

外加恒定磁场复合微波媒质负折射率条件

李天倩^{1,2}, 文光俊², 谢康³, 阳小明¹

(1. 西华大学电气信息学院 成都 610039; 2. 电子科技大学通信与信息工程学院 成都 610054;
3. 电子科技大学宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室 成都 610054)

【摘要】以亚铁磁媒质-YIG为基体, 在其中嵌入金属导体线阵列是人工合成负折射率微波媒质的一种新方法。该方法采用了复合媒质磁导率张量的修正有效媒质理论, 并推导出复合媒质介电常数张量的修正有效媒质理论, 把在恒定磁场作用下复合媒质宏观上等效为一种磁导率和介电常数都为各向异性的媒质。分析得到了等效磁导率和等效介电常数张量, 做出了色散曲线, 获得了负折射率条件。

关键词 有效媒质理论; 等效磁导率; 等效介电常数; 负折射率微波媒质
中图分类号 TN61 **文献标识码** A

NRI Condition of Composite Microwave Medium under an External Magnetic Bias Field

LI Tian-qian^{1,2}, WEN Guang-jun², XIE Kang³, and YANG Xiao-ming¹

(1. School of Electrical and Information, Xihua University Chengdu 610039;
2. School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;
3. Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks, Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract Incorporating array of metallic wires into the host media, such as ferrimagnet YIG under an external magnetic bias field, is a novel method to synthesize negative refractive index (NRI) material. A modified effective medium theory of composite medium permittivity tensor is deduced. In our theory, the composite medium in the mass are transformed into an equivalent media that both permeability and permittivity are anisotropic. The effective permeability and permittivity tensors are calculated, the dispersive curves are presented, and the negative refractive condition is obtained by analysis.

Key words effective medium theory; effective permeability; effective permittivity; negative refractive index microwave medium

负折射率微波媒质是在微波波段等效介电常数和等效磁导率同时为负, 因而具有负折射现象的人工合成物质^[1-5]。

文献[6]提出了一种人工合成负折射率微波媒质的新方法, 以外加磁场作用时等效磁导率为负的亚铁磁媒质-YIG为基体, 在其中嵌入等效介电常数为负的金属导体线阵列宏结构, 利用了有效媒质理论来分析复合媒质的等效介电常数与等效磁导率。本文对这种等效提出了异议。在外加恒定磁场下, 组成复合媒质的亚铁磁材料-YIG和等效为等离子体的金属导线阵列都会表现出各向异性, 即亚铁磁材料-YIG的磁导率和等效等离子体的介电常数为张量。

文献[6]先求亚铁磁材料-YIG的等效磁导率和等效等离子体的等效介电常数参数, 再用标量的有效媒质理论等效得到的结果对证明这种负折射率媒质实现方法可行有重要意义, 但在具体应用时很不准确, 物理意义也不清楚。本文使用修正的张量有效媒质理论可以弥补以上不足, 并具有明确的物理意义, 可作为分析此类问题的一个简单通用方法。

1 外加恒定磁场复合媒质模型

设外加恒定磁场下复合媒质模型由两种媒质组成, 媒质1嵌入媒质2中。

媒质1: 等效为等离子体的金属线阵列, 磁导率

收稿日期: 2008-01-28; 修回日期: 2008-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(60571024、60771046、60588502)

作者简介: 李天倩(1976-), 女, 博士生, 主要从事信号处理、微波毫米波射频集成电路、电磁场与微波技术方面的研究。

$\mu_1 \approx \mu_0$, 张量介电常数 $\epsilon_1(\omega)$, 体积分数 F_1 。

媒质2: 铁氧体YIG, 张量磁导率 $\mu_2(\omega)$, 介电常数 $\epsilon_2 = 12.7\epsilon_0$, 体积分数 F_2 。

假设复合媒质无限大且均匀, 即不考虑边界影响; 外加恒定磁场 \mathbf{B}_0 (使铁氧体磁饱和, 此时损耗很小可忽略) 与电磁波传播方向 (设为Z轴正向) 同向。

为了简化分析, 本文将等离子体等效为介质, 并只讨论电子的运动。

2 负折射率实现条件

在恒定磁场作用下, 铁氧体磁导率和等离子体的介电常数是张量, 都呈现各向异性; 在无磁场作用下, 铁氧体磁导率和等离子体介电常数是标量, 都呈现各向同性, 是普通的各向同性介质^[7]。本文重点讨论在恒定磁场作用下复合媒质的电磁特性。由麦克斯韦方程组可导出电磁波在铁氧体和等离子体复合媒质中传播的特性。将微观上的电磁极化作用, 用表现在宏观上的总作用效果作等效更合理; 而原有理论是对等效磁导率和等效介电常数进行按体积分数再等效。根据修正的有效媒质理论^[8], 可在恒定磁场作用下复合媒质宏观上等效为一种磁导率和介电常数都为各向异性的媒质, 得到等效磁导率 μ_{eff} 和等效介电常数 ϵ_{eff} 张量, 出色散曲线, 进一步可分析其负折射率条件。

2.1 电磁波复合媒质中传播的特性^[7-9]

2.1.1 复合媒质等效磁导率张量

铁氧体在外加恒定磁场 \mathbf{B}_0 时的磁导率为^[9]:

$$\mu_2 = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \mu_{23} \\ \mu_{31} & \mu_{32} & \mu_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & 0 \\ \mu_{21} & \mu_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中

$$\mu_{11} = \mu_{22} = \mu_0 \left(1 + \frac{\omega_c \omega_m}{\omega_c^2 - \omega^2} \right)$$

$$\mu_{12} = -\mu_{21} = j\mu_0 \left(\frac{\omega \omega_m}{\omega_c^2 - \omega^2} \right)$$

$$\mu_{33} = \mu_0, \quad \omega_c = \mu_0 \gamma_e H_0 = \frac{e}{m} B_0$$

$$\omega_m = \mu_0 \gamma_e M_0 = \frac{e}{m} \mu_0 M_0$$

其中, μ_0 为真空中的磁导率; $\gamma_e = \frac{e}{m}$ 为回磁比; e 为电子电荷的绝对值; m 为电子质量。

当 $\omega_m = 0$, 即无外磁场时, μ_2 变为标量。

等离子体磁导率 $\mu_1 \approx \mu_0$, 即等离子体没参与磁极化, 其磁极化率为0。所以, 等效磁极化率张量为:

$$\chi_{\text{eff}} = F_2 \chi = F_2 \begin{bmatrix} \chi_{11} & \chi_{12} & 0 \\ \chi_{21} & \chi_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

式中 F_2 为铁氧体的体积分数; $\chi_{11} = \chi_{22} = \frac{\omega_c \omega_m}{\omega_c^2 - \omega^2}$; $\chi_{12} = -\chi_{21} = j \frac{\omega \omega_m}{\omega_c^2 - \omega^2}$ 。

复合媒质等效磁导率张量为:

$$\mu_{\text{eff}} = (\mathbf{U} + \chi_{\text{eff}}) \mu_0 = \begin{bmatrix} \mu_{xx} & \mu_{xy} & 0 \\ \mu_{yx} & \mu_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{bmatrix}$$

式中

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mu_{xx} = \mu_{yy} = (1 + F_2 \chi_{11}) \mu_0 =$$

$$(1 + F_2 \frac{\omega_c \omega_m}{\omega_c^2 - \omega^2}) \mu_0$$

$$\mu_{xy} = -\mu_{yx} = j F_2 \chi_{12} \mu_0 =$$

$$j F_2 \frac{\omega \omega_m}{\omega_c^2 - \omega^2} \mu_0$$

2.1.2 复合媒质等效介电常数张量

等离子体在外加恒定磁场 \mathbf{B}_0 时介电常数为^[9]:

$$\epsilon_1 = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & 0 \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中

$$\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = \epsilon_0 \left(1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_c^2 - \omega^2} \right)$$

$$\epsilon_{12} = -\epsilon_{21} = j \epsilon_0 \left(\frac{\omega_p^2 \omega_c}{\omega_c^2 - \omega^2} \right)$$

$$\epsilon_{33} = \epsilon_0 \left[1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right]$$

电极化率分量为 $\chi'_{11} = \chi'_{22} = \frac{\omega_p^2}{\omega_c^2 - \omega^2}$, $\chi'_{12} =$

$-\chi'_{21} = j \frac{\omega_p^2 \omega_c}{\omega_c^2 - \omega^2}$, $\chi'_{33} = -\frac{\omega_p^2}{\omega^2}$ 。其中 $\omega_c = \mu_0 \gamma_e H_0 =$

$\frac{e}{m} B_0$; $\omega_p = \frac{N e^2}{m \epsilon_0}$ 为等离子体频率; ϵ_0 为真空中的介电常数; e 为电子电荷的绝对值; m 为电子质量; N

为每立方米自由电子数。

当 $\omega_m = 0$, 即无外磁场时, ϵ_1 变为标量。

若铁氧体 YIG 介电常数 $\epsilon_2 = \epsilon_{r2}\epsilon_0 = 12.7\epsilon_0$, 即电极化率为 $\chi'_2 = \epsilon_{r2} - 1 = 12.7 - 1 = 11.7$, 是标量, 则等效电极化率张量为:

$$\chi'_{\text{eff}} = F_1\chi'_1 + F_2\chi'_2U$$

式中 F_1 为等离子体的体积分数; F_2 为铁氧体的体积分数。

同理, 复合媒质等效介电常数张量为:

$$\epsilon_{\text{eff}} = (U + \chi'_{\text{eff}})\epsilon_0 = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & 0 \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{bmatrix}$$

式中

$$U = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = (F_1\chi'_{11} + F_2\chi'_2 + 1)\epsilon_0 =$$

$$\left(F_1 \frac{\omega_p^2}{\omega_c^2 - \omega^2} + F_2\chi'_2 + 1 \right) \epsilon_0$$

$$\epsilon_{xy} = -\epsilon_{yx} = F_1\chi'_{12}\epsilon_0 = jF_1 \frac{\omega_p^2 \omega_c}{\omega_c^2 - \omega^2} \epsilon_0$$

$$\epsilon_{zz} = (F_1\chi'_{33} + F_2\chi'_2 + 1)\epsilon_0 =$$

$$\left[F_1 \left(-\frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right) + F_2\chi'_2 + 1 \right] \epsilon_0$$

2.2 传播常数

由麦克斯韦方程可得, 复合媒质的波动方程为:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \omega^2 \mu_{\text{eff}} \cdot \epsilon_{\text{eff}} \cdot \mathbf{E} = 0$$

若传播常数 $\beta_{\text{eff}\pm}$ 为实数, 即波可继续传播。下标 “+” 对应右旋圆极化波, 下标 “-” 对应左旋圆极化波, 即有:

$$\beta_{\text{eff}\pm} = \omega \sqrt{(\mu_{xx} \mp j\mu_{xy})(\epsilon_{xx} \mp j\epsilon_{xy})} = \omega \sqrt{\mu_0 \mu_{\text{reff}\pm} \epsilon_0 \epsilon_{\text{reff}\pm}} \quad (3)$$

式中

$$\mu_{\text{reff}\pm} = 1 + F_2 \frac{\omega_c \omega_m}{\omega_c^2 - \omega^2} \pm F_2 \frac{\omega \omega_m}{\omega_c^2 - \omega^2}$$

$$\epsilon_{\text{reff}\pm} = F_1 \frac{\omega_p^2}{\omega_c^2 - \omega^2} + F_2\chi'_2 + 1 \pm F_1 \frac{\omega_p^2 \omega_c}{\omega_c^2 - \omega^2}$$

分析等效磁导率和等效介电常数可知, $\mu_{\text{reff}+}$ 在一定范围内为负, $\mu_{\text{reff}-}$ 不会为负; $\epsilon_{\text{reff}+}$ 在一定范围内为负, $\epsilon_{\text{reff}-}$ 在一定频率范围内为负。可见, 只有对右旋圆极化波可能出现等效磁导率和等效介电常

数双负, 使电磁波可以在负折射率下传播^[1,10]。

2.3 复合媒质理论色散曲线

以上推导的结果在运用时可不考虑形状, 只考虑体积分数。本文选以下模型作为实例进行仿真验证: 设定媒质1为金属导体线采用方形带状结构, 其三维尺寸 X 、 Y 和 Z 分别为0.3 mm、4.0 mm和0.3 mm。媒质1嵌入到媒质2 YIG基体中。媒质2 YIG三维尺寸 X 、 Y 、 Z 分别为24 mm、4 mm和40 mm。外加恒定磁场 \mathbf{H}_0 与波传播方向(设为 Z 轴正向)同向。设置YIG在外加磁场 $|\mathbf{H}_0| = 284\ 093\ \text{A/m}$ 作用下, 其饱和磁化强度 $4\pi M_s = 0.018\ \text{T}$ ^[7], $\Delta\mathbf{H} = 5\ 968\ \text{A/m}$ 。媒质2 YIG相对介电常数 $\epsilon_r = 12.7$ 。

由式(3)可得, 用MATLAB得到上述复合媒质对右旋圆极化波的颜色散曲线, 如图1所示。图中波频率为0~10 GHz时, 等效介电常数和等效磁导率同时为正, 波可以传播, 折射率为正; 图中波频率为10~15 GHz时, 等效介电常数和等效磁导率同时为负, 波可以传播, 折射率为负。

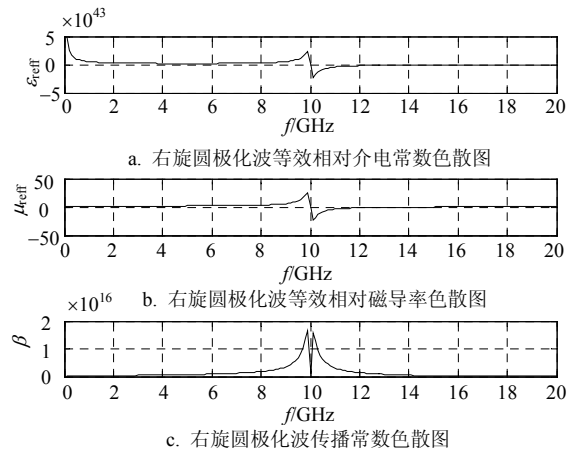


图1 外加恒定磁场与波传播方向同向, 右旋圆极化波的仿真色散曲线

3 结论

外加恒定磁场下等离子体介电常数和铁氧体磁导率为张量。本文用修正的有效媒质理论, 即将微观上的电磁极化作用效果用其表现在宏观上的总作用效果来等效, 可得到等离子体和铁氧体构成的复合媒质的等效介电常数和等效磁导率表达式, 进一步得到传播常数表达式。只有对右旋圆极化波, 才有等效介电常数和等效磁导率同时为负的情况发生, 可实现负折射率下波的传播。

参 考 文 献

[1] RACHFORD F J, ARMSTEAD D N, HARRIS V G, et al. Simulations of ferrite-dielectric-wire composite negative index materials[J]. Phys Rev Lett, 2007, 99(5): 057202.

- [2] CHEN Jiang-wei, TANG Dong-ming, ZHANG Bao-shan, et al. Left-handed materials made of dilute ferromagnetic wire arrays with gyrotropic tensors[J]. Appl Phys, 2007, 102(2): 023106.
- [3] PIMENOV A, LOIDL A, GEHRKE K, et al. Negative refraction observed in a metallic ferromagnet in the gigahertz frequency range[J]. Phys Rev Lett, 2007, 98(19): 197401.
- [4] NEFEDOV I S, TAROT A C, ABDOUNI W. Novel metamaterial: magnetized ferrite-wire medium[C]//Loughborough Antennas Propag Conf Proc Loughborough. United Kingdom: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2007.
- [5] NEFEDOV I S, TAROT A C, MAHDJOUBI K. Wire media-ferrite substrate for patch antenna miniaturization[C]//Conf Proc IEEE Int Workshop Antenna Technol Small Smart Antennas Metamater Applic. Piscataway, United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2007: 101-104.
- [6] 曹云建, 文光俊, 吴凯敏, 等. 人工合成负折射率微波媒质的一种新方法[J]. 电子科技大学学报, 2007, 36(4): 716-719.
- CAO Yun-Jian, WEN Guang-jun, WU Kai-min, et al. A new method to synthesize microwave substance of negative refractive index[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2007, 36(4): 716-719.
- [7] POZAR D M. 微波工程[M]. 第3版. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- POZAR D M. Microwave engineering[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.
- [8] BREGAR V B, PAVLIN M. Effective-susceptibility tensor for a composite with ferromagnetic inclusions: Enhancement of effective-media theory and alternative ferromagnetic approach[J]. J Appl Phys, 2004, 95(11): 6289-6293.
- [9] 杨显清, 赵家升, 王园. 电磁场与电磁波[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- YANG Xian-qing, ZHAO Jia-sheng, WANG Yuan. Electromagnetic field and electromagnetic wave[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.
- [10] DEWAR G. A thin wire array and magnetic host structure with n less than or equal 0[J]. J Appl Phys, 2005, 97(10): 10Q101.

编辑 税红

(上接第676页)

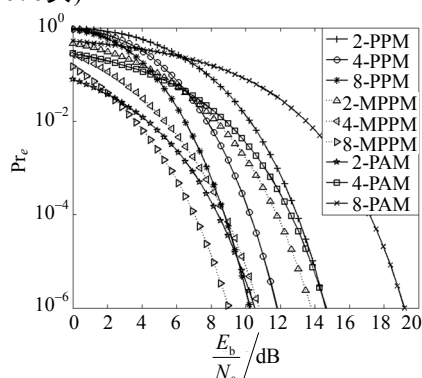


图5 误码率性能比较

4 结束语

本文利用等重码 $C(n, d, w)$ 构建了一种多脉冲位置调制(MPPM)的UWB跳时调制方案, 并对其AWGN下的信道容量、误码率进行了分析。理论分析与数值比较结果表明, 在满足一定条件下, L 进制MPPM接收机复杂度可以小于 L 进制PPM, 在数据容量、误码率等指标上也比相应的 L 进制PPM及 L 进制PAM有较大的改善。

参考文献

- [1] 邵士海, 唐友喜. 一种低采样率的UWB信号接收技术[J]. 电子科技大学学报, 2003, 32(5): 481-484.
- SHAO Shi-hai, TANG You-xi. UWB receiver technology of a low sampling rate[J]. Journal of University Electronic Science and Technology of China, 2003, 32(5): 481-484.
- [2] 张洪欣, 吕英华, 贺鹏飞, 等. 消除与WLAN同频干扰的UWB正交成形脉冲序列设计[J]. 武汉大学学报(理学版), 2005, 51(S2): 61-63.
- ZHANG Hong-xin, LÜ Ying-hua, HE Peng-fei, et al. Orthogonal pulses shaping method for uwb avoiding narrow band interference[J]. Wuhan University Journal(Nat Sci Ed), 2005, 51(S2): 61-63.
- [3] 刘洋, 王树勋, 孙晓颖. 基于多种调制方式的超宽带空时网格编码[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2007, 25(1): 1-5.
- LIU Yang, WANG Sun-xun, SUN Xiao-ying. Space-time trellis coding for UWB systems based on different modulations[J]. Journal of Jilin University(Information Science Edition), 2007, 25(1): 1-5.
- [4] WELBORN M L. System considerations for ultra-wideband wireless networks[C]//Proceedings of IEEE Radio and Wireless Conference (RAWCON 2001). Waltham, MA: IEEE, 2001: 5-8.
- [5] ASSANOVICH B, MOON-HO L. Modification of pulse position modulation for high data UWB systems and multi-user communication[C]//Proceedings of the 15th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON-2004). [S.l.]: IEEE, 2004: 1024-1027.
- [6] DOLINAR S, DIVALAR D, HAMKINS J, et al. Capacity of pulse position modulation (PPM) on Gaussian and WEBB channels[R]. [S.l.]: JPL TMO Progress Report, 2000.
- [7] MARIA-GABRIELLA D B, GUERINO G. Understanding ultra wide band radio fundamentals[M]. [S.l.]: Pearson Education, Inc, Publishing as Prentice Hall PTR, 2004.
- [8] PROAKIS J G. Digital communications[M]. 4th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001.
- [9] ZHANG Hao, GULLIVER T A. Biorthogonal pulse position modulation for time-hopping multiple access UWB communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2005, 4: 1154-1162.
- [10] HAO Zhang, GULLIVER A T. Pulse position amplitude modulation for time-hopping multiple access UWB communications[C]//Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference (WCNC- 2004). [S.l.]: IEEE, 2004: 895-900.

编辑 黄莘