

零折射率超材料对喇叭天线波前相位的改善

周 航¹, 裴志斌¹, 彭卫东², 柏 鹏², 张介秋¹, 屈绍波^{1,3}

(1. 空军工程大学 理学院, 陕西 西安 710051; 2. 空军工程大学 综合电子信息系统研究中心, 陕西 西安 710051; 3. 西安交通大学 电子陶瓷与器件教育部重点实验室, 陕西 西安 710049;)

摘 要:为改善喇叭天线波前相位, 获得更高的增益, 提出一种 3 层金属网格零折射率超材料结构, 将其加载到喇叭天线口径上。理论分析和提取的等效折射率表明, 在 7.1 GHz 附近, 该结构的电磁波的频率接近等离子体频率, 从而使得其等效折射率接近于零, 并通过劈尖仿真验证了这一零折射率的特性。当其作为喇叭天线的覆层时, 喇叭天线的波前相位由球面波被调制为均匀平面波, 方向图波束角变窄、旁瓣降低, 并且增益提高 2.6 dB。这种零折射率超材料结构调制喇叭天线波前相位的作用, 为改善喇叭天线的波前相位从而实现更高增益提供一种思路, 有一定的应用前景。

关键词:喇叭天线; 零折射率; 超材料; 高增益

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2010.06.015

中图分类号: O441.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2010)06-0070-05

超材料(metamaterial)是指一些具有天然材料所不具备的超常物理性质的人工复合结构或复合材料。这些超常物理特性包括负折射效应、逆多普勒(Doppler)效应、逆切连科夫(Cerenkov)辐射、完美透镜以及零折射率等^[1]。由于超材料表现出的这些奇异电磁性质, 有着极为广阔的应用前景, 从而在固体物理、材料科学、光学和应用电磁学等领域内引起愈来愈广泛的关注, 对它的研究正呈现迅速发展之势^[2-6]。2002 年, Enoch 等人指出: 当介质材料的等效折射率接近零时, 放置在介质中的偶极子天线向自由空间辐射的电磁波的方向主要集中在介质-空气界面的法线方向, 从而实现了天线的高方向性, 并首次从实验上验证了该结论^[7]。这种零折射率超材料的奇异特性为高方向性天线设计带来全新的思路。众多学者受到这一文献的启发, 设计出许多高方向性天线^[8-10]。

喇叭天线可视为张开的波导其功能是在比波导更大的口径上产生均匀的相位波前, 从而获得较高的增益。由于喇叭天线增益高, 工作频带宽, 具有重要的军事应用价值。然而实际设计的喇叭天线, 较大的喇叭口径使得其相位波前为近似球面波, 达不到均匀相位波前的效果。本文旨在用金属网格零折射率超材料加载到喇叭天线口径上, 研究零折射率超材料对喇叭天线相位波前的改善作用, 降低喇叭天线的旁瓣, 减小喇叭天线的波束宽度, 从而使喇叭天线获得更高的增益。

1 金属网格零折射率产生的机理

本文采用的超材料采用的 3 层金属网格结构, 见图 1。网格单元沿 x 轴方向和 y 轴方向的周期均为 a 。金属网格之间的距离为 H (Z 轴方向)。因为金属网格周期小于电磁波工作波长, 所以这种结构可以被视为金属线阵列。相关理论和试验研究表明连续金属线阵列的等价介电常数可以用等离子频率表征^[11-12]。

* 收稿日期: 2009-07-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50632030; 60871027; 61071058); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2009CB613306)

作者简介: 周 航(1984-), 男, 湖北丹江口人, 博士生, 主要从事超材料应用研究; E-mail: zh-cn1120@163.com
裴志斌(1959-), 男, 河南武陟人, 教授, 博士生导师, 主要从事电子材料与器件研究。

$\epsilon_{\text{eff}}(\omega) = 1 - \omega_p^2/\omega^2$ 其中 ω_p 是等离子体频率, ω 为电磁波的频率。当电磁波的频率低于等离子体频率时, 等效介电常数 $\epsilon_{\text{eff}}(\omega)$ 为负; 而当 $\omega \geq \omega_p, 0 \leq \epsilon_{\text{eff}}(\omega) < 1$ 。

根据固体物理理论, 金属线阵列的等离子体频率可以定义为:

$$\omega_p^2 = \frac{n_{\text{eff}} e^2}{\epsilon_0 m_{\text{eff}}} \quad (1)$$

式中: n_{eff} 为有效电子密度; m_{eff} 为电子质量; e 为电子的电荷。

而平均超材料的电子密度可以简化为^[11]:

$$n_{\text{eff}} = n \frac{\pi r^2}{aH} \quad (2)$$

式中: n 为金属线中的电子密度; r 为金属线半径。

根据经典理论, 当金属线周围产生电流、强磁场的时候, 有效的电子质量由于磁场的作用将增大。此时电子质量为^[11]:

$$m_{\text{eff}} = \frac{\mu_0 \pi r^2 e^2 n}{2\pi} \ln(a/r) \quad (3)$$

将式(2)和式(3)带入式(1)中得:

$$\omega_p^2 = \frac{n_{\text{eff}} e^2}{\epsilon_0 m_{\text{eff}}} = \frac{n \frac{\pi r^2}{aH} e^2}{\epsilon_0 \frac{\mu_0 \pi r^2 e^2 n}{2\pi} \ln(a/r)} = \frac{2\pi}{\epsilon_0 \mu_0 aH \ln(a/r)} = \frac{2\pi c^2}{aH \ln(a/r)} \quad (4)$$

式中 c 为真空中的光速, 对应本文给出的超材料结构, 上述方程可以修正为^[13]:

$$\omega_p^2 = \frac{n_{\text{eff}} e^2}{\epsilon_0 m_{\text{eff}}} = \frac{\pi c^2}{KaH \ln(a/r)} \quad (5)$$

式中 K 为修正系数, $K=3-5$, 这里 $K=3$ 。当微波频率接近于等离子体频率时, 折射率 $n = \sqrt{\mu_{\text{eff}} \epsilon_{\text{eff}}}$, 这种结构的等效折射率将接近于零 (μ_{eff} 为等效磁导率)。

根据 Snell 折射定律 ($\sin\theta_r/\sin\theta_i = n_i/n_r, \theta_i$ 为入射角, θ_r 为折射角, n_i 为异向介质折射率, n_r 为外界媒质折射率)。见图 2, 当介质的折射率接近与零时, 从介质内部朝任意方向辐射出的电磁波的折射角 θ_r 几乎为零, 从而辐射的电磁波的方向主要集中在介质-空气界面的法线方向。当把这种结构作为天线的覆层时, 可以使得出射的电磁波相位调整为均匀平面波, 从而提供天线的增益, 为高方向性天线的设计提高一种全新的思路。

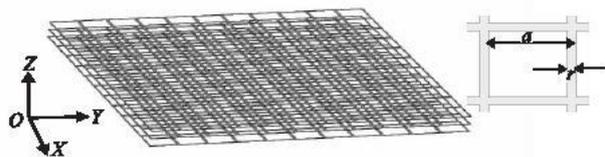


图 1 零折射率超材料结构图

Fig. 1 The structure of zero-index metamaterial (ZIM)

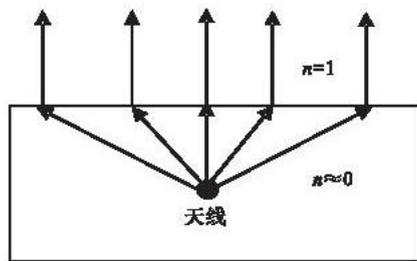


图 2 嵌入零折射率超材料偶极子天线
ig. 2 A dipole antenna embedded in ZIM

2 金属网格零折射率超材料的设计

图 3 为金属网格覆层的仿真模型。其结构尺寸为 $a = 19.5 \text{ mm}, r = 0.5 \text{ mm}$, 层间距离 $H = 7 \text{ mm}$ 。仿真模型四周加载周期性边界条件 (PBC), 相当于把金属网格沿 X, Y 轴无限周期拓展, 上下两面加载端口, 其中一个为输入端口, 另一个为输出端口。仿真得到的 S 参数见图 4, 可知在 7.0 GHz 以后, 该结构有一个很宽的传输通道。根据 S 参数提取其等效折射率, 见图 5。可以发现在大约 6.9 GHz 处其等效折射率的实部 (实线) 和虚部 (虚线) 几乎同时为零。在 7.1 GHz 处折射率的实部为 0.170 , 虚部为 0.001 (其中虚部代表损耗), 此时该 3 层金属网格结构可以视为零折射率超材料结构。

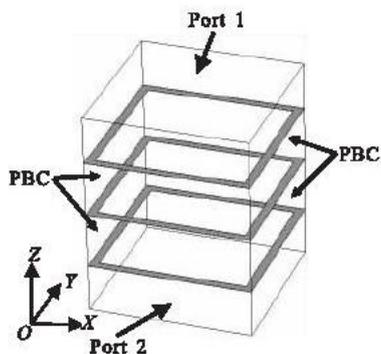


图3 结构单元仿真模型

ig.3 Unit cell of the simulation structure

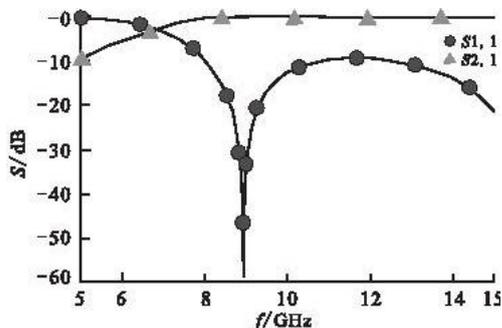


图4 仿真S参数

Fig.4 Simulated S-parameter

为了验证该金属网格结构的零折射率特性,我们做了一个波导劈尖仿真实验。图6为在频率7.1 GHz处劈尖仿真实验电场分布图。其中框架为完美电导体(PEC),金属网格劈尖结构放置在波导内,从下方波导口中馈波。可以发现,电磁波在经过3层金属网格结构后折射出去,其走向基本平行于劈尖的法线方向。这说明,在频率7.1 GHz处,此3层金属网格结构具有零折射率的特性,可视为零折射率超材料结构,可以用来改善喇叭天线的波前相位,提高增益。

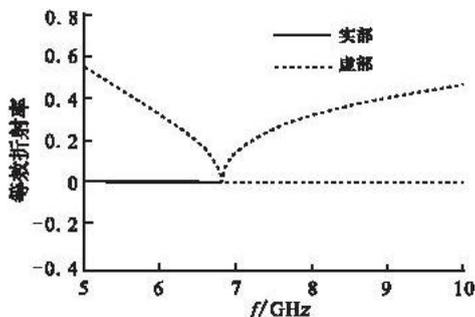


图5 等效折射率

Fig.5 Effective refractive index

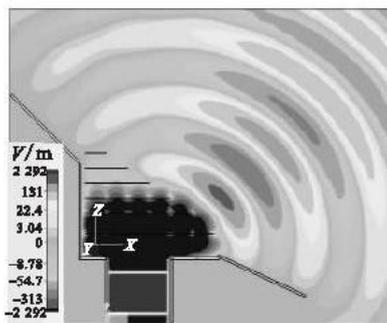


图6 劈尖波导实验

Fig.6 Prism experiment

3 金属网格零折射率超材料对喇叭天线波前相位的影响

图7为喇叭天线模型,其结构尺寸为:喇叭上端口半径 $R_t = 100$ mm,下端口半径 $R_b = 22$ mm,纵向高度 $L = 160$ mm,波导长度 $D = 50$ mm。图8为喇叭天线在7.1 GHz的电磁分布图。可以看出电磁波在喇叭口外的分布类似球面波。图9为喇叭天线的增益方向,图9(a)为E面,图9(b)为H面。最大增益为18.2 dB,其E面半功率波束宽度为 18.2° ,旁瓣仅为-3.2 dB,H面的半功率波束宽度为 16.5° ,旁瓣为-35.1 dB。

图10为加载零折射率超材料后的模型。图11为其在7.1 GHz的电场分布。可以看出此时在喇叭口外的电场分布已经基本平行于喇叭天线口面的法线,类似平面波的形式。说明零折射率超材料对喇叭天线的波前相位有很好的改善作用。图12为加载零折射率超材料后的增益方向图,图12(a)为E面,图12(b)为H面。经过改善后波形,可以发现E面和H面的方向图波束变窄,旁瓣降低。其中E面的半功率波束宽度为 13.7° ,旁瓣为-14.6 dB;H面的半功率波束宽度为 16.0° ,旁瓣为-24.4 dB。而且喇叭天线的增益由原来的18.15 dB增加到20.8 dB。

因此可见金属网格零折射率超材料结构,对喇叭天线的波前相位有很好的改善作用,可以使其从原来的类似球面波前相位改善为类似平面波,方向图的波束变窄,旁瓣降低,并能提高一定的增益。

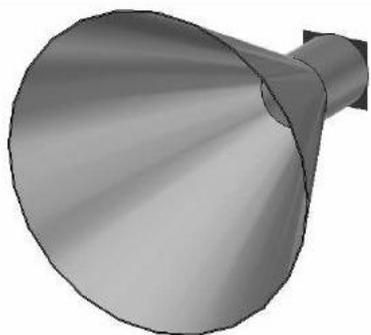


图 7 喇叭天线模型

Fig. 7 Model of the horn antenna

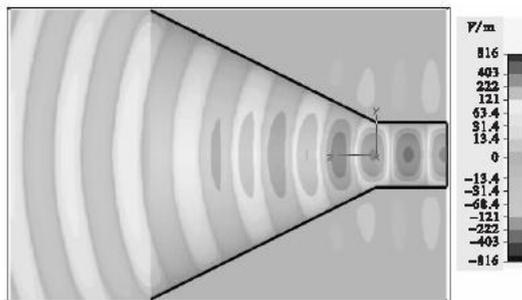
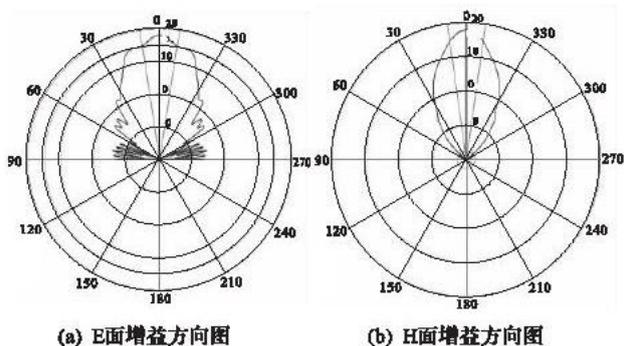


图 8 喇叭天线在 7.1 GHz 的电场分布

Fig. 8 Electric field distribution of the horn antenna at 7.1 GHz



(a) E面增益方向图

(b) H面增益方向图

图 9 喇叭天线的增益方向图(7.1 GHz)

Fig. 9 Gain patterns of the horn antenna at 7.1 GHz

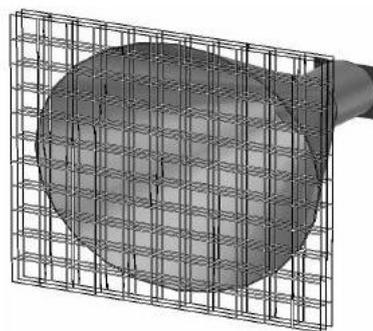


图 10 加载零折射率超材料喇叭天线模型

Fig. 10 Model of the horn antenna with ZIM

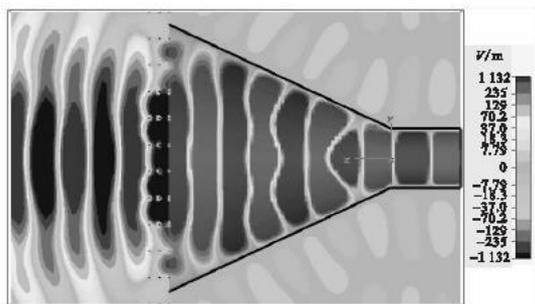
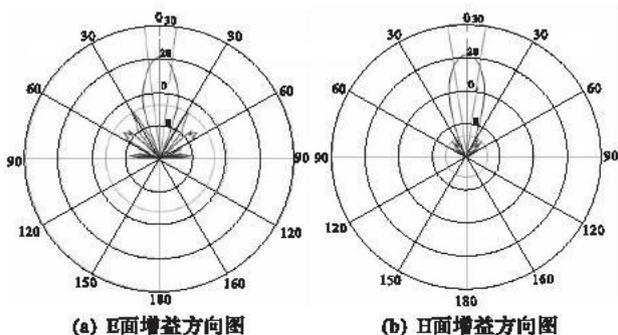


图 11 加载零折射率超材料后喇叭天线在 7.1 GHz 的电磁分布图
Fig. 11 Electric field distribution of the horn antenna with ZIM at 7.1 GHz



(a) E面增益方向图

(b) H面增益方向图

图 12 加载零折射率超材料喇叭天线的增益方向图(7.1 GHz)
Fig. 12 Gain patterns of the horn antenna with ZIM at 7.1 GHz

4 结束语

本文提出一种 3 层金属网格超材料结构,通过理论分析、仿真参数提取和劈尖波导试验均证实了在 7.1 GHz 附近这种结构具有零折射率的特性。当其用作喇叭天线的覆层时,喇叭天线的球面波前相位被调制平面波,方向图波束角明显变窄、旁瓣降低,增益提高 2.6 dB。这种零折射率超材料结构调制喇叭天线波前相位的作用,为改善喇叭天线的波前相位从而实现更高增益提供一种思路,有重要的军事应用前景。

参考文献:

[1] Veselago V G. The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Electrical and Magnetic Permeabilities [J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968, 10(4):509-514.

- [2] Ma Hua, Qu Shaobo, Xu Zhuo, et al. The Open Cloak [J]. Applied Physics Letter, 2009, 94: 103501.
- [3] 王甲富, 屈绍波, 徐卓, 等. 磁谐振和电谐振结构构成的左手材料设计[J]. 物理学报, 2008, 57(8): 5015 - 5019. WANG Jiafu, QU Shaobo, XU Zhuo, et al. The Design of left - handed Metamaterials Composed of Magnetic Resonators and Electric Resonators [J]. Acta Physica Sinica 2008, 57(8): 5015 - 5019. (in Chinese).
- [4] Erentok A, Ziolkowski R. Metamaterial - inspired Efficient Electrically Small Antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagations, 2008, 56(3): 691 - 707.
- [5] 裴志斌, 顾超, 屈绍波, 等. 自由空间法测试超材料的电磁参数 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2008, 9(5): 67 - 70. PEI Zhibin, GU Chao, QU Shaobo, et al. Measurement of Electromagnetic Parameters of Metamaterials by Free - space Method [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2008, 9(5): 67 - 70. (in Chinese)
- [6] 王斌科, 王新华, 顾超, 等. 二维圆柱超材料隐身罩的设计与测试 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2010, 11(1): 78 - 81. WANG Binke, WANG Xinhua, GU Chao, et al. The Design and Measurement of Two - dimensional Cylinder Metamaterial Cloak [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2010, 11(1): 78 - 81. (in Chinese)
- [7] Enoch S, Tayeb G, Sabouroux P, et al. A Metamaterial for Directive Emission [J]. Physics Review Letter, 2002, 89: 213902.
- [8] Yuan Y, Shen L, Ran L, et al. Directive Emission Based Anisotropic Metamaterials [J]. Physical Review A, 2008, 77: 05382.
- [9] Wu B I, Wang W, Pacheco, et al. A Study of Using Metamaterials as Antenna Substrate to Enhance Gain [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2005, 51: 295 - 328.
- [10] Zhou H, Pei Z, Qu S, et al. A Planar Zero - index Metamaterial for Directive Emission [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2009, 23(7): 953 - 962.
- [11] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, et al. Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures [J]. Physics Review Letter, 1996, 76(25): 4773 - 4776.
- [12] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Low Frequency Plasmons in Thin Wire Structures [J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 1998, 10: 4785 - 4809.
- [13] Li B, Wu B, Liang C H. Study on High Gain Circular Waveguide Array Antenna with Metamaterial Structure [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2006, 60: 207 - 219.

(编辑: 田新华)

Improvement of the Horn Antenna's Wave - front Phase Using Zero - index Metamaterial

ZHOU Hang¹, PEI Zhi - bin¹, PENG Wei - dong², BAI Peng², ZHANG Jie - qiu¹, QU Shao - bo^{1,3}

(1. Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, 710051, China; 2. Synthetic Electronic Information System Research Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 3. Electronic Materials Research Laboratory, Key Laboratory of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: This paper, in order to improve the front wave of the horn antenna and to get the higher gain, presents a three - layered metallic grid meta - material structure. Both the theory analysis and the retrieved effective refraction show that the zero index refraction occurs at about 7.1 GHz. A prism experiment is carried out to verify the properties of this zero refraction. When this structure is used as the superstratum of a horn antenna, the front wave phase of the antenna is changed from spherical wave to plane wave, the angle of the beam - width becomes narrower and the gain of the antenna is increased by 2.6 dB. The effect of zero - index metamaterial can improve the front wave of the antenna, which provides a method for realizing the higher gain of horn antennas. This metamaterial will have some applications in practice.

Key words: horn antenna; zero - index; metamaterial; high - gain