

# 1.7—2.7GHz 宽频带小单元异向介质设计 及其介质参数提取\*

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 8 月 4 日收到, 2005 年 9 月 29 日收到修改稿)

提出一种单元电尺寸小、工作频带宽、损耗小、结构简单的异向介质设计方案, 在 1.7—2.7 GHz 上所设计的异向介质结构单元电尺寸小于 0.035, 相对带宽达到 45.5%, 在整个工作频带上单个结构单元传输损耗小于 0.75 dB. 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磁波反射、透射特性进行了数值仿真分析, 并提取出了电磁波在该异向介质平板中传播时的波数、相速、折射率以及该异向介质平板的有效介电常数和有效磁导率等一系列电磁特性参数, 仿真与计算结果表明复波数的实部、相速以及折射率的实部在 1.7—2.7 GHz 的范围上为负值, 并且在相同频带上, 有效介电常数和有效磁导率的实部同时为负值, 从而有效地验证了“后向行波效应”、“负折射效应”、“双负效应”等异向介质特有的电磁特性, 对上述异向介质的存在性给予有力证明.

关键词: 异向介质, 宽频带, 小单元, 介质参数

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学、材料科学、光学和应用电磁学领域内获得愈来愈广泛的青睐<sup>[1-4]</sup>. 异向介质的早期理论研究工作是由 Veselago 于 1968 年完成的<sup>[5]</sup>, 其研究结果指出异向介质具有一系列反常的电磁特性, 其中包括负折射效应、后向行波效应、双负效应等. 但是, 由于一直无法找到天然的异向介质, 导致有关异向介质的研究在近 30 年的时间里几乎未得到任何进展. 直到 2000 年 Smith 基于 Pendry 的研究结果通过将细导线阵列与 SRRs 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>[6-8]</sup>. 然而, 上述的异向介质距离实用阶段还有很长的路要走, 带宽窄、损耗大以及结构单元电尺寸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, 现有的异向介质可以分为两类: 一类是以 Caloz<sup>[9]</sup>在 2002 年设计的“左手传输

线”为代表的“传输线型异向介质”, 一类则是以 Smith 设计的“SRRs-TWs(Thin Wires)结构”以及 Ziolkowski 等人设计的“CLSs(Capacitively Loaded Strips)-CLLs(Capacitively Loaded Loops)结构<sup>[10]</sup>为代表的“粒子型异向介质”. 当前, 虽然传输线型异向介质在带宽、损耗方面都接近实际应用的要求, 但是由于结构上的限制它无法作为填充介质或是涂敷材料, 因此不可替代粒子型异向介质. 而现有粒子型异向介质的电磁性能并不理想, 距离实用阶段还有一定差距, 这是因为对粒子型异向介质设计而言, 不但要解决带宽和损耗问题, 还要求其结构单元尺寸足够小以及结构简单、易于制造, 这样才能便于将异向介质作为填充或涂敷材料应用, 体现其实用价值<sup>[10-12]</sup>. 2004 年 Smith 等人通过将“SRRs-TWs(Thin Wires)结构”进一步优化, 得到了工作在 11.5—13 GHz 的异向介质<sup>[12]</sup>, 与现有的粒子型异向介质相比较, 其电磁性能(相对带宽 12.3%, 平均每单元传输损耗小于 3 dB)处于世界领先水平<sup>[12]</sup>, 但仍然存在一些问题: 1) 结构较复杂, 影响电磁特性因素较多, 不利于改造和优化; 2) 结构单元尺寸较大, 12 GHz

\* 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: blade@hit.edu.cn

时单元电尺寸为 0.086, 13 GHz 时达到 0.096, 这将导致由这种结构单元构成的异向介质会由于结构单元本身尺寸大而无法被放置在某些空间狭小的地方, 譬如某些有尺寸限制的波导内部或者微带线的基板中, 从而影响其应用能力。

本文针对上述问题展开研究, 设计出了工作在 1.7—2.7 GHz, 相对带宽达到 45.5%, 平均每单元传输损耗小于 0.75 dB, 单元电尺寸小于 0.035 的宽频带小单元“粒子型异向介质”。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, 并从传输和反射数据中利用 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、折射率和波数等电磁参数, 计算结果表明: 在 1.7—2.7 GHz 上, 有效介电常数和有效磁导率的实部同时为负值, 并且折射率和波数的实部也均为负值。同时, 为进一步验证提取的有效介电常数和有效磁导率的正确性, 从而更加肯定地证实上述“双负效应”确实存在, 本研究利用等效替代的方法对具有同样负有效介电常数和负有效磁导率同样尺寸的均匀异向介质平板的电波传播特性进行了仿真, 仿真结果表明该均匀异向介质平板与由本文提出的异向介质结构单元构成的同样尺寸的异向介质平板具有同样的电波反射和透射特性。

## 2. 宽频带小单元粒子型异向介质设计

依据异向介质的传输线理论<sup>[9, 13, 14]</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<sup>[15, 16]</sup>。此结论为宽频带、低损耗、小单元粒子型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矩形金属环, 与金属环距离很近、分别位于其上下两端并且与其绝缘的两条金属带条以及作为结构载体的均匀介质构成。当电磁波沿  $X$  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, 其电感值可以利用

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

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; 而矩形环上下两端与其邻近的金属带条耦合形成沿传输方向的“串联”电容, 由于金属带条与矩形环的间距远小于带条的宽度和长度, 因此其电容值可以利用平行板电容计算公式来估算。这样, 图 1 所示的异向介质单元就可用如图 2 所示的等效电路结构来描述, 其中  $L_1$  和  $C_1$  分别为等效的并联电感和串联电容。因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。

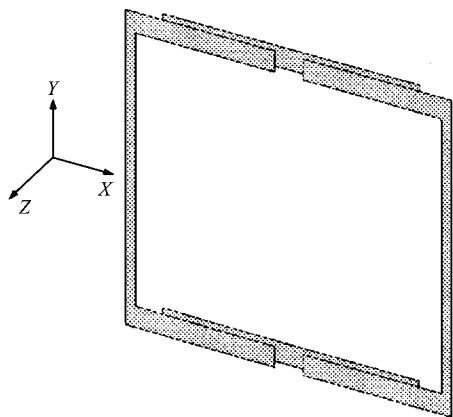


图 1 新型异向介质结构单元的三维示意图

当欲设计预定频段的宽频带小单元异向介质时, 首先利用 (1) 式和平行板电容计算公式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、耦合带条宽度和长度、耦合带条与矩形环间距以及结构单元间距, 然后利用 CST MW Studio 三维电磁场工具仿真确定上述参数。仿真模型如图 3 所示, 其中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, 波导中填充相对介电常数为 2.2 的介质 (聚丙烯材料), 而 4 个图 1 所示的异向介质单元则放置在波导中间, 并且在每个端口上入射波均沿法向方向从真

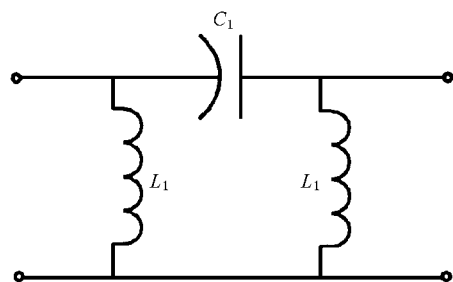


图 2 新型异向介质单元等效电路

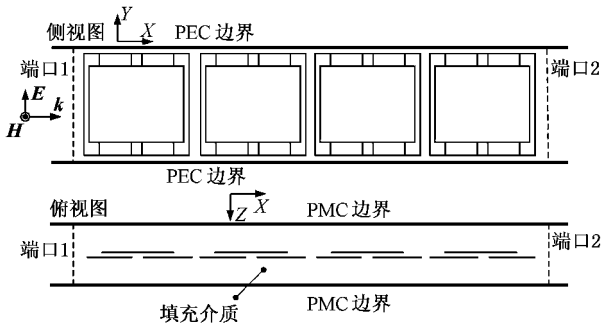


图 3 异向介质数值仿真模型结构

空中向波导中传播,这样,该仿真模型将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 1.7—2.7 GHz 产生异向介质的结构单元尺寸如图 4 所示,其中矩形环平行 Y 轴的两条边宽 0.13 mm,长 3.05 mm;平行 X 轴的两条边宽度为 0.26 mm,长度为 3.80 mm;矩形环开口宽度均为 0.26 mm;金属带条的宽度为 0.26 mm,长度为 3.30 mm,距离矩形环 0.05 mm.另外,两个 PMC 边界间距离为 0.50 mm,这个参数实际上代表的是阵元的横向间距.

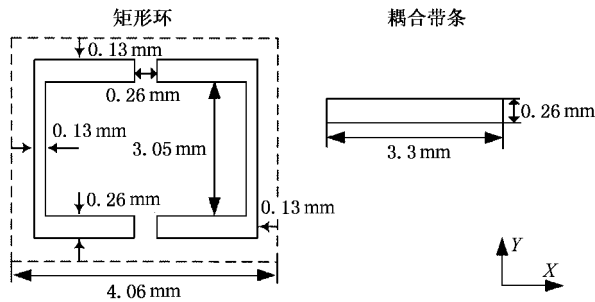


图 4 异向介质结构单元尺寸标注

在这样的结构参数下,通过计算机仿真得到的上述二端口波导的 S 参数幅度和相位随频率的变化曲线如图 5 所示.从图中可以看到,在 1.7—2.7 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.

而对于诸如波数、折射率、有效介电常数和有效磁导率等具体的电磁特性参数,则可以利用 NRW 方法从上述的 S 参数中提取出来,具体的提取算法在文献 [10] 中有详细描述.图 6 给出了波数实部和虚部的频率变化曲线,图中显示在 1.7—2.7 GHz 频带上波数的实部小于零,虚部近似为零,这意味着此

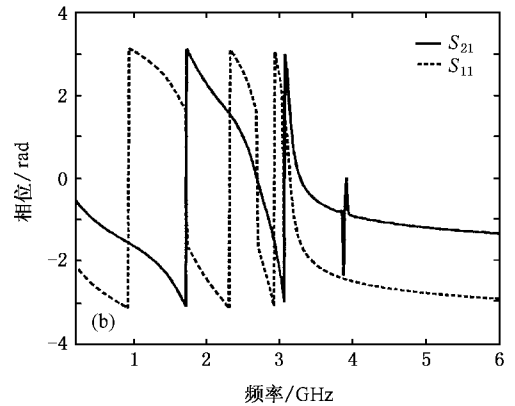
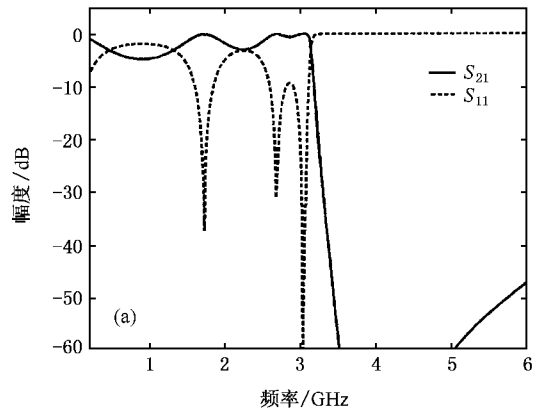


图 5 异向介质平板的 S 参数幅度、相位曲线 (a) S 参数幅度变化曲线 (b) S 参数相位变化曲线

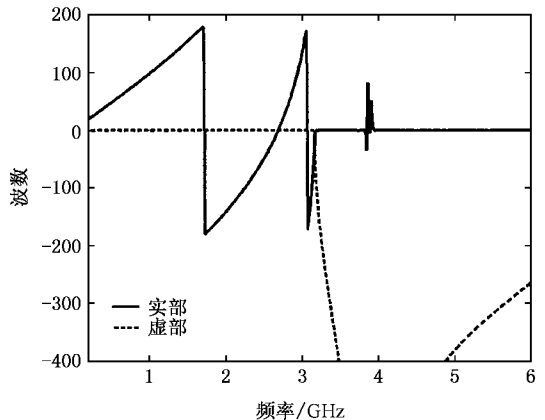


图 6 波数随频率的变化曲线

时电磁波的波前将沿着与群速相反方向传播;同时需要注意的是,在 3.2—6 GHz 上波数实部近似为零,而波数的虚部却较大,根据电波传播理论,此时电磁波将无法传播,而这一点可以从图 5(a)中得到证实.图 7 给出了相对于光速归一化的相速的频率

变化曲线, 可以看到在 1.7—2.7 GHz 频带上相速为负值, 在 3.2—6 GHz 上相速近似为零, 进一步肯定了上述的结论. 图 8 给出了异向介质平板折射率的频率变化曲线, 同样可以看到在 1.7—2.7 GHz 频带上折射率实部为负值, 虚部近似为零. 图 9, 10 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 1.7—2.7 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, 这样的条件决定了波数的实部、相速和折射率为负值; 在 3.2—6 GHz 上有效介电常数实部为正值, 有效磁导率实部为负值, 这样的条件决定了波数的实部近似为零并且电磁波无法传播.

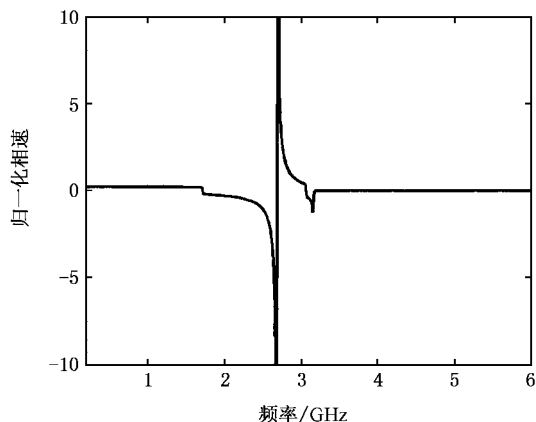


图 7 相速随频率的变化曲线

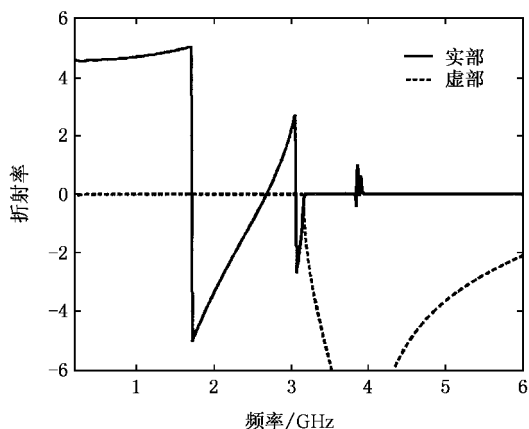


图 8 折射率随频率的变化曲线

另外, 为了进一步证明上述异向介质的存在性, 在这里将通过等效替代的方法对上述利用 NRW 方法提取出来的有效介电常数和有效磁导率两个参数的正确性进行验证. 验证的基本思路: 第一, 在 CST

MW Studio 中建立一个均匀介质长方体, 其长度为图 3 所示的 4 个结构单元的长度, 高度为图 3 中 PEC 边界间的距离, 厚度为图 3 中 PMC 边界间的距离; 第二, 将该均匀介质块的相对介电常数和相对磁导率设定为图 9 和图 10 给出的有效介电常数和有效磁导率的值, 需要注意的是, 当有效介电常数或有效磁导率小于 1 (包括小于零) 时, 可以利用软件中提供的 Drude 模型进行拟合, 拟合公式为

$$\epsilon_{\text{eff}} = 1 - \omega_{\text{pe}}^2 / (\omega^2 - j\omega\gamma_e), \quad (2)$$

$$\mu_{\text{eff}} = 1 - \omega_{\text{pm}}^2 / (\omega^2 - j\omega\gamma_m), \quad (3)$$

式中,  $\omega_{\text{pe}}$  和  $\omega_{\text{pm}}$  分别为等效的电、磁等离子体角频率,  $\gamma_e$  和  $\gamma_m$  分别为等效的电、磁等离子体碰撞频率; 第三, 将上述的均匀介质块放置在与图 3 所示相同的仿真环境中, 即设置同样的端口、PEC 边界和 PMC 边界, 最后, 用瞬态仿真器对上述模型进行仿真, 并

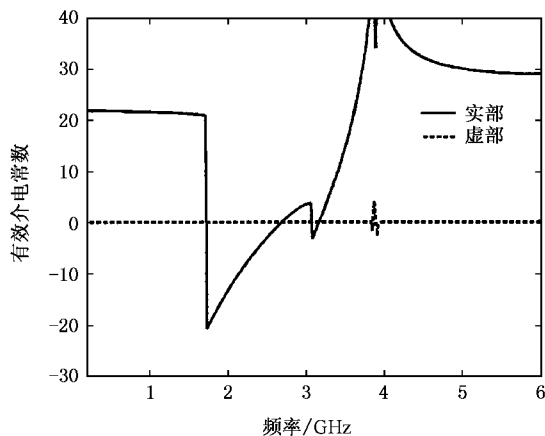


图 9 有效介电常数随频率的变化曲线

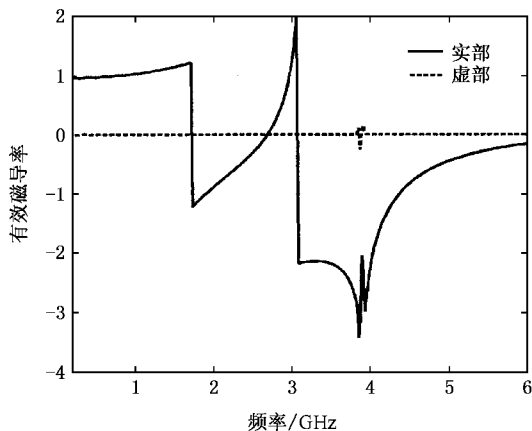


图 10 有效磁导率随频率的变化曲线

将获得的  $S$  参数(幅度和相位)与图 5 中的结果进行比较,如果二者相符合则验证了依据图 5 中的  $S$  参数数据提取出来的,如图 9 和图 10 所示的有效介电常数和有效磁导率的正确性。

图 11 和图 12 分别给出了通过在 20 个频点上(主要分布在 1.7—2.7 GHz 频带上)重复进行上述过程得到  $S_{21}$  的幅度和相位(散点)与图 5 所示  $S_{21}$  的幅度和相位(实线)的比较结果,可以看到结果符合得非常好,由此验证了图 9 和图 10 所示异向介质有效介电常数和有效磁导率随频率变化曲线的正确性,也最终证明了本文提出的异向介质的存在性。

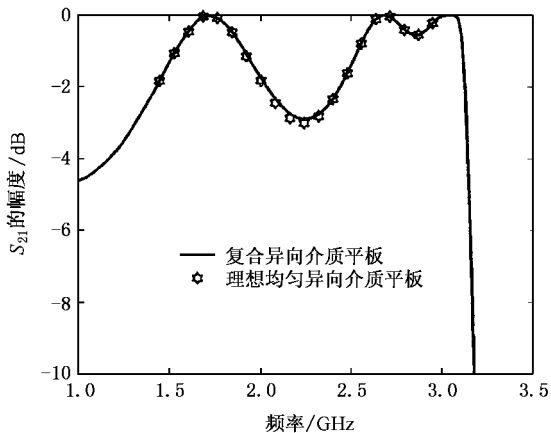


图 11 等效替代法得到  $S_{21}$  幅度与图 5 中的结果比较

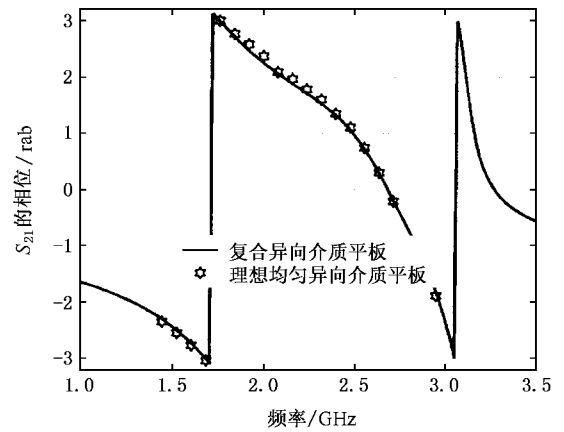


图 12 等效替代法得到  $S_{21}$  相位与图 5 中的结果比较

### 3. 讨论与结论

本文的研究结果表明,通过在粒子型异向介质设计中合理借鉴传输线型异向介质的构造机理,可以构造出性能优良的异向介质单元.本文设计的异向介质单元稳定工作在 1.7—2.7 GHz 上,单元电尺寸小于 0.035,相对带宽达到 45.5%,在整个工作频带上单个结构单元最大传输损耗小于 0.75 dB,优良的电磁性能以及小的单元尺寸使具有广泛的应用前景,而具有类似结构的二维异向介质单元也正在研究中。

[1] Zhuang F, Shen J Q 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 955 (in Chinese)  
[庄 飞、沈建其 2005 物理学报 **54** 955]

[2] Pendry J B 2004 *Science* **306** 1353

[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、康 雷、赵 乾、付全红、宋 娟、赵晓鹏 2005 物理学报 **54** 1607]

[4] Zhao Q, Zhao X P, Kang L, Zhang F L, Liu Y H, Luo C R 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2206 (in Chinese)[赵 乾、赵晓鹏、康雷、张富利、刘亚红、罗春荣 2004 物理学报 **53** 2206]

[5] Veselago V G 1968 *Soviet Physics Usp.* **10** 509.

[6] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Trans. Micro. Theo. Tech.* **47** 2075

[7] Smith D R, Kroll N 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2933

[8] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1998 *J. Phys. Cond. Matt.* **10** 4785

[9] Caloz C, Itoh T 2002 *IEEE Ante. Prop. Soci. Int. Symp.* **2** 412

[10] Ziolkowski R W 2003 *IEEE Trans. on Ante. and Prop.* **51** 1516

[11] 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

[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] Zhang D K, Zhang Y W, He L, Li H Q, Chen H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 772 (in Chinese)[张东科、张冶文、赫 丽、李宏强、陈鸿 2005 物理学报 **54** 772]

[14] Grbic A, Eleftheriades G V 2002 *J. App. Phys.* **92** 5930

[15] Yao H Y, Xu W, Li L W, Wu Q, Yeo T S 2005 *IEEE Trans. Micro. Theo. Tech.* **53** 1469

[16] Xu W, Li L W, Wu Q, 2004 *IEEE Ante. Prop. Soci. Int. Symp.* **4** 3792

# Design and modeling for 1.7—2.7 GHz broad-band left-handed material with miniaturized unit cell and its characterization<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 4 August 2005 ; revised manuscript received 29 September 2005 )

## Abstract

An 1.7—2.7 GHz broad-band left-handed ( LH ) metamaterial with miniaturized unit cell is designed. The relative bandwidth of designed metamaterial is up to 45.5% , the electrical length of its unit cell is less than 0.035 , and the transmission loss per unit cell is less than 0.75 dB in the whole operational band of the LH metamaterial. In this paper , the reflection and transmission characteristics of a semi-infinite LH metamaterial plate consisting of LH metamaterial cells is simulated , and the wave number , phase velocity , refraction index , effective permittivity and effective permeability are calculated. The results show the real part of the wave number and the refraction index and the velocity are negative while the real part of the effective permittivity and effective permeability are both negative in the 1.7—2.7 GHz band range.

**Keywords** : left-handed metamaterial , broad band , miniaturized unit cell , constitutive parameters

**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