

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ СИГНАЛА АРТЕРИАЛЬНОЙ ПУЛЬСАЦИИ КРОВИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕБРАЗОВАНИЙ

© 2012 Л. И. Калакутский, А. А. Федотов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

В статье рассматривается использование методики цифровой обработки биосигналов артериальной пульсации крови человека в условиях присутствия двигательных артефактов на основе применения кратномасштабных вейвлет-преобразований. Предложена структурная блок-схема для обработки сигнала артериальной пульсации крови, включающая в себя этапы декомпозиции и реконструкции биосигнала. Показана высокая эффективность использования предлагаемого метода цифровой обработки сигнала артериальной пульсации крови на основе применения дискретных вейвлет-преобразований по сравнению с использованием классического метода на основе фильтрации скользящего среднего.

Сигнал артериальной пульсации крови, цифровая фильтрация биосигналов, кратномасштабное вейвлет-преобразование.

Регистрация и обработка сигнала артериальной пульсации крови находит широкое применение в инструментальных системах кардиологической диагностики для мониторинга частоты сердечных сокращений, определения степени насыщения гемоглобина артериальной крови кислородом, исследования гемодинамических процессов в артериальном русле [1, 2].

Регистрация сигнала артериальной пульсации крови с помощью плетизмографических или сфигмографических датчиков сопровождается наличием помех физической и физиологической природы. Помехи электрической природы возникают в усилительном тракте систем регистрации сигнала артериальной пульсации крови в результате влияния внешних электромагнитных полей, создаваемых, главным образом, электрической сетью питания [2, 3]. Помехи физиологического происхождения можно разделить на две группы: артефакты, обусловленные движениями пациента, и помехи, создаваемые дыханием пациента.

Дыхательные тренды, присутствующие в сигнале артериальной пульсации крови, искажают изолинию и форму биосигнала. Двигательные артефакты носят

случайный характер и приводят к наибольшим искажениям биосигнала. Обработка сигнала артериальной пульсации крови на фоне присутствия двигательных артефактов связана с рядом трудностей, заключающихся в том, что природа появления двигательных артефактов имеет случайный характер, а их частотные компоненты перекрываются с основной полосой частот сигнала артериальной пульсации крови, что затрудняет использование классических методов линейной частотной фильтрации.

В настоящее время перспективным направлением в области обработки биосигналов, искаженных широкополосными шумами и помехами, является фильтрация на основе использования дискретных вейвлет-преобразований [4]. Очистка сигналов от шума может быть реализована непосредственно удалением детализирующих коэффициентов высокочастотных уровней вейвлет-разложений [5].

Шумовые компоненты биосигналов, и особенно большие случайные выбросы значений сигналов, можно рассматривать в виде множеств локальных особенностей сигналов. Процедура вейвлет-преобразования сигнала является, по сути, результа-

том фильтрации исходного сигнала фильтром с конечной импульсной характеристикой, представляющей собой дискретизированные отсчеты материнского вейвлета.

Дискретное вейвлет-преобразование включает в себя стадию декомпозиции сигнала и стадию реконструкции сигнала. Декомпозиция сигнала представляет собой фильтрацию исходного сигнала с помощью низкочастотных фильтров, импульсная характеристика которых представляет собой аппроксимирующие коэффициенты, и высокочастотных фильтров, отсчеты импульсной характеристики которых представляют собой детализирующие коэффициенты [5]. После стадии декомпозиции сигнала происходит удаление “шумовых компонент сигнала” с последующей реконструкцией исходного сигнала, очищенного от шумов и помех.

Основу предлагаемой методики составляет использование пороговых функций различной формы, на основе которых происходит ограничение уровня детализирующих коэффициентов вейвлет-преобразования. Задав определенный порог и «отсекая» коэффициенты ниже этого порога, можно значительно снизить уровень шума. Согласно теории вейвлет-преобразований, низкочастотные (аппроксимирующие) коэффициенты вейвлет-разложения обладают большей энергией сигнала, что делает их более важными для использования на стадии реконструкции. Высокочастотные (детализирующие) коэффициенты вейвлет-разложения обладают меньшей энергией сигнала, и зачастую представляют собой шумовые компоненты исходного сигнала [4]. Таким образом, в задачах фильтрации сигнала представляется целесообразным отбросить детализирующие коэффициенты вейвлет-разложения, получаемые на ранних стадиях декомпозиции сигнала.

Основными этапами предлагаемого алгоритма являются:

1. Вычисление прямого вейвлет-преобразования сигнала (выбор типа вейвлет-функции и числа уровней вейвлет-разложения).

2. Изменение полученных коэффициентов преобразования по определенному правилу (выбор алгоритма нахождения порогового значения, выбор пороговой функции, выбор стратегии обработки детализирующих коэффициентов вейвлет-разложения).

3. Вычисление обратного вейвлет-преобразования от множества модифицированных (обработанных) вейвлет-коэффициентов.

На рис. 1 приведена структурная схема декомпозиции сигнала артериальной пульсации крови, включающая обработку сигнала высокочастотным и низкочастотным фильтрами и процедуры децимации (здесь: $H(n)$ – импульсная характеристика высокочастотного фильтра, $G(n)$ – импульсная характеристика низкочастотного фильтра), а также зависимости изменения сигнала от времени на различных этапах обработки.

На рис. 2 приведена блок-схема обработки сигнала артериальной пульсации крови на основе применения вейвлет-преобразования. На первом этапе обработки осуществляется декомпозиция исходного сигнала, далее детализирующие коэффициенты, полученные на ранних стадиях приравниваются к нулю, а на поздних стадиях проходят пороговую обработку, на заключительном этапе осуществляется реконструкция сигнала, включающая в себя процедуры интерполяции и обратного вейвлет-преобразования.

Качество фильтрации сигнала будет определяться выбором значения порогового уровня. В качестве порога в данной работе предлагается использовать значение, определяемое следующим образом:

$$T = p \cdot \sqrt{2 \ln(N)}, \quad (1)$$

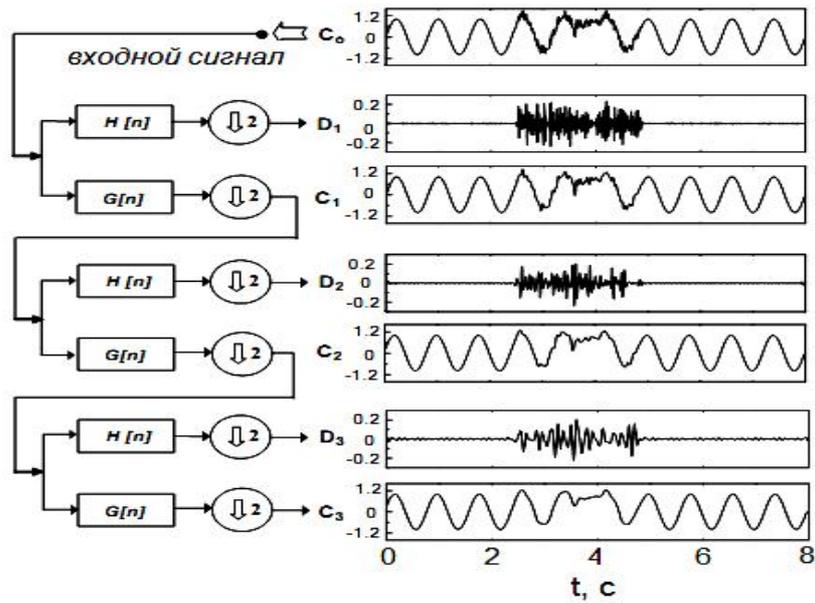


Рис. 1. Структурная схема обработки сигнала на стадии декомпозиции и зависимости изменения биосигналов на различных этапах обработки от времени

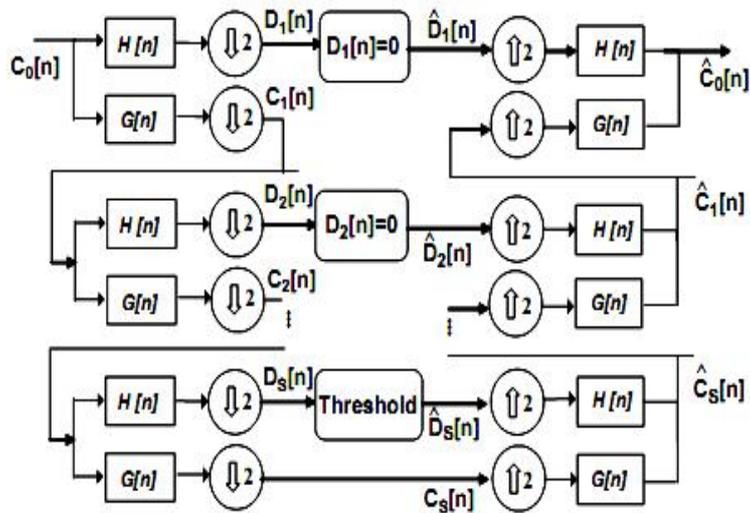


Рис. 2. Блок-схема обработки сигнала артериальной пульсации крови на основе применения вейвлет-преобразования

где T – пороговое значение; N – общее количество отсчетов обрабатываемого сигнала; p – медиана абсолютного значения последовательности детализирующих коэффициентов, лежащих на самом низком уровне разложения.

В данной работе в качестве материнского вейвлета использовался вейвлет Добеши, число уровней вейвлет-разложений было равно 4, при этом была использована жесткая пороговая функция.

Альтернативным и более простым методом обработки сигнала артериальной пульсации крови может служить фильтрация во временной области на основе использования фильтра скользящего среднего (ФСС) [6]:

$$y(n) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x(n-j),$$

где $x(n)$ – входной сигнал; N – ширина скользящего окна; $y(n)$ – выходной сигнал.

Применение ФСС приводит к сглаживанию исходного сигнала и обычно используется для устранения ошибок квантования и для устранения высокочастотных шумов в сигнале. Свойства такого рода фильтров полностью определяются шириной скользящего окна N , которая в свою очередь будет зависеть от величины частоты дискретизации обрабатываемого сигнала.

Оценкой эффективности использования той или иной методики фильтрации сигнала артериальной пульсации крови в условиях присутствия дыхательных помех и двигательных артефактов может служить чувствительность обнаружения опорных точек биосигнала, в качестве которых наиболее удобно использовать точку систолического максимума сигнала. Чувствительность обнаружения (S) оценивается как относительная доля успешно обнаруженных опорных точек (P^+) к общему числу опорных точек (P) в рассматриваемом фрагменте биосигнала. Обнаружение точки систолического максимума

сигнала происходит на основе трехточечной схемы детектирования [6].

Для регистрации биосигналов использовался сертифицированный компьютерный фотоплетизмограф “ЭЛДАР”, позволяющий регистрировать сигналы периферической артериальной пульсации крови и передавать данные в компьютер с частотой дискретизации 500 Гц. В качестве различных вариантов цифровой фильтрации сигнала артериальной пульсации крови в данной работе использовались предлагаемая методика на основе вейвлет-преобразований сигнала, а также методика на основе применения ФСС, реализуемого при различных значениях ширины скользящего окна.

В табл. 1 приведены значения эффективности обнаружения опорных точек сигнала артериальной пульсации крови для 12 различных фрагментов сигнала артериальной пульсации крови, искаженного дыхательными помехами и двигательными артефактами различной интенсивности.

Таблица 1. Эффективность обнаружения опорных точек сигнала артериальной пульсации крови на основе использования ФСС и вейвлет-преобразований

Обследуемый	A	B	C	D	E	F
P, шт	123	109	115	93	176	135
P ⁺ (вейв.), шт	122	106	114	82	166	134
P ⁺ (ФСС), N=250, шт	115	99	108	76	123	128
P ⁺ (ФСС), N=125, шт	114	104	113	69	161	130
P ⁺ (ФСС), N=62, шт	114	69	106	76	155	125
S (вейв.), %	99,2	97,3	99,1	88,2	94,3	99,3
S (ФСС), N=250, %	93,5	90,8	93,9	81,7	69,9	94,8
S (ФСС), N=125, %	92,7	95,4	98,3	74,2	91,5	96,3
S (ФСС), N=62, %	92,7	63,3	92,2	81,7	88	92,6
Обследуемый	G	H	I	J	K	Среднее значение
P, шт	149	114	131	117	145	
P ⁺ (вейв.), шт	147	113	129	114	141	
P ⁺ (ФСС), N=250, шт	128	105	119	96	113	
P ⁺ (ФСС), N=125, шт	141	105	125	93	135	
P ⁺ (ФСС), N=62, шт	144	89	120	62	127	
S (вейв.), %	98,6	99,1	98,5	97,4	97,2	
S (ФСС), N=250, %	85,9	92,1	90,8	82,1	77,9	
S (ФСС), N=125, %	94,6	92,1	95,4	79,5	93,1	
S (ФСС), N=62, %	96,6	78,1	91,6	53	87,6	

Анализ полученных результатов показал, что применение методики обработки сигнала артериальной пульсации крови на основе использования вейвлет-преобразований позволяет получить максимальную чувствительность обнаружения опорных точек биосигнала, близкую к 100%, в то время как фильтрация сигнала на основе использования ФСС дает заметно худшую чувствительность. Необходимо отметить, что использование скользящего окна с шириной, равной $\frac{1}{4}$ от величины частоты дискретизации ($N=125$), позволяет обеспечить наилучшую чувствительность обнаружения опорных точек биосигнала.

Несмотря на заметно более высокую чувствительность обнаружения опорных точек биосигнала, достигаемую при использовании методики обработки на основе применения вейвлет-преобразований, необходимо заметить, что реализация фильтрации биосигнала с помощью ФСС обладает неоспоримым преимуществом в быстродействии и простоте алгоритмической реализации, поэтому применение ФСС может быть целесообразным в системах оперативного мониторинга при обработке в режиме реального времени, в то время как использование вейвлет-

преобразований может быть реализовано при offline обработке биосигналов.

Библиографический список

1. Allen, J. Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement [Текст] / J. Allen // *Physiological Measurement*. – 2007. – Vol. 28. – P. 1-39.
2. Webster, J.G. Design of Pulse Oximeters [Текст] / J.G. Webster – *The Medical Science Series*, Taylor & Francis, 1997. – 260 p.
3. Калакутский, Л.И. Аппаратура и методы клинического мониторинга: Учебное пособие [Текст] / Л.И. Калакутский, Э.С. Манелис. – Самара: СГАУ, 1999. – 160 с.
4. Fu, T.H. Heart rate extraction from photoplethysmogram waveform using wavelet multi-resolution analysis [Текст] / [Т.Н. Fu et al] // *Journal of medical and biological engineering*. – 2008. – Vol. 28 (4). – P. 229-232.
5. Strang, G. Wavelets and Filters Banks. [Текст] / G. Strang, T. Nguyen. – *Wellesley-Cambridge-Press*, 1996. – 490 p.
6. Рангайян, Р.М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход [Текст] / Пер. с англ. Под ред. А.П. Немирко – М.: Физматлит, 2007. – 440 с.

DISTAL ARTERIAL PULSE SIGNAL PROCESSING METHOD BASED ON WAVELET TRANSFORMS

© 2012 L.I. Kalakutskiy, A.A. Fedotov

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

This article is devoted to the distal arterial pulse signal processing method in the presence of motion artifact based on the multiresolution wavelet transform. The block diagram of the distal arterial pulse signal processing method composed of two stages of signal decomposition and signal reconstruction was proposed. The high efficiency of the proposed distal arterial pulse signal processing method based on discrete wavelet transform over using classical method based on the moving average filter was shown.

Distal arterial pulse, digital biosignals processing, multiresolution wavelet transform.

Информация об авторах

Калакутский Лев Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: bme@ssau.ru. Область научных интересов: моделирование биотехнических систем, разработка неинвазивных систем кардиологической диагностики, измерительные преобразователи биологической информации.

Федотов Александр Александрович, кандидат технических наук, ассистент кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: fedoaleks@yandex.ru. Область научных интересов: цифровая обработка биосигналов, измерительные преобразователи биологической информации.

Kalakutskiy Lev Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, head of radioengineering and biomedical engineering department. Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: bme@ssau.ru. Area of scientific: modeling of biotechnical systems, development systems noninvasive cardiac diagnostic, measuring transducers of biological information.

Fedotov Alexander Alexandrovich, candidate of technical sciences, assistant professor of radioengineering and biomedical engineering department. Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: fedoaleks@yandex.ru. Area of scientific: digital processing of biosignals, transducers of biological information.