

平面左手结构在微波器件及天线设计中的应用

程 强, 林先其, 秦 瑶, 刘若鹏, 崔铁军

(东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏南京 210096)

摘 要: 自从 2001 年首次实现人工左手媒质以来, 人们一直致力于制作大带宽、低损耗、易集成且具有左手特性的微波器件与天线. 本文着重介绍两种基本的左手结构在平面微波电路中的应用, 其一是左右手复合结构, 其二为互补开口谐振环结构. 近年来, 这两种结构在微波器件及天线设计中得到广泛研究与应用. 本文总结了国内外在这两个方面的研究进展, 并结合我们在这方面所取得的成果, 对平面左手电路的原理和应用进行了详细分析和说明.

关键词: 左手媒质; 左右手复合结构; 互补开口谐振环结构

中图分类号: TN011 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 6A-118-09

Application of Planar Left-Handed Circuits on the Design of Microwave Components and Antennas

CHENG Qiang, LIN Xian-qi, QIN Yao, LIU Ruo-peng, CUI Tie-jun

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

Abstract: Since the artificial left-handed material was realized in 2001, it has been devoting to design left-handed microwave components and antennas with large bandwidth, low loss and high integration ability. In this paper, two kinds of left-handed structures used in microwave components and antennas are reviewed, one of which is the composite right/left-handed structure, and the other of which is the complementary split-ring resonator structure. Both structures have been widely studied and applied in the design of microwave components and antennas. The progress of the related researches on these two structures is summarized in this paper, in addition to some of our achievements. The principles and applications of planar left-handed circuits are analyzed and demonstrated in details.

Key words: left-handed material, composite right/left-handed structures, complementary split-ring resonators

1 引言

1968 年俄国科学家 Veselago 提出了左手媒质的概念^[1]. 在这种媒质中, 其宏观的介电常数和磁导率同时为负, 与现实世界中自然介质的特性完全相反. 这种特殊的介质特性决定了左手媒质具有很多与普通介质截然不同的电磁性质. 例如, 在左手媒质中电场、磁场与坡印廷矢量呈左手关系; 其折射率为负值; 电磁波在左手媒质中的相速和群速方向相反; 等等. 此外这种媒质还具有逆 Cerenkov 辐射和逆多普勒效应. 但由于当时并未发现自然界有这种奇异媒质的存在, 论文中所描述的很多奇特现象并未引起人们的重视, 而且这种情形一直持续了二十余年.

20 世纪八十年代以来, 有关周期结构的研究迅速成为当时科技发展中的一大亮点. 周期结构具备许多优

良性质, 例如由周期性单元组成的电磁带隙 (EBG)、光子晶体 (PBG) 等结构可以被用来制作成许多高性能光学器件 (谐振腔、滤波器、光纤等等). 再如, 周期性的金属单元排列具有一定的选频特性, 可广泛应用于频率选择表面、反射器和反射天线、雷达罩的设计中.

周期结构的研究极大地促进了人工媒质的发展^[2]. 人们逐渐寻找一些人造结构来替代普通介质实现某些特殊的力学和电磁性质.

由周期性单元排成的阵列, 在一定条件下也同普通介质一样可以用介电常数和磁导率来描述. 所谓介电常数和磁导率都代表了均匀媒质对外加电场和磁场的宏观反应. 实际上宏观的均匀媒质内部其实都是由杂乱无章的分子、原子等微观结构组成, 这些微观结构对外加场的反应在时间和空间上平均就得到了我们所关心的介电常数和磁导率. 对于非均匀媒质 (周期结构) 而言,

当每个单元的周期长度远远小于工作波长时,其对外加电磁场的反应也可以用上面所提到的采用对时间和空间平均的方法,用宏观的等效介电常数和等效磁导率来表征^[3].

英国帝国学院的 Pendry 教授在利用周期结构来实现左手媒质方面走出了第一步.他首先提出了采用无限长金属线和开口环结构来实现负介电常数和负磁导率的设想,并被后来的实验所证实^[4,5].紧接着他又提出一个大胆的设想:用左手媒质来实现完美透镜^[6].在光学成像中,由于光源所发出的凋落波分量衰减太快,往往难以捕捉,故对于一般的光学成像系统,其成像分辨率往往小于一个波长.但若使用由左手媒质构成的平板透镜,且该媒质的相对介电常数和相对磁导率都为 -1 时,透镜所成像的分辨率可以为任意小,因为此时光源所发出的凋落波在像点处被完整的恢复出来.这也就是左手媒质所特有的凋落波放大性质.这一性质一经提出就引起了极大的争议,但在后来的一些实验中被验证^[7-9].

受到 Pendry 教授工作的启发,美国加州大学圣地亚哥分校的 Smith 教授将线单元和开口环单元组合在一起,首度制作出了左手媒质的基本单元^[10].在 2001 年的《科学》杂志上,Smith 小组从实验角度证明了这种人工媒质具有负的等效折射率.这个激动人心的结果极大地推动了左手媒质领域的研究和发展.左手媒质成为全世界共同关注的焦点,美国、欧盟、中国、日本等国都将启动了这种新型媒质的研究.2003 年,左手媒质更是被评为全世界十大科技进展之一.

目前,左手媒质单元既可由电谐振单元和磁谐振单元组合排列而成,也可只包括一个基本单元,在某一频段内同时具有负介电常数和负磁导率.值得注意的是,由于这些基本单元从本质上说都是一些谐振结构,而左手频段又位于谐振结构的谐振点附件,因而左手特性所占据的频段带宽通常较窄.目前世界上很多学者都在致力于解决这个问题,包括现有结构的优化设计、探索新的产生负折射的机制等.这些新的机制主要指利用一些特殊媒质来产生负折射效应,例如光子晶体、铁氧体、手征媒质等^[11-13].

除了通过周期性的结构单元来实现空间的左手媒质外,在实际微波和光电路设计中我们还可以使用左右手复合结构从电路的角度来实现左手特性.这种左右手复合结构的研究主要以加州大学洛杉矶分校的 Itoh 小组和加拿大多伦多大学的 Eleftheriades 小组为代表.他们提出了非常相似的平面左手结构电路模型,并以此为基础制作了大量具备左手特性的微波器件,如谐振器、滤波器、功分器、耦合器、天线等.左右手复合结构在左手通带带宽及损耗上显示了巨大优势,再加

上其平面结构的易集成性,基于此复合结构的微波器件及天线研究也越来越广泛^[14,15].相应的设计成果诸如滤波器、耦合器、移相器、新型天线等也越来越多地报道在国内外核心期刊上^[16-18].相比于传统微波器件,此类基于左右手复合结构的微波器件及天线呈现出尺寸小、性能新颖等优势,更有助于微波射频系统的小型化和集成化.

近年来,一种新型的互补的开口谐振环结构也被应用于平面微波电路之中.这种结构通过在平面电路的底面刻蚀开口谐振环来实现等效的负介电常数.通过在上端导带引入开口电容,可以实现信号按左手方式传输,即实现左手传输线.通过与左右手复合结构的理论相融合,这种结构也具有高带宽和低损耗的良好特性.一系列基于互补开口谐振环结构的微波器件^[19-31]将在后面几节中加以介绍.

本文首先介绍左右手复合结构的组成、特点、及其在微波射频器件和天线中的应用,其中包括我们将一种新型左右手复合结构用于微波器件及天线设计的阶段性研究成果.然后介绍有关互补开口谐振环结构的原理、特点、及其在微波射频器件和天线中的应用.有关具体结构的详细设计和说明,请参考相关文献.在此基础上,我们对此方向的研究前景作了分析和展望.

2 左右手复合结构

2.1 左右手复合结构的组成及特点

美国加州大学洛杉矶分校的 Itoh 教授和加拿大多伦多大学的 Eleftheriades 教授等人首先提出串连电容加通孔接地的微带支线构成左右手复合传输线结构^[14,15].大量的国内外理论研究和实验研究证实了这种结构具有自然界材料中所不具有的特殊电磁特性,包括同时具有负的等效介电常数和负的等效磁导率、电磁波在这些结构中传输时其群速和相速反向、以及电场矢量、磁场矢量和电磁波的波矢满足左手定则等.

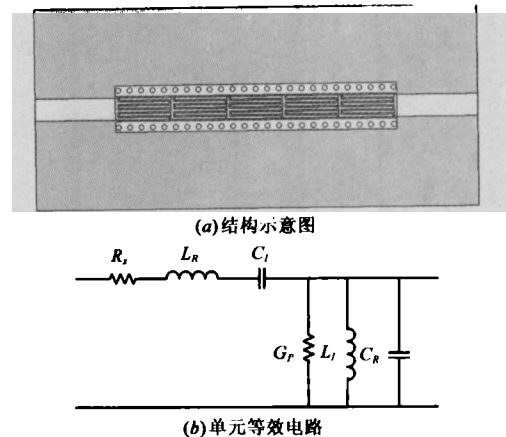


图 1 新型左右手复合结构示意图

Itoh 教授等学者用此类结构已成功设计了多种微波器件.然而,此结构属于非对称结构,而且用于实现对地电感(L_L)的微带通孔接地线造成了结构的不紧凑.基于此,我们提出了一种改进结构,如图 1(a)所示.图 1(b)给出了相应的单元等效电路模型.

在上述新型左右手复合结构中,两排金属化通孔起到了等效电壁的作用,而原通孔接地微带线替换为一段紧凑的微带线接到等效电壁上.此结构具有很好对称性,再加上通孔等效电壁的作用,减少了边缘场的泄漏耦合,使得结构更容易集成于大型高集成度的射频系统之中^[16].

2.2 左右手复合结构在微波器件设计中的应用研究

2.2.1 新型滤波器的设计

传统右手传输线的等效电路是一个低通结构,而左手传输线结构的等效电路是一个高通结构.因此左右手复合传输线构成的特异媒质是一个带通结构.利用左右手复合传输线结构的这个带通特性可以制成尺寸小、带内损耗小、频带宽的带通滤波器.

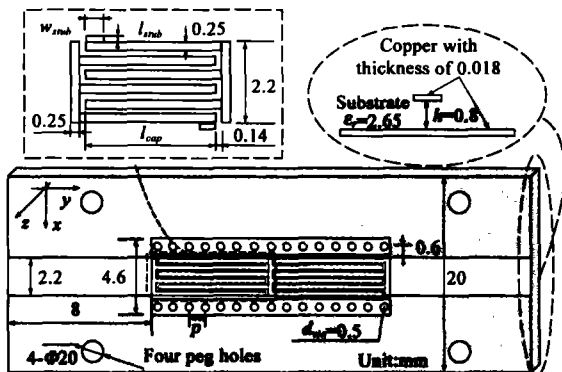


图 2 两个左右手复合传输线单元构成的新型滤波器^[16]

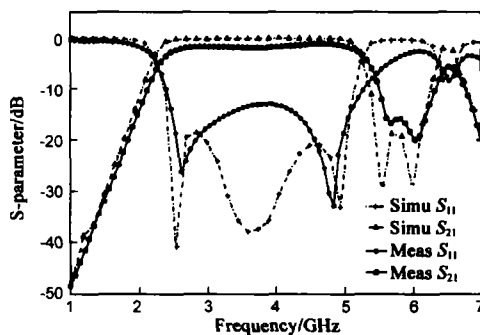


图 3 $l_{cap}=8\text{mm}$ 时的全波仿真及实验测试结果^[16]

中国科技大学的徐善驾教授等人对 Itoh 教授所提出的左右手复合结构加以改进提出了一种具有对称特性的新型复合结构,在此基础上分析并设计了具有较宽通带的带通滤波器,文献[32]给出了相应的全波仿真结果,从仿真结果我们可以看出该新型滤波器具有宽频带小尺寸低插损等特点.另外浙江大学的何赛林教授等在文献[33]中也对用多种基于左右手复合结构实

现的滤波器导波及滤波特性进行了分析.

我们在总结前人研究成果的基础上,提出了新的左右手复合结构.图 2 给出了我们所设计的基于新型复合结构的新型超宽带滤波器结构示意图.通过改变其中的交指电容长度 l_{cap} 即可得到不同工作频段上的带通滤波器^[16].图 3 给出了 $l_{cap}=8\text{mm}$ 时的电磁场全波仿真和实验测试结果.从图 3 可以看出,新型滤波器的相对带宽在 70% 以上^[16].

2.2.2 新型零阶谐振器的设计

对于左右手复合传输线结构,在其左手通带和右手通带的过渡段上有两个特殊的非零频率点,在此两点上电磁波的相位常数 $\beta=0$.再通过适当调节分布结构,使得左手传输线和右手传输线具有相等的特性阻抗.此时即可实现一个新型的零阶谐振器. Itoh 及中科院的李芳教授等人都曾应用左右手复合结构的设计过此类零阶谐振器^[34,35],其谐振频率由复合结构等效的电感、电容值决定,而与谐振器的尺寸无关,因而具有小尺寸的优点.

实际上,对于 Itoh 及李芳教授等人给出的开路谐振器,其谐振频率由等效的并联电容及并联电感所决定.为此,完全可以将其中的交指电容改换成微带线或其他结构以简化或是进一步减小尺寸.这里我们提出了如图 4(a)所示的简化左右手复合结构^[36],其等效电路模型参见图 4(b).图 5 给出了其仿真和测试结果.相比于文献[34]和[35]中的结果,我们所测试到的 Q 值有所下降,但是插入损耗大大降低,反映在测试得到的 S_{21} 幅值从文献[34]中的 -7dB 增到了 -2dB .另外,我们

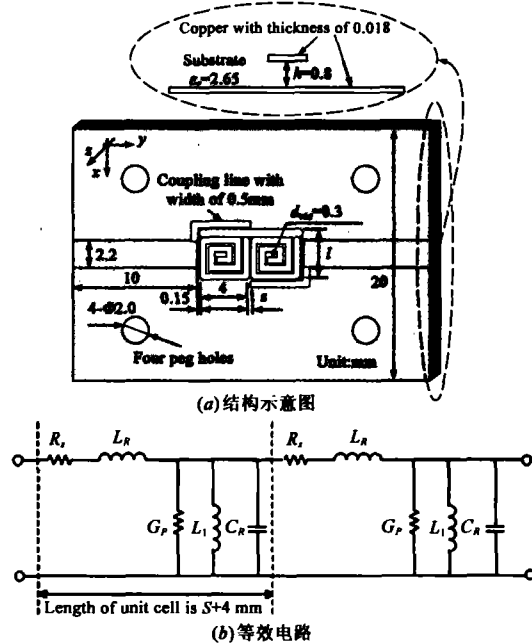


图 4 一种简化的左右手复合结构^[36]

所设计的谐振器尺寸比文献的减少了一半以上。

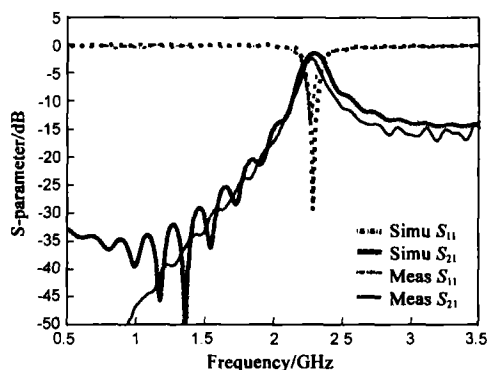


图 5 基于简化复合结构的新型谐振器 S 参数^[36]

2.2.3 任意双频带分支耦合器的设计

传统的右手四分之一波长分支线只能工作在设计频率 f_0 和它的奇次倍频 $3f_0, 5f_0, \dots$ 上。由于在双频段或多频段通讯系统中,各段频率的选择是独立的,一般不满足奇次倍频的关系,所以传统右手分支线有时不能满足这些系统的要求。而左右手复合传输线结构具有非线性相移特性,所以可以利用复合传输线来替代传统分支线中的右手传输线,以获得在第一个频段不变的情况下的任意第二个工作频段。

Itoh 等人曾用他们提出的复合结构设计了一个带集总元件的可用于 GSM 双频通信系统的 3dB 分支耦合器。集总元件的应用简化了设计过程,不过也导致了性能的降低。更主要的是集总元件值的离散性限制了设计的任意性^[37]。

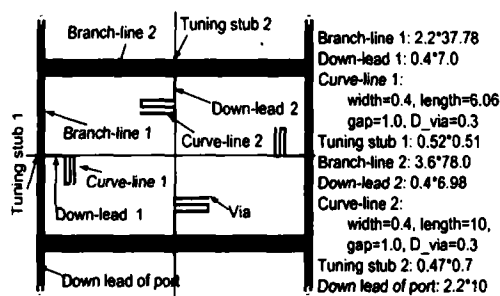


图 6 任意双频带 3dB 分支耦合器的结构示意图^[38]

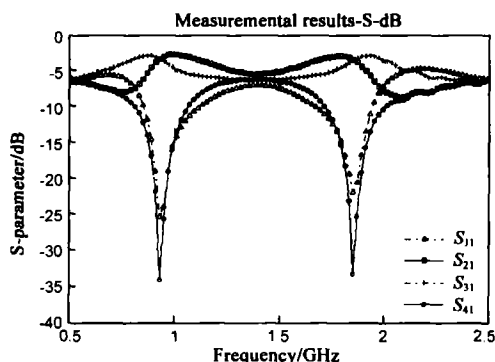


图 7 任意双频带 3dB 分支耦合器的 S 参数^[38]

为此,我们选用简化的左右手复合传输线结构重新研究设计了一个纯分布结构的耦合器^[38],两输出端口通带中心频率分别为 0.9GHz 和 1.8GHz。图 6 给出了相应的结构示意图,图 7 为我们的实测结果。

2.2.4 左右手复合结构在天线设计中的应用研究

天线设计主要由三部分组成:一是馈电网络的设计;二是辐射单元的设计;三是背景媒质的设计。目前,左右手复合结构用于天线设计的报道主要是作为馈电网络和辐射单元。在此,我们将一一加以举例说明。

(1) 新型馈电网络的设计

复合结构用于馈电网络主要是利用其非线性相位的特性,以小尺寸实现 0 度,90 度或是 180 度的相位差馈电。文献[39]为徐善驾教授等人所设计的新型馈

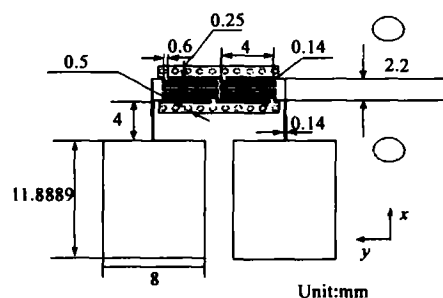
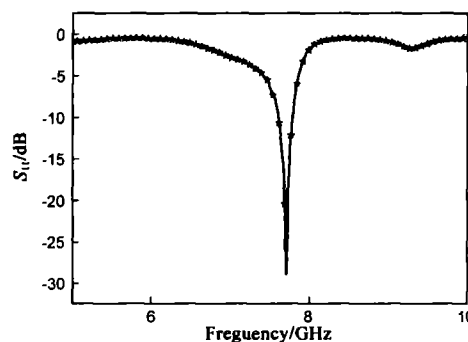
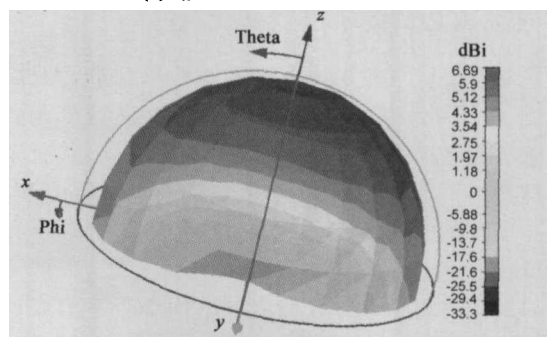


图 8 两单元天线阵列结构示意图



(a) S_{11} , 工作中心频点为 7.7GHz



(b) 工作中心频点上的 E 方向图

图 9 两单元天线阵列的仿真结果

电网络,利用左手复合传输线的非线性相位响应在小尺寸结构上实现了 360 度的相位变化。图 8 是我们所设计的两单元贴片天线串馈阵,其中新型左右手复合结构同样实现了小尺寸 360 度相位差的作用。图 9 给出了

两单元天线阵列的 S 参数及其方向图的仿真结果。

(2) 新型天线辐射单元的设计

复合结构用于辐射单元的设计主要有两种方案,一是利用左右手过渡点的零阶谐振特性设计高 Q 谐振天线,二是利用相速反相传播的特性设计行波式天线,实现前后波束扫描天线阵。

南京大学冯一军教授等人在文献[40]中报道了他们所设计的谐振天线,其天线尺寸相比于传统半波长贴片天线减少了一半。

此类谐振天线也可做成波束可扫描的行波天线阵,Itou 等人在文献[41]中报道了其行波频扫天线阵列。在 3.5GHz 时,因为左手结构的相速反相传播特性,使得波束最大指向偏向馈源端;在 4.5GHz 处为左右手过渡点,各辐射单元相位同相,最大波束指向为天线阵面的法线方向,即等效为一侧射阵;在 5.5GHz 的右手频段上,因为后一单元的相位滞后,使得最大波束指向负载,因此实现了前后向频率扫描天线阵。另外,也可以通过加载可变电容器实现由外加直流偏置源控制的相控波束扫描天线阵^[42]。

2.2.5 其他应用研究

左右手复合结构的新颖特性也可应用于其他微波器件及天线系统的设计中。如同济大学的张治文教授等人就曾利用左右手复合传输线的反相相速传播特性设计了一个高耦合度的反相耦合器^[43],浙江大学的何赛林教授等利用左右手复合结构的零阶谐振特性设计了一个新型的功率分配器,具有小尺寸低反射低插损的优点^[44]。

将左右手复合结构拓展到二维结构,还可以应用于场源的汇聚成像等功用,南京大学的冯一军教授等在文献[45]里报道了他们将二维的左右手复合结构用于负折射及透镜汇聚的分析仿真及实验结果。

3 互补开口谐振环

左手媒质一般来说由谐振结构单元进行周期排列而成。由于单元结构自身的谐振特性,谐振单元会在外加电场或磁场激励下,产生极强的反应场,从而导致传统材料达不到的较大、较小或负的介电常数或磁导率。从左手媒质的研究工作初始,人们一直在不断尝试各种形状的谐振单元^[17,18]。

最初实现介电常数和磁导率均小于零的双负材料时,为了达到负介电常数,采用的是非谐振的金属线媒质^[4]。直到 2004 年互补开口谐振环(Complimentary Split Ring Resonator, CSRR)的提出,电谐振的人工材料单元才得以实现^[16]。

3.1 互补开口谐振环的原理

对于一个开口谐振环,如图 10(a)所示,在垂直于

环的外加磁场作用下,会在环体上产生感应电流,从而产生感应磁场。由于环上电感和环间电容,该环具有一个固有的谐振频率。在谐振频率附近,会产生极强的感应磁场^[17],其方向可能与外加激励场相同或相反。通常开口谐振环附着在一块有限厚度的介质板上。

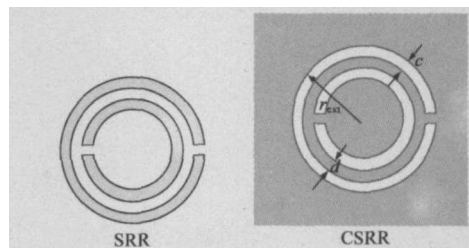


图 10 开口谐振环与互补开口谐振环^[20]

互补开口谐振环,如图 10(b)所示,是指与开口谐振环互补的结构,即在一块无限薄的理想导体金属板上刻蚀相同形状的开口谐振环。就严格的对偶来说,还要求刻蚀开口谐振环的金属板附着在一块无限厚的介质板上。根据巴俾涅原理,互补开口谐振环在垂直于金属板的外加电场激励下产生谐振的感应电场,类似于一个电偶极子,构成亚波长的电谐振结构^[17]。然而,在实际制造中,在一块附着在有限厚度介质板上的低损耗薄金属板上刻蚀开口谐振环,可以得到与同样形状的开口谐振环近似对偶的互补结构。

分析和研究开口谐振环普遍采用的是等效电路模型方法^[18,19]。在不考虑损耗的情况下,图 11(a)给出了其电路模型,将开口谐振环看作是 z 方向外加磁场感应下的 LC 谐振器。同样地,也可以用等效电路模型来描述互补开口谐振环^[19,20]。如果忽略金属板的厚度和损耗以及介质损耗,互补开口谐振环的情形与开口谐振环的情形完全对偶,如图 11(b)所示,可以用在 z 方向的外加电场激励下的等效 LC 谐振来描述。

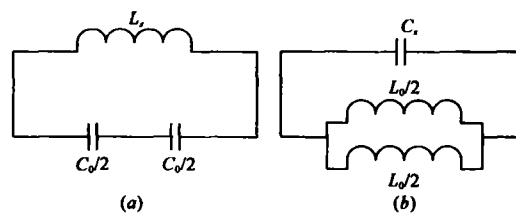


图 11 开口谐振环与互补开口谐振环的等效电路

值得一提的是,文献[46]中提出了一种用来描述互补开口谐振环的三段式等效电路。第一段和第三段电路描述互补开口谐振环的第一个谐振极点和第二个谐振极点,第二段电路描述外环和内环之间的相互作用。这种更为复杂模型更好地反映了互补开口谐振环的物理原理,并且可以获得更为准确的结果。

3.2 互补开口谐振环的应用

由于互补开口谐振环是平面结构,易于利用现有

微带技术实现,并且具有单元电尺寸小的优点,因而为设计平面微波器件提供了便利。

3.2.1 带阻微带线

在谐振频率附近,互补开口谐振环的介电常数会达到较大的值,使得传播波每经过一个谐振单元发生的相位变化达到 180 度,从而抑制信号的传播,形成阻带^[20]。通过在微带线的下地板沿着信号传播的方向刻蚀若干个开口谐振环,可以形成良好的阻带,并且在阻带之外保证微带线的通带正常工作,从而得到尺寸紧凑的具有滤波特性的带阻微带线^[16]。

3.3.2 抑制寄生通带的阶梯式阻抗滤波器

对于分布式的滤波器件,抑制寄生频带非常重要。EBG 结构可以在一定频段、一定方向上阻止信号的传递,因而可以用来抵消寄生通带。但这样做的同时往往会影响到通带性能,尤其是由于 EBG 的工作机理,其尺寸往往在工作波长附近,所以会使得器件的尺寸大大增加。在传统的阶梯式阻抗滤波器中阻抗低的一端刻蚀开口谐振环,可以很好地抑制寄生通带,提高阻带性能,并且结构小巧、工艺简便,甚至可以集成到器件的有源区域^[22]。

3.2.3 平面左手结构与带通滤波器

互补开口谐振环可以实现负介电常数,将其与可以实现负磁导率的平面结构相结合,调节它们的谐振频率,可以实现双负的左手特性^[17,22]。例如在微带结构的地板上刻蚀开口谐振环的同时,在微带上刻蚀缝隙电容,调整它们的尺寸,就可以获得左手性质的通带。这样就可以实现平面左手结构。

在此基础上,用互补开口谐振环可以实现窄带带通滤波器^[23]。具体的做法是将地板上的互补开口谐振环和微带上的缝隙电容结合,并且在输入端添加接地金属短线。该滤波器具有良好的滤波性能和紧凑的结构尺寸。

通过设计一个带通滤波单元,再将其周期级联,可以得到宽带滤波的性能^[24,25]。类似的,还可以调节各个级联单元,使其构成切比雪夫滤波器^[26],在 2.5GHz 附近可以获得 9% 的带宽比,带内抖动控制在 -0.3dB 以内。

利用地板上的互补开口谐振环加上接地的金属短线作为周期单元结构,并在单元与单元之间用 1/4 波长的微带线连接,可以实现超宽带带通滤波器^[25]。滤波器的带宽比可达 87%,带内插损 0.3dB,抖动为 1dB,回波损耗 10dB,带外性能良好。

3.2.4 窄带双工器

基于类似原理,还可以利用互补开口谐振环实现窄带双工器^[27]。其具体结构是一个 Y 形的三端口的器件,其中两个输出端接有滤波结构。该结构有两级,分

别是互补开口谐振环加缝隙电容和互补开口谐振环加金属短线电感。互补开口谐振环加缝隙电容形成较窄的左手通带,互补开口谐振环加金属短线电感可以进一步增强阻带。

通过调节结构尺寸,可以使得通带内插损小于 2dB,回波损耗大于 10dB,隔离度达到 40dB。

3.2.5 微带耦合器

通过在传统的微带耦合器地板上刻蚀谐振环,可以提高偶模的特征阻抗,获得对于传统耦合器来说较为困难的紧耦合。仿真和实验得到的背向耦合约为 3.7dB,回波损耗小于 -18dB,隔离性能优于 25dB,并且相对带宽达到 38.1%^[47]。

3.3 其他应用

互补开口谐振环是首次提出的电谐振单元。由于是亚波长的谐振结构,因此尺寸紧凑。又因为是平面结构,具有便于集成的特点,因而被用来设计带阻滤波器、低通滤波器、带通滤波器以及功分器等诸多微波器件。此后,又有学者提出了电耦合谐振环^[28]作为电谐振的空间结构(非平面的结构),使得用谐振单元实现不同介电常数的方法更为丰富和完整。互补开口谐振环除了在微波器件设计中的作用之外,还将在左手媒质的研究中具有更广泛的应用。

4 应用研究前景与展望

平面左手结构中因为引入了左手媒质的负折射特性,而表现出许多新颖的功用,以上所列举的只是在微波器件及天线设计中的部分应用。更多的创新应用还有待我们进一步的挖掘。

首先是理论上的再研究。左手媒质除了本文已提到的反相传播、非线性相位变化等之外,还有许多特异性能,例如凋落波放大等。当然,也不排除还有很多未知的特性,有待于我们进一步的研究和探索。

其次是结构上的再研究。实现具有左手特性的电路模型有很多种,而实现所需等效集总元件的分布式结构也有很多种,这就为我们寻求更优的平面左手结构提供了可能。针对不同的应用背景,提出不同形式的复合结构,这必将研究出更多的新型器件或天线。

再次是应用上的再研究。除了用以改进传统微波器件及天线的性能之外,我们完全可以从更多的角度去分析应用这些特性,研究设计出传统结构所无法实现的功能器件或天线。

总之,左手媒质的研究给科学界带来了巨大的理论创新,而平面左手结构也给工程界带来了很大的应用创新和互补。当然其中也还有太多的未知事物需要我们去探求。

5 结论

本文总结了左手结构在平面电路中的应用,着重介绍了两个基本结构,左右手复合结构和互补开口谐振环结构.这两种结构具有低损耗、大带宽、结构紧凑、工艺简便等优点,在左手平面电路中取得了广泛的应用.随着平面左手结构研究的深入,我们有理由相信,平面左手结构在未来微波电路的设计中必将拥有自己的一席之地.

参考文献:

- [1] V G Veselago. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Sov Phys Usp*, 1968, 10(4): 509 - 514.
- [2] B A Munk. *Frequency Selective Surface: Theory and Design* [M]. New York: Wiley, 2001.
- [3] C Caloz, T Itoh. *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications* [M]. New York: Wiley, 2006.
- [4] J B Pendry, A J Holden, D J Robbins, W J Stewart. Low frequency plasmons in thin-wire structures [J]. *J Phys: Condens. Matter*, 1998, 10(22): 4785 - 4809.
- [5] J B Pendry, A J Holden, D J Robbins, W J Stewart. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena [J]. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 1999, 47(11): 2075 - 1084.
- [6] J B Pendry. Negative refraction makes a perfect lens [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 85(18): 3966 - 3969.
- [7] T J Cui, X Q Lin, Q Cheng, H F Ma, X M Yang. Experiments on evanescent-wave amplification and transmission using LHM metamaterial structures [J]. *Physical Review B*, 2006, 73: 245119.
- [8] R Liu, B Zhao, X Q Lin, Q Cheng, T J Cui. Evanescent-wave amplification studied using a bilayer periodic circuit structure and its effective medium model [J]. *Physical Review B*, 2007, 75: 125118.
- [9] Popa B -I, S A Cummer. Direct measurement of evanescent wave enhancement inside passive metamaterials [J]. *Physical Review E*, 2006, 73: 016617.
- [10] R A Shelby, D R Smith, S Schultz. Experimental Verification of a Negative Index of Refraction [M]. *Science*, 2001, 292(5514): 77 - 79.
- [11] M Notomi. Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals: refraction-like behavior in the vicinity of the photonic band gap [J]. *Phys Rev B*, 2000, 62(16): 10696 - 10705.
- [12] S T Chui, L B Hu. Theoretical investigation on the possibility of preparing left-Handed materials in metallic magnetic granular composites [J]. *Phys Rev B*, 2002, 65: 144407.
- [13] J B Pendry. A Chiral Route to Negative Refraction [M]. *Science*, 2004, 306(19): 1353 - 1355.
- [14] A Lai, C Caloz, T Itoh. *Transmission Line Based Metamaterials and Their Microwave Applications* [M]. *Microwave Mag*, 2004, 5(3): 34 - 50.
- [15] G V Eleftheriades, A K Iyer, P C Kremer. Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines [J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 2002, 50(12): 2702 - 2712.
- [16] X Q Lin, T J Cui, H F Ma, D Bao. Design and analysis of super-wide bandpass filters using a novel compact meta-structure [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, 2007, 55(4): 747 - 753.
- [17] Hongsheng Chen, Lixin Ran, Jiangtao Huangfu, Xianmin Zhang, Kangsheng Chen. Left-handed materials composed of only S-shaped resonators [J]. *Phys Rev E*, 2004, 70(5): Art. No. 057605.
- [18] L Ran, J Huangfu, H Chen, X Zhang, K Cheng. Experimental study on several left-handed metamaterials [A]. *Progress In Electromagnetics Research [C]*. PIER 51, 2005. 249 - 279.
- [19] Francisco Falcone, Txema Lopetegui, Juan D. Baena, Ricardo Marqués, Ferran Martín, Mario Sorolla. Effective negative- ϵ stopband microstrip lines based on complementary split ring resonators [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2004, 14(6): 281 - 282.
- [20] F Falcone, T Lopetegui; et al. Babinet principle applied to the design of metasurfaces and metamaterials [J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 93: 197401.
- [21] B Sauvicac, C R Simovski, S A Tretyakov. Double split-ring resonators: analytical modeling and numerical simulations [J]. *Electromagnetics*, 2004, 24(5): 317 - 338.
- [22] J D Baena, J Bonache, F Martín, R M Sillero. Equivalent-circuit models for split-ring resonators and complementary split-ring resonators coupled to planar transmission lines [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, 53(4): 1451 - 1461.
- [23] Ruopeng Liu, Tie Jun Cui, Bo Zhao, Xian Qi Lin, Hui Feng Ma, Da Huang, D R Smith. Resonant crystal bandgap metamaterials in microwave regime and their exotic amplification of evanescent waves [J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 90, 091912.
- [24] M Gil, J Bonache, I Gil. On the transmission properties of left-handed microstrip lines implemented by complementary split rings resonators [J]. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 2006, 19(2): 87 - 103.
- [25] J García-García, J Bonache, F Falcone, J D Baena, F Martín, I Gil, T Lopetegui, M A G Laso, A Marcotegui, R Marqués, M Sorolla. Stepped-impedance lowpass filters with spurious pass-band suppression [J]. *Electronic Letters*, 2004, 40(14): 881 -

- 883.
- [26] J Bonache, F Martín, F Falcone, J D Baena, et al. Application of complementary split-ring resonators to the design of compact narrow band-pass structures in microstrip technology[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2005, 16(5): 508 - 512.
- [27] J Bonache, F Martín, I Gil, J Garcia-Garcia, et al. Microstrip bandpass filters with wide bandwidth and compact dimensions, *Microwave and Optical Technology Letters*, 2005, 46(4): 343 - 346.
- [28] J Bonache, I Gil, J García-García, F Martín. Novel microstrip bandpass filters based on complementary split-ring resonators [J]. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, 2006, 54(1): 265 - 271.
- [29] J Bonache, F Martín, García-García J, I Gil, et al. Ultra wide band pass filters (UWBPF) based on complementary split rings resonators[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2005, 46(3): 283 - 286.
- [30] J Bonache, Gil I, Garcia-Garcia J, Martin F. Complementary split ring resonators for microstrip diplexer design [J]. *Electronics Letters*, 2005, 41(14): 810 - 811.
- [31] D Schurig, J J Mock, D R Smith. Electric-field-coupled resonators for negative permittivity metamaterials[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 88(4): 041109.
- [32] Z X Zhang, S J Xu. A novel balun structure with a composite right-left-handed transmission line[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2005, 45, (5): 422 - 424.
- [33] S L He, X Hu, J L He, J S Li, Y Z Zou. Abnormal guiding and filtering properties for some composite structures of right/left-handed metamaterials [J]. *Proc Asia-Pacific Microwave Conference, Suzhou, China, 2005*, 1: 401 - 404.
- [34] A Sanada, C Caloz, T Itoh. Zeroth order resonance in composite right/left-handed transmission line resonators[A]. *Proc Asia-Pacific Microwave Conf [C]*. Seoul, Korea, 2003, 3: 1588 - 1592.
- [35] C Li, F Li. Novel resonator based on composite right/left-handed transmission lines[J]. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 2006, 7(1): 85 - 88.
- [36] X Q Lin, Q Cheng, R P Liu, D Bao, T J Cui. A compact resonator filters and power dividers designed with simplified meta-structures[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, submitted.
- [37] I H Lin, M DeVincentis, C Caloz, T Itoh. Arbitrary dual-band components using composite right/left-handed transmission lines[J]. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, 2004, 52(4): 1142 - 1149.
- [38] X Q Lin, R P Liu, X M Yang, J X Chen, X X Yin, Q Cheng, T J Cui. Arbitrarily dual-band components using simplified structures of conventional CRLH TLs [J]. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, 2006, 54(7): 2902 - 2908.
- [39] Q Zhu, Z X Zhang, S J Xu, W W Ding. Millimeter wave microstrip array design with CRLH-TL as feeding line [J]. *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2004, 3: 3413 - 3416.
- [40] W J Han, J M Zhao, Y J Feng. A novel microstrip ring antenna using a simplified left-handed transmission line structure [J]. *中国科技论文在线*, http://www.paper.edu.cn/downloadpaper.php?serial_number=200610-410&type=1
- [41] S Lim, C Caloz, T Itoh. A reflecto-directive system using a composite right/left-handed (CRLH) leaky-wave antenna and heterodyne mixing [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2004, 14(4): 183 - 185.
- [42] S Lim, C Caloz, T Itoh. Constant-frequency voltage-scanned reflecto-directive system [A]. *Antennas and Propagation Society International Symposium [C]*. 2004, 2: 1427 - 1430.
- [43] Y Z Wang, Y Wen Zhang, L He, F Q Liu, H Q LI, H Cheng. Discussion on coupling mechanism of asymmetric CRLH/RH TL coupler [J]. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 2006, 7(1): 95 - 98.
- [44] J S Li, Y Z Zou, S L He. A power divider based on a new kind of composite right/left-handed transmission line (CRLH TL) unit [J]. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 2006, 7(1): 1 - 4.
- [45] X H Teng, J M Zhao, T Jiang, Y J Feng. Negative refraction and partial focusing in anisotropic metamaterial realized by loaded transmission line network [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2006, 39: 213 - 219.
- [46] Hung-Wei Wu, Min-Hang Weng, Yan-Kuin Su, Ru-Yuan Yang, Cheng-Yuan Hung. Accurate Equivalent Circuit for Etched Resonator with Effective Negative Permittivity [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2007, 49(1): 231 - 234.
- [47] Kai-yu Liu, Chao Li, Fang Li. A new type of microstrip coupler with complementary split-ring resonator [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2007, 49(7): 1613 - 1615.

作者简介:



程 强 男, 1979 年 10 月出生于安徽, 2004 年毕业于南京航空航天大学, 现于东南大学毫米波国家重点实验室攻读博士学位. 研究方向包括新型人工电磁材料、计算电磁学.
E-mail: qiangcheng@emfield.org



林先其 男,1980年9月出生于浙江,2003年毕业于电子科技大学电子工程学院,现于东南大学毫米波国家重点实验室攻读博士学位.研究方向包括新型人工电磁材料、微波电路及天线、计算电磁学. E-mail: xqlin@emfield.org



姚 瑾 女,电磁场与微波技术专业博士生,2003年毕业于东南大学吴建雄学院,获得通信专业学士学位,2005年3月提前攻读博士学位,并获得硕士学位.研究方向包括新型结构人工电磁材料以及人工电磁材料的设计与应用. E-mail: yaoqin@emfield.org



刘若朋 男,1983年9月出生于陕西,2006年毕业于浙江大学,现于美国杜克大学电子与计算机科学学院攻读博士学位.研究方向包括新型人工电磁材料、计算电磁学.

E-mail: ruopeng.liu@duke.edu



崔铁军 男,1965生于河北,1993年获西安电子科技大学博士学位.现为东南大学无线电工程系教授、博士生导师、教育部“长江学者奖励计划”特聘教授,东南大学毫米波国家重点实验室、计算电磁学中心副主任及目标特性与识别研究所所长,国际著名刊物 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 的副主编.