Научная статья
Original article
УДК 004.942

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ STM32

DEVELOPMENT OF DIGITAL FILTERS BASED ON STM32 MICROCONTROLLERS

Пчелинцева Виктория Максимовна, студент магистратуры 2 курс, факультет машиностроения, ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», Россия, г. Москва
Научный руководитель: Чернокозов Владимир Васильевич

Pchelintseva Victoria Maksimovna, 2nd year master's student, Faculty of Mechanical Engineering, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Moscow Polytechnic University", Russia, Moscow
Scientific adviser: Chernokozov Vladimir Vasilievich

Аннотация: В статье анализируются особенности разработки цифровых фильтров на базе микроконтроллеров STM32. Рассматриваются сущность, основные направления и реализуемые задачи цифровой обработки сигналов, понятие, принцип функционирования и структура цифровых фильтров. Приводятся обобщённый алгоритм цифровой фильтрации, её достоинства и недостатки. Выявляются требования, предъявляемые к цифровым фильтрам, их основная функция и используемые алгоритмы. Рассматриваются способы реализации цифровых фильтров.

Annotation: The article analyzes the features of the development of digital filters based on STM32 microcontrollers. The essence, main directions and realizable tasks of digital signal processing, the concept, principle of operation and structure of digital filters are considered. A generalized digital filtering algorithm, its advantages and disadvantages are given. The requirements for digital filters, their main function and the algorithms used are identified. Ways of realization of digital filters are considered.

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, цифровые фильтры, программная реализация, аппаратная реализация, программно-аппаратная реализация, микроконтроллеры.

Keywords: digital signal processing, digital filters, software implementation, hardware implementation, software and hardware implementation, microcontrollers.

Бурное развитие инфокоммуникационных технологий актуализировало проблему разработки и реализации эффективных с позиции повышения быстродействия и минимизации вычислительных затрат алгоритмов цифровой обработки сигналов, основным из которых является цифровая фильтрация [1]. Создание более мощных вычислителей приводит к большим экономическим затратам, в связи с чем повышается интерес к программно-аппаратной реализации алгоритма, обеспечивающей высокую эффективность при достаточной скорости обработки и сокращении программно-аппаратных затрат. При проектировании средств цифровой обработки сигналов ряд алгоритмов цифровой фильтрации наилучшим образом может быть реализован как комбинация программируемых логических интегральных схем и цифровых процессоров обработки сигналов [2]. Благодаря архитектурным особенностям первых цифровые фильтры, реализованные на их основе, позволяют достигать показателей производительности, значительно превышающих другие способы, а использование в комбинированной архитектуре параллельных и последовательных регистров даёт возможность нахождения компромисса между производительностью и экономичностью.

Данное обстоятельство делает актуальным исследование специфики современной реализации цифровой фильтрации.

Целью работы является изучение особенностей разработки цифровых фильтров на базе микроконтроллеров STM32. Для её достижения были использованы методы анализа и синтеза научных публикаций и литературных источников по рассматриваемой теме.

Цифровая обработка сигналов представляет собой область науки и техники, предметом которой являются общие для различных дисциплин средства и алгоритмы обработки сигналов на базе численных методов с применением цифровой вычислительной техники [3]. К основным типам сигналов относятся:

- аналоговый, являющийся непрерывным по состоянию и во времени;
- дискретный, являющийся непрерывным по состоянию и дискретным во времени;
- цифровой, являющийся дискретным по состоянию и во времени.

Ключевыми направлениями цифровой обработки сигналов являются [4]:

- спектральный анализ: обработка звуковых, речевых, гидроакустических и сейсмических сигналов, распознавание образов;
- линейная фильтрация: синтез согласованных с сигналами фильтров, селекция сигнала в частотной области, корректоры характеристик каналов, цифровые преобразователи Гильберта и дифференциаторы, частотное разделение каналов;
- нелинейная обработка: медианная фильтрация, вычисление корреляций, синтез фазовых, амплитудных и частотных детекторов, векторное кодирование, обработка речи;
- адаптивная фильтрация: распознавание образов, обработка изображений и речи, адаптивные антенные решётки, подавление шумов;
- частотно-временной анализ: радио- и гидролокация, компрессия изображений, решение задач обнаружения;

- многоскоростная обработка: децимация и интерполяция частоты дискретизации в многоскоростных аудиосистемах и системах телекоммуникации.

Под цифровым фильтром понимается определённая аппаратная, программная либо смешанная реализация алгоритма фильтрации [5]. В цифровых фильтрах применяются оцифрованные аналоговые сигналы или представляющие некоторые переменные числа, хранящиеся в памяти компьютера. Фильтры избирательно меняют форму сигнала, то есть его фазочастотную или амплитудно-частотную характеристику, посредством конвертации цифровым процессором периодически выбираемого аналогового входного сигнала в набор цифровых отсчётов. Преобразование входной последовательности в выходную осуществляется в соответствии с вычислительным алгоритмом фильтра. При помощи цифро-аналогового преобразователя отфильтрованные цифровым образом выходные отсчёты конвертируются в аналоговый сигнал, который проходит аналоговую фильтрацию с целью устранения и сглаживания нежелательных высокочастотных компонентов.

Цифровой фильтр формируется из аналого-цифрового преобразователя, процессора, состоящего из памяти и арифметического устройства, цифро-аналогового преобразователя, сглаживающего фильтра нижних частот и генератора синхронизации [6]. Обобщённый алгоритм цифровой фильтрации может быть представлен следующим образом:

$$y(n) = \sum_{i=0}^{K} b_i \, x(n-i) + \sum_{j=0}^{M} a_i \, y(n-j),$$

где x(i), y(i) – отсчёты входной и выходной последовательностей, b_i, a_j – коэффициенты фильтра, определяемые с учётом требуемой амплитудно-частотной характеристики.

К достоинствам цифровых фильтров можно отнести [7]:

- возможность получения характеристики или реализации преобразования, практически недоступного при использовании аналоговых устройств;
- устойчивость к воздействию внешних факторов, таких как температура;
- возможность реализации нескольких алгоритмов обработки на единой аппаратной базе;
- малая габаритность при широком функционале;
- возможность применения при обработке медленно меняющихся сигналов.

В число основных недостатков цифровых фильтров входят ограничение по скорости обработки данных, влияние конечной разрядности на появление во входных данных погрешностей и высокая стоимость разработки.

Требования к цифровым фильтрам могут задаваться во временной и в частотной областях, в зависимости от назначения фильтра и удобства его описания [8]. К примеру, избирательные фильтры обычно задаются частотными характеристиками, а согласованные – импульсной характеристикой. В частотной области требования могут предъявляться как к комплексной частотной характеристике фильтра, так и к составляющим её модулю и фазе – амплитудно-частотной и фазочастотной характеристикам соответственно.

Основной функцией цифрового фильтра является выделение полезного сигнала, под которым понимается основная гармоника сигнала либо кратная ей и относящаяся к порядку три [9]. Описание входного цифрового сигнала, включающего полезный сигнал u(nT) и сигнал помехи e(nT), имеет следующий вид:

$$y(nT) = u(nT) + e(nT).$$

Для удобства синтеза цифрового фильтра в сигнале помехи выделяют ключевые составляющие, такие как описываемая экспонентой затухающая составляющая и первые нечётные высшие гармоники. На основе данных компонентов выстраиваются цифровые фильтры следующих алгоритмов:

- фильтр на основе дискретного преобразования Фурье, позволяющий получать косинусные фильтры;
- фильтр на основе метода наименьших квадратов, дающий возможность минимизировать сумму квадратов ошибок;
- формирователи ортогональных составляющих.

Цифровой фильтр может быть реализован следующими способами:

1. Аппаратный. Подразумевает применение различных функциональных блоков с жёсткой логикой: сумматоров, регистров, счётчиков, шифраторов и дешифраторов, устройств памяти, линий задержки, логических элементов, умножителей и прочих [10]. Комплекс функциональных блоков и существующих между ними связей определяет реализуемый алгоритм фильтрации. Преимуществом аппаратной реализации является высокое быстродействие, недостатками – необходимость менять структуру устройства при любом изменении алгоритма, потребность в большой мощности питания и организации теплоотвода, высокая стоимость и трудоёмкость разработки.
2. Программный. Подразумевает представление алгоритма в форме программы, последовательно выполняемой одним либо одновременно несколькими независимыми блоками [11]. Программа пишется на соответствующем конкретному операционному блоку языке программирования. К достоинствам программной реализации относятся значительная гибкость и одновременная неизменность структуры системы при различных алгоритмах, высокая скорость, простота и относительная дешевизна разработки фильтра, к недостаткам – относительно низкое быстродействие.
3. Программно-аппаратный. Подразумевает выполнение части функций системы аппаратно, а другой части – программно. Данная реализация стала получать широкое распространение с развитием

микроконтроллеров, в частности – микроконтроллеров семейства STM32.

Таким образом, принципы цифровой фильтрации широко применяются во многих областях: для обработки и последующего улучшения качества полученных от удалённых источников фотоснимков, рентгеновских плёнок и сигналов межпланетной связи, в картографии, обработке речи, звуко- и радиолокации, медицинской аппаратуре и прочем. Несмотря на преобладающее в настоящий момент программное исполнение цифровых фильтров, стремительное развитие микроэлектронной промышленности делает всё более распространённой комбинированную программно-аппаратную цифровую фильтрацию, позволяющую получать более доступные и эффективные цифровые фильтры.

Список литературы

1. Гульванский В.В. Разработка методов и алгоритмов спектрального анализа для повышения производительности устройств цифровой обработки сигналов: дис. … канд. техн. наук: 05.13.05 / Вячеслав Викторович Гульванский; С.-Петерб. гос. электротех. ун-т «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). – СПб., 2021. – 156 с.
2. Геложе Ю.А. Особенности формирования моделей цифровых фильтров в Matlab: учеб. пособие / Ю.А. Геложе, П.П. Клименко, В.Т. Корниенко; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону – Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2017. – 122 с.
3. Анисимов А.С., Чикильдин Г.П., Худяков Д.С. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. – Новосибирск, 2018. – 107 с.
4. Солонина А. И., Улахович Д. А., Яковлев Л.А. Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов: учеб. пособие. – СПб.: BHV, 2015. – 464 с.
5. Волковец А.И. Создание и обработка звука при разработке интерактивных приложений: конспект лекций. – Минск: БГУИР, 2018. – 153 с.

6. Вадутов О.С. Электроника. Математические основы обработки сигналов: учеб. и практ. для вузов / О.С. Вадутов. – М.: Изд-во Юрайт, 2022. – 307 с.
7. Бранцевич П.Ю. Цифровая обработка сигналов: конспект лекций. – Минск: БГУИР, 2015. – 63 с.
8. Коберниченко В.Г. Основы цифровой обработки сигналов: учеб. пособие / В.Г. Коберниченко; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 150 с.
9. Хамидуллин Р.Д., Объедков Е.Е. Эффективность использования цифровых фильтров в микропроцессорных устройствах релейной защиты // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2020: сборник трудов III Международного научно-технического форума. – Рязань, 2020. – С. 168-170.
10. Дахнович А.А. Дискретные системы и цифровая обработка сигналов: учеб. пособие / А.А. Дахнович. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 100 с.
11. Шишков А.Н. Цифровые сигнальные процессоры / А.Н. Шишков. – М.: МАИ, 2011. – 27 с.

Bibliography

1. Gulvansky V.V. Development of methods and algorithms for spectral analysis to improve the performance of digital signal processing devices: dis. … cand. tech. Sciences: 05.13.05 / Vyacheslav Viktorovich Gulvansky; St. Petersburg. state electrical engineering University "LETI" them. IN AND. Ulyanov (Lenin). - St. Petersburg, 2021. - 156 p.
2. Gelozhe Yu.A. Features of the formation of models of digital filters in Matlab: textbook. allowance / Yu.A. Gelozhe, P.P. Klimenko, V.T. Kornienko; South Federal University. - Rostov-on-Don - Taganrog: Publishing House of the Southern Federal University, 2017. - 122 p.
3. Anisimov A.S., Chikildin G.P., Khudyakov D.S. Digital signal processing: textbook. allowance. - Novosibirsk, 2018. - 107 p.

4. Solonin A. I., Ulakhovich D. A., Yakovlev L. A. Algorithms and processors of digital signal processing: textbook. allowance. - St. Petersburg: BHV, 2015. - 464 p.
5. Volkovets A.I. Creation and processing of sound in the development of interactive applications: lecture notes. - Minsk: BSUIR, 2018. - 153 p.
6. Vadutov O.S. Electronics. Mathematical foundations of signal processing: textbook. and pract. for universities / O.S. Vadutov. - M.: Publishing house Yurayt, 2022. - 307 p.
7. Brantsevich P.Yu. Digital Signal Processing: Lecture Notes. - Minsk: BSUIR, 2015. - 63 p.
8. Kobernichenko V.G. Fundamentals of digital signal processing: textbook. allowance / V.G. Kobernichenko; Ministry of Science and Higher. education Ros. Federation, Ural. feder. un-t. - Yekaterinburg: Ural Publishing House. un-ta, 2018. - 150 p.
9. Khamidullin R.D., Obedkov E.E. Efficiency of using digital filters in microprocessor relay protection devices // Modern technologies in science and education - STNO-2020: Proceedings of the III International Scientific and Technical Forum. - Ryazan, 2020. - S. 168-170.
10. Dakhnovich A.A. Discrete systems and digital signal processing: textbook. allowance / A.A. Dakhnovich. - Tambov: Tambov Publishing House. state tech. un-ta, 2007. - 100 p.
11. Shishkov A.N. Digital signal processors / A.N. Shishkov. – M.: MAI, 2011. – 27 p.

© *Пчелинцева В.М., 2022 Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №6/2022.*

Для цитирования: Пчелинцева В.М. РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ STM32// Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №6/2022.