

Модифицированные алгоритмы вычисления непрерывного вейвлет-преобразования сигналов, предназначенные для реализации на элементной базе с низким и сверхнизким энергопотреблением

А. Б. Степанов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
sabarticle@yandex.ru

Аннотация. The paper describes two modified algorithms for calculating the continuous wavelet transform of signals developed by the author and intended for implementation on an element base with low and ultra-low power consumption. The first algorithm allows calculating continuous wavelet transform with optimization of the signal length depending on the characteristics of the selected element base. As studies have shown, this algorithm is more suitable for implementation on microcontrollers with low energy consumption. The second algorithm is designed to perform distributed calculations of continuous wavelet transform on microcontrollers with ultra-low power consumption.

Ключевые слова: wavelet; continuous wavelet transform; calculation algorithm; microcontroller; ultra low power consumption

I. ВВЕДЕНИЕ

Вейвлеты – это обобщенное название функций с нулевым интегральным значением, обладающие компактным носителем, способные к сдвигу и масштабированию [1, 2].

Вейвлет-анализ получает все большее распространение в алгоритмах цифровой обработки сигналов [3–5]. Значительная их часть базируется на применении непрерывного вейвлет-преобразования (НВП), наиболее часто используемого при выявлении информативных признаков в сигнале [6].

Формула непрерывного вейвлет-преобразования функции $f(t) \in L^2(R)$ имеет вид:

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

где $\psi(t)$ – вейвлет-функция, параметр a – определяет размер вейвлета, b – задает сдвиг по оси времени, так что $a, b \in R, a \neq 0$.

Непрерывное вейвлет-преобразование по определению является избыточным, поэтому при реализации алгоритмов его вычисления обычно применяется высокопроизводительная элементная база, например,

процессоры общего назначения или цифровые сигнальные процессоры [7]. Как правило, реализация систем цифровой обработки сигналов на данных устройствах требует значительных энергетических затрат, что может негативно отразиться на времени ее работы при автономном исполнении.

Использование элементной базы с низким или сверхнизким энергопотреблением требует преодоления ряда трудностей, связанных в первую очередь с ограничениями объема внутренней памяти.

В данной работе предлагаются модифицированные алгоритмы вычисления непрерывного вейвлет-преобразования сигналов, предназначенные для реализации на элементной базе с низким и сверхнизким энергопотреблением, например, на микроконтроллерах.

II. МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ВЫЧИСЛЕНИЯ НВП

Как известно [1, 3], результатом вычисления НВП является матрица вейвлет-коэффициентов, которая может быть визуализирована в виде вейвлет-спектрограммы. Этот вид графика позволяет выполнять частотно-временной анализ сигналов.

В качестве примера анализируемого сигнала в работе выбран фрагмент электроэнцефалограммы (рис. 1 а).

Электроэнцефалограмма (ЭЭГ) – это сигнал, который может быть зарегистрирован на поверхности головы человека и позволяет оценить деятельность различных групп нейронов головного мозга [8, 9].

При анализе ЭЭГ необходимо выявлять ее основные ритмы и графоэлементы особой формы, характерные для определенного физиологического состояния человека [10]. Для выявления ритмов ЭЭГ обычно используются методы, основанные на применении преобразования Фурье. Для выявления графоэлементов могут быть использованы алгоритмы на основе НВП [10].

На рис. 1 б представлена вейвлет-спектрограмма анализируемого сигнала. Данный график был получен в системе MATLAB при использовании вейвлета Гаусса.

Как следует из рисунка, все высокочастотные составляющие, соответствующие мелким деталям сигнала,

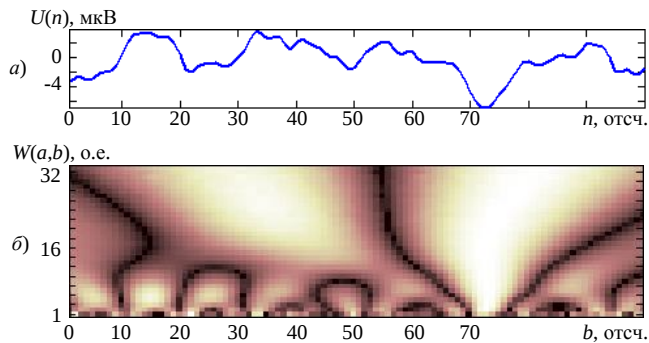


Рис. 1. Непрерывное вейвлет-преобразование фрагмента электроэнцефалограммы: а) сигнал; б) вейвлет-спектрограмма

и низкочастотные составляющие, соответствующие крупным деталям, нашли свое отражение на вейвлет-спектрограмме.

Среди методов вычисления непрерывного вейвлет-преобразования можно выделить следующие [7]:

1. Метод на основе взаимно-корреляционной функции сигнала и вейвлета.
2. Метод на основе быстрого преобразования Фурье.
3. Метод на основе дискретного вейвлет-преобразования.

Значительная часть микроконтроллеров с низким и сверхнизким энергопотреблением поддерживают работу только с числами с фиксированной точкой. Проведенные исследования [7] показали, что при использовании элементной базы с фиксированной точкой целесообразно

использовать метод на основе взаимно-корреляционной функции сигнала и вейвлета. В данной работе при реализации алгоритма вычисления НВП на элементной базе с низким и сверхнизким энергопотреблением рекомендуется:

1. Выполнять вычисление вейвлет-коэффициентов только для значений масштаба, соответствующих основным частотам определяемых графоэлементов.
2. При вычислении НВП использовать значения вейвлета, рассчитанные заранее и записанные в ПЗУ устройства.
3. Выполнять расчет НВП для фрагментов сигналов длиной, выбранной исходя из характеристик микроконтроллера и частоты дискретизации сигнала (с перекрытием).
4. При наличии возможности – использовать распределение вычислений между отдельными устройствами.

Эти рекомендации нашли свое отражение в предложенных в данной работе алгоритмах: вычисления НВП с перекрытиями соседних фрагментов сигнала (рис. 2) и распределенных вычислений НВП (рис. 3).

III. АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ НВП С ПЕРЕКРЫТИЯМИ СОСЕДНИХ ФРАГМЕНТОВ СИГНАЛА

На рис. 2 представлен алгоритм вычисления НВП с перекрытиями соседних фрагментов сигнала. Рассмотрим данный алгоритм более подробно.

Оригинальный сигнал подвергается разделению на фрагменты фиксированной длины. Для определения используемой длины сигнала выполняются следующие операции:

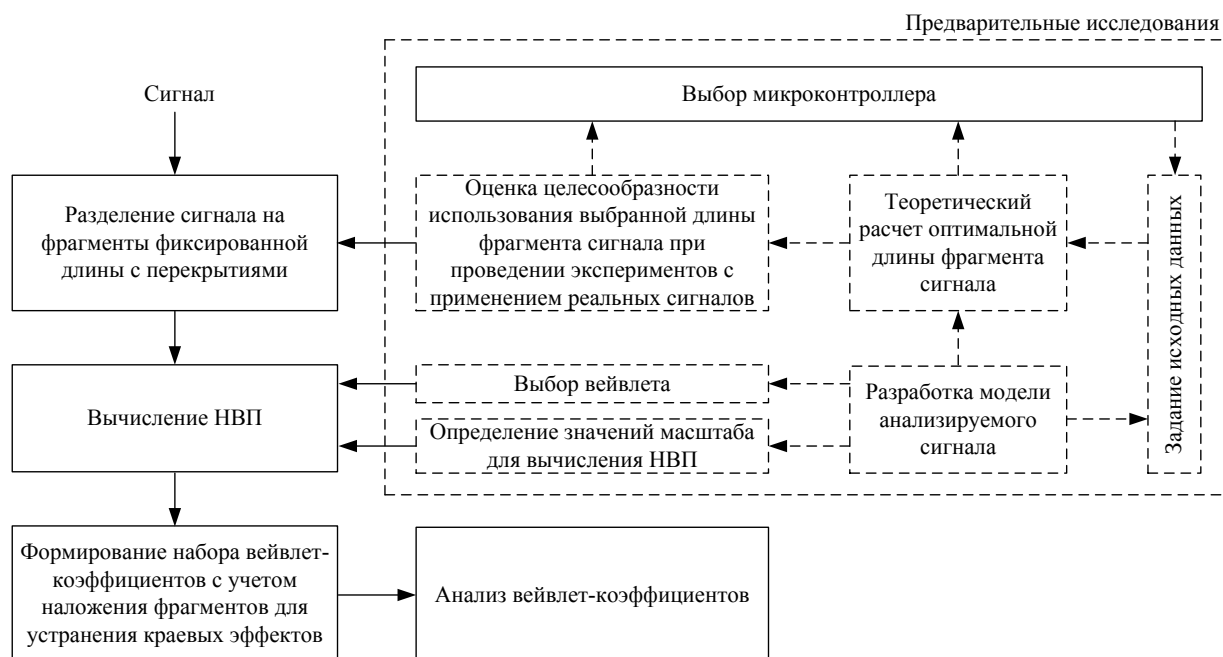


Рис. 2. Алгоритм вычисления НВП с перекрытиями соседних фрагментов сигнала

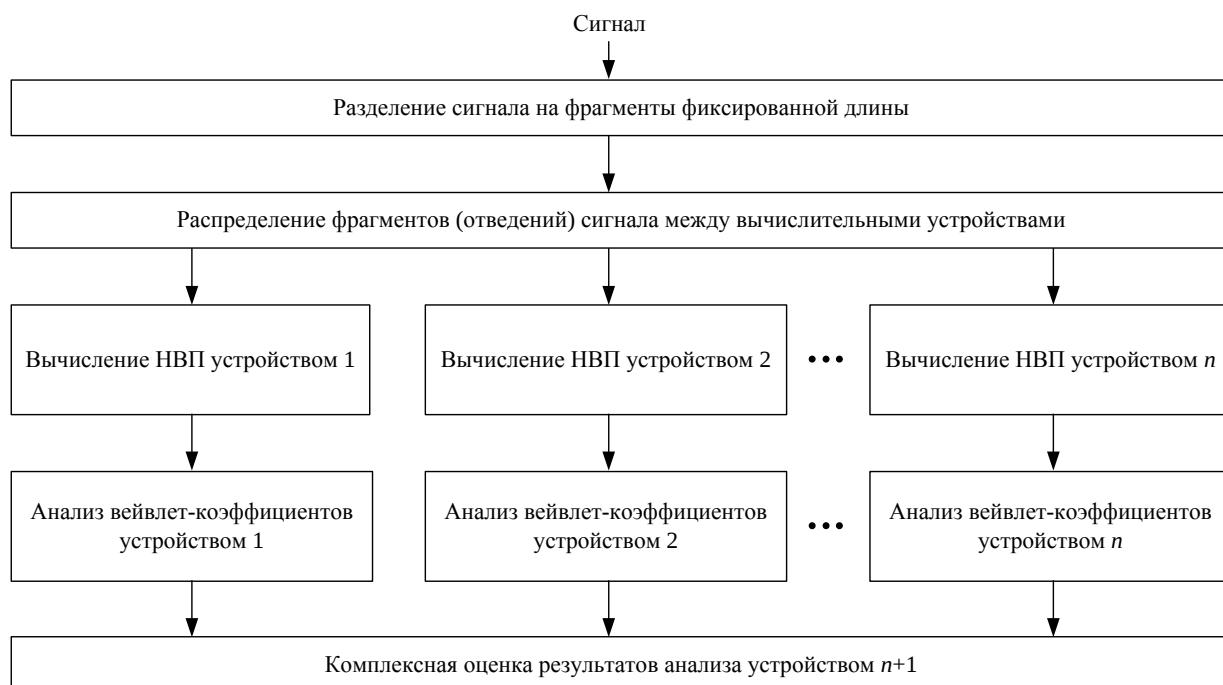


Рис. 3. Алгоритм распределенных вычислений НВП

1. Разрабатывается модель анализируемого сигнала (формальная и / или описательная).
2. Задаются исходные данные:
 - частота дискретизации сигнала;
 - число отведений в сигнале;
 - характеристики микроконтроллера;
 - особенности анализа сигнала (характеристики определяемых в сигнале графоэлементов, в том числе основные частоты; минимальная длина сигнала при определении информационного признака; типовая длина фрагмента сигнала при его анализе физиологом).
3. Теоретический расчет оптимальной длины фрагмента сигнала. В случае, если рассчитанная длина фрагмента не соответствует требованиям, полученным при разработке модели анализируемого сигнала, выполняется замена микроконтроллера.
4. После определения оптимальной длины фрагмента сигнала для выбранного микроконтроллера производится оценка целесообразности использования выбранной длины при проведении экспериментов с применением реальных сигналов. Если результаты теоретических расчетов совпадают с результатами экспериментов, то данная длина фрагмента сигнала используется при дальнейшей реализации алгоритма вычисления НВП.

Для вейвлет-анализа сигналов при НВП целесообразно использовать вейвлеты, адаптированные к данному типу

сигнала. Выбор вейвлета (а также при необходимости его синтез) осуществляется на основе модели анализируемого сигнала. Также исходя из необходимости выявления тех или иных информационных признаков в сигнале (графоэлементов) определяются значения масштаба, применяемые при вычислении НВП и соответствующие основным частотам искомых графоэлементов.

Выбор микроконтроллера, вейвлета, значений масштаба и длины фрагмента сигнала определяется заранее – на этапе написания программного кода (на рисунке данные этапы отмечены пунктирной линией).

Значения вейвлета, рассчитанные для заданного масштаба, записываются в ПЗУ микроконтроллера и используются при вычислении НВП.

При формировании итогового набора вейвлет-коэффициентов учитываются краевые эффекты, возникающие при вычислении НВП. Для их исключения при формировании фрагментов сигнала используется частичное наложение соседних фрагментов, что позволяет исключить при анализе вейвлет-коэффициенты с искажениями.

Далее полученный набор вейвлет-коэффициентов подвергается анализу с целью выявления информационных признаков в сигнале.

IV. АЛГОРИТМ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НВП

На рис. 3 представлен алгоритм распределенных вычислений НВП. Рассмотрим данный алгоритм более подробно.

На первом этапе происходит разделение сигнала на фрагменты фиксированной длины. Процедура определения оптимальной длины фрагмента сигнала аналогична

описанной ранее. Далее происходит распределение фрагментов сигнала между различными вычислительными устройствами (микроконтроллерами). Для многоканальных сигналов, таких, например, как электроэнцефалограмма, возможно распределение данных между устройствами не по фрагментам в рамках одного канала, а по каналам, что является более целесообразным.

Далее происходит вычисление НВП конкретной части сигнала каждым отдельным устройством. При этом используются вейвлеты и значения масштаба, выбранные аналогично алгоритму, описанному на рис. 2.

Полученные вейвлет-коэффициенты анализируются непосредственно на том устройстве, где производилось вычисление НВП.

Все полученные результаты анализируются отдельным устройством $n+1$. При этом выполняется комплексная оценка и формируется отчет об анализе данного сигнала.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализируем предложенные в данной работе модифицированные алгоритмы вычисления НВП:

1. Алгоритм вычисления НВП с перекрытиями соседних фрагментов сигнала позволяет использовать оптимальную для выбранного микроконтроллера длину фрагмента сигнала. Данный алгоритм целесообразно использовать для элементной базы, обладающей низким энергопотреблением и относительно невысокой производительностью.
2. Алгоритм распределенных вычислений НВП позволяет уменьшить нагрузку на каждое отдельное вычислительное устройство. Данный алгоритм целесообразно применять для устройств,

обладающих сверхнизким энергопотреблением и низкой производительностью. Необходимо отметить, что его использование эффективно только в том случае, когда система цифровой обработки сигналов уже имеет распределенную структуру. В противном случае, повышение сложности системы (увеличение числа элементов и связей между ними) может привести к обратному эффекту – увеличению суммарного энергопотребления и снижения надежности системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Арбузов С.М., Степанов А.Б. Применение методов вейвлет-анализа в электроэнцефалографии. СПб: Линк, 2009. 104 с.
- [2] Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. М.: ДМК-Пресс, 2005. 304 с.
- [3] Stark H.-G. Wavelets and Signal Processing. Springer. 2005.
- [4] Blatter C. Wavelets - Eine Einfuhrung. A.K. Peters, Ltd. 1998.
- [5] Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets. SIAM. 1992.
- [6] Витязев В.В. Вейвлет-анализ временных рядов. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2001.
- [7] Zhuravov D.V., Stepanov A.B. Application of Simulink in the Implementation of Calculation Algorithms for Continuous Wavelet Transform on a Digital Signal Processor // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 5. С. 12.
- [8] Зенков Л.Р., Ронкин М.А. Функциональная диагностика нервных болезней: руководство для врачей. М.: МЕДпресс-информ, 2011. 448 с.
- [9] Гнездицкий В.В. Обратная задача ЭЭГ и клиническая электроэнцефалография (картирование и локализация источников электрической активности мозга). М. : МЕДпресс-информ, 2004. 624 с.
- [10] Stepanov A.B. The Application of Neural Network and Spline Wavelet Models in the Electroencephalogram Analysis Automation Process, in Proc. FRUCT Conf., Apr. 2016, pp. 321-327.