

# 一种新型 SRR 缺陷地面结构低通滤波器

吴 边 李 斌 梁昌洪

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室 西安 710071)

**摘 要:** 该文提出一种新型开口谐振环(Split-Ring Resonator, SRR)缺陷地面结构(Defected Ground Structure, DGS)。这种结构与传统哑铃形 DGS 结构相比,具有陡峭的带隙和平坦的低通特性。文中详细分析了开口谐振环 DGS 单元的等效电路以及结构参数与电参数之间的关系。在此基础上提出一种加载开路枝节的 SRR DGS 单元模型以提高带外抑制,采用这种单元的级联周期结构设计并制作了一种紧凑的 S 波段低通滤波器。测试结果表明,该滤波器带内插损小于 0.5dB,带外抑制制度在 30 dB 以上。

**关键词:** 低通滤波器; 开口谐振环; 缺陷地面结构

中图分类号: TN713, TN015

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)12-3020-04

## A Novel SRR Defected Ground Structure for Lowpass Filter

Wu Bian Li Bin Liang Chang-hong

(National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** A novel Split-Ring Resonator (SRR) Defected Ground Structure (DGS) is presented. Compared with the conventional dumbbell DGS, this structure has a sharp band-gap and flat low-pass characteristic. A detailed analysis of the equivalent circuit of the cell model and the relationship between physical sizes and electrical parameters is made. Then an improved SRR DGS cell model loaded with open stubs is proposed in order to improve the out-band suppression. Based on this structure, a compact S-band microstrip lowpass filter is designed and fabricated. The measured results show that, this filter has a low insertion loss of below 0.5dB and a high out-band suppression of more than 30dB.

**Key words:** Lowpass filter; Split-Ring Resonator (SRR); Defected Ground Structure (DGS)

### 1 引言

1999年,韩国学者 Park 等人在周期光子带隙结构(Photonic Band-Gap, PBG)<sup>[1]</sup>的基础上提出了缺陷地面结构(Defected Ground Structure, DGS),并把它应用到平面电路和低通滤波器设计中<sup>[2,3]</sup>。DGS 通过在接地板上刻蚀缺陷图案,改变接地板上屏蔽电流的分布,从而改变传输线的等效电感和等效电容,获得慢波特性和禁带特性。与传统的 PBG 结构相比, DGS 结构仅需一个缺陷单元就能获得禁带特性,且带隙中心频率仅由缺陷单元结构决定,因此尺寸小,结构紧凑,易于等效电路分析。

近年来,开口谐振环(Split-Ring Resonator, SRR)已经成功地应用于制造左手材料(Left-Handed Metamaterials, LHM)。Pendry 的研究表明周期性排列的 SRR 在其谐振频率附近表现出负的磁导率<sup>[4]</sup>, Gay-Balmaz 等通过实验和数值模拟研究了单个和多个相互耦合 SRR 的电磁谐振行为<sup>[5]</sup>。Markos 等模拟了环厚度、环开口、环几何尺寸等参数对周期性排列的 SRR 的微波透射特性及谐振频率的影响<sup>[6]</sup>。

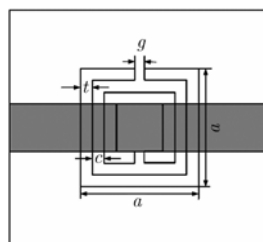
文中将开口谐振环应用到微带传输线的缺陷地面结构

中,给出了该结构单元的等效电路,具体分析了开口环边长、开口宽度与等效电路及截止频率间的变化关系。在开口谐振环 DGS 导带两边加载开路枝节可以改善其带外特性,采用开路枝节加载的 SRR DGS 级联周期结构设计并制作的低通滤波器结构紧凑,与传统的哑铃形 DGS 低通滤波器<sup>[7,8]</sup>相比,具有良好的低通特性和很高的带外抑制。

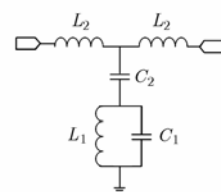
### 2 开口谐振环 DGS 特性分析

#### 2.1 开口谐振环 DGS 结构设计

开口谐振环 DGS 通过在接地板上刻蚀两个大小不等、开口方向相反的同心开口谐振环而得到,由于存在阻抗的不连续性,得到某种形式的谐振,从而实现带阻效应。如图 1(a)所示,开口谐



(a) SRR DGS 单元结构



(b) SRR DGS 单元等效电路

图 1

2006-05-31 收到, 2006-10-16 改回

国家自然科学基金(60501023)和国家 973 重大项目基金(00300113)资助课题

振环DGS单元腐蚀在微带线的接地平面上。50Ω微带线的介电常数 $\epsilon_r = 2.65$ , 介质板的高度 $h = 1.5\text{ mm}$ , 导带宽度为4.1mm。

2.2 开口谐振环 DGS 与哑铃形 DGS 特性比较

将开口谐振环DGS结构与传统哑铃形DGS的传输特性进行比较, 从图2可以看出, 开口谐振环DGS结构由于引入一个椭圆函数传输零点, 因而具有更陡峭的带阻特性, 适合用作低通滤波器的基本单元, 或用作谐波抑制。但其缺点是阻带带宽很窄, 高端阻带抑制较小。

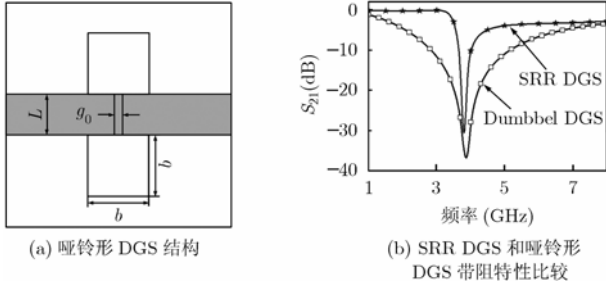


图2

2.3 开口谐振环 DGS 的等效电路分析

50Ω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, 开口谐振环自身构成并联谐振电路, 在金属地板上蚀刻开口谐振环相当于在右手传输线中引入对地的并联谐振电路, 同时环的尺寸对右手传输线的串联电感和并联电容产生影响, 最终形成的等效电路如图1(b)所示。一般说来, DGS单元的结构参数与等效电路的电参数之间存在一定的对应关系。采用Ansoft HFSS有限元分析方法, 对开口谐振环DGS单元结构进行仿真分析, 研究环边长 $a$ 和开口宽度 $g$ 与等效电路元件值以及传输特性之间的关系。

由图3(a)和表1可以看出, 随着开口谐振环边长 $a$ 的增大, 截止频率 $f_c$ 和谐振频率 $f_s$ 向低端移动, 并联谐振电路的等效电感 $L_1$ 逐渐增大, 等效电容 $C_1$ 逐渐减小; 同时传输线的等效电感 $L_2$ 和等效电容 $C_2$ 也随之增大。

由图3(b)和表2可以看出, 随着开口宽度 $g$ 的增大, 截止频率 $f_c$ 和谐振频率 $f_s$ 向高端移动, 并联谐振电路的等效电感 $L_1$ 逐渐减小, 等效电容 $C_1$ 逐渐增大; 而传输线的等效电感 $L_2$ 和等效电容 $C_2$ 基本保持不变。

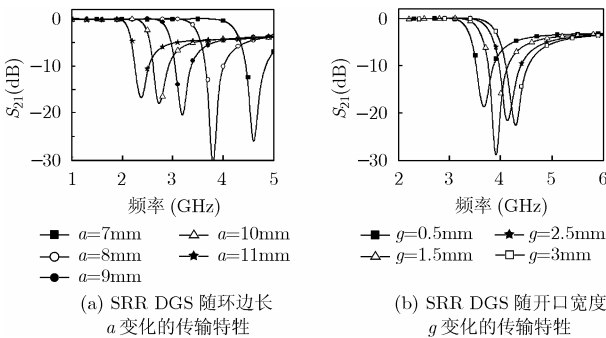


图3

表1 SRR DGS等效LC值及其频率特性与环边长 $a$ 的关系 ( $\epsilon_r = 2.65, h = 1.5\text{ mm}, t = 1\text{ mm}, c = 1\text{ mm}, g = 1\text{ mm}$ )

$a$ (mm)	7	8	9	10	11
$L_1$ (Nh)	1.142	1.733	2.337	3.144	3.356
$C_1$ (pF)	0.556	0.480	0.475	0.453	0.439
$L_2$ (nH)	1.409	1.661	2.085	2.502	3.183
$C_2$ (pF)	0.472	0.522	0.576	0.637	0.814
截止频率 $f_c$ (GHz)	3.79	3.14	2.68	2.24	1.94
谐振频率 $f_s$ (GHz)	4.60	3.80	3.19	2.73	2.35

表2 SRR DGS等效LC值及其频率特性与开口宽度 $g$ 的关系 ( $\epsilon_r = 2.65, h = 1.5\text{ mm}, t = 1\text{ mm}, c = 1\text{ mm}, a = 8\text{ mm}$ )

$g$ (mm)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
$L_1$ (nH)	2.043	1.733	1.677	1.548	1.458
$C_1$ (pF)	0.422	0.480	0.469	0.488	0.506
$L_2$ (nH)	1.635	1.661	1.618	1.606	1.586
$C_2$ (pF)	0.506	0.522	0.509	0.513	0.510
截止频率 $f_c$ (GHz)	3.01	3.14	3.19	3.25	3.32
谐振频率 $f_s$ (GHz)	3.65	3.80	3.93	4.05	4.15

由此可见, 在开口谐振环的宽度 $t$ 和两环间距 $c$ 一定的情况下, 等效电感 $L_1$ 主要取决于开口谐振环的环总长 $4a - g$ , 等效电容 $C_1$ 主要由开口宽度 $g$ 决定。此外, 传输线的等效串联电感 $L_2$ 和等效并联电容 $C_2$ 都随着开口谐振环的外周长 $4a$ 的增加而增大。SRR DGS单元的衰减极点位置是由 $L_1, C_1$ 和 $C_2$ 共同构成的并联支路的谐振频率 $f_s$ 来决定。

并联回路 $L_1 - C_1$ 的阻抗值为

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

单个电容 $C_2$ 的阻抗值为

$$Z_2 = \frac{1}{j\omega C_2} = -j \frac{1}{\omega C_2} \quad (2)$$

当 $Z_1 + Z_2 = 0$ 时并联支路谐振, 出现衰减极点。谐振频率为

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1(C_1 + C_2)}} \quad (3)$$

3 改进型 SRR DGS 及其级联结构低通滤波器

3.1 改进型 SRR DGS 单元模型

为拓展该单元结构的阻带带宽, 本文在SRR DGS的导带两端对称地加载两个开路枝节来增大并联电容, 从而改善其阻带特性。改进型SRR DGS单元结构和等效电路如图4(a)所示, 微带线的介电常数为 $\epsilon_r = 2.65$ , 介质板高度 $h = 1.5\text{ mm}$ , 金属导带宽度为 $w_0 = 4.0\text{ mm}$ , SRR的边长 $a = 10\text{ mm}$ , 开口宽度 $g = 1\text{ mm}$ , 枝片宽度 $w = 3\text{ mm}$ , 单边长度 $L = 8\text{ mm}$ 。开路枝节的加载并不影响低频通带的平滑度和陡峭度, 但由于移近了带外两个零点之间的距离, 从而极大地改善了带外阻带特性。通过Ansoft HFSS进行三维电磁结构仿真得到S

参数曲线, 然后导入Microwave Office(MWO)与对应的原理电路进行曲线拟和(如图4(b)), 得出相应的电路元件值为  $L_1=3.3$  nH,  $C_1=0.43$  pF,  $L_2=2.818$  nH,  $C_2=0.652$  pF,  $C_{p1}=1.546$  pF。

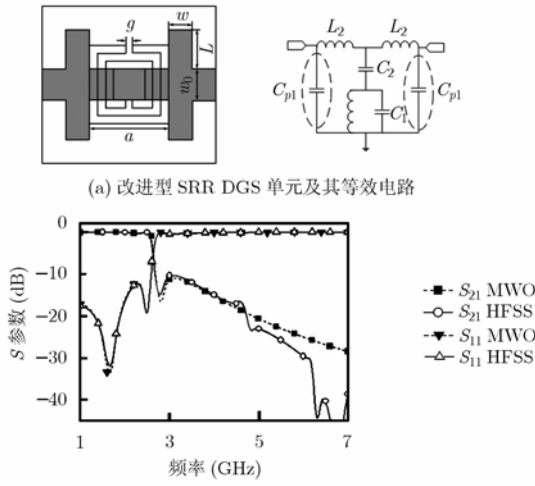


图 4

### 3.2 SRR DGS 级联结构低通滤波器

为进一步提高该低通结构的带外抑制度, 采用改进型 SRR DGS 的级联周期结构, 图5和图6分别为单元数为2和3时的SRR DGS结构和等效电路, SRR DGS 的结构尺寸与单元模型一致。通过对并联枝节的长度  $L$ , 宽度  $w$  和单元间距  $d$  的优化设计, 可以得到相应的低通滤波特性。其传输特性如图7所示, 二单元和三单元的通带回波损耗分别在-15dB 和-20dB 以下, 带外抑制度在很宽的阻带范围内分别大于 20dB 和 30dB。

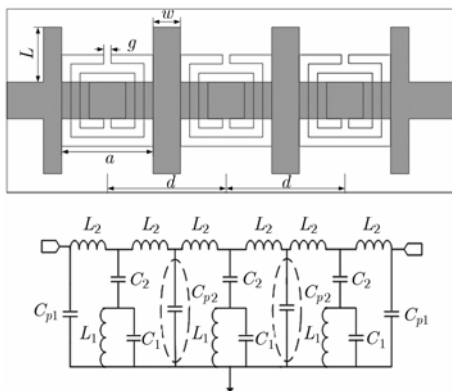
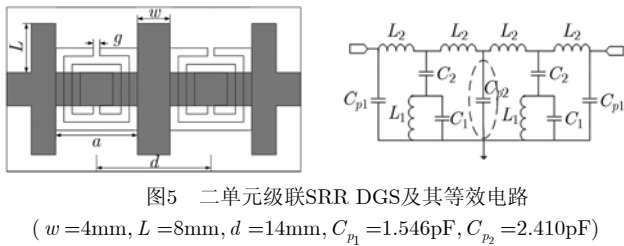


图6 三单元级联SRR DGS及其等效电路

( $w=4$ mm,  $L=9$ mm,  $d=14$ mm,  $C_{p1}=1.475$  pF,  $C_{p2}=2.509$  pF)

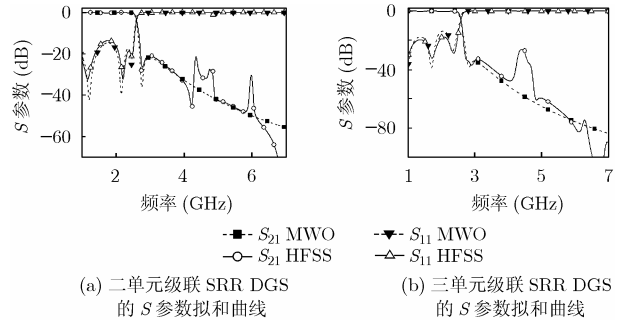


图7

### 3.3 SRR DGS 低通滤波器实物测试

为验证该方法的有效性, 我们加工了单元数分别为 1, 2 和 3 的 S 波段 SRR DGS 低通滤波器, 实物如图 8 所示, 传输曲线如图 9。从图中可以看出, 该结构紧凑, 测试结果与仿真结果比较吻合。在单元数为 3 时, 就能获得很好的低通特性, 截止频率和谐振频率分别为  $f_c=2.5$ GHz,  $f_s=2.7$ GHz, 带内插损小于 0.5dB, 且在 2.7GHz 到 7GHz 的宽阻带范围内抑制度均大于 30dB。

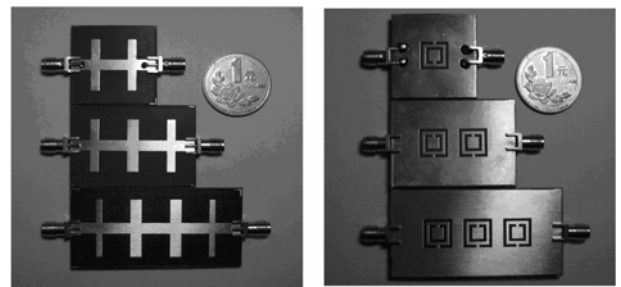


图 8 不同单元数 SRR DGS 实物图

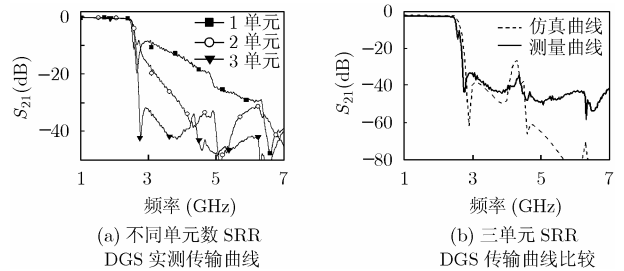


图 9

## 4 结束语

本文提出了一种新型开口谐振环缺陷地面结构, 给出了其等效电路。研究发现, 随着开口谐振环边长的增大, 截止频率降低; 随着开口宽度的增大, 截止频率升高。该结构与传统哑铃形 DGS 结构相比具有更平坦的低通特性和更陡的频率边带。在导带两边加载开路枝节可以改善 SRR DGS 的阻带特性, 采用 SRR DGS 周期结构设计并制作的低通滤波器结构紧凑, 具有通带插损小、边带陡峭和带外抑制度高优点。

## 参考文献

[1] Yablonovitch E, Gmitter T J, and Leung K M. Photonic band

- structure: The face centered cubic case employing nonspherical atoms. *Phys. Rev. Lett*, 1991, 67(1): 2295–2298.
- [2] Park J I, Kim C S, and Kim J, *et al.* Modeling of a photonic bandgap and its application for the low-pass filter design [C]. Asia Pacific Microwave Conference, Singapore, 1999: 331–334.
- [3] Kim C S, Park J I, and Dal A, *et al.* A novel 1-D periodic defected ground structure for planar circuits [J]. *IEEE Microwave Guided Wave Lett*, 2000, 10(4): 131–133.
- [4] Pendry J B, Holden A J, and Robbins D J, *et al.* Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech*, 1999, 47(11): 2075–2084.
- [5] Gay-Balmaz P, Maccio C, and Martin O J F. Microwire arrays with plasmonic response at microwave frequencies. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(15): 2896–2898
- [6] Markos P and Soukoulis C M. Numerical studies of left-handed materials and arrays of split ring resonators. *Phys Rev E*, 2002, 65(036622): 1–8.
- [7] Liu Hai-Wen, Li Zheng-Fan, Sun Xiao-Wei, and Mao Jun-Fa. An improved 1-D periodic defected ground structure for microstrip line. *IEEE Microwave Wireless Comp.*, 2004, 14(4): 180–182.
- [8] Park J S, Kim J, Lee J, and Myung S. A novel equivalent circuit and modeling method for defected ground structure and its application to optimization of a DGS lowpass filter. *IEEE Microwave Theory Tech. Symp. Dig.*, Seattle WA, 2002: 417–420.
- 吴 边: 男, 1981年生, 博士生, 从事微波毫米波电路和元件设计、新材料及多路耦合器等方面的研究.
- 李 斌: 男, 1978年生, 博士生, 研究方向为光子晶体、新型多路耦合器等.
- 梁昌洪: 男, 1943年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, IEEE Senior member, 主要研究方向为计算场论、计算微波、微波网络理论、电磁散射与逆散射、电磁兼容等.