

基于 SISS 结构的 DGS 微带低通滤波器研究

倪春¹, 张量¹, 吴先良¹, 郑娟²

(1. 合肥师范学院电子信息工程学院, 合肥 230601; 2. 合肥学院电子信息工程学院, 合肥 230601)

摘要: 缺陷地结构(defected ground structure, DGS)是在平面微波传输线接地金属板上通过刻蚀周期或非周期的形状,通过改变电路衬底材料的有效介电常数,实现改变微带传输线的等效电路.传统的 DGS 微带低通滤波器阻带较窄,且阻带抑制特性较差.针对这一问题,对 DGS 的电路结构进行深入的研究.采用矩形缺陷地结构(R-DGS),并引入矩形阶梯阻抗并联短截线(R-SISS)和半圆型阶梯阻抗并联短截线(S-SISS),设计完成了两款基于 SISS 结构的 DGS 微带低通滤波器电路.试验结果表明,新型 DGS 电路技术可以有效地改善通带内的射频传输特性,拓宽阻带带宽,增加阻带抑制,实验测试取得了较好的结果.

关键词: 缺陷地结构; 矩形阶梯阻抗并联短截线; 半圆型阶梯阻抗并联短截线

中图分类号: TN957.8 **文献标识码:** A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2016.01.001

引用格式: Research of defected ground structure microstrip low-pass filter using stepped impedance shunt stubs structure[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2016,46(1):1-5.

基于 SISS 结构的 DGS 微带低通滤波器研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2016,46(1):1-5.

Research of defected ground structure microstrip low-pass filter using stepped impedance shunt stubs structure

NI Chun¹, ZHANG Liang¹, WU Xianliang¹, ZHENG Juan²

(1. School of Electronic and Information Engineering, Hefei Normal University, Hefei 230601, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Hefei University, Hefei 230601, China)

Abstract: Defected ground structure (DGS) can change the effective permittivity of substrate materials and the equivalent circuit of the microstrip transmission line by etching the periodic or nonperiodic defected pattern on the ground plane of the microwave circuit. The traditional DGS microstrip low-pass filter has a narrow stopband, and the stopband rejection is poor. To solve this problem, the circuit structure of DGS is studied deeply. Two DGS microstrip low-pass filter circuits based on SISS structure were designed, by the adoption of rectangular defected ground structure (R-DGS), and the introduction of the rectangular stepped impedance shunt stubs (R-SISS) and semicircle stepped impedance shunt stub (S-SISS). The simulation results show that the novel DGS circuit techniques can effectively improve the RF transmission character in passband, broaden stopband bandwidth, increase stopband rejection, which are satisfactory.

Key words: defected ground structure; rectangular stepped impedance shunt stub; semicircle stepped impedance shunt stub

收稿日期:2014-12-24;修回日期:2015-09-16

基金项目:国家自然科学基金(51207041),安徽省教育厅高校自然科学研究重点项目(KJ2015A292)资助.

作者简介:倪春,男,1983年,硕士/讲师,研究方向:微波射频电路, E-mail: aiheping_student@sina.com

通讯作者:吴先良,博士/教授, E-mail: xlwu@ahu.edu.cn

0 引言

低通滤波器是现代无线通信系统中非常重要的电路部件,具有多种信号传输特性,能够抑制高次谐波和杂波.现代无线通信技术的不断发展对滤波器的性能要求也越来越高,要求滤波器带内传输和带外抑制具备良好的特性.另外,越来越紧凑的通信系统对电路元器件结构有小型化需求.迄今为止,人们已经提出了多种结构的微波滤波器,包括高低阻抗滤波器(SIR)^[1],缺陷地结构(defected ground structure, DGS)滤波器^[2]和发卡式结构滤波器^[3]等.

缺陷地结构是韩国学者 Park 等在研究了光子带隙结构(photonic band gap, PBG)^[4]的基础上提出来的.这种电路结构是通过在微带接地金属板上刻蚀周期或者非周期的形状,从而影响接地板上传导电流的分布,进而改变传输线的特性.使得 DGS 构成的微带线具有单极点低通特性、慢波效应和高等效特性阻抗三大特性.

DGS 的单极点低通特性可以方便提取等效电路参数值,简化电路分析方法,提高电路的分析效率. DGS 的慢波特性可以减小微波器件的尺寸,对小型化电路设计具有很好的应用价值. DGS 可以实现高特性阻抗,所以带有 DGS 的微带线可以在微波和毫米波电路中代替高特性阻抗微带线,有助于解决高特性阻抗微带线加工精度困难的问题.由于 DGS 具有以上特性,使得其成为当前微波毫米波集成电路研究领域的热点问题.平面谐振器、滤波器、定向耦合器、功分器、振荡器、功率放大器电路在天线中的应用正在不断研究和开发.

1 DGS 结构特性及模型参数提取

DGS 是由电磁带隙结构(electromagnetic band gap, EBG)^[5]发展而来的,其和电磁带隙结构相似,通过在微带线接地金属板上刻蚀周期性的单元结构,以获得设计频段的阻带,在结构形式上多种多样.然而 DGS 结构等效电路的提取较 EBG 结构要简单得多.

DGS 传输线的结构可以等效为并联的电容和串联电感,其特性包括:提高介质的等效介电常数、提高传输线的等效电容和电感、低通带阻、慢波、存在截止频率和谐振频率.实验表明, DGS 的微带线结构具有更高的慢波因子,因此基于 DGS 结构的电

路具有更长的电长度.在设计小型化电路方面具有得天独厚的优势.

DGS 结构模型设计,一般情况下可分为两大类形状的 DGS 模型.包括简单的独立矩形形状和哑铃型形状,如图所示.其中哑铃型的结构根据哑铃结构的不同,又可分为矩形、半圆型、圆形和三角形^[6-7].

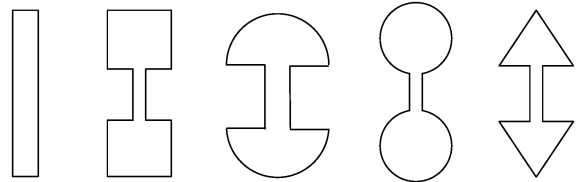
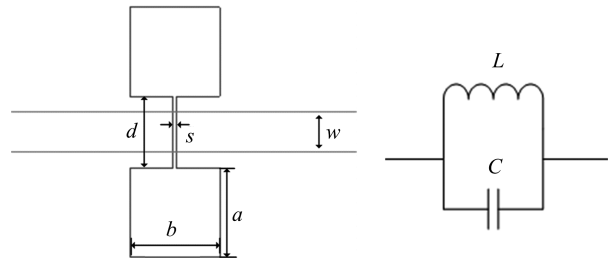


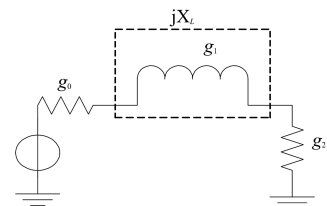
图 1 DGS 结构类型

Fig. 1 Structure type of DGS

本文在缺陷地结构的选择上,采用了矩形哑铃结构的缺陷地结构设计.图 2(a)为矩形哑铃结构 DGS 单元与其等效 LC 谐振电路.其中,矩形哑铃结构的边长分别为 a 和 b ,哑铃的矩形缝隙为 s ,哑铃中间长度为 d , w 是 50Ω 的微带传输线的宽度^[8].



(a) DGS 结构单元与 LC 并联谐振电路示意图



(b) Butterworth 低通原型滤波器

图 2 电路分析原理图

Fig. 2 Circuit analysis diagram

图 2 中 DGS 的 LC 并联谐振等效电路的电抗为:

$$X_{LC} = \frac{1}{\omega_0 C (\omega_0 / \omega - \omega / \omega_0)} \quad (1)$$

式中, $\omega_0 = 1 / \sqrt{LC}$ 是并联 LC 谐振器的谐振角频率,该角频率与衰减极点相对应.用 Butterworth 低通原型滤波器来表示 DGS 的低通特性,在低通滤波器的 3dB 截止频率点 ω_c 处有如下的等式:

$$X_{LC} |_{\omega=\omega_c} = X_L |_{\omega'=1} \quad (2)$$

ω' 为归一化角频率, 根据上述的电路分析结果, 可以得到等效 LC 谐振电路的电容和电感分别为:

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C} \quad (3)$$

$$C = \frac{\omega_c}{Z_0 g_1} \cdot \frac{1}{\omega_0^2 - \omega_c^2} \quad (4)$$

式中, f_0 是阻带的谐振频率, 微带线的特性阻抗用 Z_0 表示. 由此我们可以得出 DGS 的 LC 谐振等效电路的电感和电容大小^[9].

虽然 DGS 模型的结构形式多样, 但基本原理相似. 本文采用的矩形哑铃结构, 在一些文献中对方形哑铃的结构参数进行了分析^[10]. 有趣的是其参数 a 、 b 、 d 、 s 的选择性较大, 通过改变参数的值从而改变等效电路的电容和电感的值, 导致电路的特性发生变化, 而这一变化可以通过软件仿真的方式进行分析. 分析结果显示, 随着 s 的增大, 等效电路的等效电容值减小, f_0 增大, 其他参数变化不大; 随着 a 的增大, 等效电路的等效电感增大, f_0 减小, 电容变化不大; 随着 d 增大, 等效电路的等效电容和等效电感都增大, f_0 减小^[11].

2 阶梯阻抗并联短截线特性分析

阶梯阻抗并联短截线结构包括两个位于 50Ω 特性阻抗微带线两侧的相同的结构单元. 两个结构单元位于 50Ω 微带线的两侧, 呈对称分布. 阶梯阻抗并联短截线的结构主要有矩形阶梯阻抗并联短截线 (R-SISS) 和半圆型阶梯阻抗并联短截线 (S-SISS)^[12]. 下面以矩形阶梯阻抗并联短截线为例, 如图 3 所示为电路的结构及其等效电路, 矩形结构的边长为 b_1 和 b_2 , 且两个矩形与 50Ω 微带线之间的缝隙宽度为 s_1 , 两个矩形结构与 50Ω 微带线的连接线的宽度为 s_2 .

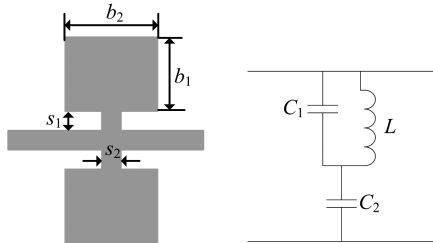


图 3 矩形阶梯阻抗并联短截线 (R-SISS) 及其等效电路
Fig. 3 Rectangular stepped impedance shunt stub (R-SISS) and its electrical equivalent

为了进一步分析矩形阶梯阻抗单元结构的特性, 本文利用 HFSS 软件对电路的参数进行扫描分

析, 仿真所使用的介质介电常数为 2.55, 厚度为 0.79mm. 保持 $s_1 = s_2 = 0.5\text{mm}$, 改变矩形结构的边长 b_1 和 b_2 , 设置 $b_2 = 6$, b_1 的取值为 5mm、6mm、7mm, 再设置 $b_1 = 6$, b_2 的取值为 5mm、6mm、7mm, 保持 $b_1 = b_2 = 6\text{mm}$, 改变 s_1 , s_1 的取值为 0.3mm、0.5mm、0.7mm. 仿真结果如图 4 所示. 对比两种情况下 b_1 、 b_2 和 s_1 长度对谐振频率的响应, 结果显示随着边长 b_1 或 b_2 增加谐振频率降低, 即等效为增加等效 LC 谐振电路的电容 C , 随着 s_1 的增加谐振频率随之降低, 可等效为谐振电路等效电感 L 增加.

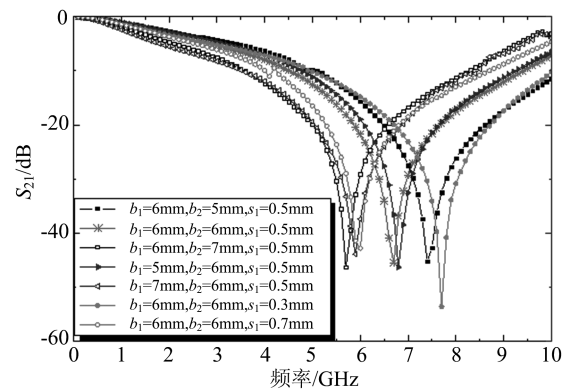


图 4 不同尺寸参数的 R-SISS 的仿真结果

Fig. 4 Simulation with different parameters of R-SISS

3 低通滤波器的设计

传统的 DGS 低通滤波器采用哑铃型的结构, 运用 HFSS 软件对传统哑铃型的结构进行仿真, 微带线的特性阻抗仍然选择 50Ω , 结构如图 5(a) 所示, 对哑铃的缝隙 s 进行扫描, 分析哑铃结构的频率响应特性, 仿真结果如图 5(b) 所示. 从图中可以看出, 普通单个哑铃 DGS, 由于在结构上未经优化, 获得的阻带带宽较窄, 不能很好地抑制高次谐波, 无法得到最佳的传输和反射特性. 对 s 的扫描结果, 可以看出, 随着 s 的增加谐振频率降低, 但阻带抑制进一步变差. 为了克服以上问题, 改善通带内的驻波, 引入了哑铃型的矩形阶梯阻抗并联短截线结构.

微带线的特性阻抗仍然选择 50Ω , 这里在哑铃型结构的 DGS 低通滤波器的基础上增加 R-SISS 结构, 提出了一种新型的、结构更加紧凑的微带线低通滤波器, 其结构如图 6 所示. 图 6(a) 给出了 R-SISS 结构单元和 R-DGS 结构单元的俯视图; 图 6(b) 给出了 R-SISS 结构单元的纵向剖面图和 R-DGS 结构单元的横向剖面图, 并在上述图中给出了等效电路

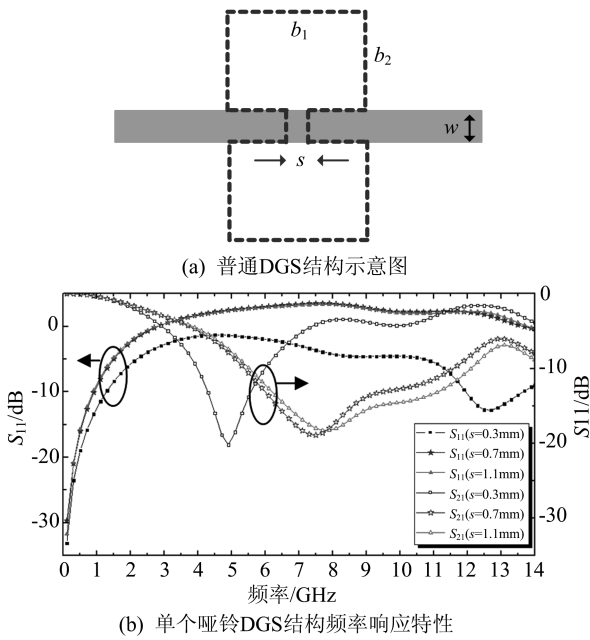


图 5 DGS 结构及其参数扫描仿真结果
Fig. 5 Geometry of DGS and its simulation with different parameters

型. 综合分析 R-SISS 和 R-DGS 单元的等效电路, 新型结构的滤波器可由若干个 R-DGS 单元和 R-SISS 单元组成.

本文采用了 3 个 R-SISS 单元和 2 个 R-DGS 单元级联的结构, 设计了一款截止频率为 2GHz 的低通滤波器. 图 7 给出了这种组合结构的电路结构图以及其电路参数情况, 利用 HFSS 软件对电路参数 $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, s_1, s_2, s_3$ 进行扫描, 通过迭代优化, 不断改进指标并最终确定上述参数值. 最终结果 $L_1 = 40\text{mm}, L_2 = 20\text{mm}, w_1 = 2.4\text{mm}, a_1 = 5\text{mm}, a_2 = 6.2\text{mm}, a_3 = 5.9\text{mm}, b_1 = 3.2\text{mm}, b_2 = 3.8\text{mm}, b_3 = 2.7\text{mm}, s_1 = 0.6\text{mm}, s_2 = 0.9\text{mm}, s_3 = 0.7\text{mm}$.

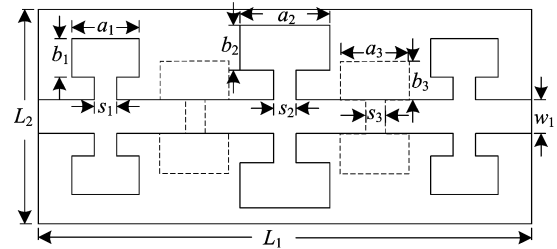


图 7 电路结构及其参数

Fig. 7 Circuit structure and its parameters

图 8 给出了电路结构的照片, 仿真及测试结果. 电路的大小尺寸为: $40\text{mm} \times 20\text{mm}$. 与传统的 DGS 低通滤波器相比, 基于 R-SISS 结构的 DGS 低通滤波器的阻带抑制特性得到了明显的提高, 通带内 S_{11} 特性也得到很明显的改善, 达到 -20dB 左右, 在阻带内 S_{21} 的起伏也明显减小, 阻带的宽带显著变宽, 阻带内抑制增强, 阻带深度明显加深. 试验结果证实了 R-SISS 结构的特点.

此外, 本文还对 S-SISS 结构进行了研究, 通过综合分析, S-SISS 结构等效电路模型的获得方法与 R-SISS 相同. 为了深入研究此种类型电路结构的频率响应特性, 进一步验证 SISS 结构对 DGS 低通滤波器频率响应的影响, 本文同时对由若干 S-SISS 单元和若干 R-DGS 单元组成的电路进行了试验, 试验采用了 3 个 S-SISS 单元和 4 个 R-DGS 单元级联的电路结构. 图 9 给出了电路的照片、仿真及测试结果. 从实验结果可以得到, 基于 S-SISS 的低通滤波器, 阻带内的 S_{11} 起伏较小, 阻带的宽带也较宽, 且阻带抑制较深. 由以上两个实验可以证明, 基于 SISS 结构的 DGS 低通滤波器的频率响应特性得到了显著改善, 尤其是阻带抑制带宽和抑制度都能得到很大的改善.

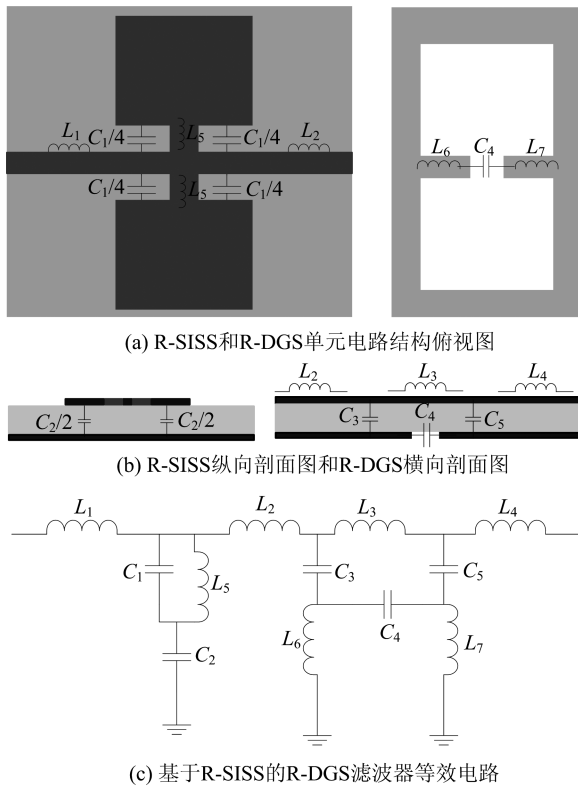


图 6 组合电路单元结构图及其等效电路
Fig. 6 Unit structure of combinational circuit and its electrical equivalent

模型提取方法; 图 6(c) 给出了由 R-SISS 结构单元和 R-DGS 结构单元组成的组合电路的等效电路模

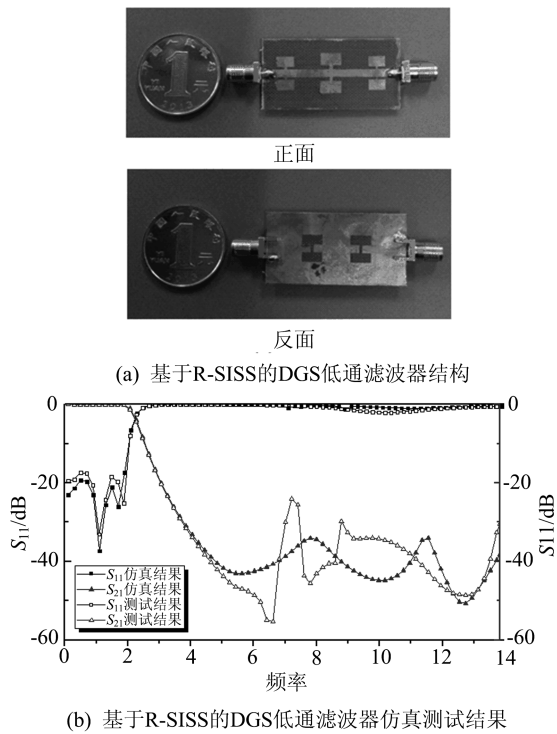


图 8 基于 R-SISS 的 DGS 低通滤波器
Fig. 8 DGS low pass filter based on R-SISS

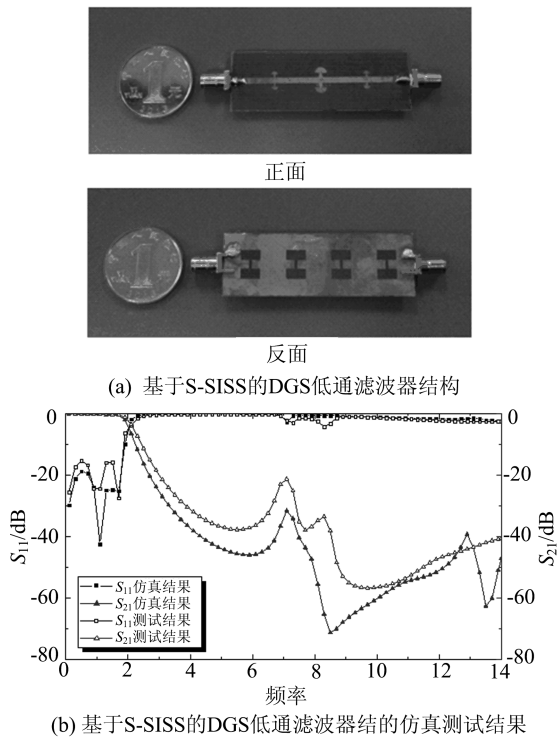


图 9 基于 S-SISS 的 DGS 低通滤波器
Fig. 9 DGS low pass filter based on S-SISS

4 结论

本文对传统 DGS 低通滤波器结构进行分析,并

对 SISS 结构进行研究,完成了对 R-SISS 和 R-DGS 结构单元的等效电路的提取. 实验证明,SISS 结构对于 DGS 低通滤波器具有增加阻带带宽和抑制制度的特点,实验分别对基于 R-SISS 结构和 S-SISS 结构的 DGS 低通滤波器进行仿真设计,通过结构优化完成了两款滤波器电路的设计,测试结果表明,该种结构的滤波器具有很好的阻带抑制特性,在射频微波电路中,能够很好地抑制电路的高次谐波分量,具有一定的科学研究价值和实际工程意义.

参考文献(References)

- [1] Park J S, Yun J S, Ahn D. A design of the novel coupled-line bandpass filter using defected ground structure with wide stopband performance[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2002, 50(9): 2037-2043.
- [2] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Physical review letters, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [3] Radisic V, Qian Y, Coccioli R, et al. Novel 2-D photonic bandgap structure for microstrip lines [J]. IEEE Microwave & Guided Wave Letters, 1998, 8(2): 69-71.
- [4] Kamakar N C, Roy S M, Balbin I. Quasi-static modeling of defected ground structure [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2006, 54(5): 2160-2168.
- [5] Woo D J, Lee T K. Suppression of harmonics in Wilkinson power divider using dual-band rejection by asymmetric DGS [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2005, 53 (6): 2139-2144.
- [6] Chen X Q, Wang L X, Weng L H, et al. Compact low pass filter using novel elliptic shape DGS[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2009, 51 (4): 1088-1091.
- [7] 闫敦豹, 高强, 付云起, 等. 加窗技术在微带 EBG 结构中的应用[J]. 微波学报, 2004, 20(4): 60-63.
- [8] 陈小群, 史小卫, 林浩佳, 等. 基于等效电路模型映射的 DGS 低通滤波器设计[C]// 第二届安捷伦科技节暨安捷伦科技生命科学与化学分析技术高层论坛. 上海, 2009.
- [9] 魏峰, 翟阳文, 史小卫, 等. 一种新颖的缺陷地微带线低通滤波器[J]. 西安电子科技大学学报, 2009, 36(4): 645-648.
- [10] 张金玲, 吕英华, 李宁, 等. 缺陷接地结构抑制微波器件谐波[J]. 电波科学学报, 2009, 24(3): 546-550.
- [11] 杨维明, 吴姣, 张劲, 等. 基于分形技术的阶跃阻抗微带低通滤波器设计[J]. 电波科学学报, 2010, 25(5): 1000-1004.
- [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.