

文章编号: 2096-1618(2022)02-0144-04

# 基于多模谐振器的超宽带滤波器设计

莫梓续, 李荣强

(成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

**摘要:** 基于多模谐振器理论设计一款结构新颖的超宽带 (ultra wide band, UWB) 带通滤波器, 通过在传统的双模谐振器上加载阶跃阻抗枝节得到。该滤波器尺寸为  $23.8 \text{ mm} \times 9.7 \text{ mm}$ , 测试的 3 dB 带宽范围为  $2.60 \sim 10.62 \text{ GHz}$ , 相对带宽约为 121%, 中心频率  $6.61 \text{ GHz}$  处的插入损耗为  $-2.1 \text{ dB}$ , 通带内群延时小于  $0.78 \text{ ns}$ 。此外, 滤波器的上下阻带均能产生传输零点, 有效地提高了滤波器的频率选择性。该滤波器适宜用在超宽带系统中。

**关键词:** 带通滤波器; 多模谐振器; 超宽带; 传输零点

**中图分类号:** TN713.5

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcuit.2022.02.005

## 0 引言

美国联邦通信委员 (federal communications commission, FCC) 在 2002 年批准将  $3.1 \sim 10.6 \text{ GHz}$  频段用于商业通讯之后, 超宽带通信技术便成为无线通信领域的竞争热点<sup>[1]</sup>。超宽带系统具有低功耗、高速率、保密性高等优势, 而滤波器作为该系统中的重要器件, 设计高性能且满足小型化要求的超宽带滤波器便成为近年研究热点之一。基于多模谐振器的超宽带滤波器最早在 2005 年由 Lei Z 等<sup>[2]</sup>提出, 其结构由一个阶跃阻抗谐振器和平行耦合线组成, 可以通过调节谐振器上加载的开路枝节调整通带宽度。除此之外还有学者提出了环谐振器<sup>[3]</sup>、阶梯型谐振器<sup>[4]</sup>等结构, 都为研究小型化高性能超宽带滤波器提供了新的设计思路。

研究利用奇偶模分析法对提出的多模谐振器进行分析, 设计一款基于多模谐振器的 UWB 带通滤波器。该滤波器整体性能良好, 带内插损较小, 中心频率  $6.61 \text{ GHz}$ , 相对带宽达到 121%。

## 1 多模谐振 UWB 滤波器设计

### 1.1 多模谐振器设计

研究采用传统双模谐振器<sup>[5]</sup>和阶跃阻抗枝节相结合的方式, 得到一个多模谐振器。传统双模谐振器结构图如图 1 所示, 它由一根长为  $L$  宽为  $W$  的枝节和一根长为  $L_1$  宽为  $W_1$  的短路枝节构成, 可以在  $3.1 \sim 10.6 \text{ GHz}$  超宽

带频段内分别产生一个偶模谐振和奇模谐振。此外, 通过调节枝节  $L$  和  $L_1$  的长度控制两种谐振模式产生的位置。

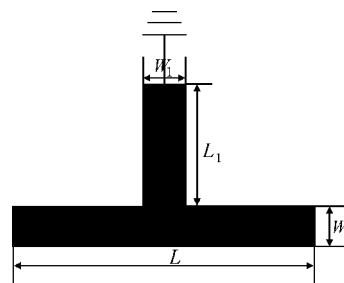


图1 双模谐振器结构图

由于两个谐振模式不足以支持滤波器获得较大的带宽, 因此继续加载枝节以获得更多的谐振模式, 同时折叠双模谐振器的枝节使结构更紧凑。最终得到的多模谐振器结构如图 2 所示。它在图 1 所示的双模谐振器的基础上额外产生了一个偶模振, 总共具有 3 个谐振模式。

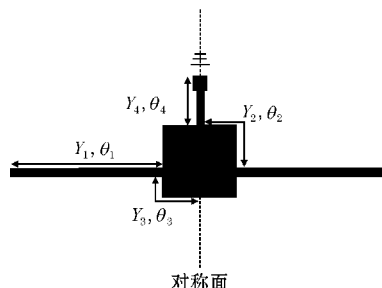


图2 多模谐振器结构图

图 2 中  $Y$  代表各枝节的特性导纳,  $\theta$  代表其等效电长度。从图 2 可以看出该谐振器为水平对称结构, 因此可以使用奇偶模分析法<sup>[6]</sup>对此结构进行分析, 其等效电路图如图 3 所示。

收稿日期: 2021-06-11

基金项目: 四川省科技厅重点研发资助项目 (2019YFG0087); 教育部产学研合作协同育人资助项目 (202002133011)

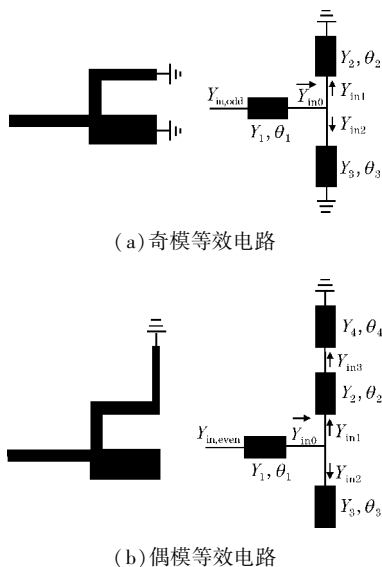


图3 谐振器等效电路模型

图3中  $Y_{in,odd}$  指在奇模激励下的输入导纳,  $Y_{in,even}$  指在偶模激励下的输入导纳。在奇模激励下对称面相当于短路,等效电路如图3(a)所示,奇模导纳可表示为

$$Y_{in,odd} = Y_1 \frac{Y_{in0} + jY_1 \tan \theta_1}{Y_1 + jY_{in0} \tan \theta_1} \quad (1)$$

其中:

$$Y_{in0} = Y_{in1} + Y_{in2} = -jY_2 \cot \theta_2 - jY_3 \cot \theta_3 \quad (2)$$

依据谐振条件  $Y_{in,odd} = 0$ , 将式(2)代入式(1)可得:

$$-jY_2 \cot \theta_2 - jY_3 \cot \theta_3 + jY_1 \tan \theta_1 = 0 \quad (3)$$

在偶模激励下,结构对称面相当于开路,等效电路如图3(b)所示,偶模导纳可表示为

$$Y_{in,even} = Y_1 \frac{Y_{in0} + jY_1 \tan \theta_1}{Y_1 + jY_{in0} \tan \theta_1} \quad (4)$$

其中:

$$Y_{in0} = Y_{in1} + Y_{in2} \quad (5)$$

$$Y_{in1} = Y_2 \frac{Y_{in3} + jY_2 \tan \theta_2}{Y_2 + jY_{in3} \tan \theta_2} \quad (6)$$

$$Y_{in2} = jY_3 \tan \theta_3 \quad (7)$$

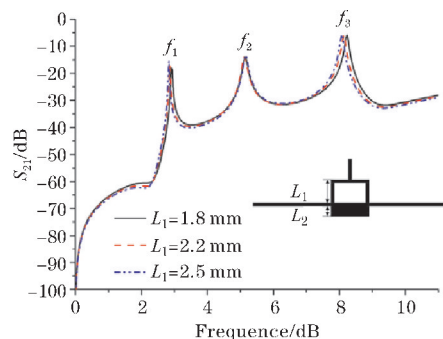
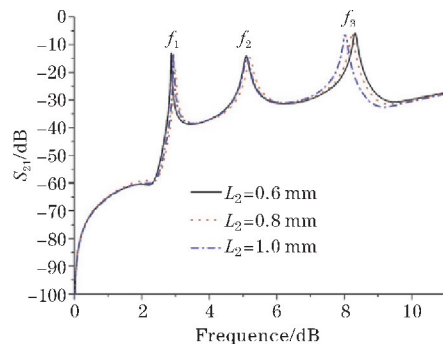
$$Y_{in3} = jY_4 \tan \theta_4 \quad (8)$$

根据谐振条件  $Y_{in,even} = 0$ , 将式(5)~(8)代入式(4)得:

$$jY_1 \tan \theta_1 + jY_3 \tan \theta_3 + Y_2 \frac{jY_4 \tan \theta_4 + jY_2 \tan \theta_2}{Y_2 - Y_4 \tan \theta_2 \tan \theta_4} = 0 \quad (9)$$

从式(3)和式(9)可以看出,通过调节对应枝节的长度和宽度控制奇偶模谐振模式在通带内产生的位置。通过电磁仿真软件 HFSS 对枝节  $L_1$  和  $L_2$  进行参数仿真,在弱耦合条件下得到的  $S_{21}$  曲线如图4和图5所示。从图中可以看出在  $L_2$  的长度保持不变的情况下,随着  $L_1$  长度的增加,谐振模式  $f_1$  和  $f_3$  向频率低端移动,  $f_2$  基本保持不变;保持  $L_1$  的长度不变,随着  $L_2$

长度的增加谐振模式  $f_3$  向频率低端移动,而谐振模式  $f_1$  和  $f_2$  基本保持不变。

图4 枝节  $L_1$  长度对谐振位置的影响图5 枝节  $L_2$  长度对谐振位置的影响

基于以上分析,经过高频电磁仿真软件的仿真与优化,最终确定谐振器中3个谐振模式的频率  $f_1$   $f_2$   $f_3$  分别为2.8 GHz、5.1 GHz、8.3 GHz。它们均匀分布在通带内有助于滤波器得到较宽的通带,同时也能使通带内的插入损耗趋于平坦。

## 1.2 UWB 滤波器设计

在确定谐振器结构后,对其选用平行耦合线馈电方式和缺陷地结构以加强耦合,结构如图6所示。该滤波器由带有缺陷地结构的平行耦合线和多模谐振器构成。平行耦合线采用的是叉指耦合的方式,由两根相同且平行的微带线分布在谐振器枝节的两侧。为加强耦合,在叉指耦合线下方地面上刻蚀一个矩形的缺陷地结构,可以减小耦合线与地面的耦合,加大其与谐振器之间的耦合强度,从而优化滤波器的性能。滤波器的带宽可以通过改变平行耦合线的长度  $L_1$  来调整,随着  $L_1$  长度增加,滤波器的带宽减小,如图7所示。

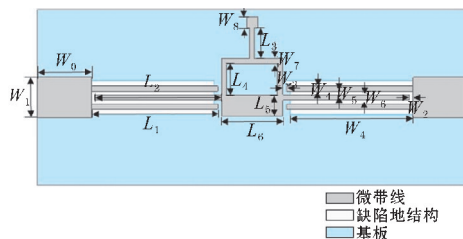


图6 超宽带滤波器结构

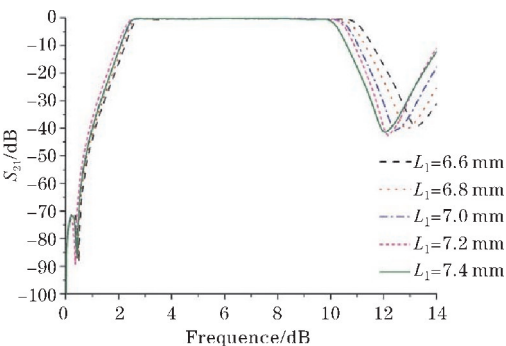
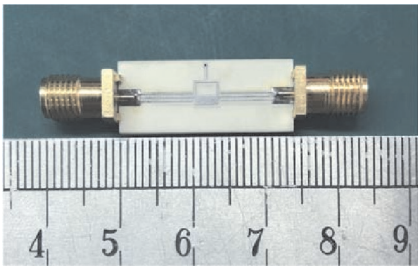
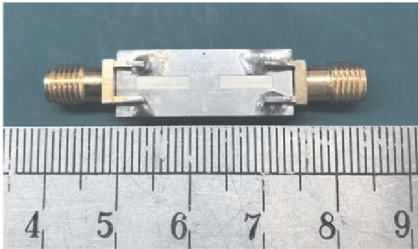


图 7 枝节  $L_1$  长度对滤波器通带的影响

通过电磁仿真软件 HFSS 的仿真与优化,最终确定了滤波器的结构参数。其中  $L_1=7\text{ mm}$ ,  $L_2=8\text{ mm}$ ,  $L_3=1.7\text{ mm}$ ,  $L_4=1.7\text{ mm}$ ,  $L_5=0.9\text{ mm}$ ,  $L_6=3.4\text{ mm}$ ,  $L_7=8.2\text{ mm}$ ,  $W_0=3\text{ mm}$ ,  $W_1=2.23\text{ mm}$ ,  $W_2=0.2\text{ mm}$ ,  $W_3=0.2\text{ mm}$ ,  $W_4=0.3\text{ mm}$ ,  $W_5=0.2\text{ mm}$ ,  $W_6=0.3\text{ mm}$ ,  $W_7=0.3\text{ mm}$ ,  $W_8=0.6\text{ mm}$ 。基板材料为 Rogers 4350, 相对介电常数为 3.48, 损耗角正切为 0.004, 板厚 1 mm。加工后的实物如图 8 所示。



(a) 正面



(b) 背面

图 8 实物加工图

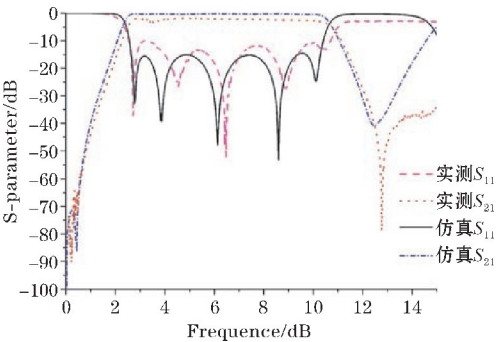
表 1 中  $\Delta f_3\text{ dB}$  与  $\Delta f_{30}\text{ dB}$  分别指滤波器 3 dB 带宽与 30 dB 带宽。

表 1 与其他类似的超宽带带通滤波器的性能比较

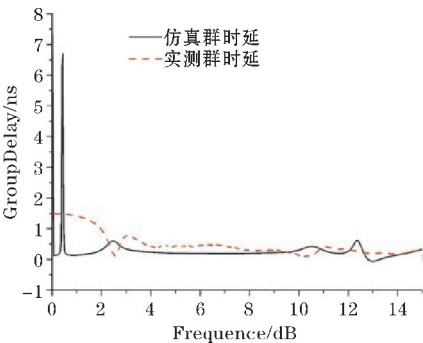
|        | 插入损耗/dB | 回波损耗/dB | 相对带宽/% | 通带选择因子: $\Delta f_3\text{ dB}/\Delta f_{30}\text{ dB}$ | 尺寸/mm       |
|--------|---------|---------|--------|--|-------------|
| 文献[7]  | 0.75    | 10.7    | 122    | 0.910  | 36.2×11.7   |
| 文献[8]  | 1.1     | 11      | 89     | 0.910  | 18.2×7      |
| 文献[9]  | 1.6     | 12      | 110    | 0.920  | 16×14.5     |
| 文献[10] | 0.3     | 13      | 92     | 0.870  | 24.3×8      |
| 文献[11] | 0.5     | 16      | 120    | 0.94   | 15.99×10.22 |
| 文献[12] | 1       | 14      | 110    | 0.682  | /           |
| 文献[13] | 0.8     | 16.5    | 102    | 0.685  | 8.1×6.2     |
| 本研究    | 2.1     | 10      | 121    | 0.782  | 23.8×9.7    |

使用矢量网络分析仪 Agilent N5235A 对滤波器实物进行测量,得到的数据和仿真参数对比如图 9 所示。实测数据相较于仿真结果频率稍微向右偏移,插入损耗整体降低 2.5 dB 左右,回波损耗则有所上升。实测 3 dB 带宽为 2.60 ~ 10.62 GHz, 相对带宽为 121%, 中心频率处的插损为 2.1 dB, 带内插损最大为 3.2 dB, 回波损耗最差为 -10 dB, 带内群延时小于 0.78 ns。  $S_{11}$  曲线存在 5 个传输极点, 其中 2 个由平行耦合线和缺陷地结构产生, 另外 3 个由谐振器产生, 上下阻带分别产生一个传输零点, 有效地提高了滤波器频率选择性。

表 1 给出设计的滤波器与其他相似滤波器的性能比较。可见, 与表中的大多数滤波器相比, 提出的滤波器具有更宽的带宽, 尺寸适中。此外, 根据通带选择因子可以看出其具有较好的带外抑制性。因而, 提出的滤波器具有较好的综合性能。



(a) 实测 S 参数与仿真数据对比



(b) 实测群延时与仿真数据对比

图 9 滤波器 S 参数与群延时

## 2 结论

本研究基于多模谐振器理论设计了一款超宽带滤波器。首先利用奇偶模分析法对提出的多模谐振器进行分析,然后利用平行耦合线馈和缺陷地结构与多模谐振器组合构成超宽带滤波器。仿真与测试结果吻合。测试结果表明,滤波器的通带带宽为2.60~10.62 GHz,相对带宽达121%,能完全覆盖3.1~10.6 GHz的超宽带频段。提出的滤波器有望应用于小型化超宽带系统中的射频收发前端<sup>[14]</sup>。

致谢:感谢成都市科技项目(2019-YFYF-00152-SN)、成都信息工程大学本科教学工程项目(BKJX2020040)对本文的资助

## 参考文献:

- [1] Commission F C. Revision of part 15 of the commission's rules regarding ultra-wideband transmission systems: First Report and Order[J]. FCC, 2002:2-48.
- [2] Zhu L, Sun S, Menzel W. Ultra-Wideband (UWB) bandpass filters using multiple-mode resonator[J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2005, 15(11):796-798.
- [3] Chan H K, Kai C. Ultra-Wideband (UWB) Ring Resonator Bandpass Filter With a Notched Band [J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2011, 21(4):206-208.
- [4] Chu Q X, Wu X H, Tian X K. Novel UWB Bandpass Filter Using Stub-Loaded Multiple-Mode Resonator[J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2011, 21(8):403-405.
- [5] 胡红虹,肖中银,高山. 双模谐振器设计超宽带滤波器[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2009, 15(5):461-463.
- [6] 波扎尔. 微波工程[M]. 北京:电子工业出版社, 2006.
- [7] Zhang T, Tian M, Long Z, et al. High-Temperature Superconducting Multimode Ring Resonator Ultra-wideband Bandpass Filter[J]. IEEE Micro-wave & Wireless Components Letters, 2018:1-3.
- [8] Danaeian M, Zarezadeh E, Gholizadeh M H, et al. A Compact and Sharp Rejection Ultra-Wideband Bandpass Filter Based on Short and Open Stub-Loaded Multiple Mode Resonators[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2019, 15(6).
- [9] Zhou C X, Guo P P, Zhou K, et al. Design of a Compact UWB Filter With High Selectivity and Superwide Stopband[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017.
- [10] Kazemi, Maryam, Lotfi, et al. UWB Bandpass Filter with Ultra-wide Stopband based on Ring Resonator[J]. Frequenz, 2018.
- [11] Zhou L, Li H, Long Z, et al. Compact high temperature superconducting multi-mode ultra-wideband filter[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2018, 61(2).
- [12] Honari M M, Mirzavand R, Saghlatoon H, et al. Two-Layered Substrate Integrated Waveguide Filter for UWB Applications [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017, 27(7):633-635.
- [13] Siang-Wen, Lan, Min-Hang, et al. Design of a Compact Ultra-Wideband Bandpass Filter With an Extremely Broad Stopband Region[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2016, 26(6):392-394.
- [14] 叶骏东,徐志军,屈德新,等. 超宽带滤波器技术的研究与进展[J]. 军事通信技术, 2015, 36(1):18-23.

## Ultra-wideband Filter Design based on Multi-mode Resonator

MO Zixu, LI Rongqiang

(College of Electronical Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** An Ultra Wide Band (UWB) bandpass filter with a novel structure was designed based on the theory of multi-mode resonator, which is obtained by loading the step impedance branches on the basis of the traditional dual-mode resonator. The size of the filter was 23.8 mm×9.7 mm, and the tested 3 dB bandwidth range was 2.60-10.62 GHz, the relative bandwidth is about 121%, the insertion loss at the center frequency of 6.61 GHz is -2.1 dB, and the group delay in the passband is less than 0.78 ns. In addition, the upper and lower stopbands of the filter can generate transmission zeros, which effectively improves the frequency selectivity of the filter. The filter is suitable for use in the UWB systems.

**Keywords:** bandpass filter; multimode resonator; ultra wide band; transmission zero