

Н. А. МАРЧЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»;
Ю. А. ЛИТОВСКИХ, магистрант НТУ «ХПИ»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ОЧИСТКИ СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММ

В статье предлагается методика фильтрации сигналов электрокардиограмм. Представлены результаты тестирования сигналов ЭКГ с помощью различных параметров очистки, на основании которых выбран рациональный набор параметров.

У статті пропонується методика фільтрації сигналів електрокардіограм. Наведені результати тестування сигналів ЕКГ за допомогою різних параметрів очищення, на базі яких обрано раціональний набір параметрів.

The method of filtration of signals of electrocardiogram is offered in the article. The results of testing of signals ECG by the different parameters of cleaning are presented. The rational set of parameters is offered for cleaning of biotsignals.

Введение. В настоящее время для обработки сигналов активно используются такие методы как спектральный анализ, фильтрация, аппроксимация в различных базисах, а также вейвлет-анализ. Несмотря на то, что эти методы хорошо исследованы, существует проблема выбора эффективного метода очистки сигналов и признаков для оценки качества очистки.

Большинство реальных сигналов нестационарны во времени или неоднородны в пространстве. Поэтому результаты анализа должны содержать не только общую частотную характеристику сигнала, но и сведения об определенных локальных координатах, на которых себя проявляют те или иные группы частотных составляющих, или на которых происходят быстрые изменения частотных составляющих сигнала [1]. Исходя из вышесказанного, для решения подобного рода задач целесообразно использовать теорию вейвлетов.

Любой сигнал содержит не только полезную информацию, но и некоторые посторонние воздействия, помехи или шумы. Одной из важнейших задач при анализе сигналов является их очистка от шумов. Особенно остро данная проблема стоит в медицине, так как в биосигналах возникает большое количество шумов по различным причинам, при этом для диагностики заболевания необходим точный сигнал [2].

Известно, что одним из практических приложений вейвлет-анализа является очистка зашумленных сигналов [1, 3–6]. Для этого осуществляется прямое вейвлет-преобразование измеренного сигнала, затем обнуляются незначительные коэффициенты преобразования по уровню порога,

пропорционального амплитуде случайного шума, и затем осуществляется обратное вейвлет-преобразование.

Постановка задачи. В данной работе поставлена задача разработки методики очистки от шума сигналов электрокардиограмм (ЭКГ) с помощью вейвлет-преобразования. Характерной особенностью сигнала ЭКГ является то, что кроме записи электрической активности сердца он содержит шумовую составляющую, которая включает в себя фон переменного тока питающей сети, высокочастотные колебания, вызванные мышечными сокращениями, а также низкочастотную составляющую, обусловленную изменением сопротивления контактов в системе «датчик-тело» [2]. Шум сигнала ЭКГ является равномерным в логарифмической шкале частот и его плотность обратно пропорциональна частоте. Спектральная плотность такого шума затухает на 3 Дб в каждой октаве. При этом уровень отсекаемых шумов должен подбираться экспериментально. Таким образом, целью работы является подбор рационального значения порога шума, выбор наилучшего класса и порядка вейвлета, а также уровня декомпозиции для сигналов ЭКГ.

Методика очистки зашумленного сигнала. Известно, что типичным методом подавления шумов является удаление высокочастотных составляющих из спектра сигнала [4]. Это может быть реализовано непосредственно удалением детализирующих коэффициентов высокочастотных уровней. Шумовые компоненты и большие случайные выбросы значений сигналов можно также рассматривать в виде множеств локальных особенностей сигналов. Задавая некоторый порог их уровня и отбрасывая значения детализирующих коэффициентов, которые его превышают, т.е. «срезают» их, можно не только уменьшать уровень шумов, но и устанавливать пороговые ограничения на нескольких уровнях разложения с учетом характеристик шумов и сигналов для различных типов вейвлетов [5]. При этом задание неправильных порогов очистки и/или большого числа уровней разложения может привести к обратному результату, так называемой «переочистке» сигналов, т.е. потере их полезной информационной составляющей.

Особенностью быстрого вейвлет-преобразование, которое используется при очистке сигналов, является необходимость обеспечения целого числа коэффициентов на последнем уровне разложения, которое определяется величиной $M/2^N$, где M представляет собой количество отсчетов, а N – максимальный уровень разложения. Если это условие не выполняется, рекомендуется дополнять массив отсчетов нулевыми значениями [3].

Модель зашумленного сигнала будем рассматривать аддитивной с равномерным шагом по аргументу n [4]:

$$S(n) = f(n) + k e(n),$$

где $f(n)$ – полезная информационная составляющая;

$e(n)$ – шумовой сигнал.

Тогда процедура удаления шума будет выполняться с использованием ортогональных вейвлетов и должна включать следующие операции:

- вейвлет-разложение сигнала $S(n)$ до уровня N . Значение уровня N определяется частотным спектром информационной части $f(n)$ сигнала, которую необходимо оставлять в рядах аппроксимационных коэффициентов. Тип и порядок вейвлета может существенно влиять на качество очистки сигнала от шума в зависимости, как от формы сигналов $f(n)$, так и от корреляционных характеристик шумов;
- задание типа и пороговых уровней очистки по известным априорным данным о характере шумов или по определенным критериям шумов во входном сигнале. При этом пороговые уровни очистки могут быть как гибкими, так и жесткими;
- модификация коэффициентов детализации вейвлет-разложения в соответствии с установленными условиями очистки;
- восстановление сигнала на основе коэффициентов аппроксимации и модифицированных детализирующих коэффициентов.

Основные результаты. Для тестирования методики очистки сигналов ЭКГ, которая осуществлялась в среде математического пакета MATLAB с использованием Wavelet Toolbox, были выбраны сигналы, представленные на сайте <http://www.physionet.org/physiobank/database/mitdb/>, а также несколько идеальных тестовых сигналов ЭКГ, которые были искусственно зашумлены характерным шумом.

В ходе тестирования выборки сигналов ЭКГ использовались различные типы и значения порогов, рассматривались различные классы вейвлетов, а также внутри одного класса – разные порядки вейвлетов и уровни декомпозиции. Для определения рациональных параметров очистки использовалось среднеквадратичное отклонение значений (СКО) сигналов, полученных в результате очистки, от значений идеального сигнала. Результаты тестирования приведены в таблице.

Минимальное значение среднеквадратичного отклонения наблюдается при очистке сигнала с помощью вейвлета Добеши 2-го порядка до 2-го уровня декомпозиции. Увеличение порядка вейвлета или уровня декомпозиции приводит не только к увеличению количества арифметических операций, необходимых для очистки сигнала, но и к увеличению значения СКО, что свидетельствует о снижении качества очистки.

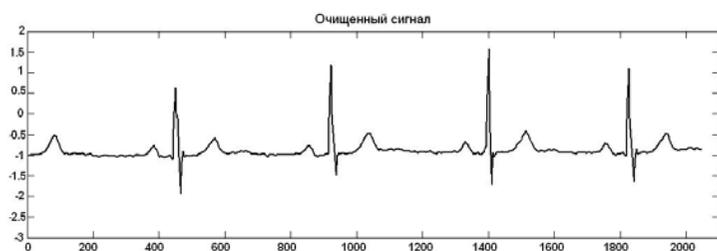
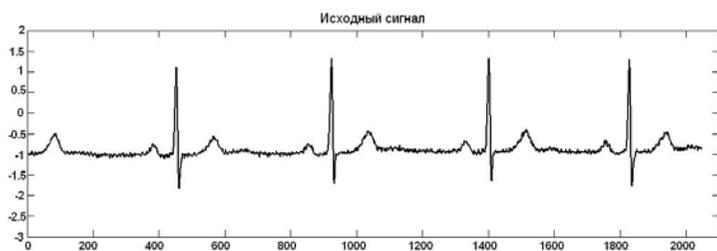
Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что характерный шум, присутствующий в сигналах сердечного ритма, можно удалить без потери полезного сигнала с помощью вейвлета Добеши 2-го порядка с разложением до 2-го уровня. При этом лучшие результаты были

получены при использовании жесткого порогового метода и универсального порога *sqtwolog*.

Результаты исследования влияния типа, порядка вейвлета и уровня декомпозиции

Класс вейвлета	Уровень декомпозиции	Порядок вейвлета	СКО, 10^{-3}	
Добеши	2	1	3,4295	
		2	2,1258	
		3	2,2248	
		4	2,6798	
		5	3,0293	
		6	3,4646	
		7	3,6588	
		8	4,0047	
		9	4,3093	
		10	4,4936	
Добеши	3	2	60,6166	
	4	3	14,2963	
Симплет	1	2	4,1951	
		2	2	2,2145
			3	2,7032
			4	12,08595
			5	11,8794
		8	11,8253	
	3	2	4,2157	
		3	59,7068	
		4	59,7334	
		2	12,0895	
Хаара	1	–	3,8986	
		–	3,4295	
		–	4,0454	
		–	6,8248	
		–	9,9246	
Мейера	1	–	5,0931	
		–	5,0946	
		–	8,9906	
		–	28,8967	

На рисунке представлен результат очистки одного из реальных сигналов ЭКГ с помощью разработанной методики.



Графики исходного и очищенного сигнала ЭКГ

Выводы. Таким образом, в ходе исследования была разработана методика для очистки сигналов ЭКГ, которая была успешно протестирована на большой выборке сигналов с помощью математического пакета MATLAB с использованием Wavelet Toolbox. Применение методики позволяет без дополнительных вычислений, связанных с определением типа вейвлета, значения необходимого порога, уровня разложения и других параметров, качественно очистить сигнал. Результаты исследования можно использовать для создания системы автоматической очистки сигналов ЭКГ, а также при анализе сложных сигналов в других областях, например при анализе неисправностей оборудования, и в дальнейших исследованиях.

Список литературы: 1. Астафьев Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения / Н. М. Астафьев // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166, № 11. – С. 1145–1170. 2. Дроздов Д. В. Автоматический анализ ЭКГ: проблемы и перспективы / Д. В. Дроздов, В. М. Леванов // Здоровоохранение и медицинская техника. – 2004. – № 2. – С. 23–27. 3. Новиков Л. В. Основы вейвлет-анализа сигналов / Л. В. Новиков. – СПб. : ИАиП РАН, 1999. – 152 с. 4. Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB / Н. К. Смоленцев. – М. : ДМК Пресс, 2005. – 304 с. 5. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам / И. Добеши. – Ижевск: НИЦ РХД, 2001. – 464 с. 6. Дьяконов В. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник / В. Дьяконов, И. Абраменкова. – СПб. : Питер, 2002. – 608 с.

Надійшла до редколегії 25.05.2010