

基于零折射复合材料覆层天线技术研究

李斌 赵交成

(西安电子工程研究所 西安 710100)

摘要:本文介绍和分析了复合材料等效介电常数和磁导率取值分类情况,通过不同途径构造等效介电常数和磁导率接近零的复合材料,利用其近零折射率的特性,来改善天线的辐射特性。仿真和实测结果表明,在波导口径天线上加载零折射率复合材料覆层,能有效提高天线的前向增益,降低天线的副瓣电平。这一工作为研制定向高增益、小型化天线提供了一种新的思路。

关键词:复合材料,零折射,圆波导天线

A Technology Study on Zero Refraction Meta-materials Cladding Antenna

Li Bin Zhao Jiao-Cheng

(Xi'an Electronic Engineering Research Institute, Xi'an 710100)

Abstract: The four different methods, with different positive or negative permittivity and permeability, to improve the gain of waveguide caliber antenna with zero Refraction meta-materials are presented in this paper. The meta-materials can realized congregating the radiation energy when it's equivalent permittivity or permeability is zero which make the refractive index of meta-materials become to zero. The simulation and experimental results show that their methods are effective and meta-materials structure can improve the radiation characteristics of antenna .The gain of antenna increases while the side lobe level decreases, which offers some novel methods to design high gain and directional antennas.

Keywords: Meta-materials Structure; Zero Refraction; Circular Waveguide Antenna

1 引言

1968 年,前苏联科学家 V. G. Veselago 发表文章^[1]提出左手材料的概念,他从 Maxwell 方程出发,分析了电磁波在介电常数 ϵ 与磁导率 μ 同时为负数的材料中的传播状况,其折射率将变为负值,并且将表现出不寻常的电磁特性。近年来,随着左手材料的物理实现^[2,3]不断深入,越来越多的等效介电常数或等效磁导率的为负的人工合新材料出现,这一类人工合成材料也被统称为复合材料,成为国际物理界和电磁学界近年来的研究热点。通过前人研究可以看出,复合材料均属于频变材料,如果能在某些特定的频段内实现介电常数 ϵ 与磁导率 μ 同时为负数,那么必定可以在其他频段实现介电常数 ϵ

与磁导率 μ 为零情况,根据斯涅耳折射定律 (Snell Law $n = \sqrt{\epsilon_{eff} \cdot \mu_{eff}}$) 可知,当介电常数 ϵ 与磁导率 μ 为零的情况下可实现零折射^[4~7]。零折射特性可以有效的使天线波束汇聚,提高天线的前向增益,降低天线的副瓣电平^[5]。

本文在文献^[4~9]的研究结果基础上,通过构造不同介电常数和磁导率的复合材料,利用其近零折射率的特性,来改善天线的辐射特性。并以圆波导口径天线为实例进行了仿真分析和实测验证,仿真和实测结果与理论推理相一致,有效的证明了该推论的有效性和实用性。

2 复合材料特性研究

介电常数和磁导率是描述物质基本电磁特性的

物理量，随着复合材料实验研究^[2,3]的飞速发展与应用的日益广泛，人们已越来越清楚地认识到，复合介质材料可以根据其介电常数和磁导率的取值不同，形成几类复合介质材料，并各自具有十分独特的电磁特性^[4~7]。

以材料的等效介电常数和磁导率的零值为分界线，将复合材料根据等效介电常数和磁导率划分成四个象限。通过在不同象限内，构建不同结构实现空间的小折射率效果，在空间上对电磁波产生汇聚作用，并将这一结论，应用于天线领域，用来提高天线的前向增益和减少阵列的副瓣电平。

如图 1 所示，对于第一象限的材料，应用不同于空气介电常数的介质材料，通过在空间上周期性排列，构成小等效介电常数和磁导率，通过合理设计可以使等效材料的等效介电常数与等效磁导率的乘积近似为零，从而可得到等效零折射率材料，在空间上对电磁波产生汇聚作用。

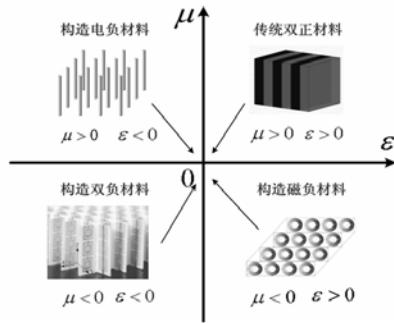


图 1 不同象限材料的物理实现

对于第二象限的材料，本文中主要是根据英国帝国理工学院 Pendry 的理论，应用金属细线(Rod)阵列构建电等离子体材料，使在一定的频率范围其等效介电常数成负值，通过分析可以看出，等效负介电常数仅仅在某一频带成负值，通过调整结构尺寸可以使等效介电常数由负值向零值靠近，最终使等效介电常数与等效磁导率的乘积近似为零，使材料的折射率近似为零。具体实现时是通过在很薄的介质板上，腐蚀金属条带。在工作频率位于金属条带结构构成的等效电等离子体频率时，其等效介电常数近似等于零，从而也可得到近似零折射率材料，在空间上对电磁波产生汇聚作用，并也将其应用于圆波导口径天线中，构成基于复合介质覆层结构高增益波导天线^[11]。

对于第四象限的材料，也根据 Smith 理论，应用金属开路环谐振器 (SRR:Split-Ring Resonator)

阵列构建磁等离子材料。在工作频率位于等效磁等离子体频率时，其等效磁导率近似等于零，从而也可得到近似零折射率材料。

对于第三象限的材料，是将第二、四象限的，单负结构材料进行组合，得到双负结构复合材料，其也可以在空间上对电磁波产生汇聚作用。其中各个象限的复合材料的等效介电常数和等效磁导率的公式推到，在文献中^[4~9]有较详细的论证、推导和验证，本文就不再进行详细说明了，仅在图 3 给出了采用四种不同象限的波导口径天线进行复层加载的示意图。

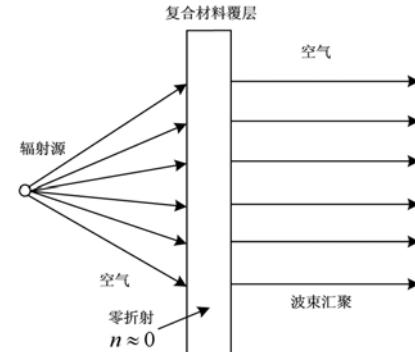


图 2 波经过覆层发生能量汇聚

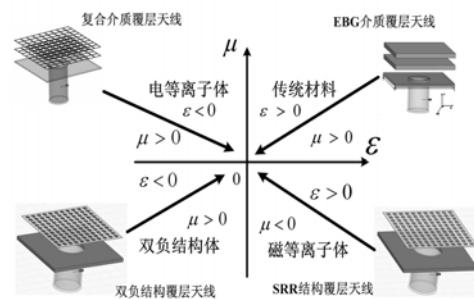


图 3 不同象限零折射率覆层天线的物理实现

3 基于零折射复合材料覆层波导天线

根据复合材料的特性分析及各个象限材料的物理实现，本文给出了从四个象限中以不同等效介电常数和等效磁导率取值逼近坐标原点，实现不同结构的零折射率复合材料覆层天线结构。图 4 给出了本文的主要设计思路。

鉴于文章的篇幅所限，本文仅给出仿真和实验结果，详细分析将另文阐述。

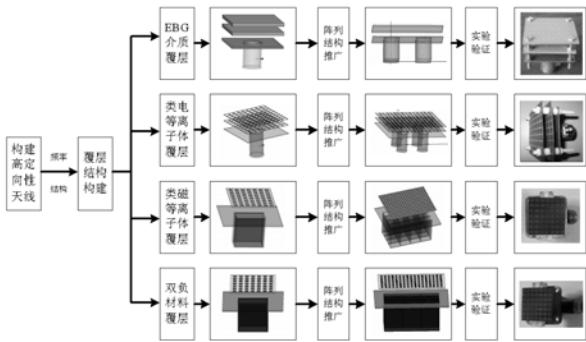


图 4 从不同象限逼近坐标原点实现高定向性天线

3.1 基于 EBG 覆层波导天线

根据 EBG 结构的传输特性分析可知, 这种结构在谐振频率附近存在比较小的等效的介电常数和等效磁导率, 因此天线仅能在较窄的频段上良好工作, 本节设计了工作频率为 $f=12\text{GHz}$ 圆波导口径天线, 其结构及仿真结果如图 5 所示。

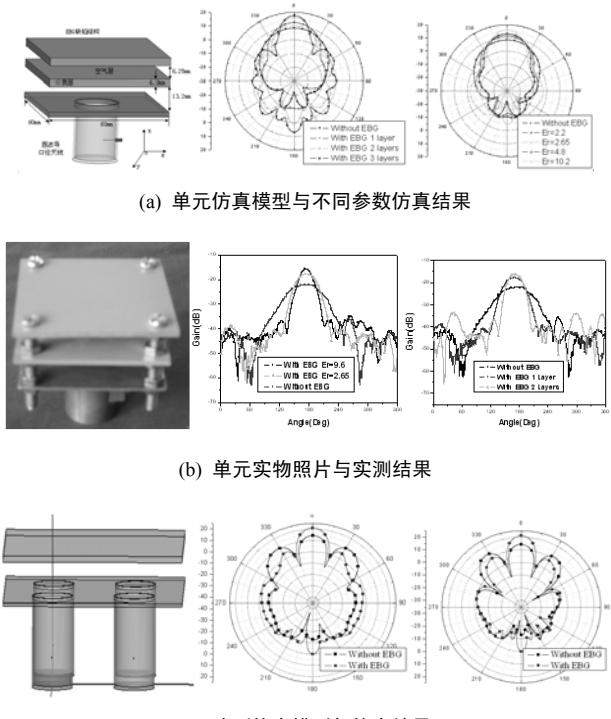


图 5 基于 EBG 覆层圆波导天线

从图 5(a)的仿真结果可以看出, 天线的辐射特性由原来没有 EBG 结构时前向增益的 8.44dB 提高到 16.18dB , 有效的改善了圆波导口径天线的前向增益。另外, 可以看出选用高介电常数的材料进行覆盖对圆波导口径天线增益的提高和降低覆层厚度

均将更加有意义。覆层天线的实物与实际测试结果如图 5(b)所示, 可以看出使用覆层使原天线的增益由 -21.9dB 增加到 -17.6dB , 使用介电常数为 9.6 的覆盖使原天线的增益由 -21.9dB 增加到 -15.5dB 。这和仿真数值结果吻合良好。图 5(c)给出了阵列推广情况下的仿真模型和仿真结果。

3.2 基于类电等离子体波导天线

圆波导天线与上节相同, 根据 Pendry 理论采用周期性金属条带网来实现类电等离子体结构, 使该材料的等效介电常数等于零值的频率趋近于天线工作频率, 其结构尺寸和仿真结果如图 6 所示。

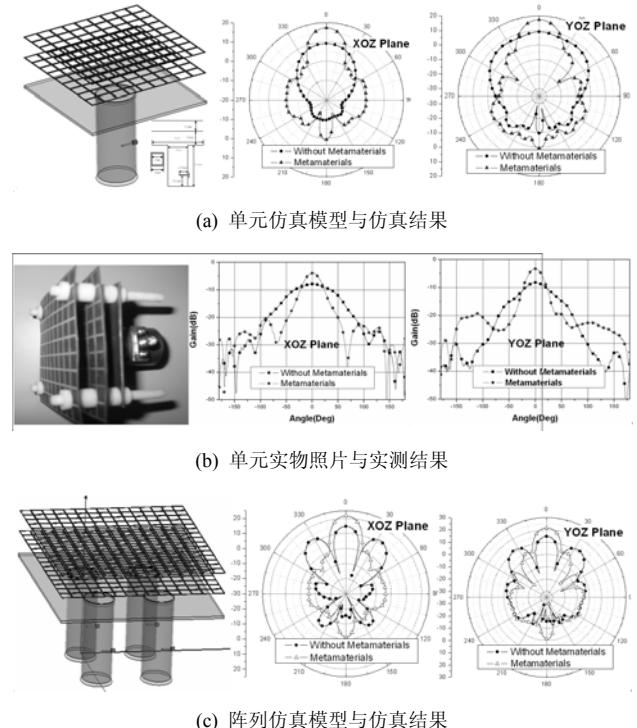


图 6 基于类电等离子体覆层圆波导天线

从数值仿真结果可以看出, 天线的增益从原有的 8.44dB 增加到 17.34dB 。图 6(b)为覆层波导口径天线实物照片与实际的测量结果, 实测结果与仿真结果吻合良好。在四元阵列推广中天线的增益分别由原来的 14.76dB 增加到 21.85dB 。从而有效证明了基于该类电等离子体覆层对天线波束有汇聚作用, 可以有效地提高天线阵列的前向增益, 降低了天线阵列的副瓣电平, 从而有效的改善天线阵列的辐射性能。

3.3 基于类磁等离子体波导天线

根据 Smith 理论采用 SRR 结构实现类磁等离子体结构，通过合理选择 SRR 结构尺寸，使 SRR 结构的磁等效等离子体的等效磁导率的零值频率趋近于天线的工作频率，电磁波经过 SRR 结构的折射率趋近于零。其结构与仿真结果如图 7 所示。

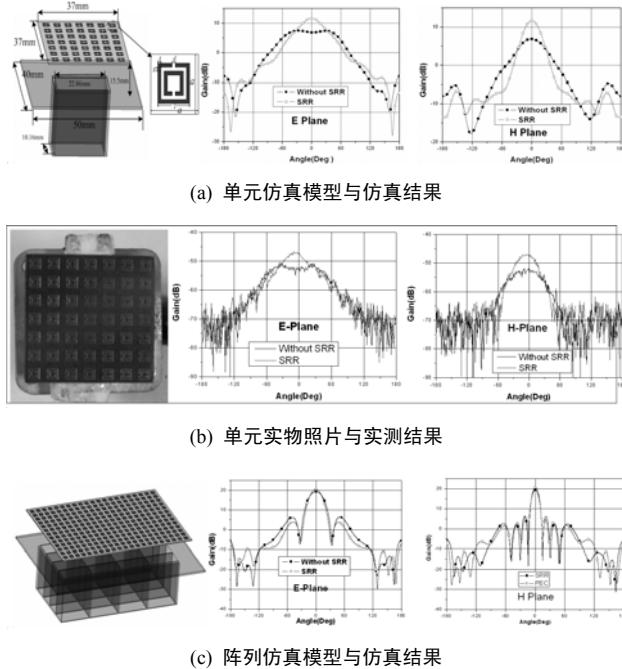


图 7 基于类磁等离子体覆层波导天线

从仿真结果可以看出，加载零折射的 SRR 结构覆层，天线的前向增益从原有的 7.48dB 增加到 11.67dB，同时可以看出副瓣相对于原波导天线有明显减少。实物照片与实测结果如图 7(b)所示，可以看出实测结果与仿真结果吻合良好。在十六元阵列推广中，天线的前向增益由原来的 19.33dB 增加到 20.57dB，后瓣电平由原来的 -5.64dB 减少到 -7.56dB。从而有效证明了基于该类磁等离子体覆层对天线波束有汇聚作用，可以有效地提高天线阵列的前向增益，降低了天线阵列的副瓣电平，有效的改善天线阵列的辐射性能。

3.4 基于双负复合材料波导天线

将 Smith 理论与 Pendry 理论相结合，采用周期性金属条带和金属 SRR 结构在介质板双面进行复合，从而实现双负结构，通过合理选择周期金属条带和金属 SRR 结构尺寸，使该结构的等效磁导率和

等效介电常数的零值频率趋近天线的工作频率，可使材料的等效介电常数与等效磁导率的乘积近似在天线工作频率近似为零，实现零折射，有效地增强了其方向性，同时旁瓣有明显降低。其结构与仿真结果如图 8 所示。

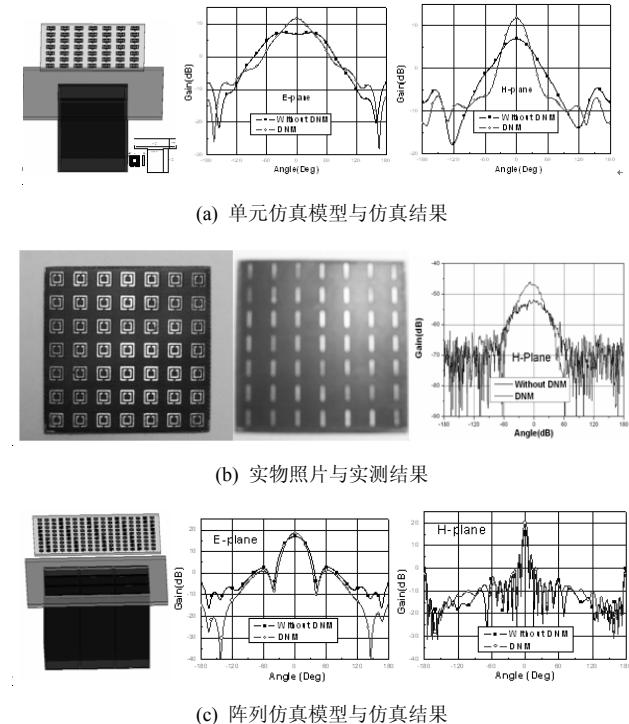


图 8 基于双负复合覆层材料波导天线

从仿真结果可以看出天线的增益有了显著的提高。天线的前向增益从原来的 7.48dB 增加到 11.68dB，后向增益也得到了明显的抑制。图 8(b)为双负覆层结构 SRR 面、SW 面实物照片与实测结果。可以看出实测结果与仿真结果吻合良好。从而有效证明了该基于双负结构复合材料覆层对天线波束有汇聚作用，可以有效地提高天线阵列的前向增益，降低了天线阵列的副瓣电平，有效的改善天线阵列的辐射性能。

4 结束语

本文主要研究了微波复合材料在波导口径天线中的应用。首先，根据描述微波材料特性的两个最基本量—等效介电常数和等效磁导率的取值范围，对微波材料进行了分类，并且在每一象限构建典型结构，并分析了其微波特性。在此基础上，以波导口径天线为例，从四个等效介电常数和等效磁导率

不同取值方向，构建覆层结构，通过大量的数值仿真结果和典型的实验测量，有力地证明了通过不同象限逼近等效介电常数与等效磁导率近似等于零值时可以实现零折射效应这一理论推理的正确性。工程技术人员可以根据这一推论构造，任意结构形式的零折射材料，不需要拘泥于双负的左手材料形式实现零折射。

文中通过构建折射率近似等于零的复合材料，采用覆层形式，以波导口径天线为实例，验证了理论推理，展示了该种覆层形式可以有效的提高天线的前向增益，降低阵列天线的副瓣电平。希望本文能对设计新型高增益定向天线和波束赋形技术的实现提供新的途径，对工程技术人员的实际工作有所帮助。

参 考 文 献

- [1] Veselago V G, The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of permittivity and permeability. Soviet Physics USPEKI,1968,(10):509-514.
- [2] J.B.Pendry, A.J.Holden, W. J. Stewart, and I. Yomgs. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures. Phys. Rev. Lett. 1996,76 (25): 4773-4776.
- [3] D.RSmith, W.J.Padilla, D.C.Vier, S.C.Nemat-Nasser, and S.Schulti. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. Phys. Rev. Lett. .2000,84(18) :4184-4187.
- [4] Li B.,Wu B., and Liang C.-H. High Gain Circular Waveguide Array Antenna Using Electromagnetic Band-Gap Structure, J. of Electromagn. Waves and Appl., Vol. 20, No.7, 955–966, 2006.
- [5] Li B., Wu B., and Liang C.-H. Study On High Gain Circular Waveguide Array Antenna With Metamaterial Structure, Progress In Electromagnetics Research, PIER 60, 207–219, 2006.
- [6] B.Li, P.-Y.Zhu, L.Liang, and C.-H. Liang. Study On High Gain Waveguide Array Antenna With SRR Structure, JEMWA ,volume 21, number 5, page 615-627, 2007.
- [7] L.Liang, B.Li, S.H.Liu, and C.H.Liang, A Study Of Using The Double Negative Structure To Enhance The Gain Of Rectangular Waveguide Antenna Arrays, Progress In Electromagnetics Research, PIER 65, 275–286, 2006.
- [8] 李斌, 吴边, 梁昌洪, 基于复合介质结构的圆波导高增益阵列天线研究, 电子与信息学报, Vol.29, No.4 :994-997, 2007.
- [9] 李斌, 党晓杰, 梁昌洪, 基于一维 EBG 结构的圆波导高增益天线, 电波科学学报, Vol.21, No.6:879-884, 2006.
- [10] 魏文元, 宫德明, 天线原理, 国防工业出版社, 1985.

作者简介

李斌, 男, 博士, 主要研究领域为阵列天线等;
赵交成, 男, 研究员, 主要研究领域为相控阵天线等。

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>