



## Моделирование и экспериментальное исследование трактового фильтра сантиметрового диапазона

А.В. Андрианов<sup>1</sup>, С.А. Быков<sup>1</sup>, А.Н. Зикий<sup>2</sup>, А.И. Пустовалов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Таганрогский научно-исследовательский институт связи, Таганрог

<sup>2</sup>Южный Федеральный Университет, Таганрог

**Аннотация:** в статье проведено моделирование и экспериментальное исследование фильтра сантиметрового диапазона на встречных стержнях. В полосе пропускания от 4 до 8 ГГц потери составили не более 1,5 дБ. Заграждение при отстройке вниз на 1 ГГц не менее 50 дБ. Заграждение при отстройке вверх на 2 ГГц не менее 70 дБ. Имеется ложная полоса пропускания 16,6 – 21,5 ГГц.

**Ключевые слова:** фильтр на встречных стержнях, моделирование, эксперимент, сантиметровый диапазон волн.

К фильтру предъявляются следующие требования:

- нижняя граничная частота полосы пропускания  $F_n = 4$  ГГц;
- верхняя граничная частота полосы пропускания  $F_v = 8$  ГГц;
- потери в полосе пропускания не более 3 дБ;
- заграждение на частоте 3 ГГц не менее 50 дБ;
- заграждение на частоте 10 ГГц не менее 60 дБ;
- заграждение в полосе от 10 до 15 ГГц не менее 50 дБ;
- волновое сопротивление входа и выхода 50 Ом;

Перечисленные выше требования были реализованы в фильтре на встречных стержнях с 13 резонаторами. Расчет проводился по книге [1]. Результаты расчета приведены в таблице 1 (второй столбец) для резонаторов прямоугольного сечения.

Таблица № 1

## Геометрические размеры фильтра

Параметр фильтра	Расчет, кв. мм	Моделирование, кв.мм	Макет, ø мм	Примечание
W1, W13	2,16	2,16	2,16	Ширина резонатора
W2, W12	1,4	1,4	1,4	
W3 – W11	1,7	1,7	1,7	
S1, S12	1,45	1,0	1,45	Зазор между резонаторами
S2, S11	1,45	1,45	1,45	
S3 – S10	1,84	2,0	1,84	
L1 = L13	12,5	11,8	10,2	Длина резонатора
L2 = L12	12,5	11,8	10,8	
L3 ... L11	12,5	11,8	10,2	
B	10	10	10	Расстояние между экранами
L	-	11,8	11	Расстояние между стенками
Er	1	1	1	Диэлектрическая проницаемость
T	-	1,9	-	Толщина резонаторов

На следующем этапе проводилось моделирование рассчитанного фильтра в пакете прикладных программ AWRDesignEnvironment [2]. Результаты расчета использовались как первое приближение для моделирования. После подстройки длины резонаторов и зазоров между ними были минимизированы потери в полосе пропускания и неравномерность потерь в полосе пропускания. Геометрические размеры фильтра после оптимизации отражены в таблице 1 и на рисунке 1.

Схематехническая модель фильтра приведена на рисунке 1.

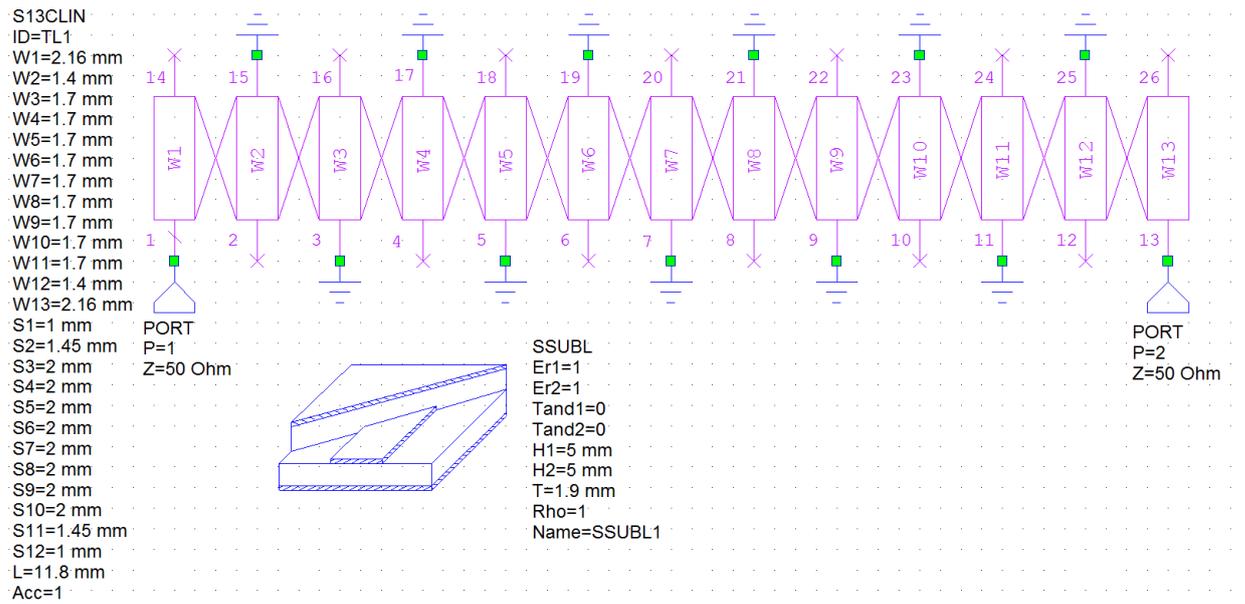


Рис. 1. – Схематехническая модель фильтра в AWRDE

Результаты моделирования показаны на рисунке 2.

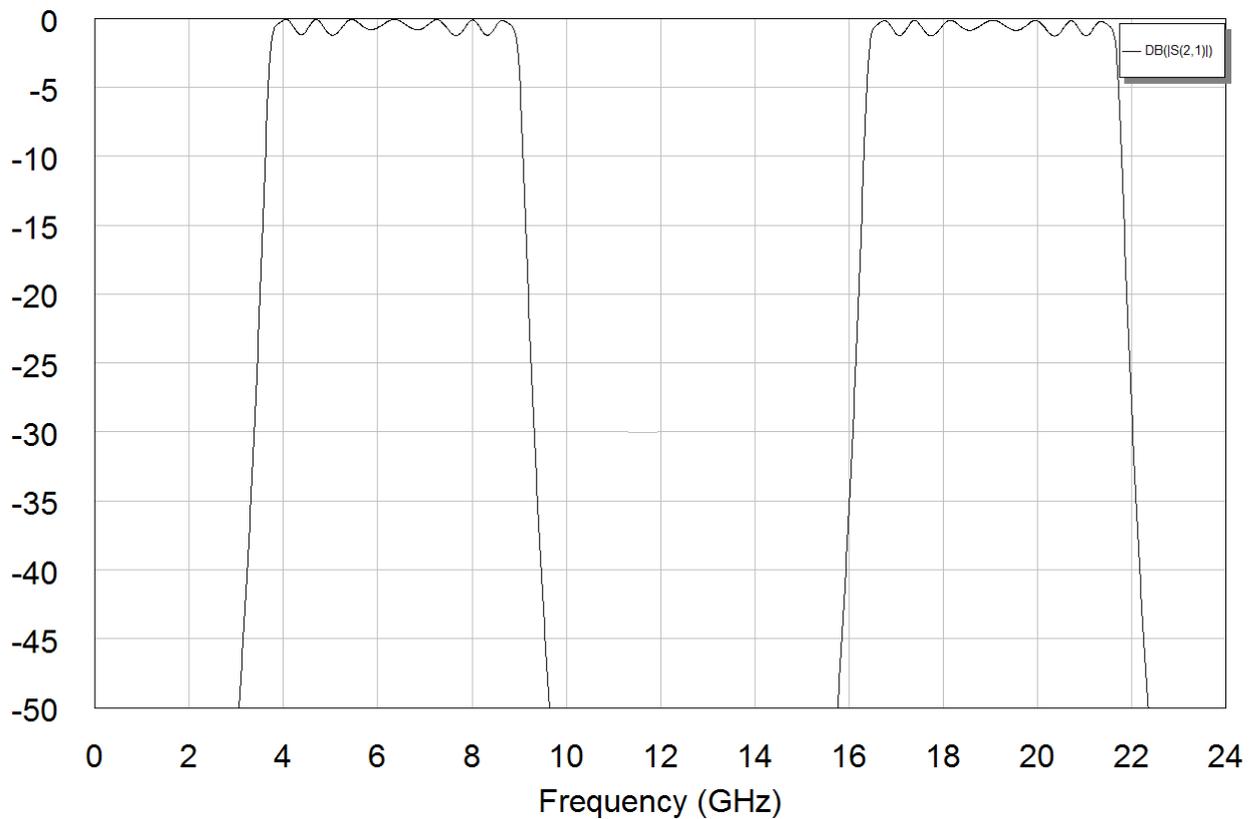


Рис. 2. – Расчетная амплитудно-частотная характеристика фильтра

Экспериментальное исследование фильтра проводилось на макете, геометрические размеры которого приведены в таблице 1 (четвертый столбец). В макете использовались круглые резонаторы как более технологичные.

Корпус фильтра имеет размеры 31x78 мм. Детали корпуса, соединителей, резонаторов изготовлены из латуни ЛС59. Для защиты от внешних воздействующих факторов корпус и резонаторы покрыты серебром, а соединители – никелем. Крышка крепится к корпусу при помощи 7 винтов М3. Крепление 11 резонаторов осуществляется с помощью стопорных винтов М2.

Эксперимент проводился на установке, содержащей анализатор цепей типа N5234А компании Agilent [3], комплект кабелей и переходов. Результаты эксперимента в виде АЧХ фильтра приведены на рисунке 3 для полосы анализируемых частот от 10 МГц до 24 ГГц.

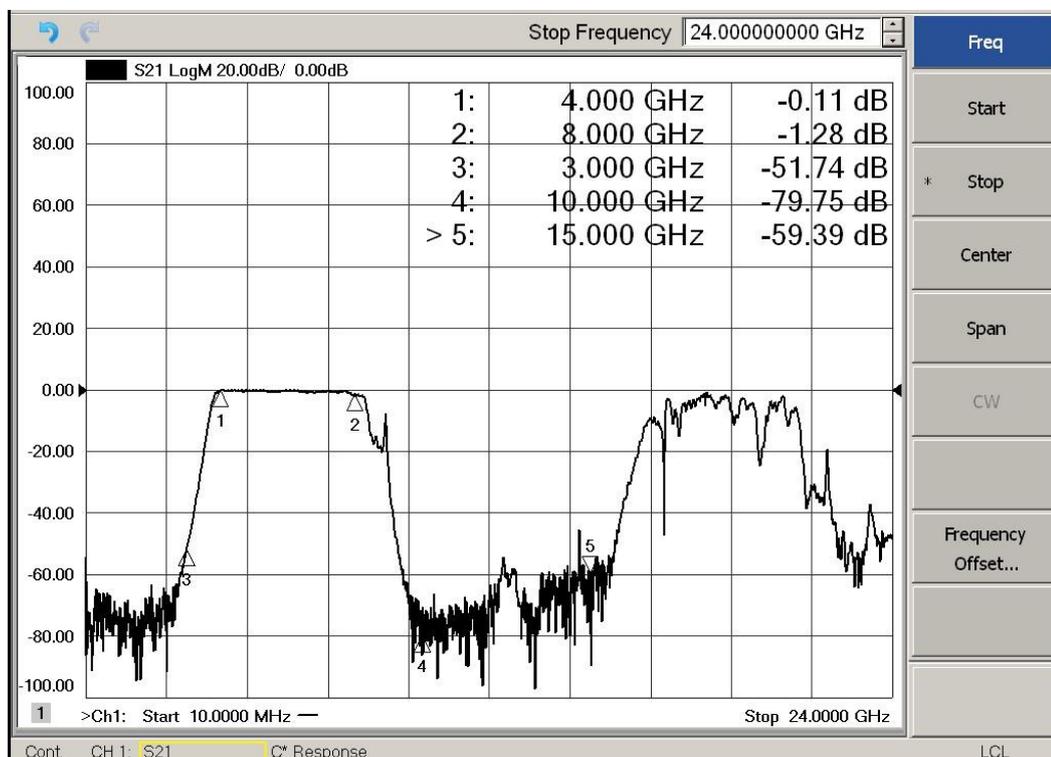


Рис. 3. – Экспериментальная амплитудно-частотная характеристика фильтра



Из рисунка видно, что потери в полосе пропускания 4 – 8 ГГц не превышают 1,5 дБ. Заграждение при отстройке вниз на 1 ГГц (на частоте 3 ГГц) составляет более 50 дБ. Заграждение при отстройке вверх на 2 ГГц (на частоте 10 ГГц) составляет более 70 дБ. В полосе 16800 – 21 ГГц имеется ложная полоса пропускания. На верхнем скате АЧХ имеется узкий всплеск.

Таблица № 2

### Параметры фильтра

Наименование параметра, размерность	Задано	Получено в модели	Получено в эксперименте
$F_n$ , ГГц	4	4	4
$F_v$ , ГГц	8	9	8
Потери в полосе пропускания, не более, дБ	3	1,2	1,28
Потери при отстройке $F_n-1$ ГГц, дБ	50	> 60	> 50
Потери при отстройке $F_v+2$ ГГц, дБ	50	> 60	> 70
Потери на второй гармонике, дБ	50	> 60	> 50
Волновое сопротивление входа и выхода, Ом	50/50	50/50	50/50
Граничные частоты ложной полосы пропускания, ГГц	–	16,5 – 21,5	

#### Выводы:

1. Проведено моделирование и экспериментальное исследование фильтра с полосой 4 – 8 ГГц. Фильтр построен на встречных стержнях с 13 резонаторами.
2. Достигнуты параметры, приведенные в таблице 2.
3. Исследованный фильтр может найти применение в приемниках СВЧ [4 – 9].
4. При выполнении работы был полезен предыдущий опыт авторов [10].

### Литература



1. Леонченко В.П., Фельдштейн А.Л., Шепелянский Л.А. Расчет полосковых фильтров на встречных стержнях. Справочник. – М.: Связь, 1975. – 312 с.
  2. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office. – М.: Солон-Пресс, 2003. – 496 с.
  3. Keysight Technologies. Контрольно-измерительные решения. Каталог 2015. М.: Keysight Technologies. – 476 с.
  4. TSUI J.B.Y. Microwave Receivers with Electronic Warfare Applications. Wiley-Interscience Publication, 1986. – 460 p.
  5. Пустовалов А.И. Двухканальное приемное устройство СВЧ диапазона. Инженерный вестник Дона, 2010, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2010/195](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2010/195).
  6. Шурховецкий А.Н. Многоканальная частотно-избирательная система СВЧ диапазона на основе направленных фильтров бегущей волны. Инженерный вестник Дона, 2010, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2010/292](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2010/292).
  7. Справочник по радиолокации в 2-х книгах. Книга 1. Под ред. М.И. Скольника. – М.: Техносфера, 2014. – 672 с.
  8. Куприянов А.И., Сахаров А.В. Теоретические основы радиоэлектронной борьбы. Учебное пособие. – М.: Вузовская книга, 2007. – 356 с.
  9. R.K. Mongia, I.J. Bahl, P. Bhartia, and J. Hong RF and Microwave Coupled-Line Circuits, Second Edition. Artech House, 2007. – 578 p.
  10. Андрианов А.В., Зикий А.Н., Пустовалов А.И. Моделирование экспериментальное исследование трактовое фильтра на встречных стержнях. Инженерный вестник Дона, 2016, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/22N4y16/3701](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/22N4y16/3701).
-



## References

1. Leonchenko V.P., Feldshtein A.L., Shepelyansky L.A. Raschet poloskovih filtrov na vstrechnih sterzhnyah. Spravochnik. [Calculation of the strip-line filters on quarter-wave resonators. Handbook]. M. Svyaz, 1975. 312 p.
2. Razevig V.D., Potapov Y.V., Kurushin A.A. Proektirovanie SVCH ustrojstv s pomoschyu Microwave Office [Designing of microwave devices using Microwave Office]. M.: Solon-Press, 2003.496 p.
3. Keysight Technologies. Kontrolno – izmeritelnye resheniya. Catalog 2015. [Instrumentation solutions. Catalog 2015]. M. Keysight Technologies. 476p.
4. TSUI J.B.Y. Microwave Receivers with Electronic Warfare Applications. Wiley-Interscience Publication, 1986.460 p.
5. Pustovalov A.I. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2010, №2.URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2010/195](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2010/195).
6. Shurkhovetskiy A.N. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2010, №4.URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2010/292](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2010/292).
7. Skolnik M.Spravochnik po radiolokacii [Radar Handbook]. M.:Technosfera, 2014.672 p.
8. Kupriyanov A.I., Saharov A.V. Teoreticheskiye osnovy radioelektronnoy bor'by. Uchebnoe posobie [Theoretical bases of electronic warfare. The manual]. M.: Vuzovskayakniga, 2007. 356 p.
9. R.K. Mongia, I.J. Bahl, P. Bhartia, and J. Hong RF and Microwave Coupled-Line Circuits, Second Edition. Artech House, 2007. 578 p.
10. Andrianov A.V., Zikiy A.N., Pustovalov A.I. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №4.URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/22N4y16/3701](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/22N4y16/3701).