

Особенности реализации вейвлет-пакетного разложения на микроконтроллере со сверхнизким энергопотреблением

А. Х. Х. Айд, А. В. Запайшиков, Е. М. Еникеева, А. Б. Степанов*
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
*dsp.sut@yandex.ru

Аннотация. Работа посвящена рассмотрению особенностей реализации вейвлет-пакетного разложения на микроконтроллере со сверхнизким энергопотреблением. Приведены основные определения и структурные схемы. В работе описан алгоритм кратномасштабного анализа. Получены результаты экспериментальных данных при исследовании сигналов электрокардиограмм и электроэнцефалограмм. Приведён и обоснован выбор элементной базы для реализации алгоритма. Разработан программный код для реализации данного алгоритма.

Ключевые слова: вейвлет, вейвлет-анализ сигнала, вейвлет-пакетное разложение, электрокардиограмма, электроэнцефалограмма, MSP430, кратномасштабный анализ, банк фильтров

I. ВВЕДЕНИЕ

Вейвлеты – это обобщённое название особых функций с нулевым интегральным значением, локализованные по оси времени, способные к сдвигу по ней и масштабированию [1–4].

При цифровой обработке сигналов широкое распространение получили методы и алгоритмы, основанные на использовании непрерывного [5], дискретного и пакетного вейвлет-преобразований [6].

Непрерывное вейвлет-преобразование используется в основном для выявления информационных признаков в сигнале [2]. Однако его недостатком является избыточность [4, 6], что затрудняет его применение при реализации алгоритмов цифровой обработки сигналов на элементной базе со сверхнизким энергопотреблением.

Дискретное вейвлет-преобразование широко применяется при сжатии сигналов и очистки их от шумов [6, 7].

Пакетное вейвлет-разложение – интегральное преобразование, позволяющее выделять отдельные составляющие в спектре исходного сигнала, а также устранять ненужные, т. е. производить выборочную фильтрацию.

Целью данной работы является рассмотрение особенностей реализации вейвлет-пакетного разложения на микроконтроллере со сверхнизким энергопотреблением.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

На рис. 1 представлена схема выполнения дискретного вейвлет-разложения [4]:

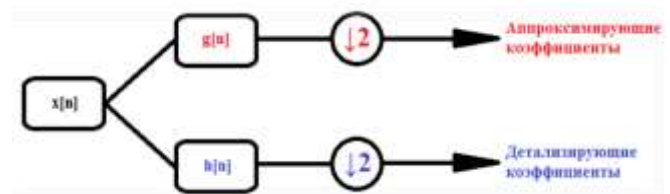


Рис. 1. Структурная схема для реализации алгоритма ДВП

В данной схеме $x[n]$ – исходный входной сигнал. Он поступает на два параллельных фильтра: фильтр нижних частот (ФНЧ) с импульсной характеристикой $g[n]$ и фильтр верхних частот (ФВЧ) с импульсной характеристикой $h[n]$. Далее с выхода каждого фильтра сигналы поступают на дециматоры с коэффициентом 2. На выходе ветви фильтра разложений нижних частот формируются аппроксимирующие коэффициенты. На выходе ветви фильтра разложений верхних частот формируются детализирующие коэффициенты.

На рис. 2 представлен алгоритм многоуровневого дискретного вейвлет-разложения. В процессе его выполнения осуществляется многократное разложение аппроксимирующих коэффициентов.

В данной схеме $x[n]$ – исходный входной сигнал. Он поступает на два параллельных фильтра: ФНЧ с импульсной характеристикой $g[n]$ и ФВЧ с импульсной характеристикой $h[n]$. Далее с выхода каждого фильтра сигналы поступают на дециматоры с коэффициентом 2. На выходе ветви фильтра разложений нижних частот формируются аппроксимирующие коэффициенты. На выходе ветви фильтра разложений верхних частот формируются детализирующие коэффициенты. Далее, на продолжении ветви аппроксимирующих коэффициентов стоит следующий каскад ДВП, обеспечивающий аналогичное разложение и разделение низкочастотных составляющих на аппроксимирующие коэффициенты и детализирующие коэффициенты.

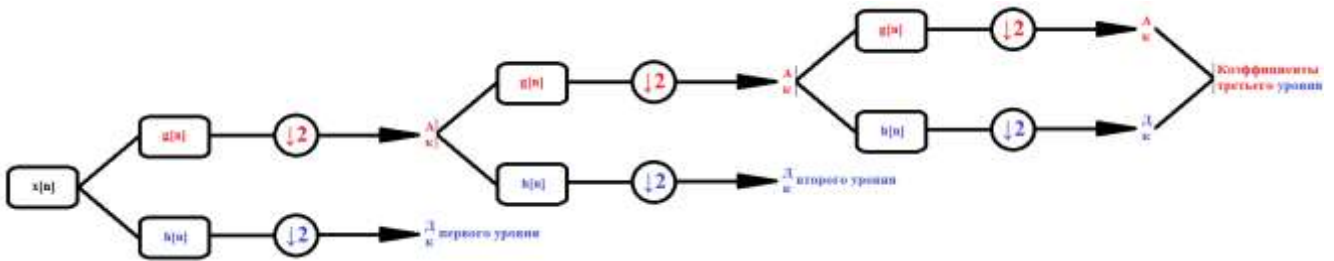


Рис. 2. Структурная схема для реализации алгоритма многоуровневого дискретного вейвлет-разложения

На рис. 3 представлен алгоритм выполнения вейвлет-пакетного разложения. В отличие от многоуровневого дискретного вейвлет-разложения повторному разложению подвергаются не только аппроксимирующие коэффициенты, но и детализирующие коэффициенты.

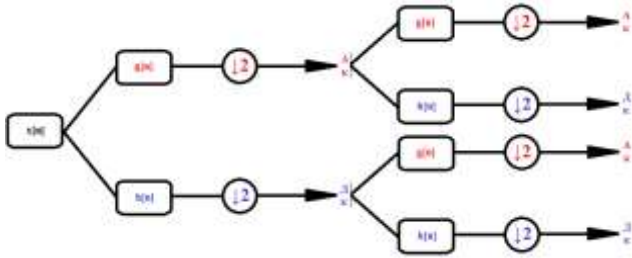


Рис. 3. Структурная схема для реализации алгоритма вейвлет-пакетного разложения

Работа данного алгоритма аналогична двум предыдущим, однако, стоит заметить, что за счёт дальнейшего разложения компонентов сигнала формируется дерево полного вейвлет-разложения, соответствующее банку цифровых фильтров.

Используя такие алгоритмы можно исследовать различные сигналы, в том числе биомедицинские, такие как электрокардиограмма и электроэнцефалограмма.

Электрокардиограмма (ЭКГ) – графическое отображение сложного колебательного электрического процесса, который является результатом регистрации электрических потенциалов, образующихся при работе сердца человека [8].

На рис. 4 представлен сигнал электрокардиограммы (красный цвет) до выполнения процедуры вейвлет-пакетного разложения.

Необходимо отметить характерный вид PQRS-комплекса. На рисунке также представлен тот же фрагмент электрокардиограммы, но после проведения процедуры вейвлет-сжатия сигнала с использованием вейвлет-пакетного разложения с удалением высокочастотных компонентов сигнала (чёрный цвет).

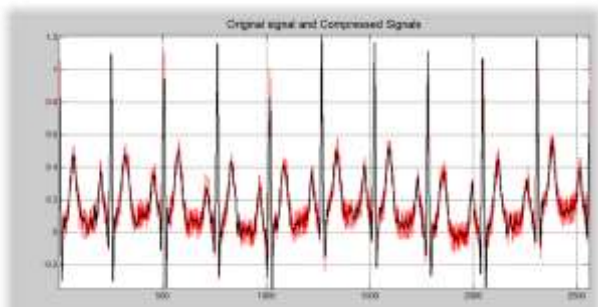


Рис. 4. Сигнал ЭКГ до и после компрессии (красный и чёрный графики соответственно)

На рис. 5 представлена древовидная структура вейвлет-пакетного разложения с использованием трёх уровней. Дерево образовано узлами (1;0), (0;1) – первого уровня разложения, (2;0), (2;1), (2;2), (2;3) – второго уровня и (3;0), (3;1), (3;2), (3;3), (3;4), (3;5), (3;6), (3;7) – третьего уровня разложения.

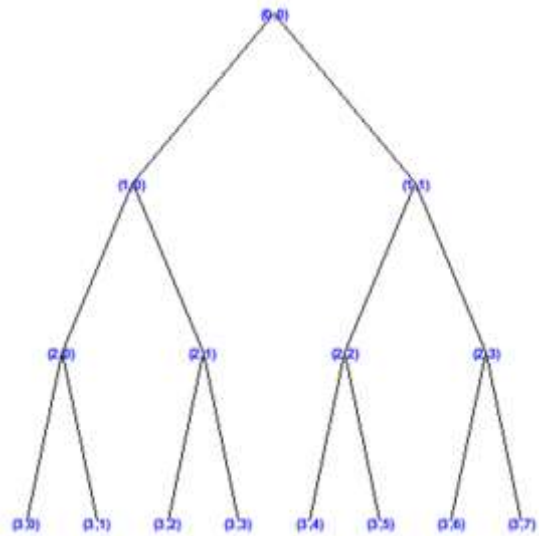


Рис. 5. Древовидная структура полного вейвлет-пакетного разложения до 3 уровня

На рис. 6 представлен сигнал, полученный в узле (3;0). Как следует из рисунка, данный узел соответствует низкочастотной составляющей сигнала (аппроксимирующей составляющей).

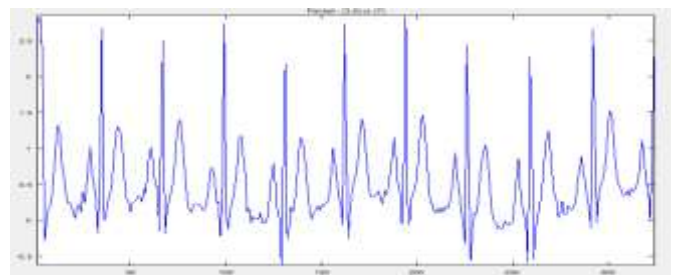


Рис. 6. Сигнал по ветви аппроксимирующих коэффициентов (узел 3; 0)

На рис. 7 представлен график сигнала, полученный в узле (3;7). Данный сигнал соответствует высокочастотной компоненте сигнала.

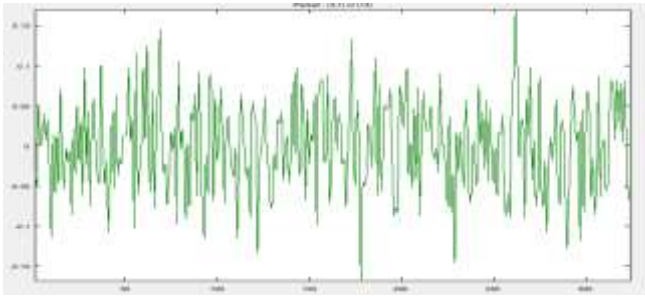


Рис. 7. Сигнал по ветви детализирующих коэффициентов (узел 3; 7)

В процессе процедуры сжатия сигнала с использованием вейвлет-пакетного разложения может быть сохранена только низкочастотная компонента сигнала. При этом, полученный сигнал после процедуры восстановления утратит высокочастотную составляющую. Таким образом, сжатие сигналов с применением вейвлет-пакетного разложения является сжатием с потерями.

Электроэнцефалограмма (ЭЭГ) – графическое отображение сложного колебательного электрического процесса, который регистрируется при помощи электроэнцефалографа при размещении его электродов на мозге или поверхности скальпа, и является результатом электрической суммации и фильтрации элементарных процессов в нейронах [8].

На рис. 8 представлен фрагмент электроэнцефалограммы до и после процедуры сжатия с использованием вейвлет-пакетного разложения.

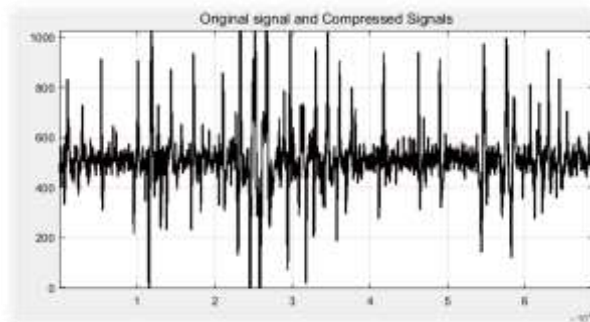


Рис. 8. Сигнал ЭЭГ до и после компрессии (красный и чёрный соответственно)

Процедура сжатия сигналов электрокардиограммы и электроэнцефалограммы схожи по своим принципам, но отличаются числом допустимых уровней разложения, что связано с особенностями формы и частотного состава сигналов.

При реализации алгоритмов вейвлет-пакетного разложения сигналов может использоваться различная элемент-база: цифровые сигнальные процессоры, программируемые логические интегральные схемы, графические процессоры, универсальные процессоры общего назначения и микроконтроллеры.

В данной работе предлагается в качестве элементной базы использование микроконтроллер MSP430Gxxx.



Рис. 9. Отладочная плата с микроконтроллером MSP430G2xxx

Для реализации вейвлет-пакетного разложения на данном микроконтроллере в интегрированной среде разработки Code Composer Studio был написан программный код (рис. 10).

```
#include "msp430g2452.h"
// Определение системы ввода-вывода
#define UART_TXD 0x02 // TXD (передатчик) на порт F1.1
(Timer0_A.OUT0)
#define UART_RXD 0x04 // RXD (приемник) на порт F1.2
(Timer0_A.CC1A)
// Настройка программного UART на 9600 бод, EMCLK = 4MHz
#define UART_TBIT_DIV_2 (8000000 / (9600 * 2))
// Длительность половинного бита
#define UART_TBIT (8000000 / 9600) // Длительность одного бита

// Определение глобальных переменных для работы полдуплексного UART
unsigned int txData; // Переменная для хранения передаваемых данных
unsigned char rxBuffer; // Переменная для хранения принятых данных
```

Рис. 10. Фрагмент программного кода для реализации вейвлет-пакетного разложения

Проведённые испытания показали, что реализованный алгоритм может быть использован при вейвлет-пакетном разложении электрокардиограммы и электроэнцефалограммы, исполняемый на элементной базе со сверхнизким энергопотреблением.

На основе качественного анализа можно сделать выводы, что для реализации вейвлет-пакетного разложения могут применяться различные ортогональные вейвлеты, но для гладких биомедицинских сигналов целесообразно использовать вейвлеты семейств: Daubechies, coiflet и symlet. Данные вейвлеты позволяют получить малые потери при вейвлет-сжатии сигналов и имеют приемлемые для выбранной элементной базы порядки фильтров. Для обработки ступенчатых сигналов может применяться вейвлет haar.

III. ВЫВОДЫ

В качестве основных результатов данной работы можно отметить следующее:

1. На элементной базе со сверхнизким энергопотреблением реализован алгоритм вейвлет-пакетного разложения.
2. При выборе вейвлета для вейвлет-пакетного разложения необходимо руководствоваться характеристиками обрабатываемого сигнала, учитывая их форму и частотный состав.

IV. ДАЛЬНЕЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Дальнейшие исследования могут быть направлены на анализ возможности применения элементной базы с низким энергопотреблением и приемлемой производительностью, например, микроконтроллеров STM32.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Блаттер К. Вейвлет-анализ. Основы теории. Москва: Техносфера, 2004. 276 с.
- [2] Витязев В.В. Вейвлет-анализ временных рядов: Учебное пособие. СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2001. 58 с.
- [3] Степанов А.Б., Помогалова А.В., Грибанов В.С., Богословский И.А., Айд Х.М.М. Применение микроконтроллеров при реализации вычислителя непрерывного вейвлет-преобразования, предназначенного для работы в условиях Арктики // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 2. С. 127-141. – DOI 10.25987/VSTU.2020.16.2.018.
- [4] Штарк Г.Г. Применение вейвлетов для ЦОС. Москва: Техносфера, 2007. 192 с.
- [5] Журавов, Д.В., Степанов А.Б. Реализация алгоритмов цифровой обработки сигналов на основе непрерывного вейвлет-преобразования средствами MATLAB // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: IV Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сборник научных статей в 2 томах, Санкт-Петербург, 03–04 марта 2015 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2015. С. 99-103.
- [6] Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. М.: ДМК Пресс, 2014. 628 с.
- [7] Журавов Д.В., Степанов А.Б. Реализация процедуры вейвлет-сжатия на цифровом сигнальном процессоре // Юбилейная 70-я всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио, Санкт-Петербург, 21–29 апреля 2015 года. Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. С. 86-87.
- [8] Ронкин М.А., Зенков Л.Р. Функциональная диагностика нервных болезней. Руководство для врачей. Изд. 5-е, Издательство МЕДпресс-информ, 2013, 488 с.