
АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ВЕЙВЛЕТ ПЕРЕТВОРЕНЬ НА СУЧАСНИХ АПАРАТНИХ ПЛАТФОРМАХ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

студент Оніщенко А.В., доцент, к.т.н. Зубков О.В.,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
кафедра мікропроцесорних технологій і систем, м.Харків, Україна
e-mail: andrii.onishchenko@nure.ua, oleh.zubkov@nure.ua

Abstract. This article examines the application of the wavelet transform mathematical method to extracting time-frequency features of acoustic signals. The most effective wavelet functions for analyzing various signal types are discussed. The execution times of wavelet transforms were determined experimentally. The feasibility of implementing real-time signal processing using the considered wavelet functions was assessed.

Ключові слова: Вейвлет перетворення, час обчислення, акустичний сигнал, librosa.

Вступ. Вейвлет-перетворення на сьогодні є одним із найбільш ефективних інструментів аналізу нестационарних сигналів у часово-частотній області [1-3]. На відміну від класичних методів спектрального аналізу, зокрема перетворення Фур'є, вейвлет-аналіз забезпечує змінну роздільну здатність за часом і частотою, що робить його особливо придатним для обробки сигналів зі швидкоплинними або локалізованими у часі особливостями. Завдяки цьому вейвлет-перетворення широко застосовуються в задачах обробки акустичних, сейсмічних, біомедичних сигналів, у системах технічної діагностики, розпізнавання образів та моніторингу стану об'єктів.

Разом із зростанням обсягів даних та підвищенням вимог до швидкодії сучасних вимірювальних і керуючих систем, особливої актуальності набуває проблема реалізації вейвлет-перетворень у реальному часі [2]. Реальний час обробки є критичним для вбудованих систем, автономних сенсорних вузлів, систем раннього попередження та кіберфізичних систем, де затримки обробки сигналів можуть призводити до втрати інформації або зниження ефективності прийняття рішень.

Сучасні апаратні платформи, зокрема мікроконтролери, цифрові сигнальні процесори (DSP), програмовані логічні інтегральні схеми (FPGA) та системи на кристалі (SoC), відкривають нові можливості для апаратної або апаратно-програмної реалізації складних алгоритмів цифрової обробки сигналів. Водночас вейвлет-перетворення характеризуються значною обчислювальною складністю, потребують ефективного управління пам'яттю та оптимізації паралельних обчислень, що ускладнює їх впровадження в системах з обмеженими ресурсами.

У зв'язку з цим актуальним є аналіз можливостей реалізації вейвлет-перетворень на сучасних апаратних платформах із урахуванням вимог реального часу. Такий аналіз дозволяє визначити доцільність застосування конкретних типів вейвлетів, обрати оптимальні архітектурні рішення, а також оцінити компроміси між точністю аналізу, швидкістю та апаратними витратами.

Метою даної роботи є аналіз обчислювальних особливостей вейвлет-перетворень та дослідження можливостей їх ефективної реалізації у режимі реального часу.

Основна частина.

Вейвлет-перетворення є методом аналізу сигналів, що забезпечує одночасне представлення інформації у часовій та частотній областях. Основною ідеєю вейвлет-аналізу є розкладання досліджуваного сигналу на набір елементарних функцій — вейвлетів, які є локалізованими як у часі, так і у частоті. Це дозволяє ефективно аналізувати нестационарні сигнали, характеристики яких змінюються з часом. Математичний опис такого перетворення наведено нижче [1]

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

де a — параметр масштабу, що задає частотні характеристики аналізу;

b — параметр зсуву у часі;

$\psi^*(t)$ — комплексно-спряжена материнська вейвлет-функція;

Базовою функцією вейвлет-аналізу є так званий материнський вейвлет, з якого шляхом масштабування та зсуву формуються всі інші вейвлети. На відміну від гармонічних функцій, що використовуються у перетворенні Фур'є і мають нескінченну часову протяжність, вейвлети мають скінченну або швидко спадну підтримку, що забезпечує високу часову локалізацію.

Загалом, вейвлет-перетворення дозволяє подати сигнал у вигляді сукупності коефіцієнтів, кожен з яких відображає вклад певної частотно-часової компоненти. Такий підхід є особливо ефективним для аналізу імпульсних, періодично змінних або зашумлених сигналів. Серед різноманіття Вейвлет функцій можна виділити наступні: Morlet, cmorl, Frequency B-Spline, гаусові та комплексні гаусові, Mexican Hat. Вейвлет Морле є комплексним гармонічним сигналом, модульованим гаусовою огибаючою. Він забезпечує високу частотну роздільну здатність і добре підходить для аналізу квазіперіодичних процесів. Завдяки комплексній формі дозволяє визначати не лише амплітуду, а й фазу локальних спектральних компонент. Широко застосовується для аналізу акустичних, біомедичних та сейсмічних сигналів. Вейвлет FBSP є комплексним вейвлетом із гнучко налаштовуваною формою спектра. Його основною перевагою є можливість незалежного керування шириною частотної смуги

та центральною частотою. Це робить FBSP ефективним для аналізу вузькосмугових процесів і сигналів зі змінною частотною структурою, зокрема у задачах виявлення та класифікації подій. Вейвлет «Мексиканський капелюх» є другою похідною від гаусової функції і є дійсним симетричним вейвлетом. Він добре підходить для виявлення піків, екстремумів та локальних аномалій у сигналі. Завдяки простій формі та добрій часовій локалізації часто застосовується в сейсміці, аналізі вібрацій і задачах виявлення подій. Вейвлет Шеннона має ідеально обмежений спектр і забезпечує високу частотну селективність. Це робить його зручним для теоретичного аналізу та дослідження спектральних властивостей сигналів. Водночас він має нескінченну часову підтримку, що ускладнює практичну реалізацію та обмежує застосування в системах реального часу.

Загалом, вейвлети Morlet, c-Morlet та FBSP є найбільш придатними для детального часово-частотного аналізу, cgaу та Mexican hat — для виявлення короткочасних подій і особливостей сигналу, тоді як вейвлет Шеннона переважно використовується в теоретичних дослідженнях.

Результати експериментів. Дослідження проводились з використанням різних типів звуків: міські звуки, птахи, голоси людей. Для досліджень було використано аудіозаписи, що проводились з використанням USB звукової карти U-Phoria UM2. Усі аудіозаписи були виконані з частотою дискретизації 44100Гц.

У якості апаратної платформи використовувався ПК на базі процесора i7 одинадцятого покоління з 16 логічними ядрами. Програмна реалізація обчислень виконувалась з використанням мови Python та бібліотеки librosa. Обчислення проводились з аудіо фрагментами тривалістю 372мс, що відповідає 16384 відлікам. При розрахунках Вейвлет перетворень обчислювалось 128 часових компонент, тобто розмір результуючої матриці був 128x16384. Результати вимірювання часу обчислень наведені у таблиці 1

Таблиця 1 – Результати вимірювань часу обчислень вейвлет перетворень

Фейвлет	Morlet	c-Morlet	FBSP	cgaу	Mexican hat	Shennon
Час, мс	80	86	33	27	29	103

Висновки. Проведений аналіз областей використання Вейвлет перетворень та їх математичного опису дозволив сформулювати проблему реалізації таких перетворень у реальному часі. Для практичних досліджень була відібрана група Вейвлетів та проведено вимірювання часу обчислень на сучасній апаратній платформі. З отриманих даних можна зробити висновки, що найшвидше перетворення реалізується для Вейвлетів: cgaу, Mexican hat, FBSP, а для Morlet, c-Morlet та Shennon час більший ніж в 3 рази. Хоча це не є критичним показником при загальному часі в 372 мс, але треба враховувати, що існує алгоритм подальшої підготовки отриманої

матриці перед подальшим розпізнаванням і необхідно витратити час на подальше розпізнавання результату Вейвлет перетворення. Отже тільки Вейвлети cgaу, Mexican hat, FBSP відповідають вимогам реального часу обробки акустичних сигналів.

Список використаних джерел

1. Tiantian G., Tongpo Z., Enggee L., LÓPEZ-BENÍTEZ M., MA F., Limin Y. A Review of Wavelet Analysis and Its Applications: Challenges and Opportunities. 2022. IEEE Access, Vol.10, P. 58869-58903
 2. Pacheco J., Benitez V.H., Pérez G., Brau A. Wavelet-Based Computational Intelligence for Real-Time Anomaly Detection and Fault Isolation in Embedded Systems. Machines. 2024. Vol.12, Iss.9. P. 664-670
- Rani M. Wavelets in artificial intelligence – a review. 2025 International Journal of Scientific Research. Vol.14, Iss.6. P.36-39