

А.Ю. Гольцев, А.А. Котельников, Ю.И. Беляев, М.Г. Котельникова
(ГОУ ВПО Новомосковский институт (филиал) "Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева"; e-mail: teplofon@bk.ru)

ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННАЯ ДЕКОМПОЗИЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫМИ ШАГОВЫМИ ФИЛЬТРАМИ

Аннотация. Предложены знакопеременные шаговые фильтры, с увеличением порядка которых улучшается их добротность и резко снижается сверхрезонансная пульсация. Материалы могут быть полезны при решении проблем безопасности.

Ключевые слова: распознавание, акустические сигналы, фильтрация.

A.J. Goltsev, A.A. Kotelnikov, J.I. Beljaev, M.G. Kotelnikova FREQUENCY-TEMPORARY DECOMPOSITION OF ACOUSTIC SIGNALS BY SIGN-VARIABLE STEP-BY-STEP FILTERS

Abstract. Sign-variable step-by-step filters with which increase in an order their good quality improves are offered and sharply the superresonant pulsation decreases. The materials can be useful at decision of the problems to safety.

Key words: recognition, acoustic signals, filtration.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 16 июля 2010 г.

Идентификация акустических сигналов имеет многочисленные приложения в диагностике устройств, механизмов и систем, работа которых сопровождается распространением звуковых колебаний в окружающую среду (автомобильные двигатели, речь, диагностика патологических процессов при ультразвуковых исследованиях в медицине и т.п.).

В общем случае акустический сигнал является суперпозицией разнотипных составляющих: региональной функции тренда – средних значений по большим интервалам усреднения, циклических компонент с определенным периодом повторения, как правило, достаточно гладких по форме, локальных особенностей (аномалий) разного порядка, вплоть до интервенций – резких изменений в определенные редкие моменты, и флюктуаций значений более высокого порядка (шумов) вокруг всех вышеперечисленных составляющих сигнала.

В этих случаях адекватная декомпозиция акустических сигналов на элементарные составляющие позволит установить причинно-следственные связи, в результате которых сгенерирован наблюдаемый звуковой фон. Методы такой декомпозиции должны обеспечивать требуемое разрешение по времени и по частоте, оценку порядка и реконструкцию сигналов из определенных составляющих (или с исключением определенных составляющих, например шумов или малозначимых деталей).

В данной статье предлагаются знакопеременные шаговые фильтры, активность которых имеет место на локальном временном интервале, центрированном на заданной отметке времени t . Максимальное выделение целевой частоты f однозначно определяется длительностью интервала активности фильтра. Данный интервал при этом является настройкой фильтра и не зависит от отметки времени t , в момент которой требуется получить оценку амплитуды резонансной частоты. Этот факт позволяет применять предлагаемые фильтры для анализа нестационарных акустических сигналов.

В основу конструирования знакопеременных шаговых фильтров положены единичные знакопеременные функции Радемахера-Уолша $ce(\omega)$ и $se(\omega)$, определенные на интервале $\omega \in [0, \dots, 2 \cdot \pi]$ и удовлетворяющие условию:

$$ce(\omega) = \begin{cases} 1, & \text{при } \frac{\partial(\sin(\omega))}{\partial\omega} > 0 \\ -1, & \text{при } \frac{\partial(\sin(\omega))}{\partial\omega} < 0; \\ 0, & \text{при } \frac{\partial(\sin(\omega))}{\partial\omega} = 0 \end{cases}; \quad se(\omega) = \begin{cases} 1, & \text{при } \frac{\partial(-\cos(\omega))}{\partial\omega} > 0 \\ -1, & \text{при } \frac{\partial(-\cos(\omega))}{\partial\omega} < 0 \\ 0, & \text{при } \frac{\partial(-\cos(\omega))}{\partial\omega} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Графический вид функций $ce(\omega)$ и $se(\omega)$ представлен на рис. 1.

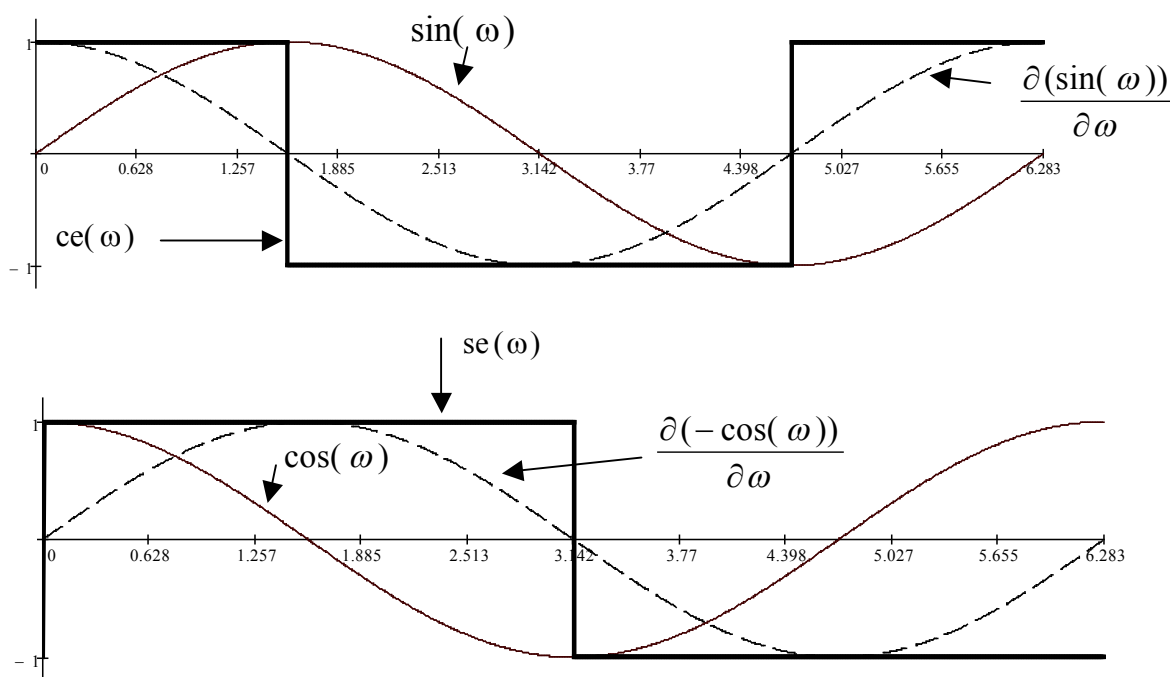


Рис. 1. Единичные знакопеременные функции.

Линейно проецируя область определения $ce(\omega)$ $[0, \dots, 2 \cdot \pi]$ на произвольную область в диапазоне $t \in [-t_1, \dots, t_1]$ и область определения $se(\omega)$ $[0, \dots, 2 \cdot \pi]$ на произвольную область в диапазоне $t \in [-t_2, \dots, t_2]$, получаем соответствующие проекции $CE(t)$ и $SE(t)$ (рис. 2).

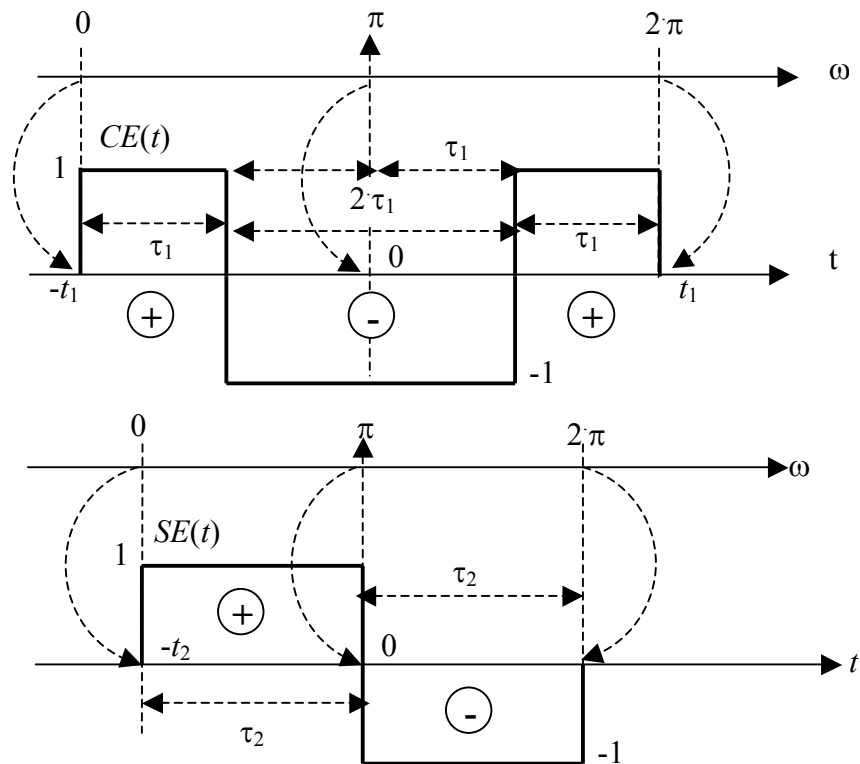


Рис. 2. Проекция области определения ступенчатых функций.

Из рис. 2 видно, что функции $CE(t)$ и $SE(t)$ в системе координат t определены следующим образом:

$$CE(t) = \begin{cases} 0, & \text{для } t < -2 \cdot \tau_1 \\ 1, & \text{для } t \in [-2 \cdot \tau_1, \dots, -\tau_1] \\ -1, & \text{для } t \in [-\tau_1, \dots, \tau_1] \\ 1, & \text{для } t \in [\tau_1, \dots, 2 \cdot \tau_1] \\ 0, & \text{для } t > 2 \cdot \tau_1 \end{cases} \quad (2)$$

$$SE(t) = \begin{cases} 0, & \text{для } t < -\tau_2 \\ 1, & \text{для } t \in [-\tau_2, \dots, 0] \\ -1, & \text{для } t \in [0, \dots, \tau_2] \\ 0, & \text{для } t > \tau_2 \end{cases}$$

Параметры τ_1 и τ_2 выбираются из условия максимального выделения целевой частоты f .

Частотно-временная декомпозиция акустического сигнала $y(t)$ осуществляется посредством его локальной свертки с $SE(t)$ - или $CE(t)$ -функциями, центрированными в окне фильтра относительно момента времени t :

$$\begin{cases} F_1(t) = \frac{k_1}{4 \cdot \tau_1} \cdot \int_{t-2 \cdot \tau_1}^{t+2 \cdot \tau_1} y(\theta) \cdot CE(\theta - t) \cdot d\theta \\ F_2(t) = \frac{k_2}{2 \cdot \tau_2} \cdot \int_{t-\tau_2}^{t+\tau_2} y(\theta) \cdot SE(\theta - t) \cdot d\theta \end{cases}, \quad (3)$$

где k_1, k_2 – коэффициенты, обеспечивающие компенсацию потери энергии целевой гармоники после частотно-временной декомпозиции сигнала $y(t)$.

Применяя преобразование Лапласа к (3), получим амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) и фазочастотную характеристику (АФХ) предлагаемых фильтров.

СЕ-фильтр

Амплитудно-частотная характеристика:

$$A_1(\omega) = \frac{k_1 \cdot \sin(\tau_1 \cdot \omega)}{\tau_1 \cdot \omega} \cdot [\cos(\tau_1 \cdot \omega) - 1]. \quad (4)$$

Фазочастотная характеристика:

$$\varphi_1(\omega) = \pi \cdot n, \quad (\text{рад}), \quad n = [0, 1, 2, \dots]. \quad (5)$$

SE-фильтр

Амплитудно-частотная характеристика:

$$A_2(\omega) = \frac{k_2 \cdot [\cos(\tau_2 \cdot \omega) - 1]}{\tau_2 \cdot \omega}. \quad (6)$$

Фазочастотная характеристика фильтра:

$$\varphi_2(\omega) = \frac{\pi}{2} + \pi \cdot n, \quad (\text{рад}), \quad n = [0, 1, 2, \dots]. \quad (7)$$

Максимизируя АЧХ фильтров для целевой частоты и компенсируя потерю энергии гармоникой после фильтрации, получим оценку параметров τ_1, k_1 и τ_2, k_2 , обеспечивающих максимальное выделение частоты f из акустической суперпозиции сигнала $y(t)$:

$$\begin{cases} \tau_1 \approx \frac{0,2869573}{f} \\ k_1 \approx -1,50612959 \\ \tau_2 \approx \frac{0,37100966}{f} \\ k_2 \approx -1,38005014 \end{cases} \quad (8)$$

Представленные фильтры являются фильтрами 1-ого порядка. Увеличить порядок фильтра можно, соединив *CE*- и/или *SE*-фильтры последовательно, добиваясь тем самым необходимого качества выделения гармоники целевой частоты.

Степень подавления боковых частот CE - и SE -фильтром n -го порядка оценивается следующими соотношениями:

$$\begin{cases} \lambda_{CE}^n(\alpha) \approx \left(\sin(1,803 \cdot \alpha) \cdot \frac{1 - \cos(1,803 \cdot \alpha)}{1,197 \cdot \alpha} \right)^n \\ \lambda_{SE}^n(\alpha) \approx \left(\frac{1 - \cos(2,331 \cdot \alpha)}{1,689 \cdot \alpha} \right)^n \end{cases}, \quad (9)$$

где $\alpha = \frac{f}{f_p}$ – отношение боковой частоты f к резонансной частоте f_p фильтра;

n – порядок фильтра.

На рис. 3 графически представлены функции подавления боковых частот в зависимости от порядка фильтра.

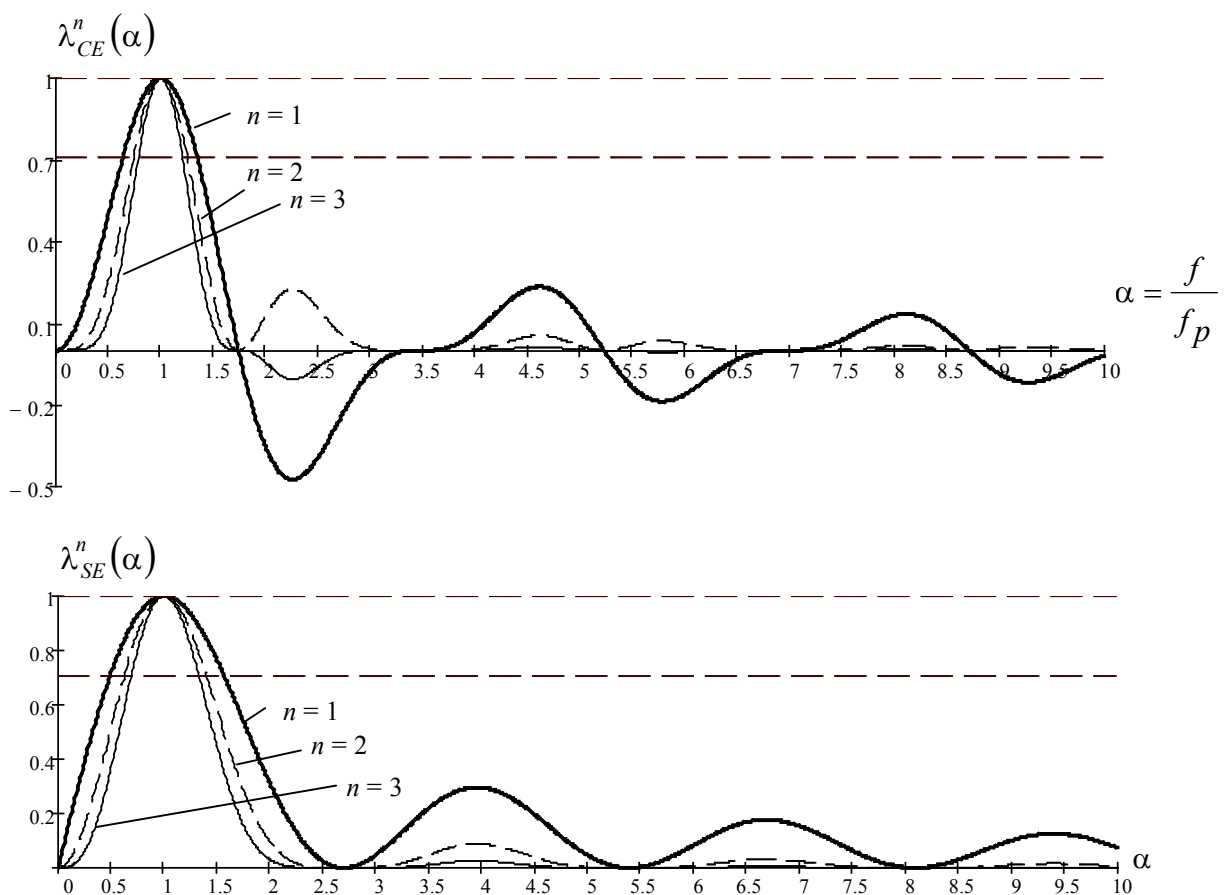


Рис. 3. Подавление боковых частот CE - и SE -фильтром в зависимости от порядка фильтра n

Видно, что *CE*-фильтр обладает лучшей добротностью и симметричностью подавления *околорезонансных* частот. Однако в области сверхрезонансных частот имеется периодическая разнополярная пульсация, амплитуда которой асимптотически затухает по мере удаления от резонансной точки. Кроме того, функция $\lambda_{CE}^n(\alpha)$ периодически инвертирует амплитуду некоторых подавляемых сверхрезонансных частот (отрицательная пульсация).

SE-фильтр же обладает сравнительно худшей добротностью и симметричностью в области *резонансной* частоты, а в области сверхрезонансных частот также имеется периодическая затухающая положительная пульсация. Однако функция $\lambda_{SE}^n(\alpha)$ на всем диапазоне не инвертирует амплитуду подавляемых сверхрезонансных частот.

Из рис. 3 видно, что по мере повышения порядка фильтров улучшается их добротность и резко снижается сверхрезонансная пульсация.

Кроме того, как видно из (2) и (3), предложенные фильтры легко программируются для компьютерных систем в виде рекуррентных схем вычисления без использования операций умножения и деления при расчете локальных сверток акустического сигнала. Это свойство резко повышает производительность частотно-временной декомпозиции и позволяет применять данные фильтры в системах распознавания акустических сигналов в режиме реального времени.