

负折射指数物质中金属线对电磁波的影响*

冯 宇^{1)†} 吴 健²⁾ 宋建平¹⁾

1) 西安交通大学, 电子科学系, 西安 710049)

2) 中国电波传播研究所, 电波环境及模化技术国家重点实验室, 北京 102206)

(2005 年 11 月 23 日收到, 2005 年 11 月 30 日收到修改稿)

构造两种结构负折射指数物质(NRM)利用数值模拟计算两种结构的 S 参数. 由于这种结构尺度比波长小, 为精确利用有限积分技术(FIT)进行模拟. 通过对这两种结构中金属线位置变化对金属谐振频率影响进行模拟, 最后得出由于金属线与谐振环耦合, 金属线对称破缺影响谐振环谐振频率和通带, 并对等效负折射指数为负的频带产生影响.

关键词: 负折射率, 左手物质, 通带, 金属线对称破缺

PACC: 4270Y, 6170E, 2570E

1. 引 言

Veselago^[1] 1968 年从理论上预测了等效介电常数、磁导率、折射率都可以为负值. 而在此之前人们一直认为介电常数(ϵ)和磁导率(μ)小于 0 的解在物理上是不存在的. 正是因为这一点, 这个问题沉寂了几十年. 直到 20 世纪 90 年代中期人们开始认识到等效介电常数(ϵ)和磁导率(μ) < 0 的情况, 在 2001 年 Smith 试验证实了负折射指数物质存在^[2]. 从此以后围绕负折射指数物质的研究成为国际热点.

负折射结构具有自然界没有的等效介电常数和等效磁导率为负特性. 如果一种媒质等效介电常数和等效磁导率的实部是负数, 并且虚部很小, 在某一频段暂时可以忽略, 依据麦克斯韦方程, 矢量 E, H 和波矢量 k 之间满足左手定律, 因此这种媒质称为左手物质(LHM), 又称双负物质(DNG), 负折射指数物质(NRM), 现在比较广泛接受的叫法为 metamaterials^[3] (异向媒质). 它与光子晶体和 PBG (photonic band-gap)^[4] 物质不同, 光子晶体和 PBG 的特性是周期结构阵 Bragg 散射的结果. 而在 NRM 中周期性相比单个散射谐振显得不太重要了. 我们知道对原子和分子, 在外部场的激励下都有自己的谐振频率. 现在把这种概念扩展到 NRM 中, 组成 NRM

每一个元素都有自己的谐振频率, 外场的作用, 非但没有抵消单个元素的共振, 而且加强了这种谐振. 当外场的频率低于谐振频率时, 响应与外场同相变化, 当外场频率高于谐振频率时, 响应与外场反相变化. 假如谐振的幅度很大, 那么将会使得 NRM 的等效介电常数(ϵ)和等效磁导率(μ)为负.

如图 1 在第一象限, 媒质为正常物质, 在第二和第四象限, $k^2 < 0$, 传播平面波为 $E = E_0 \exp[inkx]$, 振幅指数衰减不能传播, 成为 Evanescent 波. 第三象限电磁波可以传播, 但能流 S 方向与相速 k 的方向相反. 这些人工微结构物质可以对几赫兹^[5] 到近红外频率响应, 这包括无线电频率、微波和太赫兹频率. 此时的等效介电常数与等效磁导率都表现出特殊的性质.

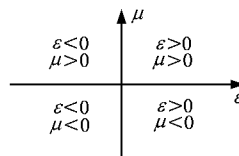


图 1 依 ϵ, μ 的性质对物质进行分类

2001 年 Shelby, Smith 等首次制造出了 NRM^[2], 同时具有负等效介电常数和负等效磁导率, 并在试验验证了负折射存在, 其研究成果发表在 2001 的

* 电波环境及模化技术国家重点实验室基金资助

† E-mail: fy1972@126.com

《science》上,由此世界掀起了研究 NRM 的热潮. 2001 年 Ziolkowski 和 Heyman^[6]利用模拟方法证实 NRM 存在. 接下来各种各样的 NRM 被制造出来^[7,8],如谐振环结构,Wire-mesh 结构,Swiss Roll 结构,金属圆柱结构,磁共振结构等等 NRM. 2002 年美国衣阿华州立大学 Ames 实验室 Soukoulis 教授利用传输矩阵对 SRR 结构进行模拟^[9]. 新加坡国立大学李乐伟教授构造出负折射单元并试验验证,与局量法和快速算法进行模拟结果一致^[10].

中科院物理所与电子所合作对不同介电常数的基质进行研究,发现当介电常数从 3.7 到 4.8 增大时,负折射指数谐振频率从 10.57 到 9.74GHz 减少^[11].

在实际负折射指数物质加工中,加工精度总是受各种条件限制,谐振环单元中金属线位置造成偏移,偏移对负折射特性造成什么影响研究在实际工程设计中具有重要意义^[12]. 下面首次利用有限积分法模拟金属线变化对负折射谐振频率和通带的影响.

2. 基本理论

FIT 是一套完备的数学理论,是麦克斯韦积分方程在网格空间上的离散形式. 早在 1977 年由托马斯·魏兰特教授(Thomas Weiland)^[13]引入,进而成为其后在电磁仿真领域中一个重要算法的基石. 由 FIT 所导出的矩阵方程保持了解析麦克斯韦方程各种固有的特性,如:电荷守恒性和能量守恒性. 解析下的梯度、散度和旋度算子在 FIT 下具有一一对应的矩阵. 这些矩阵满足解析形式下的算子恒等式. 故 FIT 保证了非常好的数值收敛性. 另一个区别于其他算法的关键之处在于 FIT 可被用于所有频段的电磁仿真问题中. 有限体积离散麦克斯韦等式依赖积分平衡,且能使离散场保持稳定和收敛,避免高次模的出现. 离散化计算区域 Ω 为 V_i , 计算区域集合 G 为

$$G := \{V_{i,j,k} \in R^3 \mid V_{i,j,k} := [x_i, x_{i+1}] \times [y_i, y_{i+1}] \times [z_i, z_{i+1}], \\ i = 1 \dots I-1, j = 1 \dots j-1, \\ k = 1 \dots K-1\},$$

I, J, K 为计算区域在 x, y, z 上总离散数. G 代表双离散旋度, \hat{G} 对偶双离散散度(如图 2 所示).

格点电压 $\hat{e}_i = \int \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \cdot d\mathbf{s}$, $\hat{h}_j = \int \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) \cdot d\mathbf{s}$,

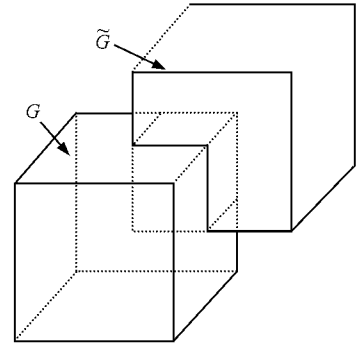


图 2 空间网格对 $\{G, \hat{G}\}$

$$\text{格点流 } \hat{d}_i = \int \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) \cdot d\mathbf{A},$$

$$\hat{b}_j = \int \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) \cdot d\mathbf{A}, \quad \hat{j}_j = \int \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) \cdot d\mathbf{A},$$

全集叫麦克斯韦格点等式 (Maxwell-Grid-Equations)^[14]

$$\mathbf{C}\hat{e} = -\frac{d}{dt}\hat{\mathbf{b}}, \quad \hat{\mathbf{C}}\hat{h} = -\frac{d}{dt}\hat{\mathbf{d}} + \hat{\mathbf{j}},$$

$$\hat{\mathbf{S}}\hat{b} = 0, \quad \hat{\mathbf{S}}\hat{d} = q,$$

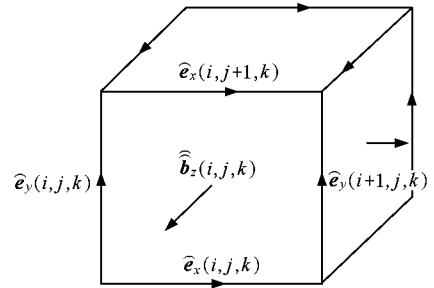


图 3 元胞 $V_{i,j,k}$ 的格点电压与磁流示意图

如图 3 所示,麦克斯韦格点方程在时间上迭代求解,与 FDTD 类似可以逐步推进地求得以后各个时刻空间电磁场的分布. 边界采用理想边界拟合 (Perfect Boundary Approximation——PBA). 它使得长方形网格中材料的填充形式可以任意(单连通或复连通). 由于此技术,软件不但保持了通常 FDTD 的快速,而且还使其精度大为提高.

3. 模拟金属线变化对负折射谐振频率的影响

为了模拟 NRM 的特性,我们取两种元胞结构:两单元 SRR 与金属线(见图 4),四单元 SRR 与金属

线(见图5).电磁波传播方向沿 X 向,在 X 向选取完全匹配层吸收边界条件(PML),在 Y 和 Z 向选取周期性边界条件.

取单元长度为 15.5mm ,SRR芯半径 0.01mm ,

两金属环间距 0.29mm ,金属选择铜电导率为 640000 (S/m).算法采用有限积分(Finite Integration)^[13]进行模拟,选取波长 $1/100$ 为步长,通过计算 S 参数可得图5和图6.

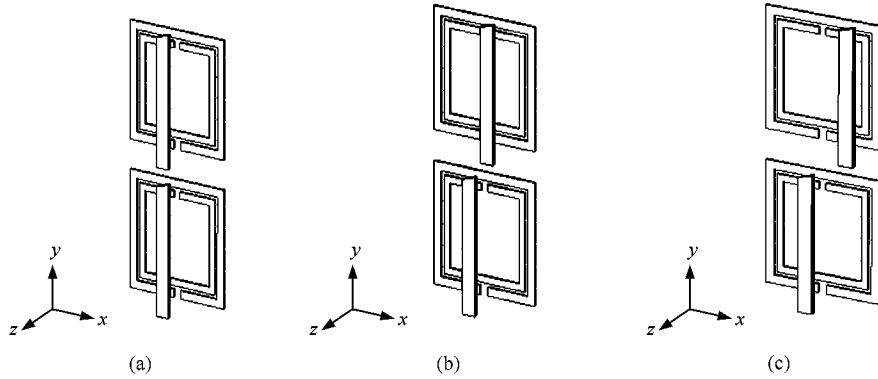


图4 两单元 SRR 和金属线结构 (a) $p=1$ 代表金属线处于环中心 (b) $p=2$ 代表金属线偏离环中心相对单元长度 6% (c) $p=3$ 代表金属线偏离环中心相对单元长度 12%

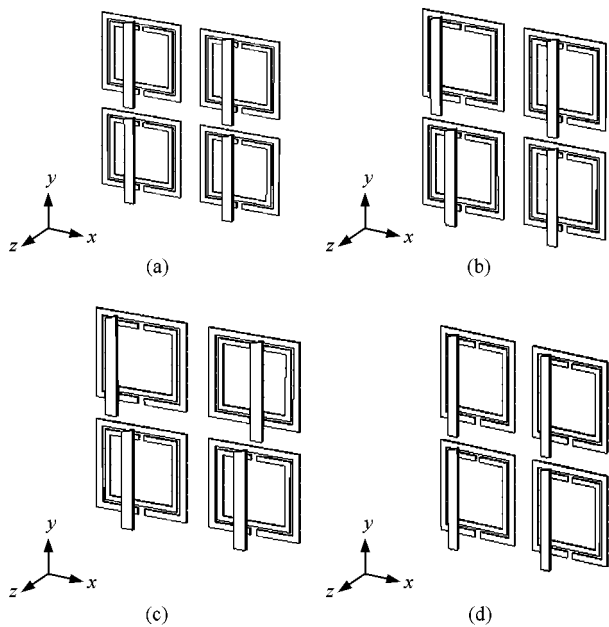


图5 四单元 SRR 和金属线结构 (a) $p=1$ 代表金属线处于环中心 (b) $p=2$ 代表金属线偏离环中心相对单元长度 6% (c) $p=3$ 代表两金属线偏离环中心相向偏离单元长度 6% (d) $p=4$ 代表金属线全部偏离环中心单元长度 6%

取谐振峰的 $1/2$ 作为通带(低于 15dB),通带带宽为 0.9GHz .在此带宽内电磁波可以通过,此时等效介电常数和等效磁导率为负,位于图1的第三象限,相应等效折射率为负.可见金属线的移动没有改

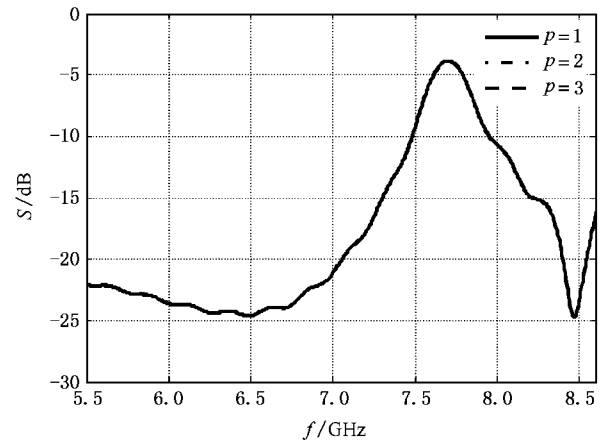


图6 模拟两单元 SRR 和金属线结构吸收 p 说明同图4

变谐振频率,通带没有改变.

对于四单元结构吸收低于 10dB 的通带宽度为 34MHz ,等效介电常数和等效磁导率同时为负,位于图1的第三象限,相应等效折射率为负,从图7可以看出对于四单元组成的元胞结构,由于对称性的破坏,其谐振频率和通带带宽发生微小变化.

4. 讨 论

在前人研究中,只偏重对某一结构进行研究,而对结构变化带来影响没有涉及.文章从两种结构的SRR与金属线组成的NRM出发,模拟金属线变化对

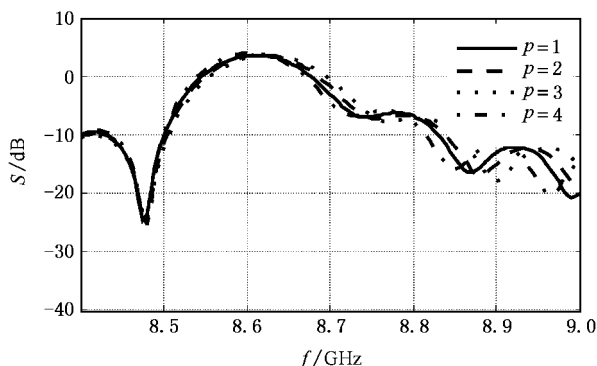


图 7 模拟四单元 SRR 和金属线结构吸收 (a) $p=1$ 代表金属线处于环中心 (b) $p=2$ 代表金属线偏离环中心相对单元长度 6% (c) $p=3$ 代表上两金属线偏离环中心相向偏离单元长度 6% (d) $p=4$ 代表金属线全部偏离环中心单元长度 6%

谐振频率的影响,结果表明,金属线对称的破缺对谐振频率和负折射指数有影响.在第 1 种结构虽然改变了金属线的位置,但整体对称性没有改变,因此其谐振频率没有改变,通带带宽也没有变化.第 2 种结构,金属线位置的改变,使其整体对称性破缺,谐振频率和通带都发生变化.其解释为,由于金属线和 SRR 存在较强的耦合作用,金属线位置的变化破坏了材料结构的周期性,改变了谐振条件,从而使其谐振峰发生变化,具有负折射指数的频段发生变化.这一结果在负折射指数物质实际工程应用中具有重大的参考价值.可以利用改变金属线的位置来制成频率选择器.对 NRM 金属线位移研究对于可控控左手材料的实现有着重要的指导意义.

[1] Veselago V G 1968 *Soviet Physics Uspekhi* **10** 509
 [2] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
 [3] Pendry J B 2004 *Contemp. Phys* **45** 191
 [4] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059. Yablonovitch E 1993 Photonic band-gap crystals. *J. Phys. Condens. Matter* **5** 2443
 [5] Pendry J B, O'Brien S 2002 *J. Phys. Condens. Matter* **14** 7409
 [6] Ziolkowski R W, Heyman E. 2001 *Phys. Rev. E* **64** 056625
 [7] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
 [8] Pendry J B, Ramakrishna S A 2002 *J. Phys. Condens. Matter* **14** 8463
 [9] Markos P, Soukoulis C M 2002 *Phys. Rev. E* **65** 036622
 [10] Yao Hai-Ying, Xu Wei, Li Le-Wei, Wu Qun, Yeo Tat-Soon 2005 *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND*

TECHNIQUES **53** 1469
 [11] Quan B G, Li C, Sui Q, Li J J, Liu W M, Li F, Gu C Z 2005 *Chinese Physics Letters* **22** 1243
 [12] 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]
 Zhao Q, Zhao X P, Kang L, Zhang F L, Liu Y H, Luo C C 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2206 (in Chinese) [赵乾、赵晓鹏、康雷、张富利、刘亚红、罗春草 2004 物理学报 **53** 2206]
 [13] Weiland T 1977 *Electronics and Communications AEUE* **31** 116
 [14] Clemens M, Weiland T 2001 *Progress in Electromagnetics Research* **32** 65

The effect of wires in negative refractive index material^{*}

Feng Yu^{1)†} Wu Jian²⁾ Song Jian-Ping¹⁾

¹⁾ *Department of Electronic Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*

²⁾ *National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radiowave Propagation, Beijing 102206, China*

(Received 23 November 2005 ; revised manuscript received 30 November 2005)

Abstract

Two structures of left handed metamaterials were proposed. Using numerical simulation, the S parameters for the two structures were calculated. Because the electromagnetic fields in conducting metamaterials can be localized to regions much smaller than the incident wavelength, it can be difficult to perform accurate numerical simulations. To obtain greater numerical accuracy, finite integration technique (FIT) was used. The results show that the wire symmetry breaking affects the resonant frequency and passband for SRR owing to the coupling between wires and SRR.

Keywords : negative refractive index, left-handed material, passband, wire symmetry breaking

PACC : 4270Y, 6170E, 2570E

^{*} Project supported by the Foundation of National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China

[†] E-mail: fy1972@126.com