

文章编号:1004-2474(2013)05-0752-04

一种窄带 SIR 带阻滤波器的设计

宋加兴,王锡良,游鑫

(电子科技大学 电子工程学院,四川 成都 610054)

摘要:介绍了嵌入式并联 $\lambda_g/4$ (λ_g 为波长) 的开路支节的基本结构与特性。采用带状线,设计了一款中心频率为 2.46 GHz、阻带宽度 50 MHz、最大阻带衰减为 60 dB 的三阶嵌入式并联开路支节窄带带阻滤波器。与传统的并联开路支节带阻滤波器相比,嵌入式并联开路支节带阻滤波器的横向尺寸减小,结构紧凑。采用阶梯阻抗谐振器(SIR)结构,按相同指标设计了一款三阶嵌入式 SIR 窄带带阻滤波器。与嵌入式并联开路支节带阻滤波器相比,嵌入式 SIR 带阻滤波器结构更为紧凑,纵向尺寸缩小约 17.5%,并具有更好的谐波抑制特性。

关键词:嵌入式并联开路支节;阶梯阻抗谐振器;窄带;带阻滤波器

中图分类号: TN713 **文献标识码:** A

Design of Narrow-band Bandstop Filter Using Stepped-impedance Resonator

SONG Jiaxing, WANG Xiliang, YOU Xin

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Embedded parallel $\lambda/4$ (λ is the wavelength) open stub structure and its band-stop properties were presented. Embedded open stub structure was applied to design a 3-order narrow-band strip-line band-stop filter, which had the center frequency of 2.46 GHz, the stop-band bandwidth of 50 MHz and the maximum elimination up to 60 dB. Compared with the traditional band-stop filter with open-circuited stubs, embedded open stub band-stop filter was more compact in lateral dimension. Based on stepped-impedance resonator (SIR) structure, another compact strip-line band-stop filter with the same target was designed. Compared with embedded open stub band-stop filter, the longitudinal size of the embedded SIR band-stop filter was reduced by about 17.5% with better harmonic suppression characteristics.

Key words: embedded open stub; stepped-impedance resonator; narrow-band; bandstop filter

0 引言

随着无线通信技术迅猛发展,频率资源日益紧张,对滤波器的性能也提出了更高要求。带阻滤波器作为滤波器的一种,在通信中所起作用也越来越重要。常见带阻滤波器多由带状线、波导和微带线等构成,而多数的带状线带阻滤波器如并联开路支节带阻滤波器和支线式带阻滤波器,一般由均匀阻抗谐振器(UIR)设计而成。UIR结构简单,易于设计因而得到广泛应用。与UIR结构相比,阶梯阻抗谐振器(SIR)在尺寸、设计参数控制、谐波抑制和设计灵活性等方面都具有更大优势。目前,以SIR为谐振器的微波带通滤波器的理论研究已较完善^[1],并得到广泛应用,但以SIR为谐振器的微波带阻滤波器的相关研究较少^[2-4]。

本文介绍了嵌入式并联 $\lambda_g/4$ (λ_g 为波长) 开路

支节基本特性,设计了一款三阶嵌入式并联开路支节窄带带阻滤波器,与传统的并联开路支节带阻滤波器相比,其横向尺寸减小,结构更紧凑。接着按相同的滤波器设计指标,设计了一款嵌入式 SIR 带阻滤波器。其纵向尺寸相比嵌入式并联开路支节带阻滤波器缩小约 17.5%,并具有更宽的上通带。这种滤波器体积小,结构紧凑,易加工及良好的谐波抑制等特点,有效地达到了滤波器小型化和高性能的目的,具有很强的工程实用价值。

1 嵌入式并联开路支节的基本特性

嵌入式并联开路支节^[5-7]是一种具有阻带谐振特性的结构单元,传统的并联开路支节较适合构成宽带带阻滤波器,而嵌入式并联开路支节则适合构成窄带带阻滤波器。与传统的并联开路支节相比,嵌入式并联开路支节的开路支节嵌入在主线内部,

收稿日期:2012-08-10

作者简介:宋加兴(1988-),男,江西赣州人,硕士生,主要从事微波无源器件的设计、微波毫米波电路与系统的研究。王锡良(1963-),男,江苏宜兴人,副教授,硕士生导师,主要从事微波无源器件的设计、电磁场数值计算的研究。

因此它具有更小的横向尺寸,其结构示意图如图 1 所示。图中,带状线的中心导带宽度 $W=10.5\text{ mm}$,厚度 $T=1\text{ mm}$ 。内嵌并联开路支节的长度 $L_1=28.4\text{ mm}$,宽度 $w_{11}=4\text{ mm}$,开路支节末端间隙 $g_1=2\text{ mm}$,主线的槽宽 $w_1=6\text{ mm}$, s_{01} 为接头处的主线长度, s_{12} 为嵌入式单元 1 与 2 之间的主线长度。

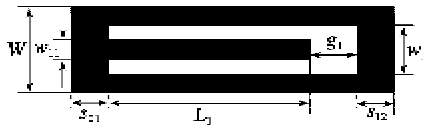


图 1 嵌入式并联开路支节结构示意图

通过三维电磁全波分析软件 HFSS 建立一嵌入式并联开路支节单元仿真模型,用带状线来实现嵌入式并联开路支节结构,如图 2 所示。模型的空气腔宽度 $a=28\text{ mm}$,高度 $b=10\text{ mm}$ 。

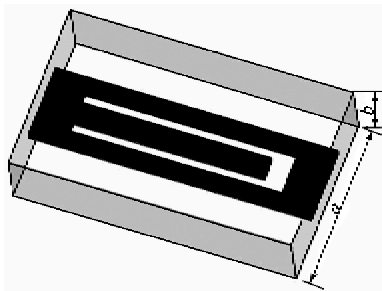


图 2 一个嵌入式并联开路支节单元模型

由图 2 得到嵌入式并联开路支节单元的频率响应曲线如图 3 所示。由图 3 可看出,嵌入式并联开路支节单元在频率 2.46 GHz 处产生一个衰减极点。 L_1 及 g_1 决定着阻带的中心频率。

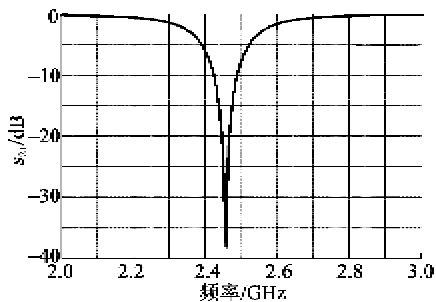


图 3 嵌入式并联开路支节单元频率响应曲线

2 嵌入式并联开路支节滤波器的设计

传统的并联开路支节带阻滤波器是按照 $\lambda_g/4$ 短截线并联基型电路来设计的。图 4 为 $\lambda_g/4$ 短截线带阻滤波器的并联基型示意图。图中滤波器的谐振器为 $\lambda_g/4$ 并联开路短截线,其间由 $\lambda_g/4$ 联接线相接。并联基型特别适用于带状线带阻滤波器。

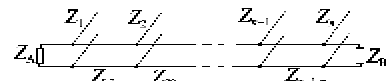


图 4 $\lambda_g/4$ 短截线带阻滤波器的并联基型

设计一款中心频率为 2.46 GHz ,最大阻带衰减为 60 dB ,阻带宽度 50 MHz 的带阻滤波器。由设计指标,采用嵌入式并联开路支节结构单元,根据并联基型带阻滤波器的准确设计式来进行设计^[7]。

为满足上述设计指标的要求,设计了一个三阶的对称带状线带阻滤波器,在 HFSS 中建立仿真模型如图 5 所示,经过仿真优化最终的模型参数:空气腔的 $L=111.38\text{ mm}$, $a=28\text{ mm}$, $b=10\text{ mm}$,带状线的 $W=10.5\text{ mm}$, $T=1\text{ mm}$ 。3 个嵌入式并联开路支节单元的 $L_1=28.25\text{ mm}$, $L_2=27.5\text{ mm}$, $L_3=L_1$;开路支节 $w_{11}=w_{22}=w_{33}=4.0\text{ mm}$;开路支节 $g_1=1.68\text{ mm}$, $g_2=1.92\text{ mm}$, $g_3=g_1$;支节单元处主线槽宽 $w_1=5.20\text{ mm}$, $w_2=6.40\text{ mm}$, $w_3=w_1$;两端 SMA 接头深入腔内与带状线相连长度 $p_1=1.3\text{ mm}$, $s_{11}=4.5\text{ mm}$,嵌入式单元 2 与 3 之间的主线长度 $s_{23}=5.0\text{ mm}$,接头处的 $s_{01}=s_{03}=4.5\text{ mm}$ 。模型中的半径 $R=2\text{ mm}$ 的聚四氟乙烯介质柱主要是起支撑、固定和定位的作用。

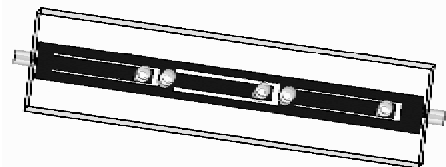


图 5 三阶嵌入式并联开路支节带阻滤波器的仿真模型

由仿真模型得到的三阶带阻滤波器的仿真曲线如图 6 所示。

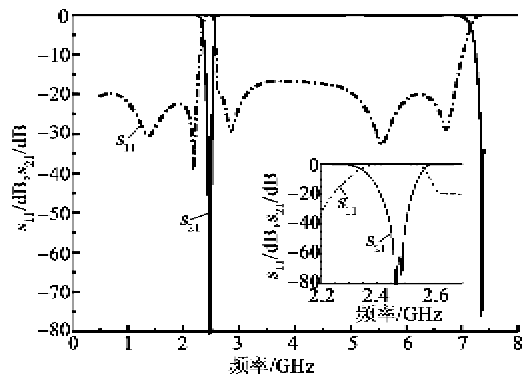


图 6 嵌入式并联开路支节的带阻滤波器的仿真曲线

由图 6 可看出,阻带衰减为 64 dB ,阻带附近的反射衰减基本 20 dB ,频率 3.5 GHz 的反射衰减最差为 17 dB 。二次阻带出现在 7.25 GHz 处,即在阻带中心频率的 3 倍之前就出现了。

3 嵌入式 SIR 带阻滤波器的设计

3.1 SIR 的基本结构与特性

SIR 是 2 个以上具有不同特性阻抗传输线组成的具有横向电磁场或准横向电磁场模式的谐振器。在不减小无载品质因数的前提下可缩短谐振器的长度,并使得在结构和设计上有更大的自由度^[3]。较常见的 SIR 基本单元如图 7 所示。

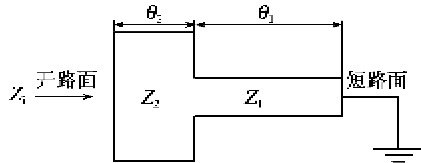


图 7 SIR 基本单元

对于终端短路的阶跃阻抗谐振器,若输入端阻抗和导纳分别定义为 Z_1 和 Y_1 ,如果忽略阶跃不连续性及开路端边缘电容的影响,则

$$Z_1 = jZ_2 \frac{Z_1 \tan \theta_1 + Z_2 \tan \theta_2}{Z_2 - Z_1 \tan \theta_1 \tan \theta_2} \quad (1)$$

设 $Y_1 = 0$, 则平衡谐振条件为

$$Z_2 - Z_1 \tan \theta_1 \tan \theta_2 = 0 \quad (2)$$

$$\tan \theta_1 \tan \theta_2 = Z_2 / Z_1 = R_z \quad (3)$$

由式(1)~(3)可知,SIR 的谐振条件取决于电长度 θ_1 、 θ_2 和阻抗比 R_z 。通过改变阻抗比 R_z ,可调整谐振器的长度和相应杂散谐振频率。与 UIR 相比 SIR 多了一个设计自由度 R_z 。

SIR 总电长度用 θ_T 表示,结合式(3)有

$$\theta_T = \theta_1 + \arctan(R_z / \tan \theta_2) \quad (4)$$

根据式(4)作出 θ_T 与 R_z 的关系曲线,如图 8 所示。由图可知,在 $R_z \geq 1$ 时 θ_T 有极大值;在 $R_z \leq 1$ 时 θ_T 有极小值;且当 $0 < R_z < 1$ 时, $0 < \theta_T < \pi/2$,所以与普通的 UIR 相比,SIR 有效地缩小了尺寸。

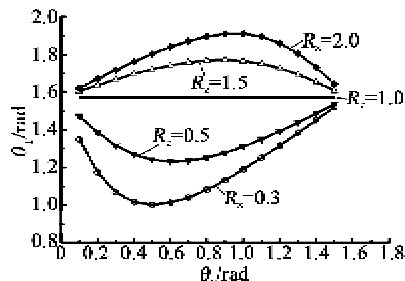


图 8 θ_T 与 R_z 的关系曲线

3.2 嵌入式 SIR 单元的特性

将嵌入式并联开路支节结构中的 $\lambda_g/4$ 开路支节换成 SIR,在 HFSS 中建立一模型,对其特性进行仿真分析,如图 9(a)所示。模型参数尺寸:空气腔的 $a=28 \text{ mm}$, $b=10 \text{ mm}$;带状线的 $W=10.5 \text{ mm}$

和 $T=1.0 \text{ mm}$;SIR 高低阻抗线的 $L_{11} = L_{12} = 11.15 \text{ mm}$, $w_{11} = 2.4 \text{ mm}$, $w_{12} = 4.2 \text{ mm}$; $g_1 = 1.5 \text{ mm}$, $w_1 = 5.2 \text{ mm}$ 。

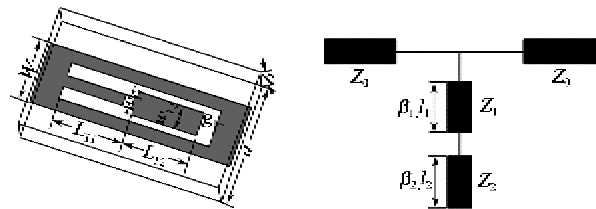


图 9 一个嵌入式 SIR 单元模型及其等效电路

我们可用图 9(b)所示的电路来等效分析嵌入式 SIR 单元^[10], Z_0 为主线的特性阻抗,用 Z_i ($i=1, 2$), β_i 和 l_i 分别为 SIR 的高、低阻抗线的特性阻抗,传播常数和长度。假定高、低阻抗线具有相同的电长度,即 $\beta_1 l_1 = \beta_2 l_2$ 。令 $z^{-1} \exp(-j2\beta_i l_i)$, 由 Z 变换技术,其散射参数 $S_{12}(z)$ 可用 z 域中的 2 个二阶多项式的比值形式表示。归一化中心频率 $\Omega_N = \cos^{-1}[(1 - Z_2/Z_1)/(1 + Z_1/Z_2)]$, 二次阻带谐振频率 $\Omega_H = 2\pi - \Omega_N$, 令 $R = \Omega_H/\Omega_N = 2\pi/\Omega_N - 1$ 。当 $Z_1 = Z_2$ 时,有 $\Omega = \pi/2$, $R=3$,即嵌入式并联开路支节的二次阻带出现在 $3f_0$ 处(见图 10(a))。由 Ω_N 、 Ω_H 及 R 的表达式可知,通过选取合适的 Z_2/Z_1 值,可使二次阻带出现在 $3f_0$ 的高端。嵌入式 SIR 结构具有比嵌入式并联开路支节更好的谐波抑制特性,二次阻带出现在 $4f_0$ 处(见图 10(b))。

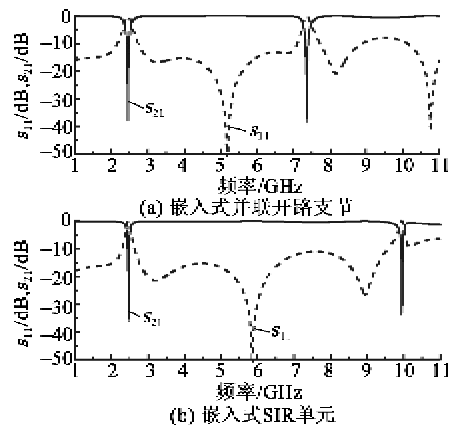


图 10 嵌入式并联开路支节和嵌入式 SIR 单元频率响应曲线

3.3 嵌入式 SIR 带阻滤波器的设计

将嵌入式 SIR 单元用于带阻滤波器设计中,取高低阻抗线为相同的长度,按相同的设计指标,也设计了一款三阶对称带状线带阻滤波器,图 11 为在 HFSS 中建立仿真模型。经过仿真优化最终的模型参数:空气腔的 $L=91.90 \text{ mm}$, $a=28 \text{ mm}$, $b=$

10 mm;带状线的 $W = 10.5$ mm, $T = 1$ mm;嵌入式 SIR 单元处的 $w_1 = 5.2$ mm, $w_2 = 6.4$ mm, $w_3 = w_1$; SIR 单元高低阻抗线宽 $w_{11} = 2.40$ mm, $w_{12} = 4.20$ mm, $w_{21} = 2.20$ mm, $w_{22} = 4.50$ mm, $w_{31} = w_{11}$, $w_{32} = w_{12}$; 3 个 SIR 单元高低阻抗线长度都为 10.9 mm; SIR 单元 $g_1 = 1.70$ mm, $g_2 = 1.15$ mm, $g_3 = g_1$; 两端 SMA 接头探针深入腔内的长度 $p_1 = 1.30$ mm, 嵌入式 SIR 单元的 $s_{12} = 4.5$ mm, $s_{23} = 6.0$ mm, 接头处的 $s_{01} = 4.5$ mm, $s_{03} = 6.0$ mm。模型中半径 $R = 2$ mm 的聚四氟乙烯介质柱主要是起支撑、固定和定位的作用。

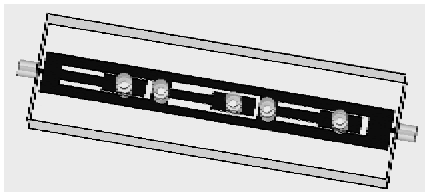


图 11 三阶嵌入式 SIR 带阻滤波器的仿真模型

由图 11 的 HFSS 模型经仿真优化得到的三阶嵌入式 SIR 带阻滤波器仿真曲线,如图 12 所示。由图可看出,阻带衰减为 68 dB,阻带附近的反射衰减基本为 22 dB,通带内最差反射衰减为 19 dB,仿真结果满足设计指标要求。对比图 12 和图 6 的仿真结果,我们发现嵌入式 SIR 带阻滤波器的寄生阻带出现在 9.50 GHz 处,即在阻带中心频率的 3 倍后才出现,二次阻带向频率高端推移了,增加了上通带的通带宽度。

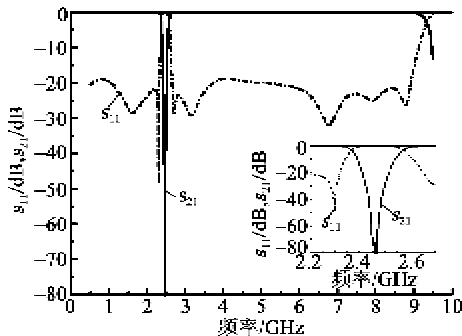


图 12 三阶嵌入式 SIR 带阻滤波器的仿真曲线

4 结束语

本文在传统带阻滤波器的设计方法的基础上,引入嵌入式并联开路支节结构,设计了一款中心频率为 2.46 GHz、阻带宽度 50 MHz、阻带衰减 60 dB 的三阶嵌入式并联开路支节带阻滤波器。按相同设计指标设计了一款三阶嵌入式 SIR 带阻滤波器,相比嵌入式并联开路支节带阻滤波器其纵向尺寸减少了 17.5%,同时又将寄生阻带向频率高端推移,增

加了上通带宽度。仿真结果表明,嵌入式 SIR 带阻滤波器具有结构紧凑、体积小、通带插入损耗小、过渡段窄、易加工及良好的谐波抑制等特点,能很好地满足无线通信系统中对带阻滤波器的要求,具有很强的工程实用价值。

参考文献:

- [1] 田树林. 基片集成波导和带隙结构的带通滤波器[J]. 重庆理工大学学报:自然科学版, 2010(6):52-55. TIAN Shulin. Bandpass filter of substrate integrated waveguide and band gap structure [J]. Journal of Chongqing Institute of Technology (Natural Science), 2010(6):52-55.
- [2] 李鸣, 李兴国. 一种改进阻带性能的 SIR 滤波器[J]. 制导与引信, 2005, 6(2):57-59. LI Ming, LI Xingguo. An improved bandstop SIR filter [J]. Guidance and Fuze, 2005, 6(2):57-59.
- [3] NAGLICH J, JUSEOP L. Extended passband bandstop filter cascade with continuous 0.85~6.6 GHz coverage[J]. IEEE MTT, 2012, 60(1):21-30.
- [4] 林娅, 曹明武, 蔡凯, 等. 具有阻带抑制特性的微带带通滤波器设计[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版, 2011, 23(1):61-64. LIN Ya, CAO Mingwu, CAI Kai, et al. Design of microstrip bandpass filter with upper-skirt frequency suppression. 2011, 23(1):61-64.
- [5] WENG Minhang, LIAUH Chihngtsung, WU Hungwei. An ultra-wideband bandpass filter with an embedded open-circuited stub structure to improve in-band performance[J]. IEEE Transactions on Microwave and Wireless Components Letters, 2009, 19(3):146-148.
- [6] LI Qi, LIANG Changhong, WEN Haibin. Compact planar ultra-wideband bandpass (UWB) filter with notched band [C] // Singapore, Asia Pacific Microwave Conference, 2009:257-260.
- [7] 李奇. 无线通信中微带滤波器的研究与设计 [D]. 西安:西安电子科技大学, 2011.
- [8] 甘本竣, 吴万春. 现代滤波器的结构与设计 [M]. 北京:科学出版社, 1973.
- [9] 申凯, 王光明, 郑武团. 微带阶跃阻抗谐振器小型化滤波器的精确设计[J]. 中国电子科学研究院学报, 2008, 3(2):195-198. SHEN Kai, WANG Guangming, ZHENG Wutuan. Accurate design for bandpass filters miniaturization using microstrip SIR [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2008, 3(2):195-198.
- [10] HUSE Chingwen, TSAI Yih sien, WU Changyu. Bandstop filter design using two-section structure and Z-domain method [C] // Beijing: Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2010: 446-448.