

Дёмочкин Андрей Игоревич,
инженер-конструктор, АО ТНИИС,
г. Таганрог Ростовская область

Зикий Анатолий Николаевич,
с.н.с., к.т.н., АО ТНИИС,
г. Таганрог Ростовская область,

ПОЛОСОВОЙ ФИЛЬТР ИЗ ОТРЕЗКОВ КАБЕЛЯ

Аннотация: Проведено моделирование и экспериментальное исследование полосового фильтра, изготовленного из отрезков коаксиального кабеля. Моделирование фильтра проводилось в программе "Microwave Office". Эксперимент проводился с помощью векторного анализатора цепей типа PNA-L. В качестве результатов представлены:

- Схема электрическая принципиальная;
- Фото макета;
- Модель в Microwave Office (MWO);
- Амплитудно-частотная характеристика из MWO;
- Экспериментальная амплитудно-частотная характеристика для двух вариантов длины кабелей.

Достигнуты следующие параметры фильтра:

- Центральная частота полосы пропускания 148 МГц;
- Ширина полосы пропускания 15,872 МГц;
- Потери в полосе пропускания 3 дБ;
- Потери на частоте 167 МГц 30 дБ;
- Волновое сопротивление 50 Ом.

Ключевые слова: полосовой фильтр; коаксиальный кабель; моделирование; эксперимент; амплитудно-частотная характеристика.

Введение

Фильтры коаксиального типа широко используются в приёмно-передающей и измерительной технике. Их описанию и исследованию посвящены многочисленные публикации, в том числе монографии [1, 2], учебные пособия [3], статьи [4-7], однако наибольшее внимание таким фильтрам уделяется на радиолюбительских форумах. Это связано с простотой изготовления таких фильтров.

Целью данной работы является получение амплитудно-частотных характеристик коаксиального фильтра методом моделирования и эксперимента. Объектом исследования является фильтр, состоящий из двух полуволновых резонаторов [4].

К фильтру предъявляются следующие требования:

- Центральная частота полосы пропускания 146 МГц;
- Ширина полосы пропускания не менее 4 МГц;
- Потери в полосе пропускания не более 3 дБ;
- Потери на частоте 167 МГц не менее 30 дБ;
- Волновое сопротивление 50 Ом.

Мешающими сигналами в этом диапазоне частот являются сигналы железнодорожной связи, сигналы пейджиговой связи и др.



Схема и конструкция

Принципиальная схема фильтра приведена на рисунке 1. Фильтр состоит из двух полуволновых резонаторов. Первый полуволновый резонатор состоит из отрезков коаксиала W2 + W3. Второй резонатор состоит из отрезков коаксиала W5 + W6. Вход и выход имеют частичное включение в резонаторы. Связь между резонаторами осуществляется через отрезок коаксиала W4, длина которого около $\lambda/4$ или $\frac{3}{4}\lambda$. Из этого рисунка видно, что фильтр состоит из 7 отрезков коаксиального кабеля. Геометрические и электрические параметры кабеля приведены в таблице 1. Длины взяты из статьи [4]. Для изготовления пяти резонаторов W2 – W6 используется жёсткий кабель в сплошной медной трубке типа РК50-2-29 [8]. Проверочный расчёт волновых сопротивлений кабеля даёт [1]:

$$Z_0 = \frac{138 \log_{10} \frac{D}{d}}{\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (1)$$

где D – внутренний диаметр медной трубки, равный 2,2 мм [8];
 d – диаметр центральной жилы коаксиала, равный 0,68 мм [8];
 $\sqrt{\epsilon_r} = 1,42$ – коэффициент укорочения.

$$\text{Тогда } Z_0 = \frac{138 \left(\frac{2.2}{0.68} \right)}{1.42} = 49,555 \approx 50 \text{ Ом.} \quad (2)$$

Для уменьшения габаритов фильтра его длинные резонаторы целесообразно скрутить в виде спирали.

В качестве соединителей X1, X2 предлагается использовать две кабельные вилки CP50-724 или CP50-726.

Проверочный расчёт длины полуволнового резонатора можно провести по следующей формуле:

$$\frac{\lambda_B}{2} = \frac{30}{2f\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (3)$$

где f – частота настройки фильтра в ГГц.

Тогда

$$\frac{\lambda_B}{2} = \frac{30}{2 \cdot 0,146 \cdot 1,42} = 72,35 \text{ см.} \quad (4)$$

Таким образом, суммарная длина отрезков коаксиала W2 и W3 должна быть равна 72 см.

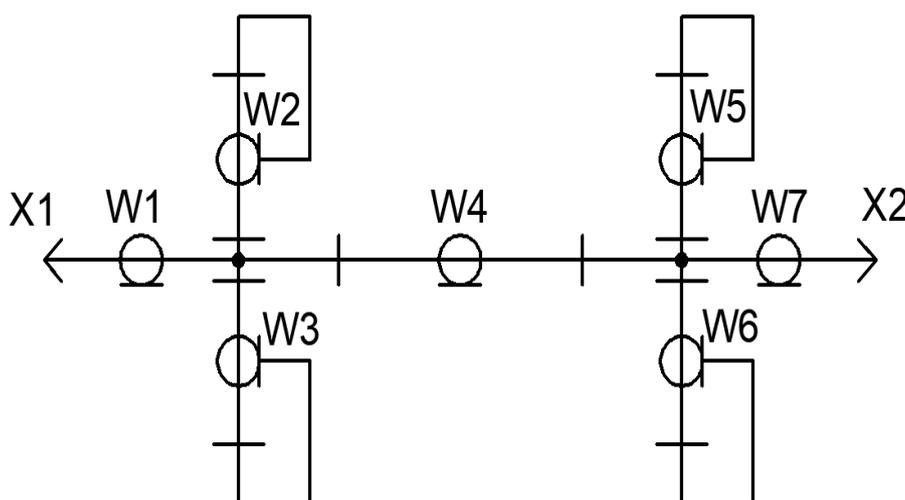


Рис. 1. Принципиальная схема фильтра



Таблица 1

Геометрические размеры отрезков кабеля				
Обозначение	Длина, мм	Волновое сопротивление, Ом	Отношение диаметров, D/d	Наименование
W1	–	50	2,2/0,68	Регулярная линия
W2	660	50	2,2/0,68	Резонатор
W3	41	50	2,2/0,68	Резонатор
W4	521	50	2,2/0,68	Резонатор
W5	660	50	2,2/0,68	Резонатор
W6	42	50	2,2/0,68	Резонатор
W7	–	50	2,2/0,68	Регулярная линия
$\sqrt{\varepsilon_r}$	1,42			Коэффициент укорочения
X1, X2	Вилка CP50-724 или CP50-726			Соединитель
$\tan \delta$	$3 \cdot 10^{-4}$ [8, стр. 133]			Тангенс угла диэлектрических потерь в материале фторопласт Ф4Д

На рисунке 2 можно видеть фото макета фильтра. Из этого рисунка видно, что он изготовлен с применением кабеля типа РК50-2-22 по ГОСТ 11326.74-79. Этот кабель имеет характеристики, близкие к характеристикам РК50-20-29.



Рис. 2. Фото фильтра из отрезков коаксиального кабеля



Моделирование

Моделирование фильтра проводилось в программе Microwave Office (MWO) [9]. Модель фильтра из MWO можно видеть на рисунке 3. Амплитудно-частотная характеристика из MWO показана на рисунке 4. При этом, длина отрезка W4 была увеличена так, как показано на рисунке 3: от 381 до 521 мм.

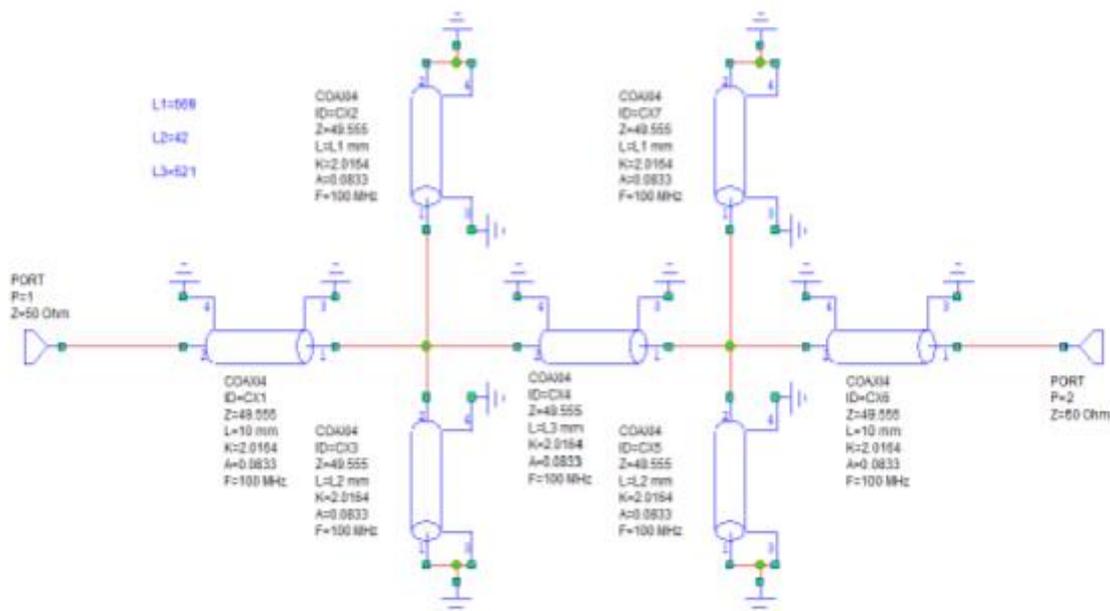


Рис. 3. Модель фильтра в MWO

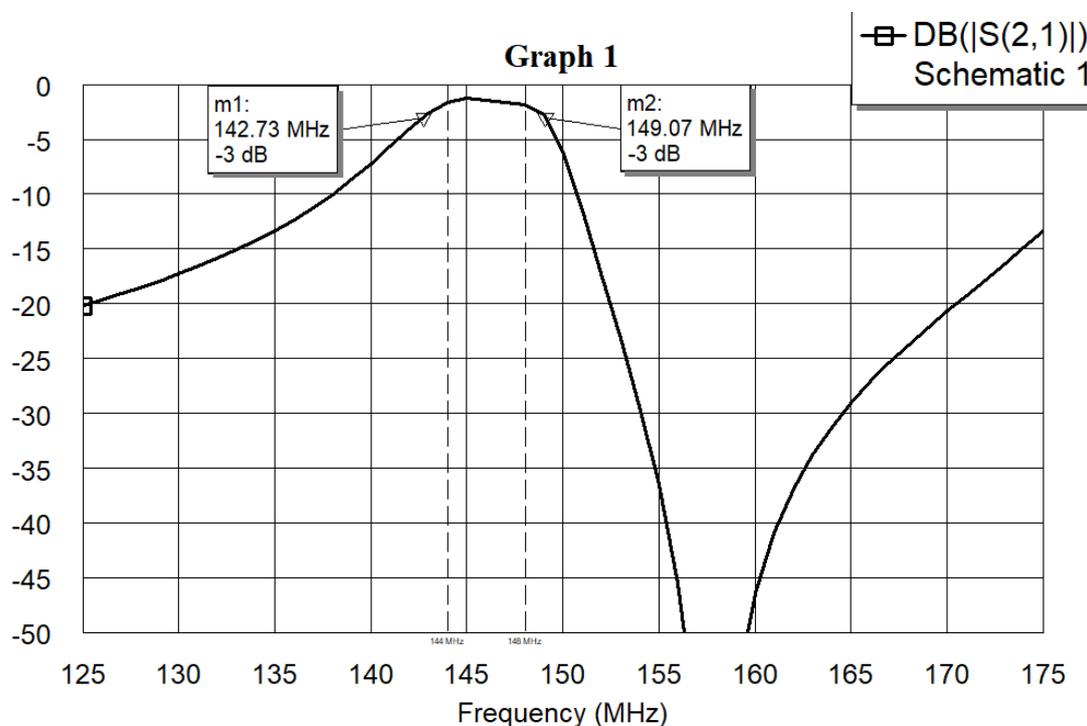


Рис. 4. АЧХ фильтра в MWO



Эксперимент

Эксперимент проводился с помощью векторного анализатора цепей типа PNA-L. Амплитудно-частотная характеристика фильтра (АЧХ, S21) приведена на рисунке 5 в полосе от 100 до 175 МГц. Из этого рисунка видно, что все контрольные точки АЧХ смещены вниз. После этого были подрезаны три отрезка кабеля, а именно W2, W4, W5. Полосы пропускания и режекции при этом сместились вверх, как показано на рисунке 6.

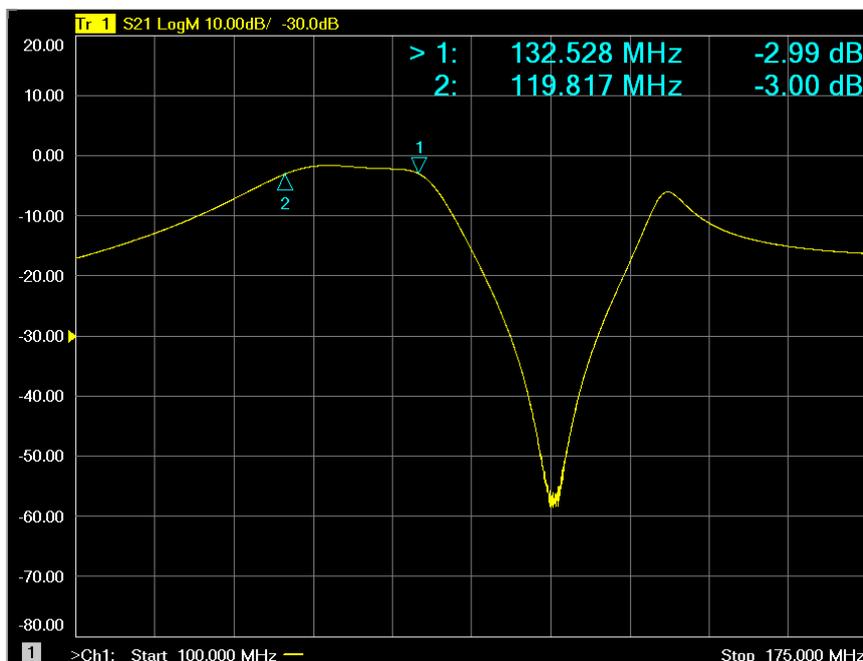


Рис. 5. АЧХ фильтра в ближней зоне до подрезания резонаторов

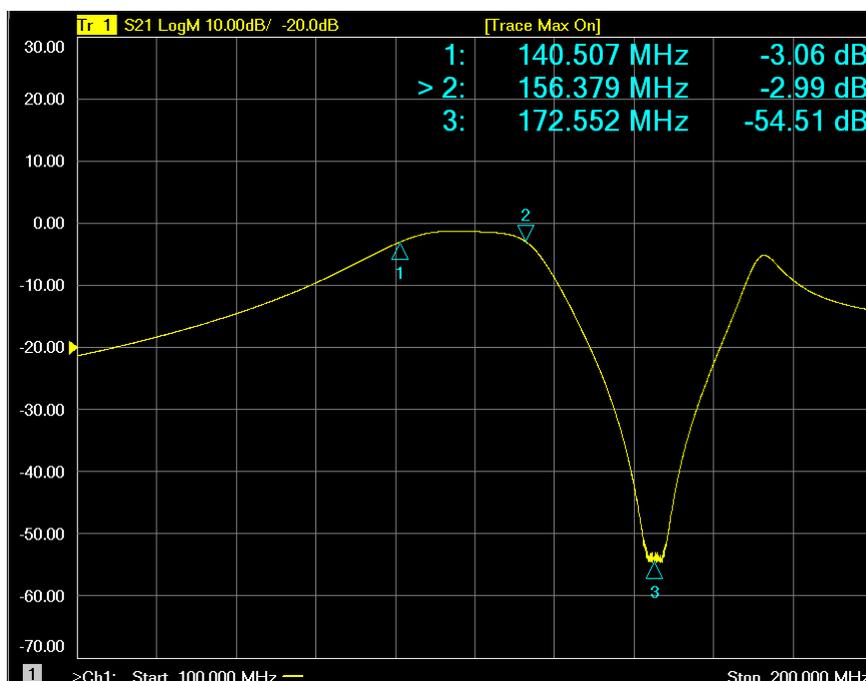


Рис. 6. АЧХ фильтра в ближней зоне после подрезания резонаторов

Рисунки 5 и 6 позволяют сформулировать количественные выводы.



Выводы

Ниже в таблице 2 приводится сравнение заданных и достигнутых параметров фильтра.
Таблица 2

Основные параметры фильтра

Наименование	Задано	Модель	Измерено
Центральная частота полосы пропускания, МГц	146	145,9	148,443
Ширина полосы пропускания на уровне минус 3 дБ, МГц	4	6,34	15,872
Потери на частоте 167 МГц, дБ	30	35	30
Волновое сопротивление, Ом	50	50	50

Из этой таблицы видно, что все требования к фильтру выполняются. Фильтр рекомендуется использовать в приёмном тракте для радиоловительской связи. Недостатком данной схемы и конструкции следует считать отсутствие органов настройки.

Список литературы:

1. Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Том 1. – М.: Связь, 1971. – 440 с.
2. Алексеев Л.В., Знаменский А.Е., Лоткова Е.Д. Электрические фильтры метрового и дециметрового диапазонов. – М.: Связь, 1976. – 280 с.
3. Зикий А.Н., Помазанов А.В., Андрианов А.В., Кочубей А.С. Фильтры СВЧ в телекоммуникационных системах. Учебное пособие. Ростов-на-Дону – Таганрог, Изд-во ЮФУ, 2024.
4. Z. Lau, W1VT. Полосовой фильтр для диапазона 2м. A No-Tune 2-meter Bandpass Filter. QST, 2000, №5. rfanat.ru/s5/urt-mb01.html
5. Андрианов А.В., Губарев Д.Е., Зикий А.Н., Сперанская Г.В. Коаксиальный фильтр нижних частот дециметрового диапазона. В сб. "Тенденции развития науки и образования", 2019. №53-3, с. 54-58.
6. Зикий А.Н., Кочубей А.С. Полосовые фильтры коаксиального типа. В книге: Развитие науки в эпоху цифровизации: проблемы, тенденции, прогнозы. Монография. Петрозаводск, 2019, с. 238-246.
7. Андрианов А.В., Сленчковский В.Г., Зикий А.Н., Баталова Е.А. Узкополосный трубчатый фильтр дециметровых волн. В сборнике "Инновационное развитие современной науки: теория, методология, практика". Сборник статей МНПК, 2020, с. 189-195
8. Радиочастотные кабели. / Гальперович Д.Я., Павлов А.А., Хренков Н.Н. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
9. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office. – М.: Солон-Пресс, 2003. – 496 с.

