

# C 波段平面异向介质设计及其后向波特特性验证<sup>\*</sup>

孟繁义<sup>1)†</sup> 吴 群<sup>1)</sup> 吴 健<sup>1)2)</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)

(2005 年 10 月 11 日收到, 2005 年 11 月 12 日收到修改稿)

提出了一种工作在 C 波段的新型平面结构异向介质, 它除了带宽宽和损耗小外, 还具有体积小、结构简单的优点, 而且能够实现工作频段的平移, 频率平移范围为 4—20 GHz. 基于电磁波由自由空间入射半无限大异向介质平板的传输和反射数据, 计算出了电波在其中传播时的相速随频率的变化曲线, 结果表明所讨论的异向介质确实在预想的频段上表现出后向波特特性, 同时利用相位观察法进一步验证了上述的后向波特特性, 从而肯定了异向介质的存在.

关键词: 异向介质, 宽频带, 小单元, 后向波特特性

PACC: 3220D, 4110H

## 1. 引 言

近年来“异向介质”由于其反常的电磁特性在固体物理、材料科学、光学和应用电磁学领域内开始获得愈来愈广泛的青睐<sup>[1-4]</sup>. 有关异向介质的早期理论研究是在 1968 年由 Veselago 完成的, Veselago 的研究结果指出当某种介质的介电常数和磁导率同时为负值时, 它将显现出一系列反常的电磁特性, 其中包括后向波特特性(相速与群速方向相反)、负折射效应(介质的折射系数为负)、逆多普勒效应及逆切伦科夫辐射效应<sup>[5]</sup>, 而正是基于这样的原因异向介质又被冠以后向波材料(backward wave material)、双负介质(double negative material)和负折射媒质(negative index of refraction medium)等名称. 但是由于自然界中一直无法找到天然的异向介质, 近 30 年来异向介质研究领域几乎没有进展. 直到 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, 制造出了异向介质, 从此异向介质的研究才进入了实质性阶段<sup>[6]</sup>. 然而上述的异向介质因其结构复杂、带宽窄、损耗大以及体积大的问题使得它几乎无用武之地. 针对这样的问题, 有很多学者在新型异向介质设计方面展开研究. 目前, 已有多种结构的异向介质被

设计、制造出来, 其中包括传输线结构异向介质<sup>[7]</sup>, 结构单元为  $\Omega$  形的异向介质<sup>[8]</sup>, 结构单元为 S 形、双 S 形的异向介质<sup>[9]</sup>, 结构单元为螺旋形的异向介质<sup>[10]</sup>, 由 CLSs(Capacitively Loaded Strips)和 CLLs(Capacitively Loaded Loops)相交替构成的异向介质<sup>[11]</sup>等. 上述异向介质在性能上都有各自的优点, 某些异向介质的部分电磁性能甚至已经非常完善, 譬如 Ziolkowski 等人在 2003 年设计的 CLSs/CLLs 异向介质具有平面结构容易加工的特点<sup>[11]</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 的低损耗异向介质<sup>[12]</sup>; 由陈抗生等在 2005 年提出的结构单元为双 S 形的异向介质, 其工作频带从 10—16 GHz, 相对带宽达到 46%<sup>[9]</sup>. 然而, 这里仍然存在一些问题: 对异向介质设计而言, 不但要求带宽宽、损耗小, 还要求其结构要简单便于制造、单元体积要小以及其工作频段可平移, 而现有的异向介质几乎都无法同时满足这些要求. 现有的异向介质单元电尺寸在 0.2—0.063 之间, 当单元体积较大时, 由其构成的异向介质将面临由于不均匀而带来的一系列问题, 如各向异性、折射性能下降以及在与其它介质的交界面处散射增加等, 同时还不便于将其作为填充或涂敷材料应用, 而当工作频段不可平移或不易平移时, 无疑会阻碍其

<sup>\*</sup> 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.

<sup>†</sup> E-mail: blade@hit.edu.cn

进一步实际应用<sup>[11-13]</sup>.

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工作在 C 波段相对带宽达到 56.4%、在中心频率上单元电尺寸为 0.067 的宽频带小单元平面异向介质,更具有吸引力的特性还表现在该异向介质具有工作频段平移的能力,平移带宽范围宽达 4—20 GHz,其调节方法简单易行,因此该异向介质具有广泛的应用前景.本研究对由上述异向介质单元构成的半无限大异向介质平板的电波传播特性进行了数值仿真,并结合 NRW(Nicolson-Ross-Weir)方法提取出了该异向介质平板的有效介电常数和有效磁导率以及电磁波在该异向介质平板中传播时的相速,计算结果表明:在 4.2—7.5 GHz,有效介电常数和有效磁导率的实部以及相速同时为负值,显示了异向介质的“双负特性”和“后向波特性的”.同时,为进一步验证上述“后向波特性的”,本研究依据文献[9,14]中提出的“相位观察法”绘制了 6 GHz 时电磁波在异向介质中传播时的电场等值线的位移-时间曲线,并根据等值线的斜率计算出了相速,计算结果表明此时得到的相速值与 NRW 方法计算而得的相速值相符合.

## 2. 宽频带小单元平面异向介质设计

依据异向介质的传输线理论<sup>[7]</sup>,只要在电磁波传播方向上并联分布电感与串联分布电容同时出现,就能产生异向介质,而且这种并联分布电感和串联分布电容的产生方式越简单、直接,产生的异向介质的带宽越宽、损耗越小、体积也越小.此结论为宽频带、低损耗、小单元异向介质设计提供了新思路.对于如图 1 所示的结构单元,它是由一个上下均有开口的方形金属环以及作为结构载体的均匀介质构成.当电磁波沿法向方向入射且电场极化方向平行 Y 方向时,开口环两侧细金属条由于其自感的存在,当形成阵列时,会在电磁波的传播过程中呈现与传播方向相垂直的“并联”电感效应,其电感可以利用

$$L_1 = \mu_0 \frac{\ln(d/r)}{4\pi} \quad (1)$$

进行估算,其中  $d$  为结构单元间 Z 方向的距离, $r$  为矩形环两侧金属条的宽度, $\mu_0$  为真空中的磁导率;而矩形环上下两端开口形成沿传输方向的“串联”电容,其电容值可以用

$$C_1 = 2.2 \frac{\epsilon_1 S}{p} \quad (2)$$

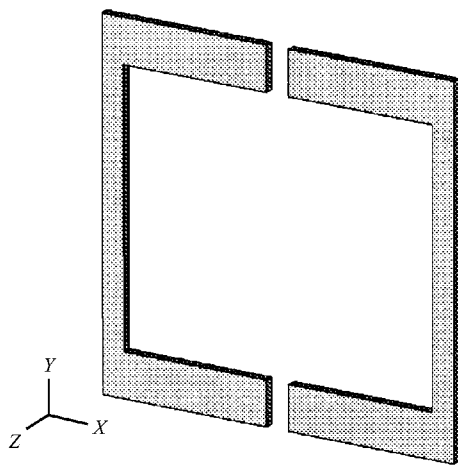


图 1 新型异向介质结构单元的三维示意图

进行估算,其中  $S$  为开口截面的正对面积, $p$  为开口宽度, $\epsilon_1$  为均匀介质的介电常数.这样,图 1 所示的异向介质单元就可用由并联电感与串联电容构成的  $\Pi$  形等效电路结构来描述,由此基于异向介质的传输线理论,可以预料到通过对图 1 所示结构合理设计和布局一定可以设计出预定频段的宽频带小单元异向介质.

本研究的目标是设计出 C 波段的宽频带具有小单元的异向介质,首先利用(1)和(2)式以及左手传输线理论,根据预定设计的异向介质工作频段估算结构单元的尺寸,包括矩形环四边的带条宽度和长度、环上开口宽度以及结构单元间距,然后利用 CST MW Studio 三维电磁场工具仿真确定上述参数.仿真模型包括一个通过分别设立理想电壁(PEC)对和理想磁壁(PMC)对形成的二端口矩形波导,如图 2 所示,波导中填充相对介电常数为 2.2 的介质(聚丙烯材料),由 4 个图 1 所示的异向介质单元并列组合放置在波导中间,并且在每个端口上入射波均沿法向方向从真空中向波导中传播,这样,该仿真模型能够对均匀平面波沿法向方向照射具有 4 个单元厚度的半无限大异向介质平板的电磁波反射和透射特性进行有效模拟.利用上述方法,最终确定的能够在 C 波段产生异向介质的结构单元尺寸如图 3 所示,其中矩形环平行 Y 轴的两条边宽 0.13 mm,长 2.03 mm;平行 X 轴的两条边宽度为 0.26 mm,长度为 2.03 mm,矩形环开口宽度均为 0.13 mm.另外,两个 PMC 边界间距离为 0.254 mm,这个参数实际上代表的是阵元的横向间距.

在这样的结构参数下,通过计算机仿真得到的

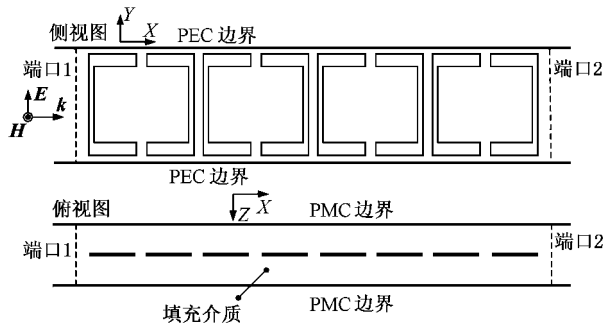


图 2 异向介质数值仿真模型结构

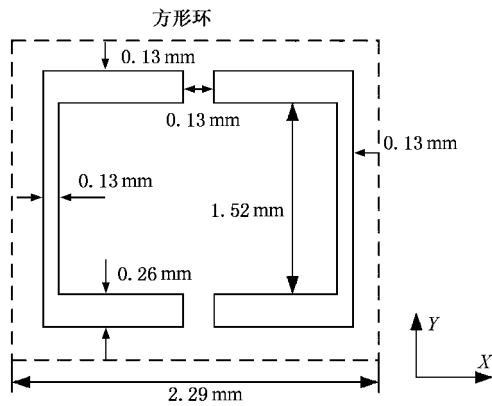


图 3 异向介质结构单元尺寸标注

上述二端口波导的  $S$  参数幅度和相位随频率的变化曲线如图 4 所示。

从图中可以看到,在 4.2—7.5 GHz 频带上  $S_{21}$  的幅度大于 -4 dB,这意味着平均每个结构单元的传输损耗小于 0.75 dB.当然,仅仅通过  $S$  参数还无法确定异向介质存在的频段,下面将通过分别观察异向介质的双负特性和后向波特特性来确定异向介质存在的频率区域.上述介质平板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相速需要利用 NRW 方法从上述的  $S$  参数中提取<sup>[11]</sup>.

图 5 和图 6 分别给出了有效介电常数和有效磁导率的频率变化曲线,可以看到在 4.2—7.5 GHz 频带上有效介电常数和有效磁导率的实部同时为负值,虚部近似为零,这正是异向介质特有的电磁特性——双负特性.图 7 绘出了相速的频率变化曲线,从图中可以看到,同样在 4.2—7.5 GHz 频带上,相速为负值,显现出了异向介质特有的后向波特特性.另外,图中还标志出了频率为 6 GHz 时对应的相速数值,如此标志的目的是为了在后面部分应用“相位观察法”<sup>[9,14]</sup>进一步观察后向波特特性并将观察结果与

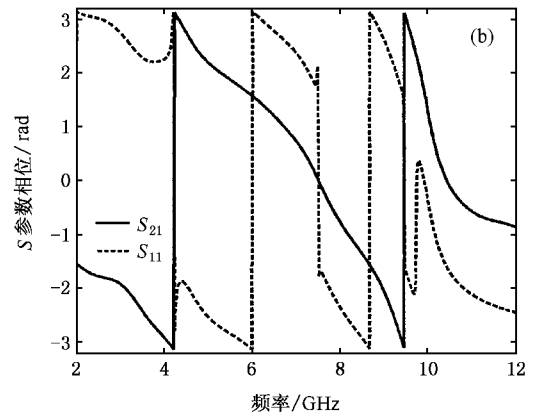
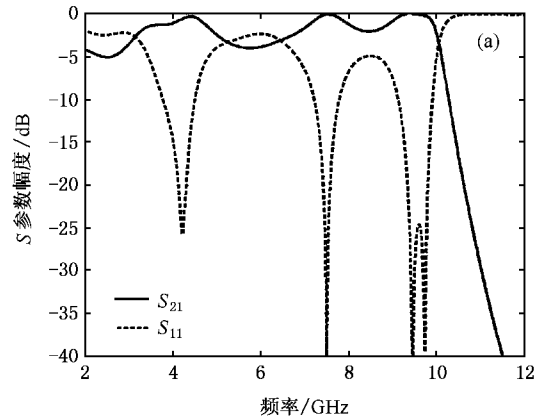
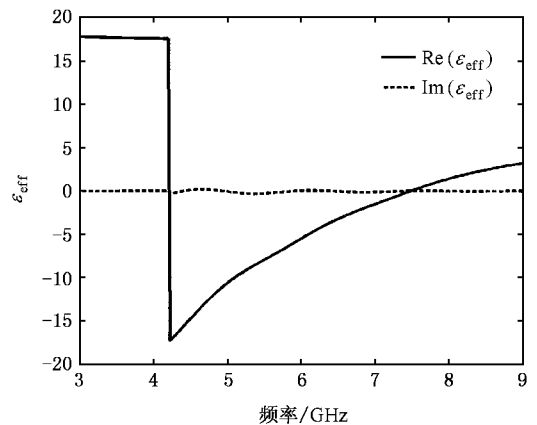
图 4 异向介质平板的  $S$  参数幅度、相位曲线 (a)  $S$  参数幅度变化曲线 (b)  $S$  参数相位变化曲线

图 5 有效介电常数随频率的变化曲线

图 7 所示结果相比较,从而肯定图 7 所示结果的正确性和异向介质的存在.同时根据 Veselago 的异向介质理论,介电常数和磁导率同时为负还将导致波数的实部和折射率为负值,实际上这些推论同样可以通过利用 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,该异

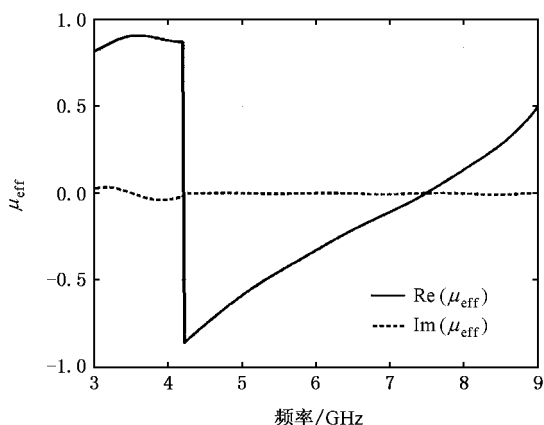


图6 有效磁导率随频率的变化曲线

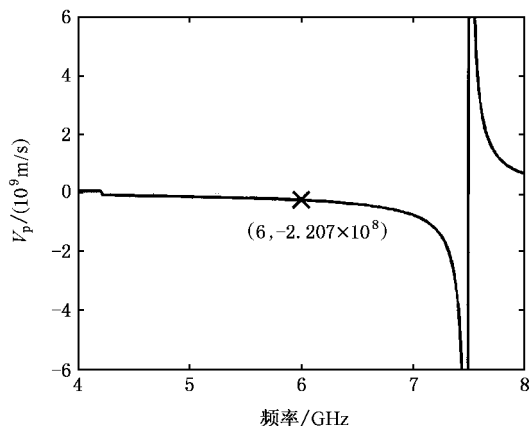


图7 相速随频率的变化曲线

向介质相对带宽为 54.6%, 在中心频率上其电尺寸为 0.067, 表 1 给出了包括文中异向介质在内的几种主要的异向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开口方形环异向介质的相对带宽较大并且电尺寸较小。

表1 几种主要的异向介质相对带宽、电尺寸比较

结构	CLSs/SRRs <sup>[11]</sup>	双 S 结构 <sup>[9]</sup>	SRR/Rods <sup>[12]</sup>	开口方环
相对带宽/%	3.2	46	12.2	56.4
中心频率电尺寸	0.18	0.12	0.16	0.067

需要注意的是, 该异向介质还具有工作频段可平移的能力, 而且调节方法非常简单。图 8 给出了, 在图 2 的仿真环境中其他条件不变而 PMC 边界间距即阵列沿  $Z$  方向的单元间隔变为 2.03 mm 时得到的相速频率变化曲线, 可以看到此时该结构在 6.8—12 GHz 频带上为异向介质, 其相对带宽约为 55.32%。另外, 通过对多组不同的结构(不同的方形

环尺寸、PMC 边界以及填充的介质)进行仿真, 得到结论: 在 4—20 GHz 频带上, 异向介质中心频率随阵列沿  $Z$  方向的单元间隔增大而单调上移, 随其中填充的介质介电常数的增加而单调下降, 而方形环四边的宽度以及开口宽度对中心频率的影响较微弱, 同时上述参数的变化对异向介质带宽和电尺寸影响不大, 这些特点充分体现了该异向介质性能的稳定性。

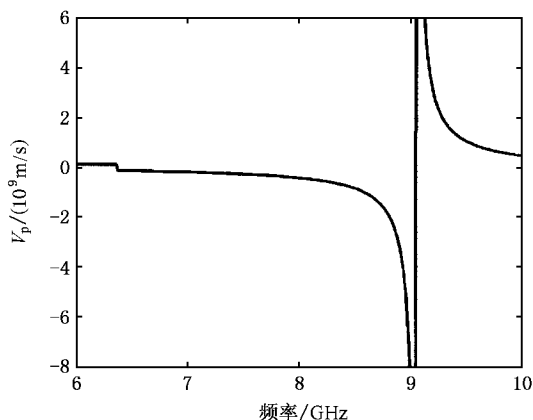


图8 阵元横向间距为 2.03 mm 时相速的频率变化曲线

### 3. 利用相位观察法验证后向波特性

为了进一步证明上述异向介质的存在性, 在这里将通过相位观察法对上述利用 NRW 方法提取出来的相速进行验证。相位观察法的基本原理是: 当利用余弦波作为图 3 所示的仿真模型的激励源时, 其激励电场可以表示为

$$E_z = \cos(kx - \omega t), \quad (3)$$

此时, 对于固定的相位  $P_{\text{const}}$ , 则有

$$x = \omega t/k + P_{\text{const}}/k, \quad (4)$$

其中  $w/k$  即为波前传播的速度(相速)。由此可以发现, 如果能够记录等值电场的随时间变化的位移曲线, 就可以通过确定该曲线斜率来确定相速<sup>[9, 14]</sup>。需要注意的是, 该方法在实验中很难实现, 但却很容易在时域仿真中完成。此时在图 3 所示的仿真环境中, 设定两个端口间距即整个仿真模型  $X$  方向长为 80.82 mm, 其中, 异向介质沿  $X$  方向被放置在 15—71.46 mm 处, 共 24 个单元; 在 0—15 mm 和 71.46—80.82 mm 处则为普通介质, 同时激励源设为余弦波激励, 工作频率为 6 GHz。在这样的条件下, 在其中传播的电场的等值线位移-时间分布曲线如图 9 所示。图中实线表示电场等值线, 可以看到在 0—15

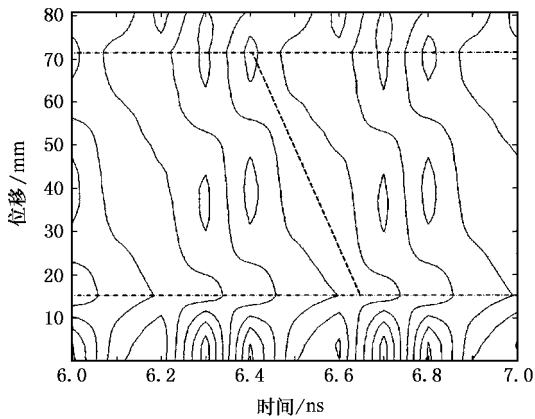


图9 电场等值线的位移-时间曲线

mm 和 71.46—80.82 mm 范围内,电场等值线的斜率为正值,表明此时相速为正;而在 15—71.46 mm 范围内电场等值线的斜率为负值,表明此时相速为负,反映了异向介质的后向波特性的。经过进一步计算,可以得到此时的相速为  $-2.1 \times 10^8$  m/s,将此结果与图

7 中所示结果相比较可以发现二者相符合。另外,从图中还可以看到等值线存在一些波动,这是由于金属介质结构的不连续性造成的。

## 4. 结 论

根据预定目标,本文设计了一种工作在 4.2—7.5 GHz、相对带宽达到 56.4%、中心频率上结构单元三方向最大电尺寸为 0.067 的 C 波段的宽频带异向介质。同时该异向介质具有很强的工作频段平移能力。本工作仅通过两次简单地改变其横向单元间距就分别获得了工作在 5.5—10 GHz,相对带宽为 58.1% 的异向介质以及工作在 6.8—12 GHz,相对带宽为 55.3% 的异向介质。文中分别利用 NRW 方法和相位观察法对异向介质的后向波特性的进行了验证。结果表明两种方法得到的结论相符合均体现了异向介质的后向波特性的,证明了本文提出的异向介质在预定频段的存在。

- [1] Zhuang F, Shen J Q 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 955 (in Chinese) [庄 飞等 2005 物理学报 **54** 955]
- [2] Zhang D K, Zhang Y W, He L, Li H Q, Chen H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 320 (in Chinese) [张东科等 2005 物理学报 **54** 320]
- [3] Luo C R, Kang L, Zhao Q, Fu Q H, Song J, Zhao X P 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1607 (in Chinese) [罗春荣等 2005 物理学报 **54** 1607]
- [4] Zhao Q, Zhao X P, Kang L, Zhang F L, Liu Y H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2206 (in Chinese) [赵 乾等 2004 物理学报 **53** 2206]
- [5] Veselago V G 1968 *Soviet Physics Usp.* **10** 509
- [6] Smith D R, Kroll N 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2933
- [7] Caloz C, Itoh T 2002 *IEEE Ante. Prop. Soci. Int. Symp.* **2** 412
- [8] Huangfu J, Ran L, Chen H, Zhang X M, Chen K, Grzegorzczk T

M, Kong J A 2004 *App. Phys. Lett.* **84** 1537

- [9] Chen H, Ran L, Huangfu J, Zhang X, Chen K, Grzegorzczk T M, Kong J A 2005 *App. Phys. Lett.* **86** 1
- [10] Lagarkov A N, Semenenko V N, Kisel V N, Chistyayev V A 2003 *J. Magn. Magn. Mat.* **161** 258
- [11] Ziolkowski R W 2003 *IEEE Trans. Ante. Prop.* **51** 1516
- [12] Smith D R, Rye P, Vier D C, Starr A F, Mock J J, Perram T 2004 *IEICE Trans. Electronics* **E87** C 359
- [13] Falcone F, Lopetegui T, Laso M A G, Baena J D, Bonache J, Beruete M, Marques R, Martin F, Sorolla M 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 197401
- [14] Moss C D, Grzegorzczk T M, Zhang Y, Kong J A 2002 *J. Electromagnetic Wav. App.* **16** 1445

# Design of C band planar LH metamaterial and verification of the BW property<sup>\*</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 11 October 2005 ; revised manuscript received 12 November 2005 )

## Abstract

A planar miniaturized left-handed ( LH ) metamaterial in C band is designed with broad bandwidth and low loss while the size of the unit cell is small and the structure is simple. In addition , the center of the frequency band where the LH metamaterial is applicable is tunable within the range of 4 to 20 GHz. A semi-infinite slab made of the planar LH metamaterial is simulated and the phase velocity is respectively extracted from the transmission and reflection data at normal incidence and the phase of wave front , results show the LH metamaterials studied exhibit backward wave ( BW ) properties in the frequency range of interest.

**Keywords :** left-handed ( LH ) metamaterial , broad band , miniaturized unit cell , backward wave ( BW ) 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 : blade@hit.edu.cn