

УДК 004.451:004.354.7-022.513

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ЦИФРОВИХ ФІЛЬТРІВ НА ESP32

Онiщенко А.В.

email: andrii.onishchenko@nure.ua

Науковий керівник – к.т.н., проф. Зубков О.В.

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. МТС
м. Харків, Україна

The work analyzes the usage of digital filters in electronic devices. The problem of assessing the speed of digital filters implementation on the popular ESP32 platform is formulated. 3 digital FIR filters were synthesized, a filtering algorithm using cyclic buffers and a DMA controller was created and studied. The developed algorithm has been proven to have a 12-times acceleration in the ESP-IDF environment compared to the classic implementation in the Arduino IDE. The ESP32 hardware platform has been proven to be highly effective for the practical implementation of digital filters.

У сучасному світі, де електронні пристрої та роботи відіграють дедалі важливішу роль, ефективна обробка сигналів стає особливо актуальною. Цифрові фільтри дозволяють покращити якість електронних систем, усуваючи небажані компоненти сигналу, знижуючи рівень шуму та підвищуючи точність переданих даних. Вони є незамінними у сферах IoT, автономного транспорту, медичних пристроїв та роботизованих систем, де якість обробки сигналу впливає на надійність і безпеку [1]. Наприклад, у медичних пристроях, таких як монітори ЕКГ, цифрові фільтри забезпечують точність діагностики та своєчасне реагування [2]. Вони також відіграють ключову роль у системах штучного інтелекту та машинного навчання, гарантуючи чистоту та точність вхідних даних. Таким чином, цифрові фільтри є критично важливими для розвитку сучасних технологій, забезпечуючи їхню ефективність і відкриваючи нові можливості для застосування.

ESP32 – це потужний мікроконтролер від Espressif Systems, широко застосовуваний у проєктах IoT, вбудованих системах та інших сферах завдяки високій продуктивності, низькій вартості та підтримці Wi-Fi і Bluetooth. Він оснащений двоядерним процесором Tensilica LX6 із частотою до 240 МГц, що дозволяє ефективно виконувати алгоритми цифрової фільтрації сигналів у реальному часі. Завдяки вбудованому 12-бітному ADC ESP32 може обробляти аналогові сигнали без додаткових витрат [2]. Попри широкий функціонал, більшість проєктів базуються на середовищі Arduino, яке не використовує всі можливості мікроконтролера. У наявних джерелах немає інформації щодо продуктивності цифрових фільтрів, реалізованих на ESP32. Тому метою цього дослідження стало оцінювання ефективності цифрової фільтрації за допомогою ESP-IDF.

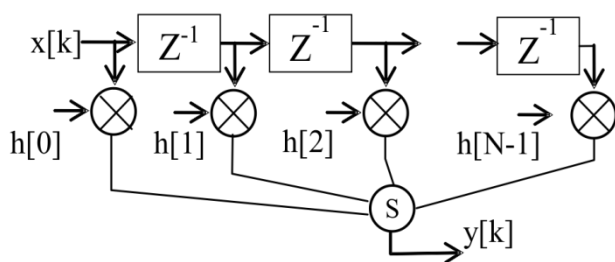


Рисунок 1 – Структура цифрового FIR фільтра

Для дослідження були синтезовані найбільш поширені у практиці цифрові фільтри з кінцевою імпульсною характеристикою (FIR). Загальна структура FIR-фільтра зображена на рисунку 1.

Сигнал на виході фільтра описується рівнянням (1).

$$y[k] = \sum_{i=0}^N h[i] \cdot x[k-i] \quad (1)$$

де N – порядок фільтра, $h(i)$ – коефіцієнти фільтра, $x[k-i]$ – відліки вхідного сигналу.

Для аналізу було обрано три фільтри. Частота дискретизації аналогового сигналу дорівнювала 10 кГц. Фільтри мали смугу пропускання 500 Гц і смугу загасання 2,1 кГц, але відрізнялися рівнем придушення частот у смузі загасання. Перший фільтр мав рівень загасання 40 дБ, другий – 87 дБ, третій – 154 дБ. Відповідно, вони відрізнялися кількістю коефіцієнтів: у першому фільтрі їх було 13, у другому – 32, у третьому – 64. Синтез фільтрів здійснювався за допомогою спеціалізованої утиліти Matlab (Filter Builder) [3]. Коефіцієнти фільтра були числами з плаваючою комою. Відповідно, всі операції фільтрації виконувалися з використанням чисел типу float. Середовище Arduino IDE дає можливість реалізувати лише найпростіший алгоритм фільтрації для ESP32, коли при появі нового відліку вхідного сигналу одразу обчислюється відлік результату фільтрації. Однак середовище ESP-IDF може використовувати канал прямого доступу до пам'яті (DMA) для автоматичної передачі результатів вимірювань з АЦП у масив пам'яті. Для досліджень був розроблений та програмно реалізований оптимальний алгоритм цифрової фільтрації. Вбудоване у ESP32 АЦП працює в безперервному режимі, але завдяки налаштованим дільникам тактового сигналу забезпечується необхідна частота вибірки вхідного сигналу. Контролер DMA зберігає вибірки вхідного сигналу в кільцевий буфер і генерує переривання, коли перша та друга половини буфера заповнені. Використовуючи цей підхід, суттєво зменшується час цифрової фільтрації шляхом скорочення кількості викликів обробника переривань та збереження поточних параметрів програми у стеку оперативної пам'яті. Як тільки перша половина буфера заповнюється, розпочинається фільтрація цих вибірок. Водночас триває заповнення другої половини буфера. Після заповнення другої половини починається їх фільтрація, а в цей час знову заповнюється перша половина буфера. Розмір буфера був обраний рівним 256

вибіркам, що становить 512 байт. Такий обсяг буфера мінімізує кількість операцій для роботи з індексами масиву під час цифрової фільтрації вхідних вибірок сигналу.

Період переривання від контролера DMA становив 12,8 мс. Він був визначений частотою дискретизації вхідного сигналу 10 кГц та перериваннями від контролера DMA після завершення 128 вимірювань. Отримані значення кількості тактових циклів, необхідних для обробки 128 вибірок вхідного сигналу, були порівняні з тактовою частотою процесора 240 МГц та перераховані у часові значення для виконання операцій цифрової фільтрації.

При реалізації фільтра з 13 коефіцієнтами час обробки 128 вибірок становив 231 мкс, для фільтра з 32 коефіцієнтами – 371 мкс, при використанні фільтра з 64 коефіцієнтами – 627 мкс. При роботі цих фільтрів процесор був завантажений на 1,8%, 2,9% та 4,9% відповідно.

Висновки. Фреймворк ESP-IDF від розробника контролерів ESP32 дозволяє отримати повний доступ до їх апаратних можливостей і збільшити швидкодію роботи фільтра завдяки використанню контролера DMA, порівняно з середовищем Arduino IDE.

Запропонований алгоритм передавання результатів вимірювань АЦП у оперативну пам'ять у поєднанні з використанням кільцевих буферів у RAM продемонстрував дуже високу продуктивність під час реалізації FIR-фільтрів і завантажує процесор лише на 5% при реалізації фільтра з 64 коефіцієнтами.

Порівняно з Arduino IDE [4], було досягнуто 12-кратного підвищення продуктивності.

Список використаних джерел:

1. Sim S., Z. Lendek P. Dobra Implementation and Testing of Digital Filters on STM32 Nucleo-64P// 2022 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics. Cluj-Napoca, Romania. 2022. PP.1-6. DOI: 10.1109/AQTR55203.2022.9801920
2. Çelebi M. Digital Filter Design Based on ARDUINO and Its Applications// Medical Technologies Congress. Antalya, Turkey. 2020, PP.263-266.
3. Wanhammar L., Saramäki T. Digital Filters Using MATLAB 2020. 1st ed.- Springer, 821 p.
4. Мачоніс Т.С. Реалізація цифрових фільтрів на ESP32 у середовищі Arduino IDE. Матеріали 28-го міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті» 16 – 18 квітня 2024 р. Том 3 Конференція «Інформаційні радіотехнології та технічний захист інформації», Харків, Україна. 2024. С.573-576