УДК 612.171.1

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА КАРДИОСИГНАЛОВ: ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

А.С. ПИГАЛЬ, П.Б. ПИГАЛЬ
Полесский государственный университет,
г. Пинск, Республика Беларусь

Введение. Вейвлет–преобразование сигналов является обобщением спектрального анализа, типичный представитель которого – классическое преобразование Фурье. Термин «вейвлет» (wavelet) в переводе с английского означает «маленькая (короткая) волна». Вейвлеты – это обобщенное название семейств математических функций определенной формы, которые локальны во времени и по частоте, и в которых все функции получаются из одной базовой (порождающей) посредством ее сдвигов и растяжений по оси времени. Вейвлет-преобразования рассматривают анализируемые временные функции в терминах колебаний, локализованных по времени и частоте.

Теория вейвлетов не является фундаментальной физической теорией, но она дает удобный и эффективный инструмент для решения многих практических задач. 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 общую частотную характеристику сигнала (распределение энергии сигнала по частотным составляющим), но и сведения об определенных локальных координатах, на которых проявляют себя те или иные группы частотных составляющих, или на которых происходят быстрые изменения частотных составляющих сигнала. По сравнению с разложением сигналов на ряды Фурье, вейвлеты способны с гораздо более высокой точностью представлять локальные особенности сигналов, вплоть до разрывов 1-го рода (скачков). В отличие от преобразований Фурье, вейвлет-преобразование одномерных сигналов обеспечивает двумерную развертку, при этом частота и координата рассматриваются как независимые переменные, что дает возможность анализа сигналов сразу в двух пространствах [1].

Для практического применения важно знать признаки, которыми обязательно должна обладать функция, чтобы быть вейвлетом. Рассмотрим в качестве примеров некоторые хорошо известные функции и их соответствие этим необходимым признакам.

Локализация. Вейвлет-преобразование в отличие от преобразования Фурье использует локализованную базисную функцию. Вейвлет должен быть локализован и во временном пространстве, и по частоте.

Нулевое среднее:

$$\int_{-\infty}^{\infty}\psi(t)dt=0.$$

Часто для приложений оказывается необходимым, чтобы не только нулевой, но и все первые m моментов были равны нулю:

$$\int_{-\infty}^{\infty}t^m\psi(t)dt=0.$$

Такой вейвлет называется вейвлетом m-го порядка. Обладающие большим числом нулевых моментов вейвлеты позволяют, игнорируя наиболее регулярные полиномиальные составляющие сигнала, анализировать мелкомасштабные флуктуации и особенности высокого порядка.

Ограниченность:

$$\int\left|\psi(t)\right|^2dt<\infty.$$

Оценка хорошей локализации и ограниченности может быть записана в виде

$$\left|\psi(t)\right|<(1+|t|^n)^{-1},$$

здесь $\omega_0 -$ доминантная частота вейвлета, число n должно быть возможно большим.

Автомодельность базиса. Характерным признаком базиса вейвлет-преобразования является его самоподобие. Все вейвлеты данного семейства $\psi_{ab}(t)$ имеют то же число осцилляции, что и базисный вейвлет $\psi(t),$ поскольку получены из него посредством масштабных преобразований и сдвигов. Благодаря этому вейвлет-преобразование с успехом применяется для анализа фрактальных сигналов [1, 3].

Одна из главных и особенно плодотворных идей вейвлетного представления сигналов на различных уровнях разложения (декомпозиции) заключается в разделении функций приближения к сигналу на две группы: аппроксимирующую – грубую, с достаточно медленной временной динамикой изменений, и детализирующую – с локальной и быстрой динамикой изменений на фоне плавной динамики, с последующим их дроблением и детализацией на других уровнях декомпозиции сигналов. Это возможно как во временной, так и в частотной областях представления сигналов вейвлетами [2].

Вейвлет-анализ имеет применение во многих областях фундаментальных исследований, включая медицину, инженерное дело и финансы. С помощью вейвлетов в медицине проводятся исследования электроэнцефалограмм, электромиограмм, акустических сигналов и электрокардиограмм. Так, например, среди изучения и дальнейшей обработки материала полученного в процессе снятия электрокардиограммы, перспективным является направление изучения вариабельности сердечного ритма. Вариабельность сердечного ритма (ВСР) – одно из физиологических свойств сердечно-сосудистой системы. Она с большой точностью отражает состояние регуляторных процессов в нашем организме, и ее изучение действительно вносит неоценимую информацию для качественной диагностики, прогнозирования, лечения и предупреждения болезней.

ВСР является методом оценки состояния механизмов регуляции физиологических функций в организме человека и животных, в частности, общей активности регуляторных механизмов, нейрогумональной регуляции сердца, соотношения между симпатическим и парасимпатическим отделами вегетативной нервной системы. ВСР – основа одной из новейших диагностических технологий клинической медицины [2, 3].

В данной работе приведено обоснование эффективного применения вейвлетов при исследовании дискретных сигналов конечной длины, в частности, при обработке данных электрокардиографии. Также рассмотрен метод преобразования (оцифровки) исходных данных для последующей обработки сигнала с рассмотрением возможности математического пакета Wavelet Toolbox MATLAB для анализа сигналов, очистки от шума и сжатия. Приведены практические примеры анализа электрокардиограмм (ЭКГ) пациентов, с выделением ключевой информации, необходимой именно для медицинской трактовки полученных результатов.

Методика и объекты исследования. Волновое преобразование (Wavelet transformation) нашло свое применение в таких разных областях знания как телекоммуникация и биология. Благодаря его свойствам для анализа нестационарных сигналов (чьи статистические свойства изменяются со временем), вейвлет-преобразование стало мощной альтернативой для Фурье метода во многих медицинских приложениях, где такие сигналы преобладают. Дополнительно к распознаванию и обнаружению ключевых диагностических характеристик, оно обеспечивает мощные средства для сжатия данных (электрокардиограмм, медицинских изображений и т.д.) с небольшой потерей ценной информации. Вейвлет–преобразование может обеспечить как очень хорошее временное разрешение на высоких частотах, так и удовлетворительное частотное разрешение на низких частотах. Интересно, что это возможно даже при отсутствии информации о характере временных и частотных параметрах сигнала, благодаря избыточности присущей непрерывному wavelet преобразованию сигнала. Фактически, в реальных приложениях желательно устранить значительную часть этой избыточности, чтобы уменьшить требования к памяти и ускорить численные вычисления. Этого достигают обычно дискретизацией частотных и временных параметров, используя бинарную схему в частотно-временной плоскости [1].

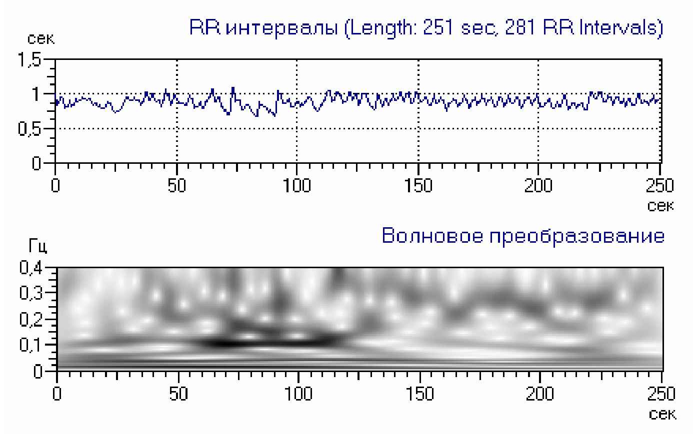

Рисунок 1 – Ритмограмма и результат ее волнового преобразования

Очевидно, что волновое преобразование можно использовать для анализа ВСР. На рисунке 1 изображены ритмограмма и результат волнового преобразования (яркость элементов пропорциональна спектральной мощности в данное время для данной частоты). Используя последний, возможно проводить оценку частотных составляющих ритмограммы в любой момент времени, в отличие от частотного анализа ВСР, результатом которого является спектрограмма стационарного участка ритма пациентов кардиохирургического профиля [2].

При выполнении поставленной задачи были обработаны кардиоинтервалограммы с уже известным медицинским диагнозом.

Так как исходные данные ЭКГ поступили на бумажном носителе (рис. 2), необходимо было решить задачу оцифровки сигнала. На практике сигнал моделируется непрерывной кривой, характеризующий некоторый процесс. Этот сигнал снимается соответствующим прибором, причем моменты снятия показаний неизвестны.Следовательно, заключенные в нем данные носят дискретный характер.

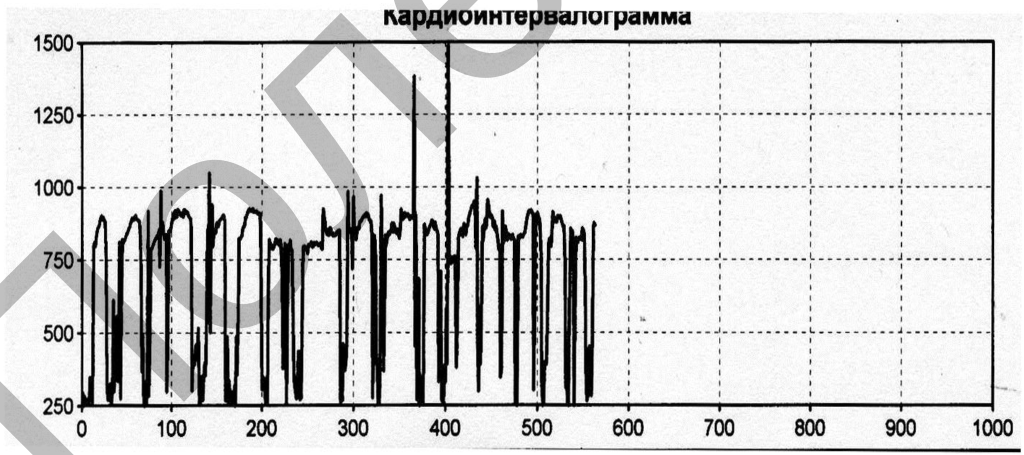

Рисунок 2 – Кардиоинтервалограмма

Необходимо определить дискретный набор данных и представить эти данные в подходящей форме. Для этого был использован следующий алгоритм:

1. *Определение характерных точек кривой.* Данный процесс называется оцифровкой графического представления сигнала и заключается в снятии координат некоторых точек кривой. В качестве характерных точек возьмем точки локальных максимумов и минимумов на кривой. В результате имеем двумерный массив координат, размерности $2 \times n$, в первом столбце которого располагаются значения переменной t, во втором соответствующие им значения сигнала $x(t)$. Массив упорядочен по возрастанию переменной t.

2. *Выбор масштаба.* Определяется длина сигнала, т.е. временной интервал на котором информация о процессе является достоверной. Как правило, снятый прибором сигнал носит дискретный характер, и его длина зависит от количества характерных точек, описывающих этот сигнал. Так

как вейвлет-базис построен на основе двоичной шкалы и программные средства также работают с двоичной шкалой, необходимо определить длину сигнала, равную степени двойки. Следовательно, и временной интервал был выбран равный $t = 2c$. При имеющихся исходных данных это, по нашему мнению, наиболее оптимальный вариант для их представления [3].

Оцифровка сигнала была произведена при помощи программного продукта Graph2Digit. Graph2Digit – свободно распространяемая бесплатная программа (Freeware). Интерфейс представлен на рисунке 3.

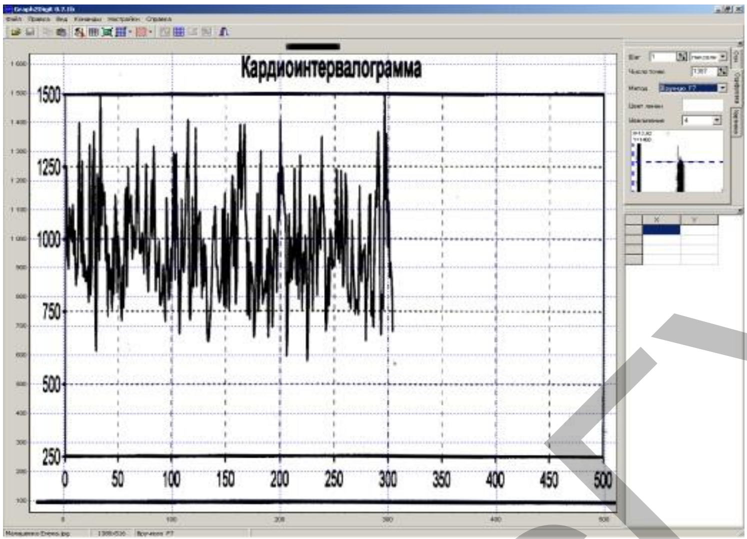

Рисунок 3 – Интерфейс программы Graph2Digit

3. Разложение частотного сигнала по частотным интервалам. Современные системы компьютерной математики включают в себя дополнительные пакеты, содержащие универсальные функции для работы с вейвлетами и позволяющие проводить вейвлет-анализ и вейвлет-синтез сигналов. Для решения поставленной задачи использовался пакет расширения Wavelet Toolbox системы MATLAB (http://www.mathsoft.com), который является мощным инструментальным средством для изучения, создания и применения вейвлетов и проведения вейвлет-анализа. Пакет предоставляет возможности для вейвлет-анализа и синтеза сигналов и изображений, встроенные вейвлеты различных типов, возможность определения своего вейвлета с наперед заданными свойствами, средства для обработки сигналов и изображений, средства для устранения шума, средства для обработки и сжатия сигналов и изображений.

В качестве анализирующего вейвлета нами был выбран вейвлет Хаара, позволяющий идентифицировать «угловые» точки сигнала. На рисунке 4 представлены разложения сигнала, изображенного на рисунке 2 в соответствующих частотных интервалах. Переход от всех частот к некоторому набору частотных интервалов позволяет удалить сторонний «шум» в сигнале и восстановить характерные особенности сигнала, соответствующие исходному процессу.

На рисунке 4 сверху вниз представлены сам сигнал, его грубая аппроксимация на пятом уровне коэффициентов a_5, описывающих изменения амплитуды сигнала, а также его детальные разложения на уровнях коэффициентов $d_1 - d_5$,

Результаты и их обсуждение. Полученные уровни разложения сигнала по вейвлет-коэффициентам соответствуют следующим частотным диапазонам: уровень d_1 – диапазону 0,4-0,5 Гц, d_2 – диапазону 0,15-0,4 Гц, d_3 – диапазону 0,07-0,15 Гц, d_4 – диапазону 0,04-0,07 Гц, d_5 – диапазону 0,02-0,04 Гц.

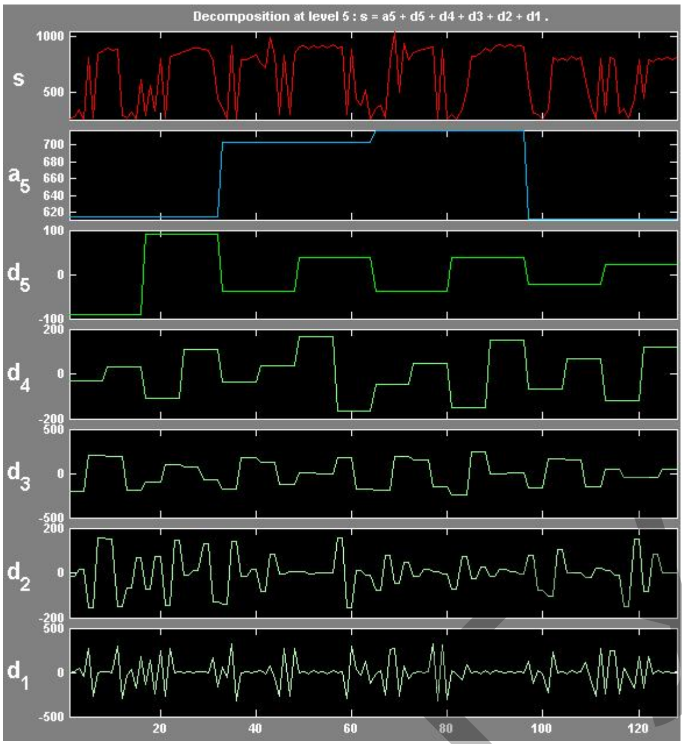

Рисунок 4 – Разложение сигнала с помощью вейвлета Хаара

Еще одной возможностью получить улучшенную картину спектрального разложения исходного сигнала кардиоритмограммы является изображение распределения коэффициентов по частоте и времени, а также распределения линий максимума энергии этих коэффициентов.

На рисунке 5 представлены плотность коэффициентов дискретного вейвлет-преобразования, энергетический спектр сигнала для выбранной частоты (шкалы) и линии максимумов интегрального вейвлет-преобразования.

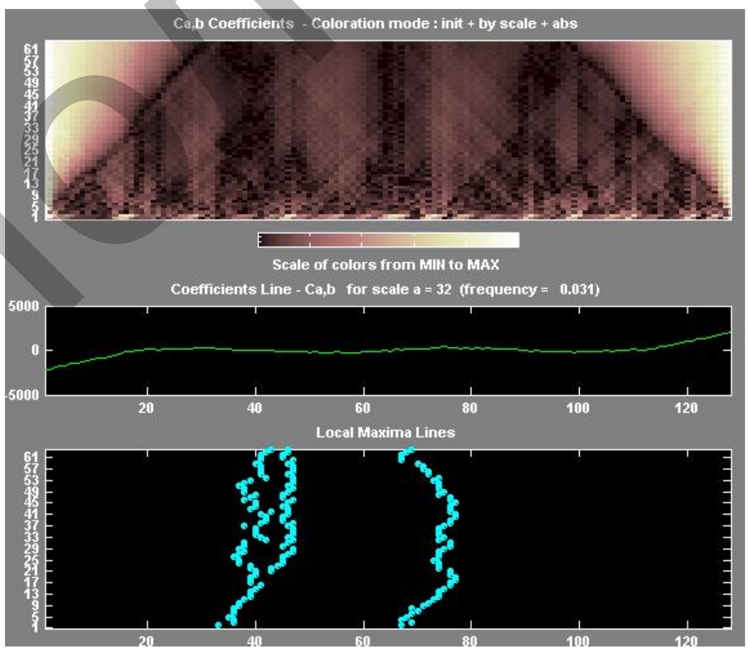

Рисунок 5 – Анализ сигнала на основе комплексного вейвлета Хаара

Выводы Рассмотрена группа пациентов численностью 100 человек с заведомо известным кардиохирургическим диагнозом. Все исследуемые – дети в возрасте от 7 до 10 лет. На уровнях d_1, d_2 и d_5 мы имеем схожую картину разложения у 85% рассмотренных кардиосигналов. При рассмотрении кардиосигнала здорового человека картина при разложении сигнала на тех же уровнях существенно отличается от полученных нами результатов. Переход от всех частот к некоторому набору частотных интервалов позволяет удалить сторонний «шум» в сигнале и восстановить характерные особенности сигнала, соответствующие исходному процессу.

В отличие от традиционного превращения Фурье, вейвлет-преобразование обеспечивает двумерное представление исследуемого сигнала в частотной области в плоскости частота-положение. Аналогом частоты при этом является масштаб аргумента базисной функции (чаще всего времени), а положение характеризуется ее здвигом, что позволяет разделить большие и мелкие элементы сигналов, одновременно локализуя их на временной шкале.

Таким образом, проведенное исследование продемонстрировало, что предлагаемый способ анализа кардиоритмограмм пациентов кардиохирургического профиля представляется перспективным для прогноза течения заболевания как дополнительный элемент диагностики в динамике наблюдения за их состоянием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малла, С. Вейвлеты в обработке сигналов / С. Малла. – М.: Мир, 2005. – С. 108.
2. Чуи, К. Введение в вейвлеты. Пер. с англ. Я. М. Жилейкина / К. Чуи. – М.: Мир, 2001. – С. 99–111
3. Новиков, Л.В. Основы вейвлет-анализа сигналов / Л.В. Новиков. – Спб.: ИАНП РАН, 1999. – С. 145-148

APPLICATION OF WAVELET TO ANALYZE CARDIOSIGNALS: PRELIMINARY RESULTS OF RESEARCH

A.S. PIGAL, P.B. PIGAL

Summary

The concept of a wavelet is introghbduced and its applications, computational the correct choice of a wavelet and the use of nonstandard matrix multiplication often prove crucial for the solution of a problem at hand. The wavelet analysis reveals such characteristics of a function as its fractal properties and singularities, among others. Following the discussion of all the above topics, practical applications of the wavelet analysis are illustrated, which are, however, too numerous for us to cover more than a tiny part of them.

Поступила в редакцию 14 апреля 2014г.