

УДК 004.02



МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ QRS-КОМПЛЕКСОВ ЭКГ-СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ТРЕШОЛДИНГА

В.И. Дубровин¹, Ю.В. Твердохлеб²

¹ Запорожский национальный технический университет,
г. Запорожье, Украина, vdubrovin@gmail.com;

² Запорожский национальный технический университет,
г. Запорожье, Украина, tv_julia@mail.ru

Предлагается метод обнаружения QRS-комплексов ЭКГ-сигналов на основе вейвлет-преобразования с применением вейвлет-трешолдинга. Обоснован выбор типа вейвлет-носителя для применения в дискретном вейвлет-преобразовании, а также выбор метода вейвлет-трешолдинга, обеспечивающий наибольшую точность в обнаружении QRS-комплексов.

ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЕ, ВЕЙВЛЕТ-ТРЕШОЛДИНГ, ЭКГ-СИГНАЛЫ

Введение

Электрокардиограмма (ЭКГ) представляет собой запись электрических потенциалов активности сердца, снятую с одного или нескольких отведений, и состоит из периодической последовательности кардиоциклов. В типичном кардиоцикле выделяют несколько элементов: Р-волна, QRS-комплекс и Т-волна (рис. 1). Отправной точкой ряда современных методик компьютерной электрокардиографии является выделение положения QRS-комплекса. Этот комплекс отражает процесс деполяризации желудочков. Зная информацию об QRS-комплексе, можно выявить такие заболевания как: инфаркт миокарда, тахикардия, блокада правой и левой ножки пучка Гиса, синдром Вольфа-Паркинсона-Уайта.

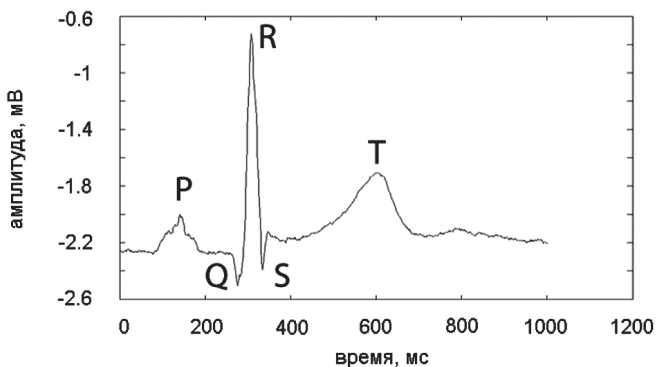


Рис. 1. Типичный комплекс электрокардиограммы

В настоящее время для анализа ЭКГ-сигнала перспективно применение вейвлет-анализа. Вейвлеты – это обобщенное название семейств математических функций определенной формы, которые локальны по времени и по частоте, и в которых все функции получаются из одной базовой (порождающей) функции посредством ее сдвигов и растяжений по оси времени. В общем случае вейвлет-преобразование функции $f(t)$ имеет вид (1) [1]:

$$W(x,s) = \frac{1}{s} \int_{-\infty}^{\infty} \psi^* \left(\frac{t-x}{s} \right) f(t) dt, \quad (1)$$

где t – ось времени; x – момент времени; s – параметр, обратный частоте; $*$ – символ комплексной сопряженности; ψ – некоторая функция.

Основная область применения вейвлетных преобразований – анализ и обработка сигналов и функций, нестационарных во времени или неоднородных в пространстве, когда результаты анализа должны содержать не только частотную характеристику сигнала, но и сведения о локальных координатах. По сравнению с разложением сигналов на ряды Фурье вейвлеты способны с гораздо более высокой точностью представить локальные особенности сигналов, вплоть до разрывов первого рода.

Целью авторов работы является разработка метода обнаружения QRS-комплексов ЭКГ-сигнала, обеспечивающего наибольшую точность.

1. Выбор типа вейвлет-носителя

В теории вейвлет-преобразования существует множество вейвлет-функций, которые могут использоваться в качестве базиса разложения и соответствующих им фильтров. Под оптимальным вейвлетом будем иметь в виду тот, который обеспечивает правильное местоположение QRS-комплекса в ЭКГ-сигнале, т.е. начальное и конечное положение Q, R и S зубцов. Введем следующие ограничения: базовый вейвлет может быть применен к дискретному вейвлет-преобразованию, порядок высокочастотных и низкочастотных фильтров, предназначенных для выделения детализирующей и аппроксимирующей составляющих, не должен превышать 10 (из-за большой ресурсоемкости). Результаты сравнений вейвлет-функций, удовлетворяющие перечисленным выше требованиям, отображены в табл. 1.

Согласно полученным результатам наилучшим вейвлет-носителем является вейвлет № 2 из семейства Добеши (db) на втором уровне разложения.

Таблица 1

Сравнение вейвлет-функций

Семейство вейвлета	Номер функции в семействе	Количество фильтров	Средняя ошибка обнаружения QRS – комплексов			
			Уровень разложения			
			1	2	3	4
Haar	-	2	0,30	0,11	0,14	0,30
Db	2	4	0,14	0,06	0,10	0,19
	3	6	0,18	0,13	0,15	0,20
	4	8	0,17	0,11	0,15	0,21
	5	10	0,30	0,17	0,20	0,30
	Coif	1	6	0,18	0,11	0,16
Sym	2	4	0,19	0,11	0,15	0,22
	3	6	0,30	0,14	0,17	0,31
	4	8	0,20	0,11	0,18	0,27
	5	10	0,21	0,11	0,17	0,25

2. Выбор метода вейвлет-трешолдинга

Линейная вейвлет-оценка может обладать некоторыми незначительными выбросами, показывающими наличие в данных высокочастотных составляющих. Подобные составляющие могут быть устранены с использованием некоторой процедуры обработки коэффициентов детализации, содержащих информацию о высокочастотной части спектра данных. Процедура обнуления или пересчета коэффициентов детализации, значения которых являются меньшим по сравнению со значением порога, представляет собой процедуру пороговой обработки, или «трешолдинг» [1].

Существуют следующие виды трешолдинга:

1) жесткий трешолдинг, при котором все коэффициенты, превышающие некоторый порог, считаются принадлежащими к «оригинальному» сигналу, а остальные относят к шуму и обнуляют (2):

$$f(x) = \begin{cases} x, & |x| \geq t, \\ 0, & |x| < t \end{cases} \quad (2)$$

где t – некоторый порог (коэффициент трешолдинга);

2) мягкий трешолдинг (3):

$$f(x) = \begin{cases} x - t, & x \geq t, \\ 0, & |x| < t, \\ x + t, & x \leq -t \end{cases} \quad (3)$$

Качество шумоподавления сигнала и, следовательно, степень увеличения отношения сигнал/шум зависят не только от вида функции трешолдинга, но также от способа её применения. В зависимости от этого трешолдинг делится на глобальный и локальный, а локальный в свою очередь на общий и многоуровневый [2 – 4].

Для определения пороговых значений будем использовать следующие методы:

1. SQR-LOG метод (4) [5 – 7]:

$$t = \sqrt{2 \left(\frac{\text{median}(\{c(i)\}, i=1..n)}{0,6745} \right)^2 \ln(n)}, \quad (4)$$

где 0,6745 – оценка среднеквадратичного отклонения белого Гауссова шума; $c(i)$ – вейвлет-коэффициенты.

2. Метод Берга-Массара (5) [8]:

$$t = |c(z)|, \\ z = \arg \min \left[-\sum \{c^2(i), i < k\} + 2\sigma^2 k \left(a + \ln \left(\frac{n}{k} \right) \right) \right], \quad (5) \\ k = 1..n,$$

где σ^2 – дисперсия шума, a – параметр разреженности, $a \geq 1$

Параметр разреженности является ключевым в методе Берга-Массара, так как он определяет степень подавления имеющихся в сигнале шумов.

В данном алгоритме определяются три интервала изменений значения параметра a , которые задают величину «штрафа»:

- «высокий», при $2,5 \leq a \leq 10$;
- «средний», при $1,5 \leq a < 2,5$;
- «низкий», при $1 \leq a < 1,5$.

В данной работе авторами предлагается использовать вейвлет-трешолдинг не для «очистки» сигнала от шумовых компонент, а для обнаружения QRS-комплексов кардиосигнала.

Выберем оптимальный метод вейвлет-трешолдинга среди методов Берга-Массара и SQR-LOG метода. Относительные ошибки обнаружения QRS-комплексов ЭКГ-сигнала на 2 уровне разложения с использованием базиса db-2 представлены в табл. 2. Для метода Берга-Массара использовалась «высокая» величина штрафа, т.е. $a > 5$.

Согласно полученным результатам, разработанный метод позволяет достигнуть высокой точности в обнаружении QRS-комплексов при локальном многоуровневом трешолдинге. Также и то, что метод Берга-Массара обладает большей точностью и лучшим быстродействием по сравнению с SQR-LOG методом: SQR-LOG метод при точности 95-96% уступает методу Берга-Массара при точности, близкой к 98-99%.

Таблица 2

Относительная ошибка обнаружения QRS-комплексов ЭКГ-сигнала на 2 уровне разложения с использованием базиса db-2

Вид трешолдинга	Относительная ошибка обнаружения, %	
	SQR-LOG метод	Метод Берга-Массара
Глобальный	8,72	6,18
Локальный общий	5,86	3,41
Локальный многоуровневый	4,45	1,52

3. Процедура обнаружения QRS-комплексов ЭКГ-сигналов состоит из следующих этапов:

1. Загрузить оцифрованный кардиосигнал.
2. Произвести вейвлет-разложение сигнала до 2 уровня с использованием базиса db-2.
3. Применить метод Берга-Массара ко второму уровню разложения с коэффициентом разреженности $a > 5$.

4. Определить точное временное местоположение найденных комплексов из сопоставления временных промежутков.

5. «Отсеять» лишние (ошибочно найденные) комплексы, используя следующие условия:

- продолжительность QRS-комплекса должна быть от 0,04 с (по нормативу ЭКГ);
- минимальное значение интервала RR должно быть 0,3 с (при 200 ударах в минуту).

Полученные таким образом комплексы будут соответствовать QRS- комплексам.

В процедуре мы используем локальный многоуровневый трешолдинг. Значит, для каждого отведения кардиосигнала процедуру обнаружения QRS-комплексов нужно выполнить отдельно, чтобы добиться максимального эффекта работы метода (максимальной точности обнаружения).

Рассмотрим работу метода. Загрузим кардиосигнал пациента: второе грудное отведение, длительностью 4096 отсчетов, учитывая, что скорость продвижения бумажной ленты при записи ЭКГ 1000 отсчетов/с (рис. 2).

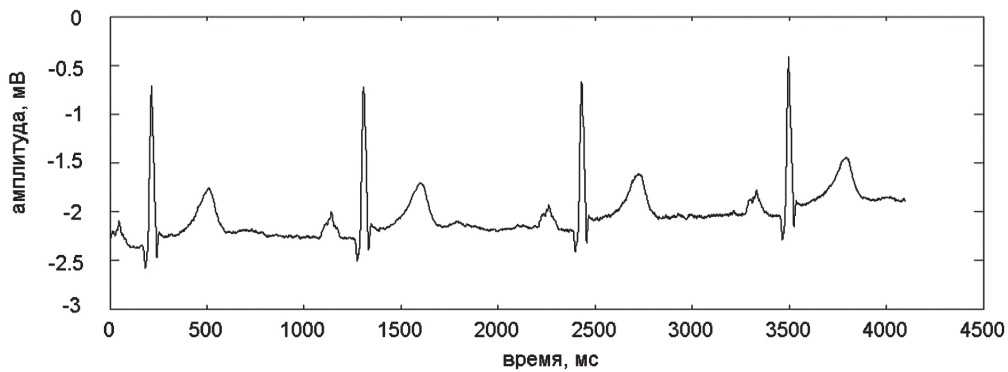


Рис. 2. Исходный кардиосигнал

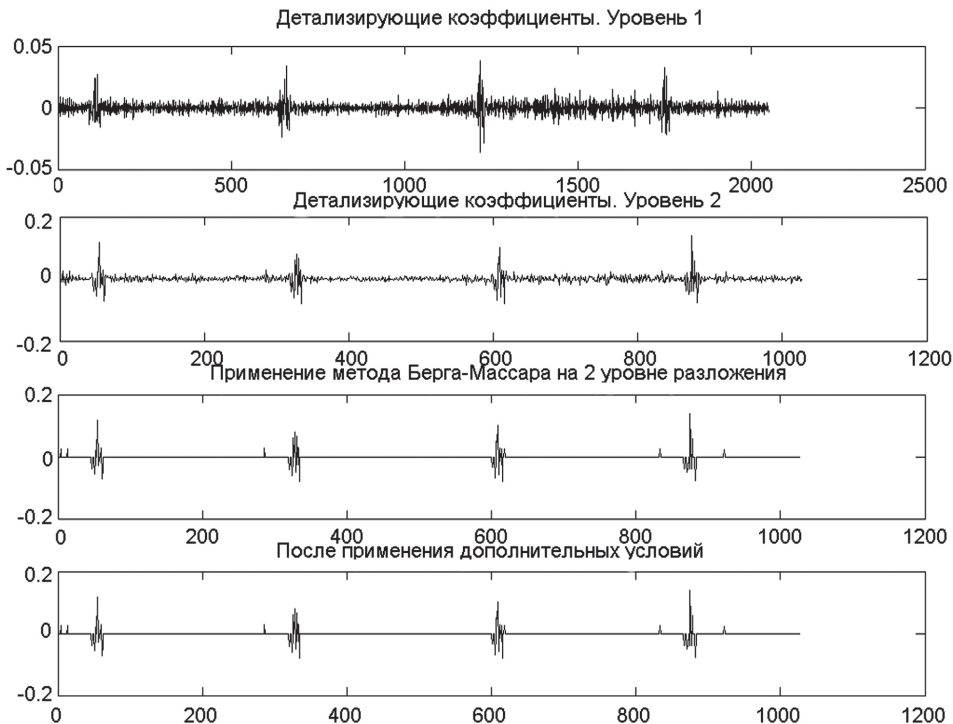


Рис. 3. Этапы работы метода

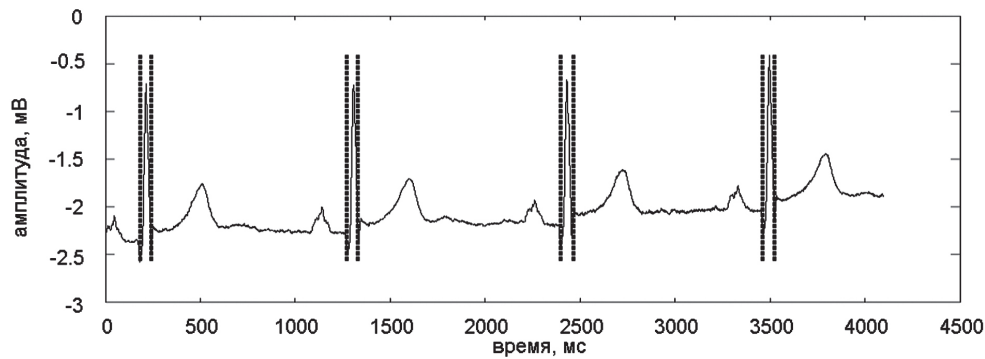


Рис. 4. Выделение QRS-комплексов

Произведем вейвлет-разложение сигнала до 2 уровня включительно с использованием базиса db-2. Применим процедуру пороговой обработки с помощью метода Берга-Массара, выбирая значения параметра разреженности больше пяти (в нашем случае было выбрано значение штрафного коэффициента, равное шести). Кроме необходимых QRS-комплексов мы получим «ошибочно найденные» комплексы; для их устранения применим дополнительные условия: продолжительность QRS-комплекса должна быть от 0,04 с и минимальное значение интервала RR должно быть 0,3 с (рис. 3). Определим точное временное местоположение найденных комплексов из сопоставления временных промежутков (рис. 4). По результатам работы программы точность обнаружения QRS-комплексов составила 98,21%, время работы разработанного метода – 0,3768 с.

Выводы

Разработан метод обнаружения QRS-комплексов ЭКГ-сигналов на основе вейвлет-преобразования. Впервые была применена процедура вейвлет-трешолдинга для выделения QRS-комплексов.

Обосновано:

1. Выбор типа вейвлет-носителя для применения в дискретном вейвлет-преобразовании (вейвлет №2 из семейства Добеши).
2. Уровень разложения сигнала (второй).
3. Тип вейвлет-трешолдинга (локальный многоуровневый).
4. Выбор метода вейвлет-трешолдинга (метод Берга-Массара).
5. Значение величины «штрафа» для метода Берга-Массара ($a > 5$).

Разработанный метод обеспечивает 98-99% точность в обнаружении QRS-комплексов ЭКГ-сигнала. Время работы метода составляет 0,3-0,4 с, поэтому данный подход может быть применен при длительном мониторинге.

Направлением дальнейших исследований является обнаружение других зубцов ЭКГ-сигнала и разработка системы анализа и диагностики кардиосигнала.

Список литературы: 1. Смоленцев, Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB [Текст] / Н.К. Смоленцев. – М.: ДМК Пресс. – 2008. – 448 с. 2. Chang S. G., Yu B. and Vetterli M. Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression // IEEE Trans. Image Proc. – 2000. – V. 9. – P. 1532-1546. 3. Weaver J. B., Yansun X., Healy D. M. Jr. and Cromwell L.D. Filtering noise from images with wavelet transforms // Magnetic Resonance in Medicine. – 1991. – P. 288-295. 4. Алексеев, К.А. Теория и практика шумоподавления в задаче обработки сейсмоакустических сигналов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: http://matlab.exponenta.m/wavelet/book5/2_1.php](http://matlab.exponenta.m/wavelet/book5/2_1.php). 5. Dohoto D.L. De-Noising by soft-thresholding // IEEE Transactions on Information Theory. – 1995. – V. 41. – P. 613-627. 6. Dohoto D.L., Johnstone I.M. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage // Biometrika. – 1994. – V. 81. – P. 425-455. 7. Walden A.T., Percival D.B., McCoy E.J. Spectrum estimation by wavelet thresholding of multitaper estimators // IEEE Transactions on Signal Processing. – 1998. – V. 46. – P. 3153-3165. 8. Luisier F., Blu., Unser M. A new SURE approach to image denoising: Interscale Orthonormal wavelet thresholding // IEEE Transactions on Image Processing. – 2007. – V. 16. – P. 593-606.

Поступила в редколлегию 14.03.2011.

УДК 004.02

Метод виявлення QRS-комплексів ЕКГ-сигналів на основі вейвлет-трешолдинга / В.І. Дубровін, Ю.В. Твердохліб // Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал. – 2011. – № 1 (75). – С. 98–101.

Запропоновано метод виявлення QRS-комплексів ЕКГ-сигналів на основі вейвлет-перетворення із застосуванням вейвлет-трешолдинга. Обґрунтовано вибір типу вейвлет-носія для застосування в дискретному вейвлет-перетворенні, а також вибір методу вейвлет-трешолдинга, що забезпечує найбільшу точність у виявленні комплексів.

Табл. 2. Лл. 4. Бібліогр.: 8 найм.

UDC 004.02

A method of detection of QRS-complexes ECG-signals on the basis of wavelet-thresholding / V.I. Dubrovin, J.V. Tverdohlib // Bionics of Intelligence: Sci. Mag. – 2011. – № 1 (75). – P. 98–101.

A method of detection of QRS-complexes ECG-signals on the basis of wavelet-transformation with the use of wavelet-thresholding is proposed. Choosing the type of a wavelet-base for the usage in discrete wavelet-transformation as well as wavelet-thresholding method giving the largest accuracy in detecting QRS-complexes is provided.

Tab. 2. Fig. 4. Ref.: 8 items