

基于 CRLH 结构的移相器和功分器设计

鲍 迪, 林先其, 崔铁军

(东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏南京 210096)

摘 要: 本文基于一种新型左右手复合结构(CRLH)的非线性相位特性,设计了一系列0度、90度移相器和等相位、90度移相功分器,并总结出设计公式.其尺寸远远小于传统器件,而功能相当.全波仿真结果和部分实验结果验证了该结构的有效性.

关键词: 左手媒质;左右手复合结构;移相器;功分器

中图分类号: TN711.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2007)6A-104-04

Design of Phase Shifters and Power Dividers Based on a Composite Right/Left Handed Structure

BAO Di, LIN Xian-qi, CUI Tie-jun

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

Abstract: We present a serial of new phase shifters and power dividers based on the nonlinear phase characteristics of a novel composite right/left handed (CRLH) structure and along with the design formula. The new components have much smaller sizes than the traditional components with the equivalent properties. Full-wave simulations and some measurement results verify the effectiveness of the new structure.

Key words: metamaterials; composite right/left handed structure; phase shifter; power divider

1 引言

近年来,左手媒质或 metamaterials,即介电系数 ϵ 和磁导率 μ 同时为负的人工媒质,在科学和工程领域都得到了广泛的关注^[1-7].除了应用开口谐振环(Split-Ring Resonators, SRR)法实现以外,三个研究组几乎同时提出了应用传输线实现的左手媒质(Transmission-Line, TL)^[8-10].传输线结构具有低损耗和宽带的特性,因而受到广泛关注.基于此,出现了许多新型微波器件,如混频器、滤波器、天线、移相器^[11]等.

本文基于一种新型左右手复合结构(CRLH)^[12]的非线性相位特性,设计了几种新型移相器和功分器,其尺寸远远小于传统器件^[13-15],而功能相当.全波仿真结果和实验结果验证了该结构的有效性.

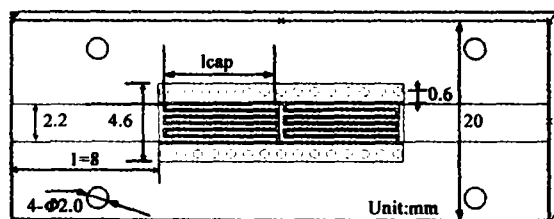


图1 超宽带滤波器

本文的工作基于之前提出的新型 CRLH 结构的超宽带滤波器^[12].本文提到的所有结构都是基于 F4B-1/2 型基片,厚度为 0.8mm,相对介电常数为 2.65.两端口的馈电线宽度为 2.2mm,这样可以达到 50 Ω 的匹配阻抗.馈电线附近有四个实验用的固定孔,如图 1(引自文献[12]图 1)所示.与传统的 CRLH 结构^[13-15]相比,本结构有如下四个优点:

- 第一,结构两侧的接地金属孔可以起到电壁的作用,从而大大减少了电磁波的泄漏.这也使得结构的插入损耗和与周围其他器件的耦合都非常小.这对于要谨慎考虑耦合噪音的大规模和超大规模综合电路的设计是很有用的.

- 第二,通过用连接到侧面金属孔壁的引脚提供并联电感,代替传统交指电容上接地金属孔提供并联电感,增大了物理设计的自由度.

- 第三,这种新型人工媒质同时具有共面波导(CPW)结构的优点,所以可以直接从微带系统移植到 CPW 系统.因为方便嵌入,我们还可以把它作为微带电路和 CPW 电路的接头.

- 第四,因为金属孔壁的独特性质,这种新型人工结构可以实现左右手带的平衡过渡,这样,我们就可以通过改变一个物理参量而得到工作在另一频带的新结构.

2 新型移相器设计

首先,我们研究图 1 所示的新型 CRLH 结构的相位特性.该新型人工媒质具有非线性相位的相位特性.通过改变图 1 中参数 l_{cap} 的值,分别提取从两端端口向内 8mm 的参考面(即紧贴 CRLH 结构的参考面)在频率为 5GHz 时的相移,得到如下相移分布,如表 1 所示.

表 1 l_{cap} 与相移关系图

l_{cap} (mm)	相移(度)
4	134.9
4.4	95.58
4.8	62.75
5.2	33.56
5.6	6.274
6	-19.75

根据表 1 数据,我们得到相移曲线的拟和公式如下:

$$y = 1.8x^4 - 40.5x^3 + 345.5x^2 - 1390.8x + 2300.3 \quad (1)$$

其中, y 为相移, x 为 l_{cap} 的长度.与 CRLH 结构的相移相对应,微带线的相位变化曲线可以表示为:

$$p = -\beta l = -\frac{2\pi\sqrt{\epsilon_r}l}{\lambda} \quad (2)$$

当微带线宽度为 2.2mm,厚 0.018mm,介质板厚 0.8mm,相对介电系数为 2.65 时,上式可以化为

$$p = -A * l * f \quad (3)$$

其中, p 是相位变化量(单位:度), A 是常数 1.8,而 l 是微带线长度(单位 mm), f 是工作频率(单位:GHz).实际仿真结果与上述公式非常吻合.在 5GHz 时,0.1mm 的微带线总是会产生 0.9 度的相移.

从上述分析可见,所提出 CRLH 结构的相移是非线性的,而且相同尺寸的相移是传统微带线的 7.2 ~ 10.9 倍.据此,在给定 5GHz 时的相移度数情况下,我们可以先从式(1)粗略得出所需的参数 l_{cap} ,然后再根据式(3)微调相位.

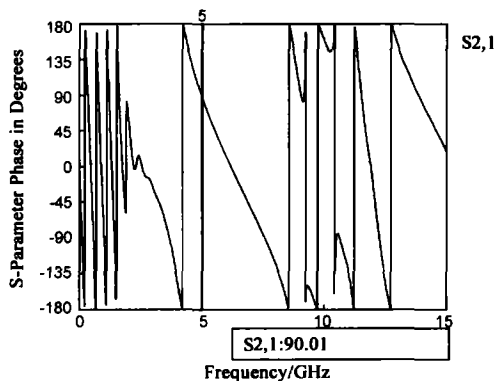


图 2 90 度移相器相位曲线

例如,对于 5GHz 的 90 度(-270 度)移相器,先结合表 1 和公式(1),得出在 $l_{cap} = 4.4\text{mm}$ 时其相移为 95.58 度,最接近 90 度.再根据公式(3),得出 $l = 0.63\text{mm}$ 时微带线移相 5.67 度.于是,可以把端口从紧贴 CRLH 的参考面分别向外推进 0.315mm,即可得到 90 度的移相器,其总长度为 10.74mm.相应的 CST 全波仿真结果如图 2 和 3 所示.

同理,可以设计 5GHz 的 0 度移相器,其对应的 $l_{cap} = 5.6\text{mm}$,端口从紧贴 CRLH 的参考面分别向外推进 0.32mm.因此,其总长度为 13.15mm.相应的 CST 全波仿真结果如图 4 和 5 所示.

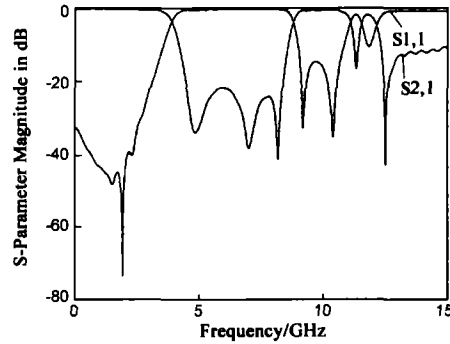


图 3 90 度移相器幅度曲线

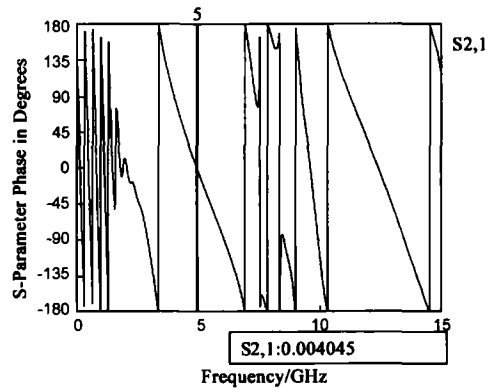


图 4 0 度移相器相位曲线

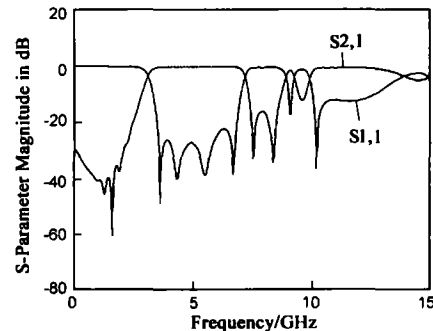


图 5 0 度移相器幅度曲线

表 2 列出了新型移相器与传统移相器的尺寸比较.可以看出,新型移相器的尺寸远远小于传统器件.

表 2 新型移相器与传统移相器尺寸比较

	新结构长度(mm)	传统结构长度(mm)
0 度	13.15	40.0
90 度	10.74	30.0

3 新型功分器设计

与设计移相器一样,我们先总结一下所提出的新型人工媒质的单元相位特性.图 6 给出了单纯两个 CRLH 单元在 $l_{cap} = 5\text{mm}$ 情况下的相位变化曲线(后文

的设计均是基于 $l_{cap} = 5\text{mm}$). 从中我们可以查出需要频点上 CRLH 单元所产生的相移.

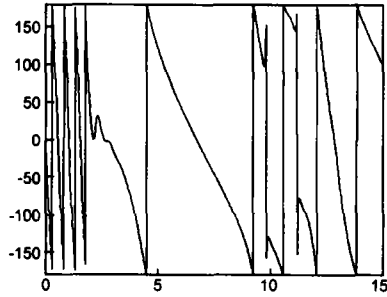
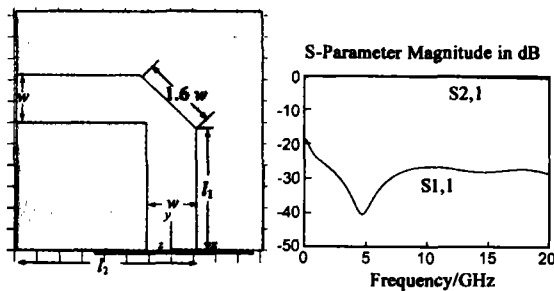


图 6 单纯两个 CRLH 单元的相位变化曲线



(a) 拐角示意图 (b) 拐角的 S 参数
图 7 拐角的结构示意图及 S 参数仿真结果

其次, 研究微带线直角折弯的电磁特性. 直角折弯的拐角地区如同有一个并联电容, 路径的加长如同两段短传输线, 或是两个电感. 一般的直接直角型拐角容易有反射, 而这是我们不希望的. 为此, 可以把拐角削去一块, 如图 7(a) 所示的 L 型拐角, 其反射在 25dB 以下, 相位变化是可预测的线性变化. $w = 2.2$ 时, 可以等效成长度为 $l_1 + l_2 - 1$ 的微带线的相位变化. 其 CST 全波仿真结果如图 7(b) 所示.

根据以上结论, 我们应用新型的 CRLH 结构研究、设计了新型功分器. 经过研究, 考虑到基片集成波导结构的接地特点和新型 CRLH 中的交指结构, 我们设计出如图 8 所示的新型等相位功分器, 其结构较好地实现了接头任务. 图 9 和图 10 分别给出该等相位功分器的 S 参数全波仿真结果和测试结果 (幅度和相位). 由图可见, 仿真结果和测量结果吻合较好.

通过前面分析, 我们知道 CRLH 结构的相位变化是

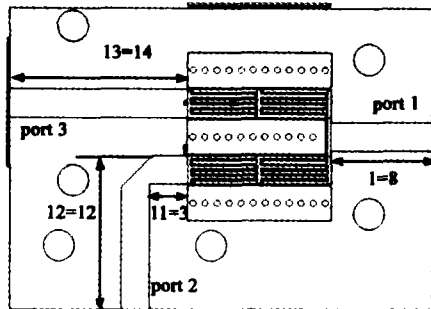


图 8 等相位功分器结构图

呈非线性的. 进而我们设计一侧是两个 CRLH 单元、一侧是三个 CRLH 单元, 再以微带线补充相位, 就可以得到移相功分器. 图 11 是我们设计的新型 90 度移相功分

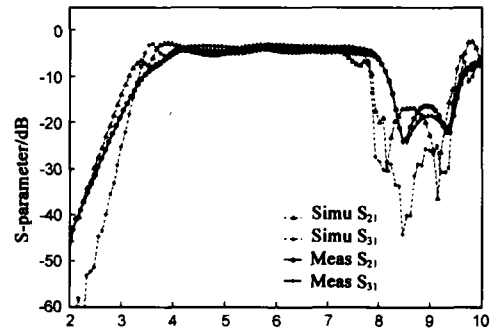


图 9 等相位功分器 S 参数的仿真和测量结果

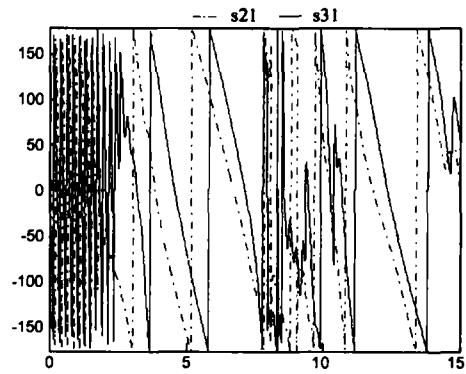


图 10 等相位功分器通带内相位曲线仿真结果

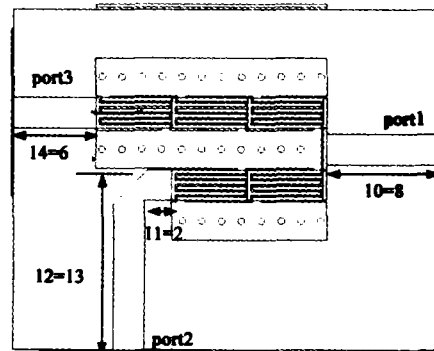


图 11 90 度移相功分器结构图

器结构图. 其相应的 S 参数 (幅度) 全波仿真结果和测试结果如图 12 所示. 可见, 二者吻合良好. 相差曲线如

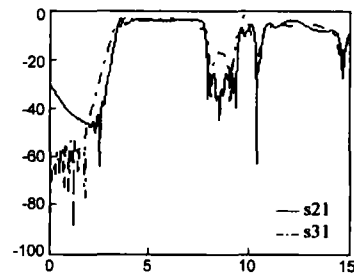


图 12 90 度移相功分器 S 参数幅度曲线

图 13 所示,在 5GHz 处实现了 90 度相差。

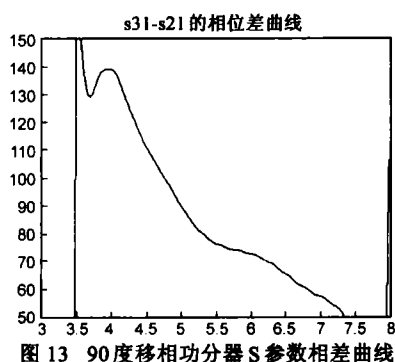


图 13 90 度移相功分器 S 参数相差曲线

4 结论

基于新型 CRLH 结构的非线性相位特性和传统微带线结构的特点,我们设计了一系列 0 度、90 度移相器和等相位、90 度移相功分器,并总结出设计公式。同时,给出电磁场全波仿真结果和部分实验结果。据此,可以方便的设计 4GHz 到 7GHz 的指定相位的移相器和功分器。这些新型 CRLH 器件继承了新型 CRLH 结构的超宽带、通带移动方便等特点,且与传统器件相比,具有尺寸小、器件间耦合小、噪声低等优点。

实验和仿真使用的都是 F4B 的板材,如果可以改进使用损耗更低材料,性能会有更大的提高。

参考文献:

- [1] V G Veselago. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of epsilon and mu[J]. Sov Phys Usp, 1968, 10(4): 509 - 514.
- [2] D R Smith, W J Padilla, D C Vier, S C Nemat-Nasser, S Schultz. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. Phys Rev Lett, 2000, 84(18): 4184 - 4187.
- [3] J B Pendry. Negative refraction makes a perfect lens[J]. Phys Rev Lett, 2000, 85(28): 3966 - 3969.
- [4] C Caloz, C C Chang, T Itoh. Full-wave verification of the fundamental properties of left-handed materials in waveguide configurations[J]. Appl. Phys, 2001, 90(11): 5483 - 5486.
- [5] N Engheta. Metamaterials with Negative Permittivity and Permeability: Background, Salient Features, and New Trends[M]. IEEE MTT-S Int Microwave Symp Dig, Philadelphia, PA, Jun. 2003, 1, 187 - 190.
- [6] J A Kong, B I Wu, Y Zhang. A unique lateral displacement of a Gaussian beam transmitted through a slab with negative permittivity and permeability[J]. Microwave Opt Technol Lett, 2002, 33(2): 136 - 139.
- [7] C Caloz, T Itoh. Novel Microwave Devices and Structures Based on the Transmission Line Approach of Meta-Materials

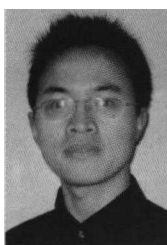
[M]. IEEE MTT-S Int Microwave Symp Dig, Philadelphia, PA, 2003, 1: 195 - 198.

- [8] C Caloz, T Itoh. Application of the Transmission Line Theory of Left-Handed (LH) Materials to the Realization of a Microstrip 'LH line' [M]. IEEE AP-S Int. Symp, San Antonio, TX, Jun. 2002, 2, 412 - 415.
- [9] A A Oliner. A Periodic-Structure Negative- Refractive-Index Medium Without Resonant Elements [M]. IEEE AP-S/URSI Int Symp Dig, San Antonio, TX, 2002, 41.
- [10] A K Iyer, G V Eleftheriades. Negative Refractive Index Metamaterials Supporting 2-D Waves [M]. IEEE MTT-S Int Microwave Symp Dig, Seattle, WA, Jun. 2002, 1067 - 1070.
- [11] A Lai, C Caloz, T Itoh. Composite right/left-handed transmission line metamaterials[J]. IEEE Microwave Mag, 2004, 5: 34 - 50.
- [12] X Q Lin, H F Ma, D Bao, T J Cui. 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.
- [13] C Caloz, A Sanada, T Itoh. A novel composite right/left-handed coupled-line directional coupler with arbitrary coupling level and broad bandwidth[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech, 2004, 52(3): 980 - 992.
- [14] 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.
- [15] J Gao, L Zhu. Characterization of infinite- and finite-extent coplanar waveguide metamaterials with varied left-and right-handed passbands[J]. IEEE Microwave Wireless Comp Lett, 2005, 15(11): 805 - 807.

作者简介:



鲍迪 女, 1983 年 5 月出生于江苏新沂, 2002 年毕业于东南大学信息工程专业, 并保送至东南大学信息工程专业微波方向读研。从事新型左手媒质方面的有关研究。
E-mail: dibao@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。研究方向包括计算电磁学、特异媒质、微波电路及天线。