

ПРОЕКТУВАННЯ ЦИФРОВИХ ФІЛЬТРІВ У ОБРОБЦІ СИГНАЛІВ

Юлія Камєнєва¹, Олексій Новосад¹, Сергій Федосов^{1,2}

DIGITAL FILTERS DESIGN IN SIGNAL PROCESSING

Yuliia Kameneva, Oleksii Novosad, Serhii Fedosov

¹Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, Луцьк, 43025, Україна,

²Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна

Abstract. *The paper provides a comprehensive review and analysis of modern approaches, methods and trends in digital filter design in the context of digital signal processing. The role of optimization algorithms, hardware implementations on FPGAs and ASICs, and specific requirements of individual applications in the selection and development of digital filters is investigated.*

Сьогодні фільтри повинні забезпечувати ефективну обробку великої кількості інформації в реальному часі. Це особливо актуально для таких даних, як текст, зображення, аудіо- та відеоінформація. Цифрові фільтри розробляються для роботи з сигналами у форматах 1D, 2D та 3D, залежно від сфери застосування. У зв'язку з цим зростає потреба у створенні DSP-систем з високою продуктивністю, які здатні працювати з великим обсягом даних та забезпечувати високу точність обробки.

Класифікація фільтрів базується за різними критеріями і включає різні типи. Зокрема, це цифрові фільтри зі скінченною імпульсною характеристикою (англ. *Finite Impulse Response*) або FIR-фільтри та цифрові фільтри з нескінченною імпульсною характеристикою (англ. *Infinite Impulse Response*) або IIR-фільтри [1-3]. При визначенні необхідного типу цифрового фільтра для конкретного сигналу, аналіз повинен керуватися збереженням лінійної фазової характеристики. У випадку, коли лінійні фазові характеристики є важливими, FIR-фільтри є кращими завдяки їх вищому порядку та більшій складності. Навпаки, якщо важлива лише частотна характеристика, IIR-цифрові фільтри є більш практичним вибором, оскільки вони мають нижчі порядки, що призводить до меншої складності та легшої реалізації.

Ключові характеристики FIR-фільтрів включають лінійну фазову характеристику, можливість обробки фільтрів вищого порядку (більш складних схем) та стабільність. Ключові ж характеристики IIR-фільтрів включають фільтри нижчого порядку (що призводить до менш складних схем), нелінійну фазову характеристику та потенційну можливість нестабільності отриманого цифрового фільтра.

Вибір між IIR- і FIR-фільтрами залежить від конкретних вимог даного застосування. Обидва типи фільтрів мають свої переваги та недоліки, і перевага одного над іншим залежить від таких факторів, як характеристики фільтра, складність реалізації та обмеження застосування. Ось порівняння переваг кожного типу: ефективна реалізація – IIR-фільтри забезпечують ефективні частотні характеристики з меншою кількістю коефіцієнтів порівняно з FIR-фільтрами. Це часто призводить до більш обчислювально ефективної реалізації.

Завдяки структурі зі зворотним зв'язком, IIR-фільтри можуть мати більш компактний дизайн, особливо в застосуваннях, де для FIR-фільтра знадобилася б велика кількість відводів (коефіцієнтів). Обробка сигналів у реальному часі: IIR-фільтри чудово підходять для обробки сигналів у застосуваннях реального часу, де затримка є критичною. Перехід від аналогових

фільтрів: IIR-фільтри можуть бути легше спроектовані для імітації перехідних характеристик аналогових фільтрів.

Проектування цифрових фільтрів є ключовим етапом у цифровій обробці сигналів. Особлива увага в сучасних дослідженнях приділяється фільтрам із скінченною імпульсною характеристикою (FIR), зокрема двовимірним фільтрам (2D FIR), які активно застосовуються в різних галузях. Наприклад, у 2017 році 2D FIR-фільтри використовувалися для обробки геофізичних даних з метою виявлення підземних ядерних випробувань, а також у медицині — для покращення зображень, отриманих під час діагностики.

Проектування FIR-фільтра вимагає визначення коефіцієнтів фільтра для досягнення бажаної частотної характеристики. Існує багато методів проектування FIR-фільтрів, і деякі з поширених технік включають техніку віконного зважування (тут бажана частотна характеристика множить на віконну функцію в часовій області для отримання коефіцієнтів фільтра). Поширені віконні функції включають вікна Геммінга, Ханнінга та Блекмана.

Класичні методи проектування IIR-фільтрів включають проектування Баттерворта, Чебишева та еліптичні (Кауера), кожен з яких пропонує різні компроміси щодо характеристик частотної реакції фільтра. Цифрові інструменти проектування та програмне забезпечення часто використовують алгоритми оптимізації для знаходження коефіцієнтів, які відповідають заданим критеріям проектування. Проектування IIR-фільтрів зазвичай базується на аналогових прототипах, які потім перетворюються у цифрову форму. Серед основних методів – перетворення Біллінера, імпульсна інваріантність та чисельні САД-методи. Важливо враховувати обмеження, пов'язані з точністю обчислень при використанні фіксованої коми, оскільки це може призводити до нестабільності фільтра та спотворення частотної характеристики.

У сучасних дослідженнях набуває значення також проектування 2D цифрових фільтрів, які використовуються в задачах обробки зображень, відео та графіки. Для їх оптимізації застосовуються методи чисельного аналізу та евристичні алгоритми, зокрема алгоритм рою частинок. Хоча 2D IIR-фільтри мають потенціал, більшість проєктів концентрується на 2D FIR-фільтрах через їхню стабільність та простоту реалізації.

Для реалізації фільтрів використовуються FPGA, ASIC та середовище Xilinx ISE. Архітектури FIR-фільтрів реалізуються у послідовній, паралельній, симетричній формах, із застосуванням структур Уоллеса, алгоритмів множення Ведіка або Бута, а також методів розподіленої арифметики. FIR-фільтри зазвичай проєктуються на мовах апаратного опису, таких як VHDL.

Порівняння FIR і IIR-фільтрів у літературі свідчить, що FIR забезпечують стабільність і лінійну фазу, але потребують більше ресурсів. IIR-фільтри виграють за обчислювальною ефективністю. При цьому диференціальна еволюція демонструє кращі результати у пошуку оптимальних параметрів IIR-фільтрів порівняно з генетичними алгоритмами.

Гнучкість у проектуванні, з можливістю досягати точних частотних характеристик за допомогою таких методів, як віконні функції (наприклад, вікно Кайзера), метод найменших квадратів та алгоритм Паркса-Макклеллана. Незважаючи на те, що IIR-фільтри мають меншу складність та підходять для обробки в реальному часі (наприклад, у комунікаційних системах), вони поступаються в стабільності та фазовій точності. Це обмежує їх застосування у завданнях, де потрібна висока точність сигналу.

Бібліографія

1. Rusu C., Dumitrescu B. Iterative reweighted l_1 design of sparse FIR filters. *Signal Processing*. 2012. Vol. 92, № 4. P. 905–911.
2. Wang H. A New Separable Two-dimensional Finite Impulse Response Filter Design With Sparse Coefficients. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*. 2015. Vol. 62, № 12. P. 2864–2873.
3. Ye W. B., Yu Y. J. Bit-level multiplierless FIR filter optimization incorporating sparse filter technique. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*. 2014. Vol. 61. № 11. P. 3206–3215.