

РАСЧЕТ КОМБИНАЦИОННЫХ ЧАСТОТ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ ФАЗОВЫМ ФИЛЬТРОМ

Авдеева Д.К., Вылегжанин О.Н., Небаба С.Г., Пеньков П.Г.

ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия (634050, г.Томск, ул.Ленина,д.30) medpribor@introscopy.tpu.ru

Рассмотрены особенности численной реализации фильтра для регистрации биоэлектрических потенциалов, основанного на применении процедуры фазовой модуляции гармоники импульса специальной формы гармониками измеряемого сигнала с шумом. Показано, что для получения максимального значения параметра модуляции необходимо обеспечить попадание значений начальной фазы опорного импульса и импульса с измеряемым сигналом на концы квазилинейного участка зависимости значения этой фазы от соотношения высот ступеней импульса. Приведен алгоритм расчета параметров опорного импульса и коэффициента усиления измеряемого сигнала, обеспечивающий это условие. Предложены методы отбора комбинаторных частот, возникающих при фазовой модуляции с амплитудами выше заданного порога. Проведены модельные расчеты для заданного сигнала со случайным шумом.

Ключевые слова: измерение биоэлектрических потенциалов, фильтрация, фазовая модуляция, расчет комбинационных частот.

CALCULATION OF COMBINATIONAL FREQUENCIES FOR FILTRATION OF BIOELECTRICAL POTENTIALS BY PHASE FILTER”

Avdeeva D.K., Vylegzhanin O.N., Nebaba S.G., Penkov P.G.

National Research Tomsk Polytechnic University, Russia, 634050, Tomsk, Lenina, d.30, medpribor@introscopy.tpu.ru

The features of numerical realization of filter for registration of bioelectrical potentials were considered. Mentioned filter is based on the using of procedure of phase modulation of harmonic of special form impulse by harmonics of measurable signal with noise. It was shown that in order to receive the maximal value of modulation parameter, it is needed to ensure the hit of initial phase values of reference impulse as well as the impulse with measurable signal on the ends of quasy-linear part of relationship between phase value and impulse echelons ratio. The algorithm for calculation of reference impulse's parameters and of multiplication factor for measurable signal implemented this condition was received. The methods for selection of combinational frequencies with amplitudes above preset threshold were suggested. The model calculation for assigned signal with random noise were carry out.

Key words: measurement of bioelectrical potentials, filtration, phase modulation, calculation of combinational frequencies.

При медицинских исследованиях биоэлектрических потенциалов возникает задача выделения изучаемых сигналов из регистрируемой смеси собственного потенциала и шумов электрода и регистрирующей системы. Учитывая случайный характер шумовой компоненты и отсутствие априорной информации о ее характеристиках, выделение информативной составляющей является достаточно сложной задачей. Ранее [1] нами был предложен метод выделения когерентного сигнала на фоне случайной помехи, основанный на применении процедуры фазовой модуляции.

В настоящей работе обсуждаются особенности численной реализации процедуры формирования такого фильтра.

Как было показано в [2], подобный фильтр может быть построен с использованием опорного импульса специального вида, показанного на рис.1.

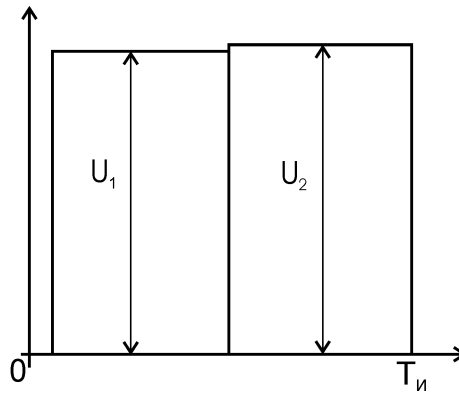


Рис. 1. Форма опорного импульса

Импульс имеет две прямоугольные ступени с амплитудами U_1 и U_2 соответственно, общая длительность ступеней немного меньше длительности интервала наблюдения $T_{И}$.

Как показали результаты анализа, при соотношениях амплитуд ступеней сигнала и отношении длительности интервала измерения к общей длительности ступеней, близких к 1, увеличивается чувствительность фазы к изменению напряжения (амплитуды ступени U_2). При этом зависимость фазы от D (отношение амплитуды второй ступени к амплитуде первой) M (отношение длительности интервала измерения к суммарной длительности ступеней) имеет вид:

$$\varphi(\omega) = \text{arctg} \left[\frac{1-D}{1+D} \text{tg} \left(\frac{\pi}{2M} \right) \right]$$

Если поместить на интервале от $T_{И}/2$ до $T_{И}$ опорного импульса измеряемый сигнал с помехой, то любая его гармоническая составляющая ω_i будет модулировать по амплитуде и фазе гармонику опорного импульса в виде [3,4,5]:

$$U_{i\Sigma}(t) = U_{i\Sigma\text{max}} \sum_{p,r,q,\dots=-\infty}^{\infty} J_p(\beta_1) \cdot J_r(\beta_2) \cdot J_q(\beta_3) \cdot \dots \cdot \sin \left[(\omega_i + p\Omega_{n1} + r\Omega_{n2} + q\Omega_{n3} + \dots)t + \sum_{p,r,q,\dots=-\infty}^{\infty} p\varphi_{n1} + \varphi_0 \right], \quad (1)$$

Где β — глубины модуляции ($\beta_i = \varphi_0 - \varphi_i$, , т.е. разность значений фазы опорного импульса и модулирующей гармоники), Ω частоты, а φ начальные фазы модулирующих гармоник. Из выражения (1) следует, что модулируемое колебание содержит целый набор комбинационных частот, отстоящих от основной частоты выше и ниже на величину

$$\Delta\omega = \sum_{p=-\infty}^{\infty} p\Omega_{np}.$$

Из приведенных рассуждений вытекает следующая схема применения фильтра. Формируется опорный импульс, на нижнюю ступень которого помещается фрагмент

аддитивной суммы измеряемого сигнала и шума. Выполнив преобразование Фурье для этого фрагмента, можно представить его в виде линейной комбинации гармоник разложения Фурье, которые и будут модулировать опорный импульс. Важным параметром, определяющим эффективность описываемого фильтра, является глубина модуляции. Анализ показывает, что максимальная глубина фазовой модуляции может быть равна π (гармоники находятся в противофазе). Но в реальных расчетах рекомендуется обеспечивать попадание фазы опорного импульса и фазы импульса с измеряемым фрагментом сигнала на квазилинейный участок графика зависимости фазы от параметра $\varphi(D)$. Для этого был предложен следующий алгоритм – выбираем значение M , первую ступень опорного импульса принимаем равной 1, а затем вычисляем значение D , которое обеспечивает попадание начальной фазы основной гармоники на нижний конец квазилинейного участка кривой $\varphi(D)$. Для этого вычисляется максимальное значение второй производной $\varphi(D)$ по D , которое соответствует значению $D=0$. Тогда квазилинейный участок кривой $\varphi(D)$ соответствует значениям $D \approx 0.10$ от этого значения. Сформировав таким образом опорный импульс, вычислим среднее значение измеряемого фрагмента сигнала и умножим этот фрагмент на коэффициент $\alpha = 2(1 - D)/\bar{x}$, где \bar{x} - среднее значение фрагмента сигнал плюс шум. Такой выбор размеров опорного импульса и измеряемого фрагмента сигнала обеспечивает значение разности начальных фаз основной гармоники равным около 2,5 – 2,9 радиана.

Из выражения (1) следует, что для k модулирующих частот, имеющих по p порядков функций Бесселя, получится $(2p+1)^k$ комбинационных частот. Таким образом, даже для процессора с тактовой частотой 2 ГГц вычисление амплитуд и частот комбинационных гармоник становится довольно сложной задачей. Хотя в выражении (1) оператор суммирования формально выполняется для индексов от минус бесконечности до плюс бесконечности, поскольку по определению $\beta \leq \pi$, то в реальных вычислениях, значения функции Бесселя с увеличением порядка быстро убывают. Поэтому, учитывая только слагаемые по модулю больше 0.01, для суммирования достаточно пяти членов с порядками -4, -2, 0, 2, 4.

Нами были проведены модельные расчеты распределения амплитуд комбинационных частот.

Исходный опорный импульс имел следующие параметры: количество точек отсчета 64, количество точек отсчета с нулевой амплитудой 1, высота первой ступени 1, $D= 0.8516$. В качестве модельного сигнала использовался полином второго порядка с коэффициентами 1, 1, -1. К этому сигналу добавлялся случайный, нормально

распределенный шум с нулевым математическим ожиданием и дисперсией 0,2. Спектр шума на интервале существования, то есть в течение длительности второго импульса, равной $T_{и}/2$, представлен на графике (рис.2). Полученный в результате импульс представлен на рис. 3.

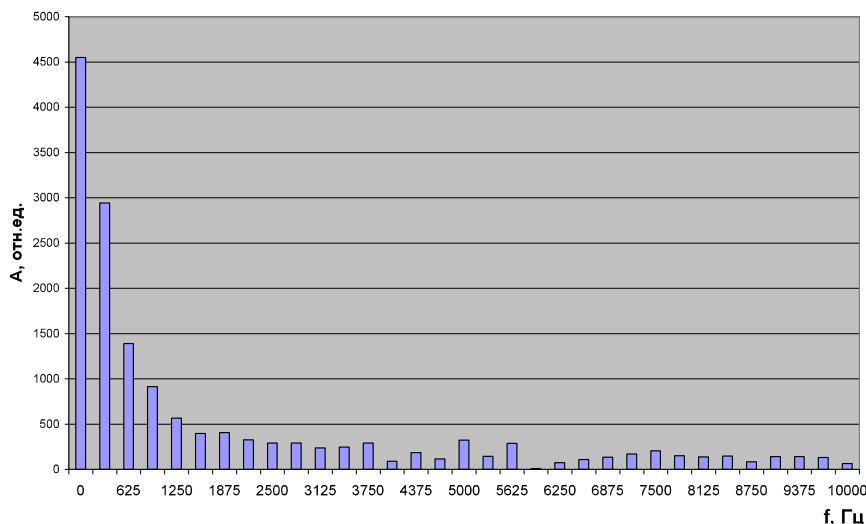


Рис. 2. Спектр зашумленного сигнала

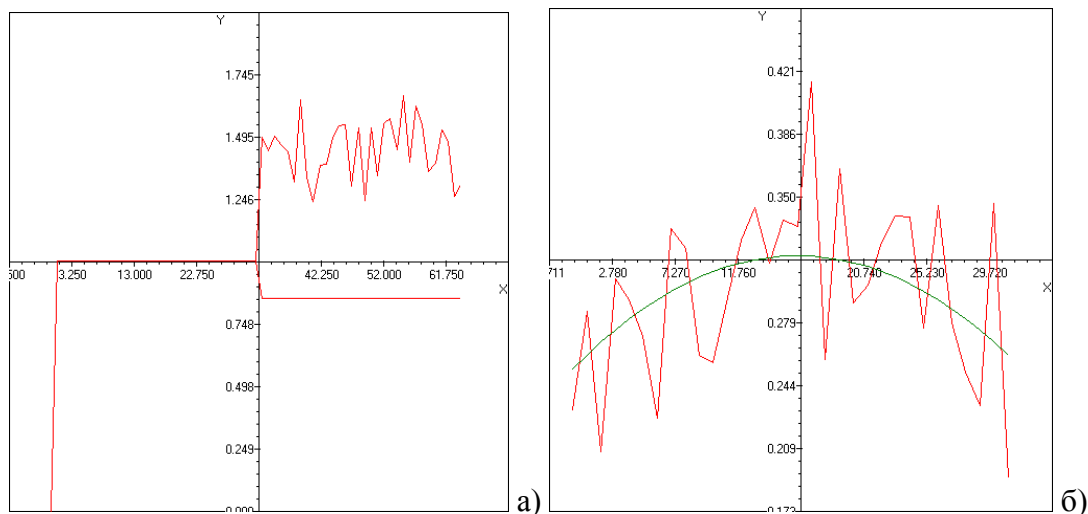


Рис. 3. Графики: а) опорного импульса с добавленным фрагментом сигнала с шумом в четвертом квадранте показана исходная вторая ступень опорного импульса, б) полезного сигнала (серая линия) и добавленного шума (красная линия).

Вычисленная начальная фаза основной гармоники опорного импульса равнялась – 1.22955727604695, а начальная фаза этой же гармоники для опорного импульса с фрагментом сигнала без шума равнялась 1.3131183875097. Таким образом, разность фаз составила -2.54267566355665. При добавлении шума начальная фаза основной гармоники становится равной 1.35917893369518. На рис.4 показан график первой производной с нанесенными точками, соответствующими: слева опорному импульсу, справа – импульсу

с добавленным сигналом. Как видно из рисунка, точки расположены максимально близко к концам квазилинейного участка зависимости фазы от параметра D . Рассчитанные по соотношению (1) комбинационные частоты и амплитуды приведены на рис. 4.

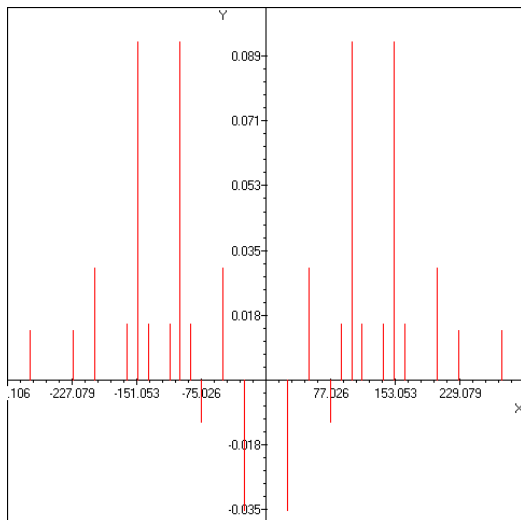


Рис. 4. График комбинационных частот, полученных при фазовой модуляции опорного импульса

Для описанной модели количество комбинационных гармоник оказалось равным шести. В таблице 1 приведены значения фаз и частот модулирующих гармоник, в таблице 2 рассчитанные комбинаторные частоты и амплитуды.

Таблица 1. Значения фаз и частот модулирующих гармоник

Фаза радиан	Частота ω
1.22955727604695	6.28318530717959
2.34750653814966	12.5663706143592
1.5423478107961	25.1327412287183
0.293137066358017	50.2654824574367
2.80177884625832	62.8318530717959
0.27693940127947	75.398223686155

Таблица 2. Рассчитанные комбинационные частоты и амплитуды

Амплитуда усл. ед.	Частота ω .
0.02045246	-124.66
0.02009389	-99.53
0.02045246	-74.40
-0.01007805	-61.83

0.02045246	-49.26
0.02009389	-24.13
-0.01007805	-11.56
-0.01004917	1.0
-0.01007805	13.57
0.020093895	26.13
0.020093895	51.26
-0.01007805	63.83
0.02045246	76.40
0.020093895	101.53
0.02045246	126.66

На рисунке 5 представлен результат применения описанного фильтра к зарегистрированному кардиоимпульсу. Как видно из рисунка, примененная фильтрация позволила заметно улучшить качество записи.

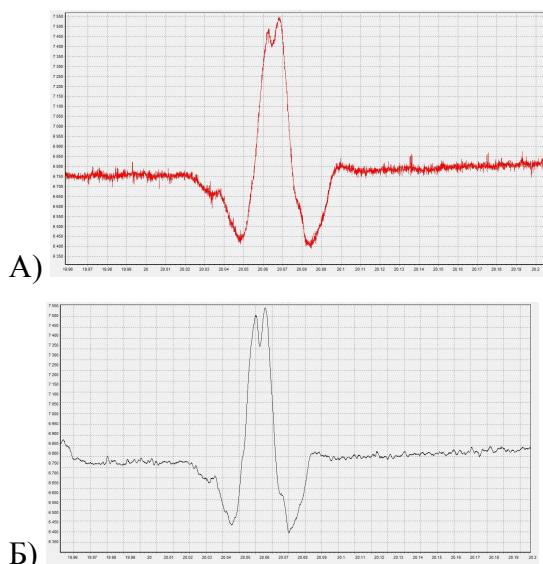


Рис.5. Кардиоимпульс а) зарегистрированный; б) после обработки описанным алгоритмом

Таким образом, полученные результаты модельных расчетов подтверждают правильность предложенного алгоритма расчета параметров опорного импульса и правил отбора комбинационных частот, появляющихся при фазовой модуляции.

Список литературы

1. Авдеева Д.К. Способ измерения сигналов произвольной формы в присутствии случайных шумов // Патент РФ № 2133474.1999. Бюл. № 20.

2. Авдеева Д.К., Вылегжанин О.Н., Рыбалка С.А. Метод выделения полезного сигнала при помехе, случайной по фазе // Успехи современного естествознания. – 2010. – № 1.– С. 132-135.
3. Андре Анго. Математика для электро- и радиоинженеров. – М.: Наука, 1967. – 780 с.
4. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для ВУЗов. – 4-е изд. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
5. Картьяну Г. Частотная модуляция. – Бухарест: Издательство Меридиане, 1964. – 673 с.

Рецензенты:

1. Агафонников В.Ф., д.т.н., профессор кафедры конструирования узлов и деталей РЭС (КУДР) Томского университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), Томск.
2. Светлаков А.А., д.т.н., профессор кафедры электронных средств автоматизации и управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, г. Томск.