

ПРОГРАММА DIFID: ЭФФЕКТИВНЫЙ СИНТЕЗ КАСКАДНЫХ ЦИФРОВЫХ БИХ-ФИЛЬТРОВ

Мингазин А.Т.

РАДИС Лтд.

Россия, Москва, Зеленоград, 103460, а/я 20
тел./факс. (095)535-04-73, e-mail: alexmin@orc.ru

Реферат. Представлена программа синтеза каскадных цифровых БИХ-фильтров - DIFID. Программа позволяет минимизировать эффекты квантования переменных и коэффициентов фильтра. На конкретных примерах показана ее эффективность.

1. Введение. Синтез частотных цифровых фильтров связан с решением ряда задач таких, как аппроксимация требуемой характеристики ослабления, выбор исходных параметров, поиск структуры фильтра, выбор способа масштабирования. Кроме того, для каскадных БИХ-фильтров необходимо определить структуры звеньев, варианты группировки полюсно-нулевых пар и упорядочения звеньев. Все эти проблемы желательно решать совместно с задачами минимизации эффектов квантования внутренних переменных и коэффициентов передаточной функции фильтра. Это позволяет расширить диапазон возможных характеристик проектируемых систем на существующих процессорах обработки сигналов, а для систем на базе заказных или полузаказных СБИС - уменьшить площадь кристалла, потребляемую мощность, стоимость, снизить требования к быстродействию.

Полную автоматизацию синтеза цифровых БИХ-фильтров на сегодняшний день выполнить не возможно. Поэтому используют более простой подход, а именно для выбранной структуры фильтра решают задачу синтеза передаточной функции. Несмотря на большое число БИХ-структур, наиболее привлекательными для разработчиков остаются каскадные фильтры на звеньях прямых или обращенных форм. Недостатками наиболее популярных программа синтеза этих фильтров является то, что в них не оптимизируются исходные параметры, квантование коэффициентов соответствует простому округлению, а используемые процедуры группировки-упорядочения не всегда эффективны. Цель данной публикации - представить программу синтеза каскадных цифровых БИХ-фильтров DIFID (разработка Радис Лтд.), которая свободна от этих недостатков, и продемонстрировать ее эффективность на конкретных примерах.

2. Программа DIFID. Программа позволяет рассчитывать каскадные цифровые БИХ-фильтры нижних и верхних частот, полосовые и режекторные фильтры. В качестве аналоговых прототипов используются фильтры Чебышева, Баттерворта, Бесселя, инверсные Чебышева и Золотарева-Кауэра. Метод перехода от прототипа к цифровому фильтру - билинейное преобразование.

Структуры звеньев второго порядка - прямая или каноническая форма или их обращенные варианты. Масштабирование осуществляется с помощью L_2 -, L_∞ - или I_1 -нормы путем изменения коэффициентов числителя передаточной функции или путем введения масштабных множителей между звеньями.

Для получения приемлемых решений с заданной или минимальной длиной слова коэффициентов используется метод вариации исходных параметров (ВИП) [1]. Варьируемый параметр неравномерность характеристики ослабления в полосе пропускания [2]. Предусмотрен режим без применения ВИП.

Для минимизации отношения (шум квантования)/сигнал применяется эвристическая процедура группировки полюсно-нулевых пар и упорядочения звеньев [3]. Кроме того, можно вручную задавать группировки и упорядочения.

Для оценки эффектов квантования внутренних переменных, представленных с фиксированной точкой, рассчитываются усиление шума квантования, отношение шум/сигнал, дополнительное число бит для компенсации шума и верхняя граница предельного цикла при нулевом входном сигнале, выраженная в битах.

Неравномерность в полосе пропускания, минимальное ослабление в полосе задерживания, максимальный коэффициент передачи, максимум спектральной плотности мощности шума квантования, неравномерность и максимум ГВЗ в полосе пропускания оцениваются на заданном количестве точек.

Все перечисленные и ряд вспомогательных параметров вместе с полученными коэффициентами дают достаточно полную информацию о синтезированном фильтре.

3. Примеры синтеза фильтров. Рассмотрим синтез каскадных БИХ-фильтров с помощью программы DIFID при использовании ВИП и процедуры группировки-упорядочения. Положим, что масштабные множители вводятся путем изменения коэффициентов числителя передаточной функции и для всех суммирующих узлов в фильтре нормы $L_\infty \cong 1$.

Отмасштабированная передаточная функция с квантованными коэффициентами

$$H(z) = \prod_{i=1}^K \frac{b_{0i} + b_{1i}z^{-1} + b_{2i}z^{-2}}{1 + a_{1i}z^{-1} + a_{2i}z^{-2}} = \prod_{i=1}^K \frac{B_i(z)}{A_i(z)} = \prod_{i=1}^K H_i(z).$$

Результирующая мощность шума квантования на выходе фильтра (в дБ) равна

$$10 \lg \left(\frac{2^{-2b}}{3} \sum_{k=1}^K \left\| \frac{1}{A_k} \prod_{i=k+1}^K H_i \right\|_2^2 \right),$$

где b - число бит, включая знак, сохраняемое после округления переменных внутри фильтра, $\prod_{i=K+1}^K H_i = 1$.

Граничные частоты нормированы относительно частоты дискретизации.

Пример 1. Требования к цифровому фильтру нижних частот:

Неравномерность в полосе пропускания, дБ	≤ 0.3
Минимальное ослабление в полосе задерживания, дБ	≥ 50
Граничные частоты	0.0260, 0.0263
Максимальный коэффициент передачи, дБ	$\cong 0$
Длина слова переменных и коэффициентов, бит	16
Аналоговый прототип	фильтр Золотарева-Кауэра

Результаты синтеза : $b_{2i} = b_{0i}, i = 1, \dots, 6,$

i	a_{1i}	a_{2i}	b_{0i}	b_{1i}
1	-1.91833496093750	0.93347167968750	0.17266845703125	-0.33520507812500
2	-1.97045898437500	0.99676513671875	0.90466308593750	-1.78424072265625
3	-1.95062255859375	0.97277832031250	0.41809082031250	-0.82153320312500
4	-1.96502685546875	0.99023437500000	0.55767822265625	-1.09899902343750
5	-1.87628173828125	0.88238525390625	0.06250000000000	-0.10308837890625

6 -1.97259521484375 0.99926757812500 0.97259521484375 -1.91864013671875

Неравномерность в полосе пропускания, дБ 0.271 (1.535)
 Минимальное ослабление в полосе задерживания, дБ 52.4 (54.6)
 Максимальный коэффициент передачи, дБ 0.002 (-0.050)
 Мощность шума квантования на выходе, дБ -55.2 (-47.70)

Пример 2. Требования к цифровому фильтру нижних частот:

Неравномерность в полосе пропускания, дБ ≤ 0.15
 Минимальное ослабление в полосе задерживания, дБ ≥ 55
 Граничные частоты 0.04, 0.045
 Максимальный коэффициент передачи, дБ $\cong 0$
 Длина слова переменных и коэффициентов, бит 16
 Аналоговый прототип фильтр Чебышева

Результаты синтеза: $b_{2i} = b_{0i}, i = 1, \dots, 9,$

i	a_{1i}	a_{2i}	b_{0i}	b_{1i}
1	-1.92584228515625	0.93127441406250	0.00115966796875	0.00225830078125
2	-1.92193603515625	0.98138427734375	0.01391601562500	0.02789306640625
3	-1.92004394531250	0.94165039062500	0.00451660156250	0.00903320312500
4	-1.91619873046875	0.95898437500000	0.00750732421875	0.01501464843750
5	-1.91735839843750	0.94952392578125	0.00256347656250	0.00512695312500
6	-1.92315673828125	0.93548583984375	0.00415039062500	0.00830078125000
7	-1.91741943359375	0.96966552734375	0.00720214843750	0.01434326171875
8	-1.92736816406250	0.92913818359375	0.00402832031250	0.00805664062500
9	-1.93023681640625	0.99371337890625	0.01580810546875	0.03155517578125

Неравномерность в полосе пропускания, дБ 0.147 (0.434)
 Минимальное ослабление в полосе задерживания, дБ 55.2 (57.5)
 Максимальный коэффициент передачи, дБ 0.005 (-0.682)
 Мощность шума квантования на выходе, дБ -57.9 (-18.7)

Пример 3. Требования к полосовому цифровому фильтру:

Неравномерность в полосе пропускания, дБ ≤ 3
 Минимальное ослабление в полосе задерживания, дБ ≥ 35
 Граничные частоты 0.004, 0.01, 0.4, 0.45
 Максимальный коэффициент передачи, дБ $\cong 0$
 Длина слова переменных, бит 16
 Длина слова коэффициентов, бит 11
 Аналоговый прототип фильтр Баттерворта

Результаты синтеза: $b_{1i} = 0; b_{2i} = -b_{0i}, i = 1, \dots, 6,$

i	a_{1i}	a_{2i}	b_{0i}
1	1.05859375	0.28906250	0.35546875
2	-1.91406250	0.91796875	1.57421875
3	1.44531250	0.75000000	0.23828125
4	-1.96484375	0.96875000	2.00000000
5	1.17968750	0.43359375	0.41406250
6	-1.88671875	0.89062500	2.26171875

Неравномерность в полосе пропускания, дБ	2.838	(4.220)
Минимальное ослабление в полосе задерживания, дБ	35.8	(37.9)
Максимальный коэффициент передачи, дБ	0.004	(- 0.05)
Мощность шума квантования на выходе, дБ	- 65.1	(+ 1.7)

Для сравнения в скобках приведены параметры фильтров, синтезированных с использованием пакета программ QEDsign-2000/demo (разработка Momentum Data Systems). Как видим, для всех примеров решения, найденные с помощью DIFID, полностью удовлетворяют заданным требованиям в отличие от решений, полученных с помощью QEDesign. Кроме того, для двух последних примеров DIFID приводит к значительно меньшим мощностям шума квантования.

4. Заключение. Представленные примеры синтеза фильтров подтверждают эффективность программы DIFID. Более широкие исследования показывают, что в сравнении с QEDesign программа DIFID может давать аналогичные или лучшие результаты. Это зависит от конкретных требований к фильтрам. Программа DIFID может быть успешно использована для синтеза каскадных цифровых БИХ-фильтров, реализуемых на базе сигнальных процессоров и ПЛИС.

Литература

1. Мингазин А.Т. Синтез передаточных функций цифровых фильтров в области дискретных значений коэффициентов (обзор). // Электронная техника. Сер. 10. 1993. № 1,2. С. 3-35.
2. Мингазин А.Т. Разрядность коэффициентов рекурсивных цифровых фильтров при упрощенном методе синтеза. // Радиотехника. 1987. № 2. С. 31-33.
3. Мингазин А.Т., Зорич А.А. Минимизация шума округления каскадных рекурсивных цифровых фильтров. // Электронная техника. Сер. 10. 1992. № 1,2. С. 37-43.