

新型人工电磁材料微波透镜增强 贴片天线定向性的研究

陈曦¹ 任学施² 崔铁军¹

(东南大学毫米波国家重点实验室,南京 210096)¹

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室,西安 710071)²

tjcui@seu.edu.cn

摘要:本文提出了一种全新的折射率渐变微波透镜模型。此透镜紧密覆盖在矩形贴片天线上方,可显著提高贴片天线的定向性。传统介质材料实现折射率渐变透镜存在成本高、渐变精度低、可变范围小等局限性。我们利用金属方环单元构建新型人工电磁材料(Metamaterials)来实现此透镜。Metamaterials具有设计多样性、可变范围大等优点。文中对矩形贴片天线、离散介质块构建的理想折射率渐变透镜天线和Metamaterials透镜天线三个方案进行了全波仿真,比较了三者的远场方向图。结论表明,本文提出的折射率渐变透镜模型明显提升了贴片天线的定向性。更重要的是,Metamaterials透镜与理想透镜有着近似的性能,证明了Metamaterials透镜在提高天线定向性中的重要价值。

关键词:新型人工电磁材料,微波透镜,折射率渐变,天线定向性

Research on Improving Patch Antenna Directivity by Metamaterials Microwave Lens

Chen Xi¹, Ren Xueshi², Cui Tiejun¹

(State Key Laboratory of Millimeter Wave, Southeast University, Nanjing 210096)¹

(State Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an 710071)²

Abstract: In this paper, a novel gradient refractive index microwave lens model is presented. The directivity of Omni-directional patch antenna can be improved by setting the microwave lens closely above the patch antenna. Manufacturing gradient refractive index microwave lens with traditional dielectric materials suffer from high cost, low gradient accuracy and small index variable scope. Metamaterials are more favorable for gradient refractive index application, inhering design diversity and large variable scope. Three models of classic patch antenna, patch antenna with ideal microwave lens and patch antenna with metamaterials microwave lens are analyzed by full wave simulator. The three far-field radiation patterns are compared. The data show that the novel microwave lens improved the directivity of the patch antenna significantly. More importantly, radiation pattern of metamaterials lens case is resemblance to that of ideal lens, proving the tremendous value of metamaterials in high directivity antenna application.

Keywords: Metamaterials; Microwave Lens; Gradient Refractive Index; Antenna Directivity

1 引言

微波透镜广泛应用于电大尺寸的天线设计中。微波透镜天线具有宽频带,高定向性的特点,与抛物面反射镜天线相比,透镜天线没有馈源遮挡引起的效率降低问题或者偏馈引起的频带变窄问题。低损耗、重量小、易于加工的介质材料是微波透镜制造者一直的共同追求。1996年由Pendry提出模型^[1],2001年Smith

^[2]实验验证的新型人工电磁材料,因其特有的介电常数和磁导率的可控性,在微波领域中有着广阔的潜在应用。2006年Tretyakov提出了一种用于基站的金属线等效介质透镜天线^[3]。本文提出一种新型的折射率渐变透镜模型,并设计了一种metamaterials单元结构与分布,来满足模型的折射率渐变要求。接下来,本文将矩形贴片天线作为此透镜的馈源,构成一种新的高定向性透镜天线。文中对经典矩形贴片天线、带理想折射率渐变透镜的天线、带Metamaterials透镜的天线,三种方案做全波仿真,比较了三者的远场方向图。结论

基金项目:国家自然科学基金 Grant Nos. 60671015, 60496317, 60601002, and 60621002。

表明，提出的此折射率渐变透镜模型明显提升了贴片天线的方向性。这种透镜还可以与缝隙天线，偶极子天线或超宽带天线组合，形成一系列符合不同要求的透镜天线。

2 折射率渐变微波透镜模型

折射率渐变透镜(GRIN Lens)是光电子中成熟的一中器件，用于成像，聚焦，激光耦合器，微光子电路^[4]。Smith 提出了新型人工电磁材料可实现折射率渐变，用于微波波束汇聚、波束偏折^[5]。Tretyakov提出的透镜天线是一种新颖的设计^[3]。它充分利用了透镜的特点，将透镜，馈源，反射器巧妙地结合在一起。本文从几何光学出发，利用折射率渐变透镜的特点，设计了一种锥形透镜，其原理类似于介质导行天线。

如图1所示，圆锥体透镜的沿轴线剖面图是一个三角形。圆锥体内，介质的等效折射率分布由

$$n(r, z) = n_{\min} \cdot \frac{|z|}{\sqrt{z^2 + r^2}} \cdot \frac{\sqrt{T^2 + (0.5 \cdot D)^2}}{T} \quad (1)$$

$T=42$ mm为圆锥高度， $D=84$ mm为圆锥底直径， $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。图中圆锥轴线折射率最大，达2.07，圆锥侧面折射率最小达1.2，外部为空气折射率为1。馈源放置在圆锥顶点，式(1)保证了从馈源发射的不同方向的射线至圆锥底面的光程相等。根据几何光学原理，可以预见，一个放置在圆锥顶点的点源，经圆锥透镜的导行，将在圆锥底面产生一个相位均匀的波前，从而实现高定向性的远场方向图。

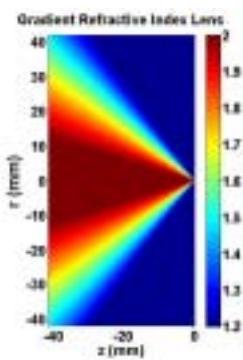


图1 透镜的沿轴线剖面图

3 方环型结构的电磁特性与透镜的Metamaterials实现

本节介绍如何利用方环型结构实现上述的圆锥透镜。如图2所示的方环结构因其旋转对称性，在x与y极化方向上具有相同的电磁响应，与上节设计的具有旋转对称结构的圆锥透镜相符。对应变量值如表1所示。

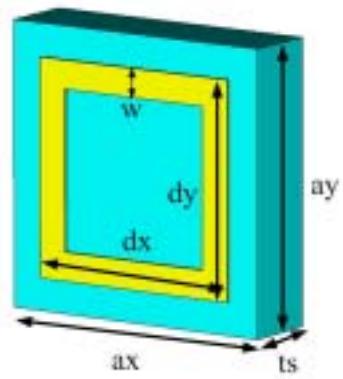


图2 方环型结构与基板的示意图

表1 变量参数值

变量名	值
排列间隔 $ax=ay=az$	3.0 mm
方环边长 $dx=dy$	0.8 至 2.8 mm
方环宽 w	0.3 mm
介质基板厚 ts	0.8 mm
覆铜厚度 tf	0.0035 mm
介质基板介电常数 ϵ	2.65

利用全波仿真器CST，建模F4B介质基板上的金属方环结构，设置合理的周期边界与激励条件，可得到x极化方向激励下3mm间隔2维周期方环的S参数频域响应。由S参数提取等效介电常数和磁导率^[6]，可得到3mm立方区域中不同尺寸方环在特定频率下的等效折射率。本文设计的透镜工作中心频率为8GHz。图3所示，控制方环尺寸可实现折射率从1.2至2.1的连续变化，满足上节中圆锥透镜的折射率变化要求。

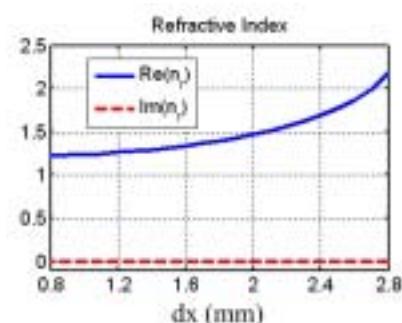


图3 方环型结构等效折射率与尺寸的关系

4 Metamaterials透镜天线的全波仿真及其与理想透镜和贴片天线的对比

这节中，我们介绍三个模型，图4所示，以验证圆锥透镜的性能。模型一，我们构建一个背面同轴馈电的矩形贴片天线，如图4(a)示。唯一的特点是，该贴片天线的接地面较大。模型二，利用折射率离散变化的

一组边长为6 mm的理想介质立方块模拟第二节中介绍的透镜，并将其与贴片天线组合，构成理想透镜天线，如图4(b)示。模型三，将3mm间隔周期排列的方环结构堆砌成Metamaterials锥体，其中方环的尺寸满足式(1)的空间分布。再将Metamaterials与模型一的贴片天线组合，构成Metamaterials透镜天线。利用电磁仿真软件CSTTM对三个模型的全波分析，得到图5所示的三个方向图对比。经典贴片天线是一个半空间方向性天线，定向性为7.7dBi。理想透镜天线定向性为13.5dBi，在定向性上有了大幅提升。

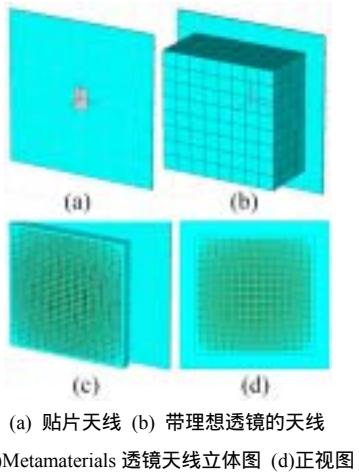


图4 三组天线的仿真模型图

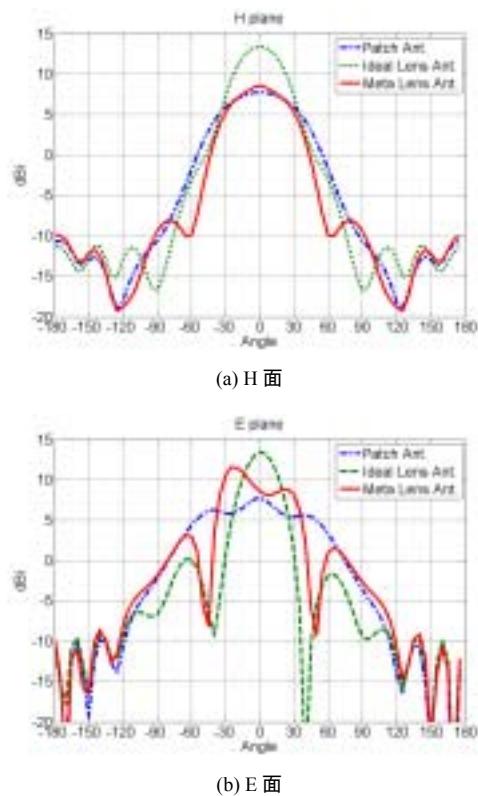


图5 三组天线远场方向图比较

Metamaterials透镜天线的H面定向性为8.6dBi，E面定向性为11.6dBi。Metamaterials透镜天线的性能在E面与理想透镜天线接近，这证实了利用Metamaterials可以实现折射率渐变透镜，并且明显可以提高贴片天线的定向性。Metamaterials透镜天线与理想透镜天线之间性能的差距主要来源于方环结构的反射和介质基板的损耗。

表2 天线远场数据比较

	定向性	半功率 波瓣宽度	副瓣 电平
H面			
贴片天线	7.8 dBi	74.4°	-18.4 dB
理想透镜天线	13.5 dBi	43.2°	-24.7 dB
Metamaterials透镜天线	8.6 dBi	57.8°	-16.6 dB
E面			
贴片天线	7.8 dBi	109.0°	-17.5 dB
理想透镜天线	13.5 dBi	30.7°	-13.3 dB
Metamaterials透镜天线 (主瓣方向 25°)	11.6 dBi	34.6°	-2.7 dB

5 结论

本文首先提出一种新型的折射率渐变透镜模型，其折射率取值范围在1.2至2.1之间。折射率在一个圆锥体内连续变化，在圆锥轴线处最大，并随锥角的增大而变小。该折射率渐变透镜将位于圆锥顶点发出的球面波阵面引导为锥底面相位均匀的平面波阵面。接着，本文提出一种金属方环结构作为Metamaterials的基本单元，用来实现透镜对折射率渐变的要求。最后，为了验证透镜的性能，本文提出了三个天线方案，贴片天线、离散介质块构成的理想透镜天线和方环结构构建的Metamaterials透镜天线，并对其做全波仿真和远场方向图比对。远场方向图证实了，理想折射率渐变透镜天线可使贴片天线定向性增加5.7dB，并有更良好的副瓣电平。方环构建的Metamaterials透镜天线，其定向性在E面上比贴片天线有3.8dB的提升，不足之处是其E面方向图缺失对称性，主瓣在25°方向。Metamaterials透镜天线性能相比理想透镜有差距，是由方环的反射和介质板的损耗引起的。在未来工作中，阻抗匹配、低反射的复杂Metamaterials结构的应用将可能进一步提升天线的性能。

本文提出的折射率随锥角变化的锥形透镜，采用

传统介质材料难以实现。Metamaterials具有的多样性、介电常数与磁导率可控性保证其能够实现分布复杂、变化范围大的折射率渐变透镜。可以预见，Metamaterials对天线的定向性、极化特性和可调节性将产生引人瞩目的贡献。

参考文献

- [1] J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart, I. Youngs, Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures, PHYSICAL REVIEW LETTERS VOLUME 76, NUMBER 25, 1996
- [2] R. A. Shelby, D. R. Smith, S. Schultz, Experimental Verification of a Negative Index of Refraction, SCIENCE VOL 292 6 APRIL 2001
- [3] P. Ikonen, M. Karkkainen, C. Simovski, P. Belov and S. Tretyakov Light-weight base station antenna with artificial wire medium lens IEE Proc.-Microw. Antennas Propag., Vol. 153, No. 2, April 2006
- [4] Kenichi Iga, Theory for gradient-index imaging, APPLIED OPTICS, Vol. 19, No. 7, 1 April 1980
- [5] D. R. Smith, J. J. Mock, Gradient index metamaterials, PHYSICAL REVIEW E 71, 036609 (2005)
- [6] D. R. Smith, S. Schultz, P. Markos and C. M. Soukoulis, Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients, PHYSICAL REVIEW B, VOLUME 65, 195104

作者简介：陈曦，男，硕士生，主要研究领域为天线和新型人工电磁材料等；任学施，男，博士生，主要研究领域为天线和无源微波器件等；崔铁军，男，教授、博士生导师，主要研究领域为计算电磁学，新型人工电磁材料，目标特性与识别等。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>