

А. И. САВИЦКИЙ, магистр, ХНУРЭ, Харьков;

Е. В. ЛИННИК, канд. техн. наук, ХНУРЭ, Харьков

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТОХАСТИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТРЕМОГРАФИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Рассмотрены вопросы повышения информативности тремографических данных путем их фильтрации с использованием вейвлет-технологий. Разработанный и описанный в статье метод позволяет сохранить информативные стохастические составляющие тремограммы и может быть использован в современных автоматизированных системах нейропсиходиагностики. Из.: 3. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: тремор, паркинсонизм, нерегулярные осцилляции, вейвлет-преобразование

© А. И. САВИЦКИЙ, Е. В. ЛИННИК, 2012

Введение

Нарушения регуляции в системе управления движением, проявляющиеся повышенным тремором или трудностью выполнения привычных движений, объединяют синдромом паркинсонизма. При кажущейся простоте симптоматики сложность установления диагноза определяется многофакторностью повреждающих воздействий [1]. В этом случае особое значение приобретают методы инструментальной оценки патологического состояния центральной нервной системы (ЦНС). Тремография (ТГ) является важной аппаратно-поведенческой методикой исследования функционального состояния психической деятельности и индивидуально-психологических особенностей личности. Тремор – непроизвольные ритмичные движения конечностей, головы, языка и других частей тела, возникающие вследствие поочередного сокращения мышц-агонистов и мышц-антагонистов.

Актуальность темы

Получение треморограммы, непосредственно фиксирующей двигательные феномены, может осуществляться как прямым, так и косвенным методом. При прямом методе непосредственно регистрируется феномен движения, например с помощью сигнала, получаемого с акселерометрического датчика.

В настоящее время достоверно определены параметры физиологического и патологического тремора и разработаны автоматизированные системы ТГ [2,3]. Однако, сигнал ТГ, как и большинство биологических сигналов являются нестационарными квазигармоническими, что обусловлено стохастическим характером и цикличностью биологических процессов. Наложение нескольких сопутствующих процессов затрудняет извлечение информативной части сигнала. Поэтому актуальными являются задачи, направленные на усовершенствование методов и средств регистрации, обработки и анализа тремограмм.

Цель работы

В современных системах тремографии для оценки параметров тремора используют математический аппарат преобразования Фурье [2], которое, при всех своих достоинствах, обладает рядом недостатков (требует знания сигнала в

будущем, ограничение числа гармоник спектра, базисная функция определена в интервале времени $(-\infty; +\infty)$ и не описывает перепады сигналов с бесконечной крутизной и др.). Альтернативой преобразованию Фурье является вейвлет-преобразование, которое в настоящее время успешно применяется в области прикладной математики, обработки сигналов и изображений, связи и средств телекоммуникаций. В отличие от преобразования Фурье, вейвлет-преобразование позволяет представлять нестационарные сигналы, легко выявлять их локальные особенности, а также непосредственно определять временную локализацию частотных составляющих сигнала [4].

Однако для каждой конкретной задачи необходим подбор оптимальных параметров разложения.

Целью данной статьи является определение наилучшего способа реализации вейвлет-фильтрации тремографического сигнала на основе анализа влияния параметров вейвлет-фильтрации на качество идентификации стохастической составляющей тремограммы произвольного движения.

Механизмы генерации тремора

Причины развития тремора до сих пор во многом неясны. Предполагают 2 основных механизма формирования тремора: наличие центральных и периферических осцилляций [1]. Центральная осцилляция обеспечивается церебеллоталамокортикальной системой, Способность к ритмическим разрядам определяется особыми свойствами ионных каналов в нейронах, а формирование генератора дрожания возникает при синхронизации ритмической патологической активности группы нейронов. Причинами синхронизации могут быть формирование патологических межнейронных связей, деафферентация или иные механизмы.

В развитии тремора и поддержании ритмической активности его генераторов существенная роль принадлежит циркуляции импульсов по нейронным кругам. Периферическая осцилляция объясняется рефлексом растяжения. Она продуцируется периферическими чувствительными окончаниями, которые рефлекторно индуцируют двигательные модуляции. При периферических механизмах источником ритмической активности являются осцилляции в дугах сенсомоторных кругов [1,2].

Основным механизмом формирования тремора считают трансляцию осцилляционной активности центральной нервной системы (ЦНС) к периферическим мышцам, а ритмическая активность мышц ведет к тремору. При этом спектральный анализ показывает пик на частоте тремора как в акселерометрическом спектре, так и в спектре электромиограммы. Эти осцилляции называют центральными; в отличие от механически-рефлекторных (периферических) осцилляций они характеризуются центрально установленной частотой и не зависят от механики конечности [3]. Это принципиальное различие между двумя механизмами может быть использовано при дифференцировании усиленного физиологического тремора и патологического эссенциального тремора. На механику конечности можно легко повлиять, добавив дополнительный груз на исследуемую конечность, поскольку увеличение веса ведет к уменьшению резонансной частоты. Частота тремора уменьшится с дополнительным грузом в случае механически-рефлекторных

осцилляций и останется неизменной при центральных осцилляциях. Нагрузка конечности при механически и рефлекторно усиленном физиологическом треморе действительно значительно уменьшает частоту [1]; это позволяет сделать вывод, согласно которому ЭТ является центральным.

Независимость дрожания в разных конечностях указывает на то, что существует несколько независимых осцилляторов для каждой конечности, вовлеченной в тремор. Четкое разделение различных видов тремора в зависимости от генератора осцилляций условно. Взаимодействие между центральными и периферическими механическими рефлекторными осцилляциями возникает периодически при всех видах центрального тремора, что может приводить к некоторым спонтанным флюктуациям в частоте тремора и его зависимости от положения конечности.

Вопрос, является ли тремор абсолютно ритмичным колебанием, остается спорным. Ни один вид тремора не продуцируется строго синусоидальными осцилляциями. По данным акселерометрии более регулярным и ритмичным по периодичности является ЭТ, форма волны которого ближе к синусоиде. Характеристика паркинсонического тремора более сложна за счет возможной смены рисунка (флексия–экстензия, пронация–супинация), в результате форма волны такого тремора неправильная и неритмичная.

Материалы и методы

Стандартная процедура вейвлет-фильтрации состоит в подавлении шумовой составляющей сигнала и восстановлении информативной составляющей и включает следующие этапы[5,6]:

- Вейвлет-разложение сигнала.
- Выбор и применение порога для детализирующих коэффициентов каждого уровня разложения.
- Вейвлет-восстановление на основе исходных коэффициентов аппроксимации и модифицированных детализирующих коэффициентов.

Однако, стандартная процедура вейвлет-фильтрации не учитывает особенности сигнала ТГ. Предлагается адаптировать метод для выделения нерегулярных осцилляций и определить набор оптимальных параметров вейвлет-фильтрации.

Предлагаемый метод вейвлет-фильтрации, адаптированный к ТГ, схематически представлен на рис.1. Как видно, для реализации данного метода необходимо

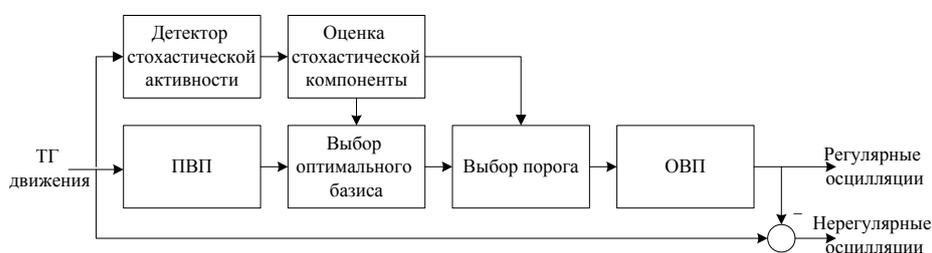


Рис.1. Схема адаптивной вейвлет-фильтрации ТГ

определить оптимальный тип и базис разложения и выбрать порог фильтрации. Оптимальный базис разложения определяется базисной вейвлет-функцией и уровнем разложения. Порог определяется типом пороговой функции и пороговой переменной

Как показали исследования, для аппроксимации ТГ наилучшим образом подходит вейвлет-преобразование с использованием алгоритма Малла. Но вейвлет-пакетное преобразование дает больше возможностей для фильтрации сигнала – большим количеством коэффициентов можно оперировать, выделение наилучшего (с позиции максимума энтропии) дерева разложения, определение оптимального уровня разложения для сигнала. Поэтому для фильтрации ТГ было применено вейвлет-пакетное преобразование.

Обзор литературы показал, что нет четких рекомендаций по выбору базисных вейвлетов [4,6]. Выбор оптимального базиса вейвлетов для разложения сигнала является трудной и пока математически не решенной задачей. Известен ряд критериев построения “хороших” вейвлетов, но, тем не менее, наилучшая комбинация этих свойств неизвестна. Выбор конкретного вейвлета зависит от данного анализируемого сигнала и определяется интуицией и практическим опытом исследователя[1].

В качестве основных требований к вейвлет-базису, применяемому в обработке ТГ можно указать:

1. обеспечение реконструкции сигнала;
2. обеспечение непрерывного и дискретного преобразований с применением алгоритмов быстрого вейвлет-преобразования (БВП).

Для проверки влияния типа базисной вейвлет-функции на качество представления сигнала ЭКГ выбраны вейвлеты Хаара, Добеши, Симлета, Койфлета и В-сплайновые биортогональные вейвлеты различных порядков, как наиболее отвечающие данным требованиям.

Определение пороговой переменной происходит на основе детекции стохастической компоненты ТГ. Детектор стохастической активности определяет, присутствует ли на входе полезный сигнал, либо входной сигнал является детерминированным. Из свойства ортогональности вейвлет-преобразования следует, что белый гауссовский шум будет преобразован в набор вейвлет-коэффициентов, нормально распределенных в каждом узле вейвлет-пакет дерева. Для определения соответствия распределения вейвлет-коэффициентов нормальному закону использован статистический метод интервального оценивания. В качестве параметра оценивания принята нормированная автокорреляционная функция вейвлет-коэффициентов в j -ом узле:

$$r_k = \frac{R_k}{R_0},$$

где 

c_i^j – вейвлет-коэффициенты в j -ом узле ($i=0..N$),

\bar{c}^j – выборочное среднее вейвлет-коэффициентов в j -ом узле.

Можно показать, что дисперсия r_k $D(r_k) \approx \frac{1}{N}$ (для $k=1,2\dots$).

Тогда, сравнивая r_k со значением $\pm \frac{x_\alpha}{\sqrt{N}}$ (где α – уровень значимости, x_α – квантиль распределения, соответствующий уровню значимости α), можно говорить, что вейвлет-коэффициенты содержат детерминированную компоненту сигнала при $|r_k| > \frac{x_\alpha}{\sqrt{N}}$ (для выбранного $\alpha=0,95$ $x_\alpha=1,96$). В противном случае, вейвлет-коэффициенты считаются стохастической компонентой и подлежат дальнейшему оцениванию.

Кoeffициенты стохастической компоненты ТГ распределены в каждом узле вейвлет-пакет дерева с различной дисперсией, поэтому оценку их параметров и определение пороговых уровней необходимо производить отдельно в каждом узле.

Для оценки параметров стохастической компоненты ТГ приняты выборочное среднее \bar{c} и выборочная дисперсия $\bar{\sigma}^2$ соответствующих вейвлет-коэффициентов.

Пороговую переменную θ необходимо определить так, чтобы $|c_k^j| \leq \theta$ с заданной вероятностью α . Тогда , где x_α двусторонний квантиль распределения на уровне значимости α .

Для $\alpha=0,95$ $x_\alpha=1,96$, и, если вместо σ взять его оценку $\bar{\sigma}$, то $|c_k^j| \leq \theta$ с 95% вероятностью. Таким образом, в качестве пороговой переменной в узле принимается значение $\theta = 1,96 \bar{\sigma}$. Аналогично пороговые переменные определяются для каждого узла вейвлет-пакет дерева.

Пороговая фильтрация коэффициентов может быть осуществлена с использованием различных пороговых техник:

Жесткий порог: 

Мягкий порог: 

Супермягкий порог: 

Результаты

Экспериментальные исследования проводились на серии ТГ-сигналов с пробой «разведение рук» снятых у здоровых людей при помощи разработанного измерительного модуля [7,8] с моделированием нерегулярных патологических осцилляций. В качестве критерия качества фильтрации взята норма восстановления сигнала:

$$norm = \frac{\|s_{\text{вых}}[n]\|^2}{\|s_{\text{вх}}[n]\|^2} \cdot 100 \% = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N |s_{\text{вых}}[n]|^2}{\sum_{n=1}^N |s_{\text{вх}}[n]|^2}} \cdot 100 \%,$$

где $norm$ – норма восстановления сигнала (в процентах), $s_{\text{вх}}[n]$ – исходный сигнал, $s_{\text{вых}}[n]$ – сигнал после фильтрации. Данный критерий далее используется для определения оптимального способа реализации алгоритма вейвлет-фильтрации ТГ.

На основе экспериментальных данных в качестве базисной функции вейвлет-разложения был выбран вейвлет Койфлета 3-го порядка (coif3).

Были проведены исследования зависимости степени восстановления сигнала нерегулярных патологических осцилляций от уровня вейвлет-разложения при фильтрации ТГ-сигнала (рис.2).

Для ТГ при использовании в качестве базисного вейвлет coif3 оптимальный уровень разложения одинаков и не зависит от уровня нерегулярных компонент (рис.2).

Был проведен сравнительный анализ качества восстановления нерегулярных патологических осцилляций при использовании стандартного метода вейвлет-фильтрации и предложенного адаптированного к ТГ (рис.3).

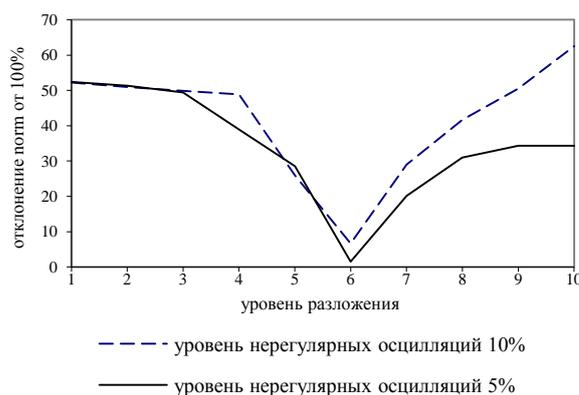


Рис.2. Отклонение нормы восстановления патологического сигнала от 100% для различных уровней разложения

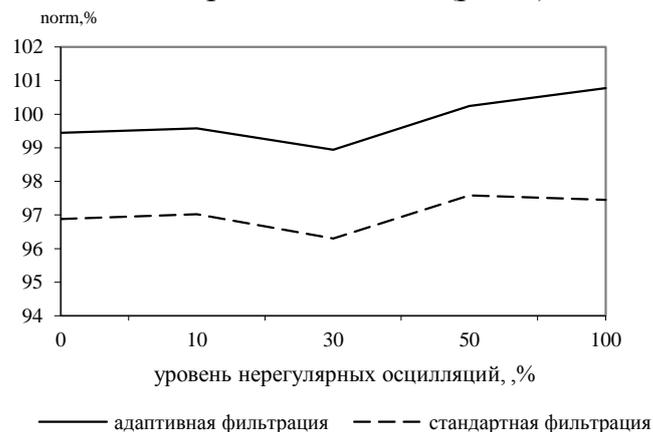


Рис. 3. Норма восстановления сигнала нерегулярных патологических осцилляций при стандартной и адаптивной фильтрации (для coif3 lev =6 mu=0,1)

Очевидно, что при использовании адаптивной вейвлет-фильтрации можно добиться выделения нерегулярных патологических осцилляций близкого к 100%.

На основе проведенных исследований, можно сформулировать последовательность выполнения этапов вейвлет-фильтрации ТГ:

- 1 Взять 2^n отсчетов сигнала.
- 2 Определить содержит ли рассматриваемый участок регулярные осцилляции или является стохастическим.

3 Если участок является стохастическим, то проводим оценку уровней сигнала во всех узлах вейвлет-пакет дерева.

4 Выполнить полное вейвлет-пакетное преобразование.

5 Выделить адаптивный базис из полного дерева, т.е. задается максимально возможное разделение регулярных и нерегулярных осцилляций (при условии, что преобразуемый фрагмент содержит и те и другие).

6 Урезать коэффициенты в выделенном базисе с использованием супермягкой пороговой техники.

7 Выполнить обратное вейвлет-преобразование.

8 Вычесть полученный сигнал из исходного.

Выводы

Таким образом, можно сделать вывод, что наилучшим (по критерию качества выделения стохастической компоненты тремографического сигнала) способом реализации вейвлет-фильтрации является реализация, основанная на алгоритме вейвлет-пакетного разложения с использованием вейвлета Койфлета 3 порядка в качестве базисного и супермягкой пороговой фильтрации с адаптацией пороговой переменной к уровню стохастической составляющей сигнала. При её использовании можно добиться разделения регулярных и нерегулярных осцилляций близкого к 100% при их различных уровнях, что позволяет выделять тремор, обусловленный центральными механизмами, и периферический механический рефлекторный тремор. Применение описанного метода фильтрации в современных тремографических системах позволит повысить точность нейропсиходиагностики за счет возможности выявления новых диагностических показателей, а также проводить контроль эффективности оперативного и консервативного лечения пациентов с паркинсонической симптоматикой.

Список литературы: 1. *Залялова, З.* Что мы знаем о треморе? [Текст] / *З. Залялова* // *Врач.* –2011. – С.7 – 11. 2. *Аврунин, О. Г.* Автоматизированный анализ количественных показателей треморографических данных для наблюдения динамики тремора [Текст] / *О. Г. Аврунин, Т. В. Жемчужкина, Т. В. Носова* // *Восточно–Европейский журнал передовых технологий.* – 2011. – №2/2 (50). – С.17 – 21. 3. *Драган, Б.* Компьютерная тензотрёморометрия в изучении физиологического и патологического тремора [Текст] / *Б. Драган* // *Вестник психиатрии и психофармакотерапии.* – 2008. – № 2(14). – С. 18 – 22. 4. *Дремин, И. М.* Вейвлеты и их использование [Текст] / *И. М. Дремин*//*Успехи физических наук.*- 2001. – Т.171. – № 5. – С.465-501. 5. *Мельникова, Е. В.* Первичная обработка электрокардиосигнала с использованием вейвлет-технологий[Текст] / *Е. В. Линник*// *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.*- 2003. – №6. – С.49-50. 6. Анализ низкоамплитудных элементов в компьютерных системах ЭКГдиагностики [Текст]: тез. докл. 2й Международный радиоэлектронный Форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития.» МРФ2005. Сб. научных трудов. Том I. Пленарные заседания Форума, семинары и круглые столы, 19–23 сентября 2005г. Харьков: *Е. В. Мельникова* (отв. ред.) . – Харьков, 2005. – с.72. 7. Возможности использования датчиков тремора при проведении треморографии [Текст]: тез. докл. 16го международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», 19 апреля 2012г. Харьков: *А. И. Савицкий* (отв. ред.). – Харьков, 2012. –174 с. 8. Измерительный модуль для регистрации тремора [Текст]: тез. докл. XXIV Всероссийську науковотехнічну конференцію «Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы» (Биомедсистемы 2011), 7 мая 2012 г. Рязань: *А. И. Савицкий* (отв. ред.). – Рязань, 2012. – 254с.

УДК 616-71

Ідентифікація стохастичної складової тремографічного сигналу/ Е.В. Лінник, А.И.Савицький // Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. - № 50(956). С. 58-65.

Розглянуто питання підвищення інформативності тремографічних даних шляхом їх фільтрації з використанням вейвлет-технологій. Розроблений та описаний у статті метод дозволяє зберегти інформативні стохастичні складові тремограми і може бути використаний в сучасних автоматизованих системах нейропсиходіагностики. Іл.: 3. Бібліогр.:8. назв.

Ключові слова: тремор, паркінсонізм, нерегулярні осциляції, вейвлет-перетворення.

UDK 616-71

Identification of tremography signal stochastic component / E. Linnik, A. Savitsky //Вестник НТУ «ХПИ». Серія «Новые решения в современных технологиях». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2012. - №50(956). . С. 58-65.

Questions of tremography data informtiveness increase by a way of wavelet-filtering are considered. The method allowing to save the tremography informative stochastic components is developed and described in article. It can be used in the modern automated systems of neuropsychodiagnostics. Im.:3 : Bibliogr.: 8.

Keywords: tremor, Parkinsonism, irregular oscillations, wavelet transform.

Надійшла до редакції 20.09.2012