

Сравнение методов останова операций отсеивания при эмпирической модовой декомпозиции сигналов

А.Р. Загретдинов¹, А.В. Бусаров², В.В. Бусаров²

¹*Казанский государственный энергетический университет*

²*Центр экспертизы промышленной безопасности, Казань*

Аннотация: В статье проводится сравнение S- и SD-методов останова операций отсеивания функций IMF. Рассмотрен пример с тестовым сигналом, проведен анализ эффективности декомпозиции.

Ключевые слова: модовая эмпирическая декомпозиция сигналов, ошибка декомпозиции, эмпирические моды, внутренние колебания, S-метод, SD-метод, нормализованная квадратичная разность, операция отсеивания, LabView, преобразование Гильберта-Хуанга.

Метод эмпирической модовой декомпозиции сигналов (Empirical Mode Decomposition, EMD) представляет собой адаптивную итерационную вычислительную процедуру разложения исходных сигналов на эмпирические моды или внутренние колебания (intrinsic mode functions, IMF) [1]. Применение данной процедуры к многокомпонентным сигналам допускает создание их частотно-временного представления на основе преобразования Гильберта [2-5].

Процедура эмпирической модовой декомпозиции реализует следующий алгоритм действий [1,6-8].

1. В сигнале $y(t)$ определяется положение всех локальных экстремумов.
2. Кубическим сплайном вычисляется верхняя $u_a(t)$ и нижняя $u_b(t)$ огибающие процесса соответственно. Определяется функция средних значений $m_1(t)$ между огибающими.

$$m_1(k) = \frac{u_a(t) + u_b(t)}{2} \quad (1)$$

Разность между сигналом $y(t)$ и функцией $m_1(t)$ дает первую компоненту отсеивания – функцию $h_1(t)$, которая является первым

приближением к первой функции IMF:

$$h_1(t) = y(t) - m_1(t). \quad (2)$$

3. Повторяются операции 1 и 2, принимая вместо $y(t)$ функцию $h_1(t)$, и находится второе приближение к первой функции IMF – функция $h_2(t)$.

$$h_2(t) = h_1(t) - m_2(t) \quad (3)$$

Останов операций отсеивания может осуществляться по заданному значению нормализованной квадратичной разности (4) между двумя последовательными итерациями (SD-метод) или по заданному ограничению числа итераций (S-метод).

$$SD_k = \frac{\sum_{t=0}^T |h_{k-1}(t) - h_k(t)|^2}{\sum_{t=0}^T h_{k-1}^2} \quad (4)$$

4. Последнее значение $h_i(t)$ итераций принимается за наиболее высокочастотную функцию $c_1(t) = h_i(t)$ семейства IMF, которая непосредственно входит в состав исходного сигнала $y(t)$. Это позволяет вычлечь $c_1(t)$ из состава сигнала и оставить в нем более низкочастотные составляющие:

$$r_1(t) = y(t) - c_1(t). \quad (5)$$

Функция $r_1(t)$ обрабатывается как новые данные по аналогичной методике с нахождением второй функции IMF – $c_2(t)$, после чего процесс продолжается.

Таким образом, достигается декомпозиция сигнала в n -эмпирическом приближении:

$$y(k) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t). \quad (6)$$

Приведенный алгоритм модовой декомпозиции реализован нами в среде программирования LabView [9].

Для вычисления ошибки декомпозиции при сравнении разных методов останова итераций (S- и SD-методов) будем использовать следующую

величину [10]:

$$Error = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y'_i - y_i)^2}{N}}, \quad (7)$$

где y_i и y'_i - значения для i -ого отсчета исходного и реконструированного по формуле (6) сигналов соответственно.

В качестве примера смоделирован гармонический сигнал (рис.1) с частотными составляющими 50, 250 и 450 Гц. Длина сигнала составляет 1000 отсчетов при частоте дискретизации 1кГц.

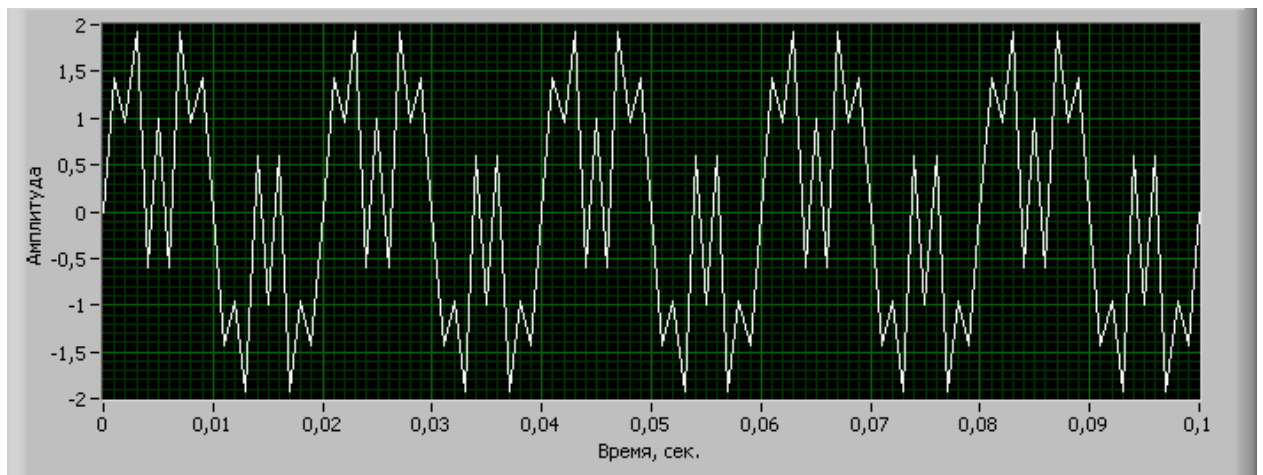


Рис. 1. – Фрагмент смоделированного сигнала

Результаты расчетов ошибки декомпозиции сигнала при задании останова операции отсеивания по S-методу представлены на рис. 2. Из рисунка видно, что с увеличением количества итераций возрастает ошибка декомпозиции сигнала. Минимальное значение ошибки было достигнуто на второй операции приближения.

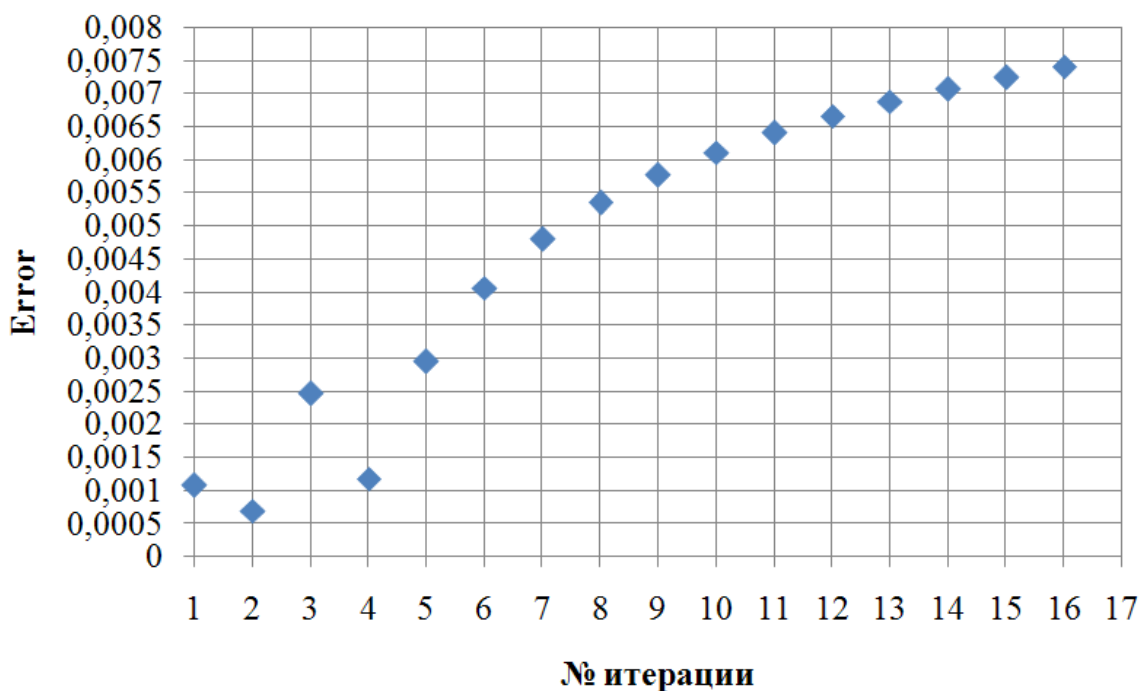


Рис. 2. – Изменение величины ошибки декомпозиции Error в зависимости от номера итерации

Для апробации на тестовом сигнале SD-метода были оценены значения нормализованной квадратичной разности для каждой операции приближения по S-методу. Следует отметить, что для каждой эмпирической моды в пределах одного номера итерации они имеют разные значения и могут отличаться на несколько порядков. В соответствии с этим был выбран диапазон задания порога останова по значению нормализованной квадратичной разности от $1E-08$ до 1.

Значения ошибки декомпозиции сигнала с применением SD-метода представлены на рис. 3. Из него видно, что минимальное значение ошибки было достигнуто при задании порога останова $SD_{min}=1E-02$. Слишком строгий критерий останова завышает величину ошибки декомпозиции, а при значении $SD_{min}=1E-08$ достигает 0,753287.

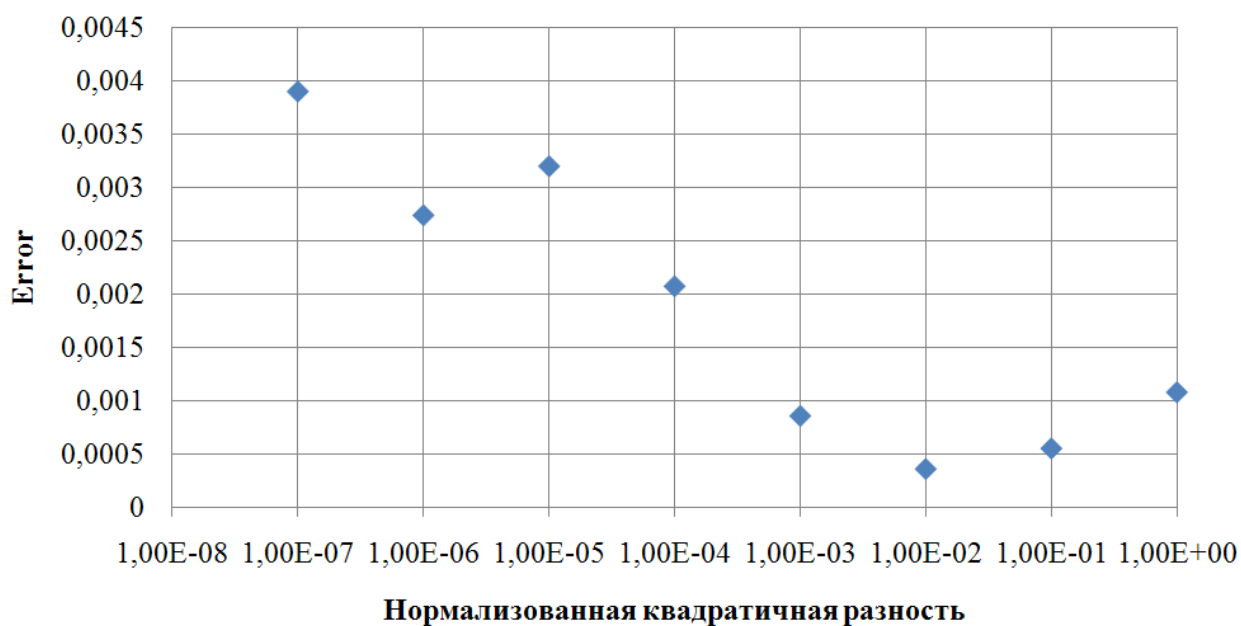


Рис. 3. – Изменение величины ошибки декомпозиции Error в зависимости от задания значения нормализованной квадратичной разности

Анализ результатов декомпозиции ряда тестовых сигналов показал схожие результаты с приведенным примером и позволяет сделать следующие выводы:

1. S- и SD-методы показали одинаковую эффективность декомпозиции, минимальные значения ошибки (7) практически совпадают.
2. Завышение критерия останова S- и SD-методов приводит к изменению форм IMF и искажает условия заданные выражением (6).
3. В случае обработки большого количества данных предпочтительным является S-метод останова операций отсеивания в виду упрощения вычислительного алгоритма.

Литература

1. Norden E. Huang, Samuel S.P. Shen. The Hilbert-Huang transform and its applications // World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2005. 325 p.

2. Берстень М.П., Зенов А.Ю. Концепция организации обработки информации в системах диагностики и распознавания // Инженерный вестник Дона, 2013, № 1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1568.
 3. Чернов А.В., Пугачева О.Ю., Абидова Е.А. Обработка диагностической информации при оценке технического состояния электроприводной арматуры АЭС // Инженерный вестник Дона, 2011, № 3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2011/499.
 4. Павлов А.Н., Филатова А.Е., Храмов А.Е., Иванов А.В., Шурыгина С.А., Куркин С.А., Москаленко И.О., Павлова О.Н. Анализ и диагностика многокомпонентных сигналов сейсмограмм с использованием преобразования Гильберта-Хуанга // Вестник ТГУ. 2012. № 4. С. 1122-1124.
 5. Павлов А.Н., Филатова А.Е., Храмов А.Е. Частотно-временной анализ нестационарных процессов: концепции вейвлетов и эмпирических мод // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. № 2. С. 141-157.
 6. Бороноев В.В., Омпоков В.Д., Козин В.А. Эмпирическая модовая декомпозиция импульсных сигналов // Вестник ВСГТУ. 2015. № 1. С. 40-43.
 7. Феоктистов А.С., Нежевенко Е.С. Классификация гиперспектральных изображений с помощью преобразования Гильберта-Хуанга // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ. 2015. № 2. С. 23-27.
 8. Huang N. E., Wu M. C., Long S. R. et al. A confidence limit for empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis // Proc. R. SOC. London, Ser. A. 2003. № 459. pp. 2317–2345.
 9. LabVIEW: стиль программирования / Блюм П., Пер. с англ. под ред. Михеева П. М.: 2008. 400 с.
 10. Сафиуллин Н.Т. Разработка методики анализа временных рядов с помощью преобразования Хуанга-Гильберта: дис. канд. техн. наук: 05.13.01. Новосиб., 2015. 193 с.
-

References

1. Norden E. Huang, Samuel S.P. Shen. The Hilbert-Huang transform and its applications. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2005. 325 p.
2. Bersten' M.P., Zenov A.Yu. Inzhenernyy vestnik Dona (Rus), 2013, № 1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1568.
3. Chernov A.V., Pugacheva O.Yu, Abidova E.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2011, № 3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2011/499.
4. Pavlov A.N., Filatova A.E., Khramov A.E., Ivanov A.V., Shurygina S.A., Kurkin S.A., Moskalenko I.O., Pavlova O.N. Vestnik TGU. 2012. № 4. pp. 1122-1124.
5. Pavlov A.N., Filatova A.E., Khramov A.E. Izvestiya vuzov. Prikladnaya nelineynaya dinamika. 2011. № 2. pp. 141-157.
6. Boronoev V.V., Ompokov V.D., Kozin V.A. Vestnik VSGTU. 2015. № 1. pp. 40-43.
7. Feoktistov A.S., Nezhevenko E.S. INTEREKSPLO GEO-SIBIR". 2015. № 2. pp. 23-27.
8. Huang N. E., Wu M. C., Long S. R. et al. A confidence limit for empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis. Proc. R. SOC. London, Ser. A. 2003. № 459. pp. 2317–2345.
9. LabVIEW: stil' programmirovaniya [The LabVIEW Style Book]. Blyum P., Per. s angl. pod red. Mikheeva P. Moscow. 2008. 400 p.
10. Safiullin N.T. Razrabotka metodiki analiza vremennykh ryadov s pomoshch'yu preobrazovaniya Khuanga-Gil'berta [The method of time series analysis using the Hilbert-Huang transform]: dis. kand. tekhn. nauk: 05.13.01. Novosibirsk, 2015. 193 p.