

蛇型 DGS 微带滤波器的设计

王 克, 陈小强

(兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 提出了一种将哑铃型 DGS 中的长方形缝隙变为蛇形缝隙的蛇型 DGS, 建立了等效电路模型并进行参数推导. 基于控制变量法分析参数变化对蛇型 DGS 结构频率特性及等效电路参数的影响. 将该结构应用于低通滤波器的设计, 分别在 HFSS 和 MATLAB 环境下对设计的滤波器及其等效电路模型进行仿真, 两种方法的仿真结果具有很好的一致性. 结果表明, 该结构可在不增加缺陷面积的情况下得到更低的衰减频率和更多的谐振频率点.

关键词: 缺陷接地结构; 等效电路; 低通滤波器

中图分类号: TN817 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.004

0 引言

近年来, 不同结构的 PBG (Photonic Band Gap) 光子带隙结构和 DGS (Defected Ground Structure) 缺陷接地结构的设计研究已经成为热点课题. 和光子带隙结构 (PBG) 类似, 缺陷接地结构 (DGS) 也是在金属接地平面上蚀刻出缺陷的图案. 通过改变电路衬底材料有效介电常数的分布, 从而改变微带线的有效电感和有效电容, 使得由 DGS 结构构成的微带线具有慢波特性和带阻特性<sup>[1-4]</sup>. 和 PBG 结构相比较, DGS 结构仅由 1 个缺陷单元构成, 它的带隙中心频率仅由该缺陷单元结构决定, 而 PBG 结构是由若干个缺陷单元组成的缺陷阵列, 它的带隙中心频率由缺陷阵列间距、排列方式和几何结构等诸多因素决定. 因此, DGS 结构具有结构简单, 易于电磁场理论分析和等效电路建模分析, 更适于集成电路实际应用的显著优点. 已广泛应用于微波和毫米波的设计中.

笔者提出蛇型 DGS 微带线的等效电路模型. 利用 HFSS 和 MATLAB 分别对蛇型 DGS 单元及其等效电路模型进行仿真分析, 研究蛇型 DGS 单元各参数变化时对其频率特性的影响. 通过 DGS 结构的微带滤波器的设计来证明等效电路模型的正确性.

1 蛇型 DGS 的频率特性及等效电路

1.1 蛇型 DGS 的结构组成和频率特性

如图 1 所示, 蛇型 DGS 是由 2 个矩形和它们之间的 1 个蛇形缝隙组成<sup>[5-6]</sup>. 选取文献 [1] 和 [7] 中提出的 DGS 单元相同的参数, 介质厚度为  $h = 0.7874\text{ mm}$ , 介电常数  $\epsilon_r = 2.2$ , 尺寸分别是  $w = 2.4\text{ mm}$ ,  $a = b = 5\text{ mm}$ ,  $n = 6$ ,  $g = 0.38\text{ mm}$ . 利用 HFSS 对图 1 中的 DGS 结构进行仿真, 并与文献 [1] 中哑铃型 DGS 仿真结果对比如图 2 所示.

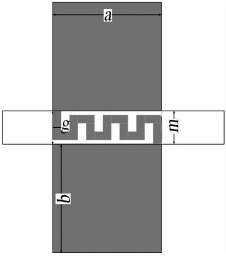


图 1 蛇型 DGS 单元示意图

Fig. 1 Schematic view of snake DGS unit

对比同一软件下两种不同结构的仿真结果可知, 蛇型 DGS 结构微带线两侧的矩形缺陷面积和形状都与哑铃型 DGS 结构一致, 在只改变缝隙  $g$  的情况下就可使原哑铃型 DGS 传输线产生更低的带隙中心频率, 在同样带宽范围内, 产生的谐振频率点更多; 蛇型 DGS 结构与文献 [7-8] 提出的

收稿日期: 2014-09-30; 修订日期: 2014-11-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51167009/E0703); 铁道部重点资助项目 (2011X008-D)

通信作者: 陈小强 (1966-), 男, 甘肃天水人, 兰州交通大学教授, 博士, 主要从事计算电磁学、计算机仿真与控制方面的研究, E-mail: xqchen@mail.lzjtu.cn.

螺旋型 DGS 结构比较,在缺陷所占的面积不变的情况下同样能产生两个谐振频率点,但设计参数减少,结构简单,易于电路的加工设计。

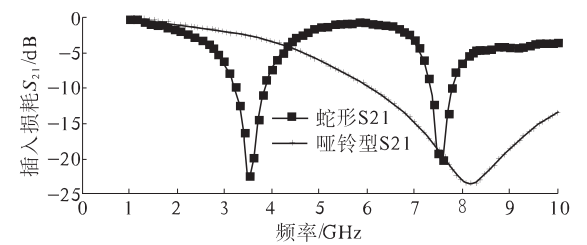


图 2 蛇型 DGS 与哑铃型 DGS 单元的仿真结果

Fig.2 The simulation results of snake DGS and dumbbell DGS unit

1.2 蛇型 DGS 结构的等效电路的模型及参数的提取

哑铃型 DGS 结构与 LC 并联电路相似,具有单极点低通滤波器的带阻特性. 笔者提出的蛇型 DGS 单元具有两个谐振频率点. 因此,利用两个 LC 并联电路的串联电路来等效文中蛇型 DGS 单元,每个谐振点由一个 LC 并联电路来等效. 将实际微带线和介质本身的损耗及电磁波辐射等因素考虑在内,应取两个 RLC 串联电路来等效<sup>[9-10]</sup>,如图 3 所示. 利用式(1)、(2)计算得等效电路的参数,电阻  $R$  由式(3)得出<sup>[10]</sup>. 蛇型 DGS 单元的电磁仿真与等效电路的仿真如图 4 所示。

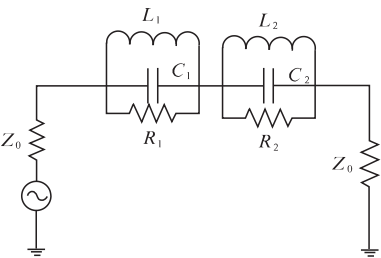


图 3 蛇型 DGS 单元的等效电路模型

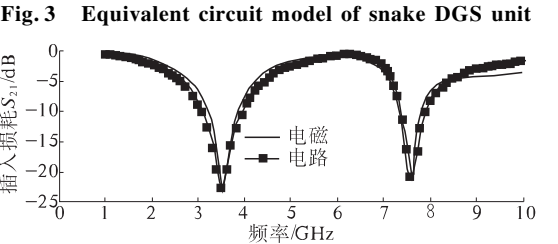


图 4 蛇型 DGS 单元电磁仿真与等效电路的仿真

Fig.4 Simulation of electromagnetic and equivalent circuit of snake DGS unit

$$C = \frac{1}{w_0 Z_0 g_1 \left( \frac{w_0}{w_c} - \frac{w_c}{w_0} \right)}. \tag{1}$$

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C}. \tag{2}$$

$$R = \frac{2Z_0}{\sqrt{\frac{1}{|S_{11}(w)|^2} - (2Z_0(wC - \frac{1}{wL}))^2} - 1}. \tag{3}$$

2 蛇型 DGS 参数变化对频率特性的影响

由文献[2,3,5,11-13]可知,影响 DGS 微带线阻带特性的参数是微带线两侧矩形的长  $a$ 、宽  $b$  和蛇型缝隙的宽  $g$ 、U 形拐点数  $n$ . 下面讨论蛇型 DGS 参数变化对频率特性的影响. 改变 DGS 单元的参数,然后利用 HFSS 三维电磁仿真软件进行仿真分析,通过仿真结果得出两个阻带各自的 3 dB 截止频率和谐振频率并求出对应的等效电感值和电容值,分析参数变化对等效电路的影响。

2.1 方格对蛇型 DGS 的影响

基于图 1 所示的蛇型 DGS 结构,取导带宽为  $w = 2.4\text{ mm}$ 、方格的宽  $b = 5\text{ mm}$ 、蛇型缝隙的宽度  $g = 0.38\text{ mm}$ 、U 形拐点数  $n = 6$ ,改变方格的长  $a$ ,分别取  $a = 3, 4, 5, 6$  和  $7\text{ mm}$  对应的仿真结果如图 5 所示. 随着方格长  $a$  的增大,截止频率和谐振频率相应地减小,且减幅越来越小. 利用公式(1)、(2)计算得等效电路的电感值随  $a$  的增大而增大,电容值基本保持不变,其中等效电感值  $L_1$  增幅明显。

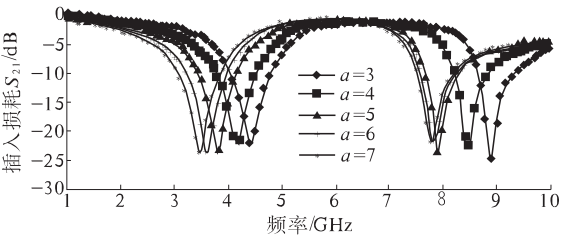


图 5 方格长  $a$  对蛇型 DGS 的影响

Fig.5 Effect of square long ( $a$ ) on snake DGS

取导带宽为  $w = 2.4\text{ mm}$ 、方格的长  $a = 5\text{ mm}$ 、蛇型的宽度  $g = 0.38\text{ mm}$  和 U 形拐点数  $n = 6$ ,改变方格的宽  $b$ ,分别取  $b = 3, 4, 5, 6, 7\text{ mm}$  对应的仿真结果如图 6 所示. 随着方格宽度  $b$  的增大截止频率和谐振相应地减小,第二个阻带基本不变,主要影响第一个阻带. 利用公式(1)、(2)计算得等效电路的电容值随  $b$  的增大而减小,相反电感值随之增大,其中电感值  $L_1$  和电容值  $C_1$  变化明显。

2.2 缝隙对蛇型 DGS 的影响

基于图 1 所示的蛇型 DGS 结构,取导带宽为  $w = 2.4\text{ mm}$ 、方格的长  $a = 5\text{ mm}$ 、宽  $b = 5\text{ mm}$  和蛇

型的 U 形拐点数  $n=6$ , 改变蛇型的宽  $g$ , 分别取  $g=0.2, 0.29, 0.38, 0.47, 0.56$  mm, 对应的仿真结果如图 7 所示. 随着  $g$  的增大, 截止频率和谐振频率相应地增大, 其中截止频率  $f_{cl}$  增幅不明显. 利用公式(1)、(2)计算得等效电路的电容值随  $g$  的增大而减小, 电感值随  $g$  的增大略微增大, 其中电容值  $C_2$  减幅明显.

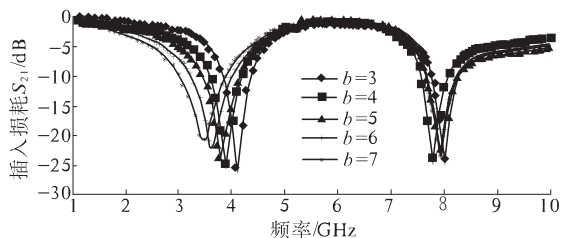


图 6 方格宽  $b$  对蛇型 DGS 的影响

Fig. 6 Effect of square distance ( $b$ ) on snake DGS

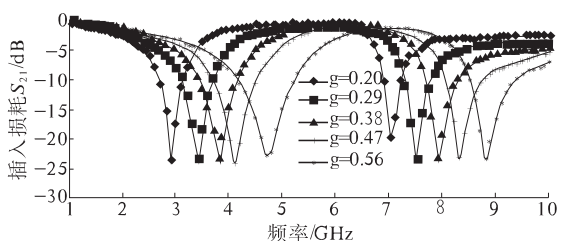


图 7 缝隙宽对蛇型 DGS 的影响

Fig. 7 Effect of gap distance on snake DGS

### 2.3 拐点数对蛇型 DGS 的影响

取导带宽为  $w=2.4$  mm、方格的长  $a=5$  mm、宽  $b=5$  mm 和蛇型宽  $g=0.38$  mm, 改变蛇型的 U 形拐点数  $n$ , 分别取  $n=2, 4, 6, 8$ , 对应的仿真结果如图 8 所示. 随着 U 形拐点数  $n$  的增大, 截止频率和谐振频率相应的减小而幅度较小. 利用公式(1)、(2)计算得等效电路的电感值  $L_2$  随  $n$  的增大而减小, 电容值变化随之增大, 其中电容值  $C_2$  增幅明显.

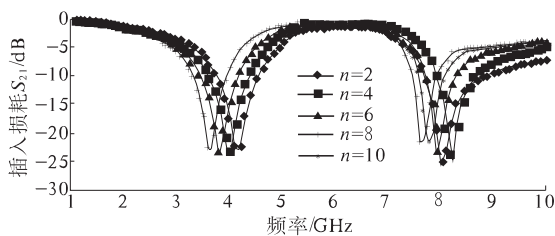


图 8 U 形拐点数  $n$  对蛇型 DGS 的影响

Fig. 8 Effect of U-shaped inflection point number ( $n$ ) on snake DGS

综上所述, 可以通过改变蛇型 DGS 结构的参数  $a, b, g$  和  $n$  来实现不同要求的带隙中心频率, 在后面的滤波器设计中我们可以通过有目的调节

参数  $a, b, g$  和  $n$ , 实现滤波器的优化设计, 从而确定 DGS-LPF 中 DGS 的尺寸.

### 3 DGS 低通滤波器的设计

LPF 与 DGS 结构的等效电路相似, 都是由集总等效元件组成. 因此, 基于 DGS 结构的等效电路法设计的 LPF 可进行电路分析<sup>[9,14-15]</sup>. 笔者提出含有 DGS 缺陷结构的低通滤波器 LPF 来验证等效电路法的正确性与可行性. 如图 9 所示, 低通原型滤波器由串并联电容电感组合而成, 笔者设计滤波器时, 串联电感用 DGS 结构来实现, 而并联电容由大范围补偿的传输线来实现, 即图 10 中  $w_2=15$  mm. 以 DGS-LPF 为例验证设计方法的正确性, 采用图 1 提出的蛇形 DGS 结构, 参数分别设为  $a=b=5$  mm,  $n=6$ ,  $g=0.38$  mm,  $w_1=2.4$  mm. 通过等值代替得出 DGS-LPF 的等效电路如图 11 所示. 其中, 4 阶 LPF 的等效电路中的两个并联的 LC 串联电路用 DGS 结构代替, 并联电容  $C_1$  和  $C_2$  由低阻抗传输线代替, 从而得出 DGS-LPF 的结构示意图如图 10 所示. 根据文献[8]中滤波器的设计原理, 将原型 LPF 转化成集总元件表示, 并利用公式(4)、(5)表示出电感值与电容值. 其中  $Z_0$  为负载阻抗,  $g_n$  为低通原型滤波器的反归一化参数 ( $n=1, 2$ ).

$$L_n = \frac{g_n Z_0}{w_{cn}}; \quad (4)$$

$$C_n = \frac{g_n}{Z_0 w_{cn}}; \quad (5)$$

$$\frac{1}{w_{cn} L_n} = - \left( w_{cn} C_{kn} - \frac{1}{w_{cn} L_{kn}} \right). \quad (6)$$

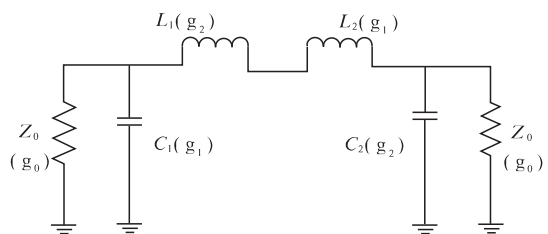


图 9 DGS-LPF 原型电路

Fig. 9 The prototype circuit of DGS-LPF

用图 1 中所示的蛇型 DGS 结构代替图 9 中电感  $L_1, L_2$ , 利用式(4)、(5)和(6)计算出集总元件  $w_{cn}, L_n, C_n$  的值. 由公式(7)求出宽为 15 mm、电容值分别为  $C_1$  和  $C_2$  的低阻抗传输线的长度  $l_1=4.7324$  mm、 $l_2=1.4600$  mm. 其中  $\lambda_g$  和  $Z$  分别为 15 mm 传输线对应的电长度和阻抗值. 同时, 由于微带线存在额外等效电感  $L_a$ , 因此, 利用

公式(8)将额外的电感考虑在等效电路的 LC 电路中,最终确定等效电路的各个参数值. 在 HFSS 和 MATLAB 环境下分别对含有 DGS 的 LPF 进行电磁仿真和等效电路仿真,结果如图 12 所示.

$$l_n = \frac{\lambda g}{2\pi} \arcsin w_{cn} Z C_n, \tag{7}$$
$$\frac{1}{\frac{1}{w_{cn} L'_{kn}} - w_{cn} C'_{kn}} = \frac{1}{\frac{1}{w_{cn} L_{kn}} - w_{cn} C_{kn}} - w_{cn} L_a. \tag{8}$$

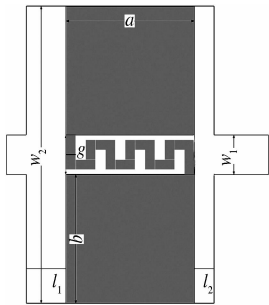


图 10 DGS-LPF 示意图  
Fig. 10 Schematic view of DGS-LPF

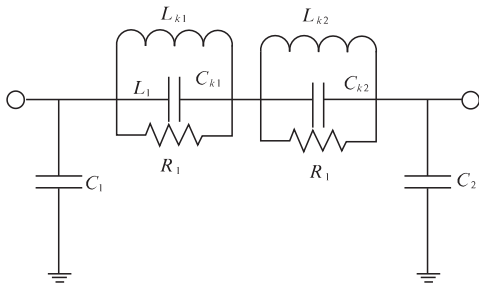


图 11 DGS-LPF 等效电路模型  
Fig. 11 Equivalent circuit model of DGS-LPF

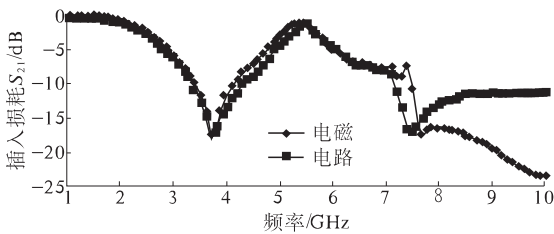


图 12 DGS-LPF 的电磁仿真与等效电路仿真  
Fig. 12 Simulation of electromagnetic and equivalent circuit of DGS-LPF

由图 12 可知,提出的等效电路合理地考虑了蛇型 DGS 单元的两个谐振频率,使基于等效电路的 LPF 的设计更符合实际. 该滤波器在 3.2 GHz 和 7.5 GHz 处产生两个阻带,能有效地截止高次谐波. DGS 低通滤波器的等效电路的电路仿真与电磁仿真结果在谐振  $w_{01}$  之前拟合良好,且计算结果  $w_{c1} = 2.202$  GHz,与仿真结果  $w_{c1} = 2.247$  GHz

相差也不是很大,证明了该设计方法的正确性. 同时,在现实设计中可以根据不同的频率要求选取蛇型 DGS 的具体参数.

4 结论

笔者在哑铃型 DGS 结构的基础上提出了一种蛇型缺陷接地结构,并给出了其等效电路模型. 与传统哑铃型 DGS 相比,该结构在不增加缺陷面积的情况下获得的衰减频率更低,产生的谐振频率点更多. 结果表明,随着方格面积的增大,截止频率降低;随着缝隙宽度  $g$  的增大,截止频率升高;随着 U 形拐点数  $n$  的增加,截止频率降低. 采用蛇型 DGS 设计的 LPF 等效电路的 MATLAB 仿真与 HFSS 电磁仿真结果相吻合. 证明了该设计方法的正确性.

参考文献:

[1] PARK J I, KIM C S, 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.

[2] 林强, 张祖荫, 郭伟. DGS 微带线滤波器设计[J]. 现代雷达, 2005, 27(6): 52 – 54.

[3] 刘海文, 李征帆, 孙晓玮, 等. 一种新颖的蝴蝶结形缺陷接地结构微带线[J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(6): 431 – 345.

[4] DAL A, PARK J S, KIM C S, et al. A design of the low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure [J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Tech, 2001, 49(1): 86 – 93.

[5] 顾继慧, 杨一飞, 周虹, 等. 新型缺陷接地结构带通滤波器研究[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2009, 32(6): 763 – 766.

[6] PARK J-S, YUN J-S, PARK C S. DGS resonator with interdigital capacitor and application to bandpass filter design[J]. Electronics Letters, 2004, 40(7): 433 – 434.

[7] KIM C S, LIM J S, NMA S, et al. The equivalent circuit modeling of defected ground structure with spiral shape[J]. IEEE Electronics Letters, 2002, 38(9): 2125 – 2128.

[8] 曹锐, 孙振鹏. DGS 结构特性分析及其改善微波放大器谐波[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2007, 29(11): 1380 – 1383.

[9] LIM J, KIM C S, AHN D, et al. Design of low-pass filters using defected ground structure [J]. IEEE Trans. On Microwave Theory and Tech, 2005, 53(8): 2539 – 2545.

[10] INSIK C, BOMSON L. Design of defected ground structures for harmonic control of active microstrip antenna [ C ]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2002(2): 852 – 855.

[11] 丁勇. 基于 SGS 的 UWB 滤波器设计[J]. 电子元件与材料,2013,32(9):42 – 44.

[12] KHAN M T, ZAKARIYA M A, SAAD M N M, et al. Parametric effect of defected ground structure (DGS) on frequency of a bandpass filter [ C ]//IEEE International RF and Microwave Conference,2013:184 – 188

[13] KUMAR A, VERMA A K. Control of stop band using

spur line resonators of DGS based low pass filter [ C ]//IEEE Students’ Technology Symposium. 2011: 61 – 64.

[14] LIM J S, KIM C S, JEONG Y C, et al. An advanced equivalent circuit of spiral-shaped defected ground structure [ C ]//34th European Microwave Conference. Amsterdam, 2004:1357 – 1360.

[15] LIM J S, KIM C S, LEE Y T, et al. A new type of low pass filter with defected ground structure [ C ]//Micro-wave Conference. European,2002:1 – 4.

Design of Snake DGS Microstrip Filter

WANG Ke, CHEN Xiao-qiang

( College of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** A snake DGS defect structure which uses snake-like gap instead of rectangular gap into the dumb-bell DGS is introduced. An equivalent circuit is built, meanwhile, the relevant circuit parameters are derived. Control variate method is used to analyze the influence of parameters variation to frequency characteristics and circuit characteristics of the snake DGS defect structure. Furthermore, this kind of structure is put into the design of low-pass filter, simulation of the designed filter and its equivalent circuit model is done separately by MATLAB and HFSS. The results of these two methods are coincident. So it can be drawn that the structure has lower attenuation frequency and more resonant frequency in the case of maintaining the area of the defects.

**Key words:** defected ground structure; equivalent circuit; low-pass filter