

В.В. Бороноев, Б.З. Гармаев, И.В. Лебединцева

Особенности непрерывного вейвлет-преобразования пульсовых сигналов

*Лаборатория пульсовой диагностики Отдела физических проблем
при Президиуме Бурятского научного центра СО РАН, г. Улан-Удэ*

Поступила в редакцию 6.08.2007 г.

Показаны возможности применения непрерывного вейвлет-преобразования для анализа модельных пульсовых сигналов. Установлено, что вейвлет-анализ способен выявлять локальные особенности сигнала и исследовать изменение спектрального состава пульсового сигнала. Исследованы вейвлет-образы пульсовых сигналов при равновесии и нарушении деятельности регулирующих систем. Показано, что при нарушении деятельности регулирующих систем меняется форма пульсового сигнала, а следовательно, и структура получаемого вейвлет-образа. Предложен метод выделения информативных точек пульсового сигнала на основе непрерывного вейвлет-преобразования.

Введение

Пульсовой сигнал лучевой артерии несет в себе информацию о многих физиологических процессах, протекающих в организме. Извлечение данной информации требует детального анализа компонент пульсового сигнала. Так, для фазового (временного) анализа сердечной деятельности, основанного на вычислении длительностей фаз сердечного цикла и анализе их временных соотношений, требуется корректное определение информативных (характерных) точек, являющихся экстремумами пульсового сигнала. Пульсовая волна является нестационарным, квазипериодическим процессом, частотный состав и основные показатели которого зависят от времени и могут изменяться в пределах временного интервала наблюдения. Поэтому применения основных методов спектрального анализа сигнала, таких как преобразование Фурье, бывает недостаточно при исследовании частотных компонент сигнала.

В последнее время для анализа нестационарных сигналов активно применяется новый метод — вейвлет-анализ. Позволяя получить зависимость амплитуды от частоты, он открывает новые возможности в детальном анализе частотной и временной структуры нестационарных сигналов, таких как пульсовая волна. Особенно это важно для локализации характерных участков пульсовой волны с целью последующего выделения характерных точек на ее малоамплитудных сегментах, от точности определения которых зависит точность поставленного диагноза.

Целью работы является оценка возможности и целесообразности применения метода вейвлет-анализа к задаче автоматизации процесса выявления функциональных отклонений организма и к задаче выделения характерных точек пульсового сигнала.

Непрерывное вейвлет-преобразование

Вейвлет-преобразование одномерного сигнала состоит в разложении по базису, сконструированному из обладающей определенными свойствами функции (вейвлета) посредством масштабных изменений и переносов. Каждая из функций этого базиса характеризует как определенную пространственную (временную) частоту, так и ее локализацию в физическом пространстве (времени).

Вейвлеты должны обладать следующими свойствами: быть локализованными во временном и частотном пространствах, иметь нулевое среднее и быть ограниченными [1–3]. С их помощью можно покрыть все пространство, используя смещение по-разному сжатых вариантов одной-единственной базисной вейвлет-функции:

$$\psi_{a,b}(t) = \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a, b \in R,$$

где параметр a — масштабный множитель, отвечающий за ширину вейвлета; b — параметр сдвига, определяющий его положение на оси.

Каждый вейвлет имеет характерные особенности во временном и в частотном пространствах, поэтому иногда с помощью разных вейвлетов можно полнее выявить и подчеркнуть те или иные свойства анализируемого сигнала и повысить точность вычислений.

Непрерывное вейвлет-преобразование производится путем свертки анализируемой функции $f(t)$ с двухпараметрической вейвлет-функцией $\psi_{a,b}$, вычисляемой по формуле [1–3]:

$$W(a,b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} a^{-1/2} \overline{\psi(a^{-1}(t-b))} f(t) dt,$$

где черта сверху обозначает комплексное сопряжение; $f(t) \in L^2(R)$.

Результатом вейвлет-преобразования одномерного ряда является двумерный массив амплитуд вейвлет-преобразования — значений коэффициентов $W(a, b)$, содержащий комбинированную информацию об анализирующем вейвлете и анализируемом сигнале. Спектр $W(a, b)$ одномерного сигнала представляет собой поверхность в трехмерном пространстве, способы визуализации которой могут быть различными. Обычно их представляют в виде картины вейвлет-коэффициентов (вейвлет-спектра), представляющей собой значения вейвлет-коэффициентов в плоскости масштаб—время, значения которых определяют цвет соответствующей области вейвлет-картины.

Применение непрерывного вейвлет-анализа к модельным импульсным сигналам

Рассмотрим синусоиду с частотой 1 Гц, устранимой точкой разрыва в $t = 5$ с и скачком в точке $t = 8$ с (рис. 1, *а*), и вейвлет-спектр ее коэффициентов, представленный на рис. 1, *б*.

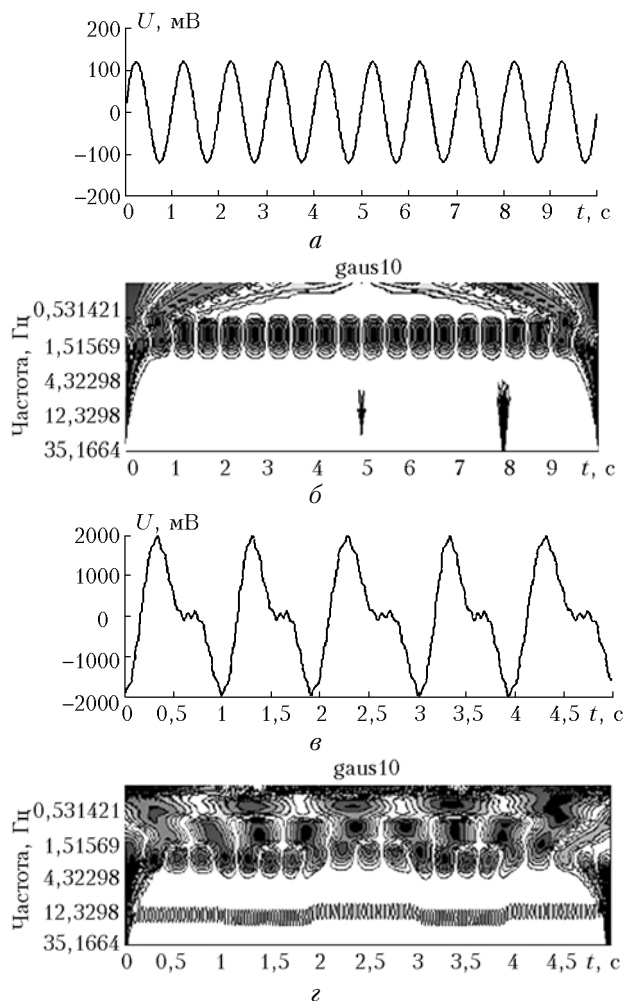


Рис. 1. График синусоиды с локальными особенностями (*а*); вейвлет-спектр синусоиды (*б*); график модельного импульсного сигнала (*в*); вейвлет-спектр модельного сигнала (*г*)

Экстремумам сигнала соответствуют большие значения вейвлет-коэффициентов — сгущение темных областей на вейвлет-спектре, а переходам сигнала через ноль — малые значения вейвлет-коэффициентов (сгущение светлых областей). Нарушениям гладкости сигнала: артефактам и флуктуациям (скачкам, выбросам), и точкам разрывов соответствуют вертикальные линии, выходящие из соответствующей точки. Чем резче выражена особенность, тем сильнее она выделяется и тем выше значения вейвлет-коэффициентов. Яркая черная горизонтальная полоса на вейвлет-спектре, соответствующая чередованию экстремумов сигнала, означает присутствие в модельном сигнале периодической компоненты — частоты рассматриваемой синусоиды 1 Гц. Некоторое четко видимое утолщение вейвлет-спектра по краям — краевые разрывы — трактуется как вызванное ограниченной во времени областью существования сигнала.

Вейвлет-преобразование способно выявлять изменения спектрального состава сигнала. Данное свойство продемонстрируем на модельном импульсном сигнале (рис. 1, *в*), состоящем из трех гармоник с частотами 1, 2, 13 Гц, которые меняют свой период. На вейвлет-спектре модельного сигнала (рис. 1, *г*) горизонтальные полосы, соответствующие частотам гармоник сигнала, меняют свое положение в зависимости от изменения периода. Для данного сигнала Фурье-спектр содержал бы три гармоники, не давая никакой информации об их изменениях (эволюции).

Таким образом, вейвлет-анализ открывает новые возможности в детальном анализе нестационарных сигналов, таких как импульсная волна. Он позволяет:

- выявлять локальные особенности импульсных сигналов — характерные точки, артефакты и флуктуации, в том числе и с малой амплитудой. Большие значения вейвлет-коэффициентов находятся вблизи локальных особенностей импульсного сигнала, а малые — там, где функция локально гладкая;
- исследовать изменения спектрального состава импульсного сигнала и его характеристик, не отражающиеся на Фурье-спектрах.

Примеры применения непрерывного вейвлет-преобразования к импульсным сигналам

Исследуем применение непрерывного вейвлет-преобразования к реальным импульсным волнам. Рассмотрим результаты непрерывного вейвлет-преобразования импульсных сигналов здорового человека и человека с функциональными отклонениями (рис. 2, *а*, *в*).

На вейвлет-спектре человека с функциональными отклонениями (рис. 2, *г*) заметно появление дополнительных локальных особенностей в диапазоне 6–23 Гц, тогда как на вейвлет-спектре здорового человека (рис. 2, *б*) они отсутствуют.

Исследуем более детально низкочастотный состав рассматриваемых сигналов в области 0,01 Гц

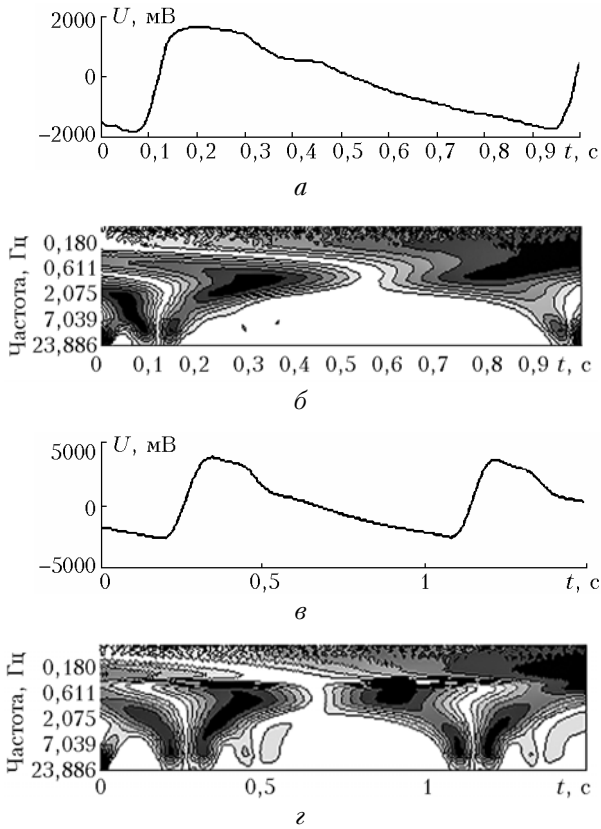


Рис. 2. Фрагмент пульсового сигнала здорового человека (*a*); его вейвлет-спектр (*б*); фрагмент пульсового сигнала человека с функциональными отклонениями (*в*); его вейвлет-спектр (*з*)

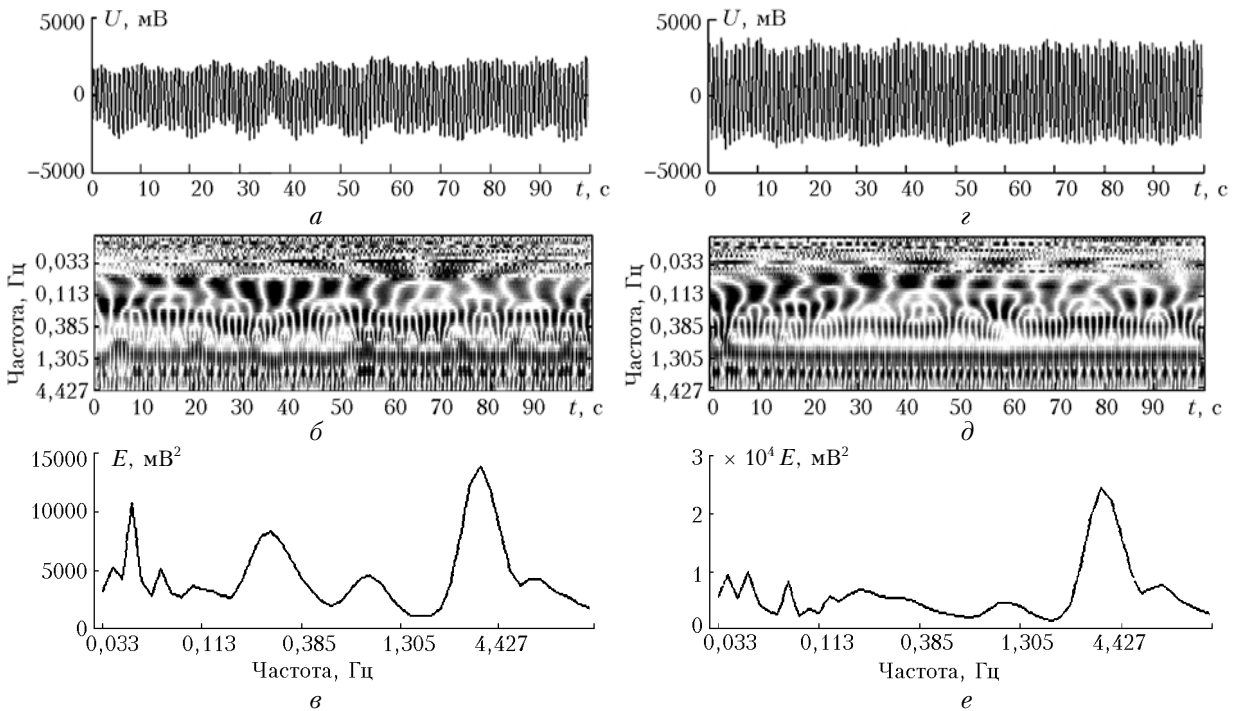


Рис. 3. Фрагмент пульсового сигнала здорового человека (длинная реализация) (*a*); его вейвлет-спектр (*б*); его глобальный вейвлет-спектр (*в*); фрагмент пульсового сигнала человека с функциональными отклонениями (длинная реализация) (*з*); его вейвлет-спектр (*д*); его глобальный вейвлет-спектр (*е*)

и выше, в частности длинные записи пульсовых волн — 100 с. Ниже представлены результаты вейвлет-преобразования рассматриваемых пульсовых сигналов (рис. 3, *a, z*).

Для здорового человека на вейвлет-спектре (рис. 3, *б*) полоса, соответствующая основной частоте сигнала, имеет большую вариацию, тогда как на вейвлет-спектре пульсового сигнала человека с функциональными отклонениями (рис. 3, *д*) полоса, соответствующая основной частоте сигнала, практически ровная, что говорит о снижении варибельности ритма сердца. Появляются дополнительные особенности на вейвлет-спектре (рис. 3, *д*) в области 0,022 Гц, имеющие периодический характер, что говорит о наличии дополнительной гармоники, которая исчезает в области $t = 35$ с. Изменение частотного состава сигнала в области 0,02–1 Гц прослеживается и на глобальном вейвлет-спектре распределения энергии сигнала по частотам E (рис. 3, *в, е*).

Таким образом, рассмотренные примеры позволяют сделать вывод, что у пациентов с различным состоянием здоровья различаются структуры вейвлет-спектров пульсовых волн: изменяется частотный состав сигнала в низкочастотной области и отличаются дополнительные локальные особенности в области 6–23 Гц вейвлет-картины.

Появление дополнительных локальных особенностей на вейвлет-спектре связано с изменением формы пульсового сигнала, которое отражается на параметрах характерных точек сигнала. Определение характерных точек сигнала является важнейшей задачей при определении функционального состояния человека.

Применение непрерывного вейвлет-преобразования для определения информативных точек пульсового сигнала

Для определения информативных точек пульсового сигнала предлагается использовать аналог непрерывного вейвлет-преобразования для дискретных сигналов [4]:

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_k f(k) \int_k^{k+1} \psi\left(\frac{b-t}{a}\right) dt,$$

где $f(k)$ – дискретный пульсовый сигнал, с использованием вейвлета Хаара, представляющего собой ортонормальный вейвлет с компактным носителем [5]:

$$\psi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < 0,5 \\ -1, & -0,5 \leq t < 0,5 \\ 0, & t < -0,5, t \geq 0,5. \end{cases}$$

Покажем возможности использования вейвлета Хаара для решения поставленной задачи на конкретных примерах. Суть метода определения информативных точек исследуемого сигнала с его помощью заключается в том, что анализируемый сигнал (рис. 4, *а*) вначале разлагаем по вейвлетам

и получаем картину абсолютных значений вейвлет-коэффициентов (вейвлет-спектр), представленных на рис. 4, *б*, на которой хорошо видны нулевые значения вейвлет-коэффициентов, обозначенных белым цветом.

Следующий этап алгоритма выделения информативных точек заключается в выборе фиксированной частоты на картине вейвлет-коэффициентов с учетом информативного масштаба (частоты), позволяющего определять искомые точки. На рис. 4, *б* вейвлет-коэффициенты на выбранной частоте показаны линией 1. Значение частоты выбрано с учетом минимизации влияния шумов на точность определения информативных точек.

На заключительном этапе определения координат информативных точек по пересечению линии 1 и нулевых значений вейвлет-коэффициентов (белые области картины вейвлет-коэффициентов) находятся информативные точки модельного сигнала, соответствующие его точкам экстремумов, как показано на рис. 4, *б*. Способ определения информативных точек исследуемого сигнала по значениям вейвлет-коэффициентов, равным нулю на выбранной фиксированной частоте (обозначены крестиками), более понятно представлен на рис. 4, *в*.

Простота и наглядность метода показывают эффективность использования непрерывного вейвлет-преобразования с вейвлетом Хаара для выделения информативных точек пульсового сигнала.

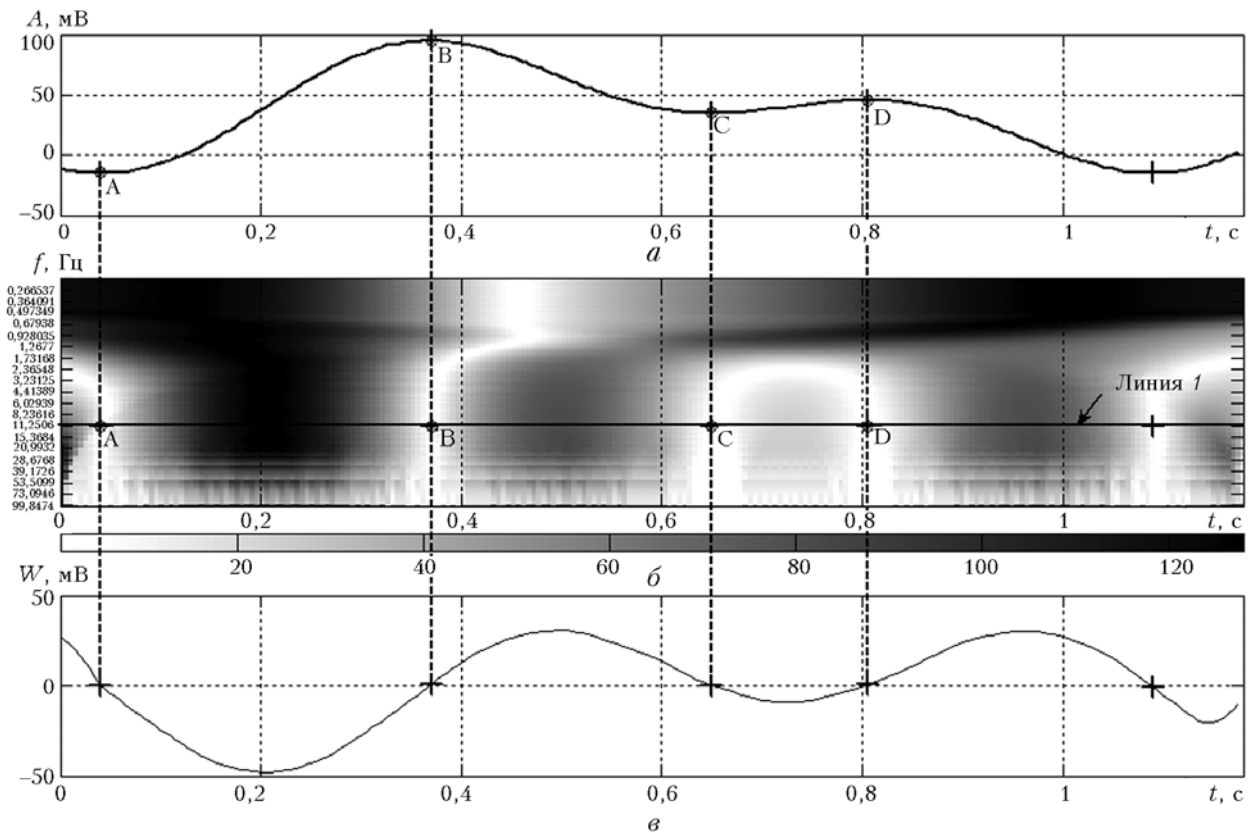


Рис. 4. Модельная пульсовая волна (*а*); вейвлет-спектр (*б*); абсолютные значения вейвлет-коэффициентов на выбранной фиксированной частоте (масштабе) (*в*)

Выводы

Изучение модельных сигналов пульсовых волн показало, что вейвлет-анализ способен выявлять характерные точки на малоамплитудных участках, артефакты и флуктуации сигналов, а также точки разрывов при некорректной записи сигналов, и тем самым открывает новые возможности в детальном исследовании локальных особенностей сигнала.

На основе анализа пульсовых сигналов различных пациентов выявлено, что при различном состоянии здоровья изменяется локальная структура вейвлет-спектров пульсового сигнала: отличаются локальные особенности сигнала; различается частотный состав в низкочастотной области пульсовых сигналов. Кроме того, предложен новый метод определения информативных точек на основе непрерывного вейвлет-преобразования.

Таким образом, применение вейвлет-преобразования к пульсовым сигналам является перспективным методом обработки. Данный метод может успешно использоваться для определения информативных точек пульсового сигнала и формализации признаков нарушения функционального состояния организма.

1. *Астафьева Н.М.* Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физ. наук. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145–1170.
2. *Новиков Л.В.* Основы вейвлет-анализа сигналов: Уч. пособие. СПб.: ООО «МОДУС», 1999. 152 с.
3. *Витязев В.В.* Вейвлет-анализ временных рядов: Уч. пособие. СПб.: Изд-во СПб.ГУ, 2001. 58 с.
4. *Переберин А.В.* О систематизации вейвлет-преобразований // Вычислительные методы и программирование. 2001. Т. 2. Разд. 3. С. 15–40.
5. *Stankovic R.S., Falkowski B.J.* The Haar wavelet transform: its status and achievements // Comput. and Electrical Eng. 2003. V. 29. N 1. P. 25–44.

V.V. Boronoyev, B.Z. Garmaev, I.V. Lebedintseva. **The features of continuous wavelet transform for physiological pressure signales.**

The paper shows the possibility of continuous wavelet transform (CWT) application to the analysis of pulse model signals. It has been found that wavelet analysis is capable of defining local characteristics of a signal and investigating any changes in the spectral distribution of a pulse signal. The wavelet spectra of pulse signals of healthy people and of people with functional disorders have been investigated. It has been shown that the shape of pulse signals of people with functional disorders changes, which brings about a change in the wavelet spectra. The paper describes a new wavelet-based detection method for physiologic pressure signal components.