

文章编号: 2095-4980(2018)05-0835-05

## 高功率波段基于零折射率材料的波前相位改善

张莉<sup>1</sup>, 廖勇<sup>2</sup>, 向红<sup>3</sup>, 韩德专<sup>3</sup>

(1.山西大同大学 物理与电子科学学院, 山西 大同 037009; 2.中国工程物理研究院 应用电子研究所, 四川 绵阳 621999;  
3.重庆大学 物理学院, 重庆 400044)

**摘要:** 零折射率材料(ZIM)作为超材料的一种在微波辐射中有广泛应用。为实现高性能的小型化天线, 分析了零折射率材料的产生机理, 设计了一种高功率金属网格材料天线透镜。数值模拟表明, 零折射率材料透镜覆盖于一 Ku 波段喇叭天线口面时, 可以改善喇叭天线波前相位, 将喇叭天线的球面波前相位调制为较均匀的平面波, 增益可提高 2.27 dB, 喇叭天线的功率容量可达到 610 MW。研究了材料的层数  $n$ 、层距  $h$ 、周期  $a$  以及金属线半径  $r$  对  $S$  参数的影响, 得到了所要求频率的最优材料结构。

**关键词:** 超材料; 高功率波段零折射率材料; 喇叭天线

**中图分类号:** TN129

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201805.0835

## Wavefront phase improvement based on zero-refractive index metamaterials in high power band

ZHANG Li<sup>1</sup>, LIAO Yong<sup>2</sup>, XIANG Hong<sup>3</sup>, HAN Dezhuang<sup>3</sup>

(1.School of Physics and Electronic Science, Datong University, Datong Shanxi 037009, China;  
2.Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China;  
3.School of Physics, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Zero-Index meta-Materials(ZIM) have been investigated extensively for their unique electromagnetic properties. In order to achieve the miniaturization of high performance antenna, a kind of zero-index material is designed, i.e., metal-mesh structure, by adjusting the effective plasma frequency to the desired frequency band. The numerical simulations indicate that this metal-mesh structure can improve the wave-front phase and increase the gain when this structure is introduced to a horn antenna. The front wave phase of the antenna is changed from the spherical wave to the plane wave, the corresponding gain of the antenna is increased by at least 2 dB. The effect of the geometrical parameters, including the number of mesh layers  $n$ , the distance between adjacent layers  $h$ , the period  $a$  for a single mesh layer, and the radius of the metal lines  $r$ , are investigated systematically to optimize the directional emission.

**Keywords:** meta-material; high-power microwave zero-index meta-materials; horn antenna

通过人工改变材料的关键物理尺度, 对材料进行加工复合使其表现出天然的材料所没有的物理特性, 得到突破自然界电磁材料性质的超常材料, 即为“超材料”。零折射率材料(ZIM)作为超材料的重要分支, 近几年得到电磁材料研究的广泛关注。ZIM 即当介电常数和磁导率同时为零或其中之一为零时, 折射率为 0, 电磁波在超材料中传播时会表现出自然常规材料所没有的特性。1996 年, 英国科学家 Pendry 利用周期性金属线结构与开口谐振环形结构分别实现了负介电常数和负磁导率<sup>[1-2]</sup>。2001 年, 物理学家 Lagarkov 为证明左右手超材料可以作为天线的反射器, 将其覆盖在金属柱体的表面, 打破了反射器只有凹面的限制<sup>[3]</sup>。2002 年, Enoch 发现放置在零折射率材料中的偶极子天线向自由空间辐射的电磁波方向主要集中在介质与空气界面的法线方向<sup>[4]</sup>。2005 年, Smith 教授利用  $S$  参数反演出超材料的磁导率、介电常数、折射率等, 对推进人工材料设计的研究发展具有重要意义, 进一步推动了超材料结构的优化与发展<sup>[5]</sup>。此后, 科研工作者根据零折射率材料特性设计出许多高方向天线<sup>[6-9]</sup>。

收稿日期: 2017-03-15; 修回日期: 2017-05-14

基金项目: 山西大同大学 2018 年度校级青年科学研究资助项目(2018Q4)

喇叭天线的波前方向为近球面波,无法达到均匀近似平面波效果,2007年,Andrea Alu 等从理论上分析了当电磁波在 ZIM 中传播时,不同的入射、出射端面对波前相位的调节作用<sup>[10]</sup>。通过研究发现,出射面的几何形状对出射波的波前相位有调整作用。本文应用零折射率材料来改善喇叭天线波前相位,提高喇叭天线增益,实现天线高性能小型化。

## 1 零折射率材料的产生机理

对于目前的人工电磁材料理论,大部分基于 Pendry 在 1996 年实现左手材料时的理论指导。Pendry 曾利用如图 1 所示的金属线阵列,实现了负的介电常数。用极细金属线所组成的金属网格,在某些频率范围内等效为等离子体,可以削弱电子的平均浓度,并且可以通过自身电感很大的特点,提高电子的有效质量,实现零折射率。

金属线阵列的等离子体频率  $\omega_p$  的物理意义为:在中和的等离子体中正离子静止,电子偏离平衡位置的振荡频率,可以定义为<sup>[1-2]</sup>:

$$\omega_p^2 = \frac{n_{\text{eff}} e^2}{\epsilon_0 m_{\text{eff}}} = \frac{\rho_0 e^2}{\epsilon_0 m_{\text{eff}}} \quad (1)$$

式中:  $n_{\text{eff}}$  为平均超材料的电子密度;  $m_{\text{eff}}$  为电子有效质量;  $\rho_0$  为等离子体密度;  $\epsilon_0$  为真空介电常数;  $e$  为元电荷。  $n_{\text{eff}}$  可用金属中的电子密度( $n$ )表示为<sup>[1-2]</sup>:

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

式中:  $a$  为图 1 中金属网格周期单元长;  $r$  为金属线半径。同时电子有效质量  $m_{\text{eff}}$  可表示为<sup>[2]</sup>:

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

式中  $\mu_0$  为真空磁导率。将式(2)~式(3)代入式(1),即可得:

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

式中  $H$  为磁场强度。金属线阵列的等价介电常数可以用等离子体频率表征为<sup>[2]</sup>:

$$\epsilon_{\text{eff}}(\omega) = \epsilon_0 - \frac{ne^2}{\omega^2 m} = \epsilon_0 \left( 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right) \quad (5)$$

由上式可知,当等离子体频率  $\omega_p$  接近微波频率  $\omega$  时,  $\epsilon_{\text{eff}}$  接近 0,此时介质折射率  $n = \sqrt{\mu_{\text{eff}} \epsilon_{\text{eff}}}$  也将接近于 0,再根据 Snell 折射定律( $\sin\theta_1/\sin\theta_2 = n_2/n_1$ ),当介质折射率  $n_2$  接近 0 时,无论入射角  $\theta_2$  为多少,从介质内部朝任意方向辐射的电磁波的折射角  $\theta_1$  接近于 0,即折射电磁波始终沿法线方向,从而达到零折射率材料的效果,如图 2 所示。基于平行于法线方向,其出射波前相位将由材料界面形状决定,其方向始终垂直于出射界面,若出射面为平面,则出射波近似为平行波<sup>[11]</sup>。

## 2 零折射率材料的结构参数对其特性影响

通过调节人工电磁超材料的结构参数,其主要特征参数介电常数和磁导率也会改变,从而调节超材料特性。本文讨论的零折射率材料结构为以图 1 为单元结构的多层金属线网格,层数为  $n$ ,每 2 层之间的间距为  $h$ 。基于零折射率材料结构参数,研究零折射率材料的  $S_{11}$  参数与材料的层数  $n$ 、层距  $h$ 、周期  $a$  以及金属线半径  $r$  的关系,图 3 为  $S$  参数与层距  $h$  的关系,可以观察到反射参数  $S_{11}$  曲线随  $h$  的增加而左移;图 4 为  $S$  参数与层数  $n$  的关系,反射参数  $S_{11}$  曲线随  $n$  的增加而左移;图 5 为  $S$  参数与周期  $a$  的关系,可以观察到反射参数  $S_{11}$  曲线随  $a$  的增加而左移;图 6 为  $S$  参数与金属线半径  $r$  的关系,反射参数  $S_{11}$  曲线随  $r$  的减小而右移,且  $S$  参数相对于随周期  $a$ 、

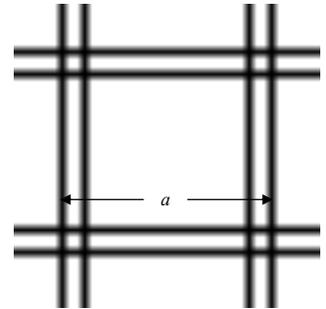


Fig.1 Metal-mesh structure  
图 1 单元金属网格结构

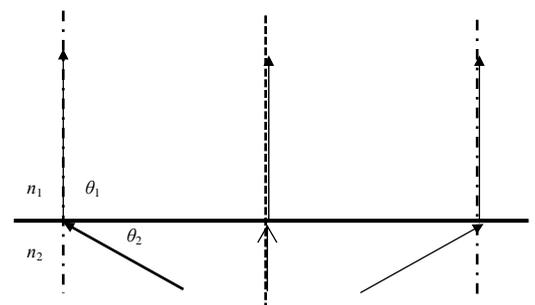


Fig.2 Schematic diagram of zero refractive index material  
图 2 零折射率材料示意图

金属线半径  $r$  变化，随层距  $h$  及层数  $n$  的变化更显著。可以发现随着单元边长  $a$  的增加，响应频率会随之降低，但增大单元尺寸对材料整体的均匀性不利，从而影响材料性能，并且增大尺寸会增加成本，不利于材料的小型化。所以在实际应用中还需共同考虑多方面因素来设计零折射率材料透镜。

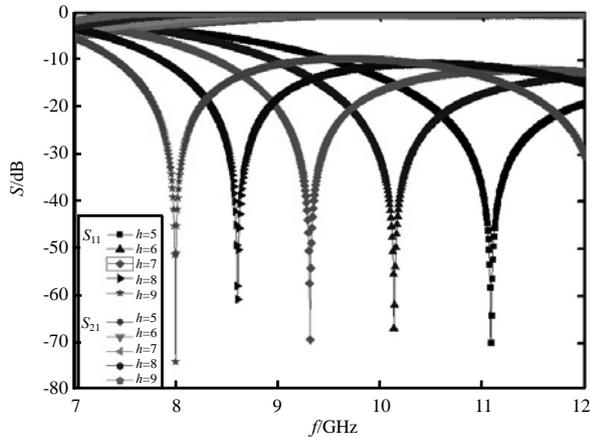


Fig.3 Relationship between  $S$  parameter and the inter-layer spacing  $h$   
图 3  $S$  参数与层距  $h$  的关系

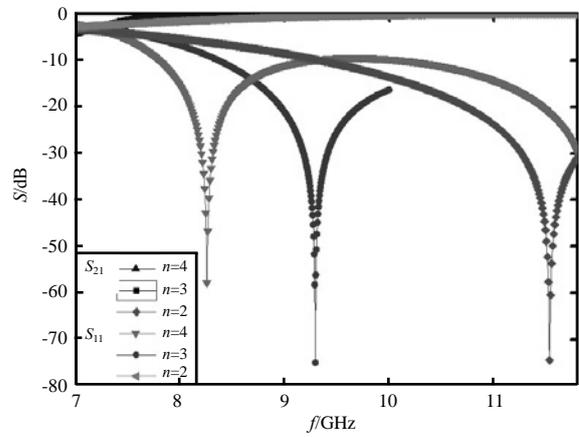


Fig.4 Relationship between  $S$  parameter and mesh layers  $n$   
图 4  $S$  参数与层数  $n$  的关系

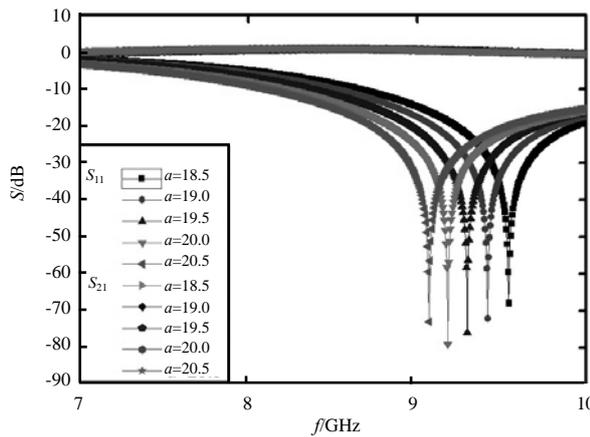


Fig.5 Relationship between  $S$  parameter and the period  $a$   
图 5  $S$  参数与周期  $a$  的关系

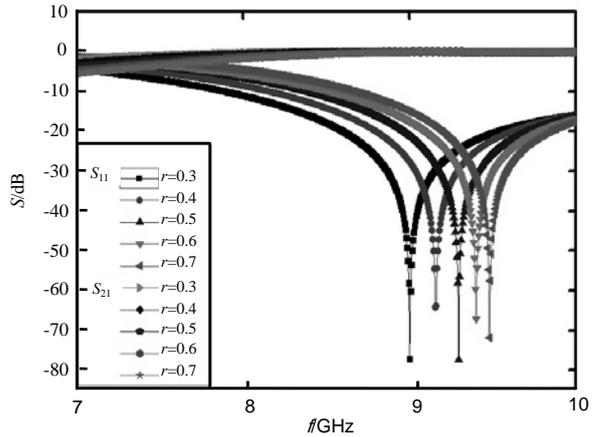


Fig.6 Relationship between  $S$  parameter and the radius of the metal lines  $r$   
图 6  $S$  参数与金属线半径  $r$  的关系

### 3 零折射率材料的增益分析

设计金属网格单元长度  $a=10$  mm，金属线半径  $r=0.5$  mm，层间距离  $h=7$  mm，材料层数  $n=2$ ，并在材料正负  $x$  以及正负  $y$  方向加载周期性边界条件，使得结构在  $x$ 、 $y$  方向无限周期拓展形成周期结构，分别在正负  $z$  方向加载输入端和输出端，得到图 7 所示的  $S$  参数曲线。在 15.2 GHz 附近，参数  $S_{11}$  相位发生跳变，出现谐振点，此时，材料的介电常数为 0，频率与等离子体频率相同，也就是达到了零折射率材料。利用 Smith 教授提出的参数提取方法<sup>[5,12-13]</sup>，通过对  $S$  参数的计算，反演出等效折射率：

$$n(\omega) = \frac{1}{kd} \arccos \left[ -\frac{1}{2S_{21}}(1-S_{11}^2+S_{21}^2) + m \frac{2\pi}{kd} \right] \quad (6)$$

式中： $k$  为自由空间的波矢量； $m$  为一个整数； $d$  为材料厚度。计算结果如图 8 所示，可以发现反演后，在频率 12.5 GHz 处其等效折射率为 0，此时 2 层金属网格在此频率处可以视为零折射率材料。

利用零折射率特性，设计零折射率材料透镜，用于改善圆锥喇叭天线辐射特性，圆锥喇叭口半径  $R_1=50$  mm，馈入圆波导口半径  $R_2=20$  mm，喇叭高度  $l=37.5$  mm，圆波导长度  $d=20$  mm。图 9 为喇叭天线在 12.5 GHz 处的电场分布图，可以看出，在喇叭口外的类似球面波的电场分布，口面电场分布不均匀。图 10 为喇叭天线的增益方向，最大增益为 15.85 dB。

将此零折射率材料覆盖于喇叭天线前，图 11 为在 12.5 GHz 处的电场分布图。可以看出在喇叭口外的类似平面波的电场分布。图 12 为覆盖零折射率材料后喇叭天线的增益方向，最大增益为 18.12 dB，增益提高了 2.27 dB。

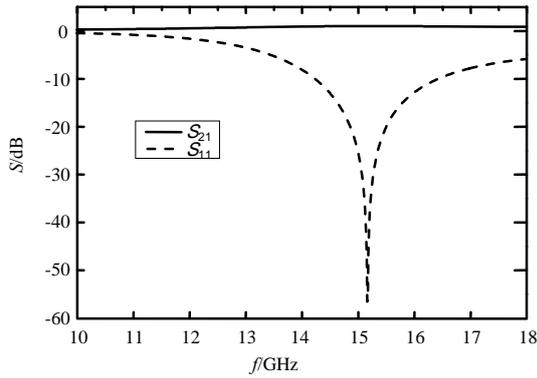


Fig.7 S parameter of the zero-index meta-materials  
图 7 零折射率材料的 S 参数

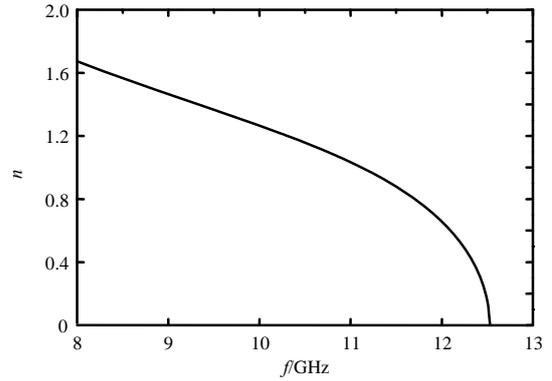


Fig.8 Effective index  
图 8 等效折射率

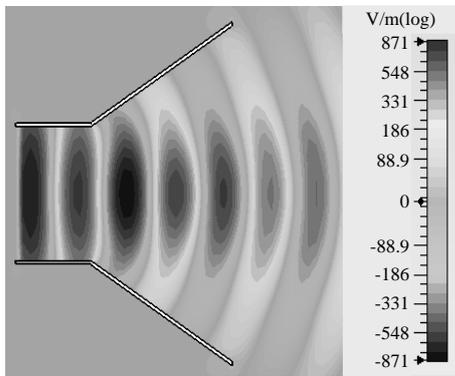


Fig.9 Electric field of horn antenna  
图 9 喇叭天线的电场分布图

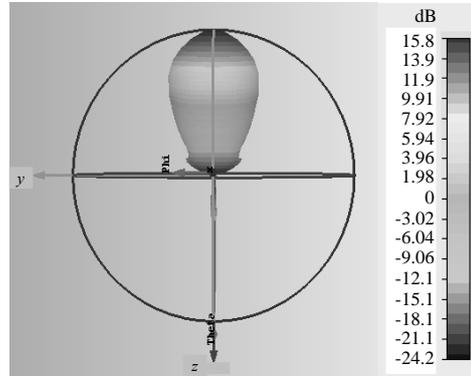


Fig.10 Gain of horn antenna  
图 10 喇叭天线增益

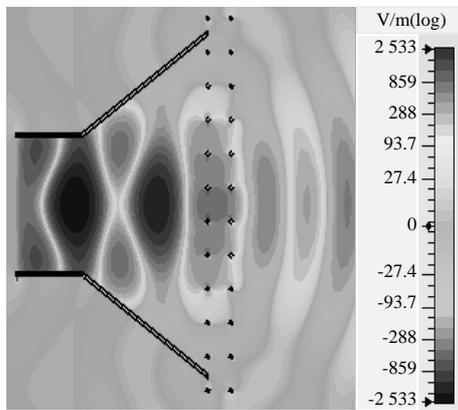


Fig.11 Electric field of horn antenna with the zero-index meta-materials  
图 11 覆盖零折射率材料的喇叭天线电场图

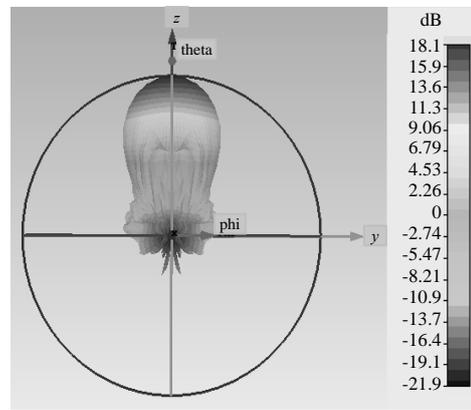


Fig.12 Gain of horn antenna with the zero-index meta-materials  
图 12 覆盖零折射率材料的喇叭天线增益

#### 4 覆盖零折射率材料后的功率容量

为将其应用于高功率中，需计算其功率容量。根据 Kilpatrick 准则<sup>[14]</sup>，在真空状态下有：

$$f = 1.643E^2 e^{-8.5/E} \tag{7}$$

式中： $f$  为微波频率，单位为 MHz； $E$  为该频率下的击穿场强，单位为 MV/m。据计算可知在频率为 12.5 GHz 下微波击穿场强为 91.5 MV/m，选取空气中微波击穿场强阈值为  $E_{\max} = 30$  kV/cm。

覆盖零折射率材料后，图 11 中真空喇叭腔内  $E_0 = 2533$  V/m，大气侧波前  $E_0 = 859$  V/m，再根据功率容量与场强的平方成正比关系有：

$$P_{\max}/P_0 = (E_{\max}/E_0)^2 \tag{8}$$

则计算可得，喇叭天线在真空状态中功率容量可达到 660 MW。而大气侧，功率容量可达 610 MW。功率容量取最低者，因此天线的功率容量可达 610 MW。

## 5 结论

本文分析了零折射率材料的产生机理,根据一种金属网格材料,研究了材料参数对结果的影响,设计了高功率 Ku 波段零折射率材料。仿真模拟表明,零折射率材料覆盖于喇叭天线口面时,可改善喇叭天线波前相位,提高增益,喇叭天线的球面波前相位调制为较均匀的平面波,且增益提高了 2.27 dB,喇叭天线的功率容量可达到 610 MW。本文中均为数值模拟分析,在理想金属真空状态下,如若在实际情况,零折射率材料的频点会出现晃动,且功率容量可能略有下降。

零折射率超材料等效介电常数和磁导率均为 0,因其具有独特的电磁性质而得到广泛的关注和研究,也显示了其在许多领域的应用潜力。且十几年来,零折射率材料在材料设计和应用方面迅速发展,应用也越来越广泛,将来零折射率材料的各种研究应用必将走向实用化。

### 参考文献:

- [1] PENDRY J B,HOLDEN A J,STEWART W J,et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures[J]. Physical Review Letters, 1996,76(25):4773-4776.
- [2] 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(22):4789-4809.
- [3] LAGARKOV A N,SEMENENKO V A,KISEL V N,et al. Development and simulation of microwave artificial magnetic composite utilizing nonmagnetic inclusions[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2003(258):161-166.
- [4] ENOCH S,TAYEN G,SABOUROUX P,et al. A metamaterial for directive emission[J]. Physical Review Letters, 2008,89(21): 213902.
- [5] SMITH D R,VIER D C,KOSCHNY T,et al. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials[J]. Physical Review E, 2005,71(3):036617.
- [6] 王波,张岩. 太赫兹超材料和超表面器件的研发与应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(1):1-12. (WANG Bo,ZHANG Yan. Design and applications of THz metamaterials and metasurfaces[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(1):1-12.)
- [7] CHEN Xudong,GRZEGORCZYK T M,WU B I,et al. Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials[J]. Physical Review E, 2004,70(1):016608.
- [8] POVINELLI M L,JOHNSON S G,JOANNOPOULOS J D,et al. Toward photonic-crystal metamaterials:creating magnetic emitters in photonic crystals[J]. Applied Physics Letters, 2003,82(7):1069-1071.
- [9] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of permittivity and permeability[J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968,10(4):509-514.
- [10] ALU A,SILVEIRINHA M G,SALANDRINO A,et al. Epsilon-near-zero metamaterials and electromagnetic sources:tailoring the radiation phase pattern[J]. Physical Review B, 2007(75):155410.
- [11] 周航,裴志斌,彭卫东,等. 零折射率超材料对喇叭天线波前相位的改善[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2010, 11(6):70-74. (ZHOU Hang,PEI Zhibin,PENG Weidong,et al. Improvement of the horn antenna's wave-front phase using zero-index metamaterial[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2010,11(6):70-74.)
- [12] SMITH D R,SCHULTZ S,MARKO P,et al. Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients[J]. Physical Review B, 2002,65(19):195104.
- [13] KOSCHNY Th,MARKO P,ECONOMOU E N,et al. Impact of inherent periodic structure on effective medium description of left-handed and related metamaterials[J]. Physical Review B, 2005,71(24):245105.
- [14] JAMES R A. High brightness RF linear accelerators[J]. Springer US, 1988,178(1):166-199.

### 作者简介:



张莉(1992-),女,山西省大同市人,硕士,主要研究领域为超材料光谱学.email: 1356002942@qq.com.

廖勇(1969-),男,湖南省宁远市人,博士,副研究员,主要研究方向为高功率微波传输、发射技术。

韩德专(1979-),男,湖南省岳阳市人,博士,研究员,主要研究领域为超材料、表面等离子激元、微纳光子结构。

向红(1976-),男,重庆市人,讲师,主要研究方向为表面等离子激元。