

УДК 51-7:537.86

ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ ПУЛЬСОВЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГИЛЬБЕРТА-ХУАНГА

В. Д. Омпоков, В. В. Боронев

Институт физического материаловедения СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д.6

Статья поступила в редакцию 1 августа 2019 г.

Аннотация. Преобразование Гильберта-Хуанга является одним из наиболее перспективных методов частотно-временного анализа нестационарных процессов. Однако при анализе различного рода реальных зашумленных процессов, в том числе пульсовых сигналов, эффективность метода значительно снижается. Это происходит из-за смешивания модовых функций при эмпирической модовой декомпозиции анализируемых данных. Целью работы является модификация преобразования Гильберта-Хуанга для анализа пульсовых сигналов. В работе предложен метод повышения точности модовой декомпозиции с использованием информации о Фурье-спектре сигнала. Предлагается предварительно рассчитывать Фурье-спектр сигнала и разделять его на части с помощью полосовых частотных фильтров. На модельных сигналах с шумом показано, что точность декомпозиции повышается кратно. Разработанный метод используется для обработки и анализа одного из наиболее информативных сигналов биомедицинской природы – пульсового сигнала. Исследование частотно-временных характеристик пульсовых сигналов с помощью предложенного модифицированного преобразования Гильберта-Хуанга позволило провести классификацию сигналов на группы, соответствующие различным функциональным состояниям организма.

Ключевые слова: частотно-временной анализ, преобразование Гильберта-Хуанга, эмпирическая модовая декомпозиция, смешивание мод, преобразование Фурье, пульсовой сигнал.

Abstract. The paper presents a relative new method for the analysis of nonstationary signals that allows a signal's frequency and amplitude to be evaluated with high time

resolution. The Hilbert-Huang transform consists of two steps: Empirical mode decomposition and Hilbert transform. The empirical mode decomposition is a signal analysis method that separates multi-component signals into single oscillatory modes called intrinsic mode functions. Mode mixing problem happens during the empirical mode decomposition process. Fourier transform was introduced to remove the mode-mixing effect. Numerical experiments with signals containing closely spaced spectral components are carried out. Mean square error between predefined and decomposed data was used as estimation parameter. The proposed approach allows achieving better decomposition results than the classic empirical mode decomposition. The results of the using of Hilbert-Huang transform as an instrument for digital processing biomedical signals are presented.

Key words: time-frequency analysis, Hilbert-Huang transform, empirical mode decomposition, mode mixing, Fourier transform, arterial blood pressure signal.

Введение

Преобразование Гильберта-Хуанга [1,2] является методом частотно-временного анализа сигналов различной природы и позволяет исследовать изменения мгновенных частот и их амплитуд во времени, что особенно важно при изучении процессов с меняющимися во времени характеристиками [3-12]. Метод основан на эмпирической модовой декомпозиции и преобразовании Гильберта. Эмпирическая модовая декомпозиция используется для разложения сложного многочастотного сигнала на эмпирические моды [1,2]. Далее при помощи преобразования Гильберта на их основе определяется мгновенный спектр исходной последовательности.

Однако, при исследовании реальных физических процессов, в том числе пульсовых сигналов, проявляется эффект смешивания мод, когда при эмпирической модовой декомпозиции сигнала на некоторых временных отрезках появляются отрезки других модовых функций, что снижает эффективность метода. Это связано с тем, что сигналы, характеризующие реальные физические объекты, практически всегда зашумлены. Поэтому

необходимо произвести модификацию преобразования Гильберта-Хуанга для анализа импульсных сигналов.

Целью работы является модификация преобразования Гильберта-Хуанга для анализа реальных импульсных сигналов.

1. Постановка проблемы. Анализ модельных сигналов с шумом

Рассмотрим первый этап преобразования Гильберта-Хуанга – метод эмпирической модовой декомпозиции. В основе метода лежит построение гладких огибающих по максимумам и минимумам последовательности и дальнейшее вычитание среднего этих огибающих из исходной последовательности [3-5]. В результате итерационного процесса получается семейство модовых функций, упорядоченных по частоте. Рассмотрим модельный сигнал $x(t)$, состоящий из суммы двух синусоид с частотами $f_1 = 1$ Гц. и $f_2 = 2$ Гц. На рис. 1а представлены модельный сигнал $x(t)$ и модовые функции $imf_1 - imf_3$, полученные в процессе эмпирической модовой декомпозиции. Видно, что модельный сигнал $x(t)$, состоящий из суммы двух синусоид, был разложен на сумму двух синусоидальных функций imf_1 и imf_2 . К полученным таким образом модовым функциям в последующем применяется преобразование Гильберта, которое позволяет определить мгновенные частоты и их амплитуды.

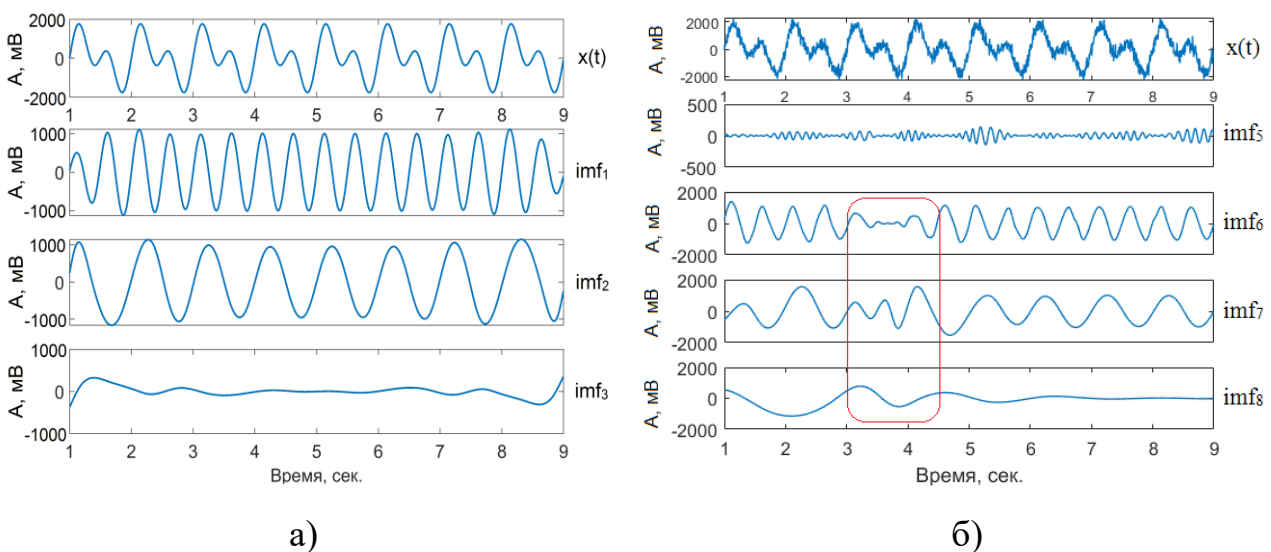


Рис. 1. Эмпирическая модовая декомпозиция: а) Модельный сигнал без шума.
 б) Смешивание мод при декомпозиции модельного сигнала с шумом.

Рассмотрим теперь модельный сигнал $x(t)$ с аддитивным белым гауссовским шумом (рис. 1б). При эмпирической модовой декомпозиции выделено 9 модовых функций $imf_1 - imf_9$, основными из которых являются модовые функции imf_6 и imf_7 . Модовые функции $imf_1 - imf_5$ являются высокочастотными шумами и обычно не рассматриваются. На рис. 1б на временном отрезке от 3 до 4,5 секунд наблюдается эффект смешивания мод, т.е. появляются колебания с частотами, не характерными для текущей модовой функции, что снижает точность метода.

Одним из основных методов, используемых для снижения данного эффекта, согласно литературным данным, является метод множественной эмпирической модовой декомпозиции [13-17]. Суть данного метода заключается в вычислении усредненных значений модовых функций по множеству реализаций после многократной эмпирической модовой декомпозиции.

Метод множественной эмпирической модовой декомпозиции является более эффективным в сравнении с классическим методом эмпирической модовой декомпозиции [14-15]. Но при использовании данного метода для декомпозиции модельных сигналов, близких по структуре к импульсным сигналам, обнаружен эффект “интерференции”, когда появляется дополнительная промежуточная модовая функция imf_{II} (рис. 2), в которой содержится информация об обеих модах. Из-за этого происходит увеличение погрешности выделения модовых функций.

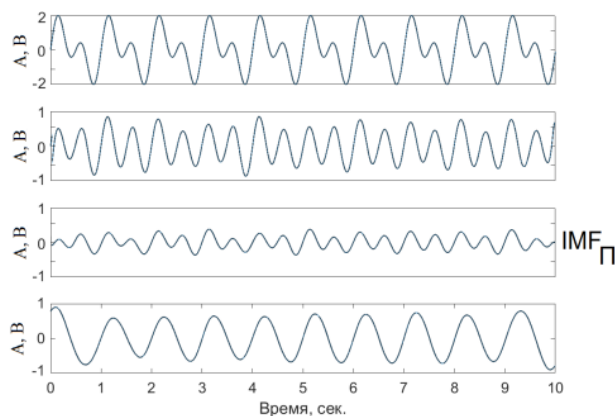


Рис. 2. Эффект “интерференции” при декомпозиции модельного сигнала.

Таким образом, алгоритм множественной модовой декомпозиции не подходит для анализа пульсовых сигналов. Поэтому актуальной задачей является модификация преобразования Гильберта-Хуанга для анализа пульсовых сигналов.

2. Предлагаемые методы и подходы

Для устранения указанных эффектов нами предлагается использовать данные по спектральному составу сигналов, полученных с помощью преобразования Фурье. Предлагается предварительно рассчитывать Фурье-спектр сигнала и разделять его на части с помощью полосовых частотных фильтров.

Рассмотрим действие алгоритма на примере реального процесса – пульсового сигнала, типичная форма которого представлена на рис. 3. На рисунке по оси абсцисс – время в секундах, по оси ординат – амплитуда сигнала в мВ. Пульсовый сигнал является одним из наиболее информативных видов сигналов биомедицинской природы. На рис. 4а представлен Фурье-спектр пульсового сигнала, который представляет собой набор гармоник f_i , кратных основной частоте f_1 , задаваемой ритмом сердца, и практически равноотстоящих друг от друга: $f_i = i * f_1$, $i=2..N$.

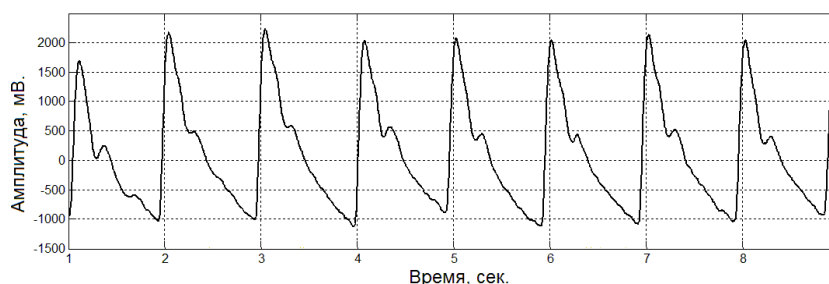


Рис. 3. Типичная форма пульсового сигнала.

В целях повышения точности эмпирической модовой декомпозиции Фурье-спектр пульсового сигнала предварительно разделяется на части с использованием полосовых частотных фильтров по границам среза f_{ci} , $i=1..N$ (рис. 4а). Граничные частоты среза определяются следующим образом:

$$f_{ci} = \frac{f_i + f_{i-1}}{2}, \quad i=2..N-1, \quad f_0=0.$$

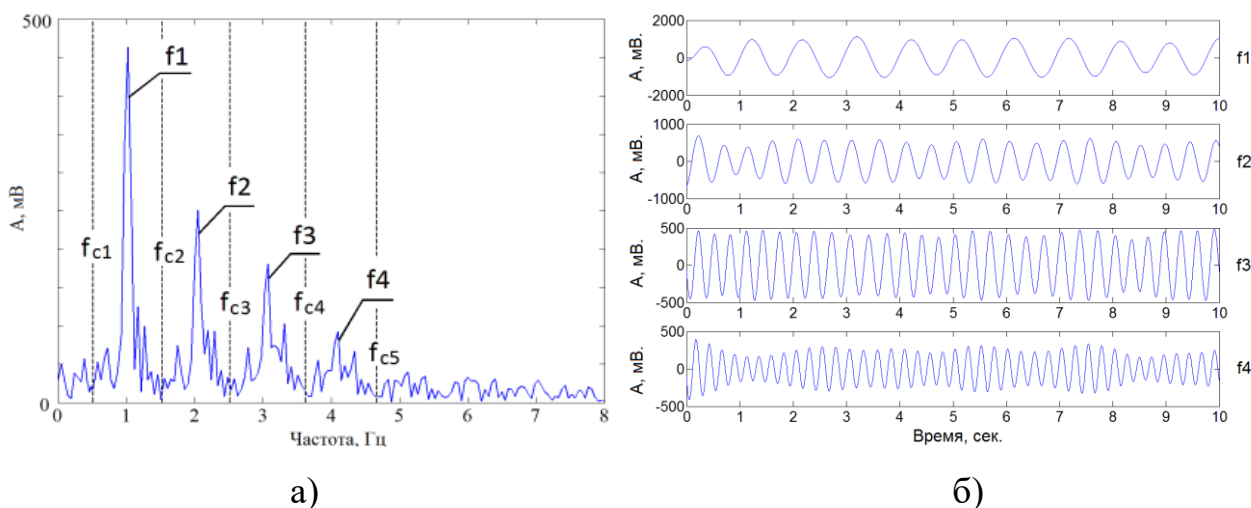


Рис. 4. а) Фурье-спектр импульсного сигнала. б) Начальные функции итераций эмпирической модовой декомпозиции.

Далее, с использованием обратного преобразования Фурье, полученные спектральные полосы переводятся во временную область (рис. 4б) и используются в качестве начальных функций итераций эмпирической модовой декомпозиции с последующим преобразованием Гильберта.

3. Результаты и их обсуждение

В результате анализа импульсных сигналов с помощью модифицированного преобразования Гильберта-Хуанга получаем частотно-временной спектр, представленный на рис. 5.

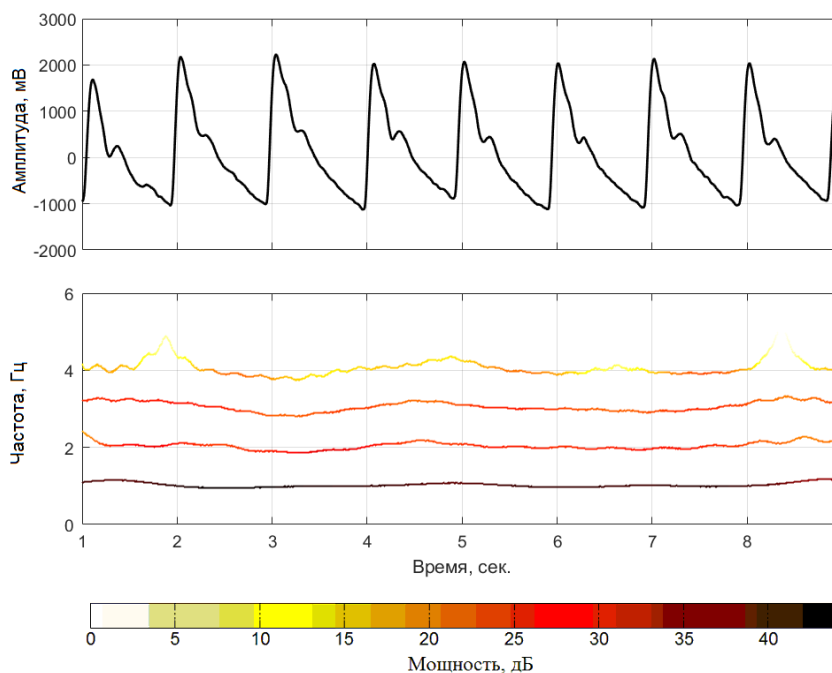


Рис. 5. Частотно-временное распределение импульсного сигнала

Данные представлены на плоскости время-частота с представлением амплитуды в каждой точке оттенками цвета, где более темные цвета соответствуют более высоким амплитудам. Здесь видны 4 кривые вдоль оси времени, которые характеризуют динамику изменения частот во времени. Флуктуация частоты и изменение амплитуды частоты во времени являются диагностическими признаками и используются для классификации сигналов на группы, соответствующие различным функциональным состояниям организма.

Произведена оценка точности модифицированного метода в зависимости от уровня шума δ в сравнении с классическим методом эмпирической модовой декомпозиции и метода множественной модовой декомпозиции. В качестве оценочного параметра использовалась среднеквадратическая погрешность декомпозиции, рассчитываемая по следующей формуле:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum (\sin_i - imf_i)^2}{N}}, i=1..N,$$

где \sin_i – значения исходной синусоиды в точках отсчета, imf_i – значения соответствующей модовой функции.

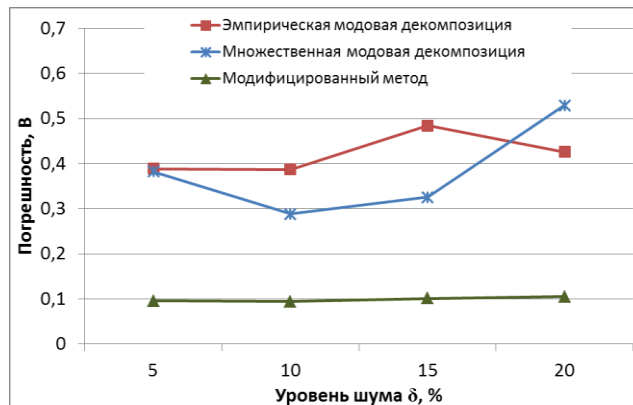


Рис. 6. Оценка погрешности декомпозиции в зависимости от уровня шума

Из рис. 6 видно, что точность декомпозиции сигнала с помощью предложенного модифицированного метода значительно выше, чем при использовании классического метода эмпирической модовой декомпозиции и метода множественной модовой декомпозиции.

Выводы

Таким образом, показано, что при использовании метода множественной модовой декомпозиции, наиболее часто используемой для снижения эффекта смешивания мод, появляется эффект “интерференции” близлежащих частот, из-за чего происходит повышение погрешности выделения модовых функций.

Для повышения точности декомпозиции предложено использовать данные по спектральному составу сигналов, полученных с помощью преобразования Фурье. Оценка погрешности предложенного модифицированного метода эмпирической модовой декомпозиции показала высокую устойчивость к шумам и высокую точность выделения модовых функций.

Таким образом, для анализа реальных пульсовых сигналов необходимо использовать модифицированный метод эмпирической модовой декомпозиции с полосовой частотной фильтрацией Фурье-спектра. Это приводит к минимизации влияния эффекта “смешивания мод” и явления “интерференции” частот на точность метода и позволяет более эффективно исследовать частотно-временную структуру пульсовых сигналов.

Литература

1. Norden Huang et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // Proceedings of the Royal Society of London. 1998. A 454. p. 903–995.
2. N. E. Huang, Samuel S.P. Shen. The Hilbert-Huang transform and its applications // World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2005. 311 p.
3. А.Е. Филатова, А.Н. Павлов, А.Е. Храмов и др. Частотно-временной анализ нестационарных геофизических процессов на основе вейвлетов и эмпирических мод // Вестник ТГУ. 2012. Т. 17. вып. 5. С. 1428-1432.
4. Сафиуллин Н.Т. Разработка методики анализа временных рядов с помощью преобразования Хуанга-Гильберта: дисс. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2015. 193 с.

5. Давыдов В.А., Давыдов А.В. Очистка геофизических данных от шумов с использованием преобразования Гильберта-Хуанга // Электронное научное издание "Актуальные инновационные исследования: наука и практика", 2010. № 1. URL: <http://www.actualresearch.ru>.
6. Кривоногов Л.Ю. Анализ и обработка эмпирических мод с целью подавления помех в электрокардиосигналах // Известия южного федерального университета. Технические науки. 2012. Т. 134. № 9. С. 119-125.
7. V.V. Boronoev, V.D. Ompokov. The Hilbert-Huang Transform for biomedical signals processing // 2014 International conference on computer technologies in physical and engineering applications (ICCTPEA). Saint Petersburg State University; IEEE (IEEE Catalog number CFP14BDA-USB). - 2014. - p. 21-22.
8. Бороноев В.В., Омпоков В.Д. Возможности преобразования Гильберта-Хуанга в задаче обработки и анализа биомедицинских сигналов // Биомедицинская радиоэлектроника. 2014. № 3. С. 40-44.
9. V. V. Boronoev, V. D. Ompokov, N. V. Pupysheva, B. Z. Garmaev. The estimation of optical radiation influence on human pulse waves /// Proceedings of SPIE. 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – 2018. - Vol. 10833. DOI: [10.1117/12.2501927](https://doi.org/10.1117/12.2501927).
10. Омпоков В.Д., Бороноев В.В. Исследование частотно-временных характеристик пульсовых сигналов с помощью преобразования Гильберта-Хуанга // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. № 5. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/may17/8/text.pdf>.
11. Altay Y.A., Kremlev A. S. Comparative analysis of ECG signal processing methods in the time-frequency domain // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). 2018. P. 1058-1062.
12. Altay Y.A., Kremlev A.S. Analysis and systematization of noise arising by long-term recording of ECG signal // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. 2018. P. 1053-1057.

13. Zhaohua Wu, Norden E. Huang. Ensemble Empirical Mode Decomposition: A Noise Assisted Data Analysis Method // *Advances in Adaptive Data Analysis*. 2009. Vol. 1. No. 1. P. 1–41.
14. María E. Torres, Marcelo A. Colominas; Gastón Schlotthauer, Patrick Flandrin. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise // *2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. Prague. 2011. P. 4144-4147.
15. Marcelo A. Colominas; Gastón Schlotthauer, María E. Torres. Improved complete ensemble EMD: A suitable tool for biomedical signal processing // *Biomedical Signal Processing and Control*. 2014. vol. 14. P. 19-29.
16. Омпоков В.Д., Бороноев В.В. Комплементарная множественная декомпозиция на эмпирические моды с адаптивным шумом CEEMDAN как метод решения основных проблем применения преобразования Гильберта-Хуанга // *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2016. № 9. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep16/12/text.pdf>.
17. Altay Y.A., Kremlev A. S. Improved Noise Resistance Processing Electrocardiosignals Adaptive Noise CEEMDAN as a Method of Solving the Basic Problems of the Application of Hilbert-Huang Transform // *Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2017 ElConRus)*. 2017. P. 621-623.

Для цитирования:

В. Д. Омпоков, В. В. Бороноев. Частотно-временной анализ пульсовых сигналов на основе преобразования Гильберта-Хуанга. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2019. № 8. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/aug19/4/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.8.4