерігається зниження значень показника ступеня декореляції зі збільшенням довжини вхідного вектора [9]. У зв'язку з цим, у системах ЦОІ застосовуються ОП невеликого ($N < 10$) числа відліків вхідних даних [2, 4, 10]. Цим, також, пояснюється розмір вхідного набору даних для більшості засобів ОП Уолша та Хаара, який становить $N = 2^3 = 8$ [2, 4, 10]. Відповідно, для дослідження ефективності застосування ТСОП у системах ЦОІ запропоновано засіб ТСОП для розміру вхідного набору даних $N = 3^2 = 9$.

Згідно результатів досліджень декореляційних властивостей ТСОП встановлено, що максимальна ефективність запропонованого перетворення у порівнянні з перетвореннями Уолша та Хаара досягається для послідовностей даних із високим рівнем автокореляції [9]. У зв'язку з цим, ефективність застосування запропонованого засобу оцінена для пристроїв комплектації вузлів обліку та контролю параметрів передачі газу. Характеристики таких пристроїв дозволяють віднести їх до категорії мобільних, особливістю яких є невеликий обсяг пам'яті для зберігання даних, а також, з огляду на однотипність виконуваних операцій, невелика обчислювальна потужність. Зокрема, оцінено ефективність застосування розробленого засобу ТСОП у якості компонента пристроїв ОЕ-22ЛА (обчислювач об'єму газу) та ТЕМР-ОЕ (лічильник газовий роторний з електронним відліковим пристроєм) [11].

Перелічені пристрої дозволяють архівувати значення показників, які отримані з їх допомогою, та передавати ці значення на вузли контролю з метою подальшого аналізу [11]. Для пристроїв обліку та контролю параметрів передачі газу допустима похибка відновлення даних визначена на рівні 5% [12], що встановлює допустимі межі ущільнення даних. При оцінюванні зменшення обсягу пам'яті, необхідного для зберігання даних, яке забезпечується ТСОП та ОП Уолша і Хаара, вимірювання похибки відновлення даних для забезпечення необхідної точності функціонування пристроїв обліку та контролю параметрів передачі газу здійснено за допомогою значень середньої абсолютної похибки у відсотках MAPE (mean absolute percentage error) відновлення даних [10]

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{|X(i) - X_r(i)|}{X(i)} \cdot 100\%, \quad (5)$$

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



Для зберігання коефіцієнтів перетворення, одержаних для записів пристроїв обліку та контролю параметрів передачі газу за допомогою засобів ОП, у загальному випадку, необхідно виділяти 4 байти пам'яті. Для зберігання у пам'яті номерів коефіцієнтів, які покладені рівними нулю, у результаті ущільнення, достатньо виділення 1 байту для кожного номера, у випадку архівів, які містять менше 256 записів (даних) та 2 байтів – для архівів з кількістю записів, яка перевищує 256. Відповідно, кількість байтів, яка необхідна для зберігання N коефіцієнтів ОП, з яких N_z рівні нулю, обчислюється наступним чином:

$$B_o = 4 \cdot (N - N_z) + L \cdot N_z, \quad (6)$$

де L – кількість байтів, необхідних для зберігання номера відкинутого коефіцієнта.

Ступінь зменшення обсягу пам'яті для зберігання даних обчислюється за допомогою співвідношення:

$$R_{Dec}^o = \frac{4N - B_o}{4N} \cdot 100\%. \quad (7)$$

Обчислені згідно **Ошибки! Источник ссылки не найден.**) середні значення показників ступеня зменшення обсягу пам'яті, необхідного для зберігання даних, які забезпечені ТСОП (Ter) та ОП Уолша (Wal) і Хаара (Har) у випадку різних архівів пристроїв обліку та контролю параметрів передачі газу наведено у таблиці 1.

ТАБЛИЦЯ 1. СЕРЕДНІ ЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ СТУПЕНЯ ЗМЕНШЕННЯ ОБСЯГУ ПАМ'ЯТІ, НЕОБХІДНОГО ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ ДАНИХ, ПРИСТРОЯМИ ОБЛІКУ ТА КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕДАЧІ ГАЗУ

№	Шифр пристрою	Тип архіву	Кількість записів у архіві	$R_{Dec}^o, \%$		
				Ter	Wal	Har
1	ОЕ-22ЛА	Хвилинний	760	44,54	44,01	44,01
2		Годинний	1530	44,51	44,02	44,02
3		Добовий	64	66,80	65,63	65,63
4	ТЕМР-ОЕ	Хвилинний	60	66,25	63,75	63,75
5		Годинний	150	67	65,5	65,5
6		Добовий	126	66,07	66,00	66,00
7		Місячний	31	60,48	60,03	63,21

Результати проведеного аналізу ефективності (табл. 1) застосування запропонованого засобу швидкого ТСОП у якості компонента пристроїв обліку та контролю параметрів передачі газу вказали на зменшення обсягу пам'яті, необхідного для зберігання даних, на рівні 44÷66%. При цьому, застосування ТСОП забезпечує, у порівнянні з ОП Уолша та Хаара, перевагу до 2,5% в залежності від довжини набору даних та рівня їх взаємної кореляції. У випадку пристроїв, для яких здійснювався аналіз, це зумовило відповідне збільшення часу автономного функціонування та підвищення точності обліку, у зв'язку з можливістю зберігання та подальшого аналізу більшої кількості записів роботи пристрою, чим підвищено загальну ефективність функціонування

відповідних комп'ютеризованих систем діагностування та контролю параметрів передачі газу.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження вказало на ефективне застосування декореляційних властивостей дискретного трійкового симетричного ортогонального перетворення у системах діагностування та контролю параметрів процесів і середовищ. У таких системах застосування запропонованого перетворення забезпечило зменшення обсягів пам'яті, необхідних для зберігання даних, у порівнянні з перетвореннями Хаара та Уолша. Цим забезпечено підвищення точності діагностування, що підвищує надійність перебігу виробничих процесів. Подальші дослідження полягають у створенні засобів запропонованого перетворення, адаптованих для застосування у системах діагностування та контролю параметрів процесів і середовищ, відмінних від проаналізованих.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] E. Ifeachor, B. Jervis, Digital Signal Processing: A Practical Approach (2nd Edition), Pearson Education, 2002, P. 960.
- [2] R. Wang, Introduction to Orthogonal Transforms with Applications in Data Processing and Analysis, Cambridge, 2010. P. 522.
- [3] 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
- [4] L.P. Yaroslavsky, Fast Transforms in Image Processing: Compression, Restoration, and Resampling / L.P. Yaroslavsky // Advances in Electrical Engineering. – August 2014. – Vol. 2014. – Article ID 276241. – P. 23. doi: 10.1155/2014/276241
- [5] Н.В. Превисокова, Аналіз ефективності методу кодування інформації на основі ортогонального перетворення Галуа / Н.В. Превисокова // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Серія: Інформатика та моделювання. – №21 (1193). – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – С. 92-101.
- [6] Г.Н. Мальцев, А.В. Харченко и А.С. Гарагуля, "Границы повышения помехоустойчивости радиотехнических систем передачи информации при цифровой обработке сигналов с компенсацией помех," Информационно-управляющие системы. – 2014. – №4. – С. 111-116.
- [7] А.В. Измайлов, Цифрова обробка інформації в розосереджених системах управління із застосуванням швидкого ортогонального перетворення на основі трійкових симетричних функцій / А.В. Измайлов, Л.Б. Петришин // Системи обробки інформації. – 2018. – № 3(154). – С. 79-89. <https://doi.org/10.30748/soi.2018.154.11>.
- [8] 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
- [9] А.В. Измайлов, Эффективность застосування ортогонального перетворення на основі трійкових симетричних функцій для цифрової обробки інформації / А.В. Измайлов // Методи та прилади контролю якості. – 2018. – № 1(40). С. 97-104.
- [10] D. Salomon, Data Compression – The Complete Reference, Springer London, 2007, P. 1092.
- [11] "ТОВ СЛОТ – Каталог продукції," ТОВ СЛОТ, 2019. [Online]. Available: <http://www.slot.if.ua/catalog/>. [Accessed 12 August 2019].
- [12] ДП "Івано-Франківськстандартметрологія", Лічильники газу мембранні. Методика повірки. СМУК. 407369.014 ИС1. – Івано-Франківськ: ДП "Івано-Франківськстандартметрологія". – 2011.



Інформаційні системи та технології ІСТ-2019

Секція 4.

Розпізнавання образів, цифрова обробка зображень і сигналів.