文章编号:1004-2474(2016)04-0647-04

基于 H 型缺陷地结构的超宽带带通滤波器设计

冯梦璐1,杨曙辉1,2,陈迎潮2

(1.北京信息科技大学 信息与通信工程学院,北京 100101; 2.南卡罗来纳大学 电气工程系,美国 哥伦比亚 29208)

摘 要:微波频段的宽带滤波器一般具有通带插入损耗大,带外抑制性差等问题,为了解决这个问题,采用具 有慢波效应的缺陷地结构(DGS)和缺陷微带结构(DMS),设计了一种新型微波频段的超宽带滤波器。分别利用电 磁仿真软件 HFSS 和平面印制板技术对其进行建模仿真和实物加工。实测与仿真结果良好吻合,带内插入损耗优 于 1.64 dB,回波损耗优于 13.93 dB,通带范围在 2.75~8.3 GHz,实现相对带宽 100.45%,高低阻带均抑制在 -10 dB以下,且该滤波器结构紧凑,体积小。

关键词:超宽带滤波器;缺陷地结构;缺陷微带结构;多模谐振器;奇偶模理论 中图分类号:TN713.5 **文献标识码**:A

Design of a Ultra-wideband Bandpass Filter Using H-shaped DGS

FENG Menglu¹, YANG Shuhui^{1,2}, CHEN Yinchao²

(1. Information and Communication Engineering Institute, Beijing Information and Science Technology University, Beijing 100101, China; 2. Electrical Engineering School, University of South Carolina, Columbia 29208, USA)

Abstract: Aiming at the problems of big passband insertion loss and poor out-of-band rejection of wideband filter operating at microwave band, a novel ultra-wide band microwave filter with defected ground structure(DGS) and defected microstrip structure(DMS), which are of slow-wave effect and single-pole band-reject characteristic, was designed in this paper. The modelling and simulation of the filter have been carried out by using the electromagnetic simulation software HFSS and the devices have been fabricated by the PCB process. The measured results agree well with the simulation ones. The proposed filter has an insertion loss of better than 1.64 dB and a return loss of better than 13.93 dB; a fractional bandwidth of 100.45% are achieved, the passband range is from 2.75 to 8.3 GHz; besides, the stopband attenuation is up to -10 dB. The filter shows a desired performance with a compact size.

Key words: ultra-wide band(UWB) filter; defected ground structure(DGS); defected microstrip structure (DMS); multi-mode resonator(MMR); even-odd mode theory

0 引言

自 2002 年美国联邦通信委员会开放了 3.1~ 10.6 GHz 的超宽带(UWB)通信频谱以来,超宽带 无线通信技术迅猛发展。作为该系统中的核心器件 之一,要求超宽带滤波器具有较大的相对带宽,较小 的插损,带外抑制高及群延时平坦等^[1-9]。实现超宽 带滤波器的设计方法有多种,如级联低通和高通滤 波器^[1],或者级联带阻和带通滤波器^[2],但此类超宽 带滤波器的尺寸大,带内插损较高。传统的短路枝 节线滤波器也是实现超宽带滤波器的方案之—^[3], 该结构的滤波器通带带宽易实现,但结构不紧凑。 此外,基于多模谐振器理论可实现超宽带滤波器,此 方法是将多个谐振模式结合,从而实现超宽带^[4-5]。 在此基础上,许多学者提出新型的结构来实现小型 化、高性能的超宽带滤波器^[6-8],如在平行微带线下 加载 DGS 实现了 UWB 带通滤波器^[6];利用折叠多 模谐振器结构实现的超宽带滤波器结构紧凑,插入 损耗小^[7];采用微带线-槽线混合结构,通过增加输 入/出间耦合实现结构紧凑,频率选择性高的超宽带 带通滤波器^[9]。

本文采用传统阶跃阻抗谐振器(SIR),在输入、 输出微带线上加入缺陷微带结构(DMS),在接地面 利用 H 型缺陷地结构(DGS),实现了较好的通带性

收稿日期:2015-09-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61171039)

作者简介: 冯梦璐(1991-), 女, 湖南岳阳人, 硕士生, 主要从事基于 PCB的芯片无线互连微通信系统结构的研究。杨曙辉(1971-), 男, 黑龙 江宝清人, 教授, 主要从事射频通信及高速电路信号完整性分析。

能,且 DGS 的带阻特性可有效地抑制带外谐波。该 滤波器的通带频率为 2.75~8.3 GHz,具有良好的 通带性能。

1 滤波器结构分析

1.1 阶梯阻抗谐振器的理论分析

传统的 $\lambda_g/2$ 型阶梯阻抗谐振器如图 1 所示,该 谐振器由 3 段电长度分别为 θ_2 , 2 θ_1 , θ_2 的传输线级 联而成,特性导纳分别为 Y_2 , Y_1 , Y_2 。





由于 SIR 为对称结构,故可用奇偶模法进行理 论分析。在奇模激励条件下(见图 2(a)),其对称面 等效于短路接地面,根据传输线理论,可得该谐振器 的奇模输入导纳^[10]为



图 2 λ_g/2 型阶梯阻抗谐振器的奇偶模等效电路

偶模激励条件下(见图 2(b)),其对称面等效于 开路面,可得该谐振器的偶模输入导纳为

$$Y_{\text{ineven}} = \frac{jY_1 \tan \theta_1 + jY_2 \tan \theta_2}{1 - \tan \theta_1 \tan \theta_2}$$
(2)

由奇偶模谐振条件: $Y_{inodd} = 0$, $Y_{ineven} = 0$,可得奇 模谐振频率:

$$\tan \theta_1 \tan \theta_2 = K_z \tag{3}$$

偶模谐振频率:
cot
$$\theta_1 \tan \theta_2 = -K_z$$
 (4)

式中: $K_z = \frac{Z_2}{Z_1}$ 为阻抗比, Z_1 、 Z_2 为传输线特性阻抗;

电长度 $\theta_1 = \beta_1 L_1, \theta_2 = \beta_2 L_2, \beta_1, \beta_2$ 为传播常数。

当 $\theta_1 = \theta_2 = \theta_0$ 时,由谐振条件: $Y_{in} = 0$ ($Y_{inodd} = 0$, $Y_{ineven} = 0$)可得

$$\begin{cases} K_z - \tan^2 \theta_0 = 0\\ \tan \theta_0 = \infty \end{cases}$$
(5)

根据式(5)可知各谐振模式对应的电长度,并进 一步求得 SIR 的尺寸。

奇模的基模谐振频率为

$$f_{\rm odd} = \frac{\arctan\sqrt{K_z}c}{2L_1\pi\sqrt{\varepsilon_{\rm eff}}} \tag{6}$$

偶模的基模谐振频率为

$$f_{\rm even} = \frac{\arctan\sqrt{K_z}c}{(L_1 + 2L_2)\pi\sqrt{\epsilon_{\rm eff}}}$$
(7)

式中:L1为谐振结构的物理长度; ε eff 为有效介电常数; c 为真空下光速。

1.2 DGS 单元的特性分析

传统的 DGS 为哑铃型,近年来许多学者又提出 了新型结构^[11-12]。本文采用 H 型 DGS(H-DGS), 位于低阻抗传输线对应的地平面上,如图 3(a)所 示。采用 ADS 的 Lincale 工具设计微带线宽度 W=1.87 mm,特征阻抗为 50 Ω。基板采用 FR4 板 材,厚 H=1 mm,相对介电常数 $\epsilon_r = 4.4$,介质损耗 角正切为 0.01。



图 3 H-DGS 的结构图及等效电路

H-DGS 具有单极点带阻特性,可以等效为 LC 并联谐振电路,如图 3(b)所示。等效电感 L 和等效 电容 C 的计算式^[13]分别为

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C}$$
(8)

$$C = \frac{f_{\rm c}}{4\pi Z_0 (f_0^2 - f_{\rm c}^2)} \tag{9}$$

式中: f_0 为 H-DGS 单元的谐振频率; f_c 为3 dB 截 止频率; Z_0 为微带线的特征阻抗。

为了计算所需要的 L 和 C,使用 HFSS 进行仿 真分析出谐振频率与 S-DGS(Slanted-DGS,斜缺陷 地结构)尺寸的关系,如图 4 所示。分别研究 H-DGS的 4 个尺寸参数对其 S 参数的影响可看出, 随着 a,b,d 的增大,引入的 L 值越大,谐振频率变 高。c 的改变不会影响 H-DGS 的谐振频率。



1.3 DMS 单元的分析

DMS与DGS不同,是在金属层微带线上进行 刻蚀。DMS通过干扰微带线上的电流分布从而形 成带阻特性,可以滤除特定的信号。传统的DMS 采用T型结构,本文采用矩形DMS(R-DMS),如图 5(a)所示。利用 R-DMS可改善通带性能。



DMS单元的等效电路如图 5(b)所示。并联电容、电感值可通过衰减零点的频率^[14]求得,即电感值如式(8)所示,并联电容为

$$C = \frac{f_{\rm c}}{200\pi (f_0^2 - f_{\rm c}^2)} \tag{10}$$

利用 HFSS 进行仿真分析 R-DMS 的传输特性,如图 6 所示。在 0~18 GHz 的频率范围内,R-DMS 表现为超宽低通特性,与 SIR 级联组成超宽带带通滤波器,并在其通带范围 2.75~8.3 GHz 内可达到较好的性能指标。



图 6 R-DMS 的传输特性

2 基于 H-DGS 超宽带滤波器的仿真与实测

本文提出的采用 H 型 DGS 及 DMS 的超宽带 带通滤波器结构如图 7 所示。根据上述分析与优 化,各设计参数为: $W_1 = 0.48 \text{ mm}, L_1 = 10.9 \text{ mm},$ $W_2 = 0.96 \text{ mm}, L_2 = 10.6 \text{ mm}, W_3 = 1.87 \text{ mm}, L_3 =$ $10.3 \text{ mm}, W_4 = 1.4 \text{ mm}, L_4 = 3 \text{ mm}, W_5 = 0.7 \text{ mm},$ $L_5 = 1 \text{ mm}, W_6 = 1 \text{ mm}, L_6 = 4.3 \text{ mm},$ 对所设计的 滤波器进行加工,实物如图 8 所示。



通过 Agilent E8363C 矢量网络分析仪测量滤 波器的 S 参数,图 9 为仿真与测试结果。3 dB 带宽 为 2.75~8.3 GHz,相对带宽为 100.45%,通带内 最小插损为 1.64 dB,回波损耗均小于-13.93 dB, 且上、下阻带均抑制在-10 dB 以下。两个传输零 点分别位于 1.93 GHz 和 11.04 GHz,上阻带的传 输零点衰减量不够,其原因可能是由于工艺上的误 差及 SMA 接头带来的损耗引起的。表 1 为所设计 的 UWB 滤波器与其他文献中的滤波器的对比。表 中,*IL* 为插入损耗,*RL* 为回波损耗,3 dB FBW 为 3 dB相对带宽,*TZ* 为是否有上、下阻带传输零点, *US* 为阻带范围。另外,本文设计的 UWB 滤波器采 用 FR4 板材,而其他已报道文献中采用的板材相比 成本较低。



表1 与其他 UWB 带通滤波器的性能对比

文献	基板介电常数	IL/dB	RL/dB	3 dB FBW/%	<i>TZ</i> (是/否)	US(抑制度大于-10 dB)
[7]	2.55	<2	>10	117	是	>16 GHz
[8]	2.55	<1.5	>10	122	是	>18 GHz
[9]	2.2	$<\!\!1$	>10	109.5	是	> 11 GHz
[11]	10.2	<1.1	>10	99.2	是	$> 11 \mathrm{~GHz}$
本文	4.4	<1.64	>13.93	100.5	是	>9.4 GHz

3 结束语

本文在传统 SIR 基础上,利用 H-DGS 及 DMS 设计了一款超宽带微带滤波器,其具有较好的通带 和阻带性能。H-DGS 的慢波效应增加了微带线的 有效电长度,使设计的滤波器结构紧凑,在小型化滤 波器设计中具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] LIU Y,LIANG C H, WANG Y J. UWB filter using hybrid quasi-lumped elements and defected ground structure[J]. IET Electronics Letters, 2009, 45(17): 899-900.
- [2] LEE J K, KIM Y S. Ultra-wide bandpass filter with improved upper stopband performance using defected ground structure [J]. IEEE Microwave & Wireless Component Letters, 2010, 20(6): 316-318.
- [3] 刘云,赵永久.高端锐截止的短截线超宽带滤波器[J]. 微波学报,2011,27(4):42-44.
 LIU Yun,ZHAO Yongjiu. UWB stub filter with steep rejection slope at the high edge of passband[J]. Journal of Macrowaves,2011,27(4):42-44.
- [4] WU X H, CHU Q X, TIAN X K, et al. Quintuple-mode UWB bandpass filter with sharp roll-off and superwide upper stopband[J]. IEEE Microwave & Wireless Component Letters, 2011, 21(12):661-663.
- [5] HE X, CHU Q X. Compact UWB bandpass filter using dual-stub-loaded resonator (DSLR) [J]. IEEE Microwave & Wireless Component Letters, 2013, 23 (10): 527-529.
- [6] 汪章静.基于平行耦合微带线和 DGS 结构的超宽带滤 波器[J]. 压电与声光,2013,35(2):276-278.
 WANG Zhangjing. Ultrawideband filter based on parallel-coupled microstrip lines and DGS[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2013,35(2):276-278.
- [7] 张友俊,秦家峰.一种中心枝节折叠的新型超宽带滤波 器[J]. 压电与声光,2014,36(5):720-722. ZHANG Youjun,QIN Jiafeng. A novel ultra-wideband filter with the center-minor folded[J]. Piezoelectrics &.

Acoustooptics, 2014, 36(5): 720-722.

[8] 杨海峰,邢孟江.具有三阶谐振腔的S波段LTCC带 通滤波器设计[J].重庆理工大学学报(自然科学版), 2012,26(6):98-101.

YANG Haifeng, XING Mengjiang. A design of S-band LTCC passband filter with three resonant cacities[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2012, 26(6):98-101.

[9] 杨虹,陈静,刘云龙,等.一种基于多模谐振器的超宽带带通滤波器设计[J].电子元件与材料,2015,34(6):
 61-65.

YANG Hong, CHEN Jing, LIU Yunlong, et al. Design of a ultra-wideband bandpass filter using MMR technique[J]. Electronic Component and Materials, 2015, 34(6):61-65.

- [10] 董金明,林萍实,邓晖. 微波技术 [M]. 2 版. 北京:机械 工业出版社,2010: 14-32.
- [11] SHIN I, LEE T H, LEE J, et al. A novel resonant ground structure based on a cavity-backed DGS[J]. IEEE Microw Wireless Compon Lett, 2014, 24(5): 321-323.
- [12] 门阳,游彬. 基于新型缺陷地的谐波抑制微带滤波器 设计[J]. 电子器件,2011,34(6):668-671.
 MEN Yang,YOU Bin. Design of harmonic-suppressed microstrip filter using novel defected ground structure
 [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2011, 34 (6):668-671.
- [13] 倪春,吴先良,安士全. 微带 DGS 低通滤波器的设计
 [J]. 中国电子科学研究院学报,2010,5(2):217-220.
 NI Chun,WU Xianliang,AN Shiquan. A design of microstrip DGS lowpass filter [J]. Journal of CAEIT, 2010, 5(2):217-220.
- [14] ZAKARIA Z, MUTALIB M A, ISMAIL A, et al. Compact structure of band-pass filter integrated with defected microstrip structure(DMS) for wideband applications[C]//S. l. : The Netherlands: The 8th European Conference on Antennas and Propagation, 2014: 2158-2162.