

УДК 53.088.7, 612.172.4

Л.Ю. Кривоногов**МЕТОД И АЛГОРИТМЫ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОЙ ОБРАБОТКИ
ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭМПИРИЧЕСКОЙ
МОДОВОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ**

Рассмотрены вопросы обработки электрокардиосигналов (ЭКС) на основе эмпирической модовой декомпозиции. Для повышения эффективности помехоустойчивой обработки ЭКС предложено формировать оценку помехи в отсутствие полезного сигнала, а также объединить адаптивный и непараметрический подходы к преодолению априорной неопределенности. В рамках такого объединения разработан метод помехоустойчивой обработки ЭКС, основанный на применении адаптивного разложения сигнала на узкополосные частотные составляющие и их непараметрическом анализе. Предложен алгоритм усеченный эмпирической модовой декомпозиции, позволяющий реализовать фильтрацию ЭКС в реальном времени. Для анализа эмпирических мод и обнаружения информативных участков ЭКС предложено использовать ранговый обнаружитель. Определение уровня помех на неинформативных участках эмпирических мод позволяет повысить точность расчета порогового значения. В качестве пороговой функции выбрана Nonnegative Garrote. Представленный метод и алгоритмы обработки ЭКС реализованы в виде виртуального прибора в среде графического программирования LabVIEW.

Электрокардиосигнал; эмпирическая модовая декомпозиция; нелинейная пороговая обработка; информативный участок.

L.Yu. Krivonogov**METHOD AND ALGORITHMS FOR ACCURATE ECG SIGNAL
PROCESSING BASED ON EMPIRICAL MODE DECOMPOSITION**

The problems of digital processing ECG signals based on empirical modes decomposition are considered. It is proposed to form the interference estimate in the absence of the valid signal for improving the efficiency accurate of ECG signals processing and to combine the adaptive and non-parametric approaches to overcoming a priori uncertainty. Within such combining the method of accurate processing based on the application of adaptive signal decomposition into narrow-band frequency components and their non-parametric analysis is developed. An algorithm truncated empirical mode decomposition, which allows filtering ECG signals to real-time, is offered. It is proposed to use a rank detector for analysis of the empirical modes and detection informative intervals of ECG signals. Determining of the interference level on uninformative intervals empirical modes allows improving the accuracy of the threshold value calculation. Nonnegative Garrote is selected as a threshold function. The presented method and algorithms of digital processing ECG signals realized in the form of a virtual instrument in the environment of graphic programming of LabVIEW.

ECG signal; denoising; empirical mode decomposition; thresholding; informative interval.

По данным Всемирной организации здравоохранения сердечно-сосудистые заболевания являются основной причиной смерти населения во многих экономически развитых странах, составляя более 30 % всех случаев смерти в мире. Только в России от сердечно-сосудистых заболеваний ежегодно умирает более шестисот тысяч человек.

Наиболее распространенным методом диагностики сердечно-сосудистой системы является электрокардиография, имеющая более чем вековую историю и продолжающая активно развиваться и совершенствоваться. Для раннего выявления, своевременной профилактики, прогнозирования и эффективного лечения заболеваний сердца с начала 1960-х гг. в электрокардиографию начинают активно внедряться методы автоматического анализа электрокардиосигналов (ЭКС).

Несмотря на очевидные успехи автоматизации электрокардиографических исследований, компьютерный анализ ЭКС еще далек от совершенства, и по некоторым оценкам в коммерческих системах автоматического анализа ЭКС от 5 до 20 % заключений полностью или частично не совпадают с врачебными. В тоже время, современная электрокардиография невозможна без применения компьютерных технологий и единственной возможностью массового внедрения новейших достижений мировой кардиологии в медицинскую практику является тиражирование программного обеспечения от ведущих мировых производителей для компьютерных анализаторов ЭКС. Выбор практикующего врача-кардиолога в пользу конкретной компьютерной диагностической системы может обеспечить лишь высокая достоверность результатов автоматического анализа ЭКС.

ЭКС в общем случае представляют собой нестационарные сложноструктурированные сигналы с циклически повторяющимися информативными участками, в виде разнополярных импульсов. Именно по признакам, сосредоточенным на локальных информативных участках ЭКС в электрокардиографии оценивается состояние сердца. Форма и параметры информативных участков ЭКС разнообразны, изменчивы и не всегда предсказуемы. Нередко единственная реализация сигнала является уникальной и неповторимой. Кроме того, в канале регистрации ЭКС неизбежно присутствуют помехи различного вида и происхождения, которые проявляются особенно сильно в условиях длительной регистрации и двигательной активности пациентов.

Неизбежное влияние помех на электрокардиосигналы приводит к их искажению и, соответственно, к искажению диагностических признаков, поэтому при разработке систем автоматического анализа ЭКС необходимо предусматривать разработку способов и средств устранения помех. Без принятия специальных мер по борьбе с помехами анализ ЭКС теряет всякий смысл.

Особое значение в борьбе с помехами имеют этапы регистрации и предварительной обработки, на которых закладываются основы качественного автоматического анализа ЭКС. При этом, основной причиной ошибок и неточностей автоматической диагностики в электрокардиографии являются погрешности измерения амплитудно-временных параметров сигналов и ошибки обнаружения отдельных элементов ЭКС и их границ. В свою очередь, погрешности измерений и ошибки обнаружения напрямую связаны с наличием помех в регистрируемом сигнале и искажений, полученных в результате недостаточно качественной регистрации и предварительной обработки (в том числе, и за счет процедур помехоподавления).

В настоящее время ключевыми задачами обработки ЭКС является подавление помех и обнаружение информативных участков.

Если в результате подавления помех происходят искажения формы информативных участков ЭКС, то это может привести к ошибочным или неточным диагностическим заключениям. В этой связи, особую актуальность приобретает разработка алгоритмов подавления помех в ЭКС, обеспечивающих сохранение формы полезного сигнала. Эффективность таких процедур будет определяться минимальным искажением полезного сигнала при максимальном подавлении помех.

Задача предварительной обработки ЭКС в первую очередь связана с выделением полезного сигнала на фоне помех. Формально такая задача трактуется следующим образом: сигнал $x(t) = F[ecs(t), n(t)]$ регистрируется в дискретные моменты времени $t = t_1, \dots, t_n$, необходимо отделить (восстановить) полезный сигнал $ecs(t)$ от искажающей его помехи $n(t)$. Подобная задача имеет решение только в случае, когда функция F априорно известна, либо имеются обоснованные предпо-

ложения о ее виде. Довольно часто предполагается аддитивное взаимодействие полезного сигнала и помехи, т.е. $x(t) = ecs(t) + n(t)$. Но даже в этой ситуации отделение полезного сигнала от помехи возможно, если имеются различия в их характеристиках (частотных, амплитудных, фазовых, вероятностных и др.).

В условиях реального электрокардиографического исследования модель полезного сигнала обычно неизвестна, т.е. для обработки ЭКС не подходят методы, основанные на поиске сходства с опорным (модельным) сигналом. В этой ситуации целесообразно проводить обработку ЭКС таким образом, чтобы получить информацию о свойствах помехи, а затем использовать эту информацию (модель помехи) для создания процедур, обеспечивающих максимально возможное подавление помехи при минимальных искажениях полезного сигнала.

Большинство существующих процедур подавления помех синтезируются на основе критерия минимума среднеквадратического отклонения. Очевидно, что полученные процедуры не обеспечивают сохранение формы полезного сигнала на локальных участках и поэтому малоприспособлены для обработки ЭКС. В связи с этим в основу построения эффективных методов и алгоритмов подавления помех в ЭКС должен быть положен другой критерий оптимальности. Например, минимум среднеквадратического или абсолютного отклонения сигнала на локальных информативных участках.

Для обработки ЭКС малоприспособлены классические методы (в частности разложение по различным системам базисных функций), поскольку полученные при разложении коэффициенты малочувствительны к изменениям сигнала на информативных участках. Поэтому внимание привлекают альтернативные подходы к синтезу методов и алгоритмов автоматического анализа ЭКС.

Ошибки и неточности автоматической диагностики имеют целый ряд причин, одной из которых является искажение полезного сигнала помехами или процедурами первичной обработки. Если в результате подавления помех происходят искажения формы информативных участков ЭКС, то это может привести к ошибочным или неточным диагностическим заключениям. В этой связи, актуальна разработка способов и алгоритмов фильтрации ЭКС, обеспечивающих значительное подавление помех при минимальном искажении формы полезного сигнала [1].

Автоматический анализ ЭКС представляет собой серьезную теоретическую проблему, причинами которой является априорная неопределенность сигнально-помеховой обстановки; сложная структура ЭКС; нестационарность, негауссовость и пересечение спектров полезного сигнала и помех; необходимость сохранения формы полезного сигнала. Серьезность проблемы подавления помех в ЭКС требует разработки специальной стратегии. Проведем анализ перспективных направлений повышения эффективности помехоустойчивой обработки электрокардосигналов.

В условиях реального электрокардиографического исследования модель полезного сигнала обычно неизвестна, т.е. для обработки ЭКС не подходят методы, основанные на поиске сходства с опорным (модельным) сигналом. В этой ситуации целесообразно проводить обработку ЭКС таким образом, чтобы получить информацию о свойствах помехи, а затем использовать эту информацию (оценку или модель помехи) для создания процедур, обеспечивающих максимально возможное подавление помехи при минимальных искажениях полезного сигнала. Структура ЭКС в большинстве случаев позволяет разделить сигнал на информативные и неинформативные временные участки даже при наличии интенсивных помех. Выделение неинформативного участка ЭКС, на котором присутствует только помеха, позволяет сформировать оценку помехи и использовать эту оценку для повышения эффективности помехоподавления. Основой выделения различных временных

участков служат алгоритмы сегментации ЭКС (обнаружители или детекторы R зубцов, QRS комплексов, кардиоциклов и другие). Таким образом, первое направление повышения эффективности помехоустойчивой обработки электрокардиосигналов заключается в **формировании оценки помехи в отсутствие полезного сигнала**.

Принципиальной особенностью обработки ЭКС является априорная неопределенность сигнально-помеховой обстановки. Решение задачи преодоления априорной неопределенности идет в двух направлениях:

- ◆ адаптивном, заключающемся в подстройке структуры и параметров системы при изменении условий ее функционирования;
- ◆ непараметрическом, которое сводится к обеспечению нечувствительности (инвариантности) системы к изменению свойств сигналов и помех.

Адаптация применяется, когда неизвестна небольшая совокупность параметров сигналов и помех. Если же число неизвестных параметров велико, то адаптация неэффективна и тогда применяются непараметрические методы, основанные на непараметрической проверке гипотез.

Для повышения эффективности помехоустойчивой обработки ЭКС предложено **объединить адаптивный и непараметрический подходы к преодолению априорной неопределенности** (второе направление). Такое объединение заключается в использовании адаптивных и непараметрических процедур на различных этапах обработки ЭКС.

Анализировать ЭКС с его сложной структурой и наличием помех непосредственно достаточно сложно, так как составляющие его компоненты, взаимодействуя друг с другом, маскируют и искажают интересующие исследователя закономерности. В такой ситуации целесообразно разделить исследуемый сложный сигнал на отдельные частотные составляющие и анализировать каждую по отдельности. Анализ компонент и вклада каждой из них в исследуемый сигнал позволяет выявлять скрытые закономерности, в том числе и выделить полезный сигнал на фоне помех.

Методы разложения сигналов на узкополосные составляющие по локально сосредоточенным базисам в последние годы нашли широкое применение. При этом полагают, что при правильно подобранном базисе узкополосная помеха может занять всю частотную составляющую и тогда ее можно будет исключить. Если же помеха широкополосная, то она проявляется сразу в нескольких субполосах и устраняется с помощью специальной пороговой обработки. Исходя из вышесказанного, в качестве третьего направления повышения эффективности помехоустойчивой обработки примем **применение адаптивного разложения ЭКС по локально сосредоточенным базисам**.

В результате анализа были выбраны и обоснованы три направления повышения эффективности помехоустойчивой обработки ЭКС:

- ◆ формирование оценки помехи в отсутствие полезного сигнала;
- ◆ адаптивное разложения ЭКС по локально сосредоточенным базисам;
- ◆ объединение адаптивного и непараметрического подходов к преодолению априорной неопределенности.

В рамках объединения всех трех направлений был разработан метод помехоустойчивой обработки ЭКС, основанный на применении адаптивного разложения сигнала на узкополосные частотные составляющие и их непараметрическом анализе.

На первом этапе разработки метода необходимо выбрать конкретный алгоритм разложения ЭКС по локально сосредоточенным базисам. Для адаптивной обработки сигналов наибольший практический интерес представляют точки экстремумов, разрывов, перегибов, нарушения монотонности, отвечающие реальным

изменениям сигнала во времени. Именно такие точки (локальные экстремумы) используются для формирования адаптивного базиса эмпирической модовой декомпозиции (ЭМД) [2, 3]. Эмпирическая модовая декомпозиция (Empirical Mode Decomposition) была предложена как составная часть преобразования Гильберта-Хуанга (Hilbert–Huang Transform), которое выполняется в два этапа. Сначала при помощи алгоритма ЭМД находят эмпирические моды (ЭМ), затем на втором этапе при помощи преобразования Гильберта на их основе определяется мгновенный спектр входного сигнала. Таким образом, входной сигнал представляется в виде трехмерной поверхности в координатах амплитуда-время-частота.

Основным преимуществом ЭМД является 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. Кроме адаптивности, разложение обладает и другими важными для практических приложений свойствами [3]:

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

Эмпирические моды это монокомпонентные составляющие сигнала, которые вместо постоянной амплитуды и частоты, как в простой гармонике, имеют меняющуюся во времени амплитуду и частоту. ЭМ не имеют строгого аналитического описания, но удовлетворяют условиям, гарантирующим их определенную симметрию и узкополосность. Кроме того, в работах [4–6] показана эффективность применения ЭМД для подавления помех в ЭКС.

В основе классического алгоритма ЭМД [2, 3] лежит построение гладких огибающих по максимумам и минимумам сигнала, нахождение среднего этих огибающих и его дальнейшее вычитание из входного сигнала. Огибающие строятся с помощью кубической сплайн-интерполяции. В результате перечисленных действий находится первое приближение к первой эмпирической моде. Для полноценного выделения ЭМ необходимо вновь найти максимумы и минимумы у найденной оценки ЭМ, и повторить все ранее описанные действия. Этот итерационный процесс, называемый отсеиванием (sifting), продолжается до тех пор, пока не будет достигнут заданный критерий его останова. В результате процесса отсеивания получаются первая эмпирическая мода. Далее, для того чтобы найти следующую ЭМ, необходимо из исходного сигнала вычесть уже найденную ЭМ и снова повторить описанные действия. Так продолжается до тех пор, пока не будут найдены все ЭМ. Поиск очередной ЭМ прекращается тогда, когда в остатке будет не более двух экстремумов.

Одной из проблем, ограничивающей применение классического алгоритма ЭМД [2, 3] для обработки ЭКС, является значительная вычислительная сложность за счет итерационной процедуры отсеивания, что не позволяет использовать этот алгоритм в системах реального времени.

Для повышения быстродействия алгоритма разложения сигнала на частотные составляющие в работе [7] предложено исключить из алгоритма ЭМД процедуру отсеивания. При этом первые приближения к соответствующим ЭМ будут считаться частотными компонентами входного сигнала. И хотя, частотные составляющие, полученные в результате такой усеченной ЭМД, не полностью удовлетворяют свойствам эмпирических мод, сформулированным в [2, 3], для подавления помех в ЭКС это не имеет особого значения, так как задача получения спектра

Гильберта и соответственно построения 3D поверхности перед нами не стоит. А вот то, что базис является законченным и сходящимся (сумма всех частотных составляющих и остатка соответствует исходному сигналу) не вызывает сомнений. Проведенные исследования показали, что абсолютная ошибка декомпозиции-реконструкции сигнала не превышает тысячной доли единицы младшего разряда. И, что самое главное, базис остается адаптивным, так как получен непосредственно из анализируемых данных эмпирическим методом.

При выполнении декомпозиции в соответствие с классическим алгоритмом ЭМД для качественного отсеивания эмпирических мод выполняется не менее 6–8 итераций. При декомпозиции участка реального ЭКС в 2500–3000 отсчетов получается 10–12 ЭМ. Таким образом, при выполнении декомпозиции получаем 60–96 итераций. При декомпозиции по усеченному алгоритму ЭМД количество итераций будет соответствовать количеству полученных ЭМ, т.е. 10–12.

Если для устранения высокочастотных (ВЧ) помех использовать разложение на три частотных составляющих и остаток, то количество операций сократится примерно в 18–24 раза. Таким образом, усеченный алгоритм ЭМД позволяет значительно уменьшить вычислительные затраты при реализации разложения и реализовать фильтрацию ЭКС в реальном времени. Проведенные исследования показали, что эффективность подавления помех в большей степени зависит от типа пороговой функции и уровня порога, чем от качества отсеивания ЭМ. Следовательно, применение усеченного алгоритма ЭМД для подавления помех в ЭКС вполне оправдано.

Базовый алгоритм подавления ВЧ помех на основе ЭМД предусматривает декомпозицию сигнала на ЭМ, анализ ЭМ, нелинейную пороговую обработку (НПО) некоторых из них и последующую реконструкцию сигнала.

Анализ и пороговая обработка ЭМ определяют эффективность помехоподавления и включает решение следующих задач (первые две задачи – задачи анализа, третья – НПО):

- ◆ определение «глубины шума» – выбор количества ЭМ, к которым необходимо применить НПО (при этом решается еще одна подзадача – содержит ли первая самая высокочастотная ЭМ полезную составляющую ЭКС или только шум);
- ◆ определение порогового значения p ;
- ◆ выбор типа пороговой функции и способа ее применения.

«Глубина» шума определяется исходя из следующих соображений. Общее количество ЭМ на которое раскладывается участок сигнала длительностью в N отсчетов приблизительно оценивается как

$$M = (\log_2 N) \pm 1.$$

Двоичный логарифм в формуле соответствует бинарной структуре алгоритма эмпирической модовой декомпозиции. Высокочастотные помехи после декомпозиции сосредотачиваются в первых нескольких ЭМ, их количество назовем «глубиной шума», которая приблизительно равна $DN=M/4$ и обычно не превышает 5. Например, участок ЭКС в 2500 отсчетов (5 секунд при частоте дискретизации 500 отсчетов в секунду) раскладывается на 10–12 ЭМ в зависимости от сложности сигнала, вида и интенсивности помех. При этом все ВЧ помехи сосредотачиваются в первых трех ЭМ, поэтому НПО целесообразно применять именно к трем первым (наиболее высокочастотным ЭМ).

Распределения отсчетов в конкретных ЭМ, как правило, не являются гауссовыми (нормальными), что обосновывает применение непараметрических методов для анализа ЭМ. Методы непараметрической статистики целесообразно применять в случаях, когда заданы самые общие отличия между ситуациями наличия и отсут-

ствия сигнала. Непараметрические алгоритмы обнаружения сигналов обеспечивают инвариантность к изменению распределения входных данных. При этом, инвариантные свойства непараметрических процедур достигаются за счет некоторого нелинейного преобразования S массива выборочных значений X , которое сокращает избыточность входной информации. В результате этого преобразования образуется новый массив $Z=SX$, распределение элементов которого при отсутствии сигнала точно известно при любом распределении помехи. При появлении сигнала инвариантность распределения массива Z нарушается, что и является критерием обнаружения сигнала. Такими инвариантными свойствами обладает процедура ранжирования входных отсчетов, которая получается при замене элементов входного массива их рангами, т.е. порядковыми номерами в вариационном ряду. Применение ранговых алгоритмов для обнаружения информативных участков ЭКС подробно рассмотрено в работе [8]. Для анализа ЭМ ЭКС эти алгоритмы имеют еще большую эффективность чем для ЭКС за счет симметричности ЭМ относительно нуля.

Применение ранговых процедур для анализа ЭМ позволяет обнаружить информативные участки и, следовательно, выявить:

- ◆ ЭМ, содержащие лишь помеховую составляющую (их необходимо исключить из реконструкции ЭКС);
- ◆ ЭМ, содержащие помеховую и полезную составляющие (к ним необходимо применить НПО);
- ◆ участки эмпирических мод, содержащие лишь помеху (формирование оценки помехи в отсутствие полезного сигнала на этих участках позволяет с высокой точностью определить пороговое значение p).

Разработанный алгоритм анализа ЭМ достаточно прост в реализации и содержит следующие этапы.

1. Определение уровня помех в ЭМ с помощью робастной оценки масштаба – Median Absolute Deviation (MAD), которое описывается следующим выражением:

$$MAD = b \times med_i |x_i - med_j x_j|,$$

где b – константа, зависящая от распределения выборки. Применение робастной оценки масштаба (робастного аналога среднеквадратичного отклонения) позволяет в определенной мере оценить уровень помех в выборке и не учитывать аномальные выбросы, соответствующие информативным участкам ЭКС.

2. Ранговое обнаружение информативных участков в исследуемой ЭМ с порогом, зависящим от робастной оценки масштаба. В качестве рангового обнаружителя целесообразно применить алгоритм бинарного квантования дискретных разностей [8]. Эмпирические моды, в которых не обнаруживаются информативные участки, содержат лишь помеховую составляющую и из реконструкции исключаются. ЭМ, в которых обнаруживаются информативные участки с определенной частотой, подлежат НПО и дальнейшей реконструкции.
3. Решение об обнаружении информативных участков ЭКС (QRS комплексов) принимается на основе обнаружения информативных участков в нескольких ЭМ.
4. Все участки ЭМ, кроме обнаруженных информативных, считаются неинформативными. Именно на них формируется (уточняется) оценка помехи.
5. По уточненной оценке помех для каждой ЭМ рассчитывается пороговое значение – p .

НПО ЭМ представляет собой специальную нелинейную процедуру дискриминации отсчетов на пороговом уровне в соответствии с определенными правилами

$$Thr(f_n(t)) = \psi(p_n),$$

где f_n – эмпирическая мода n -ого уровня разложения, ψ – некоторая нелинейная пороговая функция, p_n – пороговое значение, t – дискретное время,

Проведенные исследования показали, что широко распространенные пороговые функции Hard Thresholding и Soft Thresholding [4, 6] имеют ряд недостатков, приводящих к значительным искажениям ЭКС. Hard Thresholding сохраняя отсчеты ЭМ, превышающих некоторое заданное значение порога, сохраняет также помех, присутствующих в них. Кроме того, в результирующем сигнале возникают паразитные гармоники за счет обращенных в ноль отсчетов. Функция Soft Thresholding имеет тенденцию достаточно большого искажения ЭКС из-за уменьшения отсчетов, соответствующих QRS комплексам.

Для устранения недостатков Hard Thresholding и Soft Thresholding за последние годы был предложен целый ряд других пороговых функций (гиперболическая функция Видаковича, устойчивая функция Брюса и Гао, функция Nonnegative Garrote Бреймана, функция на основе гиперболического тангенса Пурначандры и Кумаравеля и т.д.). Некоторые из них позволяют уменьшить искажения ЭКС при помехоподавлении с применением ЭМД. Наибольший интерес для подавления помех в ЭКС представляет функция Nonnegative Garrote:

$$GThr(f_n(t)) = \begin{cases} f_n(t) - \frac{p_n^2}{f_n(t)}, & \text{if } |f_n(t)| > p_n; \\ 0, & \text{if } |f_n(t)| \leq p_n, \end{cases}$$

предложенная Брейманом в 1995 г. Проведенные исследования показали, что применение этой функции (при подобранном пороге) позволяет на 1–2 % уменьшить среднеквадратичную ошибку и примерно на 5 % снизить максимальную абсолютную ошибку реконструкции ЭКС на информативных участках.

Что касается способа применения пороговой функции, то проведенные исследования показали:

- ◆ для каждой ЭМ значения порогов определяются индивидуально в соответствии с уровнем помех в ней (для реальных помех интенсивность в разных ЭМ будет различной);
- ◆ значения порогов должны корректироваться на каждом кардиоцикле или на каждом обрабатываемом участке ЭКС из-за нестационарного поведения помехи.

Предложенный метод и разработанные алгоритмы позволяют уменьшить искажения ЭКС при подавлении высокочастотных помех. Это достигается применением для пороговой обработки функции Nonnegative Garrote и более точным определением уровня помех в ЭМ, которое используется для расчета порогового значения. Полученные пороговые значения достаточно близки к оптимальным и отличаются от них не более чем на 5 %.

Кроме того, практически без дополнительных затрат и с высокой достоверностью решается еще одна задача обработки ЭКС – обнаружение информативных участков.

Использование усеченного алгоритма ЭМД позволяет значительно повысить скорость обработки ЭКС, при этом появляется возможность проводить подавление помех в ЭКС в реальном времени.

Структура, иллюстрирующая метод помехоустойчивой обработки ЭКС представлена на рис. 1. Узлы анализа ЭМ обеспечивают формирование оценки помехи и расчет пороговых значений для соответствующих ЭМ. Узлы НПО реализуют нелинейную пороговую обработку. Узел реконструкции обеспечивает восстановление ЭКС.

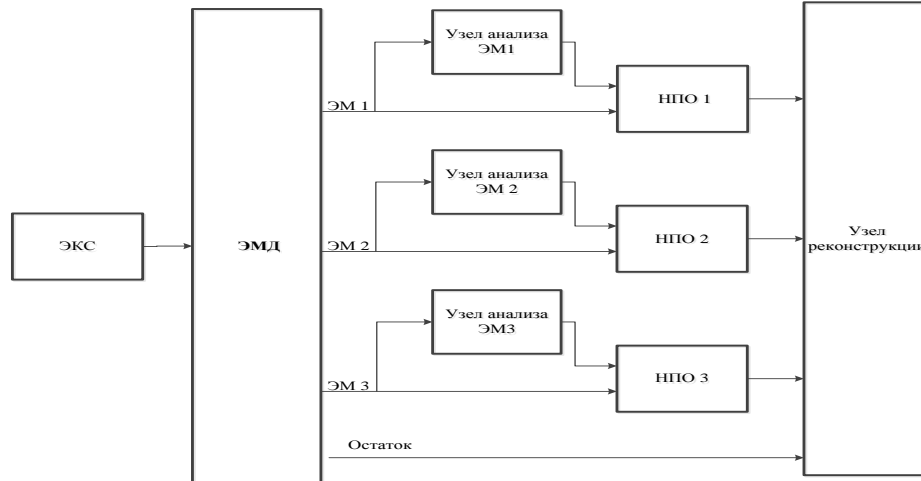


Рис. 1. Структура, иллюстрирующая метод помехоустойчивой обработки ЭКС

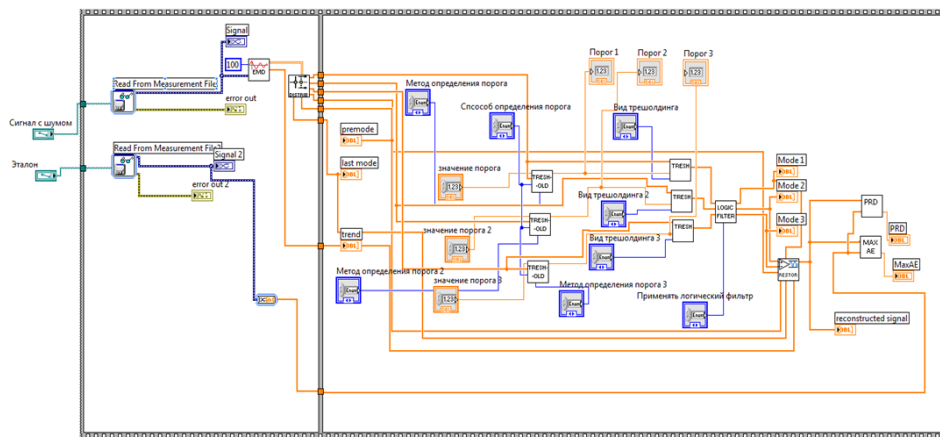


Рис. 2. Блок-диаграмма разработанного виртуального прибора LabVIEW

Предложенный метод и алгоритмы обработки ЭКС на основе ЭМД и рангового обнаружителя были реализованы в виде виртуального прибора в системе графического программирования LabVIEW (рис. 2). Разработанный виртуальный прибор позволяет выбирать различные функции НПО и алгоритмы расчета пороговых значений, а также рассчитывать ошибки реконструкции на информативных участках. Это позволяет провести оптимизацию алгоритмов

В настоящее время разработанный виртуальный прибор проходит тестирование на эталонных ЭКС и помехах, а также сигналах базы электрокардиографических данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дроздов Д.В. Влияние фильтрации на диагностические свойства биосигналов // Функциональная диагностика. – 2011. – № 3. – С. 75-78.
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. Huang N.E., Shen S.S.P. The Hilbert-Huang Transform and Its Applications // World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore 596224. – 2005. – 526 p.
4. Кривоногов Л.Ю., Тычков А.Ю. Подавление помех в электрокардиосигналах на основе разложения по эмпирическим модам // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 8 (109). – С. 127-132.
5. Тычков А.Ю., Чураков П.П., Кривоногов Л.Ю. Автоматизированная система обработки и анализа электрокардиосигналов в условиях интенсивных помех различного вида // Известия высших учебных заведений Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 117-125.
6. Кривоногов Л.Ю. Анализ и обработка эмпирических мод с целью подавления помех в электрокардиосигналах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 9 (134). – С. 119-125.
7. Кривоногов Л.Ю., Егоров М.С. Подавление высокочастотных помех в электрокардиосигналах на основе усеченной эмпирической модовой декомпозиции // Материалы IV Межрег. научн. конф. «Актуальные проблемы медицинской науки и образования»: электронное научн. издание. – 2013. – С. 485-491.
8. Акимов П.С., Бакут П.А., Богданович В.А. и др. Теория обнаружения сигналов / Под ред. П.А. Бакута. – М.: Радио и связь, 1984. – 440 с.
9. Кривоногов Л.Ю. Методы и алгоритмы помехоустойчивой обработки электрокардиографической информации: Дис. ... канд. техн. наук. – Пенза, 2003.

REFERENCES

1. Drozdov D.V. Vliyaniye fil'tratsii na diagnosticheskie svoystva biosignalov [The filtration effect on the diagnostic properties of bio-measurement], Funktsional'naya diagnostika [Functional Diagnostics], 2011, No. 3, pp. 75-78.
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, pp. 903-995.
3. Huang N.E., Shen S.S.P. The Hilbert-Huang Transform and Its Applications, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore 596224, 2005, 526 p.
4. Krivonogov L.Yu., Tychkov A.Yu. Podavleniye pomekh v elektrokardiosignalakh na osnove razlozheniya po empiricheskim modam [The suppression electrocardiograph on the basis of decomposition in an empirical fashion], Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 8 (109), pp. 127-132.
5. Tychkov A.Yu., Churakov P.P., Krivonogov L.Yu. Avtomatizirovannaya sistema obrabotki i analiza elektrokardiosignalov v usloviyakh intensivnykh pomekh razlichnogo vida [Automated processing and analysis of electrocardiogram under heavy interference of various types], Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki [News of higher educational institutions of the Volga region. Technical science], 2011, No. 1 (17), pp. 117-125.
6. Krivonogov L.Yu. Analiz i obrabotka empiricheskikh mod s tsel'yu podavleniya pomekh v elektrokardiosignalakh [Analysis and processing of empirical fashion to suppress interference in electrocardiograph], Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 9 (134), pp. 119-125.

7. *Krivosnogov L.Yu., Egorov M.S. Podavlenie vysokochastotnykh pomekh v elektrokardio-signalakh na osnove usechennoy empiricheskoy modovoy dekompozitsii* [The suppression of high-frequency interference in electrocardiograph based on truncated empirical mode decomposition], *Materialy IV Mezhhreg. nauchn. konf. «Aktual'nye problemy meditsinskoj nauki i obrazovaniya»: elektronnoe nauchn. izdanie* [Materials of the IV all-Russian scientific conference "Actual problems of medical science and education: electronic scientific edition], 2013, pp. 485-491.
8. *Akimov P.S., Bakut P.A., Bogdanovich V.A. i dr. Teoriya obnaruzheniya signalov* [The theory of detection signals]. Moscow: Radio i svyaz', 1984, 440 p.
9. *Krivosnogov L.Yu. Metody i algoritmy pomekhoustoychivoy obrabotki elektrokardiograficheskoy informatsii: Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Methods and algorithms for error-correcting processing electrocardiographic information: cand. of eng. sc. diss]. Penza, 2003.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Т.В. Истомина.

Кривоногов Леонид Юрьевич – Пензенский государственный университет; e-mail: leonidkrivosnogov@yandex.ru; 440067, г. Пенза, ул. Клары Цеткин, 39-53; тел.: 89063960585; к.т.н.; доцент.

Krivosnogov Leonid Yurievich – Penza State University; e-mail: leonidkrivosnogov@yandex.ru; 39-53, Klara Tzetkin street, Penza, 440067, Russia; phone: +79063960585; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 615.47:617-089

А.В. Лучинин, И.Б. Старченко, А.А. Резниченко

АНАЛИЗ И ВЫЯВЛЕНИЕ МЕДЛЕННО-ВОЛНОВЫХ КОМПОНЕНТ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАММЫ И ПОСТРОЕНИЕ ФУНКЦИИ РЕГРЕССИИ

Предложен новый метод прогноза биоритмологических характеристик человека, основанный на выделении противофазных компонент спектра сигналов и построении функции регрессии отдельно для каждой из них. Выявлено, что ритмозадающие компоненты спектра модулируются медленно-волновыми компонентами по типу амплитудной модуляции с подавленной несущей. Приведены оценки точности аппроксимации с помощью «прямой» регрессии высокочастотных противофазных компонент и с помощью регрессии огибающей высокочастотного сигнала с последующим восстановлением несущей. Для реализации метода используются стандартные методы цифровой обработки сигналов (спектральный анализ, цифровая фильтрация, метод «синхронного детектирования»). Основные результаты получены на примере выделения медленно-волновой (околоминутной) компоненты фотоплетизмограммы, но может быть применен и для других электрофизиологических сигналов (ЭЭГ, ЭКГ, ЭМГ и др.). Получена возможность реконструкции сигнала на большой интервал времени, что позволяет спрогнозировать фон, относительно которого можно оценить эффективность того или иного физиотерапевтического воздействия.

Фотоплетизмограмма; медленно-волновые компоненты; регрессия.

A.V. Luchinin, I.B. Starchenko, A.A. Reznichenko

ANALYSIS AND IDENTIFICATION SLOW AND WAVE COMPONENT PHOTOPLETHYSMOGRAM AND CREATION OF FUNCTION OF REGRESSION

The new method of the forecast the biorhythmological characteristics of the person is introduced, based on allocation antiphase component of signals range and structure regression function separately for each of them. It is revealed that set rhythm components of a range are modulated by slow-wave components by amplitude modulation type with suppressed carrier. Accuracy