

Индюхин Алексей Федорович

E-mail: induke_a_f@mail.ru.

300045, г. Тула, ул. Новомосковская, 25, кв. 70.

Тел.: 84872350552; 84872377110.

Korzhuk Nikolay Lvovich

Saveliev Valeri Viktorovich

Tula State University.

92, Lenina pr., Tula, 300600, Russia.

Phone: +74872350552.

Indyukhin Alexey Alekseevich

E-mail: induke705@mail.ru.

12/43, Demonstration street, Tula, 300041, Russia.

Phone: +74872350552; +74872301016.

Indyukhin Alexey Fedorovich

E-mail: induke_a_f@mail.ru.

25/70, Novomoskovsk street, Tula, 300045, Russia.

Phone: +74872350552; +74872377110.

УДК 53.088.7, 612.172.4

Л.Ю. Кривоногов, А.Ю. Тычков

**ПОДАВЛЕНИЕ ПОМЕХ В ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛАХ НА ОСНОВЕ
РАЗЛОЖЕНИЯ ПО ЭМПИРИЧЕСКИМ МОДАМ**

Описан алгоритм подавления помех в электрокардосигналах, основанный на их разложении по эмпирическим модам, обработке отдельных мод и последующей реконструкции сигналов.

Электрокардосигнал; подавление помех; разложение по эмпирическим модам.

L.Y. Krivonogov, A.Y. Tychkov

**ECG SIGNAL DENOISING BASED ON EMPIRICAL MODE
DECOMPOSITION**

This paper describes algorithm ECG signals denoising based on empirical mode decomposition, processing of separate modes and subsequent reconstruction of an ECG signal.

ECG signal; denoising; empirical mode decomposition.

Заболевания сердца и сердечно-сосудистой системы являются ведущей причиной смертности населения во многих экономически развитых странах, в том числе и в России, составляя около 55 % от общей смертности. Повышение эффективности лечения и возвращение пациентов к активной жизни связаны, прежде всего, со своевременной диагностикой, основой которой является электрокардиография. Несмотря на значительные успехи, достигнутые почти за полувековую историю автоматизации электрокардиографических исследований, эффективность автоматического анализа электрокардосигналов (ЭКС) недостаточно высока. Основной причиной ошибок автоматической диагностики в электрокардиологии являются погрешности, допущенные на этапе измерения амплитудно-временных параметров ЭКС [1]. В свою очередь, погрешности измерений напрямую связаны с наличием помех в регистрируемом сигнале, с их видом и интенсивностью. Кроме того, процедуры обработки ЭКС, предназначенные для устранения помех, сами могут яв-

ляться причиной искажений полезного сигнала, и как следствие, причиной погрешностей измерений.

Проблема подавления помех при обработке ЭКС состоит в том, что полезная информация сосредоточена в циклически повторяющихся коротких информативных участках. Поэтому, если в результате помехоподавления происходят даже незначительные искажения формы информативных участков ЭКС, то такие искажения могут привести к ошибочным диагностическим заключениям. Следовательно, основным требованием, предъявляемым к процедурам помехоподавления, является значительное подавление помех при минимальном искажении полезного сигнала.

Традиционно помехи в электрокардиографии, с точки зрения их проявления, делят на следующие виды:

- ◆ дрейф изолинии (низкочастотные колебания с частотой менее 0,5 Гц);
- ◆ сетевая помеха (суперпозиция гармоник разных фаз с частотами, кратными 50 Гц);
- ◆ мышечный тремор (хаотические колебания с частотой 30–100 Гц);
- ◆ артефакты движения (одиночные или циклические волны с частотой от единиц до 30–40 Гц.);
- ◆ высокочастотные шумы электродов и усилителей;
- ◆ импульсные помехи.

Подавление сетевой помехи и тремора обычно приводит к уменьшению амплитуды и увеличению длительности Q, R, S зубцов; устранение дрейфа изолинии – к искажению ST-сегмента.

Наибольшее распространение для подавления помех при обработке ЭКС получили три группы фильтров:

- ◆ линейные частотные фильтры;
- ◆ компенсирующие схемы вычитания помехи;
- ◆ вейвлет-фильтры.

Основными недостатками этих фильтров являются неполное подавление помех и искажение полезного сигнала. В той или иной степени эти два недостатка присущи всем процедурам помехоподавления.

Возможным подходом к решению проблемы качественного подавления помех в ЭКС является его анализ на основе разложения по эмпирическим модам (empirical mode decomposition, EMD) [2]. Основным преимуществом технологии EMD является ее высокая адаптивность, связанная с тем, что базисные функции, используемые для разложения сигнала, конструируются непосредственно из самого исследуемого сигнала, что позволяет учесть все его локальные особенности, внутреннюю структуру, присутствие различных помех. Данные функции получили название эмпирических мод (ЭМ). Кроме адаптивности, EMD обладает и другими важными для практических приложений свойствами:

- ◆ локальностью, т.е. возможностью учета локальных особенностей сигнала;
- ◆ ортогональностью, обеспечивающей восстановление сигнала с определенной точностью;
- ◆ полнотой, гарантирующей конечность числа базисных функций при конечной длительности сигнала.

В общем случае выбор базиса разложения определяется структурными свойствами сигнала [3], а поскольку ЭКС является нестационарным и его информативные участки могут иметь различную форму, то практически невозможно подобрать фиксированный базис, обеспечивающий эффективный анализ. Временная изменчивость ЭКС и сопровождающих его помех требует применения адаптивных

процедур на различных этапах обработки. Поэтому целесообразно для разложения выбрать не фиксированный, а адаптивный базис, позволяющий учитывать особенности и сложную внутреннюю структуру ЭКС. Анализ ЭКС путем разложения по ЭМ должен обеспечить качественное подавление помех, на основе разделения в пространстве признаков информации о помехах и полезном сигнале с последующим использованием только последней.

Эмпирические моды – это монокомпонентные составляющие сигнала, но вместо постоянной амплитуды и частоты, как в простой гармонике, они имеют меняющуюся во времени амплитуду и частоту. ЭМ не имеют строгого аналитического описания, но должны удовлетворять двум условиям [4]:

- ◆ общее число экстремумов равняется общему числу нулей с точностью до единицы;
- ◆ среднее значение двух огибающих – верхней, интерполирующей локальные максимумы, и нижней, интерполирующей локальные минимумы, должно быть приближенно равно нулю.

Эти условия гарантируют определенную симметрию и узкополосность базисных функций.

Технология EMD достаточно проста в реализации, требует сравнительно небольшого объема вычислений и в общем виде содержит следующие этапы [4].

1. Определение локальных экстремумов (максимумов и минимумов) входного сигнала.
2. Вычисление верхней огибающей по найденным локальным максимумам и нижней огибающей по локальным минимумам. Огибающие строят чаще всего с помощью кубической сплайн-интерполяции.
3. Вычисление среднего значения огибающих (локального тренда).
4. Устранение локального тренда (вычисление первой ЭМ – разности между входным сигналом и локальным трендом, полученным на этапе 3).
5. Повторение этапов 1-4 для вычисленных ЭМ и получение новых ЭМ и новых локальных трендов. Каждая новая ЭМ является входным сигналом на этапе 1. Процесс продолжается до тех пор, пока новая вычисленная ЭМ не будет удовлетворять критерию останова.
6. Вычисление глобального тренда сигнала.

В результате разложения ЭКС $x(t)$ получим:

$$x(t) = \sum_{i=0}^{n-1} f_i(t) + r_n(t),$$

где $f_i(t)$ – набор эмпирических мод, $r_n(t)$ – остаточный член, не подлежащий разложению (глобальный тренд ЭКС).

Таким образом, каждая функция $f_i(t)$ является монокомпонентной, имеет свой характерный временной масштаб осцилляций, который убывает с ростом её номера i , а процесс вычисления сводится к устранению локального тренда, соответствующего данному масштабу.

Базовый алгоритм подавления помех на основе EMD предусматривает декомпозицию сигнала на ЭМ, удаление некоторых из них (соответствующих помехам) и последующее восстановление сигнала.

Проведенные исследования показали, что для реальных ЭКС спектры полезного сигнала и помех значительно перекрываются, и поэтому помехи в различной степени распределяются по многим ЭМ. Следовательно, алгоритм, основанный

только на удалении определенных ЭМ, не может обеспечить высокого качества устранения помех в ЭКС.

Для эффективного удаления помех в ЭКС необходимо сформировать определенные критерии классификации эмпирических мод на три группы:

1. ЭМ, содержащие только помеховую составляющую.
2. ЭМ, в которых присутствует полезная информация вместе с «просочившимися» помехами.
3. ЭМ, содержащие только полезную информацию.

При этом ЭМ первой группы целесообразно исключить из реконструкции ЭКС, ЭМ второй группы подвергнуть пороговой обработке (thresholding) и/или частотной фильтрации, а моды третьей группы использовать в реконструкции без изменения. Суть пороговой обработки состоит в специальной нелинейной процедуре модификации отсчетов ЭМ в соответствии с определенными правилами. В качестве критериев классификации следует использовать статистические оценки, рассчитанные для каждой ЭМ исследуемого ЭКС.

Еще одним подходом к повышению качества подавления помех в ЭКС является предварительное разделение сигнала на частотные составляющие, раздельная их декомпозиция на ЭМ и удаление некоторых мод частотных составляющих [4].

Исследовав алгоритмы, описанные в [4-7], авторами предложен алгоритм подавления помех в ЭКС, состоящий из 2 ветвей.

Ветвь 1. Подавление высокочастотных помех (сетевой помехи и мышечного тремора). Исследуемый ЭКС с помощью ФНЧ делится на две частотные составляющие (высокочастотную – ВЧС и низкочастотную – НЧС). Каждая из частотных составляющих ВЧС и НЧС подвергается процедуре ДЭМ, затем часть высокочастотных мод ВЧС и НЧС удаляется, а часть подвергается пороговой обработке (soft thresholding) в соответствии с выражением:

$$\eta(f_j(t)) = \begin{cases} \text{sign}(f_j(t)) \times (|f_j(t)| - p), & \text{if } |f_j(t)| > p \\ 0, & \text{if } |f_j(t)| \leq p \end{cases},$$

где $f_i(t)$ – соответствующая ЭМ, p – порог, рассчитанный на основе измерения уровня помех в соответствующей ЭМ.

Результаты подавления тремора мышц предложенным алгоритмом приведены на рис. 1 (вверху ЭКС с помехой, внизу ЭКС после процедуры помехоподавления).

Ветвь 2. Подавление низкочастотных помех (дрейфа изолинии и артефактов движения). Исследуемый ЭКС подвергается процедуре ДЭМ, глобальный тренд удаляется, несколько самых низкочастотных ЭМ фильтруются с помощью ФВЧ (фильтр Баттерворта 2 порядка, частота среза 0,2 Гц) для подавления НЧС-составляющих этих мод. На рис. 2 приведены результаты устранения артефактов движения предложенным алгоритмом (вверху ЭКС с помехой, внизу ЭКС после процедуры помехоподавления).

Для исследования качества помехоподавления предложенным алгоритмом в эталонные ЭКС были добавлены реальные помехи различных видов. Для количественной оценки качества помехоподавления была использована среднеквадратическая ошибка отклонения (percent root-mean-square difference, PRD) восстановленного сигнала y_i от эталонного ЭКС x_i

$$PRD = \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2}} \right) \times 100\%.$$

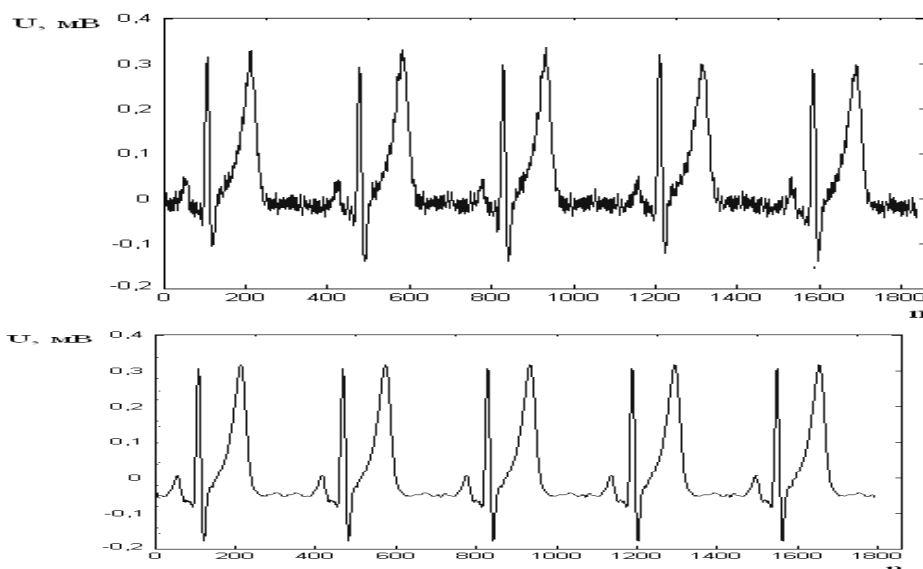


Рис. 1. Результаты подавления тремора мышцы

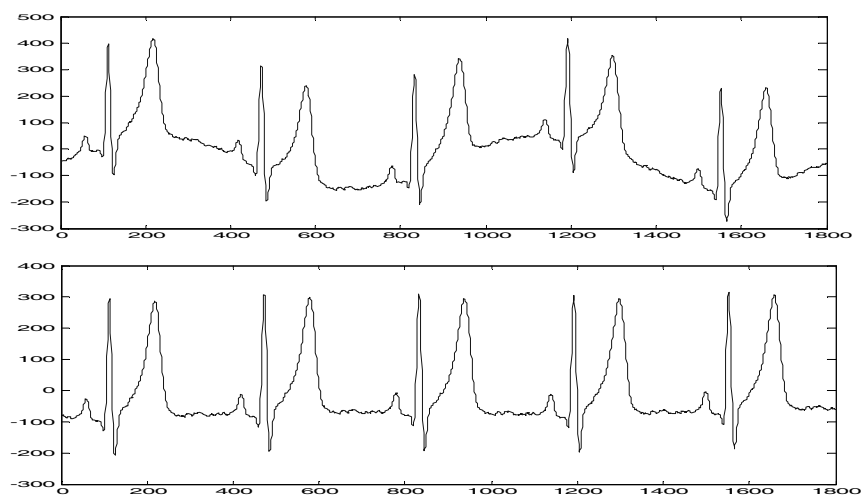


Рис. 2. Результаты устранения артефактов движения

Проведенные исследования показали, что значения среднеквадратической ошибки (PRD) для большинства реальных помех не превышают 2,5-3 % и лишь для некоторых комбинированных помех достигают 4-5 % (результаты получены без учета краевых участков сигнала, на которых искажения больше).

Алгоритм реализован в системе MATLAB, расчеты PRD выполнены в Microsoft Excel. Несмотря на то, что результаты получены лишь для нескольких

участков ЭКС, длительность около 4 с, (частота дискретизации сигнала – 500 отсчетов в с, количество разрядов квантования – 12), перспективность применения ЕМД для подавления помех в ЭКС не вызывает сомнений.

В настоящее время предложенный алгоритм тестируется с использованием базы электрокардиографических данных Массачусетского технологического института (MIT/BIH), которая является признанным стандартом для тестирования программных и аппаратных средств автоматизированного анализа ЭКС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Чирейкин Л.В., Шурыгин Д.Я., Лабутин В.К.* Автоматический анализ электрокардиограмм. – Л.: Наука, 1977.
2. *Huang N.E., Shen Z., Long S.R.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // Proc. R. Soc. Lond. A. – 1998. – Vol. 454. – P. 903-995.
3. *Ватанабе С.* Разложение Карунена–Лоэва и факторный анализ. Теория и приложения. Автоматический анализ сложных изображений / Под. ред. Э.М. Браверманна. – М.: Мир, 1969.
4. Патент США №20080269628 A1. Denoising and artifact rejection for cardiac signal in a senses system. *Detlef W., Honghuan Z., Bryon P.* 30.10.2008.
5. *Blanco-Velasco M., Weng B., Barner K.E.* A New ECG Enhancement Algorithm for Stress ECG Tests. Computers in Cardiology. – 2006. – № 33. – P. 917–920.
6. *Na Pan, Vai Mang, Mai Peng Un, Pun Sio hang.* Accurate Removal of Baseline Wander in ECG Using Empirical Mode Decomposition. Proceedings of NFSI & ICFBI 2007, Hangzhou, China, October 12-14, 2007.
7. *Zhao Z. D., Chen Y. Q.* A New Method for Removal of Baseline Wander and Power Line Interference in ECG Signals. in Proc.15th Conf. Machine Learning and Cybernetics, China, Aug 13-16. – 2006. –P. 4342-4347.

Кривоногов Леонид Юрьевич

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пензенский государственный университет».

E-mail: leonidkrivonogov@yandex.ru.

440033, г. Пенза, ул. Клары Цеткин, 39-53.

Тел.: 88412572053.

Тычков Александр Юрьевич

E-mail: tychkov-a@mail.ru.

440000, г. Пенза, ул. Кирова, 30-37.

Тел.: 89374274617.

Krivonogov Leonid Yurievich

Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Penza State University”.

E-mail: leonidkrivonogov@yandex.ru

39-53, K.Tzetkin street, Penza, 440033, Russia.

Phone: +78412572053.

Tychkov Alexander Yurievich

E-mail: tychkov-a@mail.ru.

30-37, Kirova street, Penza, 440000, Russia.

Phone: +79374274617.