

G 形 DMS 结构高选择性低通滤波器的分析与设计^①

曹海林^{②*} 管伟^{*} 何思佳^{*} 杨力生^{**}

(^{*}重庆大学飞行器测控与通信教育部重点实验室 重庆 400044)

(^{**}重庆大学 通信与测控中心 重庆 400044)

摘要 提出一种新颖的 G 形缺陷微带结构(DMS)微带线,以 G 形 DMS 为结构单元,设计并实现了一种具有高选择性和宽阻带特性的微带低通滤波器。与传统的 DMS 结构相比,G 形 DMS 具有更低的谐振频率和更宽的阻带抑制。对设计的滤波器进行了测试,实测结果表明:该滤波器 3dB 截止频率为 3.17GHz,频率选择性达 189dB/GHz,同时在 3.4GHz~10GHz 阻带内抑制度大于 25dB,有效地抑制了二次和三次谐波。该滤波器占用大小仅为 26mm×15mm,实测结果与仿真良好吻合,表明了该 DMS 的有效性及实用性。

关键词 缺陷微带结构(DMS), G 形, 微带低通滤波器, 选择性, 宽阻带

0 引言

低通滤波器可用于抑制谐波和杂波信号,在通信系统中有广泛应用。高选择性和宽阻带的微带低通滤波器是无线通信系统中的一个重要研究方向。传统的微带低通滤波器如阶梯阻抗线滤波器、开路短截线滤波器,尺寸较大、阻带较窄、综合特性较差,不能满足无线通信快速发展的要求。自从 1999 年 Park 和 Kim 等人提出了缺陷地结构(defected ground structure, DGS)以来,国内外已有诸多学者将 DGS 广泛应用于微波毫米波电路设计,如抑制高次谐杂波、设计性能良好的低通、带阻、带通滤波器。但是,由于 DGS 在金属接地板背面刻蚀缺陷图案,改变了金属接地板的结构,引起背向能量泄漏,且不适用于地平面安装在屏蔽盒上的应用场合。最近,在研究 DGS 的基础上,有学者又提出了缺陷微带结构(defected microstrip structure, DMS)。与 DGS 相比,DMS 同样具有 DGS 类似的慢波特性和带隙特性;并且,DMS 金属接地板完整,能减小电路与地面噪音串扰,降低电磁干扰,更加适合微波集成电路。近几年,国内外学者提出多种 DMS 结构^[1~8],如 T 形、F 形、M 形等,由于其易于实现且便于集成,使得 DMS 在微波毫米波集成电路中得到了广泛的应用。

文献[1]提出采用 T 形 DMS 来设计低通滤波器,但该低通滤波器频率选择性较差。文献[2~5]分别提出互补开口方形环(complementary open square ring, COSR)DMS、F 形 DMS 等结构,改善了带通滤波器的阻带性能。文献[6]提出采用 C 形 DMS 设计带阻滤波器,但该滤波器尺寸较大。文献[7]提出利用 M 形 DMS 来设计性能良好的带阻滤波器。文献[8]提出了新的 DMS 结构,并用其设计了两种阻带滤波器。但是迄今为止,DMS 主要用于改善带阻和带通滤波器性能,而将 DMS 用于低通滤波器的研究不足。针对上述问题,本研究提出了一种新颖的 G 形 DMS 结构,并建立了其等效电路,研究了其参数对阻带特性的影响,分析了其慢波特性。进而,通过级联 G 形 DMS,设计了一种新型结构的高选择性和宽阻带的微带低通滤波器,并通过仿真和实测验证了其有效性。

1 G 形 DMS 单元建模

提出的 G 形 DMS 结构如图 1(a)所示,结构单元由一个刻蚀在微带线上 C 形环和一个相连接的缝隙组成,形似字母 G。

传统 C 形 DMS 微带线^[6],如图 1(b)所示,其等效电路可采用了两个并联的 LC 谐振电路表示。与

① 国家自然科学基金(61001089)和重庆市科委自然科学基金(2010BB2243)资助项目。

② 男,1981 年生,博士,副研究员,硕导,研究方向:运载器测控,微波信道,天线技术;联系人,E-mail: hailingao@cqu.edu.cn
(收稿日期:2012-05-30)

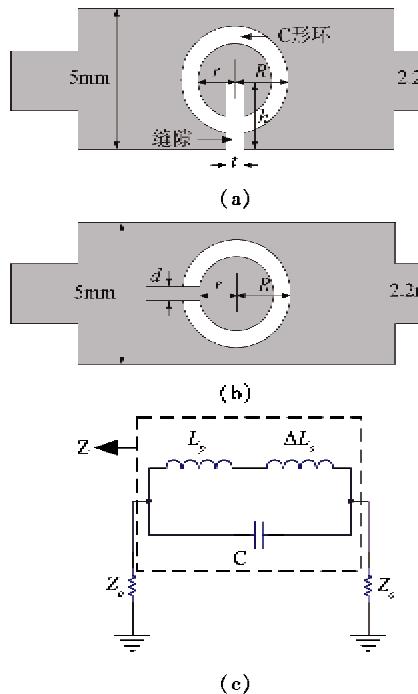


图 1 G 形 DMS、C 形 DMS 和 G 形 DMS 等效电路

C 形 DMS 不同, G 形 DMS 在 C 形 DMS 上加载缝隙, 缝隙改变了电流的流动路径, 增加电流的流动路径长度。从电路上看, 这种效果可以等效一个额外的串联电感 ΔL_s , 加载, 电路如图 1(c) 所示。缝隙的电感值 ΔL_s 可以计算如下^[9]:

$$\Delta L_s = \frac{h u_0 \pi}{8} \left(\frac{l'}{W'} \right)^2 \quad (1)$$

式中, h 为基板厚度, l' 和 W' 分别是缝隙的等效长度和宽度, u_0 为真空磁导率。G 形 DMS 的等效电路模型中的分并联阻抗 Z 的计算公式为

$$Z = jw \cdot \frac{L_p + \Delta L_s}{1 - (L_p + \Delta L_s) C w^2} \quad (2)$$

当并联电路谐振时, Z 趋于无穷大, 网络的传输零点的频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{(L_p + \Delta L_s) C}} \quad (3)$$

从式(1)和式(3)可以看出, 改变谐振器上缝隙的尺寸, 即可改变 ΔL_s 的值, 网络传输零点的频率也将变化。

文中采用基于有限元法的电磁仿真软件 HFSS 12.0 仿真, 基板采用介电常数为 2.65, 厚度为 1mm 的聚四氟乙烯。具有相同面积的 C 形 DMS 和 G 形 DMS 传输特性仿真结果如图 2 所示, 结构如图 1(a)、图 1(b) 所示, 尺寸为 $R = 1.5\text{mm}$, $r = 1.0\text{mm}$, $d = 0.2\text{mm}$, $t = 0.2\text{mm}$, $h = 2.5\text{mm}$ 。从图 2 中可以

看出, G 形 DMS 的谐振频率为 10.22GHz, C 形 DMS 的谐振频率为 14.11GHz。这是由于加载缝隙的附加电感效应, G 形 DMS 相对 C 形 DMS 具有更低的谐振频率和更宽的阻带, 谐振频率降低了 27.6%, 这与式(3)相吻合。

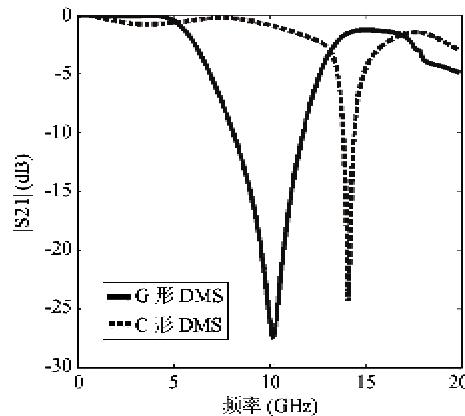
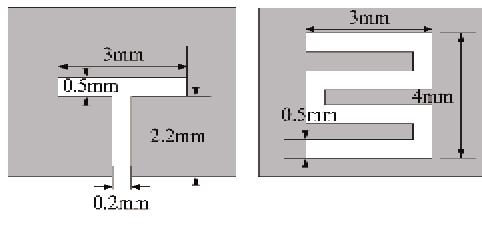
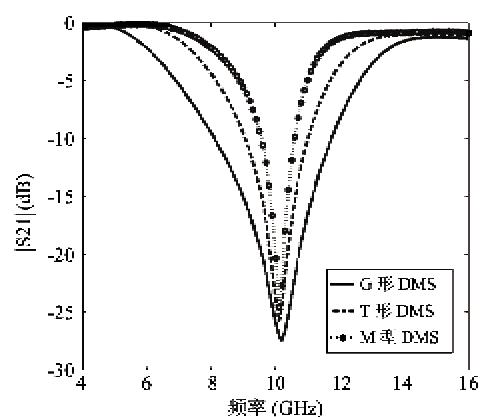


图 2 相同大小 G 形与 C 形阻带特性比较

为了研究 G 形 DMS 的传输特性, 将 G 形 DMS 的传输特性与 T 形^[1]、M 形^[7] DMS 进行比较研究。T 形和 M 形结构的尺寸参数如图 3(a) 所示, G 形 DMS 尺寸同上, 都刻蚀在相同的微带线上。从仿真结果图 3(b) 中可以看出, 就本例而言, 在谐振频率



(a) T 形和 M 形 DMS



(b) G 形、T 形和 M 形 DMS 的 S 参数

图 3 三种 DMS 带阻特性比较

大致相同的情况下(10GHz),由于缝隙的影响,G形DMS和T形DMS相对于M形DMS具有更宽的阻带。而且,从图2可以看出G形DMS的截止频率为6.31GHz,相对于截止频率7.60GHz的T形DMS和截止频率8.35GHz的M形DMS,分别降低了17.0%和24.4%,这有助于减少滤波器的尺寸,适合用作低通滤波器的基本单元。

2 G形DMS单元性能分析

为了研究G形DMS的结构参数对电性能的影响,分别对缝隙宽度 t 、缝隙长度 h 及环宽度 R 对传输特性影响进行仿真研究。G形DMS的初始尺寸如下: $R=1.5\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $h=2.5\text{mm}$, $t=0.2\text{mm}$ 。当缝隙宽度 t 从0.2mm增加到0.6mm时,仿真结果如图4所示,谐振频率从10.21GHz增加到12.73GHz。正如理论分析式(1)所示,当缝隙宽度 t 增加时,串联电感 ΔL_s 减小,相应谐振频率升高。

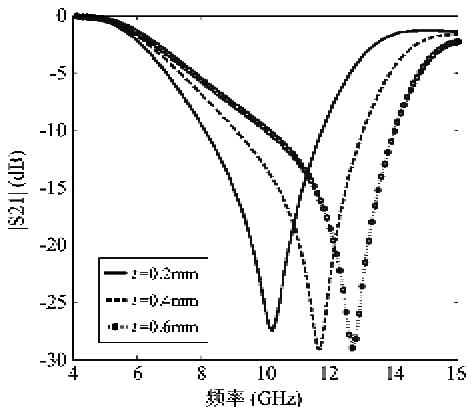


图4 缝隙宽度 t 变化对带阻特性的影响

图5所示为谐振器上缝隙长度 h 对DMS传输特性的影响曲线。从中看出,缝隙长度越长,谐振频

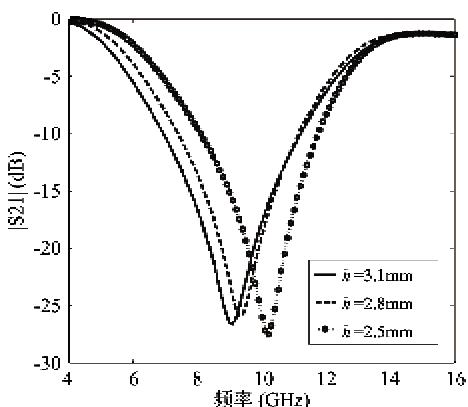


图5 缝隙高度 h 变化对带阻特性的影响

率越低,与上述理论推导式(1)一致。当缝隙长度 h 增大时,串联电感 ΔL_s 增大,谐振频率 f_0 降低。

从图4和图5可以看出,G形DMS中缝隙对微带线频率响应的影响,与理论分析一致,证实了等效电路的正确性。

在缝隙一定的情况下,改变C形环的宽度时,谐振频率随之发生变化。从图6中可以看出,当 R 最大时,谐振频率最低,同时,阻带宽度随着 R 增大而增大。

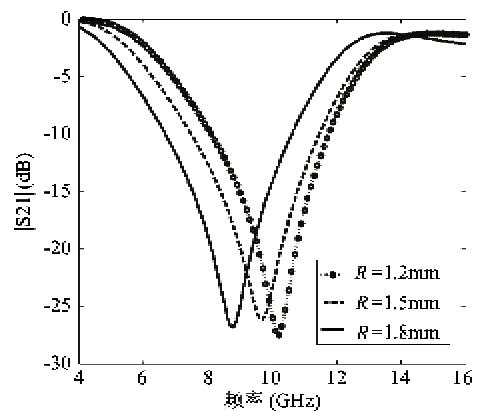


图6 环带宽度 R 变化对带阻特性的影响

因此,通过适当地调整G形DMS的尺寸参数,可以获得所需的谐振频率和阻带抑制宽度。

慢波效应是DMS的另一个重要特性。慢波特性影响滤波器的通带性能,可实现滤波器紧凑设计^[10]。

如图7所示,G形DMS的微带线在谐振频率出现了相位跳跃的现象。与没有刻蚀DMS的相同长度的微带线相比,G形DMS结构微带线在谐振频率前显示了慢的相位变化特性,在谐振频率后显示了快的相位变化特性。因此,G形DMS慢波特性增

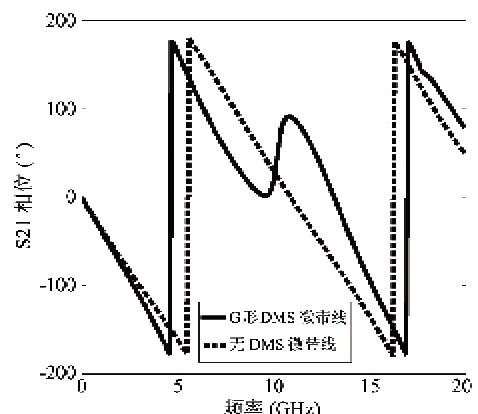


图7 有无DMS的相同微带线相位特性

加了微带线的电长度,有助于减小滤波器设计的整体面积。

3 DMS 低通滤波器设计与测试结果

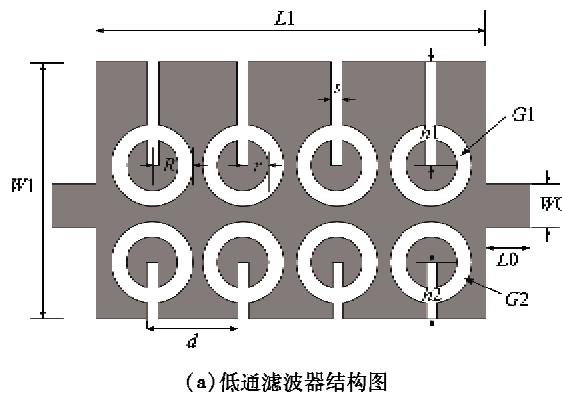
为了提高低通滤波器的带外抑制度,获得较低的截止频率和较好的通带性能,采用了较宽的补偿微带线结合 G 形 DMS 并列排列且四对 DMS 的级联周期结构,设计的 DMS 低通滤波器结构如图 8(a) 所示。

该低通滤波器包括两种不同尺寸的 G 形 DMS,如图 8(a) 所示,四单元的 G1 形 DMS 用于抑制 3.17GHz 到 5GHz 的阻带,四单元的 G2 形 DMS 用于抑制 5GHz 到 10GHz 的阻带。两种不同尺寸的 G 形 DMS 扩宽了低通滤波器阻带的宽度。通过 HFSS 12.0 仿真软件优化,适当地调节 DMS 的尺寸和四对 DMS 之间的距离,优化滤波器的性能,得到各个单元的物理尺寸如下: $L_0 = 2\text{mm}$, $L_1 = 22\text{mm}$, $W_0 = 2.2\text{mm}$, $W_1 = 15\text{mm}$, $R = 2.5\text{mm}$, $r = 1.5\text{mm}$, $d = 5.2\text{mm}$, $s = 0.6\text{mm}$, $h_1 = 6\text{mm}$, $h_2 = 3\text{mm}$ 。实际制作的 DMS 微带线低通滤波器实物图如图 8(b) 所示,滤波器尺寸为 $26\text{mm} \times 15\text{mm}$ 。图 8(c) 给出了 G 形 DMS 滤波器的电流分布矢量图,从图中可以看出 G 形 DMS 对微带线的电流路径的影响。

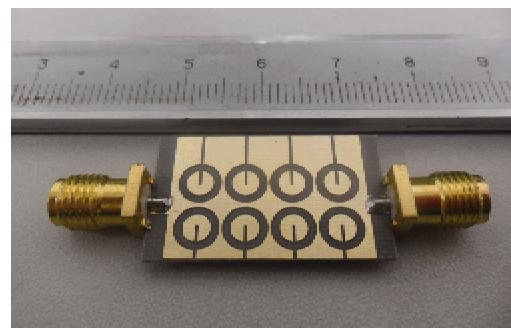
最后,利用 Agilent 8720ET 矢量网络分析仪对该滤波器进行测试,如图 8(d) 所示,滤波器实测与模拟仿真结果之间基本一致。测试结果表明,DMS 低通滤波器的 3dB 截止频率为 3.17GHz,从直流到 2GHz 通带内插损小于 0.5dB,通带内回波损耗优于 10dB,具备很好的阻抗匹配特性。从 -3dB 到 -20dB 的过渡带带宽仅为 0.09GHz,即频率选择性^[11]达 189dB/GHz,阻带抑制度优于 -25dB 拓展到了 10 GHz,有效地抑制了二、三次谐波。

4 结 论

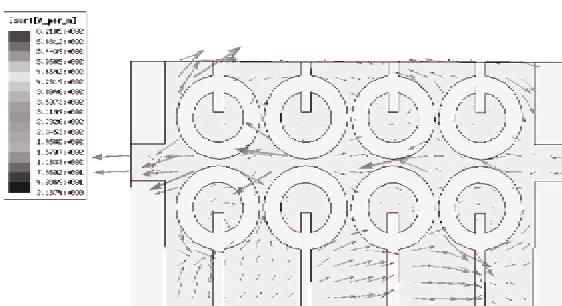
本文提出了一种新颖的 G 形 DMS 结构,建立了微带线的等效电路,分析了该 DMS 微带线的传输特性和慢波特性。与传统的 DMS 相比,G 形 DMS 具有更宽的阻带和更低衰减深度。最后,利用 G 形 DMS 级联周期结构设计出了一种新颖的低通滤波器。理论仿真和实测数据分析表明,该低通滤波器频率选择性达 189dB/GHz,同时,具有较宽的阻带的有效性。该 DMS 滤波器具有小型化,结构紧凑,



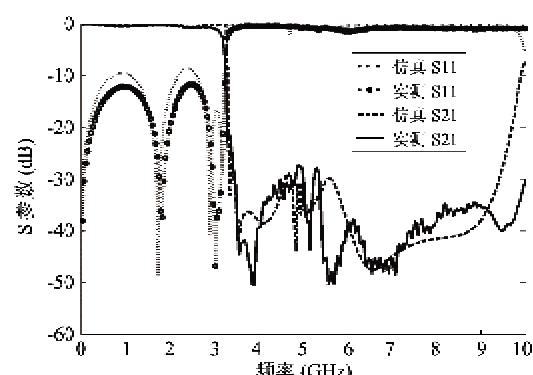
(a) 低通滤波器结构图



(b) 低通滤波器实物照片



(c) 低通滤波器电流分布矢量图



(d) 低通滤波器仿真和实验测试结果
图 8 低通滤波器结构图,实物照片,电流路径
和仿真与实测结果

特性,能较好地抑制二、三次谐波,验证了 G 形 DMS 容易集成等优点。因此,本文提出的 G 形 DMS 单元

在微波集成电路领域中具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 薛玉杰, 杨雪霞, 陆炜敏. 一种新颖的 DMS 低通滤波器的分析与设计. 应用科学学报, 2007, 25(3):272-275
- [2] Naser-Moghadasi M, Alamolhoda M, Rahmati B. Harmonics blocking in hairpin filter using defected microstrip structure. *IEICE Electronics Express*, 2011, 8(9): 629-635
- [3] Naser-Moghadasi M, Alamolhoda M, Rahmati B. Spurious-response suppression in microstrip parallel-coupled bandpass filter by using defected microstrip structure. *IEICE Electronics Express*, 2011, 8(2): 70-75
- [4] Liu H W, Zhang Z C, Wang S, et al. Compact dual-band bandpass filter using defected microstrip structure for GPS and WLAN applications. *Electronic Letter*, 2011, 46(10): 1444-1445
- [5] Xie H H, Jiao Y C, Wang B, et al. DMS structures stop bandpass filter harmonics. *Micowave & RF*, 2011, 50(9): 72-76
- [6] 李臣云, 张友俊, 王振. 适合制作高性能带阻滤波器的新型 C 形环级联 DMS 结构. 高技术通讯, 2011, 21(6):661-664
- [7] La D S, Lu Y H, Sun S Y, et al. A novel compact bandstop filter using defected microstrip structure. *Microwave Optical Technology Letter*, 2011, 53(2): 433-435
- [8] Xiao J K, Zhu W J, Fu J S. New bandstop filter using simple defected microstrip structure. *Microwave Journal*, 2011, 54 (9): 134-144
- [9] Zhang X X, Yang F. Study of a slit cut on a microstrip antenna and its applications. *Microwave Optical Technology Letter*, 1998, 18(4): 297-300
- [10] 喻东升, 吕英华, 张金零等. 一种新颖的 Φ 形缺陷地结构低通滤波器. 北京邮电大学学报, 2011, 34(3): 12-16
- [11] Karmakar N C. Theoretical investigations into binomial distributions of photonic bandgaps in microstripline structures. *Electronic Letter*, 2002, 33 (5): 191-196

Design and analysis of a G-shaped DMS lowpass filter with high selectivity

Cao Hailin * ** , Guan Wei * , He Sijia * , Yang Lisheng * **

(* Key Laboratory of Aerocraft Tracking Telemetering & Command and Communication Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044)

(** The Center of Communication and Tracking Telemetering & Command, Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract

A novel G-shaped defected microstrip structure (DMS) was proposed, and a microstrip lowpass filter with the superior selectivity and wide stopband was designed and fabricated using the proposed DMS as its structural units. Compared with the conventional DMS, the proposed G-shaped DMS exhibits a lower resonant frequency and a wider stopband. The lowpass filter was tested and measured, and the results showed that its 3dB cutoff frequency was 3.17GHz, the frequency selectivity was 189dB/GHz, and the harmonic suppression was over 25dB in the stopband of 3.4GHz ~ 10GHz, so the second and third harmonics can be effectively suppressed. The dimension of this filter is as small as 26mm × 15mm. The measured and simulated results are in good agreement, validating the effectiveness and practicality of the DMS.

Key words: defected microstrip structure (DMS), G-shaped structure, microstrip lowpass filter, selectivity, wide stopband