

ПРОГРАММА EXTREMAL: РАСЧЕТ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦИФРОВЫХ И АНАЛОГОВЫХ ФИЛЬТРОВ

Алёшин Д.В., Мингазин А.Т.

РАДИС Лтд, Россия, Москва, Зеленоград, 124460, а/я 20.
Тел./факс. (095) 535-35-13, e-mail: alexmin@orc.ru

Реферат. Представлена программа Extremal фирмы “РАДИС Лтд” для расчета экстремальных параметров цифровых и аналоговых фильтров нижних и верхних частот, полосовых и режекторных фильтров с характеристиками Баттерворта, Чебышева и Золотарева-Кауэра. Приведен пример расчета иллюстрирующий интересные альтернативные значения параметров конкретного фильтра.

1. Введение. Минимально необходимый порядок N частотных цифровых или аналоговых фильтров, таких как фильтры нижних и верхних частот (ФНЧ и ФВЧ), полосовые и режекторные фильтры (ПФ и РФ) определяется заданными допустимыми исходными параметрами к их характеристикам ослабления. Имеется возможность улучшения этих параметров при условии, что расчет по ним не приводит к целой величине N . Кроме того, такую возможность можно получить, преднамеренно увеличив минимально необходимое значение N .

В [1] введены области допустимых исходных параметров S , вид и размерность которых зависит от типа фильтра (ФНЧ, ПФ или др.) и используемой аппроксимации его характеристики. Расчет фильтра для любой точки S будет приводить к допустимой характеристике. Выбор точки выполняется по тем или иным соображениям разработчиком. С увеличением N при фиксированных исходных параметрах область S расширяется, что дает возможность получения допустимых характеристик в широких пределах.

Итак, перед разработчиком стоит задача выбора исходных значений параметров в S для расчета собственно фильтра. В инженерной практике часто стремятся определить экстремально улучшенное значение одного из параметров при заданных остальных [2-6]. Например, неравномерность в полосе пропускания может быть экстремально уменьшена или полоса пропускания экстремально расширена без нарушения требований к характеристике. Такой подход означает, что совокупность исходных значений параметров будет принадлежать границе S .

Расчетные соотношения для определения экстремальных параметров цифровых и аналоговых ФНЧ, ФВЧ, ПФ и РФ с характеристиками Баттерворта, Чебышева и Золотарева-Кауэра представлены в [3]. Еще два других варианта расчета для ФНЧ были предложены в [4], а позднее описаны в [5].

Расчет экстремальных параметров вручную на калькуляторе утомителен, а в ряде случаев не желателен из-за громоздкости соотношений, наличия численных процедур и неизбежности совершения ошибок. В данной статье после необходимых определений представлена удобная компьютерная программа Extremal фирмы “РАДИС Лтд” для вычисления экстремальных параметров цифровых и аналоговых ФНЧ, ФВЧ, ПФ и РФ по соотношениям из [3,4].

2. Исходные параметры. Под исходными параметрами характеристики ослабления фильтров (ФНЧ, ФВЧ, ПФ и РФ) понимают:

- неравномерность в полосе пропускания Δa в дБ;
- минимальное ослабление в полосе задерживания a_0 в дБ;
- граничные частоты полос пропускания и задерживания $f_1, f_2, f_3, f_4, f_i < f_{i+1}$.

Предполагается, что в полосе пропускания характеристика имеет максимальный уровень 0 дБ. Для ФНЧ и ФВЧ необходимо задать только две граничными частоты.

Задавшись значениями $\Delta a = \Delta a_{\max}$, $a_0 = a_{0\min}$, $f_i = f_{in}$, $i=1,2,3,4$ и частотой дискретизации f_s , в случае цифровых фильтров, определяют N для выбранного типа фильтра. Для расчета фильтра, т.е. коэффициентов его передаточной функции можно использовать представленные значения исходных параметров, или любые другие, находящиеся внутри или на границе области S .

Такой выбор параметров обеспечивает заданные требования к фильтру $\Delta a \leq \Delta a_{\max}$, $a_0 \leq a_{0\min}$ при номинальных граничных частотах f_{in} , $i=1,2,3,4$. Заметим, что знак равенства в этих неравенствах означает, что область S является точкой и улучшение параметров возможно только при увеличении N на $1,2,\dots$ в случае ФНЧ (ФВЧ) или на $2,4,\dots$ в случае ПФ (РФ).

Программа Extremal позволяет определить целый ряд альтернативных значений исходных параметров, которые могут быть использованы для дальнейшего расчета фильтра с улучшенными характеристиками. Перед представлением Extremal определим желаемые свойства характеристик с экстремальными параметрами.

3. Экстремальные параметры. Для ФНЧ и ФВЧ определим 7, а для ПФ и РФ 11 свойств характеристики ослабления с экстремальными параметрами, которые могут представлять практический интерес.

Свойства вариантов характеристик ФНЧ и ФВЧ:

1. Минимум максимальной взвешенной ошибки;
2. Минимальная неравномерность в полосе пропускания;
3. Максимум минимального ослабления в полосе задерживания;
4. Максимально широкая полоса пропускания;
5. Максимально узкая переходная полоса при номинальной полосе пропускания;
6. Минимальная неравномерность не во всей полосе пропускания;
7. Максимум минимального ослабления не во всей полосе задерживания.

Свойство 1 означает, что взвешенные уровни пульсаций характеристики ослабления в полосе пропускания и задерживания равны. Это означает, что

$$(1 - 10^{-\Delta a / 20}) / (1 - 10^{-\Delta a_{\max} / 20}) = 10^{(a_{0\min} - a_0) / 20}. \quad (1)$$

Свойства 2...5 и 6...7 описаны в [3] и [4], соответственно.

Для фильтров инверсных Чебышева и Баттерворта свойство 6, а для фильтров Чебышева и Баттерворта свойство 7 не имеют смысла [1,4]. Наличие свойств 6 и 7 зависит от исходных требований к характеристике и значения N .

Свойства вариантов характеристик ПФ и РФ:

1. Минимум максимальной взвешенной ошибки;
2. Минимальная неравномерность в полосе пропускания;
3. Максимум минимального ослабления в полосе задерживания;
4. Максимально узкие переходные полосы при номинальной полосе пропускания;
5. Максимальное расширение полосы пропускания слева;
6. Максимальное расширение полосы пропускания справа;
7. Максимальное, симметричное расширение полосы пропускания;
8. Минимальная неравномерность в правой части полосы пропускания;
9. Минимальная неравномерность в левой части полосы пропускания;
10. Минимальная неравномерность в средней части полосы пропускания ПФ и в полосах пропускания РФ за исключением областей примыкающих к переходным зонам;
11. Максимум минимального ослабления не во всей полосе задерживания.

Для фильтров Чебышева и Баттерворта свойство 11, для фильтров инверсных Чебышева и Баттерворта свойства 8...10, не имеют смысла. Наличие свойств 8...11 зависит от исходных требований к характеристике и значения N .

4. Программа Extremal. Программа Extremal выполняет расчет экстремальных параметров цифровых и аналоговых ФНЧ, ФВЧ, ПФ и РФ с характеристиками Баттерворта, Чебышева и Золотарева-Кауэра. Программа позволяет рассчитать экстремальные параметры для 7-ми вариантов характеристик ФНЧ и ФВЧ и 11-ти вариантов характеристик ПФ и РФ, упомянутых выше. В программе определяется минимальный порядок фильтра и допускается его изменение в сторону увеличения и обратно при одновременном наблюдении изменения параметров характеристик.

Кроме того, в Extremal имеется возможность работать в одной из четырех систем параметров для описания неравномерности в полосе пропускания и ослабления в полосе задерживания: $\{\Delta a, a_0\}$, $\{\delta_1, \delta_2\}$, $\{\delta_p, \delta_s\}$, $\{\varepsilon_1, \varepsilon_2\}$. Связь между системами параметров описывается как

$$\delta_1 = (1 - 10^{-\Delta a / 20}) / (1 + 10^{-\Delta a / 20}), \quad \delta_2 = 2(10^{-a_0 / 20}) / (1 + 10^{-\Delta a / 20});$$

$$\delta_p = 1 - 10^{-\Delta a / 20}, \quad \delta_s = 10^{-a_0 / 20}; \quad \varepsilon_1^2 = 10^{-\Delta a / 10} - 1, \quad \varepsilon_2^2 = 10^{-a_0 / 10} - 1.$$

Переход от параметров какой-либо системы к параметрам другой и обратно выполняется по желанию пользователя до или после задания конкретных значений.

Основное окно программы с результатами расчета экстремальных параметров представлено на рис.1. Три выпадающих окна позволяют выбрать любой из упомянутых фильтров.

Вариант	dA, дБ	A0, дБ	F1	F2	F3	F4
Исходный	2	70	0,05	0,2	0,3	0,38
1	1,1559106	74,3528414	0,05	0,0900336	0,3	0,38
2	0,4607603	70	0,05	0,0900336	0,3	0,38
3	2	77,1814409	0,05	0,0900336	0,3	0,38
4	2	70	0,05	0,0820755	0,3144749	0,38
5	2	70	0,1514195	0,2	0,3378965	0,38
6	2	70	0,05	0,0811894	0,3	0,3677046
7	2	70	0,0564902	0,0900336	0,3	0,3658377
8	0,4921211	70	0,0484817	0,0873957	0,3	0,38
9	0,2003809	70	0,05	0,0950668	0,3	0,3861426
10	0,2474984	70	0,047539	0,0900336	0,3	0,3854818
11	2	79,9885481	0,05	0,0932394	0,2943689	0,38

Рис.1. Основное окно программы Extremal с результатами расчетов.

С помощью кнопки “Исходные параметры” вызывается вспомогательное окно необходимое для ввода исходных параметров и значения f_s . В данном случае $f_s = 1$. Исходные (см. исходный вариант) и рассчитанные экстремальные параметры (см. варианты 1...11), а также минимальный порядок фильтра отображаются в поле основного окна. Для удобства исходные значения можно изменять непосредственно в строке “исходный”.

5. Результаты расчета. Как видим на рис.1 представлены рассчитанные экстремальные параметры и порядок цифрового РФ Золотарева - Кауэра для следующих исходных данных: $\Delta a = \Delta a_{\max} = 2$ дБ; $a_0 = a_{0\min} = 70$ дБ; $f_1 = f_{1n} = 0,05$; $f_2 = f_{2n} = 0,2$; $f_3 = f_{3n} = 0,3$; $f_4 = f_{4n} = 0,38$; $f_s = 1$. Частоты $f_1 \dots f_4$ на рис.1 обозначены как F1...F4, а параметры Δa и a_0 , как dA и A0.

Порядок РФ N=10. Исходному варианту в первой строке цифр соответствуют вышеприведенные данные. Вариант 1 соответствует характеристике с минимумом максимальной ошибки и можно убедиться, что в этом случае справедливо соотношение (1). Вариант 2 дает характеристику с минимальной $\Delta a = 0,4607603$ дБ в номинальной полосе пропускания (точнее в каждой из двух полос, т.к. это РФ), а вариант 3 соответствует максимуму $a_0 = 77,1814409$ дБ в номинальной полосе задерживания. Характеристике для варианта 4 соответствуют максимально узкие переходные

полосы при номинальной полосе пропускания. Для варианта 5 полоса пропускания максимально расширена слева, для варианта 6 – справа, а для варианта 7 – симметрично. Варианту 8 соответствует характеристика с минимальной $\Delta a = 0,4921211$ дБ во всей правой полосе и в части левой полосы пропускания от 0 до 0,0484817 с монотонным увеличением неравномерности до 2 дБ в диапазоне частот от 0,0484817 до 0,05. Подобным образом можно трактовать варианты 9 и 10 с минимальными $\Delta a = 0,2003809$ дБ и $\Delta a = 0,2474984$ дБ, соответственно. Наконец варианту 11 свойственна характеристика с максимумом $a_0 = 79,9885481$ дБ, но не во всей полосе задерживания. Это значение a_0 имеет место в полосе задерживания от 0,0932394 до 0,2943689. От частоты 0,2943689 до 0,3 характеристика ослабления монотонно уменьшается от 79,9885481 дБ до 70 дБ.

Следует заметить, что характеристики цифровых или аналоговых ПФ и РФ обладают определенной симметрией и если граничные частоты заданы без учета этого, то левый или правый склон характеристики ослабления будет иметь более узкую переходную полосу. В программе Extremal этот факт учитывается пересчетом частот f_1 или f_4 для ПФ и f_2 или f_3 для РФ.

Для расчета собственно ПФ может быть выбран любой из 11 вариантов на рис.1. Очевидно, что при фиксированном N значение какого-либо параметра для вариантов 1...11 нельзя улучшить без ухудшения других параметров. Программа Extremal предлагает разработчикам полезные альтернативы по расчету фильтров. Выбор того или иного варианта расчета зависит от требований к конкретному проекту.

6. Заключение. Программа Extremal позволяет гибко оперировать значениями исходных параметров и порядков различных цифровых и аналоговых фильтров с целью достижения желаемых характеристик и является полезным и удобным вспомогательным средством для разработчиков радиоэлектронной аппаратуры.

Литература

1. Мингазин А.Т. Начальные приближения для синтеза цифровых фильтров с минимальной длиной слова коэффициентов. // Электронная техника. 1983. Сер. 10. № 6. С. 3-8.
2. Савченко С.М., Смирнов Э.Е. Улучшение частотных характеристик эллиптических фильтров. // Изв. вузов СССР. Сер. Радиотехника. 1976. Т. XIX. № 6. С.113-116.
3. Мингазин А.Т. Экстремальные параметры аналоговых и цифровых фильтров. // Электро-связь. 1999. № 1. С. 22-23.
4. Мингазин А.Т. Способ улучшения характеристик затухания фильтров. // Радиотехника. 1985. № 9. С. 89-91.
5. Tomic D.V., Lutovac M. D., Evans B.L. Advanced digital IIR filter design. // ECCTD. 1999. P.1323-1326.
6. Vlcek M., Unbehauen R. Degree, ripple and transition width of elliptic filters. // IEEE Trans. 1989. CAS-36. № 3. P.469-472.