

基于新型 CSRR 结构的 SIW 双频滤波器

何婉霞¹ 肖中银¹ 姜逸飞²

(1. 上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室 上海 200072; 2. 上海航天 804 研究所 上海 201109)

摘要: 提出了一种新型六边形的 CSRR(互补金属开口谐振环)结构,并利用该结构设计出了一款 SIW(基片集成波导)双频滤波器。通过调整四组 CSRR 嵌套环的尺寸,可以分别控制两个谐振频点。滤波器的第一通带和第二通带分别由上下两层大小不一的六边形 CSRR 嵌套环形成,并且可以相对独立地控制频点位置。本设计采用四节点拓扑结构,通过交叉耦合形成了两个传输零点,形成了高阻带抑制的特点。该滤波器的两个频点设计分别为 2.4 GHz 和 5.2 GHz,相对带宽为 7% 和 5%。可广泛应用于无线通信领域的射频接受前端系统中,拥有小型化,低损耗,易加工等特点。

关键词: 互补金属开口谐振环; 基片集成波导; 双频滤波器

中图分类号: TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

SIW dualband filter with novel CSRR structure

He Wanxia¹ Xiao Zhongyin¹ Jiang Yifei²

(1. China Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China;
2. Shanghai 804 Aerospace Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: In this paper, a novel hexagonal CSRR (complementary split-ring resonators) structure is proposed, and a SIW (substrate integrated waveguide) dualband filter is designed. By adjusting the size of the four sets of CSRR clamp ring, the two resonant frequencies can be controlled. The first passband and the second passband of the filter are respectively formed by a hexagonal CSRR clamp ring with different sizes of up and down two layers, and can control the position of the frequency points independently. This design uses four node topology, through the cross coupling to form the two transmission zeros, forming a high stopband suppression characteristics. The two frequency points of the filter are 2.4 GHz and 5.2 GHz, and the relative bandwidth is 8% and 5%, respectively. The utility model can be widely used in the RF receiver front-end system of the wireless communication field, and has the characteristics of miniaturization, low loss and easy processing.

Keywords: CSRR; SIW; dualband filter

0 引言

随着无线通信技术的发展,人类的生活已经与相关通信设备无法分隔。与此同时,频谱资源变得日益紧张,如何在有限的频谱资源内产生更大的应用空间,已经成为人类科学的一个重要研究方向。基于这样的现状,大量学者开始着力于研究微波滤波器。微波滤波器在无线通信系统中起着频率选择和抑制干扰作用,并且同时具备小型化,低损耗,易加工等优点。近年来,无线通信的各种协议共同使用着有限的通信频段,这就使得多频微波滤波器成为了重要的研究课题。

随着微波多频滤波器的研究,产生了以下 3 种比较主

流的设计方式:1)单通带滤波器组合法产生双通带响应;2)双/多模谐振法;3)双通带传输函数法。文献[1]通过将两个单通带滤波器进行并联实现双通带的滤波器特性,这种结构的缺点是物理体积大、带内损耗大。文献[2]介绍了方形谐振器的简并模分裂法构成的双通带滤波器,这种结构的劣势在于物理结构复杂、加工难度大。文献[3]描述了阶跃阻抗谐振器构成的双通带滤波器,但其杂散频率影响大、通带间抑制度不理想。

本文通过研究 SIW 滤波器和 CSRR 结构,提出了一种新型六边型 CSRR 结构,并将其与 SIW 结构相结合设计出了一款新型双频滤波器。通过调节 CSRR 的结构和相对位置,使得两个通带分别为 2.4 GHz 和 5.2 GHz,并在

3.6 GHz 和 6.1 GHz 处产生了两个传输零点,有效地优化了带外抑制度。最后,对滤波器进行了加工和测量,并对其性能进行了全面的分析。该滤波器可用于采用 WiFi、WIMAX 和蓝牙技术的移动终端,比如手机、平板电脑、智能穿戴设备等。实现多种频段信号的提取和抑制干扰。

1 理论分析

1.1 SIW 的理论分析

近年来,SIW(基片集成波导)结构由于其物理体积小,功率容量大,插入损耗小等优点广泛地受到了众多学者们的青睐。如图 1 所示为 SIW 的基本结构,该结构由中间基板和上下两层金属面构成,并利用两排金属孔来代替传统波导结构的金属侧壁。适当选取金属孔径 d 和孔间距 s ,能将孔间的能量泄露降到极低,几乎可以代替金属波导进行能量传递和频点谐振。

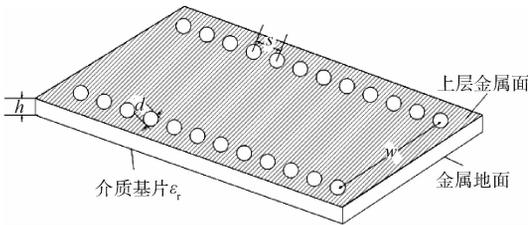


图 1 SIW 结构

与矩形金属波导相比较,SIW 除了在波的传输特性上相似以外,还在结构上等效,式(1)是等效关系经验公式^[4]:

$$\mu = \varphi_1 + \frac{\varphi_2}{\frac{p}{d} + \frac{\varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_3}{\varphi_3 - \varphi_1}} \quad (1)$$

其中

$$\varphi_1 = 1.0198 + \frac{0.3465}{\frac{w}{s} - 1.0684} \quad (2)$$

$$\varphi_2 = -0.1183 - \frac{1.2729}{\frac{w}{s} - 1.201} \quad (3)$$

$$\varphi_3 = 1.0082 - \frac{0.9163}{\frac{w}{s} + 0.2152} \quad (4)$$

于是得等效矩形金属波导宽度为:

$$a = w \cdot \mu \quad (5)$$

当在 SIW 结构中传播主模 TE_{10} 模时,SIW 的截止频率为:

$$f_{c(TE_{10})} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r} \cdot a} \quad (6)$$

由此可知,SIW 的宽度 w 的大小决定 SIW 的截止频率。当已知 w 的尺寸后,就可计算出 SIW 的截止频率。

SIW 结构的截止频率随着宽度 w 的仿真曲线如图 2

所示。当 w 逐渐变大,截止频率 $f_{c(TE_{10})}$ 逐渐降低。将 SIW 的宽度从 22 mm 变化到 24 mm,再逐渐变化到 26 mm 可以明显地观察到截止频率的变化。

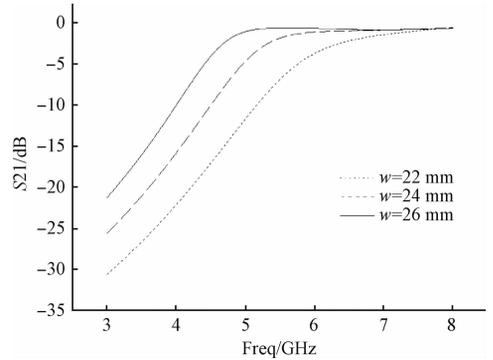


图 2 截止频率仿真曲线

1.2 六边形 CSRR 的设计

近年来,CSRR 结构已经成为了一种受到广泛关注的谐振器形式。本文提出了一种新型六边形 CSRR 结构,其基本结构如图 3 所示。该谐振器的谐振特性分别由物理尺寸 $L1$ 、 $s1$ 和 $g1$ 决定。

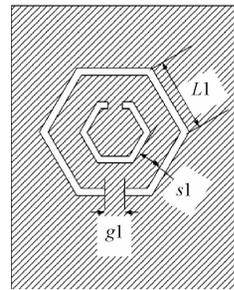


图 3 CSRR 结构示意图

根据文献[5]所述,若将 CSRR 结构刻蚀于 SIW 的金属表面。同时满足条件: f_0 (CSRR 结构的谐振频率) < f_c (SIW 的截止频率)。则能够在 f_0 处形成通带。基于新型六边形 CSRR 结构的 SIW 谐振器如图 4 所示。

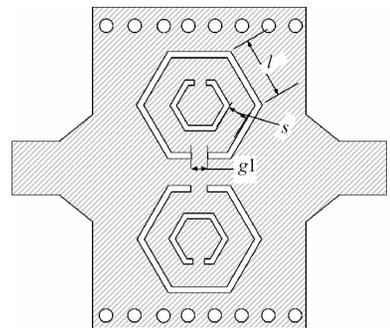


图 4 基于 CSRR 的 SIW 谐振器

对于该谐振器结构而言,CSRR 的长度参数 l 可以控

制谐振频率,而参数 S 和参数 g_1 可以空时谐振器的带外特性。

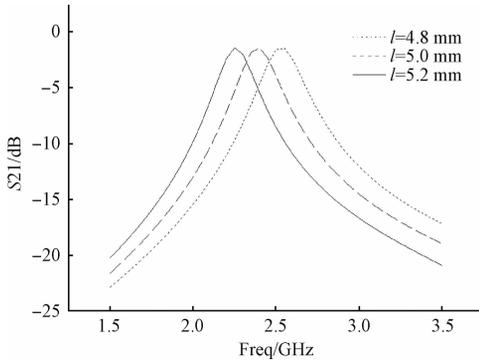


图 5 谐振器仿真曲线

上述谐振器的仿真曲线如图 5 所示。随着参数 l 变小,谐振频点 f_0 逐渐变高。随着参数 l 从 4.8 mm 变化到 5.0 mm,再变化到 5.2 mm 该谐振器的频点之间下降。相比于传统的圆形或者矩形 CSRR 结构,本文提出的六边形 CSRR 结构有明显的优点^[6-8]。1) 当 f_0 相同时,六边形 CSRR 占用更小的物理面积;2) 加载六边形 CSRR 谐振器的滤波器拥有更大带宽。

2 滤波器设计

利用加载六边形 CSRR 结构的 SIW 谐振器可以设计出性能比较优越的带通滤波器。但是为了满足日益复杂的通信协议,多频滤波器的需求更加急切。基于以上需求,本文利用加载六边形 CSRR 结构的 SIW 谐振器设计了一款微波双频滤波器。所设计滤波器的物理结构如图 6 所示。

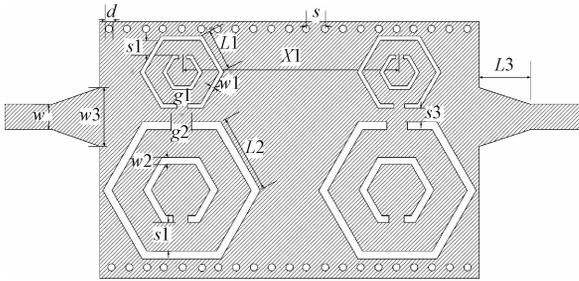


图 6 新型滤波器的物理结构

该滤波器分别加载了 4 组六边形 CSRR 结构,其中两组大环和两组小环尺寸一致并且分别产生第一谐振频率和第二谐振频率。

该滤波器的拓扑结构如图 7 所示^[9-10],4 个 CSRR 分别为第一、第二、第三和第四谐振器;输入/输出分别为两个非谐振节点。利用该拓扑结构可以实现谐振器之间的交叉耦合^[11],最终使得滤波器的频谱响应出现两个传输零点,分别位于两个通带之间以及高频阻带处。

分别调整两种 CSRR 的内外环间距,可以改变传输零

S : 输入节点 $R1, R2, R3, R4$:
 L : 输出节点 第 1, 2, 3, 4 谐振器

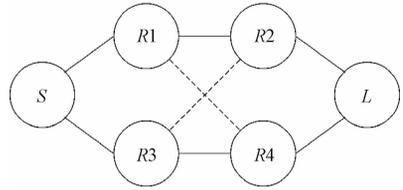


图 7 拓扑结构示意图

点的位置^[12]。传输零点分别随着 $S1$ 和 $S2$ 的变换趋势如图 8 和图 9 所示。随着 $S1$ 和 $S2$ 逐渐变小,传输零点的位置向低频移动。只要适当调整 $S1$ 和 $S2$,就可以将传输零点放到需要的位置,用以调整频响特性的带外抑制度。

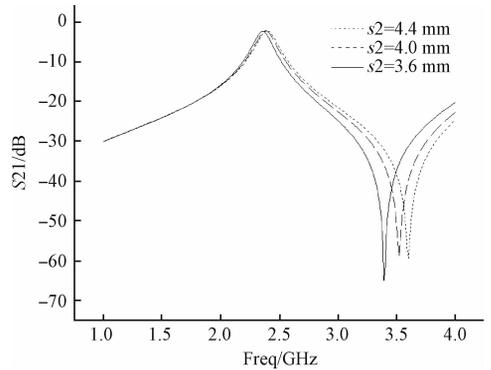


图 8 第一传输零点变化趋势

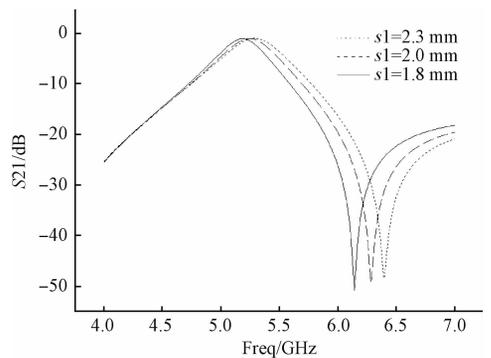


图 9 第二传输零点变化趋势

利用三维电磁仿真软件 HFSS 对图 6 所示的结构进行仿真。选择罗杰斯 5 880 作为该滤波器的基板材料,并选取介电常数为 2.2,基板厚度为 0.787 mm。通过调节图 6 中的各个物理参数,可以得到需要的频响特性。最终各参数取值如表 1 所示。

该滤波器的仿真曲线与测试曲线如图 10 所示。从仿真结果得知,该双频滤波器的两个频点位于 2.4 GHz 和 5.2 GHz;相对带宽分别为 7% 和 5%;通带内最小插入损耗分别为 0.4 dB 和 0.8 dB。两个传输零点分别位于 3.64 GHz 和 6.14 GHz,插入损耗分别达到了 49.9 dB 和

表 1 滤波器参数

参量	S1	S2	S3	L1	L2	L3	W1	W2
数值/mm	1.8	3.6	1.0	3.3	6.2	40	0.5	0.5
参量	W3	W	X1	g1	g2	d	s	
数值/mm	6.5	2.4	16.0	0.2	0.6	0.8	0.6	

50.7 dB。实测与仿真结果相似度较高。但是,由于加工精度和输入/输出转接头的焊接不良等问题,使得实测结果与仿真曲线之间产生了一定的频偏和损耗。

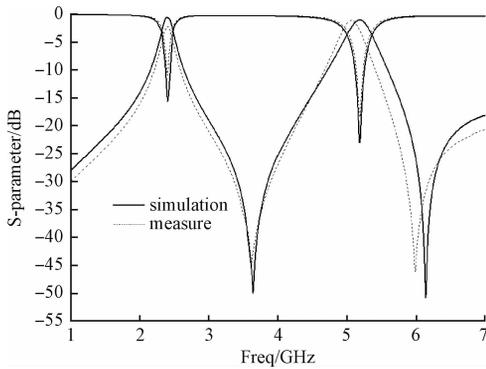


图 10 双频滤波器仿真与测试曲线

为了验证该滤波器的有效性,本文设计一个测试系统。该测试系统模拟 WiFi 系统^[13]的射频接收前端,为滤波器提供复杂的微波信号,并用该滤波器提取出 2.4 GHz 和 5.2 GHz 的有用信号^[14]。

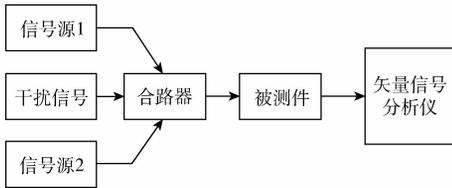


图 11 测试系统示意图

本文所设计测试系统如图 11 所示,使用安捷伦公司的矢量信号源(E8267D)产生 2.4 GHz 的射频信号作为信号源 1;使用 E8267D 产生 5.32 GHz 的射频信号作为信号源 2;使用安捷伦公司的扫频信号源(83752)作为干扰源^[15]。并将三路信号通过合路器合成为复杂的微波信号,用于模拟天线接收的空间信号(包含有用信号和各类噪声)。本文所设计的滤波器的主要功能就是提取有用信号并且一直各类噪声。将合成的微波信号,进滤波器(被测件)后,再用安捷伦公司的矢量信号分析仪观察接收的信号。为测试系统图如图 12 所示。

最终的测试结果显示,矢量信号分析仪接收到两路有用信号分别位于 2.4 GHz 和 5.32 GHz。信号的功率分别为 0 dBm 和 -1 dBm,带内一直均大于 30 dBc。利用该测试系统得到的测试结果表明,本文设计的滤波器可以实现

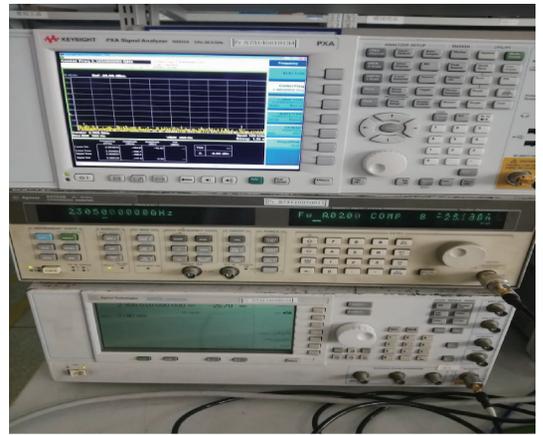


图 12 测试系统图

双频提取功能和带外抑制功能,完全满足微波双频滤波器的设计需要。可以利用与无线通信系统的接收前端和小功率的射频发射前端。

3 结 论

本文提出了一种新型六边形 CSRR 结构,并用此结构设计了一款基于新型 CSRR 结构的 SIW 双频滤波器。该滤波器拥有小型化,低插损,易加工等优点,可以用于 WiFi 和 WiMax 等移动通信系统。基于这样的研究成果,在将来的工作和学习中可以进一步研究六边形 CSRR 结构的其他应用。

参考文献

- [1] 刘毅,戴永胜. LTCC 双频带通滤波器小型化设计与研究[J]. 电子元件与材料, 2016, 35(6):85-87.
- [2] ZHANG X Y, XUE Q. Novel dual-mode dual-band filters using coplanar-waveguide-fed ring resonators[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2007, 55(10):2183-2190.
- [3] LIU H W, WANG Y, WANG X M, et al. Compact and high selectivity tri-band bandpass filter using multimode stepped-impedance resonator [J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2013, 23(10):536-538.
- [4] 闫智国. 基于基片集成波导的 WLAN 滤波器和 UWB 滤波器的设计[D]. 大连:大连海事大学, 2013.
- [5] 魏胜. 基于 SIW 结构的双通带滤波器研究[D]. 合肥:安徽大学, 2016.
- [6] 姜逸飞,孟令琴,杨广立. 新型三阶 SIR 高阻带抑制双通带滤波器[J]. 上海大学学报:自然科学版, 2017, 23(1):147-154.
- [7] 周景超,孟令琴,任龙,等. 双模双通带基片集成波

- 导滤波器的设计[J]. 电子测量技术, 2014, 37(6): 4-7.
- [8] 张中华, 李光林, 黄杰, 等. 基于 CSRR-HMSIW 和 CSRR-DGS 谐振器的双带滤波器研究[J]. 西南大学学报:自然科学版, 2016, 38(12):162-168.
- [9] LIU Z, XIAO G, ZHU L. Triple-mode bandpass filters on csrr-loaded substrate integrated waveguide cavities [J]. IEEE Transactions on Components Packaging & Manufacturing Technology, 2016, 6(7):1-7.
- [10] RHBANOU A, BRI S, SABBANE M. Design of substrate integrated waveguide band pass filter based on CSRR-EBG [J]. International Journal of Microwave & Optical Technology, 2016.
- [11] CHANG K. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications[M]. John Wiley & Sons, Inc, 2001.
- [12] CHEN J, SHENG J, GAO N, et al. Compact and high-selectivity microstrip bandpass filter using quad-mode resonator [J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2015, 57(2):478-481.
- [13] 黄瑞龙, 刘桂雄, 黄坚, 等. 基于扫频调谐预扫描的快速 EMI 测试关键技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(8):1269-1274.
- [14] LUO S, LIU Y, SONG C. The study on the dualband filter with common cavity [C]. IEEE International Conference on Communication Problem-Solving, IEEE, 2015.
- [15] CORONA-CHAVEZ A, KATARIA T K, OLVERA-CERVANTES J L. Dual-band differential filter with complete band independence [J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2016, 58(4):864-868.

作者简介

肖中银, 1964 年出生, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为微波与毫米波电路、光波导与技术。
E-mail: zhyxiao@shu.edu.cn