

EBG 高阻表面结构的矩形波导宽边缝隙天线

李斌, 李龙, 梁昌洪

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘要: 本文提出了波导宽边缝隙天线提高方向图前后辐射比的一种新的实现途径。文中采用在波导宽边上附加 EBG (electromagnetic band-gap) 高阻表面结构作为高阻接地面的新方法来提高波导缝隙天线方向图的前后辐射比, 并对设计的 EBG 波导缝隙天线单元和阵列的辐射特性进行了仿真分析和实际测量, 仿真和测量结果说明该方法对提高矩形波导宽边缝隙天线方向图的前后辐射比是十分有效的。

关键词: 波导缝隙天线; EBG 表面结构; 方向图; 前后辐射比

中图分类号: TN821 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 03-0429-04

The Rectangular Waveguide Board Wall Slot Array Antenna with EBG High-impedance Surface Structure

LI Bin, LI Long, Liang Chang-hong

(National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian Univ., Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: This paper deals with the method to raise the front to back (F/B) ratio on the pattern for the slots antenna of rectangular waveguide. The EBG (electromagnetic band-gap) high-impedance surface structure is utilized as a high-impedance ground plane for slots on rectangular waveguide to raise the front to back (F/B) ratio, and detailed analysis is made to study the influence of EBG high-impedance surface characteristic on the radiation properties of the slots array antenna of rectangular waveguide by using the simulation method. The electric parameters of the designed example antenna are measured. The experimental results show that this method is effective.

Key words: waveguide slot antenna; EBG high-impedance surface structure; patterns; front to back ratio

1 引言

电磁带隙(Electromagnetic Band-Gap, 即 EBG)结构是从光子带隙结构^[1]发展而来, 具有周期特性, 能够使某些频段的电磁波无法从中通过, 存在明显的频率禁带特性。近年来, 随着光子带隙概念在电磁领域的不断拓展, 电磁带隙结构材料得到了广泛的研究和应用。

目前, 对 EBG 结构电磁特性的分析研究已有不少文献^[2,3]。EBG 高阻表面结构用于单极子天线国内外也有学者进行过研究^[4], 他们研究了在单极子天线或微带贴片天线周围附加 EBG 高阻表面结构来拟制表面波^[5-7], 提高天线增益。但在作为现代雷达和通信系统中常用部件的波导缝隙天线, 其 EBG 高阻表面结构的应用国内外相关报道甚少。本文主要对将 EBG 高阻表面结构应用于矩形波导宽边缝隙天线进行了研究, 考察了单缝隙和多缝隙情

况的辐射特性, 并通过仿真分析, 发现这种结构可有效的提高天线方向图的前后辐射比, 最后给出了实验测量的结果, 说明了这种结构的可行性和有效性。

2 EBG 结构的设计

作为本文研究的基础, 对 EBG 方形高阻表面结构按等效电路模型进行初始化设计^[8], 再应用基于有限元法的 HFSS 软件进行验证。假设方形高阻表面的结构参数为: 贴片的单元边长为 w , 单元周期为 a , 单元间的缝隙为 g , 金属过孔的直径为 d , 基板材料的厚度为 t , 介电常数为 ϵ_r 。EBG 结构示意图如图 1(a) 所示。

可以将结构中的一个单元看成一个等效谐振电路, 如图 1(b) 所示, 应用复变函数中保角变换原理求解等效模型中的电容和电感值, 单元等效 LC 参数由式(1)、(2) 给出^[8]:

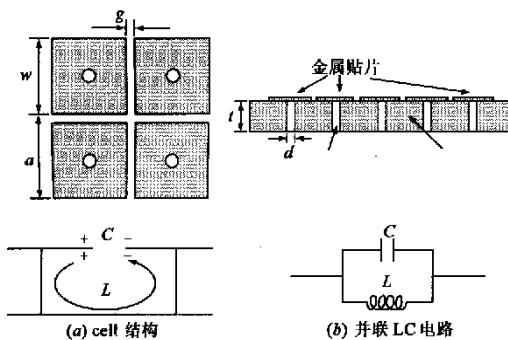


图 1 (a) EBG 高阻表面结构示意图 ;(b) LC 等效电路图

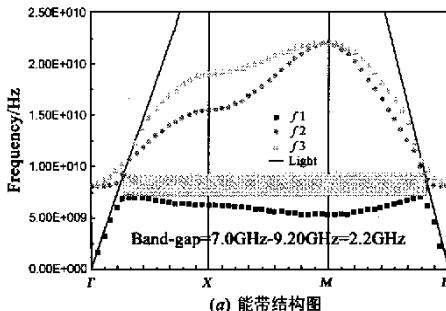
$$C = \frac{\varepsilon_0 w}{\pi} \operatorname{ch}^{-1} \left(\frac{a}{g} \right) + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r w'}{\pi} \operatorname{ch}^{-1} \left(\frac{\operatorname{sh}(\pi(w' + g)/4t)}{\operatorname{sh}(\pi g/4t)} \right) + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r w}{\pi} \left[\frac{\pi^2 t}{2w} \operatorname{ln} \left(\frac{a + \sqrt{a^2 - d^2}}{d} \right) \right] \quad (1)$$

$$L = \mu_0 t \left\{ \frac{1}{\pi} \left[\operatorname{ln} \left(\frac{a + \sqrt{a^2 - d^2}}{d} \right) + 1.301825 \right] \right\} \quad (2)$$

式中 $w' \approx \left(1 - \frac{k^2 S}{2w^2} \right) w$, k 参数一般取 3 左右。

依据上述理论,设计了一个工作在 7.5GHz 的 EBG 结构,选择介质基板的介电常数 $\varepsilon_r = 2.65$, 基板厚度 $t = 1.5\text{mm}$, 方形周期单元贴片边长 $w = 3.0\text{mm}$, 单元之间的缝隙 $g = 0.5\text{mm}$, 短路孔半径 $r = 0.3\text{mm}$ 构成了 EBG 高阻表面结构,对设计出的 EBG 结构用 Ansoft HFSS 软件对其进行带隙特性进行了仿真验证,结果如图 2(a)所示。并对实际加工的 EBG 结构的带隙特性进行了测量,其结果如图 2(b)所示。

由图 2(b)可见,在 7.11~9.07GHz 频率范围内,有明



(a) 能带结构图

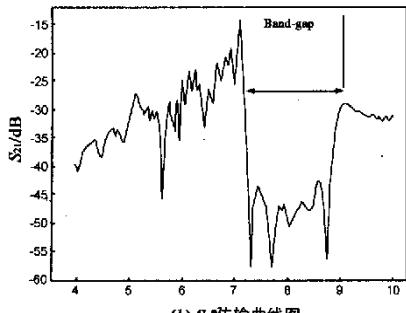
(b) S₂₁ 传输曲线图

图 2 方形高阻表面的电磁特性图

显的电磁带隙特性,根据仿真和测试结果以及天线的工作频率,这里设计的 EBG 高阻表面结构可以满足设计要求。

3 EBG 结构波导宽边缝隙天线

现在所使用的波导宽边缝隙天线多为线性阵列和平面阵列天线,作为波导宽边大型、多单元缝隙阵列天线的设计的基础,首先对波导宽边缝隙天线的典型结构结合 EBG 高阻表面结构进行设计,并对其辐射特性进行仿真分析。

根据波导缝隙天线设计的一般过程结合 EBG 高阻表面结构,设计出了波导宽边单缝隙、线阵和面阵 EBG 结构天线。

3.1 单缝隙 EBG 天线的辐射特性分析

所设计的宽边波导缝隙天线为工作频率 7.5GHz 的缝隙驻波天线,这里选用非标扁波导,波导的宽边和窄边的尺寸分别为 27.8mm × 6.31mm, 波导壁厚 1mm, 缝隙长度为 20.58mm, 缝隙宽度为 4mm, 缝隙中心距短路边 14.4mm, 缝隙偏离波导中心位置为 3.07mm, 并为了考察 EBG 结构加载对缝隙天线特性的影响,这里添加了一个 60mm × 60mm 的一个接地板,对缝隙进行 EBG 结构加载, 分别在缝隙两侧放置 4 × 8 单元的 EBG 高阻表面结构,其结构如图 3(a)所示。

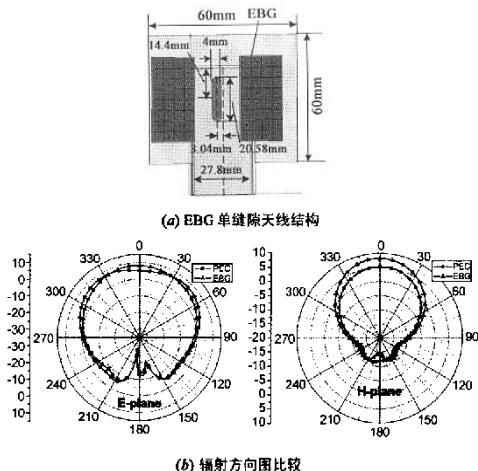


图 3 EBG 单缝隙天线

应用 HFSS 对两种情况的辐射特性进行了数值仿真分析,辐射方向图的数值结果如图 3(b)所示,可以看出在存在一定的接地板条件下,加载 EBG 结构可以对天线的前向增益有 3.3dB 的提高,并对天线的后瓣有一定的抑制作用,有 2.5dB 的减少。

3.2 缝隙线阵 EBG 天线的辐射特性分析

为了进一步验证在单缝隙天线中得出的结论,设计了一个 5 单元的线性宽边缝隙驻波阵天线,其基本参数与单缝隙相同,单元间距为 28.8mm, 两侧有 30mm × 150mm 的接地板,在接地板处分别加载 5 × 30 单元的 EBG 高阻表

面结构,其结构如图4(a)所示。

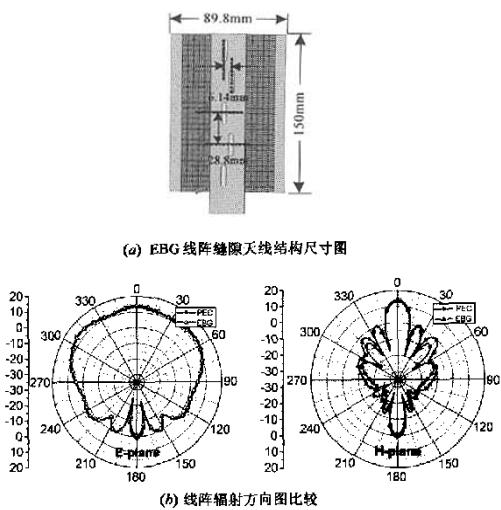


图4 EBG结构5元线阵缝隙天线

数值仿真结果如图4(b)所示,将EBG结构应用于波导宽边缝隙线阵天线同样可以改善天线的辐射特性,加载EBG结构可以对天线的前向增益有2dB的提高,并对天线的后瓣有所抑制,后瓣有3.5dB的减少。

3.3 缝隙面阵EBG天线的辐射特性分析

在实际中,波导宽边缝隙平板天线相对于上两种情况有更加广泛的应用,这里对加载EBG结构波导宽边缝隙平板天线的辐射特性进行了进一步的讨论。本文设计了一个 5×5 共25个单元的平板阵列,其缝隙的基本参数与单缝隙相同,单个波导上的缝隙分布与线性阵列相同,在平面阵列中波导间的间距为28.8mm,从而可得这一平面阵列天线为均匀分布。在天线的周围有 $40mm \times 40mm$ 的接地板,在接地板上四周各加载了 5×30 的EBG高阻表面结构,其结构如图6(a)所示。

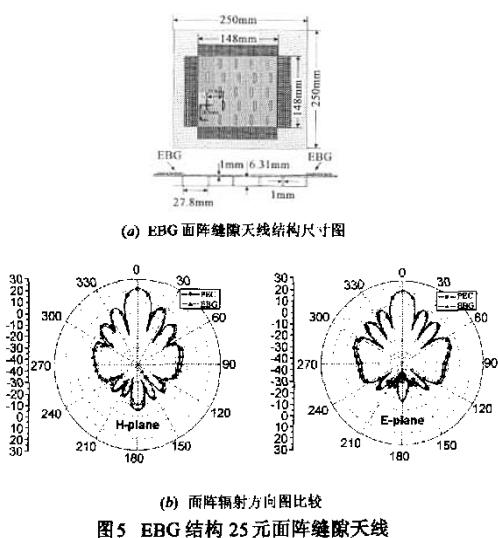


图5 EBG结构25元面阵缝隙天线

数值仿真结果如图5(b)所示,根据天线的结构特性,这里只给出了一个面的辐射方向图,从图上可以明显看出将EBG高阻表面结构应用于波导宽边缝隙面阵天线同样可以改善天线的辐射特性,加载EBG结构可以对天线的前向增益有1.5dB的提高,并对天线的后瓣有效抑制,有7dB以上的明显减少。这表明EBG结构用于波导宽边缝隙天线可以有效的提高天线方向图的前后辐射比。

4 实验验证

根据仿真结果,加工了实际的缝隙天线并对其进行了测量,以验证仿真结论。图6(a)分别为一般波导缝隙天线阵和EBG结构加载的缝隙天线阵的实物结构,用远场测量的方法对波导缝隙天线阵列和其附加EBG结构的辐射方向图进行了实际的测量,测试频率为7.5GHz。其测试结果如图6(b)和(c)所示。比较方向图测量结果,可以看出在接地板处附加EBG结构对波导缝隙天线阵列的方向图有明显的改善,方向图的前向增益提高了1.8dB,且有效的抑制了天线的后瓣,较原有PEC情况减少了14dB,从而进一步验证了数值仿真所得到的结论。

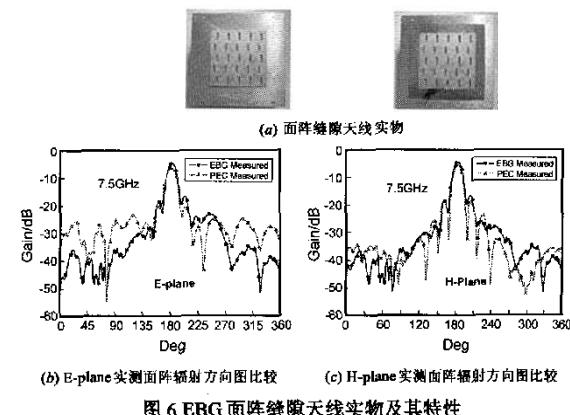


图6 EBG面阵缝隙天线实物及其特性

5 结论

本文将EBG高阻表面结构应用于矩形波导宽边缝隙天线及其阵列,从仿真分析结果可以看出,将EBG结构应用于波导宽边缝隙天线可以改善天线的辐射特性,提高天线方向图的前后辐射比,并对加工的实物天线进行了方向图的测量,从而验证了EBG结构用于波导宽边缝隙天线可以有效地提高天线方向图的前后辐射比这一结论。

参考文献:

- [1] E Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20):2059-2062.
- [2] D Sievenpiper, et al. Antennas on high-impedance ground planes [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques' s Digest (7803-5135-5), 1999. 1245-1248.

- [3] L Zhang. An efficient finite-element method for the analysis of photonic band-gap materials [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques's Digest, 1999, 1703 - 1706.
- [4] D Sievenpiper. High impedance electromagnetic surface with forbidden frequency band [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47 (11) : 2059 - 2074.
- [5] G H Huff, J TBernhard. Improvements in the performance of microstrip antennas on finite ground planes through ground plane edge serration [J]. IEEE Transactions on microwave and wireless components letters 2002, 12 (8) : 308 - 310.
- [6] 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.
Hu Rong, Zhang Xue-xia. Study of PBG structure and its application in antennas [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31 (12) : 1765 - 1770. (in Chinese)
- [7] 杨绍华, 张福顺, 焦永昌. EBG 结构的小型圆极化微带天线 [J]. 电子学报, 2004, 32 (11) : 1930 - 1932.
Yang Shao-hua, Zhang Fu-shun, Jiao Yong-chang. The circularly polarized micro strip patch in small size with EBG construction [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32 (11) : 1930 - 1932. (in Chinese)
- [8] 梁昌洪. PBG 高阻表面的准静态等效媒质模型 [R]. 西安: 西安电子科技大学, 2004.
Liang Chang-hong. The equivalent model of the square

high impedance surface of PBG structure [R]. Xi'an: Xidian University, 2004. (in Chinese)

作者简介:



李斌 男, 1978 年 9 月出生于山西省侯马市, 现为西安电子科技大学电磁场与微波技术专业博士研究生, 主要从事新型电磁材料的特性分析、波导缝隙天线、新型多路耦合器设计等方面的研究工作。

E-mail: bli@mail.xidian.edu.cn



李龙 男, 1977 年 1 月出生于贵州安顺, 2005 年 7 月获得西安电子科技大学电磁场与微波技术专业博士学位, 现为西安电子科技大学电子工程学院教师, 中国电子学会会员, 主要从事电磁场数值计算、电磁兼容、波导缝隙天线、新型人工电磁材料(光子晶体 PCs, 电磁带隙 EBG, 左手媒质 LHM)等方面的研究工作。

E-mail: lilong@mail.xidian.edu.cn



梁昌洪 男, 1943 年 12 月出生于上海, 现为西安电子科技大学教授, 博士导师, 并任中国电子学会微波学会副主任委员、中国电子学会会士、IEEE Senior member 等职, 2003 年荣获首届全国教学名师称号, 研究方向包括计算场论、计算微波、微波网络理论、电磁散射与逆散射、电磁兼容等方面。

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>