

НИВЕЛИРОВАНИЕ СЕТЕВОЙ ЧАСТОТЫ ИЗ ЭКГ-СИГНАЛА МЕТОДОМ КОМБИНИРОВАННОЙ ДВУНАПРАВЛЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ УЗКОПОЛОСНЫМ РЕЖЕКТОРНЫМ ФИЛЬТРОМ

© 2015 г. Е.В. Зайцев

Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Тюменской области, Ханты-Мансийском автономном округе – Югра, Ямало-Ненецком автономном округе, 625027, Тюмень, ул. Минская, 88

E-mail: zayg21@gmail.com

Поступила в редакцию 16.05.15 г.

Целью настоящей работы было выявление отрицательных эффектов устранения сетевой частоты из электрокардиографического сигнала узкополосным рекурсивным режекторным фильтром и поиск метода фильтрации, не имеющего выявленных недостатков. Описан метод фильтрации сигнала узкополосным рекурсивным фильтром, основным выявленным недостатком которого являлось наличие переходного процесса (переходного шума) в виде реакции на единичные импульсы, которыми на электрокардиографическом сигнале являются R-зубцы. Выяснено, что эффект переходного шума возникает справа от единичного импульса при прямой фильтрации и слева от единичного импульса при обратной фильтрации. На основе данного эффекта был предложен метод, формирующий конечный сигнал из областей, не содержащих переходный процесс.

Ключевые слова: электрокардиография, бесконечная импульсная характеристика, фильтрация, узкополосный фильтр, режекторный фильтр, сетевая частота, сетевая наводка.

Современные электрокардиографы используют для фильтрации сигнала фильтры с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтры). Неоднократно рассматривались отрицательные эффекты воздействия фильтров на сигнал, например, фильтр высоких частот, применяемый для устранения эффекта дрейфа изолинии электрокардиографического (ЭКГ) сигнала, вносит искажения в форму ST-сегмента, а фильтр низких частот, используемый для снижения уровня шума усилителей, искажает форму QRS-комплекса электрокардиограммы и снижает его амплитуду [1,2]. Но тем не менее достаточно редко описываются эффекты искажения сигнала от применения полосно-заграждающего (режекторного) фильтра сетевой частоты. В данной статье рассмотрен эффект переходного шума, возникающего при нивелировании сетевой наводки, и метод его устранения.

Сокращения: БИХ-фильтр – фильтры с бесконечной импульсной характеристикой, ЭКГ – электрокардиографический, ФЧХ – фазо-частотная характеристика, PSNR – пиковое соотношение сигнала к шуму.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве основного испытательного средства использовали программный комплекс «ECG Filtering Studio», разработанный для исследования влияния фильтров на форму ЭКГ-сигнала и включающий в себя различные методы фильтрации, построения ЭКГ-сигнала и загрузки файлов в WFDB-формате, а также методы генерации шумов ЭКГ-сигнала.

В большинстве случаев для фильтрации сетевой наводки используется узкополосный рекурсивный фильтр, основными преимуществами которого являются простота в построении и минимальная групповая задержка в полосе пропускания. Исходными параметрами являются центральная частота и ширина полосы заграждения BW (BandWidth), которые должны быть заданы относительно частоты дискретизации, т.е. в диапазоне от 0 до 0,5. Затем вычисляется параметр K , и только после этого рассчитываются весовые коэффициенты [3]:

$$\begin{aligned} a_0 = a_2 = K, \quad a_1 = -2K \cos(f\pi), \\ b_1 = a_1, \quad b_2 = 2K - 1, \end{aligned} \quad (1)$$

где

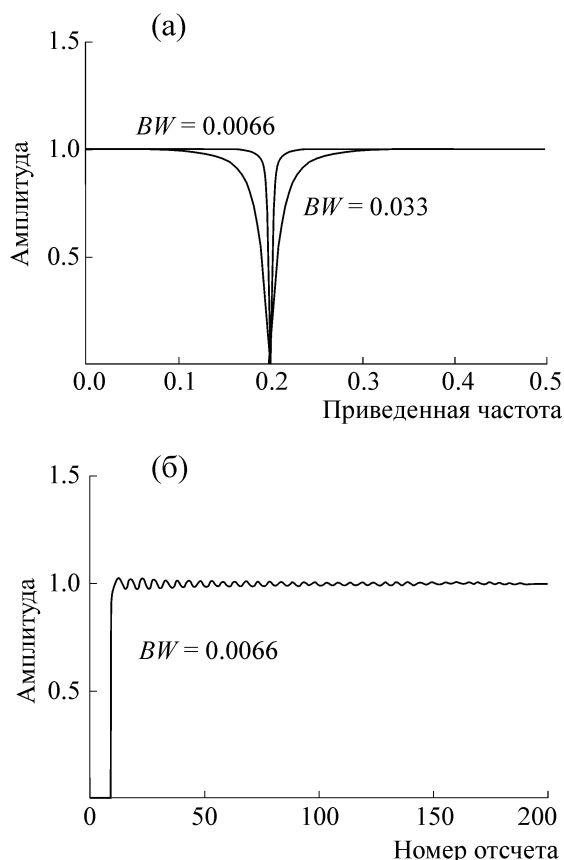


Рис. 1. Амплитудно-частотная (а) и переходная (б) характеристики узкополосного рекурсивного фильтра.

$$K = \frac{1}{1 + \operatorname{tg}(BW\pi/2)}.$$

Для фильтрации сигнала необходимо воспользоваться формулой (2), которая представляет собой уравнение рекурсивного фильтра, где x и y – входной и выходной сигнал соответственно, а a и b – весовые коэффициенты прямой и обратной связей [3]:

$$y[n] = a_0x[n] + a_1x[n-1] + a_1x[n-2] + b_1y[n-1] + b_2y[n-2]. \quad (2)$$

Известно, что любой БИХ-фильтр обладает рядом характеристик, наиболее значимыми из которых являются переходная, амплитудно-частотная и фазо-частотная (ФЧХ) характеристики фильтра. Примеры амплитудно-частотной и переходной характеристик рассматриваемого БИХ-фильтра приведены на рис. 1. Заметно, что переходная характеристика имеет ярко выраженный колебательный процесс, называемый также переходным шумом [3]. Этот эффект напрямую зависит от ширины полосы загражде-

ния фильтра: чем меньше полоса, тем больше длительность переходного шума, но меньше его амплитуда, и наоборот. Переходный шум возникает как реакция на единичный импульс, которым на электрокардиограмме является R-зубец, имеющий значительную амплитуду при небольшом времени нарастания.

В свою очередь, параметр ФЧХ-фильтра характеризует искажения фазы сигнала, при этом существуют три типа фильтров: с нулевой фазой, с линейной ФЧХ и с нелинейной ФЧХ. Фильтр с нулевой фазой имеет симметричную относительно нуля импульсную характеристику, т.е. выходной сигнал не имеет фазового сдвига. Построить БИХ-фильтр с нулевой фазой возможно методом двунаправленной фильтрации. Для этого необходимо произвести фильтрацию по формуле (2), сначала от нулевого отсчета до конца сигнала, а затем в обратном направлении [3]. Если при этом производить прямую и обратную фильтрацию одного и того же сигнала режекторным фильтром, то при прямой фильтрации переходный шум будет справа от единичного импульса, а при обратной – слева. Учитывая тот факт, что узкополосный режекторный фильтр обладает минимальной групповой задержкой в полосе пропускания, можно использовать данный эффект для создания метода фильтрации сетевой наводки с минимальными искажениями сигнала, названного методом комбинированной двунаправленной фильтрации.

Рассмотрим процесс формирования сигнала с минимальным уровнем переходного шума в три этапа. На первом этапе производится прямая фильтрация сигнала, на втором этапе выполняется обратная фильтрация, на последнем этапе мы совмещаем результаты фильтрации по схеме, предложенной на рис. 2. Треугольные импульсы длительностью 20 мс имитируют R-зубцы, результирующий сигнал формируется из областей, не содержащих переходный шум: $f(x) \in [R_n + RR/2; R_{n+1}]$ – для сигнала, подвергнутого прямой фильтрации, и $f(x) \in [R_n; R_{n+1} - RR/2]$ – для сигнала, подвергнутого обратной фильтрации, где RR – интервал между R-зубцами, а R_n – абсцисса n -го R-зубца.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При оценке эффективности данного метода были использованы испытательные сигналы из атласа СТС, описанные в ГОСТ Р МЭК 60601-2-51 и применяемые для аттестации электрокардиографов, в частности, для оценки влияния фильтров на форму сигнала. Методика оценки включала в себя три этапа: наложение сетевого

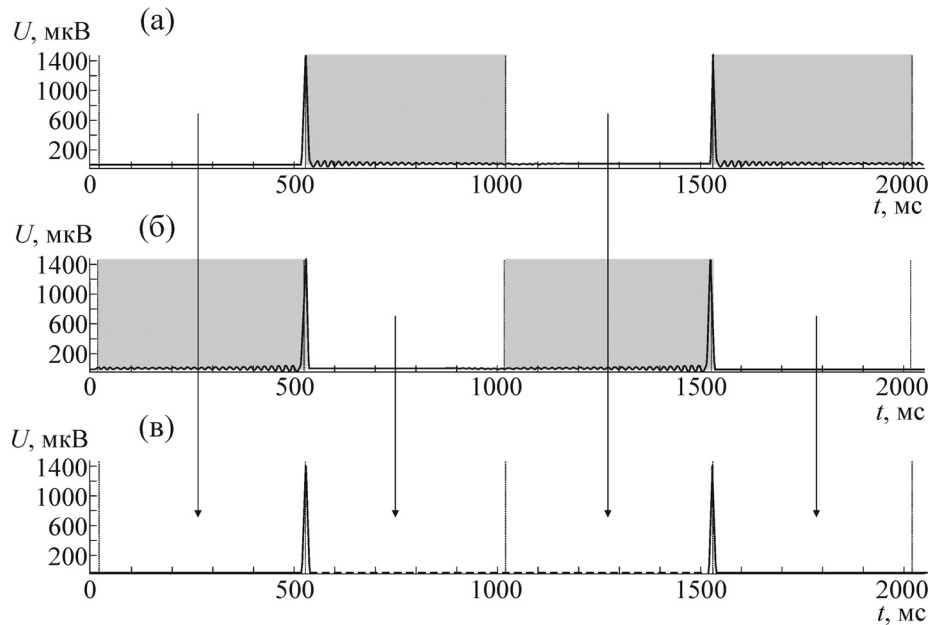


Рис. 2. Схема сетевой наводки на основе метода двунаправленной фильтрации: (а) – прямая фильтрация, (б) – обратная фильтрация, (в) – результирующий сигнал.

шума, фильтрация сигнала и сравнение оригинального сигнала с сигналом после фильтрации с использованием метрики PSNR (peak signal-to-noise ratio, пиковое соотношение сигнала к шуму, которое выражается в децибелах: чем выше значение, тем лучше характеристики фильтра). Сравнение усредненных значений PSNR при различных значениях ширины полосы заграждения приводится на рис. 3. Очевидно, что наилучшие значения PSNR достигаются при использовании метода комбинированной двунаправленной фильтрации при ширине полосы заграждения в 1 Гц.

ОБСУЖДЕНИЕ

Наиболее значимым результатом уменьшения эффекта переходного шума в областях PQ- и ST-сегментов электрокардиограммы является достижение более высокой точности работы алгоритмов автоматического анализа электрокардиограмм за счет уменьшения количества пиков, которые могут быть ошибочно восприняты за Q- или S-зубцы. Данный метод может применяться в электрокардиографах, регистрирующих фактические местоположения R-зубцов на электрокардиограмме, например, в процессе определения частоты сердечных сокращений. Основным недостатком метода комбинированной двунаправленной фильтрации является требование к наличию зарегистрированного сигнала определенной длительности. Фактически

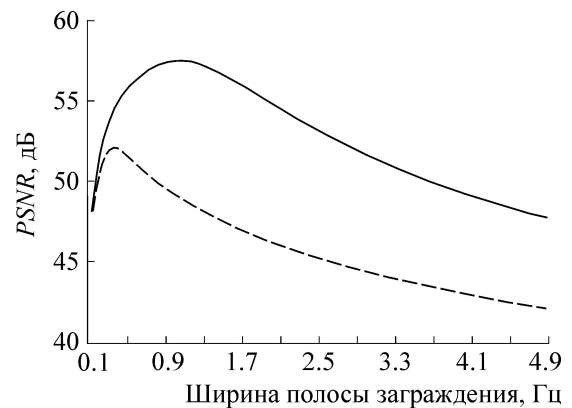


Рис. 3. Зависимости величины PSNR от ширины полосы заграждения при применении однонаправленной (сплошная линия) и комбинированной двунаправленной фильтрации (пунктирная линия).

это означает, что данный метод не может применяться в процессе регистрации ЭКГ-сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе рассмотрения влияния режекторного фильтра на форму ЭКГ-сигнала был выявлен основной недостаток существующего метода фильтрации, заключающийся в наличии переходного шума, и предложен качественно новый подход к элиминации интерференции сетевой частоты, уменьшающий эффект переходного процесса за счет метода комбинированной двунаправленной фильтрации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Е. Е. Моженина, Д. Н. Никонорова и И. С. Антоненко, в сб. *Труды XIX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии»* (Томск, Изд-во Томского политех. ун-та, 2013), т. 1, сс. 399–400.
2. Д. К. Авдеева, М. В. Балахонова, С. В. Демьянов, и др., *Соврем. проблемы науки и образования*, № 3, (2012).
3. С. Смит, *Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников* (М., Додэка-XXI, 2012).

Elimination on Power Line Interference from ECG Signal Using Combined Double-sided Narrow-band Notch Filter

E.V. Zaitsev

Tyumen Regional Center of Standardization, Metrology and Testing, ul. Minskaya 88, Tyumen, 625027 Russia

The aim of current research was to find negative effects caused by eliminating power line interference in ECG signal with narrow-band recursive notch filter and to search for a filtering method that will solve a problem of signal distortion. During the study the method of ECG filtering with narrow-band recursive filter was described. The main negative attribute of this filter is a transient noise, also called «ringing» effect, as the reaction to a single impulse visible as R spikes on the ECG signals. It was discovered, that «ringing» effect appears after the impulse during forward filtering and before the impulse during backward filtering. Based on this effect we proposed a method the main idea of which was to build the finite signal with regions without transients.

Key words: electrocardiography, IIR, filtering, narrow-band filter, notch filter, power-line frequency, power line interference