

基于等效电路模型映射的 DGS 低通滤波器设计

陈小群 史小卫 林浩佳

(西安电子科技大学 天线与微波技术重点实验室, 西安 710071)

摘要:在分析缺陷地结构(DGS)单元及其等效电路模型的基础上,采用了一种新颖的椭圆 DGS 单元并建立了椭圆 DGS 单元与其等效电路之间的映射关系。根据该映射关系利用电磁仿真的 S 参数提取出等效电路模型的元件值,通过基于矩量法(MoM)的快速电路仿真优化得到目标频率响应对应的电路元件值,根据电路优化的结果调谐低通滤波器的电磁模型。最终获得所需低通滤波器结构。实验证明该滤波器的电磁仿真、等效电路仿真及实测结果吻合,验证了该设计方法的有效性和准确性。

关键字:缺陷地结构, 低通滤波器, 等效电路, 矩量法, 有限元

中图分类号: TN713 文献标识码: A

Design of DGS Low Pass Filter with Equivalent Circuit Model Mapping

Chen Xiaoqun Shi Xiaowei Lin Haojia

(Key Lab. Antennas and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: As the equivalent circuit model of the defected ground structure (DGS) unit was analyzed, a mapping relationship between DGS unit and its equivalent was established by using a novel elliptic shape DGS. The devices values of the equivalent circuit could be obtained from the simulated S parameters. And the low pass filter could be optimized by simulated its equivalent circuit model with method of moments (MoM). The filter was finally adjusted and optimized according to the mapping of the circuit simulated. Finally, a low pass filter was simulated, optimized and fabricated. The experiment results showed a good agreement and validity for the proposed design method.

Keywords: defected ground structure, low pass filter, equivalent circuit, method of moments, finite element

1 引言

1999 年 J.I.Park 等学者在光子带隙结构 PBG (Photonic Band Gap) 的基础上提出的缺陷地结构 DGS (Defected ground structure) 已经成为微波领域新近发展的热点之一, 并逐渐被应用于天线、低通滤波器等无源器件的设计^[1, 2]。DGS 是指在微带线等传输线的金属地平面上蚀刻周期性或非周期性的各种栅格的平面结构, 通过改变地板电流分布间接改变传输线的传输特性, 从而获得慢波特性和禁带特性^[3]。DGS 具有以下优点: 首先, 结构简单且易于仿真和制作^[4]。其次, 具有足够宽的阻带特性和慢波效应, 可以用来抑制二次甚至高次谐波, 并减小电路尺寸^[5, 6]。第三, 插入损耗小。许多滤波器采用 DGS 可以在特定的通带内实现足够小的插

损^[7]。

传统的低通滤波器设计大多数采用低通滤波器的电路原型, 根据指标选择其实现形式, 如巴特沃斯, 切比雪夫或椭圆函数等形式。根据所选形式的电路模型的阶数、等效电路原件值和耦合系数, 通过电磁仿真调谐实现所需指标。本文在低通滤波器综合的基础上, 提出了一种采用等效电路模型与电磁模型映射的快速设计 DGS 低通滤波器的方法。实验通过对 DGS 单元建模、仿真、 S 参数提取和等效电路分析, 进行电路模型优化, 采用一种新颖的椭圆结构 DGS 低通滤波器, 与最终实验测试结果进行比较, 证明利用电路模型优化的有效性和准确性。

2 等效电路模型提取

2.1 DGS 等效电路模型提取

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 60571057)

图 1 给出了三种不同结构的 DGS 单元, 其中椭圆 DGS 单元为本文所提出的一种新颖的结构。下面以椭圆 DGS 单元为例子进行分析如图 2 所示。该单元是在微带线的下方接地板上蚀刻出 2 个对称椭圆形并由一狭细的缝隙连接。其中椭圆的长径为 b , 短径为 a , 缝隙的宽度为 g , 两个椭圆中心距离为 l 。本文采用介电常数为 3.2, 厚度为 0.787 mm 的基板, 其 50Ω 微带线长度 d 为 1.88 mm, 图 2 为该单元的等效 RLC 谐振电路模型。

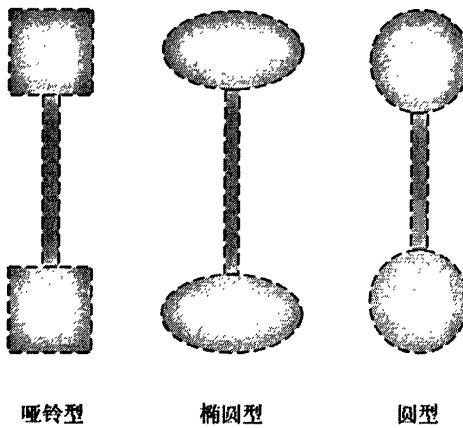


图 1 三种不同结构的 DGS 单元

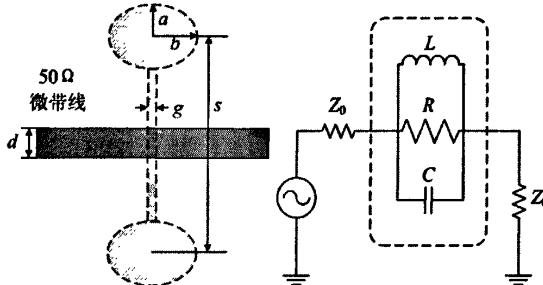


图 2 椭圆 DGS 单元及其等效电路模型

微带线下面的地板蚀刻椭圆区域形成的等效电感 L , 中间的狭槽形成的等效电容 C , 组成 LC 并联的谐振电路, 其频率响应在有限特定频点上产生极点^[8]。由于实际模型为有耗等效电路, 因此用一个并联谐振 RLC 电路表示。为了便于分析, 常用理想无耗 LC 电路来等效 DGS 单元。如图 2 所示, 该 RLC 电路元件参数可以通过对该结构进行 EM 仿真所得的 S 参数及以下公式提取出来^[7]

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

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

$$R = \frac{2Z_0}{\sqrt{\frac{1}{|S_{11}(\omega_0)|^2} - \left(2Z_0\left(\omega_0 C - \frac{1}{\omega_0 L}\right)\right)^2} - 1} \quad (3)$$

式中 ω_0 是谐振角频率; ω_c 代表 3 dB 截止角频率; Z_0 指传输线的特征阻抗, 这里 Z_0 为 50Ω。三种不同结构的 DGS 单元的正方形, 椭圆形和圆形的面积均为 15.1 mm², 其中本文仿真采用介电常数为 3.2, 厚度为 0.787 mm 的基板, 其 50Ω 微带线长度 d 为 1.88 mm, 边长为 3.88 mm, 椭圆的长轴为 2.4 mm, 短轴为 2 mm, 圆形的半径为 2.19 mm 并且连接正方形, 椭圆形和圆形的缝隙的宽度为 0.2 mm, 长度为 12 mm。其频率响应特性如图 3 所示,

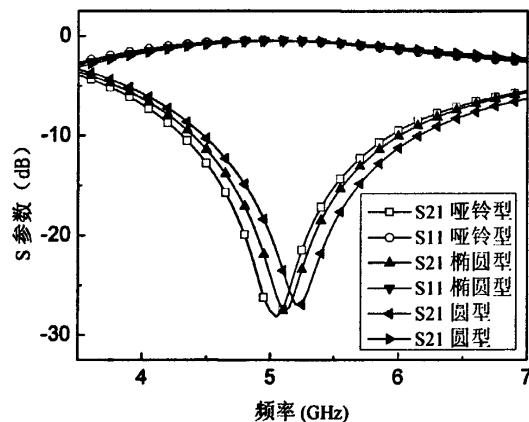


图 3 三种 DGS 单元的频率特性

表 1 是由图 3 的三种不同结构的 DGS 单元在同等条件下仿真所得的 S 参数提取的部分等效电路模型元件值及其响应频率。

以椭圆 DGS 单元与其等效电路的仿真结果比较为例子, 由图 4 可见, 该电路模型与电磁仿真的频率响应吻合良好, 证明了该等效电路的有效性与准确性。事实上, DGS 单元的尺寸可以与等效电路模型建立起普遍的对应关系。对于任意一个 DGS 单元, 其缺陷结果的面积 (正方形、椭圆形或者圆心缺陷面积) 均可以等效为一电感, 并且电感值的大

小与面积成正比。而连接两个缺陷结构的缝隙则可等效为一电容, 电容的大小与缝隙的宽度成反比。按照这种关系, 可以通过频率响应实现映射。

表 1 等效电路元件值及其响应频率

	哑铃型	椭圆型	圆型
f_c (GHz)	3.25	3.32	3.44
f_0 (GHz)	5.01	5.12	5.18
L (nH)	2.833	2.579	2.581
C (pF)	0.358	0.375	0.366
$S_{21\max}$ (dB)	-27.85	-27.58	-26.93

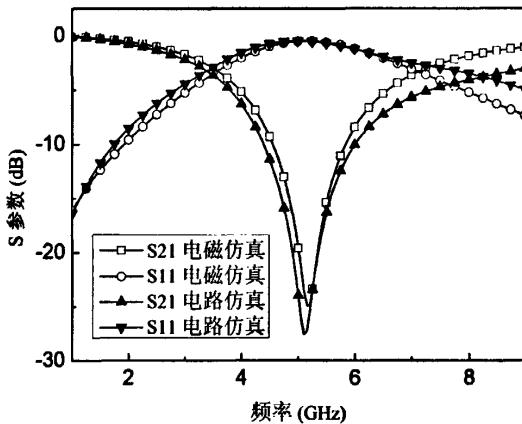


图 4 椭圆 DGS 单元的电磁仿真与等效电路仿真

2.2 等效电路模型映射

由前面的分析可知, 该椭圆 DGS 单元与其等效电路模型之间存在电磁模型尺寸与等效电路元件值的一一对应关系, 针对不同尺寸的 DGS 单元模型, 其电磁仿真的频率响应与等效电路模型的元件值和频率响应存在一一对应关系, 因此, 本文提出了一种对应的等效电路模型与电磁模型的映射模型如图 5 所示。

首先, 根据低通滤波器的设计指标, 选取合适的响应方式, 确定滤波器阶数和电路拓扑结构(奇数阶/偶数阶), 综合出电路的元件值以及耦合系数, 并建立电磁模型。其次, 先通过电磁的模型的仿真所得的频率响应 S 参数, 通过公式提

取出等效电路模型的元件参数。利用电路模型进行快速调谐优化, 得出性能符合要求的滤波器响应的电路模型的元件参数。最后利用优化所得的电路模型调整电磁模型的具体尺寸参数。实现所需滤波器设计。本文电磁仿真采用基于有限元 FEM (Finite Element) 的仿真软件 HFSS, 电路仿真采用 Agilent 的基于矩量法 MoM (Method of Moments) 仿真软件 ADS(Advanced design System)。

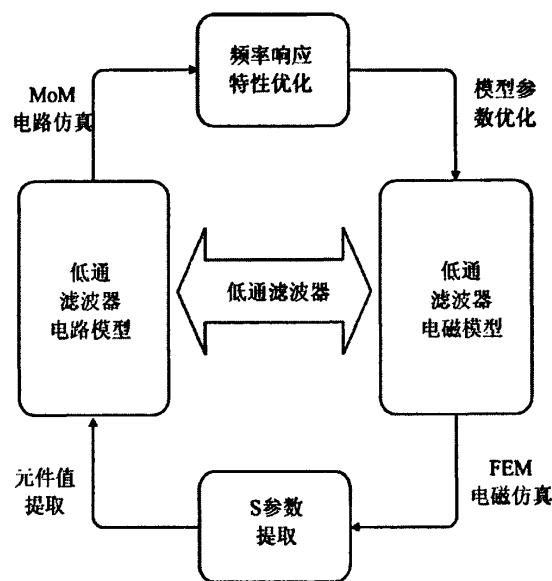


图 5 等效电路模型与电磁模型映射示意图

3 DGS 低通滤波器设计

由上面提出的等效电路映射法可知, MOM 可以快速准确的得到电路的频率响应, 利用该方法设计低通滤波器可以有效减少设计时间, 提高设计效率。下面通过一个实际例子验证该设计方法。现要求设计以低通滤波器, 截止频率为 4.5 GHz, 通带回波损耗低于 -2 dB, 带内插损小于 1 dB, 带外衰减在 5.5 GHz ~ 10 GHz 范围内小于 -30 dB。

根据上述指标, 选取椭圆函数响应的七阶低通形式, 具体对应的元件可以通过查表获得。该低通滤波器的 DGS 实现形式如图 6 所示。采用三个椭圆 DGS 单元级联的方式, 在微带线上增加并

联枝节, 以获得更好的带外抑制特性。

其中 DGS 低通滤波器的初始模型参数为 $a=1 \text{ mm}$, $b=1.5 \text{ mm}$, $b_1=2 \text{ mm}$, $w=1 \text{ mm}$, $g=0.2 \text{ mm}$, $s_1=12 \text{ mm}$, $s_2=6 \text{ mm}$, $l_1=10 \text{ mm}$, $l_3=5 \text{ mm}$ and $l_4=8 \text{ mm}$ 。在固定其它参数的情况下, 改变并联枝节 l_2 的长度, 即改变了并联电容的大小, 其不同枝节长度的电磁仿真响应如图 6 所示。可见当 l_2 的长度增加时, 带外抑制可以得到较好的改善, 而带内的回波损耗也随之增大。

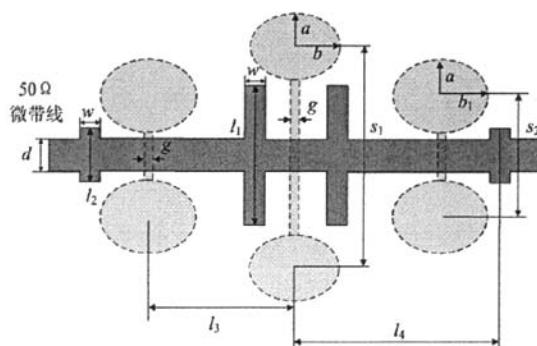


图 6 DGS 低通滤波器模型

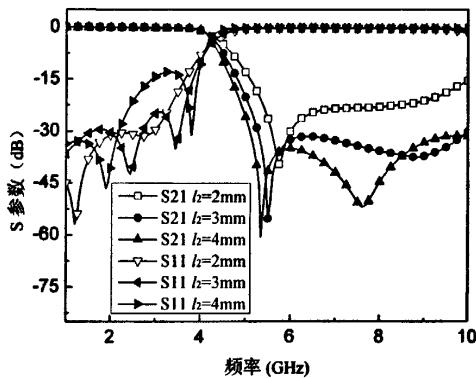


图 7 并联枝节长度变化时的频率响应

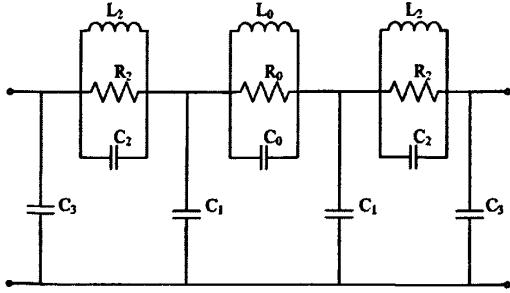


图 8 DGS 低通滤波器的等效电路模型

利用电磁仿真所得的 S 参数, 可计算出等效电路的具体元件值。其中并联电容可由开路微带并联枝节的计算得出。图 7 是该低通滤波器的等效电路模型。在初始 S 参数提取的电路元件值的基础上, 优化出所需频率响应的电路模型的元件值为 $C_0=0.43 \text{ pF}$, $L_0=2.21 \text{ nH}$, $R_0=2.192 \text{ k}\Omega$, $C_2=0.21 \text{ pF}$, $L_2=0.93 \text{ nH}$, $R_2=1.642 \text{ k}\Omega$, $L_{s1}=1.13 \text{ nH}$, $L_{s2}=2.38 \text{ nH}$, $C_1=1.41 \text{ pF}$ and $C_3=0.56 \text{ pF}$ 。利用上述的映射关系, 滤波器优化得到的尺寸为 $a=1 \text{ mm}$, $b=1.5 \text{ mm}$, $b_1=2 \text{ mm}$, $w=1.1 \text{ mm}$, $g=0.2 \text{ mm}$, $s_1=12.5 \text{ mm}$, $s_2=6 \text{ mm}$, $l_1=10 \text{ mm}$, $l_2=3 \text{ mm}$, $l_3=5.5 \text{ mm}$ and $l_4=8.5 \text{ mm}$ 。优化后的频率响应如图 9 所示, 可见电路仿真与电磁仿结果十分吻合。

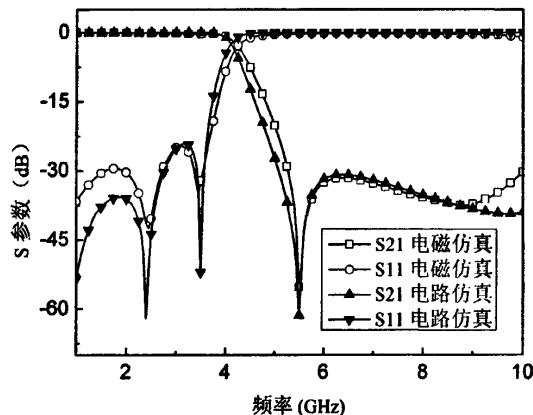


图 9 DGS 低通滤波器的电磁仿真与电路仿真结果比较

4 实验结果

为了验证由等效电路映射设计的低通滤波器的正确性, 本文使用 Taconic TLC 的相对介电常数为 3.2, 厚度为 0.787 mm 的介质板对最终优化所得的低通滤波器进行加工。图 10 是该低通滤波器的正反面实物图。采用 Agilent 的 N5230A 矢量网络分析仪进行测试。实测结果表明该低通滤波器的 3 dB 截止频率为 4.48 GHz, 与仿真结果大约有 20 MHz 的频移, 主要是由加工误差引起的。带外抑制在 5.8 GHz~10 GHz 范围内低于-31 dB, 带内回波损耗小于-23 dB, 且插损约为 0.7 dB。测试结果与理论分析结果非常吻合, 如图 11 所示。同时符合该低通滤波器的设计要求。

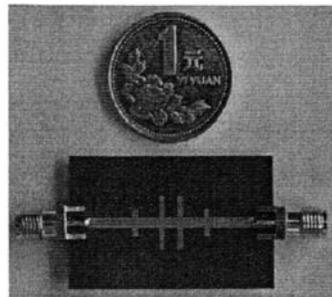


图 10 (a) 低通滤波器的正面

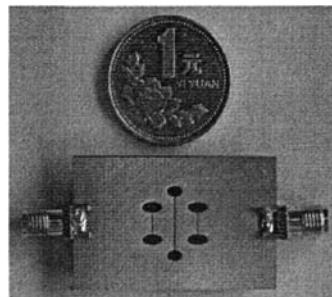


图 10 (b) 低通滤波器的正面

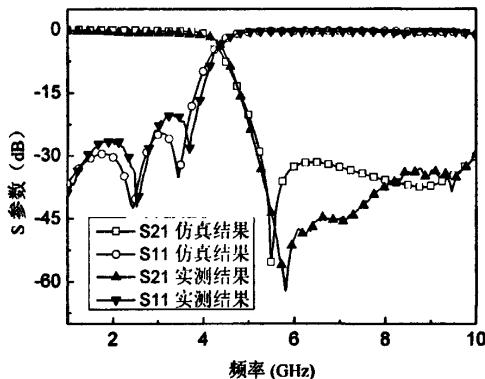


图 11 低通滤波器的仿真结果与实测结果比较

5 结论

文章提出了一种基于等效电路模型映射的低通滤波器设计方法, 通过电磁模型仿真的S参数提取出等效电路的具体元件值, 通过MOM的电路仿真, 快速优化低通滤波器的结果, 最后通过优化的结果调整电磁模型的尺寸。利用该方法可以快速准确的设计出所需的低通滤波器。实验证明, 该方法可以准确有效提高低通滤波器设计效率。

参考文献:

- [1] D.-J. Woo, T.-K. Lee, J.-W. Lee, C.-S. Pyo, and W.-K. Choi, Novel U-slot and V-slot DGSs for bandstop filter with improved Q factor [J], *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2006, 54 (6): 2840-2846.
- [2] M. K. Mandal and S. Sanyal, A novel defected ground structure for planar circuits [J], *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.*, 2006, 16(2): 93-95.
- [3] S.-W. Ting, K.-W. Tam, and R. Martins, Novel defected ground structure element with triple transmission zeros and its application for multispurious suppression of microstrip parallel coupled line bandpass filter [J], *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2007, 49(6): 1409-1412.
- [4] H.-J. Chen, T.-H. Huang, C.-S. Chang, L.-S. Chen, N.-F. Wang, Y.-H. Wang, and M.-P. Houn, A novel cross-shape DGS applied to design ultra-wide stopband low-pass filters [J], *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.*, 2006, 16(5): 252-254,
- [5] P. Vagner and M. Kasal, Design of novel microstrip low-pass filter using defected ground structure [J], *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2008, 50(1): 10-13.
- [6] H. W. Liu, Z. F. Li, X. W. Sun, and J. F. Mao, An improved 1-D periodic defected ground structure for microstrip line [J], *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.*, 2004, 14(4): 180-182.
- [7] D. Ahn, J. S. Park, C. S. Kim, J. Kim, Y. X. Qian, and T. Itoh, A design of the low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure [J], *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2001, 49(1): 86-93.
- [8] XiaoQun Chen, LingXia Wang, LiHong Weng, XiaoWei Shi, Compact low pass filter using novel elliptic shape DGS [J], *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2009, 51(4): 1088-1091.

作者简介:

陈小群: 1982 年出生, 2005 年获得西安电子科技大学学士学位, 现为西安电子科技大学电磁场微波技术专业博士研究生, 研究方向为功率放大器线性化技术研究及微带滤波器设计。

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题，有资深工程师领衔主讲，课程既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，设计原理和设计仿真实践相结合，向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频，专家授课，中文讲解，直观易学；既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

更多专业培训课程：

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>

专注于微波、射频、天线设计人才的培养

易迪拓培训

官方网址: <http://www.edatop.com>

淘宝网店: <http://shop36920890.taobao.com>