

# 基于 DGS 和双层 SRRs 结构的左手介质微带线的设计\*

武明峰<sup>1)†</sup> 孟繁义<sup>1)</sup> 吴 群<sup>1)</sup> 吴 健<sup>1)‡</sup>

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家重点实验室, 北京 102206)

(2006 年 2 月 21 日收到, 2006 年 4 月 13 日收到修改稿)

基于 DGS 结构和双层 SRRs 结构, 提出了一种工作于双频段的微带线结构的新型左手介质, 它除了频带宽和损耗小外, 还具有体积小、结构简单便于加工的优点. 基于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微带线的有效介电常数和有效磁导率, 并进一步得到了电波在微带线上传播时的波数随频率的变化曲线, 结果表明文中讨论的左手介质微带线确实在较宽的频段上表现出后向波特性, 从而证实了左手介质的存在.

关键词: 左手介质, 宽频带, 电小单元, 后向波效应

PACC: 3220D, 4110H

## 1. 引 言

左手介质(left-handed medium, LHM)又名负折射媒质(negative index medium, NIM)或异向介质(metamaterial), 是 20 世纪 90 年代末期出现的一种新型周期结构(periodic structure)的人工电磁媒质, 它同时具有负值的介电常数和负值的磁导率, 导致在该媒质中传播的电磁波的电场  $E$ , 磁场  $H$  以及波矢量  $k$  三者构成左手系, 而不是遵循常规媒质的右手法则, 故而得名. 左手介质的概念雏形需要追溯到 20 世纪 60 年代, Veselago 从理论上对它进行了研究, 并且预言了左手介质具有一系列超常规的电磁特性, 包括左手特性, 负折射特性, 逆多普勒效应(Doppler effect), 逆切伦科夫辐射效应(Cerenkov effect)等<sup>[1]</sup>. 由于自然界中并没有发现负折射媒质, 所以负折射媒质理论在此后近 30 年的时间里缺乏实验证实一直停留在理论的层面. 2000 年 Smith 基于 Pendry 的研究结果通过将细导线阵列与 SRRs(split rings resonators)阵列合理布局, 历史上第一次制造出了左手介质, 这一突破性成果使得该领域的研究进入了实质性阶段<sup>[2]</sup>. 然而上述的左手介质因其结构复杂、带宽窄、损耗大以及体积大的问题使其距离实际应用有较大的差距.

基于这种状况, 很多学者在新型左手介质设计方面展开研究<sup>[3-16]</sup>. 到目前为止已经有多种新型结构的左手介质被设计、制造出来, 其中包括传输线结构左手介质<sup>[3]</sup>, 结构单元为  $\Omega$  形的左手介质<sup>[4]</sup>, 开口方环结构的左手介质<sup>[5, 6]</sup>, 结构单元为 S 形、双 S 形的左手介质<sup>[7]</sup>, 结构单元为螺旋形的左手介质<sup>[8]</sup>, 由 CLSs(capacitively loaded strips)和 CLLs(capacitively loaded loops)相交替构成的左手介质<sup>[9]</sup>等. 虽然负折射媒质的新型结构层出不穷, 但是它们可以归纳为两大类: 一类是基于 Smith 的 SRR 结构的改进或者衍生结构, 另一类是基于左手传输线的改进或衍生结构. 早期的 SRR 结构的左手介质的相对带宽很窄(约 0.5%), 损耗很大, 高达 30 dB 以上. 经过持续的改良和衍生之后性能已经有了很大的改善. 例如由陈抗生等在 2005 年提出的结构单元为双 S 形的左手介质, 其工作频带从 10—16 GHz, 相对带宽达到 46%<sup>[6]</sup>; Smith 等人在 2004 年通过优化 SRRs 和细导线尺寸, 设计出了单元损耗小于 0.3 dB 的低损耗左手介质<sup>[10]</sup>. 然而遗憾的是这些结构单元在应用方面仍然存在较大的限制, 因为为了能够激发出单元结构的负介电常数和负磁导率, 这些单元结构对电场和磁场的方向都有严格的要求, 导致这些左手介质单元只有在腔体结构的应用场合容易获得激发条件, 而对于微波或毫米波平面电路器

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

† E-mail: wumingfeng2005@yahoo.com.cn

件的应用场合则不如左手传输线方便,而且这种单元结构的电尺寸比较大,有的甚至接近 0.2 波长。传统的左手传输线结构的左手介质和 SRR 结构的左手介质在本质上是一致的。因为在传输线结构的等效电路中,通常能够得到串联的等效电感和并联的等效电容,它们其实代表了传输线的有效磁导率和有效介电常数,因此只要能用传输线实现负值的等效电感和负值的等效电容即可,而负的电感本质上就是电容,负的电容本质上就是电感,因此只要能在传输线的等效电路中实现串联的电容和并联的电感就可以实现左手传输线。但是要获得串联的等效电容和并联的等效电感并不容易,目前有些左手传输线结构为了获得它们甚至借助 LTCC 等昂贵的技术手段<sup>[1]</sup>。

综上,对左手介质传输线设计而言,不但要求其带宽宽、损耗小,更重要的是,还要求其单元体积小、加工容易、成本低廉,而上文所述的两种技术思路的左手介质几乎都无法同时满足这些要求,无疑会阻碍其在微波毫米波电路器件上的进一步实际应用。

本文针对上述问题展开研究,利用三维电磁场仿真软件设计出了一种相对带宽达到 46.77%、在中心频率上单元电尺寸为 0.071(现有的左手介质的单元电尺寸在 0.2—0.067 之间)的宽频带小单元微带结构的左手介质,其单元结构紧凑,便于加工且价格低廉,因此可以预示该左手介质具有广泛的应用前景。本研究中,对由上述左手介质单元构成的微带线的电波传播特性进行了数值仿真,并结合 NRW(Nicolson-Ross-Weir)方法提取出了该左手介质微带线的有效介电常数和有效磁导率,计算结果表明:在 4.90—6.51GHz 和 7.03—8.57GHz 两个频段内,有效介电常数和有效磁导率的实部同时为负值,显示了左手介质的双负特性。同时,为进一步验证上述左手介质微带线的“后向波特性”,本研究依据文献[9,10]中提出的“波数观察法”绘制了电磁波在左手介质微带线中传播时的波数-频率曲线,计算结果表明该左手介质微带线在双负频段具有良好的后向波传播特性。

## 2. 宽频带电小单元左手介质微带线的设计

依据 Smith 的 SRR 结构左手介质的设计方法和

有效媒质理论,只要能够分别设计出产生负介电常数和负磁导率的结构单元,之后通过合理布局,使得负介电常数和负磁导率的频段尽量重合,便能设计出同时具有负介电常数和负磁导率的左手介质。

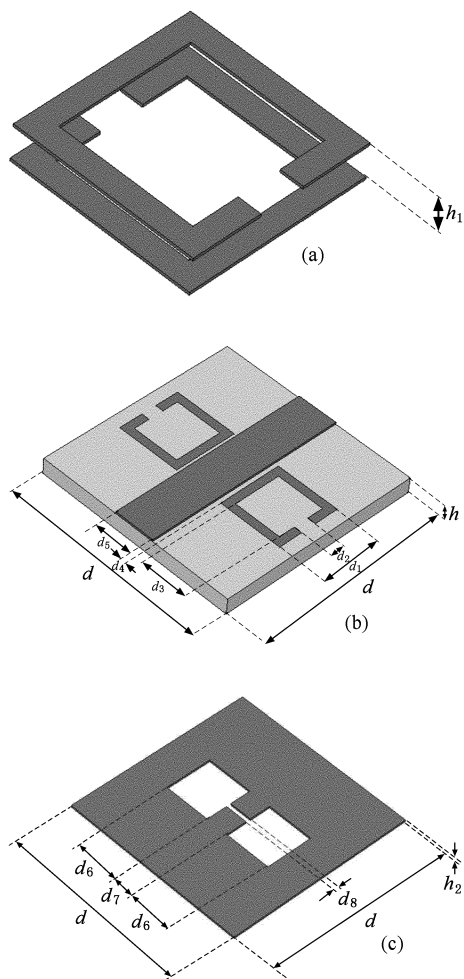


图 1 带有 DGS 结构和 SRR 结构的左手介质微带线的结构示意图 (a)具有双层结构的 SRR 单元的结构示意图 (b)微带线结构的示意图 (c)DGS 结构示意图

本文设计的微带结构的左手介质如图 1(b)所示,在边长为  $d$  高为  $h$  的正方形介质板(相对介电常数为  $\epsilon_r$ )的正中央,有一条宽为  $d_5$  的微带线,在微带线两边对称地放置了两个双层结构的开口谐振环(split rings resonators, SRR)。该双层结构的 SRR 如图 1(a)所示,它由两个相同尺寸的正方形开口环组成,并开口相对地放置。环的外边长为  $d_1$ ,内边长为  $d_3$ ,开口为  $d_2$ ,两层之间的间距为  $h_1$ 。介质板下方放置的是一个边长也为  $d$  金属板,如图 1(c)所示,在金属板的中间与 SRR 相对应的位置有两个缺口,它们都是边长为  $d_6$  的正方形,通过正中央的宽

为  $d_8$  的缝隙相连通,金属板的厚度为  $h_2$ . 这种金属结构也称为非理想接地结构(defected ground structures, DGS),是光子带隙结构(PBG)的一种发展形式.

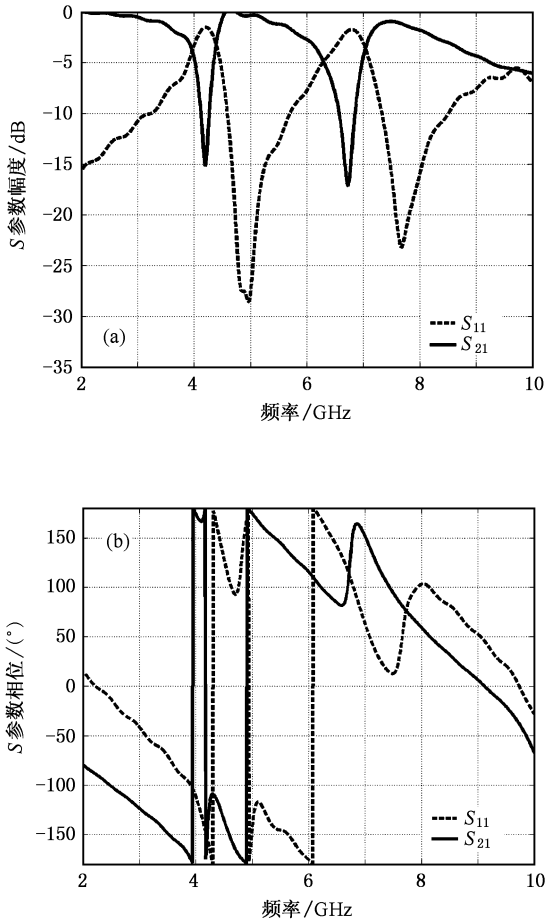


图2 左手介质微带线二端口的  $S$  参数幅度、相位曲线 (a)  $S$  参数幅度变化曲线 (b)  $S$  参数相位变化曲线

设  $\epsilon_r = 10.2$ ,  $d = 10$  mm,  $d_1 = 3.15$  mm,  $d_2 = 0.75$  mm,  $d_3 = 2.35$  mm,  $d_4 = 0.2$  mm,  $d_5 = 2$  mm,  $d_6 = 2.5$  mm,  $d_7 = 1.2$  mm,  $d_8 = 0.25$  mm,  $h = 0.787$  mm,  $h_1 = 0.535$  mm,  $h_2 = 0.1$  mm, 在这样的结构参数下,通过计算机仿真得到微带线二端口的  $S$  参数幅度和相位随频率的变化曲线如图2所示. 从图中可以定性地看出,在4GHz到10GHz的频段中间,交错着两个通带(4.4—6.3GHz和7.0—9.7GHz)和两个阻带(约3.9—4.4GHz和6.3—7.0GHz). 当然,仅仅通过  $S$  参数还无法确定左手介质存在的频段,下面将通过分别观察左手介质的双负特性(即介电常数和磁导率同时为负数的频段)和后向波特性和来确定左手介质存在的频率区域.

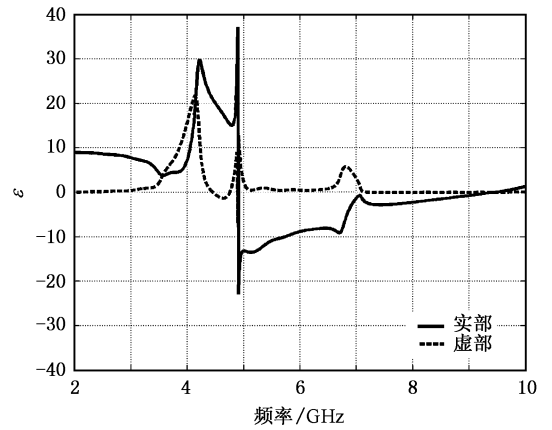


图3 有效介电常数随频率的变化曲线

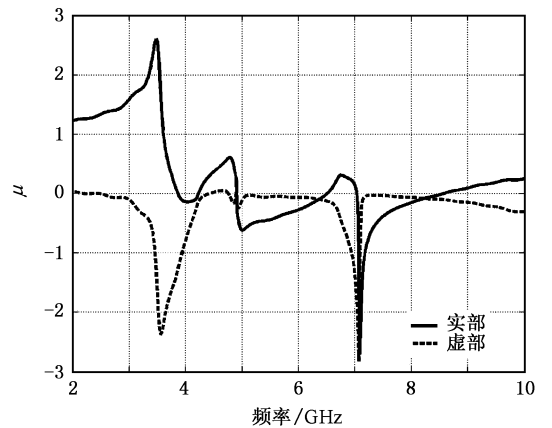


图4 有效介电常数随频率的变化曲线

### 3. 左手介质微带线的参数提取及电磁特性

左手介质微带线的有效介电常数和有效磁导率以及电磁波在其中传播时的波数需要利用 NRW 方法从上述的  $S$  参数中提取<sup>[9]</sup>.

图3、图4分别给出了有效介电常数和有效磁导率的频率变化曲线,可以看到有效介电常数为负值的频段为4.90—9.41GHz,有效磁导率为负值的频段有两个,分别是4.89—6.51GHz和7.03—8.57GHz. 所以可以看出,在4.90—6.51GHz和7.03—8.57GHz的两个频段内,有效介电常数和磁导率的实部同时为负值,虚部近似为零,这正是左手介质特有的电磁特性——双负特性.

图5绘出了左手介质微带线上传播的电磁波的波数随频率的变化曲线,从图中可以看到,在有效介

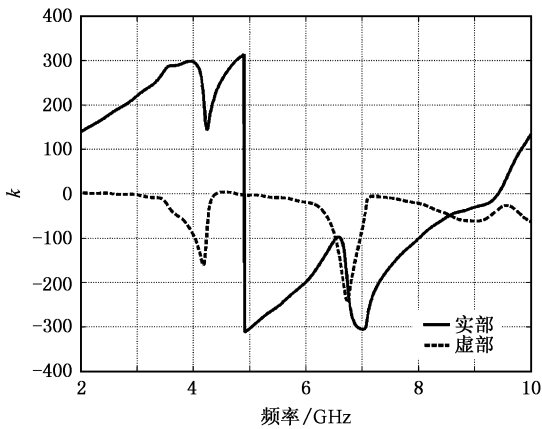


图5 左手介质微带线上的波数随频率的变化曲线

电常数和有效磁导率同时为负值的两个频段 4.90—6.51GHz 和 7.03—8.57GHz 内,波数的实部为负值,虚部几乎为零,这正显现出了左手介质特有的后向波特特性。另外在 6.51—7.03 GHz 和 8.57—9.4GHz 两个频段内,由于有效介电常数为负值而有效磁导率为正值,导致这个频段的波数的实部虽然也为负数,但是其虚部非常大,说明此时传播的电磁波处于剧烈地衰减状态。

根据 Veselago 的左手介质理论,当介电常数和磁导率同时为负时,将导致波数的实部和折射率为负值,这些推论已经通过利用 NRW 方法从上述 S 参数中提取相应参数的方法得到证实。

通过进一步计算可以得到,该左手介质微带线在 4.90—6.51GHz 和 7.03—8.57GHz 两个频段的相对带宽分别为 28.22% 和 19.74%,总相对带宽为

46.77%,在中心频率处其电尺寸为 0.071,表 1 给出了包括文中左手介质微带线在内的几种主要的左手介质的相对带宽和电尺寸的比较,从表中可以看到本文设计的左手介质微带线的相对带宽较大并且电尺寸较小。

表 1 几种主要的左手相对带宽、电尺寸比较

结构	CLSs/SRRs <sup>[9]</sup>	双 S 结构 <sup>[7]</sup>	SRR/Rods <sup>[10]</sup>	左手介质微带线
相对带宽/%	3.2	46	12.2	46.77
中心频率	0.18	0.12	0.16	0.071
电尺寸				

## 4. 结 论

根据预定目标,本文设计了一种工作 4.90—6.51GHz 和 7.03—8.57GHz 两个频段、相对带宽达到 46.77%、中心频率上结构单元电尺寸为 0.071 的左手介质微带线。文中分别利用 NRW 方法和波数观察法对左手介质的后向波特特性进行了验证,结果表明两种方法得到的结论相吻合均体现了左手介质的后向波特特性,证明了本文提出的左手介质在预定频段的存在。该左手介质微带线单元电尺寸小、频带宽、加工容易、成本低廉,符合平面结构的微波电路与器件上的应用需求。

本文作者在此衷心感谢 CST 公司为本课题研究提供 CST MWS 三维仿真软件包及大量的技术支持。

- [1] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [2] Smith D R, Kroll N 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2933
- [3] Caloz C, Itoh T 2002 *IEEE AP-S Digest*. **2** 412
- [4] Huangfu J, Ran L, Chen H et al 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 1537
- [5] Meng F Y, Wu Q, Wu J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2194 (in Chinese) [孟繁义、吴群、吴健 2006 物理学报 **55** 2194]
- [6] Meng F Y, Wu Q, Wu J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2200 (in Chinese) [孟繁义、吴群、吴健 2006 物理学报 **55** 2200]
- [7] Chen H, Ran L, Huangfu J et al 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 1
- [8] Lagarkov A N, Semenenko V N, Kisel V N, Chistyayev V A 2003 *J Mag. Mag. Mater.* **258-259** 161
- [9] Ziolkowski R W 2003 *IEEE Trans. Antenn Propag* **51** 1516
- [10] Smith D R, Rye P, Vier D C et al 2004 *IEICE Trans. Electron*

E87-C 359

- [11] Horii Y, Caloz C, Itoh T 2005 *IEEE Trans. Microwave Theory Techniq* **53** 1527
- [12] Luo C R, Kang L, Zhao Q et al 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1607 (in Chinese) [罗春荣、康雷、赵乾等 2005 物理学报 **54** 1607]
- [13] Zhang F L, Zhao Q, Liu Y H et al 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1330
- [14] Jiang T, Chen Y, Feng Y J 2006 *Chin. Phys.* **15** 1154
- [15] Zhao Q, Zhao X P, Kang L 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2206 (in Chinese) [赵乾、赵晓鹏、康雷 2004 物理学报 **53** 2206]
- [16] Kang L, Zhao Q, Zhao X P 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3379 (in Chinese) [康雷、赵乾、赵晓鹏 2004 物理学报 **53** 3379]



# Design of left-handed microstrip based on DGS and double layers SRRs structures<sup>\*</sup>

Wu Ming-Feng<sup>1)†</sup> Meng Fan-Yi<sup>1)</sup> Wu Qun<sup>1)</sup> Wu Jian<sup>1)2)</sup>

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

2) ( *National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, Beijing 102206, China* )

( Received 21 February 2006 ; revised manuscript received 13 April 2006 )

## Abstract

A double band left-handed ( LH ) microstrip is designed based on defected ground structure ( DGS ) and Split Ring Resonators ( SRRs ) with broad bandwidth and low loss while the size of the unit cell is small and the synthesis is simple. Its effective permittivity and permeability are both extracted from the transmission and reflection data of the left-Handed microstrip, then the wave number  $k$  is calculated, and the results demonstrate that the LH microstrip shows backward wave ( BW ) properties in the broad frequency range of interest.

**Keywords** : left-handed medium, broadband, electrical small cell, backward wave property

**PACC** : 3220D, 4110H

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60571026 ), and the Fund for the National Key Laboratory of Electromagnetic Environment ( Grant No. 514860303 ).

<sup>†</sup> E-mail : wumingfeng2005@yahoo.com.cn