

Адаптивный метод коррекции дрейфа изолинии электрокардиосигнала с использованием кратномасштабных вейвлет-преобразований

Аннотация

Представлен сравнительный анализ различных подходов к коррекции дрейфа изолинии электрокардиосигнала (ЭКС). Предлагается новый адаптивный метод коррекции дрейфа изолинии на основе формирования опорного сигнала адаптивного фильтра с использованием кратномасштабных вейвлет-преобразований ЭКС. Эффективность различных методов коррекции дрейфа изолинии была исследована при обработке модельных ЭКС в условиях присутствия искажений различной интенсивности. Проведена оценка точности определения смещения ST-сегмента реальных ЭКС при использовании различных методов коррекции дрейфа изолинии.

Введение

Применение методов обработки электрокардиографического сигнала (ЭКС) является золотым стандартом современной кардиологической диагностики по выявлению патологий проводящей системы сердца, нарушений сердечного ритма и прогностическому обнаружению развития сердечно-сосудистых заболеваний [1], [2]. Регистрация ЭКС при помощи поверхностно расположенных на теле человека электродов сопровождается наличием помех и шумов различной интенсивности и природы возникновения.

Помехи, обусловленные дыханием человека и смещением электродов при произвольных движениях, приводят к искажению формы ЭКС, возникновению дрейфа изолинии и увеличению погрешностей измерения параметров ST-сегмента. С точки зрения спектральных характеристик, под дрейфом изолинии ЭКС понимают квазипериодический сигнал, основная полоса частот которого располагается ниже средней частоты сердечных сокращений, при этом большинство исследователей в своих работах в качестве основной полосы частот дрейфа изолинии указывают диапазон значений от 0 до 0,6...0,8 Гц [3], [4]. Стохастическая природа возникновения дрейфа изолинии обуславливает необходимость создания новых нетривиальных методов цифровой обработки ЭКС.

В настоящее время на практике для коррекции дрейфа изолинии используются методы аппроксимации, которые не предъявляют высоких требований к вычислительным ресурсам, но тем не менее имеют принципиальные ограничения на частотный диапазон выделяемого сигнала помехи [3]. С увеличением основной частоты дрейфа изолинии, ухудшается точность его выделения из ЭКС, а при достижении частотой дрейфа величины, равной половине средней частоты сердечных сокращений, являющейся фактической частотой дискретизации дрейфа изолинии, восстановление становится невозможным в силу невыполнения условий теоремы Найквиста-Котельникова. С учетом того, что частота сердечного ритма человека может в некоторых случаях достигать величины 0,5 Гц (30 уд/мин), а в среднем равна 1 Гц (60 уд/мин), реальная частота сигнала помехи, при которой возможно устранение дрейфа изолинии аппроксимативными методами, не превышает 0,3...0,4 Гц.

Указанных недостатков лишены способы коррекции дрейфа изолинии, основанные на линейной частотной фильтрации ЭКС посредством фильтров верхних или нижних частот. В первом случае происходит непосредственное подавление низкочастотной аддитивной помехи, а во втором случае дрейф выделяется фильтром и далее вычитается из исходного зашумленного ЭКС. Однако из-за неизбежного перекрытия частотных спектров ЭКС и дрейфа изолинии в обоих случаях неизбежны потери информационной части спектра, а также возникновение фазовых искажений при частотной фильтрации ЭКС.

Адаптивная фильтрация дрейфа изолинии ЭКС в настоящее время не находит широкого применения в силу объективных сложностей регистрации опорного сигнала адаптивного

фильтра, коррелированного с сигналом помехи, что является необходимым условием применимости метода адаптивного подавления шумов [2]. Рассматриваемая работа посвящена разработке адаптивной методики коррекции дрейфа изолинии ЭКС, отличающейся тем, что опорный сигнал адаптивного фильтра будет формироваться на основе кратномасштабного вейвлет-преобразования ЭКС.

Материалы и методы

Для формирования опорного сигнала адаптивного фильтра будем использовать декомпозицию зашумленного ЭКС на основе кратномасштабных вейвлет-преобразований, представляющих собой разложение (или декомпозицию) исходного сигнала на последовательность аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов [5]. Проведенные исследования показали, что последовательность аппроксимирующих коэффициентов, полученных на верхних уровнях вейвлет-декомпозиции, имеет частотный спектр, схожий со спектром дрейфа изолинии ЭКС.

На рис. 1 представлена блок-схема обработки ЭКС предлагаемым адаптивным фильтром для подавления дрейфа изолинии, где 1 – основной вход фильтра, содержащий исходный зашумленный ЭКС; 2 – блок вейвлет-разложения исходного ЭКС; 3 – последовательность аппроксимирующих коэффициентов вейвлет-разложения; 4 – последовательность детализирующих коэффициентов вейвлет-разложения; 5 – КИХ-фильтр с адаптивным набором коэффициентов; 6 – выход фильтра, содержащий ЭКС после коррекции присутствующего дрейфа изолинии.

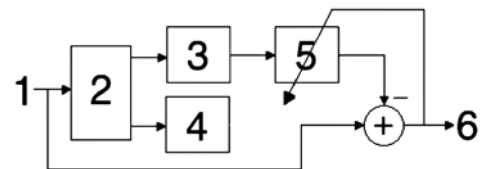


Рис. 1. Блок-схема обработки ЭКС для адаптивной коррекции дрейфа изолинии (пояснения – в тексте статьи)

Одним из возможных путей исследования эффективности методов коррекции дрейфа изолинии ЭКС является математическое моделирование процессов фильтрации биосигнала. Модель ЭКС с присутствующим дрейфом изолинии принимается аддитивной. Для получения модельных зависимостей использовалась имитационная модель, позволяющая сформировать фрагменты ЭКС с требуемой морфологией и заданными значениями амплитудно-временных параметров биосигнала, предложенная Р.Е. McSharгу с соавторами [6].

Математическая модель дрейфа изолинии ЭКС может быть представлена в виде суммы детерминированных и случайных компонент:

$$W(k) = W_{\max} \cdot \left[\sum_{i=1}^4 \sin \left(2\pi f_i \frac{k}{f_s} \right) + \psi(k) \right],$$

где W_{\max} – амплитуда модельного сигнала дрейфа изолинии; $\psi(k)$ – случайная компонента, полученная фильтрацией белого гауссовского шума низкочастотным фильтром с частотой среза 1 Гц; f_s – частота дискретизации; f_i – массив частот аддитивного набора гармонических сигналов, представляющих собой детерминированную компоненту. При моделировании дрейфа изолинии ЭКС были использованы следующие значения частот: $f_s = 200$ Гц; $f_1 = 0,1$ Гц; $f_2 = 0,2$ Гц; $f_3 = 0,4$ Гц; $f_4 = 0,8$ Гц.

Для количественной оценки эффективности коррекции дрейфа изолинии ЭКС был предложен коэффициент искажения δ ЭКС после выполнения процедур цифровой фильтрации:

$$\delta = 100 \% \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M [Y_f(i) - Y(i)]^2}{\sum_{i=1}^M Y^2(i)}}$$

где i – номер отсчета сигнала; M – количество отсчетов в рассматриваемых фрагментах сигнала; $Y_f(i)$ – отсчет ЭКС после этапов фильтрации; $Y(i)$ – отсчет модельного ЭКС, свободное от проявления дрейфа изолинии.

Для выбора оптимального подхода к устранению дрейфа изолинии ЭКС использовался критерий минимизации коэффициента искажения сигнала в диапазоне изменения отношения сигнал/помеха, определяемого следующим образом:

$$SNR = 10 \lg \frac{P_{\max}}{N_{\max}}$$

где SNR – коэффициент, характеризующий соотношение спектральных мощностей сигнала и помехи, дБ; N_{\max} – спектральная мощность модельного сигнала дрейфа изолинии; P_{\max} – спектральная мощность модельного ЭКС.

Приведенные ниже результаты были получены в компьютерной системе инженерных вычислений «MATLAB R2013a» с использованием стандартных функций вейвлет-анализа сигналов средствами «Wavelet Toolbox».

Результаты

Анализ эффективности коррекции дрейфа изолинии ЭКС проводился для следующих методов обработки: аппроксимативный метод (АМ); фильтрация нижних частот (ФНЧ) с последующим вычитанием сформированной оценки дрейфа изолинии из исходного ЭКС; адаптивная коррекция с формированием опорного сигнала адаптивного фильтра на основе кратномасштабного вейвлет-преобразования исходного ЭКС (АФВП).

Эффективность применения аппроксимативного метода определялась используемым методом интерполяции и величи-

ной ошибок обнаружения опорных точек ЭКС (узлов аппроксимации). Для детектирования опорных точек аппроксимации использовался помехоустойчивый метод обнаружения QRS-комплексов ЭКС на основе полосовой фильтрации, преобразования Гилберта и адаптивного порога, характеризующийся малыми ошибками обнаружения [7], [8].

Проведенные в данной работе исследования показали, что наибольшая эффективность коррекции дрейфа изолинии достигается при использовании кубической сплайн-интерполяции: среднее значение коэффициента искажения ЭКС в рассматриваемом диапазоне изменения отношения сигнал/помеха от 0 до 20 дБ составило 8,1 %; при линейной интерполяции – 9,6 %; при интерполяции квадратичным полиномом – 8,9 %.

Корректное устранение дрейфа изолинии ЭКС на основе применения низкочастотной цифровой фильтрации будет зависеть от частоты среза и типа используемого фильтра. Результаты проведенных исследований показали, что наибольшая эффективность обработки по критерию минимизации коэффициента искажения ЭКС достигается при использовании нерекурсивных низкочастотных фильтров с линейной фазовой характеристикой, при частоте среза фильтра, равной 0,7 Гц.

Эффективность формирования опорного сигнала на основе применения кратномасштабных вейвлет-преобразований зависит от вида материнской вейвлет-функции и уровня декомпозиции. Наилучшие результаты вейвлет-обработки ЭКС достигаются при использовании вейвлетов Добеши – семейства ортогональных вейвлетов, вычисляемых итерационным путем [5].

Для оценки эффективности выделения дрейфа изолинии был выбран коэффициент корреляции R между модельным сигналом помехи $W(k)$ и последовательностью аппроксимирующих или детализирующих коэффициентов кратномасштабного вейвлет-преобразования аддитивной комбинации ЭКС и модельного дрейфа изолинии.

На рис. 2 представлены зависимости изменения коэффициента корреляции R от уровня декомпозиции S при использовании различных видов вейвлет-функций (на рисунке: 1, 2, 3 – коэффициенты корреляции для аппроксимирующих коэффициентов при использовании функции Добеши 2-го, 4-го, 6-го порядка соответственно; 4, 5, 6 – коэффициент корреляции для детализирующих коэффициентов при использовании функции Добеши 2-го, 4-го, 6-го порядка соответственно).

Анализ полученных данных показал, что оптимальной оценкой присутствующего дрейфа изолинии ЭКС для частоты дискретизации 200 Гц является последовательность аппроксимирующих коэффициентов 6-го уровня декомпозиции, полученных при помощи вейвлетов Добеши 6-го порядка. В случае использования других значений частоты дискретизации ЭКС необходимо будет произвести предварительную процедуру интерполяции или децимации исходного сигнала.

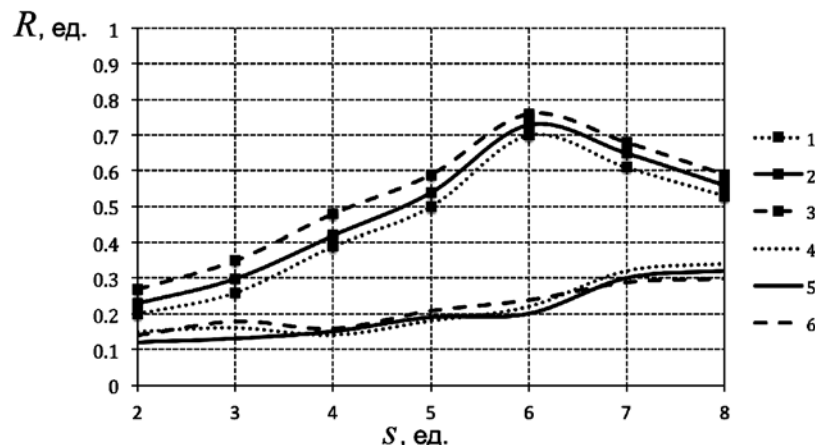


Рис. 2. Зависимости изменения коэффициента корреляции R от уровня декомпозиции S при использовании вейвлетов Добеши различного порядка (пояснения – в тексте статьи)

Качество адаптивной фильтрации дрейфа изолинии ЭКС будет зависеть от используемого алгоритма определения коэффициентов адаптивного фильтра, обеспечивающего максимизацию отношения сигнал/шум на выходе [2]. Проведенные в работе исследования показали, что наименьшие искажения ЭКС обеспечивает программная реализация рекурсивного метода наименьших квадратов на основе решения уравнения Винера-Хопфа; при этом оптимальное качество обработки достигается при следующих значениях параметров алгоритма: коэффициент забывания – 0,96; порядок фильтра – 12.

Результаты сравнительного анализа эффективности применения рассмотренных методов коррекции дрейфа изолинии для модельного ЭКС представлены на рис. 3, где 1 – ФНЧ; 2 – АМ; 3 – АФВП.

Разработанный адаптивный метод коррекции дрейфа изолинии ЭКС обеспечивает наименьшие искажения при обработке модельных ЭКС в широком диапазоне изменения отношения сигнал/помеха. Использование аппроксимативного метода коррекции дрейфа позволяет обеспечить меньшие искажения ЭКС по сравнению с подходом на основе низкочастотной фильтрации.

На рис. 4 представлены эпюры обработки модельного ЭКС, искаженного сильным дрейфом изолинии. Представленные иллюстрации демонстрируют высокое качество обработки модельного ЭКС: в выходном сигнале адаптивного фильтра дрейф изолинии почти незаметен.

При обработке реальных ЭКС, искаженных присутствующим дрейфом изолинии, наиболее важной характеристикой

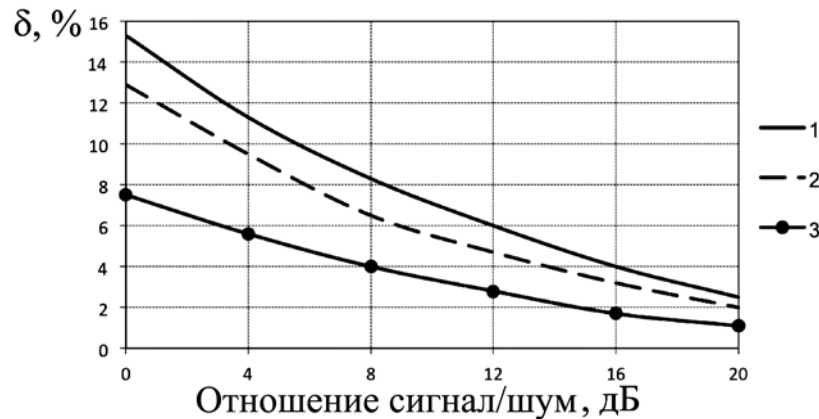


Рис. 3. Зависимости изменения коэффициента искажения ЭКС от изменения отношения сигнал/помеха для различных методов коррекции дрейфа изолинии (пояснения – в тексте статьи)

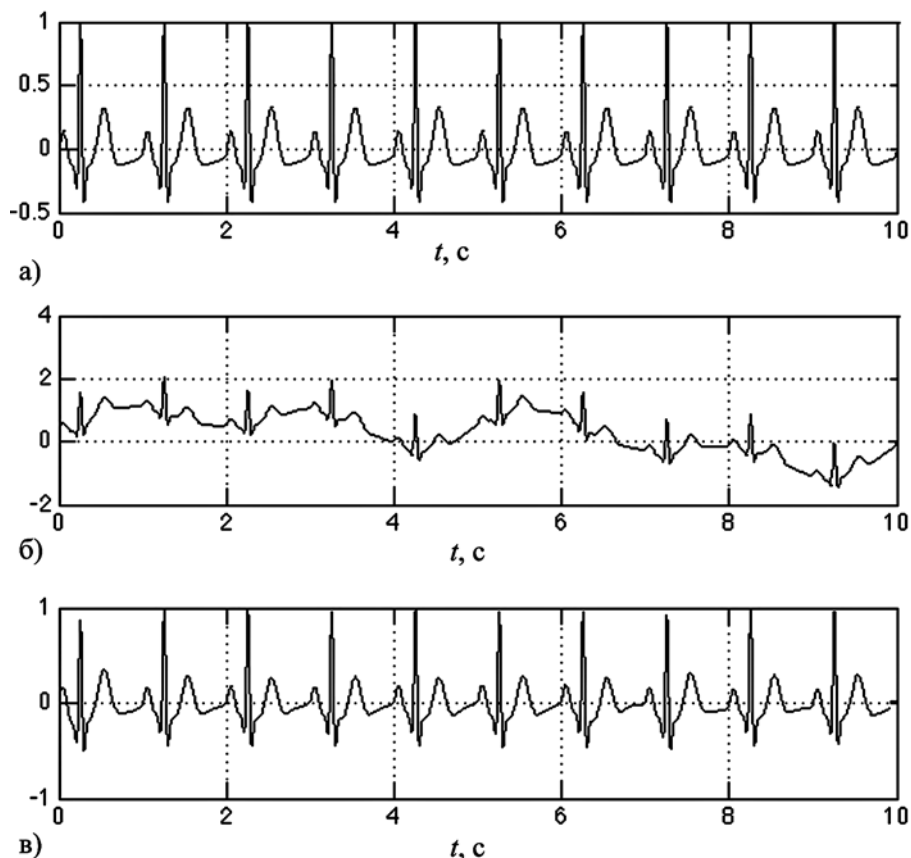


Рис. 4. Исходный модельный ЭКС (а); модельный ЭКС с присутствующим дрейфом изолинии (б); ЭКС после обработки адаптивным фильтром (в)

применяемого метода обработки является обеспечение минимальных искажений ST-сегмента, точное определение параметров которого является ключевым моментом в задачах диагностики сердечных ишемий и инфаркта миокарда [9].

Для сравнительного анализа возникающих ошибок при определении уровня смещения ST-сегмента с использованием рассмотренных методов коррекции дрейфа изолинии при обработке клинических записей ЭКС использовалась выборка сигналов «European ST-T Database» из общедоступной базы данных «Physionet» Массачусетского технологического университета (<http://physionet.org>).

В табл. 1 приведены результаты количественной оценки уровня максимального смещения ST-сегмента (абсолютная величина смещения – более 100 мкВ) после применения рассматриваемых методов коррекции дрейфа изолинии в клинических записях ЭКС; в скобках для каждой записи сигнала указана максимальная величина смещения ST-сегмента в микровольтах, определенная на основе ручного экспертного анализа исходных зарегистрированных ЭКС; положительное значение смещения соответствует элевации ST-сегмента, а отрицательное значение – депрессии.

Таблица 1

Результаты оценки уровня максимального смещения ST-сегмента ЭКС

Фрагмент записи сигнала	АМ	ФНЧ	АФВП
e0103 (+150)	+140	+120	+150
e0105 (-150)	-120	-90	-145
e0106 (-100)	-80	-70	-95
e0107 (+300)	+260	+240	+310
e0108 (-200)	-170	-160	-190
e0110 (-600)	-560	-510	-600
e0112 (-400)	-340	-350	-390
e0113 (-250)	-200	-190	-240
e0114 (-100)	-60	-50	-90
e0118 (+350)	+300	+250	+330
e0119 (+200)	+160	+160	+190
e0103 (+150)	+140	+120	+150

Анализ полученных данных показал, что разработанный адаптивный метод коррекции дрейфа изолинии ЭКС обеспечивает наименьшие ошибки измерения амплитудных характеристик ST-сегмента при обработке реальных ЭКС. Среди классических подходов наименьшие отклонения в определении уровня смещения ST-сегмента достигаются при использовании аппроксимативного метода.

Заключение

В результате проведенных исследований был разработан метод коррекции дрейфа изолинии ЭКС, основанный на применении адаптивной фильтрации с формированием опорного сигнала на основе кратномасштабных вейвлет-преобразований. Предлагаемый подход характеризуется высокой эффективностью коррекции дрейфа изолинии различной интенсивности,

малыми искажениями ЭКС. Проведенные сравнительные исследования показали убедительное преимущество использования адаптивного подхода к коррекции дрейфа изолинии по сравнению с традиционными аппроксимативными и частотными методами.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что использование адаптивной фильтрации с формированием опорного сигнала на основе кратномасштабных вейвлет-преобразований является эффективным методом коррекции дрейфа изолинии ЭКС, обеспечивает малые искажения ST-сегмента ЭКС, обладает наибольшей устойчивостью к изменению интенсивности присутствующего дрейфа изолинии.

Список литературы:

1. *Калакутский Л.И., Манелис Э.С.* Аппаратура и методы клинического мониторинга. – М.: Высшая школа, 2004. 156 с.
2. *Рангайян Р.М.* Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход / Пер. с англ. Под ред. А.П. Немирко. – М.: Физматлит, 2007. 440 с.
3. *Dev R.* Different Techniques to Remove Baseline Wander from ECG Signal: A Review // International Journal of Electrical, Electronics and Communication Engineering. 2012. Vol. 2 (7). PP. 532-537.
4. *Friesen G.M. et al.* A comparison of the noise sensitivity of nine QRS detection algorithms // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 1990. Vol. 27 (1). PP. 85-98.
5. *Strang G., Nguyen T.* Wavelets and Filters Banks. – Wellesley-Cambridge-Press, 1996. 490 p.
6. *McSharry P.E. et al.* A dynamical model for generating synthetic electrocardiogram signals // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2003. Vol. 50 (3). PP. 289-295.
7. *Benitez D. et al.* The use of the Hilbert transform in ECG signal analysis // Computers in Biology and Medicine. 2001. Vol. 31. PP. 399-406.
8. *Федотов А.А., Акулова А.С.* QRS-детектор сигнала электрокардиограмм для систем длительного мониторинга состояния пациента // Радиотехника и электроника. 2017. Т. 62. № 4. С. 392-398.
9. *Okin P.M. et al.* Computerized ST Depression Analysis Improves Prediction of All-Cause and Cardiovascular Mortality: The Strong Heart Study // Annals of Noninvasive Electrocardiology. 2001. Vol. 6 (2). PP. 107-116.

*Александр Александрович Федотов,
канд. техн. наук, доцент,
кафедра лазерных и биотехнических систем,
Самарский национальный исследовательский
университет им. акад. С.П. Королева,
г. Самара,
e-mail: fedoaleks@yandex.ru*

* * * * *