

УДК 621.372.543.2

Применение метода адаптивных предскажений АЧХ на примере проектирования канальных фильтров входных мультиплексоров для систем спутниковой связи

И.Е. Бурлаков, С.Д. Креков, Я.Ф. Бальва

Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения РАН - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН

Аннотация: в данной работе рассматривалось применение метода адаптивных предскажений для проектирования канальных фильтров входных мультиплексоров систем спутниковой связи. Был синтезирован канальный фильтр Ку-диапазона входного мультиплексора методами адаптивных предскажений, традиционных предскажений и классическим методом синтеза. Получены его частотные характеристики и неравномерности АЧХ, проведено сравнение полученных данных и их анализ.

Ключевые слова: метод адаптивных предскажений, метод предскажений, входной мультиплексор, неравномерность АЧХ, СВЧ-фильтр

1. Введение

Во входных мультиплексорах систем спутниковой связи для минимального искажения входного сигнала требуются полосовые канальные фильтры, обладающие малыми неравномерностями АЧХ (НАЧХ) и ГВЗ (НГВЗ) в полосе пропускания. Для разделения близко расположенных по частоте каналов данные фильтры должны обладать высокой крутизной склонов АЧХ, которую, как показано в работах [1, 2], можно повысить за счет размещения нулей передачи вблизи полосы пропускания. Также стоит отметить, что такие фильтры, как правило, имеют узкую относительную ширину полосы пропускания $\Delta f/f_0$ (менее 1%). Вместе с тем хорошо известно, что с уменьшением $\Delta f/f_0$ становится сложнее добиться малой неравномерности АЧХ при фиксированной собственной добротности резонаторов Q_0 . Для примера на рисунке 1 представлены АЧХ двух фильтров с относительной шириной полосы пропускания 0.3 % (слева) и 3 % (справа). Собственная добротность резонаторов обоих фильтров равна 7000. В прямоугольную область взята область АЧХ с неравномерностью 1 дБ. Видно, что в фильтре с меньшим $\Delta f/f_0$ переходные области малой крутизны АЧХ занимают значительную часть полосы пропускания, в то время как для второго фильтра, $\Delta f/f_0$ которого больше, эти переходные области занимают меньшую часть полосы пропускания, благодаря чему АЧХ в полосе пропускания более равномерна.

Уменьшить НАЧХ можно за счет повышения собственной добротности резонаторов, однако это не всегда представляется возможным. В этом случае можно использовать специальные методы синтеза, например традиционный метод предскажений, описанный в работах [3, 4], который позволяет уменьшить НАЧХ фильтра за счет увеличения уровня вносимых потерь и уменьшения уровня обратных потерь. На практике высокий уровень вносимых потерь компенсируется наличием в тракте МШУ, а установка СВЧ-вентелей на входе и выходах входного мультиплексора позволяет обеспечить требуемый уровень обратных потерь. Развитием традиционного метода предскажений является метод адаптивных предскажений [5], также позволяющий синтезировать фильтры с низкой НАЧХ, но при этом имеющие лучшие характеристики вносимых потерь и потерь на отражение.

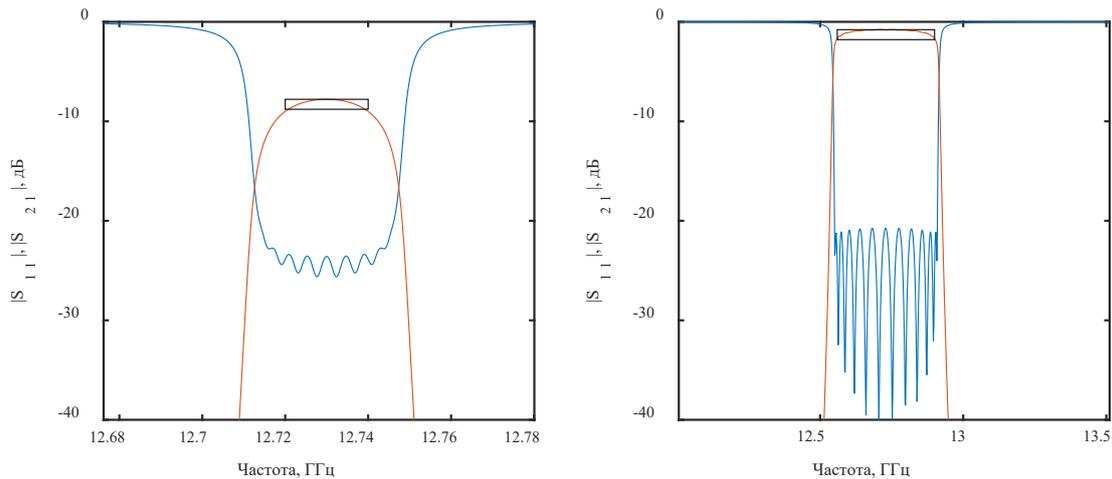


Рисунок 1. Сравнение фильтров с полосой пропускания 0.3 % (слева) и 3 % (справа)

2. Описание метода адаптивных предискажений

Метод адаптивных предискажений, как и классический метод синтеза [6], использует характеристические полиномы $F(s)$, $E(s)$, $P(s)$ для синтеза частотных характеристик фильтра. Здесь s – частотная переменная, которая равна $j\omega$ для фильтра без потерь и $s = \sigma + j\omega$ при их наличии, где σ – величина сдвига частотной переменной, определяемая формулой (1):

$$\sigma = \frac{f_0}{BW} \left(\frac{1}{Q_0} - \frac{1}{Q_{eff}} \right) \quad (1)$$

где BW – полоса пропускания фильтра, f_0 – центральная частота этой полосы, Q_0 – собственная добротность резонаторов, Q_{eff} – эффективная добротность резонаторов.

Для компенсации сдвига частотной переменной в методе адаптивных предискажений применяется предварительный сдвиг нулей полинома $E(s)$ на величину σc_i , где c_i – константа, определяющая степень искажения i -го нуля, причем c_i хотя бы в одном случае должна отличаться от 1. При $c_i > 1$ ноль будет называться пере-предискаженным (over-predistorted), $c_i < 1$ – недо-предискаженным (under-predistorted), $c_i = 1$ – предискаженным (predistorted). Величины адаптивного сдвига σc_i ограничиваются так, чтобы нули полинома $E(s)$, согласно критерию Гурвица, оставались в левой полуплоскости. Для определения начальных значений сдвигов можно использовать кусочно-непрерывные функции и в дальнейшем корректировать их до тех пор, пока не будут получены нужные характеристики.

3. Результаты синтеза

В качестве примера был синтезирован каналный фильтр 12-го порядка входного мультиплексора с полосой рабочих частот $\Delta f = 36$ МГц и центральной частотой $f_0 = 12.73$ МГц. Требования к НАЧХ фильтра представлены в таблице 1. Собственная добротность резонаторов равна 7000 и соответствует моде H_{101} прямоугольного волноводного резонатора сечением 16x8 мм.

Таблица 1. Требования к НАЧХ

Полоса частот, МГц	$f_0 \pm 11.0$	$f_0 \pm 14.0$	$f_0 \pm 16.0$	$f_0 \pm 17.5$	$f_0 \pm 18.0$
Величина НАЧХ, дБ	0.20	0.25	0.40	0.70	1.00

Для сравнения данный фильтр был получен тремя способами: классическим (фильтр А) – когда фильтры настраиваются на высокий заданный уровень обратных потерь, традиционным предсказанием (фильтр Б) и адаптивным предсказанием (фильтр В). АЧХ полученных фильтров для сравнения уровня вносимых потерь и потерь на отражение показаны на рисунке 2а (слева коэффициент передачи, справа коэффициент отражения). Максимальные значения уровней вносимых и обратных потерь синтезированных фильтров представлены в таблице 2. Для фильтров, синтезированных методами предсказаний (фильтры Б, В) $Q_{eff} = 10500$. При таком значении эффективной добротности резонаторов удается достичь низкой НАЧХ, однако оно также является предельным для фильтра Б поскольку при дальнейшем увеличении Q_{eff} начинает нарушаться критерий Гурвица, в чём можно убедиться по значению уровня обратных потерь для данного фильтра в таблице 2 и распределению нулей его полинома $E(s)$ на рисунке 3. В методе же адаптивных предсказаний дальнейшее увеличение эффективной добротности резонаторов не приводит к нарушению данного условия и тем самым позволяет получить более лучшие характеристики (фильтр Г) при том же самом наборе коэффициентов c_i . Стоит также отметить, что фильтры (В и Г), полученные методом адаптивных предсказаний, имеют относительно невысокий уровень вносимых потерь (в районе 4.5 дБ), что позволяет снизить мощность МШУ (для сравнения у фильтра Б они на уровне 24.5 дБ).

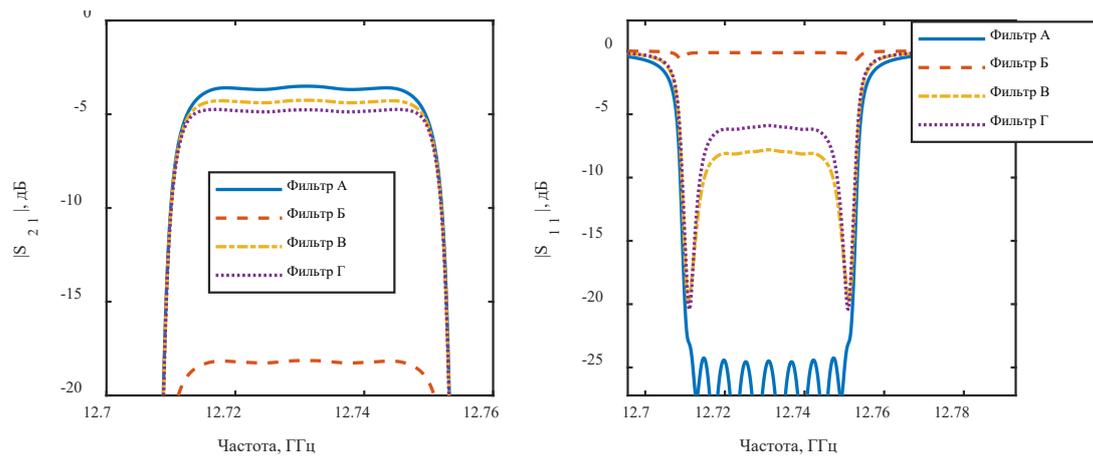
Таблица 2. Потери в фильтрах

	Классический метод	Традиционный метод предсказаний	Метод адаптивных предсказаний ($Q_{eff} = 10500$)	Метод адаптивных предсказаний ($Q_{eff} = 15000$)
Фильтр	А	Б	В	Г
Вносимые потери, дБ	3.50	18.13	4.26	4.74
Обратные потери, дБ	24.55	0.13	7.81	5.89

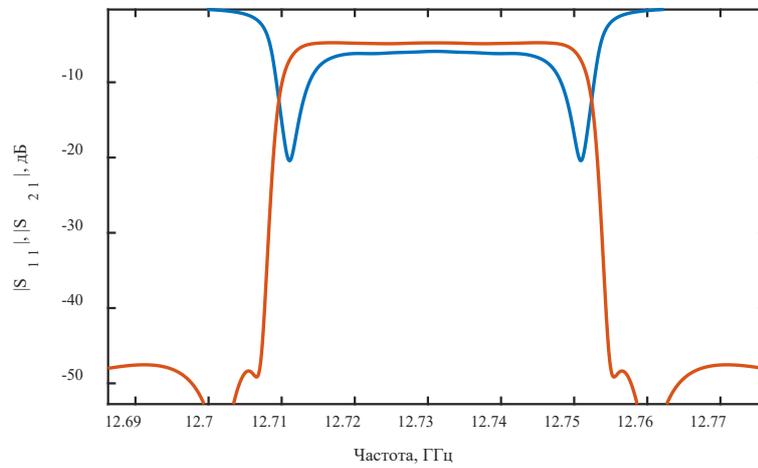
НАЧХ фильтров представлены в таблице 3. Как видно из таблицы фильтр Б обладает лучшими характеристиками неравномерности, чем фильтр В. Однако при этом первый имеет высокий уровень вносимых и низкий уровень обратных потерь. Дальнейшая настройка фильтра В, путем увеличения его Q_{eff} трансформирует его в фильтр Г, НАЧХ, которого лучше, чем у всех остальных и составляет всего 0.76 дБ в полосе частот $f_0 \pm 18.0$ МГц. АЧХ фильтра Г представлена на рисунке 2б.

Таблица 3. Неравномерности фильтров

Фильтр	$f_0 \pm 11.0$ МГц	$f_0 \pm 14.0$ МГц	$f_0 \pm 16.0$ МГц	$f_0 \pm 17.5$ МГц	$f_0 \pm 18.0$ МГц
А	0.17 дБ	0.31 дБ	0.70 дБ	1.5 дБ	1.58 дБ
Б	0.12 дБ	0.14 дБ	0.37 дБ	0.85 дБ	0.90 дБ
В	0.13 дБ	0.13 дБ	0.36 дБ	1.00 дБ	1.08 дБ
Г	0.11 дБ	0.13 дБ	0.17 дБ	0.70 дБ	0.76 дБ
Требования ГЗ	0.20 дБ	0.25 дБ	0.40 дБ	0.70 дБ	1.00 дБ



(а)



(б)

Рисунок 2. а) уровни вносимых и обратных потерь фильтров; б) итоговая АЧХ фильтра

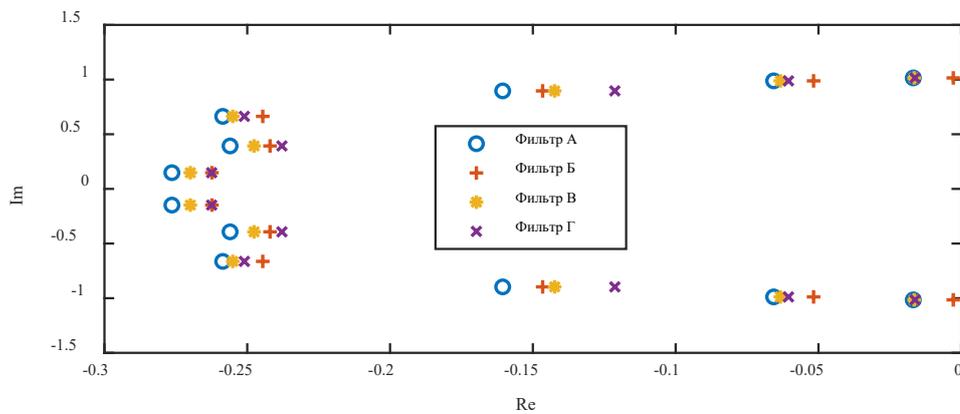


Рисунок 3. Расположение нулей полинома $E(s)$ на комплексной плоскости

4. Заключение

В работе кратко описаны особенности канальных фильтров входных

мультиплексов, синтез которых, как было показано, вызывает сложности поскольку для них требуется обеспечить малую неравномерность АЧХ в полосе пропускания при малом значении $\Delta f/f_0$. Для синтеза таких фильтров предлагается использовать метод адаптивных предискажений, который был кратко освещен в разделе 2.

Для демонстрации практической пользы в качестве примера был синтезирован каналный фильтр 12-го порядка Ку-диапазона входного мультиплексора, характеристики которого представлены в разделе 3. Помимо метода адаптивных предискажений данный фильтр для сравнения был синтезирован классическим методом и традиционным методом предискажений.

Из результатов представленных в таблицах 2 и 3 видно, что лучший результат получилось достичь методом адаптивных предискажений. У фильтра, полученного данным методом (фильтр Г) лучшие показатели НАЧХ (0.76 дБ в самом широком диапазоне частот) и в то же время он обладает наилучшими значениями вносимых потерь (4.74 дБ) и потерь на отражение (5.89 дБ). Стоит отметить, что метод адаптивных предискажений позволяет снизить требования к усилению МШУ в сравнении с традиционным методом предискажений без ухудшения НАЧХ и уровней вносимых и обратных потерь. Таким образом можно заключить, что путем подбора Q_{eff} и коэффициентов c_i метод адаптивных предискажений позволяет получать фильтры с малой неравномерностью АЧХ и приемлемым уровнем обратных и вносимых потерь, что делает его более предпочтительным для практического использования при синтезе каналных фильтров входных мультиплексов.

Список литературы

1. Belyaev V. A. et al. Implementation of cross couplings in microwave bandpass filters //Microwave and optical technology letters. – 2014. – Т. 56. – №. 9. – С. 2021-2025.
2. Kurzrok R. M. General four-resonator filters at microwave frequencies (correspondence) //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1966. – Т. 14. – №. 6. – С. 295-296.
3. Yu M. et al. Symmetrical realization for predistorted microwave filters //IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2005. – IEEE, 2005. – С. 245-248.
4. Бурлаков И.Е., Креков С.Д., Коцан Д.Ю., Бальва Я.Ф. Использование метода предискажений при проектировании фильтров с малой неравномерностью АЧХ // Успехи современной радиоэлектроники. 2023. Т. 77. № 12. С. 17–25.
5. Yu M. et al. Novel adaptive predistortion technique for cross coupled filters //IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2003. – IEEE, 2003. – Т. 2. – С. 929-932.
6. Cameron R. J. Advanced coupling matrix synthesis techniques for microwave filters //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2003. – Т. 51. – №. 1. – С. 1-10.