

Metamaterials 技术及其天线应用综述

刘 涛¹, 曹祥玉¹, 张 广², 文 曦¹

(1. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 空军工程大学导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘 要: Metamaterials 技术的一些独特电磁特性为克服当前天线、通信等领域遇到的一些技术上的限制提供了可能的解决方案。首先述评了目前文献中经常见到的一些 Metamaterials 的概念及其电磁特性;其次,重点综述了电磁带隙这一代表性技术的分析方法、分析模型及其在天线中应用;最后讨论了 Metamaterials 技术的国内外研究现状及发展方向。

关键词: 超颖质材料; 周期结构; 表面波; 同相反射; 天线

中图分类号: TN 82

文献标志码: A

Metamaterials technology and its antenna applications

LIU Tao¹, CAO Xiang-yu¹, ZHANG Guang², WEN Xi¹

(1. The Telecommunication Engineering Inst., Air Force Engineering Univ., Xi'an 710077, China;

2. The Missile Inst., Air Force Engineering Univ., Sanyuan 713800, China)

Abstract: Presently, metamaterials has received considerable attention in the field of electromagnetic, whose some unique electromagnetic features may offer promising alternatives for overcoming the limitations of current technology in the fields of antennas and communications. Firstly, some conceptions of metamaterials and their electromagnetic characteristics are reviewed. Secondly, analytical methods, analytical models and antenna application of EBG being a representative technology of metamaterials are reviewed emphatically. Finally, the current research situations and developmental trends of metamaterials are discussed.

Keywords: metamaterials; periodic structure; surface wave; in-phase reflection; antenna

0 引 言

近几年,具有独特电磁特性的一些人工材料成为电磁领域一个研究热点,如电磁带隙(electromagnetic band-gap, EBG)结构、缺陷地结构(defected ground structures, DGS)、左手媒质(left-handed materials, LHM)、频率选择表面(frequency selective surface, FSS)、软/硬表面(soft/hard surface)等。这些材料统称为“Metamaterials”,其中“meta”是一个古希腊的单词前缀,有“超”的意思,一般译为“超材料”或“超颖质材料”。这些材料都是人工合成材料,在电磁领域都表现出一些在自然界中不存在的现象,像频率禁带、负折射率等。当把它们应用于微波和毫米波工程领域中,可显著改善一些设备及器件的性能,如提高天线增益、减小阵元间耦合、制造高 Q 谐振腔^[1]、实现完美透镜^[2]等。可以说,这些人工材料的出现,为克服当前在天线、通信等领域遇到的一些技术上的限制提供了可能的解决方案^[3-5]。

Metamaterials 技术在天线中的应用,目前主要是以 EBG 的应用研究为代表,像 LHM 技术现在仍处于对它的奇异特性的理论研究、结构实现和实验观察上,具体应用研究远没有 EBG 技术开展的广泛和容易实现。因此,本文后半部分主要综述了 EBG 结构在天线中的应用研究现状。

1 几个概念

1.1 电磁带隙结构

EBG 结构是一种介质在另一种介质中周期排列所组成的人造晶体,该排列周期为波长量级,简言之,就是一种具有频率带隙特性的人造周期性结构。1987 年, Yablonovitch^[6]在讨论如何抑制自发辐射时提出了光子晶体(photonic crystal)这一崭新概念。几乎同时, John^[7]在讨论光子局域时也独立提出了这一概念。光子晶体最显著的特性就是,当光波在晶体中传播时,某些频率范围的波将不能通

收稿日期:2006-11-01; 修回日期:2007-03-05。

基金项目:国家自然科学基金(60671001);陕西省自然科学基金基础研究计划(2005F21);西安市工业攻关项目(GG06020);空军工程大学电讯工程学院博士创新基金(200603)资助课题

作者简介:刘涛(1976-),男,博士研究生,主要研究方向为 EBG 结构和数值算法。E-mail: lt9571@163.com

过,该频率范围被称作光子带隙(photonic bandgap, PBG)。虽然最初的光子晶体结构研究是在光学领域,但是这种结构通过缩比关系可应用于很宽的频率范围内,只要合理选择材料的种类、尺寸和周期性结构的点阵参数,就可制作出带隙位于声波、微波、光波范围内的光子晶体,在电磁学领域就被称作电磁晶体(electromagnetic crystal)或电磁带隙材料。

EBG 材料是目前电磁领域发展最快的研究课题之一,它可使研究人员某种程度上控制和操纵电磁波的传输,而这在以前是不可能的事情。理论和实验的发展,以及实际应用的技术潜力,都驱动了 EBG 技术的快速发展。尤其值得指出的是,在电磁带隙的深入研究中,Luo^[8]发现了电磁晶体的负折射现象,目前称之为左手媒质。

1.2 左手媒质

左手媒质首先由苏联物理学家 V. G. Veselago^[9]于 1968 年提出。他当时提出一种介电常数和磁导率同时为负数的物质,并分析了这种物质的特殊性质。与普通媒质不同,在这种媒质中,电场 E 、磁场 H 和波矢 k 形成了左手系,因此,Veselago 将这种媒质称作左手媒质。Veselago 指出,在左手媒质中,群速为负值,相速度与能流的方向相反;左手媒质的折射率应该是负的,波在右手媒质和左手媒质的界面处发生的是负折射,即折射射线与入射射线在界面法线的同侧;介电常数和磁导率同时为负的媒质只有在具有频率色散时才能实现。虽然 Veselago 对左手媒质的特性进行了较为详细的分析,但 30 多年来这一观点一直被认为是一种假想而并未得到证实,因为自然界并不存在介电常数和磁导率同时为负的物质。1999 年,Pendry 对如何人工制造出具有负磁导率的材料给出了建议,并于次年发表文章称左手媒质可以制造完美透镜^[2]。2000 年,D. R. Smith 领导的研究小组按照 Pendry 的建议做出了第一例左手材料^[10],关于左手媒质的研究才又被学者重视。随后 Smith 小组又通过实验证实了负折射率^[11]。

当前,LHM 主要通过周期结构来实现,正如 EBG 和频率选择表面实现方法一样。这自然引发一个问题,即是否所有 EBG 材料都有负折射率现象?如果有,那必要的条件又是什么呢?文献[12]对此问题进行了研究,研究表明,当周期结构工作在不同频率范围时,可分别表现出 EBG、LHM 和右手媒质的特性。LHM 也可抑制表面波,降低边缘绕射影响,改善天线方向图^[13]。

1.3 缺陷地结构

DGS 是一种蚀刻在接地面上的任意形状,可以说是从 PBG 结构演化而来的。它既可以是周期结构,也可以是非周期结构,它能比较容易的用等效电路来表示。DGS 可应用在平面谐振器、高特征阻抗传输线和滤波器、天线等各种器件和设备上。在应用中,DGS 表现出以下特性:扰乱接地面屏蔽场;增加等效介电常数、增加传输线的有效电容和

电感等。

DGS 概念可应用于 EBG 结构的设计中。如果在 EBG 结构中引入线状缺陷,缺陷会在晶体中激起传播模,模式的频率位于电磁带隙内,这就是波导模式^[14]。波导模式被限制在缺陷所在区域内,在缺陷以外的电磁晶体区域不存在传播模。这就意味着,在缺陷所在区域内激起的模式会无泄漏的一直传播,从而实现了波导^[14-15]。Yang 等还提出了 TEM 传输线波导^[16]。如果在电磁晶体中引入局部缺陷,则可以形成高 Q 电磁晶体谐振腔。

1.4 频率选择表面

FSS 是一种周期性的平面阵列结构,其对不同频段的人射电磁波能进行有选择性的发射或传输。FSS 的研究虽然远远早于 PBG 概念的提出,但是 FSS 的这种特性,也可以将其视为一种电磁晶体结构^[17]。FSS 对于各个方向的人射波具有选择性的反射或透射特性,应与其作为 EBG 在漏波区的能带结构相对应,只是在漏波区,由于 EBG 的谐振频点为复数,难以求解,因此,FSS 的频率选择特性基本上都通过反射或透射系数表征。FSS 的应用范围涉及到光波、红外、毫米波及亚毫米波、微波等领域的许多方面^[18]。

1.5 软/硬表面

人工软/硬表面也是电磁领域近年一个研究的热点,他们主要应用在处理表面波问题上。软硬表面依据表面阻抗和边界条件来定义^[19],设表面阻抗的纵向和横向分量分别为 Z_l 和 Z_t ,则软表面定义为

$$Z_l = \infty, Z_t = 0, E_t \approx E_n \approx 0 \quad (1)$$

硬表面定义为

$$Z_l = 0, Z_t = \infty, \partial E_t / \partial n = \partial E_n / \partial n = 0 \quad (2)$$

当希望沿表面有零辐射场的时候,可以用软表面。反之,当希望沿表面有强的辐射场时,可以使用硬表面。文献[20]对在圆柱上的缝隙辐射从理论和实验证实了软硬表面的特性。软表面在 H 面表现出 PEC 特性,而在 E 面表现出 PMC 特性,因此它也可理解为一种带隙特性,可用于贴片天线抑制表面波的传播,提高天线性能,和最常用的 EBG 结构相比,某些情况下它在结构上可以做得更简单,体积也更小^[21]。

2 电磁带隙技术及天线应用

EBG 结构是 Metamaterials 中最有代表性的材料,已成为目前电磁领域发展最快的研究课题之一,它代表着当前电磁领域平面问题解决方案中的一项主要的突破技术,主要在于它具有导引和控制电磁波的能力。EBG 结构自从发展以来,迄今已提出各种各样的 EBG 结构,这其中最具代表性的就是 mushroom-like EBG 结构,也即高阻表面(high impedance surface, HIS)结构,对它的带隙理论和工程应用研究也最多。在下面的述评中也将以它为主要表述对象。

2.1 EBG 结构分析方法

EBG 结构的理论分析在其结构设计中起到关键的作用。EBG 结构最根本的特性是频率禁带特性,而频率禁带可以通过其能带结构来描述(一般用于无限大的理想 EBG 结构),也可以通过传输特性来描述(一般针对于有限结构或器件)。目前用来分析 EBG 结构特性的方法很多,理想的一维、二维或三维结构的带隙特征可以通过平面波展开法计算,规整的有限结构也可以采用传输矩阵法来计算。由于微波波段的波长较长,在光学波段可以认为是远远大于波长而能够按照无限大来处理的结构,在微波波段必须考虑其有限尺度的影响,所以,在微波波段,要想获得一种 EBG 结构的带隙特征,则需要采用全波数值分析方法,比如时域有限差分法(FDTD),有限元法(FEM),矩量法(MOM)等。

上述方法是获得 EBG 结构带隙特征的一些基本方法,但在实际的模型分析中,研究人员越来越借助于现在成熟的高频结构仿真软件来进行 EBG 结构的分析和仿真。目前常用的高频结构仿真软件有 Ansoft HFSS(high frequency structures simulation)和 CST-MWS(computer simulation technology microwave studio),Ansoft HFSS 现在最新版本是 Version10,CST-MWS 是 2006 版本。用仿真获得 EBG 带隙一般有三种方法^[22]:直接传输法、色散图法和反射相位法。直接传输法是获得 EBG 结构的 S 参数来观察带隙特征,色散图法是利用 EBG 结构单元获得本征模来描绘出带隙特征,反射相位法是利用平面波入射 EBG 结构单元获得反射相位特性来观察带隙特征。EBG 结构特性的实验测量常用方法有共面微带线法、振子法和悬置微带线法^[23]。

2.2 EBG 结构分析模型

高阻表面作为一种代表性的 EBG 结构,对其带隙物理机制的分析模型有很多。用上述的数值方法可以精确的计算复杂的 EBG 结构,获得对其带隙特性的认识,但需要耗费大量的计算资源和时间,所以,许多学者提出了一些更精确的解析模型^[24-25],但这些模型都限制在垂直平面波激励,而且也不能处理金属过孔半径的影响。

首先提出高阻表面结构的 Sievenpiper 是从单元 LC 并联谐振电路来解释这种 EBG 结构的物理机制,这种模型被称之为准静态等效媒质模型^[26]。他的这种观点是创新性的,使得分析和设计 EBG 结构都相对容易。但这种模型不能精确的计算等效电容 C 和电感 L 的值,尤其没有考虑金属过孔半径的影响。文献[27]对此模型进行了修正,分析中考虑了过孔半径的影响,使得分析的精确度有很大提高。但准静态模型毕竟只是一种近似模型,与实际相比,在准确度上还有一定差距。

文献[28]基于 mushroom-like BEG 结构的局域谐振本质,提出一种简单的局域谐振腔体单元(locally resonant

cavity cell,LRCC)模型。它是一种等效的微波谐振腔体,具有多谐性,其本征振荡模式与外界激励无关,揭示的是 EBG 结构的内在本质,同时也揭示了模式谐振频率与表面波带隙位置以及反射相位特性的密切联系。LRCC 模型包含了 EBG 结构的所有几何参数。LRCC 模型的一个不足之处就是从模式频率中还不能准确反映带隙宽度的变化。

文献[29]提出了一种简单的高阻表面理论分析模型,他把高阻表面结构看成由三部分组成:频率选择表面,金属过孔阵和地面。分别分析每一层结构就变得相对简单,对带宽控制也就容易。基于本征模分析,文献[30]对高阻表面带隙产生的机制也给出了一种新的解释,使得对表面波的传输模式有更深入的认识。

这些模型大多以高阻表面为分析对象,但也可以用于分析其他一些 EBG 结构。各种理论模型对分析认识 EBG 结构的物理机制有很大作用,但都还有其不足之处,所以对其分析有待更深入研究。

2.3 EBG 结构的天线应用

EBG 结构最显著的两个特性是表面波抑制特性和同相反射特性。在天线设计中合理应用这两个特性,可以显著改善天线的性能和结构。

在天线应用中,介质中激起的表面波会降低天线辐射效率,退化方向图,增加天线阵元间的互耦合。将 EBG 材料应用于天线的设计和平面微带天线阵列,由于 EBG 结构的表面波抑制特性,切断了基底中传播的表面波,增强了天线耦合到空间的电磁波辐射功率,使天线增益提高、侧向和后向辐射降低,天线单元之间的互耦减小,提高了天线的效率。Ramon Gonzalo^[31]等人研究证明,在平面微带天线中采用 EBG 结构,在降低回波损耗的同时增强了带宽,天线增益提高约 10 dB,后向辐射减小,前后比改善近 8 dB。Fan Yang^[32]在微带天线阵中采用 Mushroom-Like EBG,将天线间耦合度由 -15.85 dB 降低到 -25.03 dB,大大降低微带天线的阵元间耦合度,而带隙外耦合度基本没有变化。

利用 EBG 结构,表面波也可以被用来设计天线。文献[33]中就提出了一种新颖的表面波天线,利用了粒子群优化技术设计单元拓扑。在这种天线设计中,表面波不是被抑制,而是在介质中传播。当天线工作时,偶极子激励起强烈的表面波,此时偶极子起着能量转换器而不是辐射器的作用。当表面波传播到接地面边缘绕射时,就可获得一个类似单极子天线的辐射效果。

在天线的设计中,一般用良导体(perfect electric conductor,PEC)作为反射面,电场的边界条件使得垂直入射波在 PEC 面上有一个 180°的反射相位,即半波损失。因此,为了使平行极化天线的辐射波和通过电导体反射面的反射波最后取得同相,必须使天线与反射面的距离(最小)保持 $\lambda/4$ (从概念上讲,即要使空间相位 p 与时间相位 p 迭加后取得同相)。EBG 材料的同相反射特性可等效为理想磁导

体(perfect magnetic conductor, PMC)。在这种人工磁导体接地面上,对垂直入射波有 0° 的反射相位和最大的切向电场,反射相位随着频率从 180° 到 0° 连续变化,这就可以使天线紧挨 EBG 表面放置并获得较好的辐射特性,该特性为低剖面天线的设计提供了新的实现途径^[34-35]。

表面波抑制特性和同相反射特性在单个天线的设计和平面微带天线阵列的应用中已得到充分体现和证实。在各种应用中,尽管形状不同,材料各异,但都呈现较好的带隙特性和同相反射特性,可以非常有效地抑制表面波,克服微带天线固有的窄带缺陷,增强带宽,实现双带甚至多带工作^[36-37];可降低后瓣和旁瓣、加强前向辐射、提高天线增益;在阵列中可减小天线各单元间互耦,消除天线阵的扫描盲区,使天线设计尺寸减小,从而使天线设计小型化。

3 Metamaterials 技术研究现状及其发展

Metamaterials 技术作为一类人工复合材料的统称,其目前研究的热点集中于 EBG 和 LHM 技术,国外许多大学和科研机构都有研究小组进行 Metamaterials 技术的研究。在 EBG 的研究上,以 Yahya Rahmat-Samii 和 Tatsuo Itoh 分别领导的研究小组最为著名,他们对 EBG 的物理机制和应用都有较深入的研究。在 LHM 的研究上,D. R. Smith 领导的研究小组的工作比较突出。目前,对 EBG 的研究主要集中在如何在实际中应用的问题;对 LHM,主要集中在对其特性的理论研究上,由于其结构不易实现,所以应用研究还处于起始阶段。

国内在 Metamaterials 技术的研究方面已经全面展开,很多高校和研究机构都投入了大量的精力。根据检索,从 2000 年开始,国家自然科学基金在 Metamaterials 技术研究方面每年都资助几项课题,所资助的领域涉及 Metamaterials 技术的理论研究、制备表征和应用等多个方向(包含光波和微波两个领域)。“863”计划新材料技术领域 2006 年度专项课题申请指南中,仍然把半导体光子晶体材料、左手材料列为重点支持对象。国家“973”计划也重点资助了几项关于 Metamaterials 技术的研究课题,分别由一所或几所大学联合进行研究,代表研究单位有华东师范大学、国防科技大学、浙江大学和东南大学等。另外中科院物理所、化工冶金研究所以及复旦大学、西安电子科技大学等诸多研究单位也在进行这方面的研究工作。

作为 Metamaterials 中代表性的 EBG 结构,研究人员对其研究主要集中于平面结构上带隙理论和应用的研究,对曲面上带隙特性机理和应用研究还没完全展开。而曲面共形天线在航空航天以及移动通信等众多领域已得到了广泛应用,利用 EBG 改善曲面共形天线的性能也必然成为其下一步应用的目标。2005 年,Loughborough 大学的 G. K. Palikaras 等人把圆柱共形的 EBG 结构应用于偶极子天线,实现了共形 EBG 结构在 WLAN 基站天线上的良好应用,

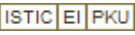
提高了 E 面上的方向性^[38]。Chalmers 大学的 Jian Yang 等人对柱面共形高阻抗 EBG 表面附近的偶极子之间的耦合进行了研究^[39],计算结果显示了共形 EBG 结构的良好倾向,但遗憾的是测量结果和计算结果吻合的并不是很好。从目前来看,曲面 EBG 结构文献报道的偏少,说明在曲面共形 EBG 结构的研究方面还需要加强。LHM 发展方向主要在其特殊效应的应用研究上。同时,对介电常数和磁导率一正一负情况的研究也是下一步的研究方向。

Metamaterials 作为一种新型的人工复合材料,使人们某种程度上开始可以操纵和控制电磁波的传播,它所表现出来的独特电磁特性为解决当前电扫描相控阵、高精度 GPS、蓝牙、移动通信、便携式天线等技术中出现的技术问题提供了一种可能的解决方案。各种 Metamaterials 在特性和结构上既有类似,又有各自独特的地方,可以说互相交叉,将他们结合起来研究将是一项重要而富有挑战性的工作。

参考文献:

- [1] Yonekura Jun, Mitsutaka Ikeda, Toshihiko Baba. Analysis of finite 2-D photonic crystals of columns and lightwave devices using the scattering matrix method[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, 7(8): 1500 - 1508.
- [2] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 85: 39 - 66.
- [3] Hurtado R, Klimczak W, Mckinzie W E, et al. Artificial magnetic conductor technology reduces weight and size for precision GS antennas[C]// *Navigational National Technical Meeting*, San Diego, CA, 2002, 1: 28 - 30.
- [4] Jimenez Broas R F, Sievenpiper D F, Yablonovitch E. A high-impedance ground plane applied to cellphone handset geometry [J]. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 2002, 49(7): 1262 - 1265.
- [5] Salonen P, Keskilammi M, Sydanheimo L. A low-cost 2.45 GHz photonic band-gap patch antennas for wearable systems[C]// *Proceedings of the 11th International Conference on Antennas and Propagation*, ICAP, Manchester, UK, 2001: 719 - 724.
- [6] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58: 2059 - 2062.
- [7] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58: 2486 - 2489.
- [8] Lou C, Johnson S G, Ioannopoulos J D, et al. Negative refraction without negative index in metallic photonic crystals[J]. *Optics Express*, 2003, 11(7): 746 - 754.
- [9] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneous negative values of ϵ and μ [J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1968, 10: 509.
- [10] Smith D R, Willie Padilla J, Vier D C, et al. Composite medium

- with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 18(5): 4184.
- [11] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, 292: 77–79.
- [12] Gao Chu, Chen Zhining, Wang Yunyi, et al. Investigation on relationship of electromagnetic band-gap structures and left/right handed structures[C]// *IEEE International Workshop on Antenna Technology*, 2005: 387–390.
- [13] Baccarelli P, Burghignoli P, Lovat G, et al. Surface-wave suppression in a double-negative metamaterial grounded Slab[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2003, 2: 269–272.
- [14] Mekis Attila, Fan Shanhui, Joannopoulos J D. Bound states in photonic crystal waveguides and waveguide bends[J]. *Phys. Rev. B*, 1998, 58: 4809–4817.
- [15] Smith C J M, Benisty H, Olivier S, et al. Low-loss channel waveguides with two-dimensional photonic crystal boundaries[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 77(18): 2813–2815.
- [16] Yang F R, Ma K P, Qian Y, et al. A novel TEM waveguide using uniplanar compact photonic band-gap (UC-PBG Structures)[J]. *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech*, 1999, 47(11): 2092–2098.
- [17] Kyriazidou C A, et al. Artificial versus natural crystal: effective wave impedance of printed photonic band-gap materials[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2000, 48(1): 95–106.
- [18] Mittra R, et al. FSS and their microwave and optical applications[J]. *Illinois: University of Illinois*, 1993.
- [19] Kildal P S. Definition of artificially soft and hard surface for electromagnetic waves[J]. *Electronics Letters*, 1988, 24(3): 168–170.
- [20] Ulvers Tore, Kildal P S. Radiation from slots in artificially soft and hard cylinders[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1989, 37(12): 1628–1632.
- [21] Li Rongbin, et al. Radiation-pattern improvement of patch antennas on a large-size substrate using a compact soft-surface structure and its realization on LTCC multilayer technology[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2005, 53(1): 200–208.
- [22] Remski R. Analysis of EBG surfaces using ansoft HFSS[J]. *Microwave*, 2000, 43(9): 190–198.
- [23] 胡荣, 张雪霞. PBG 结构特性的研究及其在天线中的应用[J]. *电子学报*, 2003, 31(12): 1765–1770.
- [24] Diaz R E, Aberle T J, Mckinzie W E. TM mode analysis of a sievenpiper high-impedance reactive surface[C]// *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2000, 1: 327–330.
- [25] Tretyakov S A, Simovski C R. Dynamic model of artificial reactive impedance surface[J]. *J. Electromagn Waves and Appl*, 2003, 17(1): 131–145.
- [26] Sievenpiper D. High-impedance electromagnetic surfaces[D]. *Ph. D. dissertation, Dep. Elect. Eng. Univ. California at Los Angeles, Los Angeles, CA*, 1999.
- [27] 梁昌洪. PBG 高阻表面的准静态等效媒质模型[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2004: 5.
- [28] 李龙. 广义电磁谐振与 EBG 电磁局域谐振研究及应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005: 113–130.
- [29] Sergio Clavijo, Rodolfo Diaz E, William E McKinzie. Design methodology for sievenpiper high-impedance surfaces: an artificial magnetic conductor for positive gain electrically small antennas[J]. *IEEE Trans. on AP*, 2003, 51(10): 2678–2690.
- [30] Ramprasad R, Petras M. New interpretation of wave propagation in high impedance surfaces[C]. 2005: 1741–1744.
- [31] Ramon Gonzalo Peter de Maagt, Mario Sorolla. Enhanced patch-antenna performance by suppressing surface waves using photonic bandgap substrates[J]. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(11): 2131–2138.
- [32] Yang Fan, Rahmat-Samii Yahya. Microstrip antennas integrated with electromagnetic band-gap (EBG) structures: a low mutual coupling design for array applications - antennas and propagation[J]. *IEEE Trans. on AP*, 2003, 51(10): 2936–2948.
- [33] Jin N, Rahmat-Samii Y. Particle swarm optimization of miniaturized quadrature reflection phase structure for low-profile antenna applications[C]// *IEEE AP-S Int. Symp. Dig.*, 2005, 2(7): 255–258.
- [34] Yang Fan, Rahmat-Samii Yahya. Reflection phase characterizations of the EBG ground plane for low profile wire antenna applications[J]. *IEEE Trans. on AP*, 2003, 51(10): 2691–2703.
- [35] Alexandros Feresidis P, George Goussetis, Wang ShenHong, et al. Artificial magnetic conductor surface and their application to low-profile high-gain planar antenna[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2005, 53(1): 209–215.
- [36] Rahnman M, Stuchly M. Wide-band microstrip patch antenna with planar PBG structure[C]// *Proc. IEEE APS Dig.*, 2001, 2(7): 486–489.
- [37] Sudha T, Vedavathy T S. A dual band circularly polarized microstrip antenna on an EBG substrate[C]// *IEEE ISAP*, 2002, 2(6): 68–71.
- [38] Palikaras G K, Feresidis A P, Vardaxoglou J C. Cylindrical EBG surfaces for omni-directional wireless LAN antennas[C]// *IEEE Proceeding*, 2005, 105: 339–342.
- [39] Yang Jian, Kildal Per-Simon. An efficient computation of impedances of dipoles over cylindrical structure by using a spectrum of 2D solutions with asymptotic waveform evaluation[C]// *IEEE Proceeding*, 2004, 104: 3956–3959.

作者: 刘涛, 曹祥玉, 张广, 文曦, LIU Tao, CAO Xiang-yu, ZHANG Guang, WEN Xi
作者单位: 刘涛, 曹祥玉, 文曦, LIU Tao, CAO Xiang-yu, WEN Xi (空军工程大学电讯工程学院, 陕西, 西安, 710077), 张广, ZHANG Guang (空军工程大学导弹学院, 陕西, 三原, 713800)
刊名: 系统工程与电子技术 
英文刊名: SYSTEMS ENGINEERING AND ELECTRONICS
年, 卷(期): 2007, 29(12)
被引用次数: 1次

参考文献(39条)

1. Yonekura Jun; Mitsutaka Ikeda; Toshihiko Baba Analysis of finite 2-D photonic crystals of columns and lightwave devices using the scattering matrix method [外文期刊] 1999(08)
2. Pendry J B Negative refraction makes a perfect lens [外文期刊] 2000
3. Hurtado R; Klimczak W; McKinzie W E Artificial magnetic conductor technology reduces weight and size for precision GS antennas [外文会议] 2002
4. Jimenez Broas R F; Sievenpiper D F; Yablonovitch E A high impedance ground plane applied to cellphone handset geometry 2002(07)
5. Salonen P; Keskilampi M; Sydanheimo L A low-cost 2.45 GHz photonic band-gap patch antennas for wearable systems 2001
6. Yablonovitch E Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics 1987
7. John S Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [外文期刊] 1987
8. Lou C; Johnson S G; Jannopoulos J D Negative refraction without negative index in metallic photonic crystals 2003(07)
9. Veselago V G The electrodynamics of substances with simultaneous negative values of ϵ and μ 1968
10. Smith D R; Willie Padilla J; Vier D C Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity [外文期刊] 2000(05)
11. Shelby R A; Smith D R; Schultz S Experimental verification of a negative index of refraction [外文期刊] 2001
12. Gao Chu; Chen Zhining; Wang Yunyi Investigation on relationship of electromagnetic band-gap structures and left/right handed structures 2005
13. Baccarelli P; Burghignoli P; Lovat G Surface-wave suppression in a double-negative metamaterial grounded Slab [外文期刊] 2003(0)
14. Mekis Attila; Fan Shanhui; Joannopoulos J D Bound states in photonic crystal waveguides and waveguide bends [外文期刊] 1998(8)
15. Smith C J M; Benisty H; Olivier S Low-loss channel waveguides with two-dimensional photonic crystal boundaries [外文期刊] 2000(18)
16. Yang F R; Ma K P; Qian Y A novel TEM waveguide using uniplanar compact photonic band-gap (UC-PBG Structures) [外文期刊] 1999(11)
17. Kyriazidou C A Artificial versus natural crystal: effective wave impedance of printed photonic

[band-gap materials](#)[外文期刊] 2000(01)

18. [Mittra R](#) [FSS and their microwave and optical applications](#) 1993

19. [Kildal P S](#) [Definition of artificially soft and hard surface for electromagnetic waves](#)[外文期刊] 1988(03)

20. [Ulvers Tore;Kildal P S](#) [Radiation from slots in artificially soft and hard cylinders](#)[外文期刊] 1989(12)

21. [Li Rongbin](#) [Radiation-pattern improvement of patch antennas on a large-size substrate using a compact soft-surface structure and its realization on LTCC multilayer technology](#)[外文期刊] 2005(01)

22. [Remski R](#) [Analysis of EBG surfaces using ansoft HFSS](#) 2000(09)

23. [胡荣;张雪霞](#) [PBG结构特性的研究及其在天线中的应用](#)[期刊论文]-[电子学报](#) 2003(12)

24. [Diaz R E;Aberle T J;McKinzie W E](#) [TM mode analysis of a sievenpiper high-impedance reactive surface](#)[外文会议] 2000

25. [Tretyakov S A;Simovski C R](#) [Dynamic model of artificial reactive impedance surface](#)[外文期刊] 2003(01)

26. [Sievenpiper D](#) [High-impedance electromagnetic surfaces](#) 1999

27. [梁昌洪](#) [PBG高阻表面的准静态等效媒质模型](#) 2004

28. [李龙](#) [广义电磁谐振与EBG电磁局域谐振研究及应用](#)[学位论文] 2005

29. [Sergio Clavijo;Rodolfo Diaz E;William E McKinzie](#) [Design methodology for sievenpiper high-impedance surfaces:an artificial magnetic conductor for positive gain electrically small antennas](#) 2003(10)

30. [Ramprasad R;Petras M](#) [New interpretation of wave propagation in high impedance surfaces](#) 2005

31. [Ramon Gonzalo Peter de Maagt;Mario Sorolla](#) [Enhanced patchantenna performance by suppressing surface waves using photonic bandgap substrates](#)[外文期刊] 1999(11)

32. [Yang Fan;Rahmat-Samii Yahya](#) [Microstrip antennas integrated with electromagnetic band-gap \(EBG\) structures:a low mutual coupling design for array applications-antennas and propagation](#) 2003(10)

33. [Jin N;Rahmat-Samii Y](#) [Particle swarm optimization of miniaturized quadrature reflection phase structure for low-profile antenna applications](#)[外文会议] 2005

34. [Yang Fan;Rahmat Samii Yahya](#) [Reflection phase characterizations of the EBG ground plane for low profile wire antenna applications](#)[外文期刊] 2003(10)

35. [Alexandros Feresidis P;George Goussetis;Wang ShenHong](#) [Artificial magnetic conductor surface and their application to low-profile high-gain planar antenna](#)[外文期刊] 2005(01)

36. [Rahman M;Stuchly M](#) [Wide-band microstrip patch antenna with planar PBG structure](#) 2001(07)

37. [Sudha T;Vedavathy T S A](#) [dual band circularly polarized microstrip antenna on an EBG substrate](#)[外文会议] 2002(06)

38. [Palikaras G K;Feresidis A P;Vardaxoglou J C](#) [Cylindrical EBG surfaces for omni-directional wireless LAN antennas](#)[外文会议] 2005

39. [Yang Jian;Kildal Per-Simon](#) [An efficient computation of impedances of dipoles over cylindrical structure by using a spectrum of 2D solutions with asymptotic waveform evaluation](#) 2004

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，一直致力和专注于微波、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>