

新型小型化的平面左手介质微带线 及其后向波特特性验证*

武明峰¹⁾ 孟繁义¹⁾ 傅佳辉¹⁾ 吴 群^{1)†} 吴 健^{1)‡}

1) 哈尔滨工业大学电子与信息技术研究院, 哈尔滨 150001)

2) 电波环境特性及模化技术国防科技重点实验室, 北京 102206)

(2007 年 3 月 31 日收到, 2007 年 5 月 25 日收到修改稿)

基于裂缝谐振环结构的降频技术, 首先设计了一种电尺寸较小的左手介质微带线单元, 并根据电磁波在微带线上的传输和反射数据, 分别计算了左手介质的有效介电常数和有效磁导率. 之后针对左手介质八元阵列进行三维电磁仿真实验, 结果表明该八元阵列在左手介质频段上具有独特的后向波效应, 从而证实了该左手介质频段的存在. 与传统的左手介质微带单元相比, 阐述的左手介质单元的电尺寸减小了 60%, 而且结构简单, 便于加工, 适用于平面电路器件的小型化等应用研究工作.

关键词: 左手介质, 小型化, 双负特性, 后向波特特性

PACC: 4110H

1. 引 言

左手介质同时具有负介电常数 ϵ 和负磁导率 μ , 导致在该介质中传播的电磁波的电场 E 、磁场 H 以及波矢 k 三者构成左手系, 故而得名. 2000 年 Smith 利用裂缝谐振环 (split ring resonators, SRR) 和细导线阵列在工程上首次实现了左手介质^[1], 但该左手介质结构存在电尺寸较大、带宽较窄、带内损耗较大以及加工繁琐等缺点, 无法达到工程实用的要求. 针对上述问题, 多种改良型左手介质被设计出来, 并部分地解决了上述缺陷. 譬如改良型 SRR 左手介质的带内损耗仅 0.3 dB^[2]; 双 S 形的左手介质相对带宽达到 46%^[3]; 而 CLSs (capacitively loaded strips) / CLLs (capacitively loaded loops) 左手介质具有便于微带加工的优点^[4]. 然而上述左手介质都存在着电尺寸过大的问题. 例如改良型 SRR、双 S 形以及 CLSs / CLLs 左手介质在中心频率处的电尺寸分别为 0.16, 0.12 和 0.18 波长, 都超过了有效媒质理论 0.1 波长的前提要求, 因此不能应用有效媒质理论提取它们的电磁参数, 否则将导致提取误差过大等问题.

本文针对该问题展开研究, 结合 SRR 结构的降频技术和微带缺陷接地结构 (defected ground structures, DGS) 易于调节、便于加工的优点, 利用三维电磁场仿真软件 CST microwave studio (MWS) 设计出了一种电尺寸仅为 0.04 波长的小型化平面左手介质微带线. 计算结果表明, 在 2.00—2.35 GHz 频段内, 该微带线单元的有效介电常数和有效磁导率的实部同时为负值且虚部接近于零. 之后通过绘制左手介质的八单元阵列的磁场分布随相位的变化情况, 演示了其向后波效应. 仿真和计算结果都证实了该小型化左手介质微带线具有良好的传输特性、双负特性和后向波特特性.

2. 小型化左手介质微带线的设计

根据 Smith 的设计方法^[1], 本文的设计思路如下: 首先设计一个 DGS 结构产生负介电常数, 因为 DGS 是微带平面结构, 具有便于激发、便于加工以及带宽较宽等优点^[5]. 然后利用 SRR 结构的降频技术, 设计一个谐振频率与 DGS 接近的小型化 SRR 结构, 从而获得负磁导率. 最后通过调整 DGS 和 SRR

* 国家自然科学基金 (批准号 60571026) 和电波环境特性及模化技术国防科技重点实验室项目 (批准号 514860303) 资助的课题.

† 通讯联系人, E-mail: qwu@hit.edu.cn

的结构参数以及基板的介电常数,使负介电常数频段与负磁导率频段尽可能重叠,获得小型化左手介质单元。

根据上述思路,本文的小型化左手介质如图 1(a)所示。在介电常数 ϵ_{r1} 、边长为 a 、高为 H_2 的第一层介质板的正中央,两个小型化 SRR 结构对称地放置在有一条宽为 W 的微带线两边。该小型化 SRR 的结构如图 1(b)所示,其边长为 b ,线宽为 c ,内环与外环间的缝隙为 d ,开口宽度 0.3 mm。当准 TEM 电磁波沿微带线传播时,环绕着微带线的磁场将穿透两边的 SRR 结构,并激发 SRR 结构产生环行电流,进而产生负磁导率效应。

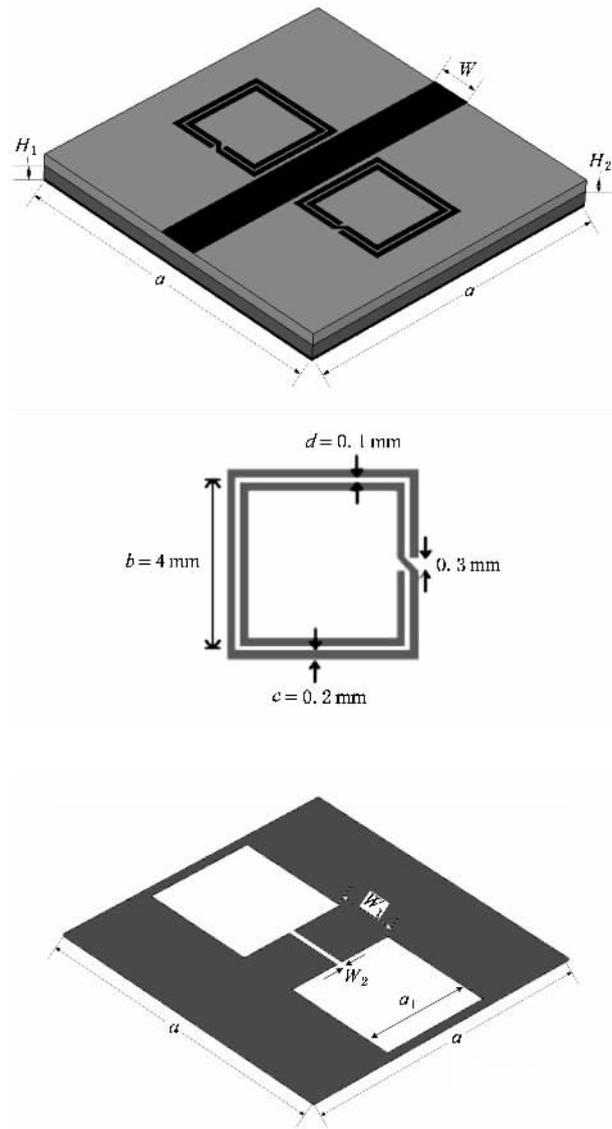


图 1 小型化左手介质微带线的结构示意图 (a)左手介质微带线单元的结构示意图 (b)微带线两边的小型化 SRR 的结构示意图 (c)微带线底部的 DGS 结构示意图

第一层介质板的正下方放置的是相对介电常数为 ϵ_{r2} 、边长为 a 、高为 H_1 的第二层介质板,其底部蚀刻有 DGS 结构,如图 1(c)所示。DGS 结构由两个边长为 a_1 的正方形孔组成,且由正中央的宽为 W_2 的缝隙相连通。方孔的位置与小型化 SRR 相对应。当准 TEM 波沿微带线传播时,磁场穿透方孔并在其四周产生感应电流,形成并联电感效应,即负介电常数效应。

在上述结构中,小型化 SRR 结构的内环与外环的配置方式是决定左手介质小型化的关键因素之一。传统 SRR 结构和小型化 SRR 结构分别如图 2(a)和图 2(b)所示。可以发现传统 SRR 结构的内环与外环上各有一个缺口,且相对放置,导致外环电流与内环电流只能通过环间电容耦合。假设内环与外环之间的总耦合电容为 C_0 ,根据等效电路分析模型可知^[6],传统 SRR 结构等效于两个串联的 $C_0/2$ 电容,即为 $C_0/4$ 。小型化 SRR 的内环与外环之间在开口处直接相连,在相同的结构参数情况下,其等效电容为 C_0 ^[6]。由 $\omega_0^2 = 1/LC$ 可知,小型化 SRR 的谐振频率约为传统 SRR 的一半,其电尺寸减小了约 50%。

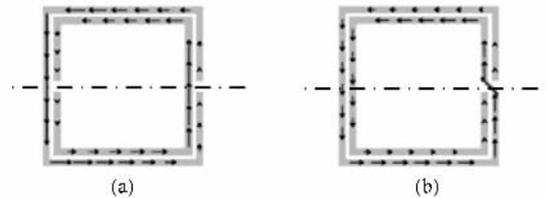


图 2 传统 SRR 结构(a)与小型化 SRR 结构(b)及其电流分布示意图

设 $\epsilon_{r1} = 2.43$, $\epsilon_{r2} = 10.2$, $a = 14.00$ mm, $a_1 = 5.00$ mm, $b = 4.00$ mm, $c = 0.20$ mm, $d = 0.10$ mm, $H_1 = 0.56$ mm, $H_2 = 0.49$ mm, $W = 1.53$ mm, $W_1 = 2.40$ mm, $W_2 = 0.06$ mm。在该结构参数下,利用 CST MWS 仿真得到微带线二端口的 S 参数的幅度曲线如图 3 所示。图 3 中实线代表左手介质微带线单元的 S_{21} 曲线,虚线代表只加载小型化 SRR 结构的 S_{21} 曲线,点线代表只加载 DGS 结构的 S_{21} 曲线。由此可知,小型化 SRR 结构的负磁导率效应的谐振频率在 2.24 GHz 附近,移除小型化 SRR 结构后,DGS 结构在 2.20 GHz 附近具有宽频带的阻带。将 DGS 和小型化 SRR 结构结合在一起,它们在 2.20 GHz 附近的共同的阻带变成了通带,且由于 DGS 与小型化 SRR 结构之间电场耦合的影响,通带的中心频率下降至

2.15 GHz 附近. 因此, 可以确定 2.15 GHz 附近存在介电常数和磁导率同时为负值的左手介质频段.

左手介质微带线的有效介电常数和有效磁导率需要利用 NRW 方法从上述的 S 参数中提取^[4]. 图 4、图 5 分别给出提取的有效介电常数和有效磁导率的变化曲线. 可以观察到有效介电常数曲线在 1.78 GHz 和 2.38 GHz 存在谐振, 并因此产生了两个负介电常数频段; 而有效磁导率曲线在 1.78 GHz 存在谐振, 并且在谐振频率右侧产生了负磁导率频段. 在小于 1.78 GHz 的频段上, 只有介电常数实部为负值, 因此电磁波被迅速衰减, 产生了 S_{21} 曲线的第一个阻带; 在大于 2.38 GHz 的频段上, 只有磁导率的实部为负值, 产生了 S_{21} 曲线的第二个阻带. 在两个谐振频率之间的频段上, 即 2.00—2.38 GHz, 介电常数实部和磁导率实部同时为负值且虚部接近于零. 因此, 该频段具有双负特性, 是左手介质频段.

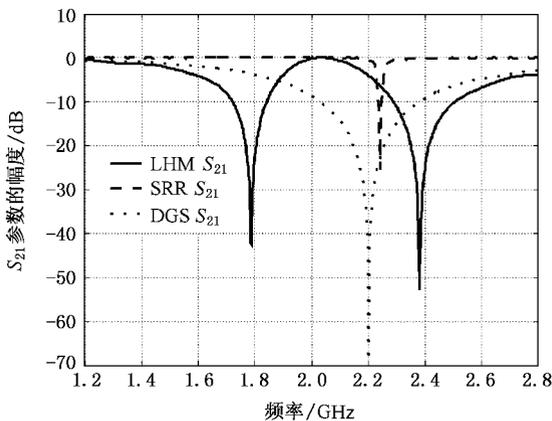


图 3 微带线两端口的 S 参数的幅度曲线

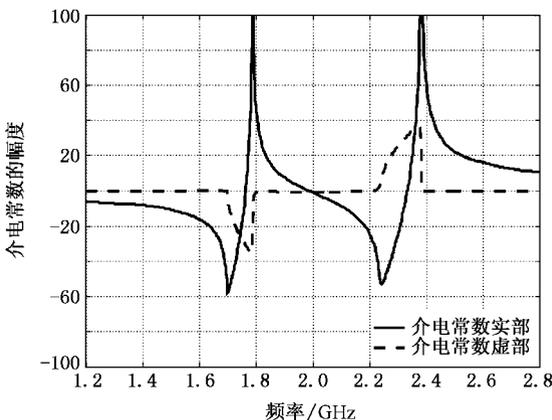


图 4 有效介电常数随频率的变化曲线

进一步计算可以得到, 该左手介质微带线的相对带宽为 16.1%、中心频率处的电尺寸为 0.04 波

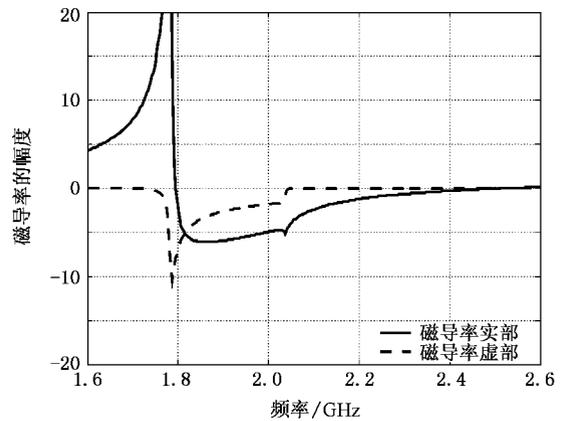


图 5 有效介电常数随频率的变化曲线

长. 表 1 给出了几种主要左手介质的相对带宽和电尺寸的比较. 可见该左手介质微带线的相对带宽较大, 而且电尺寸远小于 0.1 波长, 达到了有效媒质理论的前提要求.

表 1 几种主要的左手介质结构相对带宽、电尺寸比较

左手介质结构	相对带宽	中心频率的电尺寸
SRR/Rod ^[2]	12.2%	0.16
双 S 结构 ^[3]	46%	0.12
CLSs/SRR ^[4]	3.2%	0.18
小型化 SRR/DCS	16.1%	0.04

3. 左手介质的后向波特性验证

为了进一步验证左手介质频段, 图 6 绘制了左手介质的八单元阵列的仿真结构及其 2.23 GHz 磁场的后向波效应. 图中八个左手介质单元依次排列, 间距 $\Delta L = 2$ mm. 阵列两边是普通的介质板. 电磁波由端口 1 入射, 沿 $+y$ 向端口 2 传播. 图中 $y-z$ 截面的 2.23 GHz 磁场的相位从 0° 开始, 以 22.5° 为步长, 依次增加至 117.5° . 可以发现左手介质阵列中的磁场分布朝端口 1 移动, 而左手介质阵列上方的普通介质中的磁场向端口 2 移动. 这说明当电磁波的能量从端口 1 向端口 2 传播时, 普通介质中的相速与能量传播方向一致, 但是左手介质微带线上的相速却与能量传播方向相反, 这正是左手介质独特的后向波效应.

从图 6 中还可以观察到后向波的相速明显小于前向波的相速. 设相速之比为 K , 图中 $\Delta L_2/\Delta L_1 = 10/2 = 5$ 则

$$K = v_{\text{前}}/v_{\text{后}} = (\Delta L_2/5)/(\Delta L_1/6) = 6.$$

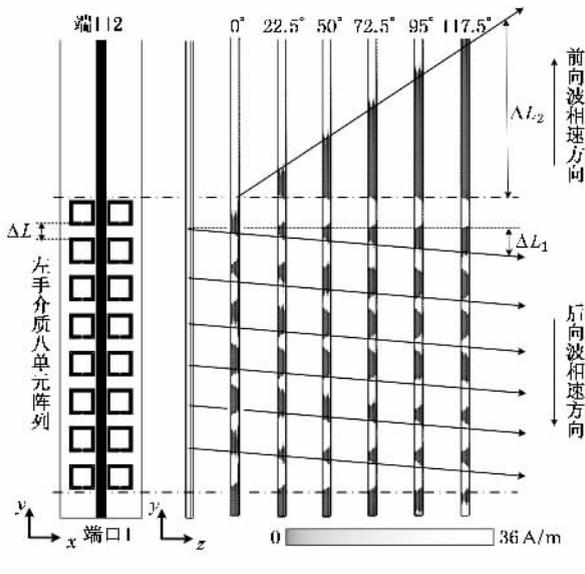


图6 左手介质微带线阵列的后向波特性示意图

而 K 还可以根据有效电磁参数推算得到,公式如下:

$$v_p = 1 / (\epsilon_0 \epsilon_{\text{eff}} \mu_0 \mu_{\text{eff}})^{1/2},$$

式中 ϵ_{eff} 和 μ_{eff} 分别代表有效介电常数和有效磁导率.从图 4、5 可知 2.23 GHz 时左手介质的有效介电常数和有效磁导率分别为 -54 和 -1.5,因此

$$K = v_{\text{前}} / v_{\text{后}} = (\epsilon_{\text{eff左}} \cdot \mu_{\text{eff左}} / \epsilon_{\text{eff右}} \cdot \mu_{\text{eff右}})^{1/2} = 5.82.$$

上述结果表明,本文提取的电磁参数与仿真实验之间的误差较小,印证了该左手介质单元具有较小的电尺寸.

4. 结 论

根据预定目标,本文设计了一种工作于 2.00—2.35 GHz、相对带宽达到 16.10%、中心频率的电尺寸仅为 0.04 波长的左手介质微带线.文中分别利用传输特性法、NRW 参数提取法和后向波演示法,证实左手介质频段的存在.该左手介质微带线具有电尺寸较小、相对频带较宽、容易加工和成本低廉等特点,符合平面微波电路与器件的应用需求.

- [1] Smith D R, Kroll N 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2933
 [2] Lagarkov A N, Semenenko V N, Kisel V N, Chistyayev V A 2003 *J. Mag. Mag. Mater.* **258-259** 161
 [3] Chen H, Ran L, Huangfu J et al 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 1
 [4] Ziolkowski R W 2003 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **51** 1516

- [5] Wu M F, Meng F Y, Wu Q, Wu J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5790 (in Chinese) [武明峰, 孟繁义, 吴群, 吴健 2006 物理学报 **55** 5790]
 [6] Baena J D, Marques R, Medina F 2004 *Phys. Rev. B* **69** 14402



Novel miniaturized planar left-handed metamaterial transmission lines verified by the backward wave property^{*}

Wu Ming-Feng¹⁾ Meng Fan-Yi¹⁾ Fu Jia-Hui¹⁾ Wu Qun^{1)†} Wu Jian¹⁾²⁾

1) *School of Electronics and Information Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*

2) *Defense Key Laboratory of Electromagnetic Environment and Modeling Techniques, Beijing 102206, China*

(Received 31 March 2007 ; revised manuscript received 25 May 2007)

Abstract

Based on the technique of reducing working frequency of split ring resonators (SRR), this paper presents a miniaturized left-handed metamaterial transmission line unit, and retrieves the effective permittivity and permeability parameters from the transmission and reflection data. To verify the presence of the left-handed frequency band, 3D numerical simulation is conducted to an array of left-handed metamaterials including eight units, which demonstrates that the left-handed metamaterial microstrip line can support unique backward wave property very well. Compared with conventional left-handed microstrip lines, this structure has been reduced by 60% in electrical sizes, and would be more convenient for fabrication in applications as miniaturized planar circuit components.

Keywords : left-handed metamaterials, miniaturization, double negative property, backward wave property

PACC : 4110H

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60571026) and the Defense Key Laboratory of Electromagnetic Environment and Modeling Techniques (Grant No. 514860303).

[†] Corresponding author. E-mail : qwu@hit.edu.cn