

一种曲折型缺陷地结构超宽带滤波器的设计

朱永忠, 赵志远

(武警工程大学通信工程系, 710086, 西安)

摘要: 针对超宽带滤波器插损较大、阻带较窄的问题, 提出一种曲折型缺陷地结构小型超宽带滤波器的设计方法. 首先, 在金属地面上开曲折型缝隙, 得到曲折型缺陷地结构; 然后, 依据曲折型缺陷地平行耦合线和传输线的结构特点, 分别构造它们的等效电路模型, 再结合 HFSS 仿真来验证电路模型的正确性, 推导出结构尺寸与等效电路元件参数之间的对应关系, 得出曲折型缺陷地平行耦合线具有超宽带特性和曲折型缺陷地传输线具有低通高选择性的结论. 结合这两种结构的优点设计了一种结构简单、具有宽阻带的超宽带滤波器. 测试结果表明, 与传统缺陷地结构和复合左右手传输线(CRLH)结构的超宽带滤波器相比, 该滤波器具有插损小的特点, 其带内最大插损仅为 0.88 dB, 阻带抑制在 11.75~20 GHz 范围内均小于 -30 dB.

关键词: 缺陷地结构; 超宽带; 滤波器; 传输零点

中图分类号: TN713.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)08-0100-06

Design of Ultra-Wideband Filter with Tortuously Defected Ground Structure

ZHU Yongzhong, ZHAO Zhiyuan

(Department of Communication Engineering, Engineering University of CAPF, Xi'an 710086, China)

Abstract: A novel design method for small ultra-wideband (UWB) filter is proposed by using tortuously defected ground structure (DGS) to solve the problem of larger insertion loss and narrower stop band in the design of UWB filter. Firstly, a tortuous DGS is obtained by using winding shaped slot in the metal ground, and then equivalent circuit models are established according to the structural features of the parallel coupled-line and the transmission line of the tortuous DGS. The correctness of the circuit models is verified by using software HFSS, and the relation between DGS size and equivalent circuit parameters is deduced. The UWB characteristic of the parallel coupled-line and the low-pass/high selective characteristic of the transmission line of tortuous DGS are demonstrated. A simple and high-selective UWB filter is then designed based on the advantages of the two lines. Test results show that the insertion loss of the proposed filter is lower than those of the conventional DGS and the CRLH UWB filters, and that the measured maximum insertion loss is about 0.88 dB and the rejection in the range of 11.75 to 20 GHz is less than -30 dB.

Keywords: defected ground structure; ultra-wideband; filter; transmission zero

自从 2002 年美国联邦通信委员会(FCC)解禁了 3.1~10.6 GHz 段的频谱、并使之能够应用于超

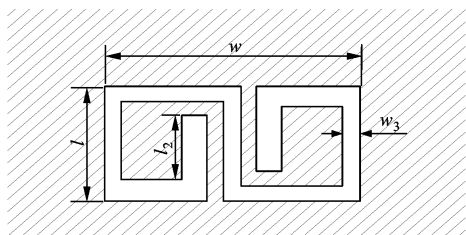
宽带设备之后, 在学术界和工业制造领域掀起了一股超宽带技术的研究热潮. 由于滤波器在整个射频

超宽带电路系统中扮演着相当重要的角色,因而成为了人们关注的热点和重点,于是出现了许多不同结构形式、不同性能特点的超宽带滤波器^[1-5],如混合微带线/共面波导滤波器、微带多模滤波器、短节线滤波器等,这些滤波器在通带内都表现出了较好的通带性能。但是,这些滤波器阻带较窄,不能有效抑制高次谐波。由于缺陷型接地结构(defected ground structure, DGS)能够产生特殊的带阻或带通效应,因此在超宽带滤波器设计中得到了越来越多的应用^[6-10]。在早期,DGS一般较多地应用于低通滤波器的设计^[6-8],而近年来,DGS在超宽带通滤波器设计中的应用逐渐增多。文献[9]应用半圆形缺陷地结构和阶梯阻抗并联枝结构,实现了超宽带带通滤波器的设计,但是这种滤波器的阻带太窄。文献[10-12]应用DGS虽然实现了带外的宽带抑制,但其插损相对较大,一般都在1.5 dB^[10,12]左右。

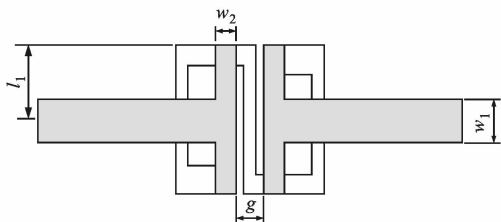
本文提出一种高选择性、宽阻带、低插损的超宽带滤波器的设计方法,利用曲折型DGS平行耦合线的带通特性展宽带宽,通过曲折型DGS传输线的低通特性抑制谐波,引入阶梯阻抗枝节调节带内波纹特性,实现了高性能、小型化超宽带滤波器的设计。

1 理论分析

传统DGS单元的带通特性主要应用于窄带,而基于DGS的超宽带滤波器也是由其低通和高通特性组合而成的,但鲜有文献对DGS单元的超宽带特性进行研究。本文研究的曲折型DGS通过在接地板上刻蚀一段旋转对称的曲折型单元而得到(如图1a所示),由于存在阻抗的不连续性,将得到某种形式



(a) 曲折型缺陷地面



(b) 曲折型DGS单元中的平行耦合线

图1 曲折型DGS平行耦合线

的谐振,通过与信号层不同形式传输线的结合,可以形成带通或带阻效应。

1.1 曲折型DGS平行耦合线的超宽带特性分析

曲折型DGS平行耦合线结构由信号层的一对平行耦合线、50 Ω传输线及曲折型缺陷地面构成,如图1所示。图1b为曲折型DGS单元信号层,根据文献[13],该单元中的50 Ω传输线可以等效为由串联电感 $2L_2$ 和并联电容 C' 构成的右手传输线,而两耦合线与地面间的耦合可用 C_c 表示。为简化电路,将 C' 和 C_c 合并为 C_2 ,平行耦合线间的耦合用电容 $C_3/2$ 表示,在金属地板上蚀刻曲折型单元相当于在传输线中引入对地的并联谐振电路(L_1, C_1)^[14],等效电路如图2所示。电路中传输参数的零点频率 f_1 是由并联LC电路(L_1, C_1)和串联电容 C_2 的谐振条件决定的。因为并联回路(L_1, C_1)的阻抗

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_1 + (j\omega L_1)^{-1}} = j \frac{\omega L_1}{1 - \omega^2 L_1 C_1} \quad (1)$$

单个电容 C_2 的阻抗

$$Z_2 = -j(1/\omega C_2) \quad (2)$$

当 $Z_1 + Z_2 = 0$ 时,并联支路产生谐振并出现衰减极点,因此谐振频率

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1}{L_1(C_1 + C_2)} \right]^{1/2} \quad (3)$$

取相对介电常数 $\epsilon_r = 4.4$,介质板厚度 $h = 0.8$ mm,平行耦合微带线宽度 $w_2 = 1.6$ mm,长度 $2l_1 = 3.12$ mm,间隙距离 $g = 0.6$ mm,馈线宽度 $w_1 = 1.54$ mm,缺陷地的尺寸 $l = 6.4$ mm, $w = 10.2$ mm, $w_3 = 0.6$ mm, $l_2 = 4$ mm,可得出相应的电路元件的量值为 $L_1 = 0.295$ nH, $C_1 = 0.490$ pF, $L_2 = 1.860$ nH, $C_2 = 0.380$ pF, $C_3 = 2.2$ pF。由式(3)可计算出传输零点频率 $f_1 = 10.02$ GHz。利用Ansoft HFSS进行仿真分析所得的结果与等效电路的响应曲线吻合较好(见图3,图中 S_{11} 为反射系数, S_{21} 为传输系数),仿真所得的3 dB带宽为1.95~7.59 GHz,10 dB带宽为1.71~8.80 GHz,最小插损为0.66 dB,可见曲折型DGS具有很好的宽带特性。

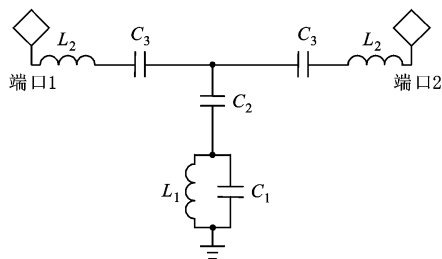


图2 曲折型DGS单元的等效电路

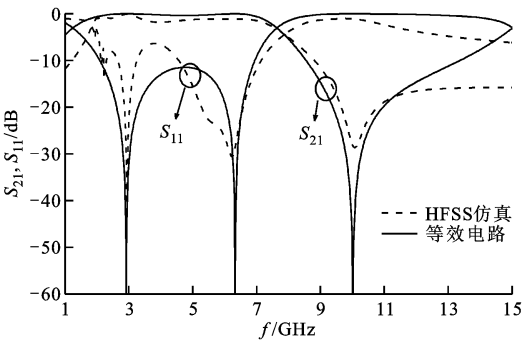


图3 等效电路响应曲线与 HFSS 仿真结果的比较

下面根据 Ansoft HFSS 的仿真结果来讨论曲折型 DGS 平行耦合线的各个参数对其带宽的影响. 保持以上其他参数不变, 仅改变 l_1 , 其传输响应曲线如图 4 所示, 可见随着 l_1 的增大, 其高端截止频率 (f_c) 越来越低, 而低端截止频率 (f_c) 基本不变. 表 1 给出了仅改变 l_1 时等效电路元件参数的变化, 可见随 l_1 增大, 元件中电感 L_2 增大, 而电容 C_3 减小. 若取 $w_2=1.6\text{ mm}$, $l_1=2.5\text{ mm}$, $w_1=1.54\text{ mm}$, 只改变两平行线间的间隙 g , 则由图 5 可见, 随着 g 的减小, 带内插损变好, 带宽增大, 这是因为 g 越小耦合就越强, 所以优化 g 可以改善滤波器的带内响应 (见图 5). 表 2 给出了仅改变 g 时等效电路元件参数的变化, 可见随着 g 的增大, 元件中电感 L_2 和电容 C_3 均减小.

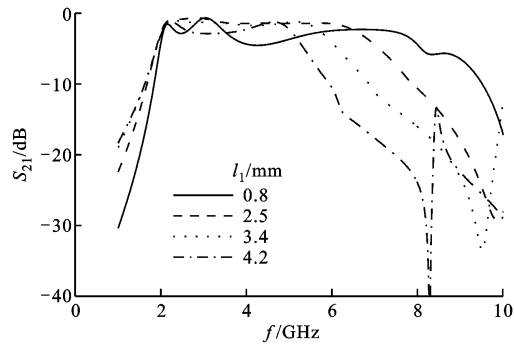


图4 传输响应随 l_1 变化的仿真结果

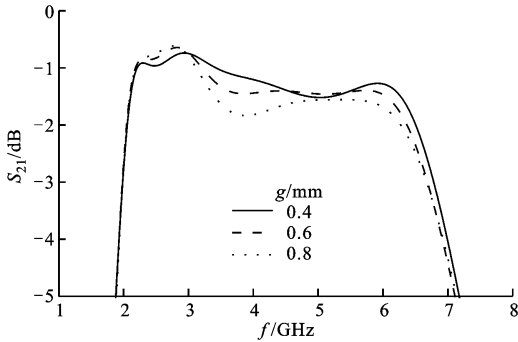


图5 传输响应随 g 变化的仿真结果

表1 平行耦合线等效电路参数与耦合线长度的关系

l_1/mm	L_1/nH	C_1/pF	L_2/nH	C_2/pF	C_3/pF
4.2	0.295	0.785	5.513	0.394	1.040
3.4	0.295	0.538	3.987	0.407	1.386
2.5	0.292	0.508	2.639	0.390	2.000
0.8	0.290	0.336	1.790	0.354	2.450

表2 平行耦合线等效电路参数与耦合线间距的关系

g/mm	L_1/nH	C_1/pF	L_2/nH	C_2/pF	C_3/pF
0.8	0.300	0.479	2.371	0.440	1.747
0.6	0.292	0.508	2.639	0.390	2.000
0.4	0.290	0.566	2.926	0.386	2.296

保持信号层的参数不变, 讨论曲折型 DGS 的尺寸对滤波器带宽的影响. 取 $w_2=1.6\text{ mm}$, $l_1=2.5\text{ mm}$, $w_1=1.6\text{ mm}$, $g=0.6\text{ mm}$. 设定 3 种曲折型 DGS 单元尺寸, 分别命名为 A、B、C 型: A 型为 $l=6.4\text{ mm}$, $w=10.2\text{ mm}$, $w_3=0.6\text{ mm}$, $l_2=4\text{ mm}$; B 型为 $l=5.4\text{ mm}$, $w=10.2\text{ mm}$, $w_3=0.6\text{ mm}$, $l_2=2.8\text{ mm}$; C 型为 $l=4.4\text{ mm}$, $w=10.2\text{ mm}$, $w_3=0.6\text{ mm}$, $l_2=1\text{ mm}$. 由图 6 可见, 随着曲折型 DGS 总长度的减小, 中心频率向高端平移.

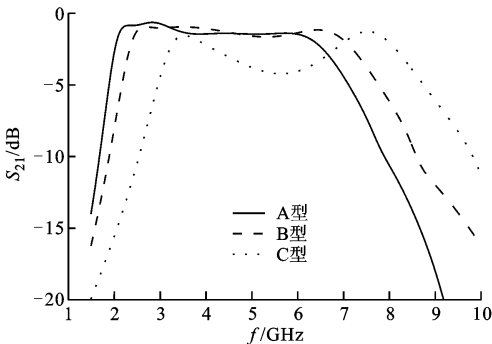


图6 传输响应随曲折型 DGS 尺寸变化的仿真结果

根据以上分析可知, 曲折型 DGS 的尺寸决定了超宽带带通滤波器的中心频率, 平行耦合线的长度 $2l_1$ 决定了超宽带带通滤波器的上限截止频率, 其他参数的变化可以改变带内波纹的幅度或带外的选择性. 从图 4~图 6 可见, 此种超宽带滤波器结构设计简单, 在高端阻带具有传输零点, 有较好的带外选择性, 而且由于带宽由曲折型 DGS 的总长度和耦合线长度 l_1 决定, 因此可以根据系统需求, 设计任意频带宽度的滤波器.

1.2 曲折型 DGS 传输线的低通特性分析

曲折型 DGS 传输线结构由信号层的 $50\ \Omega$ 传输线和曲折型缺陷地面构成,如图 7 所示. $50\ \Omega$ 传输线可以等效为串联电感和并联电容构成的右手传输线,在金属地板上蚀刻曲折型单元相当于在传输线中引入对地的并联谐振电路,同时曲折型单元的尺寸对传输线的串联电感和并联电容产生影响^[14-15],最终形成的等效电路如图 8a 所示. 取 $50\ \Omega$ 微带线的相对介电常数 $\epsilon_r=4.4$,介质板高度 $h=0.8\ \text{mm}$,导带宽度 $w_1=1.54\ \text{mm}$,缺陷地尺寸 $l\times w=6.4\ \text{mm}\times 10.2\ \text{mm}$, $w_3=0.6\ \text{mm}$, $l_2=4\ \text{mm}$,得出相应的电路元件参数值 $L_1=1.254\ \text{nH}$, $C_1=0.756\ \text{pF}$, $L_2=2.550\ \text{nH}$, $C_2=0.89\ \text{pF}$. 等效电路的传输响应曲线如图 8b 所示,其中传输参数的零点频率 f_1 是由并联 LC 电路(L_1, C_1)和串联电容 C_2 的谐振条件决定的,可用式(3)表示,而反射参数的零点频率 f_2 是由整个电路的谐振条件决定的,若支路电感 L_2 的

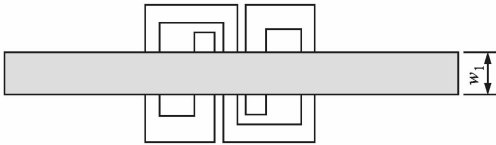
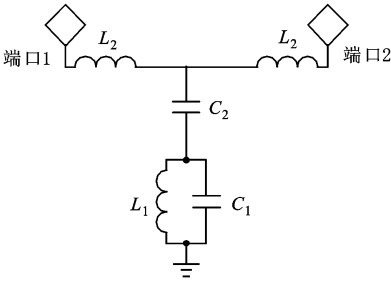
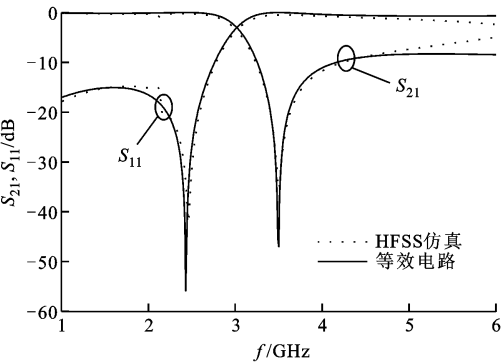


图 7 曲折型 DGS 传输线结构



(a) 等效电路



(b) 响应曲线

图 8 曲折型 DGS 传输线结构的等效电路及其响应曲线

阻抗用 Z_3 表示,并联支路(L_1, C_1)和串联电容 C_2 的阻抗用 Z_4 表示,则有

$$Z_3 = j2\pi f_2 L_2 \tag{4}$$

$$Z_4 = j \frac{2\pi f_2 L_1}{1 - (2\pi f_2)^2 L_1 C_1} - j \frac{1}{2\pi f_2 C_2} \tag{5}$$

因为图 8a 属典型的 T 型电路,若要使得其散射矩阵中的 S_{11} 为 0,则有

$$2Z_3 + \frac{Z_3^2}{Z_4} = \frac{Z_L^2}{Z_4} \tag{6}$$

式中: Z_L 为端口匹配阻抗; L_1, C_1, L_2, C_2 为等效电路中的元件参数. 因此,也可通过式(6)求得 f_2 .

利用式(3)和式(6)计算得 $f_1=3.48\ \text{GHz}$, $f_2=2.42\ \text{GHz}$. Ansoft HFSS 的仿真分析结果与等效电路的响应曲线吻合较好(见图 8b),说明这种结构具有很好的低通平坦特性和边带选择性.

下面讨论曲折型 DGS 传输线结构的尺寸对其传输参数的影响. 传输线结构分为 A、B、C 3 种类型:A 型的尺寸为 $l=6.4\ \text{mm}$, $w=10.2\ \text{mm}$, $w_3=0.6\ \text{mm}$, $l_2=4\ \text{mm}$,其等效电路模型的参数值为 $L_1=1.254\ \text{nH}$, $C_1=0.756\ \text{pF}$, $L_2=2.550\ \text{nH}$, $C_2=0.89\ \text{pH}$;B 型的尺寸为 $l=5.4\ \text{mm}$, $w=10.2\ \text{mm}$, $w_3=0.6\ \text{mm}$, $l_2=2.8\ \text{mm}$,其等效电路模型的参数值为 $L_1=0.910\ \text{nH}$, $C_1=0.856\ \text{pF}$, $L_2=2.050\ \text{nH}$, $C_2=0.79\ \text{pF}$;C 型的尺寸为 $l=4.4\ \text{mm}$, $w=10.2\ \text{mm}$, $w_3=0.6\ \text{mm}$, $l_2=1\ \text{mm}$,其等效电路模型的参数值为 $L_1=0.410\ \text{nH}$, $C_1=1.09\ \text{pF}$, $L_2=1.850\ \text{nH}$, $C_2=0.69\ \text{pF}$. 传输线结构等效电路的传输响应随结构尺寸的变化如图 9 所示. 由此可见,在曲折型 DGS 单元的宽度 w_3 一定的情况下,等效电感 L_1 主要取决于曲折型 DGS 单元的总长,且随着 DGS 单元总长的减小而减小;等效电容 C_1 主要由 $(L-L_3)$ 决定,且随 $(L-L_3)$ 的增加而增大. 此外,传输线的等效串联电感 L_2 和等效并联电容 C_2 随着曲折型 DGS 单元外周长的增加而增大. 总体而言,随

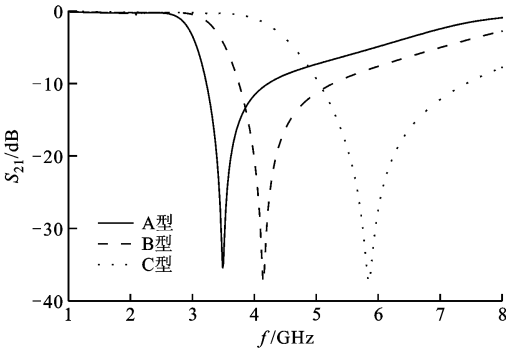


图 9 DGS 传输线的传输响应随其结构尺寸的变化

着 DGS 单元总长的减小,传输参数的衰减极点向高端平移.

与传统哑铃型 DGS(这里 $l=1.54\text{ mm}$, $b=8\text{ mm}$, $g_0=0.5\text{ mm}$)的传输特性进行比较,结果见图 10,可以看出曲折型 DGS 具有更好的边带特性和带内平坦特性,适合用作低通滤波器的基本单元,或用于谐波抑制.

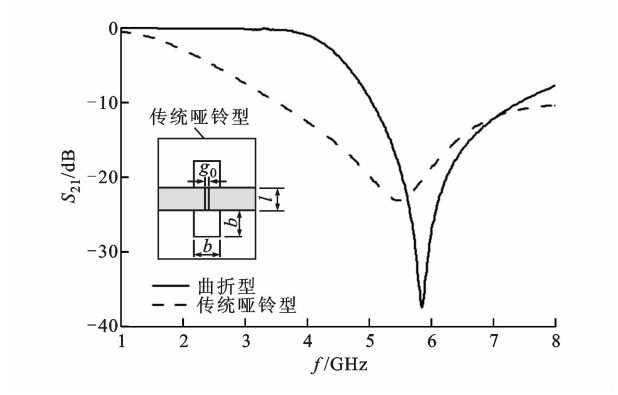
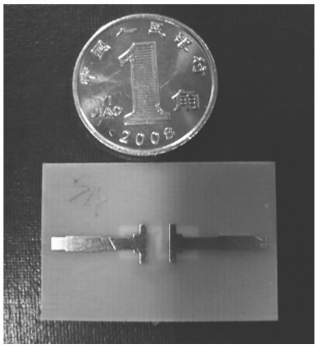


图 10 2 种 DGS 的传输响应比较

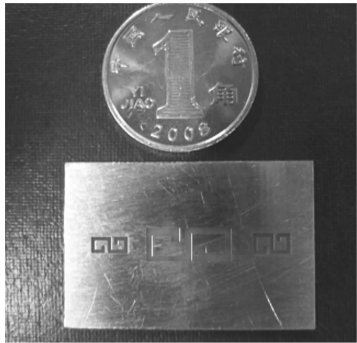
2 曲折型 DGS 超宽带滤波器设计

根据以上分析,本文设计了一个曲折型缺陷地组合式超宽带滤波器,实物照片见图 11. 图 11a 是正面,为信号层,从左至右依次为传输线、平行耦合线、传输线;图 11b 是反面,从左至右依次为 3 个曲折型缺陷地结构,由 2 个低通滤波器和 1 个带通滤波器级联组成. 介质板厚度为 0.8 mm , $\epsilon_r=4.5$. 在图 11b 中,从左至右,第一个为低通结构,其微带层结构如图 7 所示, $w_1=1.9\text{ mm}$, 缺陷地尺寸 $w_3=0.5\text{ mm}$, $l_2=1\text{ mm}$, $l=2\text{ mm}$, $w=4.5\text{ mm}$;第二个为带通结构,其微带层结构如图 1 所示, $w_2=1\text{ mm}$, $l_1=2.4\text{ mm}$, $l_2=2.27\text{ mm}$, $w_1=1.52\text{ mm}$, $g=2.92\text{ mm}$, 缺陷地尺寸 $w_3=0.7\text{ mm}$, $l_2=1.7\text{ mm}$, $l=4\text{ mm}$, $w=10.2\text{ mm}$;第三个为低通结构,其微带层结构如图 7 所示, $w_1=1.9\text{ mm}$, 缺陷地尺寸 $w_3=0.5\text{ mm}$, $l_2=1\text{ mm}$, $l=2.5\text{ mm}$, $w=4.5\text{ mm}$. 在馈电段,采用阶梯阻抗枝节进一步调整滤波器的带内响应. 滤波器测试采用安捷伦 N5230 矢量网络分析仪,测试结果如图 12 所示,测试的带宽可以达到 $3.1\sim 10.6\text{ GHz}$,最大插损为 -0.88 dB ,通带回波损耗最大值为 -17.5 dB ,传输零点位于 11.96 GHz 处,带外衰减在 $11.75\sim 20\text{ GHz}$ 范围内小于 -30 dB ,有效抑制了高次谐波.

与文献[11]中的传统哑铃型 DGS 滤波器和文献[12]中的复合左右手传输线(CRLH)结构滤波器



(a) 正面



(b) 反面

图 11 曲折型 DGS 超宽带滤波器实物图

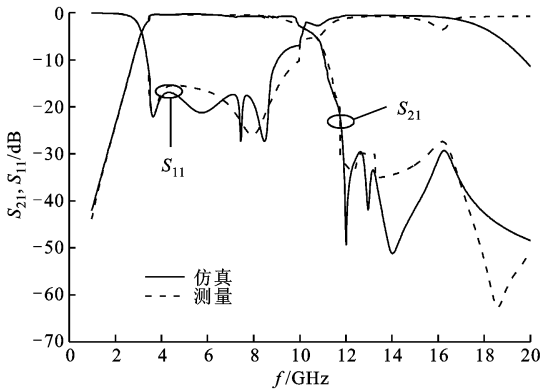


图 12 超宽带滤波器实测响应曲线

相比,在测试设备和测试频带相同的情况下,本文所提出的曲折型 DGS 超宽带滤波器在插损指标上明显具有优势:如表 3 所示,在 $3.1\sim 10.6\text{ GHz}$ 通带范围内,文献[11]滤波器的测试插损小于 1.8 dB ,文献[12]滤波器的测试插损小于 1.5 dB ,而本文滤波器的测试插损小于 0.88 dB . 这是因为,文献[11]的滤波器在馈线段采用了多个哑铃型 DGS,导致插损增加,文献[12]的滤波器为了减小结构尺寸,采用了单元 CRLH 结构,导致耦合明显不足,因此插损较大,且由于引入的交叉耦合有限,高端抑制较差,仅在 $11.95\sim 16\text{ GHz}$ 的阻带范围内传输抑制大于

20 dB,而本文滤波器的传输抑制在 11.75~20 GHz 范围内都大于 30 dB.由此可见,采用低插损的曲折型 DGS 平行耦合线和高阻带抑制的曲折型 DGS 传输线相结合的结构,在插损方面明显优于传统的缺陷地结构和单元 CRLH 结构,在阻带抑制方面与单元 CRLH 结构相比也具有较大优势.

表 3 本文滤波器与文献[11-12]滤波器的参数比较

来源	带内插损/dB	反射损耗/dB	传输抑制/dB
	3. 1~10. 6 GHz		
文献[11]	小于 1. 8	大于 11	大于 30 (11. 1~20 GHz)
文献[12]	小于 1. 5	大于 17	大于 20 (11. 95~16 GHz)
本文	小于 0. 8	大于 17. 5	大于 30 (11. 75~20 GHz)

3 结 论

基于曲折型 DGS 的平行线滤波器具有很宽的通带,能够通过调整微带层耦合线的长、宽和底部曲折型 DGS 面积的大小来设计任意带宽的超宽带滤波器,但是这种结构的阻带较窄,带外抑制不够好,而曲折型 DGS 的微带线结构具有很好的低通特性,且带内传输响应较为平坦,因此可以结合这 2 种结构的优点,设计出高选择性、宽阻带、低插损的超宽带滤波器.

参考文献:

[1] THOMSON N, HONG Jiasheng. Compact ultra-wideband micro-strip/coplanar waveguide bandpass filter [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2007, 17 (3): 184-186.

[2] CHEN Yucheng, LEE Chingher, HSU Chung I G. A compact CPW-fed UWB BPF using combined microstrip SIR [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2009, 51(4): 918-921.

[3] YAO Binyan, ZHOU Yonggang, CAO Qunsheng, et al. Compact UWB band-pass filter with improved upper-stopband performance [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2009, 19(1): 27-29.

[4] ABBOSH A M. Planar bandpass filters for ultra-wideband applications [J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 2007, 55(10): 2262-2269.

[5] CHEN P, WEI F, SHI X W, et al. A compact ultra-wideband band-pass filter with defected ground struc-

ture [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2009, 51(4): 979-981.

[6] 杨永杰,隋会静,周立衡,等. 新型螺旋形缺陷地结构在低通滤波器中的应用[J]. 南京理工大学学报:自然科学版, 2010, 34(6): 796-798.

YANG Yongjie, SUI Huijing, ZHOU Lihen, et al. Applications of novel spiral shaped defected ground structure to lowpass filter [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science, 2010, 34(6):796-798.

[7] ROUHI R. Compact elliptic function lowpass filter based on defected ground structure [J]. IECE Electronics Express, 2010, 7(6): 434-439.

[8] VERMA A K, KUMAR A. Synthesis of microstrip lowpass filter using defected ground structures [J]. IET Microw Antennas Propag, 2011, 5(12): 1431-1439.

[9] 魏峰,黄丘林,史小卫,等. 一种新型超宽带带通滤波器的设计与实现[J]. 微波学报, 2010, 26(3): 48-51.

WEI Feng, HUANG Qiulin, SHI Xiaowei, et al. Design and realization of a new UWB band-pass filter [J]. Journal of Microwave, 2010, 26(3): 48-51.

[10] SEKAR V, ENTESARI K. Miniaturized UWB band-pass filters with notch using slow-wave CPW multiple-mode resonators [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2011, 21(2): 80-82.

[11] NEDIL M, DENIDNI T A, DJAIZ A. Ultra-wideband microstrip to CB-CPW transition applied to broadband filter [J]. Electronics Letters, 2007, 43(8): 464-466.

[12] 褚庆听,黄健全,刘传运. 基于 CRLH 结构的小型超宽带滤波器[J]. 天津大学学报, 2011, 40(4): 359-363.

CHU Qingxin, HUANG Jianquan, LIU Chuanyun. Compact UWB band-pass filter based on CRLH structure [J]. Journal of Tianjin University, 2011, 40(4): 359-363.

[13] MONDAL P, MANDAL M K, CHAKTABARTY A. Compact bandpass filters with wide controllable fractional bandwidth [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2006, 16(10): 540-542.

[14] WENG M H, CHANG Y C, WU H W. An inverse S-shaped slotted ground structure applied to miniature wide stopband lowpass filters [J]. IEICE Trans on Electron, 2007, E90-C(12): 2285-2288.

[15] BONACHE J, GIL I. Complementary split rings resonators (CSRRs): towards the miniaturization of microwave device design [J]. Comput Electron, 2006, 5 (2/3): 193-197.

(编辑 葛赵青 刘杨)