

УДК 621.301: 681.32

Применение системы MATLAB для синтеза быстродействующих гребенчатых фильтров

И.И. Турулин, Ю.Б. Верич

Введение

Широко распространенные пакеты программ автоматического проектирования цифровых фильтров, такие, как DFDP или пакет Signal Processing Toolbox системы MATLAB [1], позволяют синтезировать фильтры верхних и нижних частот, а также полосно-пропускающие и полосно-заграждающие фильтры. Однако в этих системах не предусмотрен синтез гребенчатых фильтров, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) которых периодична. Вместе с тем гребенчатые фильтры широко используются в различных системах (в частности, биомедицинских) для подавления помехи частотой 50 Гц и ее гармоник. Необходимость подавления гармоник обусловлена тем, что сетевая наводка носит емкостной характер, в результате чего образуется паразитная дифференцирующая цепь, «подчеркивающая» высшие гармоники сетевой помехи. С другой стороны, гребенчатые фильтры могут использоваться для выделения гар-

Предлагается простая методика синтеза быстродействующих гребенчатых фильтров по фильтру-прототипу нижних или верхних частот с помощью пакета Signal Processing Toolbox системы MATLAB. Приведен пример синтеза фильтра для подавления сетевой помехи.

моник сложного периодического сигнала на фоне помехи. В этом случае ширина полосы пропускания будет более узкой, чем полоса заграждения.

Предлагаемая методика позволяет с помощью вышеуказанных программ и несложных расчетов достаточно легко синтезировать быстродействующие гребенчатые фильтры. Методика основана на явлении сжатия спектра сигнала по оси частот при увеличении длины сигнала путем добавления нулей между исходными дискретными [2].

Методика

В зависимости от задачи выбирается тип синтезируемого фильтра: ФНЧ-подобный (рис. 1) или ФВЧ-подобный (рис. 2). Здесь f – частота, $H(f)$ – АЧХ, f_d –

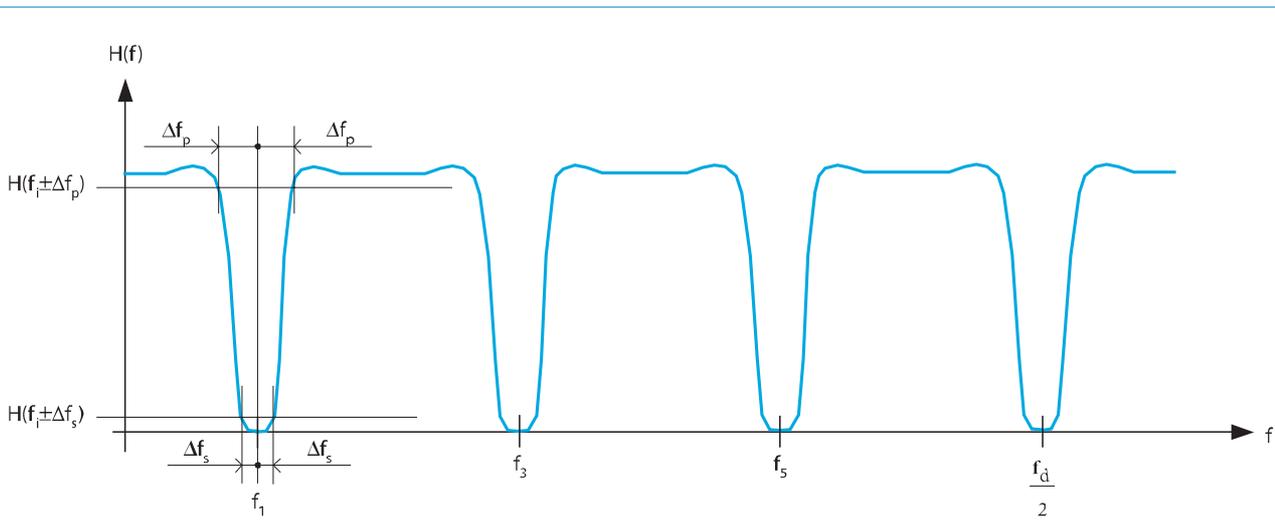


Рис. 1. АЧХ ФНЧ-подобного гребенчатого фильтра

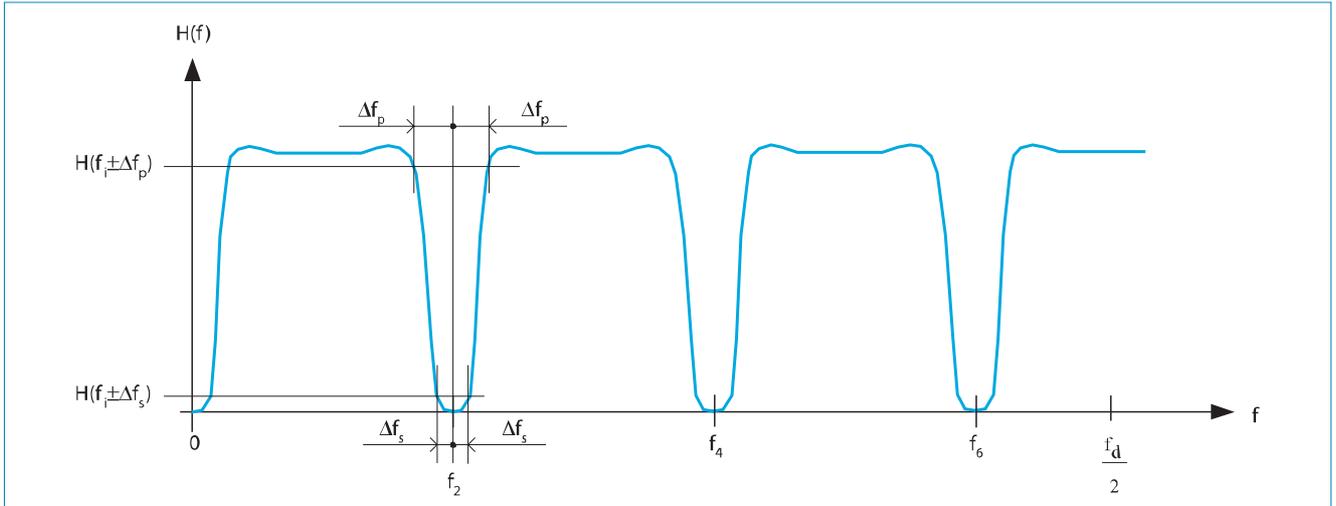


Рис. 2. АЧХ ФВЧ-подобного гребенчатого фильтра

частота дискретизации, Δf_p – полуширина полосы пропускания, Δf_s – полуширина полосы заграждения соответственно по уровням нормированной АЧХ $H(f_i \pm \Delta f_p) / H[(f_i \pm \Delta f_{i+1})/2]$ и $H(f_i \pm \Delta f_s) / H[(f_i \pm \Delta f_{i+1})/2]$, где $f_i = f_1 \cdot i$ – центральные частоты полос заграждения. Для ФНЧ-подобных фильтров $i=1, 3, 5, \dots$, для ФВЧ-подобных $i=0, 2, 4, \dots$. Частота дискретизации должна быть кратна частоте f_1 для ФНЧ-подобных фильтров или частоте f_2 для ФВЧ-подобных. В противном случае изменяют f_1 или f_2 либо производят передискретизацию сигнала для выполнения условия кратности частот, а на выходе фильтра, если требуется, делают обратную передискретизацию. Уровень АЧХ в полосе пропускания считается равным единице.

Сначала задают $f_d, \Delta f_p, \Delta f_s, H(f_i \pm \Delta f_p), H(f_i \pm \Delta f_s), f_1$ или f_2 . Для ФНЧ-подобных фильтров рассчитывают коэффициенты структуры цифрового ФНЧ с граничной частотой полосы пропускания $f_p = f_d/2 - L \cdot \Delta f_p$ и граничной частотой полосы заграждения $f_s' = f_d/2 - L \cdot \Delta f_s$, где $L = f_d/(2 \cdot f_1)$. Для расчета ФНЧ задаются уровни АЧХ $H'(f_p)$ и $H'(f_s')$ соответственно. При расчете коэффициентов ФВЧ-подобного фильтра разница состоит в том, что рассчитывается ФВЧ с граничными частотами $f_p = L \cdot \Delta f_p, f_s' = L \cdot \Delta f_s$, где $L = f_d/f_2$.

Искомый фильтр получается с увеличением в L раз всех задержек в структуре фильтра. Иными словами, если разностное уравнение ФНЧ или ФВЧ-фильтра имело вид:

$$y_k = \sum_{m=0}^M a_m \cdot x_{k-m} + \sum_{n=1}^N b_n \cdot y_{k-n},$$

где a_m и b_n – коэффициенты фильтра соответственно в цепях прямых и обратных связей, y_k – выходной, x_k – входной сигналы, то разностное уравнение искомого фильтра будет иметь вид:

$$y_k = \sum_{m=0}^{M \cdot L} a_m \cdot x_{k-m \cdot L} + \sum_{n=1}^{N \cdot L} b_n \cdot y_{k-n \cdot L}.$$

В результате увеличения в L раз всех задержек импульсная характеристика ФНЧ или ФВЧ h'_n растягивается вправо от точки $n=0$ с добавлением $L-1$ нулей между соседними дискретами. Таким образом, импульсная характеристика искомого фильтра $h_n = h'_{n/L}$, если $n \bmod L = 0$ и $h_n = 0$ в других случаях, где h'_n – импульсная характеристика ФНЧ или ФВЧ до преобразования, $n \bmod L$ – остаток от деления нацело n на L . АЧХ фильтра примет вид рис. 1 или рис. 2. Это легко показать, рассчитав после увеличения всех задержек передаточную функцию искомого фильтра [3]:

$$H(e^{j\omega}) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h_k \cdot e^{-j\omega k T_d},$$

где T_d – шаг дискретизации.

С учетом того, что $h_n = h'_{n/L}$, если $n \bmod L = 0$ и $h_n = 0$, в других случаях получим:

$$H(e^{j\omega}) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h_{k \cdot L} \cdot e^{-j\omega k \cdot L T_d} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h'_k \cdot e^{-j\omega k \cdot L T_d} = H'(e^{j\omega L}),$$

где $H'(\cdot)$ – передаточная функция ФНЧ или ФВЧ до увеличения задержек.

Таким образом, передаточная функция искомого фильтра будет представлять собой сжатую в L раз по оси частот передаточную функцию ФНЧ или ФВЧ. Поскольку передаточная функция искомого фильтра периодична с периодом 2π , $H'(e^{j\omega L})$ будет периодична с периодом $2\pi/L$, что обеспечивает гребенчатость.

Пример. В качестве примера приводятся характеристики ФВЧ-подобного гребенчатого фильтра на основе ФВЧ Баттерворта 4-го порядка, разработанного

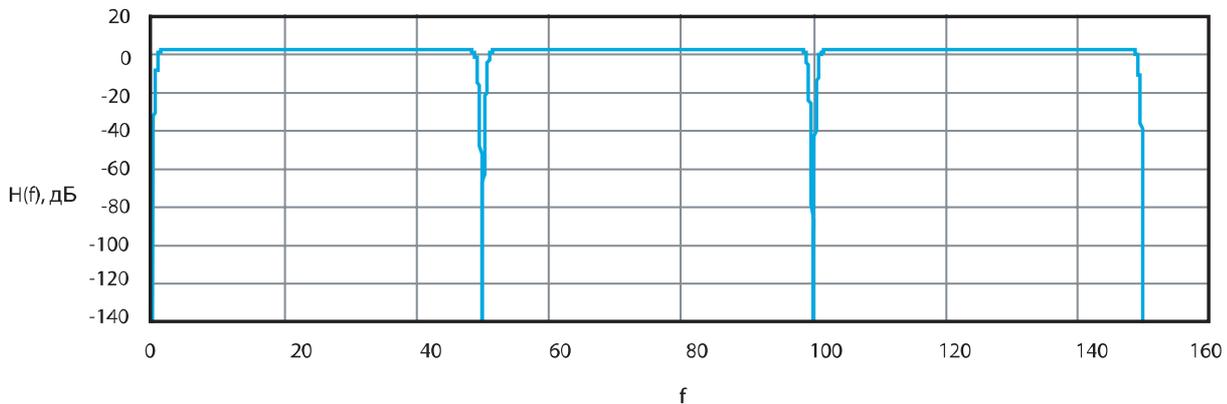


Рис. 3. АЧХ синтезированного ФВЧ-подобного гребенчатого фильтра на основе ФВЧ Баттерворта 4-го порядка

для компьютерного энцефалографа. Фильтр реализован программно на персональном компьютере с процессором Pentium-200 и в реальном масштабе времени выполняет 10-канальную фильтрацию. Фильтр имеет следующие параметры: $\Delta f_s = 0,5$ Гц, $\Delta f_p = 1$ Гц, $f_2 = 50$ Гц, $f_d = 16$ кГц, нормированные уровни АЧХ: $H(f_i \pm \Delta f_p) / H[(f_i \pm \Delta f_{i+1})/2] = -2$ дБ, $H(f_i \pm \Delta f_s) / H[(f_i \pm \Delta f_{i+1})/2] = -24$ дБ, где $H[(f_i \pm \Delta f_{i+1})/2] = 1,199$, $i = 0, 2, 4, \dots, L = 320$. Ненормированная АЧХ данного фильтра показана на рис. 3.

Заметим, что с помощью программы DFDP3, использованной для расчета ФВЧ, был синтезирован фильтр с уровнем в полосе пропускания $H[(f_i \pm \Delta f_{i+1})/2] = 1,199$. Уровень АЧХ легко привести к требуемому путем введения умножения на постоянный коэффициент на входе или выходе фильтра. Например, для получения единичного уровня АЧХ значение коэффициента фильтра будет равно $1/1,199$.

Выводы

Достоинством фильтров, синтезированных с помощью предлагаемой методики, является малое число операций на отсчет сигнала (в L раз меньше, чем у однополосного режекторного фильтра с такой же крутизной АЧХ). Уменьшение числа операций, с одной стороны, позволяет повысить быстродействие фильтров, с другой – уменьшить накапливаемую погрешность, а также чувствительность полюсов к квантованию коэффициентов. Объем памяти для реализации задержек сигнала, необходимых при фильтрации $V \approx (M+N) \cdot L \cdot N_n$ байт, где N_n – разрядность используемых чисел (в байтах), M и N – число ненулевых коэф-

фициентов соответственно в нерекурсивной и рекурсивной частях фильтра. Достоинством является еще и то, что ФВЧ-подобный гребенчатый фильтр способен подавлять не только сетевую помеху и ее гармоники, но и постоянную составляющую, которая для таких устройств, как кардиографы, энцефалографы и миографы, обычно является помехой. Также зачастую в биомедицинских системах требуется подавить нижние частоты от 0 до f_p , причем отношение f_d/f_p настолько большое, что часто разрядность процессора оказывается недостаточной для реализации ФВЧ с требуемыми характеристиками. Применение данной методики позволяет снизить требования к разрядности процессора и одновременно решить задачу подавления периодической помехи.

Если необходимо получить фильтр с АЧХ, показанной на рис. 2, но без режекторной врезки на нулевой частоте, можно включить параллельно ему ФНЧ (входы объединяются, выходные сигналы суммируются). При этом, возможно, потребуется подобрать тип фильтра (Баттерворта, Чебышева и т.д.) для уменьшения неравномерности АЧХ результирующего фильтра в окрестности точки $f=0$.

Литература

1. Рудаков П.И., Сафонов В.И. Обработка сигналов и изображений. MATLAB 5.x. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2000. – 416 с.
2. Витязев В.В. Цифровая частотная селекция сигналов. М.: Радио и связь, 1993. – 240 с.
3. Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н. Цифровая обработка сигналов. М.: Радио и связь, 1990.