ВЕЙВЛЕТ АНАЛИЗ МЕДИЦИНСКИХ СИГНАЛОВ

Чесноков Ю.В.

Кубанский государственный университет
cvi@phys.kubsu.ru

Для анализа медицинских сигналов, полученных в результате диагностики, часто используют преобразование Фурье. Но в связи с его недостатками по обработке сигналов с изменяющимися частотно-временными параметрами более перспективным является использование вейвлет анализа (wavelet analysis), а именно так называемого вейвлет преобразования (wavelet transform), которое обладает несомненными преимуществами.

Большинство медицинских сигналов имеет сложные частотно-временные характеристики. Как правило, такие сигналы состоят из близких по времени, короткоживущих высокочастотных компонентов и долговременных, близких по частоте низкочастотных компонентов.

Для анализа таких сигналов нужен метод, способный обеспечить хорошее разрешение и по частоте, и по времени. Первое требуется для локализации низкочастотных составляющих, второе – для разрешения компонентов высокой частоты.

Сигнал анализируется путем разложения по базисным функциям, полученным из некоторого прототипа. Функция-прототип называется анализирующим (материнским) вейвлетом.

Вейвлет функция должна удовлетворять 2-м условиям:

1. Среднее значение (интеграл по всей прямой) равно нулю.
2. Функция быстро убывает при $t \to \infty$.

Обычно, вейвлет функция обозначается буквой ψ.

В общем случае вейвлет преобразование функции *f(t)* выглядит так:

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

где t – ось времени, x – момент времени, s – параметр, обратный частоте, а (*) – означает комплексно-сопряженное, f(t) – исследуемый сигнал, W(x, s) – результат вейвлет преобразования для пары значений x и s.

Главным элементом в вейвлет анализе является функция вейвлет (анализирующий вейвлет). Наибольшей популярностью пользуются две из них, изображенных на рис. 1.

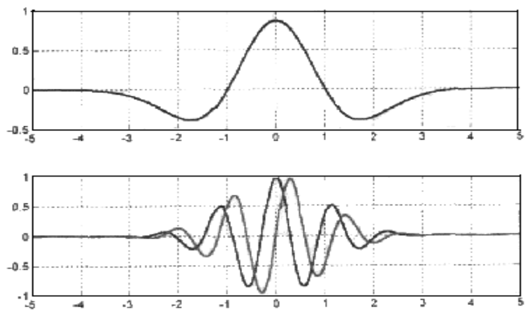

Рис. 1. Примеры вейвлетов.

Сверху изображен вейвлет "сомбреро" (Mexican Hat), названный так благодаря своему внешнему виду. На нижней части рис. 1 изображен вейвлет Морле. График любого вейвлета выглядит примерно также, как и функция Морле. Заметим, что вейвлет Морле комплекснозначный, на рисунке изображены её вещественная и мнимая составляющие.

Итак, у нас имеется некоторая функция f(t), зависящая от времени. Результатом ее вейвлет анализа будет некоторая функция W(x, s), которая зависит уже от двух переменных: от времени и от частоты (обратно пропорционально). Для каждой пары x и s вычисление вейвлет преобразования следующий:

1. Вейвлет функция растягивается в s раз по горизонтали и в 1/s раз по вертикали.
2. Далее он сдвигается в точку x. Полученная функция обозначается как ψ(x, s).
3. Производится усреднение в окрестности точки s при помощи ψ(x, s).

В результате получается вполне наглядная картина, иллюстрирующая частотно-временные характеристики сигнала. По оси абсцисс откладывается время, по оси ординат – частота (иногда размерность оси ординат выбирается так: log(1/s), где s-частота), а абсолютное значение вейвлет преобразования для конкретной пары x и s определяет цвет, которым данный результат будет отображен (чем в большей степени та или иная частота присутствует в сигнале в конкретный момент времени, тем светлее/темнее будет оттенок).

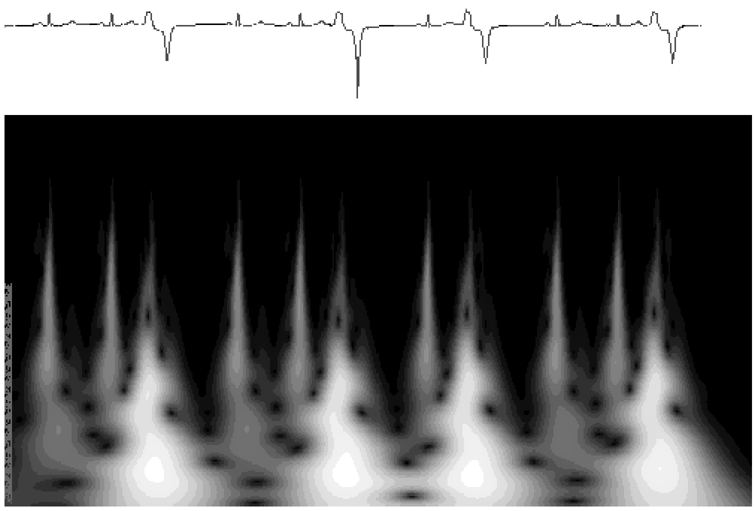

Рис 2. Вейвлет преобразование нестационарного сигнала с помощью вевлета Морле.

Коронарная болезнь сердца (coronary artery disease, CAD) является основной причиной смерти в индустриально развитых странах. Поэтому раннее выявление CAD считается одним из важнейших направлений кардиологических исследований. Разработано несколько диагностических методов, которые делятся на инвазивные (invasive) и неинвазивные (non-invasive). К инвазивным относятся:

- таллиевый тест, при котором пациенту вводится таллий-201 и делается серия снимков в гамма-лучах;
- катетеризация, при которой через большую артерию к сердцу подводится катетер, из него выпускается краска, поглощающая рентгеновские лучи, после чего проводится рентгеноскопия коронарных артерий.

К неинвазивным методам относятся традиционный осмотр со снятием анамнеза, электрокардиография и эхокардиография (ультразвуковое обследование). В этой статье мы сосредоточимся на двух последних методах.

Известно, что турбулентность кровотока является причиной звуков, анализ которых может оказаться очень полезным для раннего выявления сердечных аномалий. Важную информацию содержит и изменчивость *частоты сердечных сокращений* (Heart Rate Variability, HRV). Перечислим основные особенности этого сигнала. Во временной области сигнал не является ни периодическим, ни полностью случайным. В частотной области он состоит в основном из трех спектральных пиков: высокочастотного (HF) пика вблизи 0,20 Гц, низкочастотного (LF) - около 0,1 Гц, и сверхнизкочастотного (VLF) пика, называемого 1/f-компонентом, поскольку его спектральная амплитуда растет с убыванием частоты.

Предварительные результаты применения вейвлет анализа к этим сигналам внушают оптимизм. В случае HRV оцифрованный сигнал раскладывается на нескольких уровнях разрешения. На каждом уровне коэффициенты представляют собой детали, возникающие при переходе из одного масштаба в другой. Регрессионный анализ лог-лог-графиков вариации вейвлет коэффициентов в зависимости от масштаба указывает на то, что наклон графиков этих сигналов различен у здоровых людей и у людей с множественными коронарными окклюзиями. Аналогичные наблюдения указывают на то, что сигналы диастолического сердечного тона в норме более гладкие, чем у больных. Кроме того, некоторые высокочастотные компоненты диастолического сердечного тона можно, по-видимому, ассоциировать с наличием коронарной болезни сердца.

Недавно F. Yang и W. Liao сообщили о создании теоретической модели сигнала HRV на основе вейвлет преобразования. Хотя предложенные ими модель и разложение используются для прогнозирования действия гравитации на организм летчика, они легко адаптируются для медицинских целей.

Таким образом, использование аппарата вейвлет анализа для обработки медицинской информации является наиболее перспективным по сравнению с другими методами, именно его использование позволяет обнаружить ключевые диагностические признаки и получить частотно-временную характеристику исследуемого сигнала.

WAVELET ANALYSIS IN MEDICAL SIGNAL PROCESSING

Chesnokov Yu.

Kuban State University, cvi@phys.kubsu.ru

Mathematical transformations are applied to signals to obtain a further information from that signal that is not readily available in the raw signal. I will assume a time-domain signal as a **raw** signal, and a signal that has been "transformed" by any of the available mathematical transformations as a **processed** signal. Most of the signals in practice, are **TIME-DOMAIN** signals in their raw format. That is, whatever that signal is measuring, is a function of time. In other words, when we plot the signal one of the axes is time (independent variable), and the other (dependent variable) is usually the amplitude. When we plot time-domain signals, we obtain a **time-amplitude representation** of the signal. This representation is not always the best representation of the signal for most signal processing related applications. In many cases, the most distinguished information is hidden in the frequency content of the signal. The **frequency SPECTRUM** of a signal is basically the frequency components (spectral components) of that signal. The frequency spectrum of a signal shows what frequencies exist in the signal. Let's give an example from biological signals. Suppose we are looking at an ECG signal (ElectroCardioGraphy, graphical recording of heart's electrical activity). The typical shape of a healthy ECG signal is well known to cardiologists. Any significant deviation from that shape is usually considered to be a symptom of a pathological condition.

This pathological condition, however, may not always be quite obvious in the original time-domain signal. Cardiologists usually use the time-domain ECG signals, which are recorded on strip-charts to analyze ECG signals. Recently, the new computerized ECG recorders/analyzers also utilize the frequency information to decide whether a pathological condition exists. A pathological condition can sometimes be diagnosed more easily when the frequency content of the signal is analyzed. The Wavelet transform is very useful in such applications; it provides the time-frequency representation of the signal. Often times a particular spectral component occurring at any instant can be of particular interest. In these cases it may be very beneficial to know the time intervals these particular spectral components occur. For example, in EEGs, the latency of an event-related potential is of particular interest (Event-related potential is the response of the brain to a specific stimulus like flashlight, the latency of this response is the amount of time elapsed between the onset of the stimulus and the response).

Wavelet transform is capable of providing the time and frequency information simultaneously, hence giving a time-frequency representation of the signal. The frequency and time information of a signal at some certain point in the time-frequency plane cannot be known. In other words: We cannot know **what spectral component** exists at any given time **instant**. The best we can do is to investigate what **spectral components** exist at any given **interval** of time. This is a problem of resolution, and it is the main reason why researchers have switched to wavelet transform from short-term Fourier transform. It gives a fixed resolution at all times, whereas wavelet transform gives a variable resolution as follows: higher frequencies are better resolved in time, and lower frequencies are better resolved in frequency. This means that, a certain high frequency component can be located better in time (with less relative error) than a low frequency component. On the contrary, a low frequency component can be located better in frequency compared to high frequency component. Thus, wavelet analysis is very promising in digital signal processing especially for non-stationary signals where for better results we need both time and frequency information.