

# 利用集总 $L-C$ 元件构造的一维 metamaterials 特性的实验研究\*

张东科<sup>2)</sup> 张治文<sup>1)†</sup> 赫 丽<sup>1)</sup> 李宏强<sup>1)‡</sup> 陈 鸿<sup>1)‡</sup>

<sup>1)</sup> 同济大学波耳固体物理研究所, 上海 200092)

<sup>2)</sup> 同济大学电子与信息工程学院, 上海 200092)

(2004 年 2 月 27 日收到, 2004 年 6 月 8 日收到修改稿)

在普通微带传输线中周期性地加载集总  $L-C$  元件能够构造一维特异性材料 (metamaterials), 它具有与众不同的特异性质. 通过实验证实了波在这种结构中传播具有相速度与群速度方向相反的左手性通带, 其折射率为负值, 并发现平均折射率为零的能隙. 这种结构具有结构紧凑, 参数可调, 制作简单的优点.

关键词: 负折射率, 特异性材料, 周期性结构, 微带线

PACC: 4270Q, 4110H

## 1. 引 言

介电常数和磁导率是用于描述物质电磁性质的基本物理量, 决定着电磁波在物质中的传播特性. 1968 年, Veselago 设想了对于同时具有负介电常数和负磁导率的左手性媒质, 即波矢  $k$  与电场强度  $E$ 、磁场强度  $H$  满足左手法则, 并具有负的折射率, 电磁波在这种媒质中传播时, Maxwell 方程仍然成立, 但波的传播方向和能量的传播方向相反, 即具有负的相速度和正的群速度, 并可表现出一些奇异的电磁特性, 如逆多普勒效应、逆斯涅尔折射效应及逆 Cerenkov 辐射效应等<sup>[1]</sup>. Pendrg 和 Smith 等利用细金属导线阵列和有缝谐振环阵列构造介电常数与磁导率同时为负的人工媒质<sup>[2-4]</sup>, 但是这种结构几何尺寸较大, 并且具有很大的损耗和负折射的带宽很窄, 很难应用于射频/微波电路和仪器中. 2002 年, Caloz 等提出利用传输线理论构造这种左手性媒质, 设想利用微带元件(叉指型电容和螺旋型电感)制成人工的左手性传输线, 这种结构具有适中的插入损耗和较宽的带宽<sup>[5,6]</sup>. Grbic 和 Eleftheriades 等人在传输线中周期性的加载  $L-C$  制作折射率为负值的材料, 并进行了后向波辐射和二维结构的聚焦试验<sup>[7,8]</sup>. 这类具有人工复杂结构且具有特异性能的材料统称为特

异性材料 (metamaterials).

本文通过实验证实了在普通微带传输线中周期性地加载集总  $L-C$  元件构造的一维 metamaterials 的特性. 在较低频率范围内, 有效介电常数和有效磁导率将同时为负值, 相速度和群速度的方向将相反, 这种结构具有比较宽的左手性通带和较小的损耗, 并且可以很容易地通过选取  $L-C$  元件的值, 实现带宽的可调性. 另外, 实验还发现在较高频率范围内, 有效介电常数和磁导率将同时为正值, 系统呈现出右手性通带特征. 左手通带与右手通带之间被一能隙隔开, 在该能隙中, 系统的相移常数为零, 或者说有效折射率为零. 最近, 有关含特异材料光子晶体中奇异能隙的研究引起人们很大的兴趣<sup>[9-13]</sup>. 文献 [9, 10] 的理论研究表明, 这类光子晶体存在一个有效折射率或平均折射率为零 ( $\bar{n} = 0$ ) 的能隙. 该能隙具有许多不同于传统光子晶体中 Bragg 能隙的特点, 而对于一维光子晶体的 Bragg 能隙已有许多研究<sup>[14,15]</sup>. 因此, 利用集总  $L-C$  元件构造的一维特异性材料, 将为研究  $\bar{n} = 0$  能隙提供方便的实验平台.

## 2. 原 理

在微带传输线中加载集总的  $L-C$  元件, 将加载电容串联, 加载电感并联, 实现如图 1 所示的基本单

\* 国家重点基础研究发展规划项目(批准号 2001CB610406), 国家自然科学基金(批准号 50477048), 上海市科委重点基础研究项目资助的课题.

† E-mail: yewenzhang@online.sh.cn

元.由基本单元串联构成的一维周期性微波网络,它的色散关系为<sup>[8,16]</sup>

$$\cos(\beta d) = \cos(kd) + \frac{ZY}{2} \cos^2\left(\frac{kd}{2}\right) + \frac{j}{2} \left( \frac{Z}{Z_0} + \frac{Y}{Y_0} \right) \sin(kd), \quad (1)$$

其中  $\beta$  是布洛赫(Bloch)波的传播常数,  $k = \omega \sqrt{L_0 C_0}$  是传输线的传播常数.当  $d \ll \lambda_0$  时,  $kd$  很小,  $\beta d$  也将很小.(1)式可近似为

$$1 - \frac{(\beta d)^2}{2} \approx 1 - \frac{(kd)^2}{2} + \frac{ZY}{2} + \frac{jkd}{2} \left( \frac{Z}{Z_0} + \frac{Y}{Y_0} \right). \quad (2)$$

因为  $Z = \frac{1}{j\omega C}$ ,  $Y = \frac{1}{j\omega L}$  可得<sup>[7,8,17]</sup>

$$\beta \approx \pm \omega \sqrt{\left( L_0 - \frac{1}{\omega^2 C d} \right) \left( C_0 - \frac{1}{\omega^2 L d} \right)}, \quad (3)$$

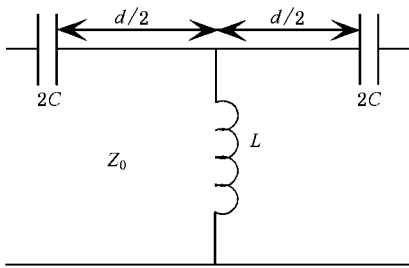


图1 基本单元的等效电路

因此,这种周期性结构的有效介电常数和有效磁导率为

$$\epsilon_{\text{eff}} \approx C_0 - \frac{1}{\omega^2 L d}, \quad \mu_{\text{eff}} \approx L_0 - \frac{1}{\omega^2 C d}, \quad (4)$$

上式表明,在频率很高的情况下,加载的电容电感的作用很小,主要有传输线本身的分布电容和分布电感决定这种周期性结构的有效介电常数和有效磁导率;在频率较低的情况下,传输线本身的分布电容和分布电感作用很小,主要有加载的电容电感决定这种周期性结构的有效介电常数和有效磁导率,即

$$\epsilon_{\text{eff}} \approx -\frac{1}{\omega^2 L d}, \quad \mu_{\text{eff}} \approx -\frac{1}{\omega^2 C d}. \quad (5)$$

所以,在低频段布洛赫波的相移常数  $\beta$  为

$$\beta \approx -\omega \sqrt{\left( L_0 - \frac{1}{\omega^2 C d} \right) \left( C_0 - \frac{1}{\omega^2 L d} \right)}. \quad (6)$$

在高频段布洛赫波的相移常数  $\beta$  为

$$\beta \approx \omega \sqrt{\left( L_0 - \frac{1}{\omega^2 C d} \right) \left( C_0 - \frac{1}{\omega^2 L d} \right)}. \quad (7)$$

由(5)(6)(7)式表明,在低频通带区域有效介电常

数和有效磁导率同时为负的,折射率为

$$n = -c \sqrt{\epsilon_{\text{eff}} \mu_{\text{eff}}}, \quad (8)$$

其中  $c$  为真空中的光速.相速度和群速度的方向相反,此区域为左手性通带.在高频通带区域有效介电常数和有效磁导率为正的,此区域为右手性通带.

### 3. 实验设计与实验结果

采用介电常数为 4.75(在 1GHz 时),厚度为 1.6mm 的 FR-4 环氧树脂复合玻璃纤维布覆铜板)为基材制作一维的周期性结构传输线.将微带线做成 50Ω 匹配的传输线,在微带线中,周期性的加载集总的电容、电感元件,如图 2 所示.

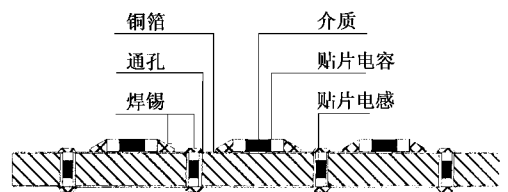


图2 结构示意图

图 3 示出几件不同周期数的一维 metamaterials. 所有测量结果采用 Agilent 8722ES 矢量网络分析仪.

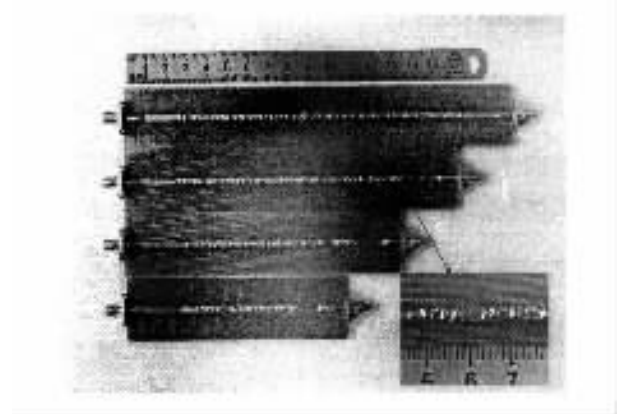


图3 不同周期数的一维 metamaterials

当  $C = 5.1\text{pF}$ ,  $L = 4.7\text{nH}$ , 周期数分别为 8, 12, 16, 20 时,  $S_{21}$  如图 4 所示.结果如图表明,当周期数大于 8 时,才会出现明显的阻带,将通带分成两部分.第一个阻带是由于这种高通结构产生,第二个阻带是由于这种周期性结构所产生.随着周期数的增加,阻带的衰减逐渐增大,而阻带的频率不发生变化.这两个阻带之间即左手性通带.可以看到,左手性通带从高通滤波器的截止频率开始到第二个阻

带,带宽比较大,且传输损耗比较小.矢量网络分析仪同时给出了  $S_{21}$  的幅值与相位  $\varphi$ ,从而得到相移常数的信息,从中可以得到色散曲线  $\omega(\beta d)$ .根据色散曲线又可以得到群速度、相速度以及有效折射率.

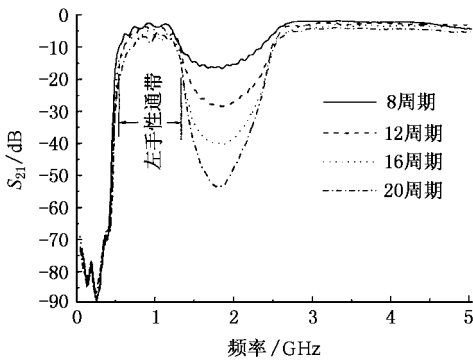


图4  $C = 5.1\text{pF}$ ,  $L = 4.7\text{nH}$  单元长  $7\text{mm}$ , 不同周期数的  $S_{21}$

在周期数为 20 时,色散曲线  $\omega(\beta d)$  测量值与理论值的比较如图 5 所示,从图中可以看出测量值与理论值符合得很好.群速度和相速度测量值如图 6 所示,可以看到,在左手性通带的群速度和相速度方向相反,在右手性通带群速度和相速度方向相同.群速度的理论值与测量值的比较如图 7 所示,表明在两个通带内群速度均为正值,且小于光速.图 8 所示有效折射率与频率的关系,可以看到在左手性通带有效折射率为负值,而在右手性通带有效折射率为正值,且理论值与测量值符合得很好.另外,从图 5 可以看出,在左手通带与右手通带之间存在一个阻带或带隙,带隙的上、下边缘由频率  $\omega_{c1} = 1/\sqrt{CL_0d}$ ,  $\omega_{c2} = 1/\sqrt{CL_0d}$  确定.在带隙的中部,相移常数  $\beta = 0$ .这说明,在带隙中部传播的电磁波不存在相延迟,相应的有效折射率为零 ( $\bar{n} = 0$ ).这个结论从图 8 也可以得到.

在  $C = 2.0\text{pF}$ ,  $L = 2.2\text{nH}$ , 周期数为 12, 16 时,  $S_{21}$  如图 9 所示.在周期数为 12 时,色散曲线  $\omega(\beta d)$  测量值与理论值的比较如图 10 所示,也表明,这种结构在集总元件允许的频率范围内测量值与理论值符合得很好.

比较图 4 和图 9 可以看到,左手性通带由  $0.5\text{GHz} - 1.5\text{GHz}$  变到  $1.2\text{GHz} - 2.4\text{GHz}$ , 频带向高频方向移动,频带范围也变大,此时的频率已接近集总元件允许的频率范围上限.比较图 5 和图 10 可以看到,当左手性通带在较低频段时,测量值与理论值符合得更好.这样也可以采用有源的变容二极管代

替本文中的贴片电容器,通过外加电压来调节电容值,实现左手性通带的电调谐.实际上我们已经实现了这样的一维 metamaterials,有关结果将另文发表.

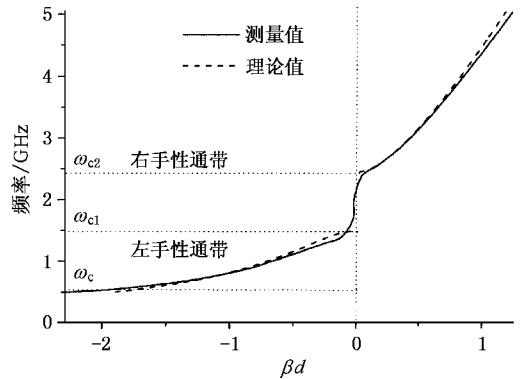


图5 色散曲线  $\omega(\beta d)$ ,  $C = 5.1\text{pF}$ ,  $L = 4.7\text{nH}$ , 周期数为 20, 单元长  $7\text{mm}$

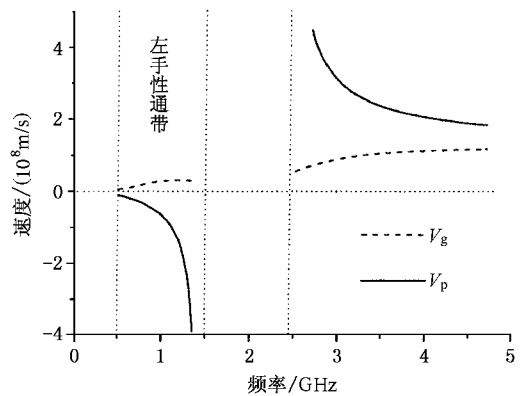


图6 群速度  $V_g$  与相速度  $V_p$ ,  $C = 5.1\text{pF}$ ,  $L = 4.7\text{nH}$ , 周期数为 20, 单元长  $7\text{mm}$

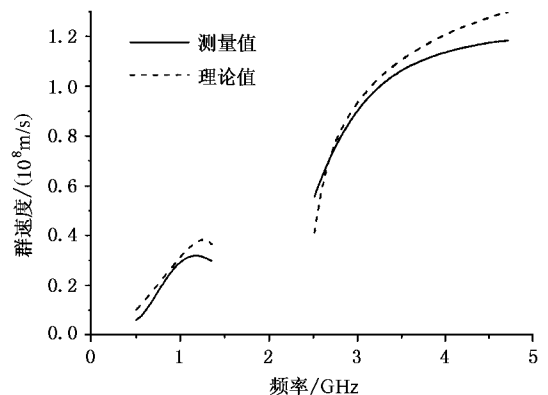


图7 群速度,  $C = 5.1\text{pF}$ ,  $L = 4.7\text{nH}$ , 周期数为 20, 单元长  $7\text{mm}$

此外,从(6)式可以看到,适当调节单元长度,也可以对左手性通带实现一定的调节.

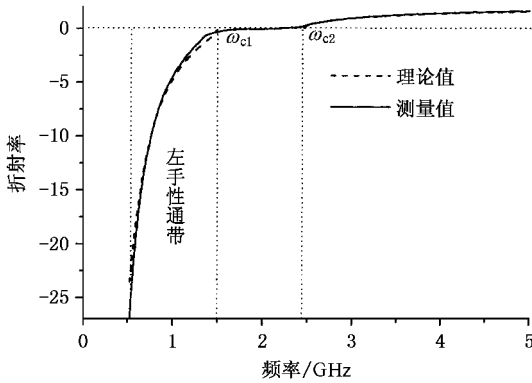


图 8 有效折射率与频率的关系,  $C = 5.1\text{pF}$ ,  $L = 4.7\text{nH}$ , 周期数为 20, 单元长  $7\text{mm}$

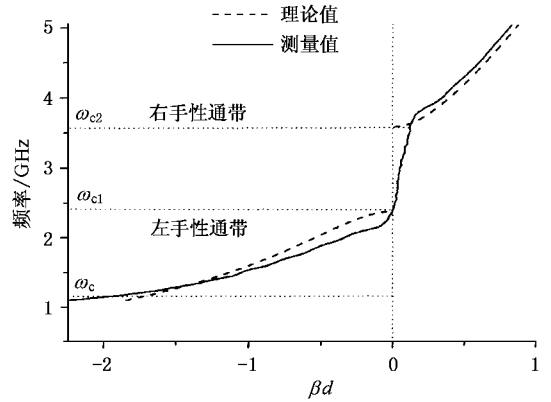


图 10 色散曲线  $\omega(\beta d)$ ,  $C = 2.0\text{pF}$ ,  $L = 2.2\text{nH}$ , 周期数为 12, 单元长  $7\text{mm}$

## 4. 讨论与结论

1. 本文的研究结果表明,对于由集总参数元件在微带传输线基础上构成的一维特异性材料,在集总元件允许的频率范围内,可以通过选取不同的  $L-C$  值,很容易地实现左手性通带的调节,并且这种结构具有较宽的保持折射率为负数的左手性通带,传输损耗比较小,这将在射频/微波电路和仪器中有很好的应用前景。

2. 本文的研究表明,在左手通带与右手通带之间存在一个有效折射率或平均折射率为零 ( $\bar{n} = 0$ ) 的能隙。最近的理论研究表明<sup>[9,10]</sup>,  $\bar{n} = 0$  能隙有着与传统光子晶体中 Bragg 能隙不同的特性,如能隙的位置与晶格大小无关而且无序的影响很小。这些特性可以很方便地在本文所制备的周期性集总  $L-C$  元件构造中实现。有关研究工作目前正在进行之中。

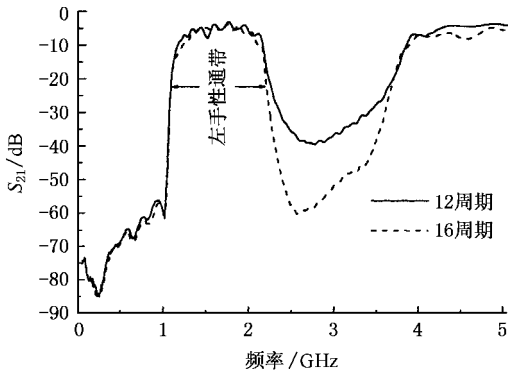


图 9 不同周期数的  $S_{21}$ ,  $C = 2.0\text{pF}$ ,  $L = 2.2\text{nH}$ , 单元长  $7\text{mm}$

- [ 1 ] Veselago V G 1968 *Soviet Physics Usp.* **10** 509
- [ 2 ] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J and Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [ 3 ] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J and Stewart W J 1999 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **47** 2075
- [ 4 ] Shelby R A, Smith D R and Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [ 5 ] Caloz C and Itoh T 2002 *IEEE Ante. Prop. Soci. Int. Symp.* **2** 412
- [ 6 ] Caloz C et al 2002 *USNC/URSI National Radio Science Meeting* **1** 39
- [ 7 ] Grbic A et al 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 5930
- [ 8 ] Eleftheriades G V et al 2002 *IEEE Trans. Micro. Theo. Tech.* **50** 2702
- [ 9 ] Li J, Zhou L, Chan C T and Sheng P 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 083901
- [ 10 ] Jiang H T, Chen H, Li H Q, Zhang Y W and Zhu S Y 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 5386
- [ 11 ] Shadrivov I V, Sukhorukov A A and Kivshar Y S 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 3820
- [ 12 ] Jiang H T, Chen H, Li H Q, Zhang Y W, Zi J and Zhu S Y 2004 *Phys. Rev. E* (accepted for publication)
- [ 13 ] Wu L, He S L and Chen L 2003 *Opt. Express* **11** 1283
- [ 14 ] Zhou P et al 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2276 (in Chinese) [ 周 鹏等 2002 物理学报 **51** 2276 ]
- [ 15 ] Liu N H et al 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1418 (in Chinese) [ 刘念华等 2003 物理学报 **52** 1418 ]
- [ 16 ] Collin R E 1996 *Foundations for Microwave Engineering* (New York: McGraw-Hill) [ in Chinese ] R. E. 柯林著, 吕继尧译, 1981 微波工程基础 (北京: 人民邮电出版社, 第 411 页)

[ 17 ] Antoniades M A *et al* 2003 *IEEE Ant. Wire. Prop. Lett.* **2** 103

## Experimental verification of the characteristic of one-dimensional metamaterials by use of lumped-elements $L-C$ \*

Zhang Dong-Ke<sup>2)</sup> Zhang Ye-Wen<sup>1,2)</sup> He Li<sup>1)</sup> Li Hong-Qiang<sup>1,2)</sup> Chen Hong<sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup>( *Pohl Institute of Solid State Physics ,Tongji University ,Shanghai 200092 ,China* )

<sup>2)</sup>( *School of Electronics and Information ,Tongji University ,Shanghai 200092 ,China* )

( Received 27 February 2004 ; revised manuscript received 8 June 2004 )

### Abstract

The metamaterials by use of  $L-C$  lumped-elements in the transmission line have the preternatural characteristic ,which is different from the conventional dielectrics . We report the experimental results in the left-handed range with anti-parallel phase and group velocities in the metamaterials ,with the negative refractive index , and we find the bandgap corresponding to zero averaged refractive index . The configuration offers some significant advantages :it is more compact in size ,the material parameters can be tuned ,and the method of fabrication is easy to carried out .

**Keywords** : negative refraction index , metamaterials , periodic structures , microstrip

**PACC** : 4270Q , 4110H

\* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China ( Grant No. 2001CB610406 ) , by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 50477048 ) , and by the Shanghai Science and Technology Committee .