

文章编号 1005-0388(2009)05-0909-05

# 应用交指电容加载环谐振器的微带 带阻滤波器

彭 毅 章文勋

(东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏南京 210096)

**摘要** 提出了一种交指电容加载环谐振器(IDCLLR), 与同尺寸的开环谐振器(SRR)相比, 具有更多的设计参数、更低的谐振频率和更大的动态范围, 因而使得设计更加灵活、也更适于器件小型化。随后提出两种基于IDCLLR的亚波长微带带阻滤波器结构: 第一种是由一对IDCLLR磁耦合到50欧姆微带传输线构成的滤波器, 获得0.39%(-10 dB)的窄的阻带; 第二种是由一个IDCLLR磁耦合到U形微带传输线中构成的滤波器, 由于增强耦合而获得2.4%的较宽且深的阻带。文中给出了它们的全波仿真和测试结果。

**关键词** 人工电磁材料; 交指电容加载环谐振器; 微带带阻滤波器

**中图分类号** TN 713      **文献标志码** A

## Compact microstrip band-stop filter using interdigital capacitance loading loop resonator

PENG Yi ZHANG Wen-xun

(State key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Jiangsu Nanjing 210096, China)

**Abstract** In this paper, the interdigital capacitance loading loop resonator (IDCLLR) is proposed to design microstrip band-stop filter. Compared to split-ring resonator (SRR), IDCLLR of the same size possesses lower resonant frequency, more parameters for design and larger dynamic ranges. So IDCLLR makes it more flexible for designing filter and benefit of structural minimization. Two kinds of band-reject filters based on IDCLLR are presented. The first one is obtained by magnetic coupling a pair of IDCLLRs to a  $50\Omega$  microstrip line and a 0.39% (-10 dB) narrow band rejection is achieved; the second one is obtained by embedding one IDCLLR into a meandered microstrip line. Due to enhanced coupling between IDCLLR and microstrip, a 2.4% (-10 dB) broad and deep band rejection is achieved. Full-wave simulated and measured results are presented.

**Key words** metamaterials; interdigital capacitively-loaded loop resonator; band-reject filter

## 引言

在近期文献中, 人工的特异电磁材料

(metamaterials) 如开环谐振器 (Split-Ring Resonator, 简称 SRR) 等频受青睐, 作为谐振单元而被应用于平面电路设计, 特别是构成带通和带阻

滤波器<sup>[1~4]</sup>。PENDRY最早提出的SRR<sup>[5]</sup>如图1(a)左所示,其电磁行为类似于一个磁偶极子,能被平行于环轴线的外部磁场所激励,谐振时金属环上的传导电流连同环隙中的位移电流形成闭合电流,表现出很强的抗磁性;由于尺寸远小于波长,周期排列的SRR可视为具有等效负磁导率的媒质。SRR单元也可等效为一LC谐振电路,见图1(a)右,其准静态谐振频率 $f_s = (L_s C_s / 2)^{1/2} / 2\pi$ ,其中 $L_s$ 是等效电感,近似等于具有内外环平均周长和同等环宽度的闭合导体单环的电感; $C_s = 2aC_{pul}$ , $C_{pul}$ 是内外环间单位长度分布电容, $C_s$ 是左右各半个SRR的电容,总等效电容为左右两个电容的串联即 $C_s/2$ 。SRR以其平面结构、易于制作和集成,能在很宽频带内实现磁响应等优点,受到高度关注,目前已用于滤波器、耦合器、移相器、天线和隐身材料等的设计和制造中。然而由于SRR结构简单,可供调节的参数较少,使得设计不够灵活,也限制了结构的进一步小型化。为此,以SRR为基础,一些学者又提出其他的亚波长谐振结构,如宽边耦合开环谐振器(BC-SRR)<sup>[6]</sup>、电容性加载环谐振器(CLLR)<sup>[7,8]</sup>和螺旋型谐振器(SR)<sup>[2]</sup>等。由于电感较难调控,而电容较易控制,这些谐振单元的电容比相同尺寸SRR的大,故能进一步降低结构的电尺寸。但仍然存在结构参数少、损耗增加等问题。为避免这些不足,我们提出一个新的亚波长谐振结构:交指电容加载环谐振器(Inter-Digital Capacitance Loading Loop Resonator,简称IDCLLR),其结构及参数如图1(b)左所示。IDCLLR的主要特点是采用单环结构,且用交指电容取代普通单开环谐振器的缝隙电容。交指电容具有较多的结构参数,如交指的数目、宽度和长度等,都可用来调节电容,这增

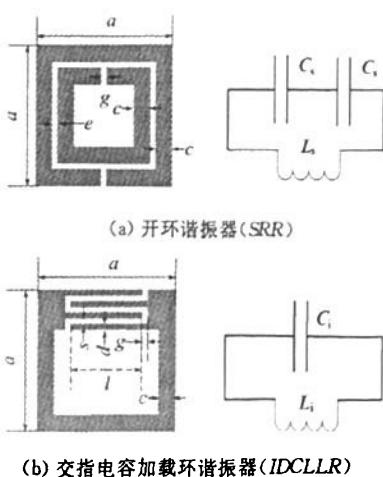


图1 两种谐振单元的示意图及其等效电路模型

加了设计的灵活性,并可使结构进一步小型化。XIAO等人提出的用于设计小型化波导的交指结构磁性材料可认为是IDCLLR的特例<sup>[9]</sup>。我们将设计基于IDCLLR的微带带阻滤波器。首先分析IDCLLR的等效电路模型,给出等效电容估算公式,并与SRR电路模型相对比。然后设计了基于IDCLLR的两种带阻滤波器,一种是普通微带线加载一对IDCLLR构成的普通带阻滤波器;另一种是由单个IDCLLR嵌入U型微带线构成的紧耦合微带带阻滤波器。仿真和实验都表明后者比前者有更佳的带阻特性。

## 1 等效电路模型

对亚波长谐振单元来说,谐振频率是它们的重要指标之一。IDCLLR的等效电路如图1(b)右所示,其准静态谐振角频率为 $\omega_s = 1/\sqrt{L_i C_i}$ , $L_i$ 为其等效电感,同SRR一样,也可由同形状闭合金属环电感近似计算。 $C_i$ 为IDCLLR的等效电容,近似等于加载的交指电容。交指电容的分析和设计问题ALLEY已详细研究<sup>[10]</sup>。一般来说,为使电容最大化,交指的宽度和间隔应设计为相等。交指电容的准静态电容可按式(1)近似计算<sup>[11]</sup>,即

$$C_i = \frac{2\epsilon_0 \epsilon_{ri}}{K'(k_i)} (N-1)l \quad (1)$$

式中, $k_i = \tan^2(d\pi/4(d+s))$ ; $N$ 是交指数目; $l$ 是交指长度; $\epsilon_{ri}$ 是宽度为 $d$ 的微带线的等效介电常数,由下式表示<sup>[11]</sup>

$$\epsilon_{ri} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} F\left(\frac{d}{h}\right) - \frac{\epsilon_r - 1}{4.6} \frac{t/h}{\sqrt{d/h}} \quad (2)$$

$$F\left(\frac{d}{h}\right) = \begin{cases} (1 + 12 \frac{d}{h})^{-1/2} + 0.04(1 - \frac{d}{h})^2 & \frac{d}{h} \leqslant 1 \\ (1 + 12 \frac{d}{h})^{-1/2} & \frac{d}{h} \geqslant 1 \end{cases} \quad (3)$$

$K(k)$ 和 $K'(k)$ 是第一类完全椭圆函数及其余函数, $\epsilon_r$ 是介质相对介电常数, $t$ 是微带线厚度, $h$ 是介质厚度,且有<sup>[11]</sup>

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \begin{cases} \left[ \frac{1}{\pi} \ln \left( 2 \frac{1+\sqrt{k}}{1-\sqrt{k}} \right) \right]^{-1} & 0 \leqslant k \leqslant 0.7 \\ \frac{1}{\pi} \ln \left( 2 \frac{1+\sqrt{k}}{1-\sqrt{k}} \right) & 0.7 \leqslant k \leqslant 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $K'(k) = K(k')$ , $k' = \sqrt{1-k^2}$ 。由式(1)可知, $C_i$ 与 $l$ 成正比,这样可以在保持其他结构参数不变的情况下,仅通过调节交指长度就可显著地改变电

容。同样,交指的数目和宽度以及交指的间距也对电容有明显的影响。

对于 SRR,其等效电容可由共面双线间的耦合电容近似计算<sup>[6]</sup>,算式如下

$$C_s = 2aC_{\text{pul}} = 2\epsilon_0 \epsilon_{\text{ss}} \frac{K(k_s)}{K'(k_s)} a \quad (5)$$

式中,  $a$  是 SRR 的边长;  $k_s = e/(e+2c)$ ;  $\epsilon_{\text{ss}}$  是宽度为  $c$ , 间距为  $e$  的共面带状线的等效介电常数, 由下式表示<sup>[11]</sup>

$$\epsilon_{\text{ss}} = 1 + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{K'(k_s)}{K(k_s)} \frac{K(k_{s1})}{K'(k_{s1})} \quad (6)$$

其中  $k_{s1} = \sinh(\pi e/4h)/\sinh(\pi(e+2c)/4h)$ 。由式(5)可知  $C_s$  与  $a$ 、 $e$  和  $c$  有关, 研究表明<sup>[6]</sup>, 若保持  $a$  和  $c$  不变, 谐频  $f_0$  随着  $e$  的减小而减小( $C_s$  增加)。但受制于制作工艺,  $e$  不能无限制减少, 所以调节  $e$  对谐频的影响是十分有限的。

因此, 在尺寸相同的情况下( $a$  和  $c$  相同), IDCLLR 比 SRR 有更多的设计参数。这给设计带来方便, 也利于器件的小型化。

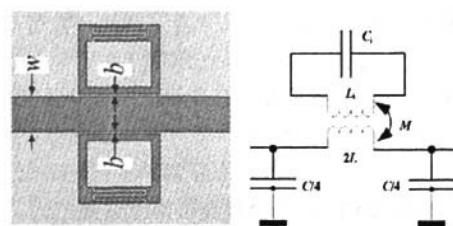
## 2 微带带阻滤波器

亚波长谐振器的重要应用之一是制作小型带阻滤波器, 研究表明<sup>[1,3]</sup>, 基于 SRR 等亚波长谐振器的带阻滤波器比具有相似功能的 EBG 结构和周期性缺陷接地结构带阻滤波器<sup>[12]</sup> 具有更小的尺寸。我们用 IDCLLR 替代 SRR 以期进一步降低尺寸。

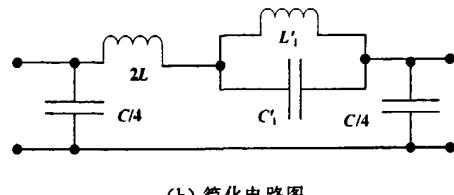
### 2.1 带阻滤波器及其集总单元电路模型

利用 IDCLLR 的谐振特性设计的带阻滤波器由 50 欧姆微带线两旁加载一对 IDCLLR 构成, 如图 2(a) 所示。其等效集总参数电路如图 2(b) 所示, 因镜像对称性该图对应原电路的一半。图中  $L$  和  $C$  是微带线单位长度的等效电感和电容。IDCLLR 通过互感  $M$  磁耦合到微带线上。图 2(c) 是简化电路图, 其中并联分支中的电感、电容值满足关系<sup>[2]</sup>  $L'_1 = C_i M^2 \omega_i^2$ ,  $C'_i = L_i / (M^2 \omega_i^2)$ 。

据此设计并制作了基于 IDCLLR 微带带阻滤波器, 用于研究滤波器的频率响应特性。实验样品参数选取如下: 介质基片为 Arlon diclad 880,  $\epsilon_r = 2.2$ , 厚度为 1 mm; 微带线宽度为  $w = 3.05$  mm; IDCLLR 的参数取  $a = 6$  mm,  $c = 0.6$  mm,  $g = s = b = 0.2$  mm,  $l = 3.6$  mm。用 Agilent PNA E8363B 矢量网络分析仪测量散射参数, 用基于有限元法的商业软件 HFSS 进行数值仿真, 仿真和测试  $S_{21}$  参数结果如图 3 所示。



(a) 结构示意图 (b) 等效电路图



(b) 简化电路图

图 2 基于 IDCLLR 的微带带阻滤波器

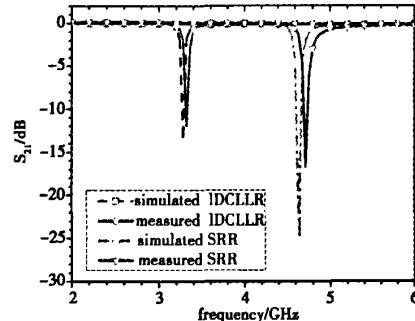


图 3 基于 IDCLLR 和 SRR 的两种带阻滤波器的  $S_{21}$  仿真和测试的频响曲线

将图 2 中的 IDCLLR 换成 SRR, 就得到基于 SRR 的微带带阻滤波器。为便于比较, 图 3 也包括了这种滤波器的传输系数频响曲线, 其中 SRR 的尺寸为  $a = 6$  mm,  $c = 0.6$  mm,  $g = s = b = 0.2$  mm, 参考图 1(a)。由图 3 可见, 仿真和测量结果符合得较好。 $S_{21}$  的频响曲线显示两种结构都具有明显的窄带带阻滤波器特性, 其衰减谷点对应谐振器的谐振频率。由图 3 得 IDCLLR 的谐振频率约 3.32 GHz, 对应电长度约  $\lambda_g/11$ ; SRR 的谐振频率约 4.72 GHz, 对应的电长度  $\lambda_g/7$ 。其中  $\lambda_g$  是介质中谐振时波长。两种谐振单元的面积相同, 显然 IDCLLR 的电尺寸更小, 约为 SRR 的 40%。然而基于 IDCLLR 的滤波器阻带中心插损只有约 -12 dB, -10 dB 带宽只有约 13 MHz, 相对带宽约 0.39%。基于 SRR 的滤波器则具有较低的阻带电平(阻带中心插损约 -16 dB)和较宽的阻带宽度(相对带宽约 1%), 这是由于 SRR

是双环结构,它比单环结构能更好地与微带线耦合。改善阻带性能的办法之一是增加谐振单元数目,我们的研究表明当IDCLLR单元数增加到6对(12个)时,10 dB带宽可达8.5%,中心插损约-23 dB<sup>[13]</sup>。

## 2.2 基于IDCLLR的紧耦合带阻滤波器

上述微带带阻滤波器虽呈现带阻功能,但阻带电平不高且带宽极窄,这起因于谐振单元与微带之间的耦合较弱。增强耦合的途径:或是尽可能减小微带与谐振单元的间距,但受加工容差的制约;或是增加谐振单元的数目,这又会使通带插损增加。为了实现强耦合,JITHA等人提出用单开环谐振器(OLR)加载U形微带线的滤波器结构<sup>[14]</sup>,该结构中OLR嵌入U形微带线的凹槽中,因三条边与微带线相邻而耦合显著增强,只需一个单元就取得较好的阻带特性,缺点是单元尺寸过大。我们根据同一原理,采用IDCLLR加载U型微带线,设计并制作了微带带阻滤波器,如图4所示。该结构中IDCLLR距微带线各边的距离皆为0.2 mm,其他结构尺寸及材料参数同图2(a)。

仿真和测试结果示于图5,测量的谐振频率约3.34 GHz,与图3的结果基本一致;阻带中心的插损约-22 dB,-10 dB的阻带宽度约80 MHz,相对

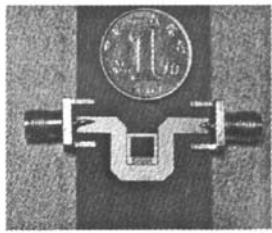


图4 基于IDCLLR的紧耦合带阻滤波器实验样品图

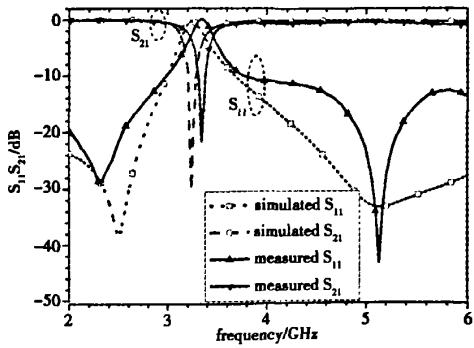
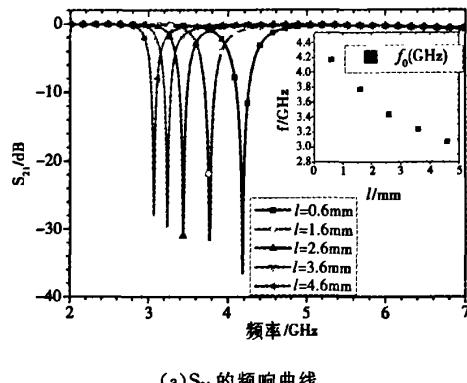


图5 S参数的频响曲线仿真和测试结果

带宽约2.4%。与第一种滤波器比较,阻带电平提高了10 dB,带宽增加了5倍多,带阻特性明显改善。仿真和测量的回波损耗有一定的偏差,这可能是由于测量时同轴到微带过渡的阻抗失配以及制作公差所引起的。

进一步考察交指长度l对谐振频率的影响。根据式(1),增加l就会增加C<sub>i</sub>,而电感几乎不变,从而谐振频率降低。仿真结果如图6所示,图6(a)是不同l下S<sub>21</sub>频响曲线图,当l由0.6 mm按间隔1 mm变化到4.6 mm时,谐振频率由4.18 GHz降到3.08 GHz,降低约1.35倍,显示较大的动态范围。图中的插图表示的是谐振频率f<sub>0</sub>与l的关系,显然,f<sub>0</sub>随l的增加而降低,这与式(1)所预计的一致。

图6(b)是不同l下的S<sub>11</sub>频响曲线,在阻带中心,S<sub>11</sub>接近于零,表明能量基本上被反射回输入端。在大部分通带区域,插损小于-0.3 dB,表明几乎没有能量辐射出去。



(a) S<sub>21</sub>的频响曲线

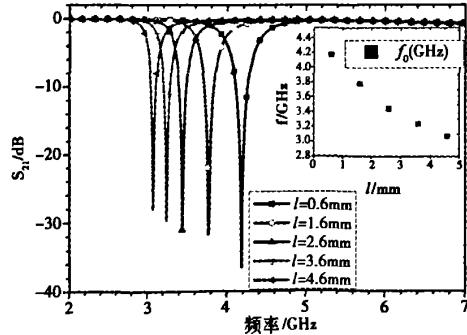


图6 不同交指长度l下S参数仿真结果

## 3 结论

分析了IDCLLR结构的电磁特性,指出其交指结构提供的较大等效电容能实现较低的谐振频率,

可作为亚波长谐振器而应用于器件小型化;同时较多的结构参数能提供较大的动态范围,增加了设计的灵活性。以 IDCLLR 为谐振单元设计和制作了两种紧凑结构的微带带阻滤波器。第一种是由一对 IDCLLR 磁耦合到微带传输线构成的滤波器,具有很窄的阻带特征,其电尺寸约为 SRR 的 40%,因而更有利于器件的小型化。第二种是由单个 IDCLLR 磁耦合到 U 形微带传输线构成的滤波器,能显著增加谐振单元与微带的耦合,仿真和测试结果表明其阻带特性明显优于前一种滤波器。

### 参考文献

- [1] GARC'IA-GARC'IA J, BONACHE J, GIL I, et al. Comparison of electromagnetic band gap and split-ring resonator microstrip lines as stop band structures[J]. *Microwave Opt. Tech. Lett.*, 2005, 44(4): 376-379.
- [2] BAENA J D, BONACHE J, MARETIN F, et al. Equivalent-circuit models for split-ring resonators and complementary split-ring resonators coupled to planar transmission lines[J]. *IEEE Transactions on MTT*, 2005, 53(4): 1451-1461.
- [3] GARC'IA-GARC'IA J, MARETIN F, FALCONE F, et al. Microwave filters with improved stopband based on sub-wavelength resonators[J]. *IEEE Transactions on MTT*, 2005, 53(4): 1997-2006.
- [4] OZNAZI V, ERTURK V B, et al. A comparative investigation of SRR-and CSRR-based band reject filters: simulations, experiments, and discussions[J]. *Microwave and Opt. Tech. Letters*, 2008, 50(2): 519-523.
- [5] PENDRY J B, HOLDEN A J, ROBBINS D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. *IEEE Trans. MTT*, 1999, 47(11): 2075-2084.
- [6] MARQU'ES R, MESA F, MARTEL J, et al. Comparative analysis of edge-and broadside-coupled split ring resonators for metamaterial design-theory and experiments[J]. *IEEE Transactions on AP*, 2003, 51(10): 2572-2581.
- [7] ERENTOK A, LULJAK P L, ZIOLKOWSKI R W, et al. Characterization of a volumetric meta-material realization of an artificial magnetic conductor for antenna applications[J]. *IEEE Transactions on AP*, 2005, 53(1): 160-172.
- [8] SCHURIG D, MOCK J J, JUSTICE J J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. *Science*, 2006, 314 (10): 977-980.
- [9] XIAO Gaobiao, MAO Junfa, YUAN Bin. An artificial magnetic material with Interdigital structure[C]// IEEE AP-S Int. Symp. Dig, Hawaii, USA, 2007: 2558-2561.
- [10] ALLEY G D. Interdigital capacitors and their application to lumped-element microwave integrated circuits[J]. *IEEE Transactions on MTT*, 1970, 18(12): 1028-1033.
- [11] BAHL I, BHARTIA P. *Microwave Solid State Circuit Design*[M]. 2nd Ed. New York: Wiley, 2003.
- [12] 刘海文,孙晓伟,李征帆,等.周期性缺陷接地结构的微带线[J].*电波科学学报*,2007,22(4):675-679.  
LIU Haiwen, SUN Xiaowei, LI Zhengfan, et al. Micro-strip lines with periodic defected ground structures [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2007, 22 (4): 675-679. (in Chinese)
- [13] PENG Y, ZHANG W X. Microstrip band-stop filter based on interdigital capacitance loading loop resonator[J/OL]. *Progress In Electro-magnetics Research Letters*, 2009, 8, 93-103. <http://meta.mit.edu/pierl>
- [14] JITHA B, BYBI P C, AANANDAN C K, et al. Microstrip band rejection filter using open loop resonator[J]. *Microwave Opt. Tech. Lett.*, 2008, 50(6): 1550-1551.

彭毅 (1969—),男,安徽人,东南大学副教授,主要研究方向为人工电磁材料、微波理论和技术、天线理论和技术等。



章文勋 (1937—),男,东南大学教授,博士生导师,中国电子学会会士、IET Fellow, IEEE Fellow。主要研究方向是工程电磁理论与微波技术,天线理论与技术等。



## 微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://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/>