

# 新型 DGS 准椭圆低通滤波器的研究

杨瑾屏, 吴 文

(南京理工大学电光学院, 江苏南京 210094)

**摘 要:** 在 Chebyshev 原型滤波器基础上引入衰减极点来获得准椭圆低通滤波器的集总参数电路, 并分别采用哑铃型和螺旋型缺陷接地结构实现其串联支路的电感和高外  $Q$  值 LC 并联谐振电路, 再采用加宽微带线实现其并联支路电容, 从而获得了具有良好的频率选择性及谐波抑止特性且整体结构紧凑的 DGS 准椭圆低通滤波器. 由于该设计方法完全采用解析公式计算, 故具有快速有效的优点. 最后研制了一个工作频率为 2.4GHz 的 5 阶准椭圆低通滤波器, 其通带内最大插损小于 0.5dB, 衰减超过 20dB 的阻带宽度为 13GHz, 纵向长度大约为  $1/4$  工作波长.

**关键词:** 低通滤波器; DGS; 等效电路模型

**中图分类号:** TN822      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2008) 02-0235-04

## Research on Novel Quasi-Elliptic Low-Pass Filters Using Defected Ground Structure

YANG Jin-ping, WU Wen

(School of Electric Engineering and Optoelec Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract:** The equivalent circuits of a compact Quasi-Elliptic low-pass filter (QELPF) are derived from the Chebyshev prototype circuits by introducing an attenuation pole, which has excellent performance in selectivity and harmonic suppression. The inductances in series branch circuits of QELPF are realized by dumb-bell-shaped defected ground structures (DB-DGSs), the high external quality factor of LC parallel resonance circuits in series branch circuits are realized by spiral-shaped defected ground structures (SP-DGSs), and the shunt capacitances are realized by broadened microstrip lines. Since the design expressions are all analytical, this design process of QELPF is fast and accurate. Finally, a five-pole QELPF for 2.4GHz is developed. The simulated and measured results show that passband insert-loss is less than 0.5dB and the stopband width with 20dB attenuation is over 13GHz. Furthermore, its size in the lengthwise direction is only about  $1/4$  wavelength.

**Key words:** low-pass filter; defected ground structure (DGS); equivalent circuit model

### 1 引言

使用缺陷接地结构 (DGS) 设计低通滤波器是近年来的研究热点之一<sup>[1~4]</sup>. 基于 DGS 的慢波效应和带隙特性, 这类滤波器具有结构紧凑和谐波抑止特性好等优点. 哑铃型缺陷接地结构 (dumbbell-shaped DGS, DB-DGS) 是其中应用最为广泛的一种结构, 其电路特性可以用并联 LC 谐振电路来表示. 但是受加工精度限制, DB-DGS 所能实现的等效电容较小. 因此, DB-DGS 在电路设计通常作为电感使用. 例如 DB-DGS 作为等效电感已被成功应用于三阶巴特沃斯型滤波器和  $N$  阶 ( $N \geq 5$ ) 切比雪夫型滤波器<sup>[2~4]</sup>.

与巴特沃斯型和切比雪夫型低通滤波器相比, 准椭圆低通滤波器集总参数电路的串联支路除电感元件外

还包含有具备高外观品质因数 (外  $Q$  值) 的 LC 并联谐振电路. 此类 LC 并联谐振电路难以用 DB-DGS 实现, 但图 1 所示的螺旋型缺陷接地结构 (spiral-shaped DGS, SP-DGS)<sup>[5]</sup> 是由接地板上窄而长的缝隙组成, 具有尖锐的阻带曲线亦即具有高外  $Q$  值的谐振特性, 因此 SP-DGS 可以用来实现准椭圆低通滤波器串联支路的高外  $Q$  值 LC 并联谐振电路.

本文在 Chebyshev 原型滤波器的基础上引入衰减极点来获得准椭圆滤波器集总参数电路, 然后分别采用 DB-DGS 和 SP-DGS 其串联支路的电感和高外  $Q$  值 LC 并联谐振电路, 再采用加宽微带线来实现来实现其并联支路电容. 由于 DGS 和微带线的频响均可以由等效电路来精确表征, 所以整个滤波器综合过程完全采用解析公式来计算, 从而可以快速有效地设计出所需特性的准

椭圆低通滤波器.

## 2 DGS 建模

通过在微带接地板上蚀刻如图 1 虚线所示形状的缝隙就可以实现 DB-DGS 和 SP-DGS 两种单元电路结构. 对于 DB-DGS, 它的等效电路模型采用在两侧串联了传输线的并联 LC 谐振电路来表示. 鉴于其建模方法和计算公式已经被广泛研究<sup>[2,4]</sup>, 本文不再赘述.

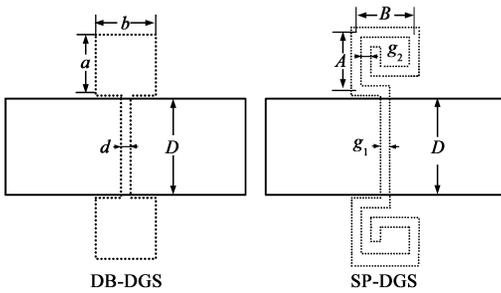


图 1 典型的 DB-DGS 和 SP-DGS 单元结构

由于 SP-DGS 具有类周期性的多阻带特性, 仅用 2 阶谐振单元不能准确表征其频响特性. 考虑到第一个阻带和第二个阻带之间的寄生通带对滤波器性能可能产生不利影响. 本文在上述的并联谐振电路基础上增加了一个串联电感以彰显寄生通带的影响, 其结构如图 3 所示. 其等效电路模型参数经过理论推导, 可用如下公式计算:

$$C = \frac{(\omega_0^2 - \omega_{c1}^2)(\omega_0^2 - \omega_{c2}^2)}{2Z_c\omega_{c1}\omega_{c2}\omega_0^2(\omega_{c1} - \omega_{c2})} \quad (1)$$

$$L_{1st} = \frac{1}{\omega_0^2 C} \quad (2)$$

$$L_{2nd} = -\frac{\omega_0^2}{(\omega_0^2 - \omega_{c2}^2)} L_{1st} - \frac{2Z_c}{\omega_{c2}} \quad (3)$$

式(1)~(3)中的  $\omega_0$  是 SP-DGS 第一个阻带的谐振频率,  $\omega_{c1}$  和  $\omega_{c2}$  分别是位于阻带两侧的 3dB 截止频率;  $Z_c$  为传输线特性阻抗.

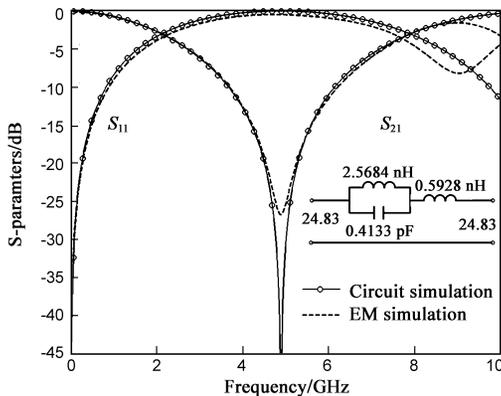


图 2 使用电磁仿真软件仿真和等效电路计算的 SP-DGS 结构 S 参数 ( $D=5.0$  mm,  $A=B=3.6$  mm,  $g_1=0.40$  mm, 介电常数  $\epsilon_r=3.38$ , 介质厚度  $h=0.813$  mm)

为了验证该模型和计算公式的有效性, 采用 CST 公司的 Microwave Studio 电磁场计算软件对给定结构尺寸的 SP DGS 单元进行了全波电磁场仿真(EM simulation)分析. 并根据所得到的各个特征频率采用式(1)~(3)得到其等效电路模型参数. 将使用等效电路模型进行电路仿真(Circuit simulation)的结果和已经得到电磁场仿真结果进行对比, 可如图 2 所示. 由图 2 可以看出两者的一致性很好, 这表明上述的 SP DGS 等效电路模型可以相当宽的频带内精确表征其传输特性.

## 3 DGS 准椭圆低通滤波器设计

### 3.1 理想准椭圆低通滤波器设计

如图 3 所示, 采用谐振频率为  $\omega_p$  的 LC 并联谐振电路来代替标准切比雪夫低通滤波器中的一个串联电感, 就会在低通滤波器的截止频率附近的引入适当的衰减极点, 从而可以简单而有效地实现低通滤波器的准椭圆特性.

在这种滤波器中, 为保证该滤波器仍具有良好通带特性, 要求新引进的并联谐振电路 ( $L_s - C_s$ ) 与原串联电感 ( $L$ ) 在滤波器截止频率点的阻抗保持相等, 即

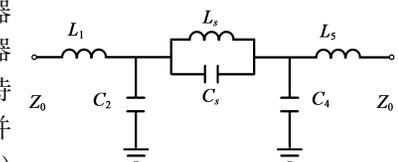


图 3 理想准椭圆滤波器原理图

$$j\omega_c L = \frac{j\omega_c L_s}{1 - \frac{\omega_c^2}{\omega_p^2}} \quad (4)$$

因此新引进的 LC 并联谐振电路的电感和电容可以通过如下两式来计算

$$L_s = L \left( 1 - \frac{\omega_c^2}{\omega_p^2} \right) \quad (5)$$

$$C_s = \frac{1}{\omega_p^2 L_s} \quad (6)$$

下面采用上述方法设计一个截止频率为 2.4GHz

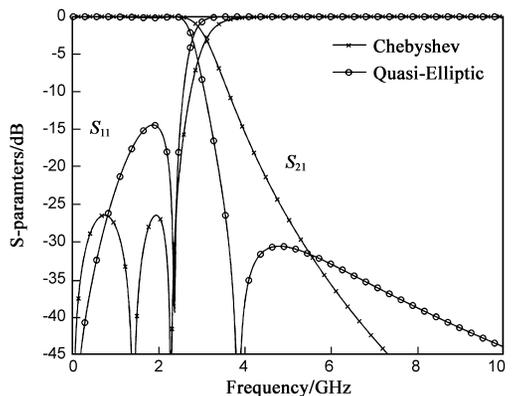


图 4 切比雪夫滤波器与准椭圆滤波器频响的对比结果

的 5 阶准椭圆低通滤波器, 衰减极点位于 3.8GHz 处. 准椭圆滤波器原理图如图 3 所示, 其各元件值如表 1 所示. 分别对标准切比雪夫滤波器<sup>6</sup>与本文所设计的准椭圆滤波器的进行计算分析, 所得  $S$  参数如图 4 所示. 由图 4 可以看出: 虽然此准椭圆滤波器只有 5 阶, 但在 2.4GHz 到 3.8GHz 的过渡带传输系数衰减曲线却可与标准的 7 阶切比雪夫滤波器相当; 阻带衰减均大于 20dB; 滤波器通带内插损略有增加, 但仍能满足一般工程设计要求.

表 1 理想滤波器与 DGS 滤波器元件值

理想滤波器元件	元件值	DGS 滤波器元件	元件值
$Z_0$	50Ω	$Z_0$	50Ω
$L_1$	2.51nH	$L'_{a,1}$	1.94nH
$C_2$	1.17pF	$L_{a,1}$	0.38nH
$L_3$	3.05nH	$C'_1$	0.20pF
$C_3$	0.56pF	$C_2$	1.17pF
$C_4$	1.17pF	$L'_3$	2.57nH
$L_5$	2.51nH	$L_{a,3}$	1.36nH
$Z_0$	50Ω	$C'_3$	0.41pF
		$C_4$	1.17pF
		$L'_5$	1.94nH
		$L_{a,5}$	0.38nH
		$C'_5$	0.20pF
		$Z_0$	50Ω

### 3.2 DGS 低通滤波器的设计

根据上文对 DGS 建模结果的讨论, 可以使用如下结构实现图 3 所示的准椭圆低通滤波器: 分别采用 DB-DGS 和 SP-DGS 结构实现串联支路的电感和并联谐振电路, 采用文献[4]所提出的加宽微带线来实现并联支路的电容. 计入加宽微带线寄生的附加电感后, 最终的 DGS 准椭圆低通滤波器的等效电路如图 5 所示. 其中  $L'_1 - C'_1, L'_5 - C'_5, L'_3 - C'_3$  分别是 DB-DGS 和 SP-DGS 等效电路模型中的并联谐振电路;  $L_{a,1}, L_{a,5}$  是使用加宽微带线所引入的附加电感,  $L_{a,3}$  是 SP-DGS 结构附加电感与加宽微带线附加电感之和.

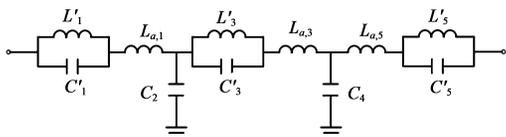


图 5 5 阶 DGS 低通滤波器等效电路原理图

为了使 DGS 滤波器特性与理想准椭圆滤波器频响符合得更好, 并能唯一确定 DGS 等效电路参数值, 不仅要求准椭圆滤波器集总参数电路的各部分元件与 DGS 滤波器等效电路对应部分在滤波器的截止频率处具有相同的阻抗, 而且要求准椭圆低通滤波器的谐振电路  $L_s - C_s$  与对应的 SP-DGS 的等效电路在 3dB 截止频率点  $\omega_{c3}$  也具有相同的阻抗. 据此, 本文推导出以下公式来计算 DGS 的等效电路模型参数:

$$L'_1 = (L_1 - L_{a,1}) \left[ 1 - \left( \frac{\omega_c}{\omega_{0,DB}} \right)^2 \right] = L'_5 \quad (7)$$

$$C'_1 = \frac{1}{\omega_{0,DB} L'_1} C'_5 \quad (8)$$

$$L'_3 = \frac{\omega_p^2 (\omega_{0,SP}^2 - \omega_c^2) (\omega_{0,SP}^2 - \omega_{c2}^2)}{\omega_{0,SP}^2 (\omega_p^2 - \omega_c^2) (\omega_p^2 - \omega_{c3}^2)} L_3 \quad (9)$$

$$L_{a,3} = \frac{\omega_p^2 (\omega_{0,SP}^2 - \omega_p^2)}{(\omega_p^2 - \omega_c^2) (\omega_p^2 - \omega_{c3}^2)} L_3 \quad (10)$$

$$C'_3 = \frac{1}{\omega_{0,SP}^2 L'_3} \quad (11)$$

其中, DB-DGS 和 SP-DGS 的谐振频率分别用  $\omega_{0,DB}$  和  $\omega_{0,SP}$  表示.  $L_{a,1}$  可用加宽微带线的长度算出, 而  $L_{a,3}$  是考虑加宽微带线和 SP-DGS 附加电感的影响后而选取的恰当数值. 采用上述方法, 本文设计了工作频率为 2.4GHz 的 5 阶 DGS 准椭圆低通滤波器的各个元件的参数值, 如表 1 所列.

### 4 DGS 滤波器的研制

首先, 选定加宽微带线的宽度为 5mm, 则所需长度和寄生的附加电感  $L_a$  可由文献[4]所给的公式计算.

其次, 确定 DGS 结构的实际尺寸. 本文根据表 1 中的元件值采用的曲线拟合方法<sup>[4]</sup>来获得 DGS 结构的实际尺寸, 其结果如图 6 所示.

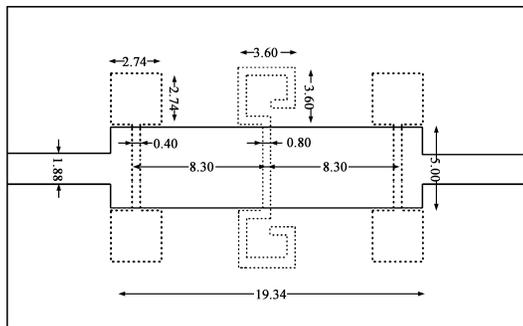


图 6 DGS 低通滤波器的结构尺寸图

此 5 阶 DGS 低通准椭圆滤波器的完整电路结构如图 6 和图 7 所示, 其介质板材料为 R04003. 下表面电路由腐蚀掉如虚线所示尺寸的缺陷的接地板组成, 而上表面电路则由连成一体的三段微带组成. 中间为加宽微带线, 两侧的微带具有 50Ω 的特性阻抗以实现与测试电路的匹配.

此 5 阶 DGS 准椭圆低通滤波器的电磁仿真结果和

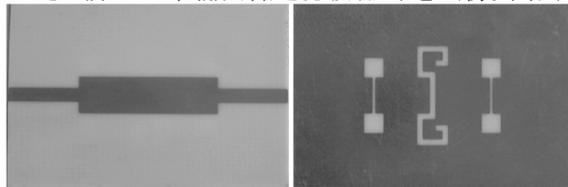


图 7 DGS 低通滤波器实物图

实测数据则如图 8 所示.由图 8 可以看到:DGS 准椭圆滤波器的电磁仿真结果和实测数据比较吻合;其通带内最大插损小于 0.5dB,而衰减超过 20dB 的阻带范围很宽(4.3GHz~17.3GHz);在其截止频率附近可以观察到一个明显的衰减极点,证明采用 DGS 结构和加宽微带线确实可以实现单极点准椭圆低通滤波器.此外本文所研制的 5 阶 DGS 准椭圆低通滤波器的纵向长度只有 19.34mm,大约为 1/4 工作波长,因此结构非常紧凑.

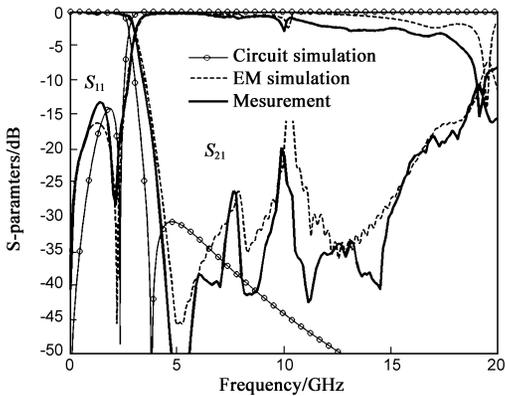


图 8 DGS 低通滤波器的仿真结果与实测结果

## 5 结论

本文提出了一种同时使用 SP-DGS 和 DB-DGS 两种结构设计准椭圆滤波器的方法.电路实测数据与电磁场仿真结果很好的一致性证明了这种设计方法的有效性.由于本文提出的设计公式具有完全的解析形式,可

作者简介:



杨瑾屏 1979 年出生,2003 年获南京理工大学硕士学位,现为该校博士研究生.主要研究方向为 EBG、LHM、Chaos 等技术.

E-mail: coolbird2050@163.com

以方便的进行理论计算,也便于与各种 EDA 辅助设计软件连接.从实测结果可以看出本滤波器具有较低低的插损,陡峭的过渡带,宽的阻带带宽等优点.此外,本滤波器仅由接地板腐蚀的缺陷结构及上表面的加宽微带线组成,具有纵向尺寸小和和工艺加工比较简单等优点,其能承受的功率容量也显著增大.

参考文献:

- [1] Kim C S, Park J S, Ahn D, Lim J B. A novel 1-D periodic defected ground structure for planar circuits[J]. IEEE Microw. Guided Wave Lett., 2000, 10(4): 131 - 133.
- [2] Ahn D, Park J S, Kim C S, Kim J, Qian Y, Itoh T. 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.
- [3] 王雷, 丁荣林, 王安国, 胡俊杰. 组合式非周期缺陷接地结构低通滤波器的分析[J]. 微波学报, 2004, 20(3): 39 - 42.
- [4] Lim J S, Kim C S, Ahn D, Jeong Y C, Nam S. Design of low-pass filters using defected ground structure[J]. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2005, 53(8): 2539 - 2545.
- [5] Kim C S, Lim J S, Nam S, Kang K S, Ahn D. Equivalent circuit modeling of spiral defected ground structure for microstrip line. Electron. Lett., 2002, 38(19): 1109 - 1110.
- [6] Levy R. Filters with single transmission zeros at real or imaginary frequencies [J]. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 1976, 24(4): 172 - 181.



吴文 1968 年出生,1997 年获东南大学电磁场与微波技术专业博士学位,教授,国防科工委“511 人才工程”学术技术带头人.主要成果:曾获省部级奖 4 项,已在各种学术期刊、学术会议发表论文 30 余篇.主要研究方向为毫米波天线及电路、毫米波探测与制导技术等.