

一种 Peano 结构的圆极化微带天线设计

王帅涛,朱素英

(中国空空导弹研究院,河南 洛阳 471009)

摘要:在天线结构优化设计中,为了改善电磁带隙结构下阵元间距过大造成天线阵极化特性和增益性能下降的问题,提出设计了一种 Peano 结构下的圆极化微带天线。使用直接传输方法分析有限周期的一阶 Peano 结构的表面波带隙,将电磁带隙结构放在微带天线周围,通过减小电磁带隙结构和天线的间距,优化天线结构和天线的参数,缩小阵元之间的间距。仿真结果表明,与传统的电磁带隙结构微带天线相比,改进设计能有效减小圆极化天线阵中阵元间距,抑制阵元之间的互耦,提高阵元的方向性和天线阵性能。

关键词:电磁带隙;圆极化微带天线;互耦;表面波

中图分类号:TN822.4 **文献标识码:**B

Design of Circularly Polarized Microstrip Antenna with Peano Structure

WANG Shuai-tao, ZHU Su-ying

(China Airborn Missile Academy, Luoyang Henan 471009, China)

ABSTRACT: To improve the problem of antenna array circular polarization and gain degradation because of large distance between antennae with EBG structure, a design of circularly polarized microstrip antenna with Peano curve structure was proposed. After study of finite periods first order Peano curve to suppress surface wave by direct transmission method, the EBG structure was put around the antenna, the distance was reduced between antenna and Peano structure, and the design parameters of antenna and Peano structure were optimized. The simulated results show that the distance between circularly polarized microstrip antenna and EBG structure can be reduced as compared with the traditional antenna. Mutual coupling among antennas can be suppressed, and the performance of antenna array can be improved.

KEYWORDS: Electromagnetic band-gap; Circularly polarized microstrip antenna; Mutual coupling; Surface Wave

1 引言

电磁带隙(Electromagnetic Band-Gap, EBG)是一种人造的具有频率带隙的周期结构。由于 EBG 结构具有带阻、慢波和高阻抗独特的电磁特性,已经应用于微带天线、低横截面线天线^[1]、缝隙天线和高增益天线^[2]中。随着对 EBG 结构研究的不断深入,各种不同特性和类型的 EBG 结构得到广泛的应用,如介质基片上钻孔电磁带隙结构应用^[3]来提高天线阵的带宽、Mushroom-like EBG 结构降低天线阵的耦合度提高天线阵的性能等。

目前电磁带隙结构主要应用在天线阵中,可以有效抑制天线之间的互耦,同时由于电磁带隙的存在,增大了阵元之间的距离。而阵元间距增加会增大天线阵方向图的栅瓣^[4]。利用紧凑型 EBG 结构的四分之一波长微带天线^[5],减小阵元面积,但是无法实现圆极化特性。采用新型紧凑宽带平面电磁带隙结构实现了小型化^[6],但是增加了带隙结构的复杂

度和加工难度。

前面对于电磁带隙结构的应用研究主要在于减小电磁带隙结构的尺寸和采用小型天线来减小阵元间距。本文采用一阶 Peano 结构, Peano 结构被用来作为高阻抗表面^[7],作为单极子天线的反射面,提高天线的阻抗匹配特性和方向性。本文利用它对微带天线电场的影响,减小带隙结构与天线阵元之间的间距,通过优化微带天线的特性,提出一种电磁带隙结构下的圆极化微带天线设计,缩小了 EBG 结构与阵元的间距,实现阵元间距和天线面积的减小。同时降低了阵元之间的互耦,提高阵元方向性,克服了微带天线阵中由于表面波和 EBG 结构与阵元间距过大造成天线阵设计困难的问题。

2 天线结构设计

本文所用的 EBG 结构为一阶 Peano 结构,如图 1 所示。Peano 结构也是一种分形结构^[8],可以得到无限周期结构。介质基板表面为一阶 Peano 结构,底面为地平面。

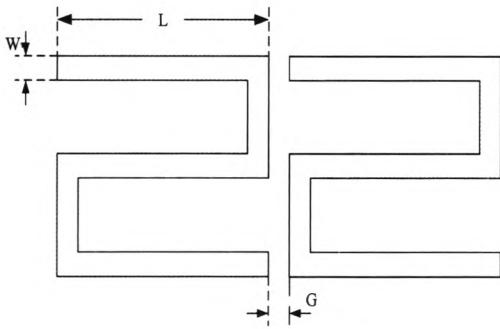


图1 一阶 Peano 结构单元

这种结构不容易用集总 LC 电路来描述,通过有限元计算软件 HFSS 对其特性进行分析。利用分析结果来进行 Peano 周期结构设计,达到所要求的效果。

一阶 Peano 结构的谐振频率与基板的高度 H、结构的长度 L、结构中微带宽度 W 和结构的间隙 G 有关。当平面波入射到 Peano 结构上时,在低频时,表面阻抗呈现电感特性,支持 TM 波工作,在高频时;表面阻抗呈容性,支持 TE 波工作;在其工作点上会呈现高阻抗表面,反射波为同相位反射^[9]。

使用基于有限元法的 HFSS 电磁仿真软件建立 EBG 结构的模型,利用主从边界条件模拟无限周期结构,使用 Floquet 端口作为馈源来分析 EBG 结构的同相位反射特性,从同相位反射特性中得到 Peano 结构的基本设计参数。仿真模型的参数为基板高度 H = 2mm, 基板的型号是 ROGERS TMM 6, 基板介电常数 $\epsilon_r = 6$ 。EBG 结构的尺寸为 L=3mm, W = 0.8mm, G = 0.4mm, 分析得到 Peano 结构的参数与零反射相位的频率点曲线如图 2 所示。

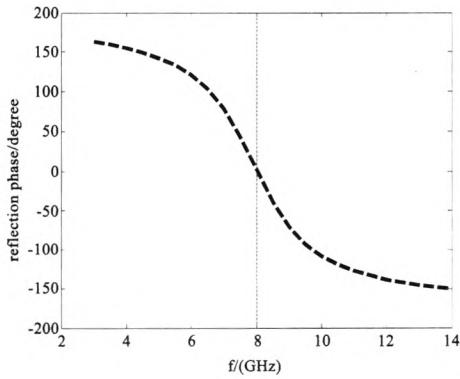


图2 EBG 结构的相位反射特性

从图 2 中可以得到,在 8GHz 处反射相位为 0°。一般认为反射相位在±90°之内都是同相位反射,更苛刻的条件也可以认为反射相位在±45°之内是同相位反射。EBG 结构的同相位特性类似一个理想磁平面,可以用作天线的反射面,提高天线增益和方向性。对 EBG 结构同相位反射特性的分析可以得到结构的工作特性参数。

根据前面的同相位反射特性得到的参数,利用直接传输法^[10]对 EBG 结构的带阻特性进一步优化,得到所需要的带

隙特性。将 EBG 结构放置在矩形波导内,波导面分别设置为一对理想电壁 (PEC) 和一对理想磁壁 (PMC), 形成一个 TEM 波导, 此波导不存在截止频率, 通过仿真得到两端口的传输系数 S_{21} 的幅度就可以得到阻带的范围。用三个单元进行仿真, 单元数越多, 阻带特性越明显^[11], 仿真结果如图 3 所示。

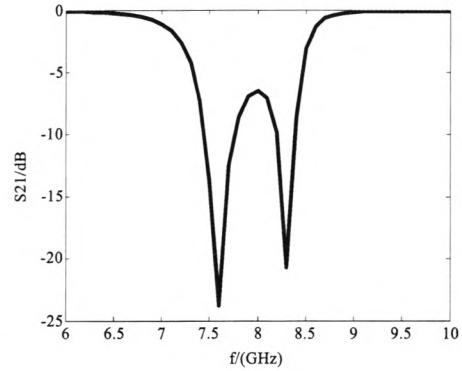


图3 EBG 结构的传输曲线

从图 3 中可以看出, 电磁波在 EBG 结构表面传输时, 在 7.5–8.5GHz 处是带阻特性, EBG 结构可以抑制这个频段的表面波传输。由于天线阵中阵元的间距不宜过大, 适当选择单元数来满足设计要求。

3 Peano 结构圆极化微带天线设计

圆极化天线的优点是可以接收多种极化来波, 除了和本身反向的回波。因此, 圆极化天线广泛用于移动通信和 GPS 中, 可以抑制雨雾干扰和多径反射。

本文采用方形微带天线作引入微扰 Δs 来实现圆极化特性^[12], 天线的大小 $l=0.5\lambda_g$, 其中 λ_g 为介质板中的电磁波波长。

$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

引入的微扰 Δs 即微带天线的切角可以由下式(2)计算, 得到微带天线的基本参数。

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + \frac{10h}{l} \right]^{-\frac{1}{2}} \\ \left| \frac{\Delta s}{s} \right| = \frac{1}{2Q} \\ Q = \frac{2w\epsilon_e}{hG/l} \times \frac{\iint |E|^2 dA}{\oint |E|^2 dl} \end{array} \right. \quad (2)$$

根据上面的经验式(2)可以得到圆极化微带天线的结构。设计的微带天线中心频率为 8GHz, 微带天线 $l=6.6\text{mm}$, 切角面积 $\Delta s = 1.56\text{mm}^2$, 基板的大小为 $16.4\text{mm} \times 16.4\text{mm}$, 基板高度 $H=2\text{mm}$, 基板采用介电常数 $\epsilon_r = 6$ 。同时把 Peano 结构放到天线周围, 设计 Peano 结构和天线间距为 2mm, 大大减小电磁带隙与天线的间距。EBG 结构的尺寸为 $L = 2.78\text{mm}$, $W = 0.5\text{mm}$, $G = 0.5\text{mm}$, 有 EBG 结构的切角面积为 Δs

$= 10.24 \text{ mm}^2$ 。经过仿真优化后得到的无 EBG 结构和有 EBG 结构的微带天线如图 4 所示。

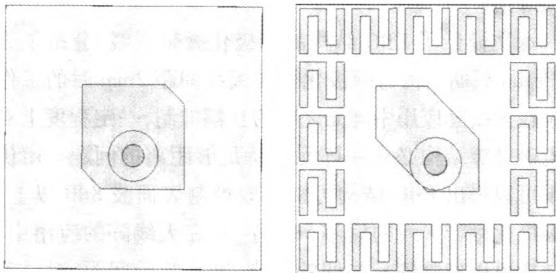


图 4 天线结构仿真结果图

从图 4 可以看出,EBG 结构离天线 2mm 时,由于减小了谐振腔体的体积,天线的谐振频率会提高。调节圆极化微带天线的馈电位置和切角大小,可以得到合适的工作频率。此时天线馈电点不一定在中边位置,要进行微调,可以得到良好的圆极化特性和匹配特性。同时 EBG 结构的带阻性能有效抑制微带天线的表面波,降低天线后瓣。

图 5 为有 EBG 结构和无 EBG 结构的圆极化微带天线馈电端口的反射系数(S_{11})。

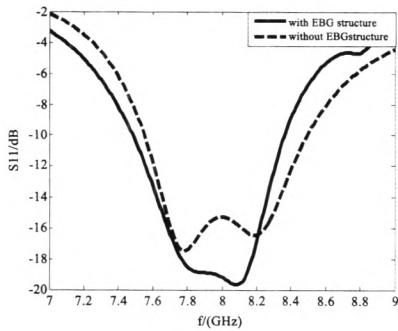


图 5 圆极化微带天线反射系数

由于 EBG 结构的存在,会影响微带天线表面的电场分布。而微带天线表面阻抗变化特性与无 EBG 结构时的天线阻抗变化特性是一样的。有 EBG 结构时,天线的匹配特性得到提高,提高天线的工作效率。

有无 Peano 周期结构的圆极化微带天线的 $\Phi = 0^\circ$ 远场方向图对比如图 6 所示, $\Phi = 90^\circ$ 远场方向对比如图 7 所示。

没有 EBG 结构的圆极化微带天线方向图的 E 面和 H 面在 0° 时的天线增益为 5.16 dB , 带有 EBG 结构的圆极化微带天线方向图的在 0° 时的天线增益为 4.3 dB 。天线增益降低 0.9 dB 。

带 EBG 结构的微带天线的波束要窄,并且由于 EBG 结构阻带的存在,有效抑制了微带天线的表面波,使得圆极化微带天线的后瓣明显减小,比原方向图减小 5 dB 左右,提高了天线的方向性。

图 8 为有无 EBG 结构的圆极化微带天线的轴比对比图。一般定义轴比带宽为低于 3 dB 的频率带宽为圆极化带宽,高

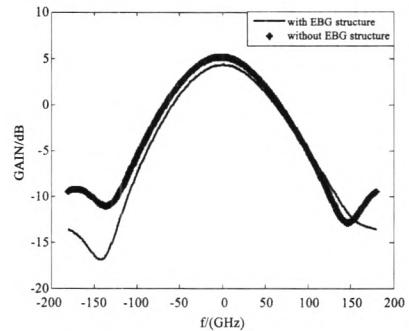


图 6 微带天线 $\Phi = 0^\circ$ 方向图

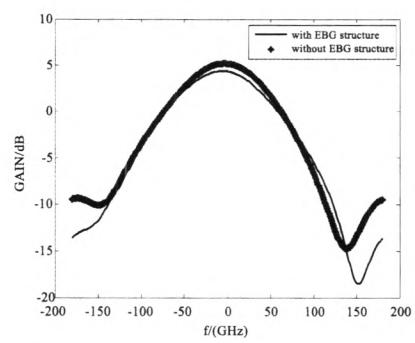


图 7 微带天线 $\Phi = 90^\circ$ 方向图

于 3 dB 的为线极化工作。带 EBG 结构的圆极化微带天线的轴比与没有 EBG 结构的天线轴比相近,有 EBG 结构的微带天线圆极化带宽略小于没有 EBG 结构的微带天线。

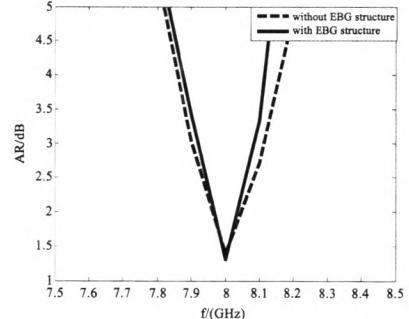


图 8 微带天线轴比

在天线阵进行波束扫描时,扫描性能的改变主要受到天线阵元之间的互耦的影响,严重时可产生扫描盲区。另外,波束也与单个天线阵元方向图有关,在边缘的阵元与中心的阵元方向图差异很大,由此引起天线阵方向图综合误差增大。当对圆极化微带天线组成天线阵时进行扫描时,天线阵元之间的互耦会造成方向图恶化,严重时会退化成线极化天线阵。

利用 EBG 结构减小天线阵元之间的互耦,提高天线阵元的独立性。用两个圆极化微带天线测试 EBG 结构的带阻特性。建立的模型如图 9 所示。

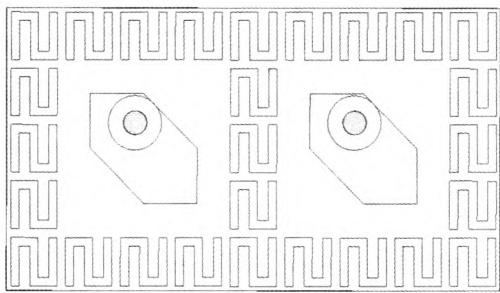


图9 EBG 结构天线阵

对两阵元天线的互耦进行对比分析,一种加入 EBG 结构,另一种不加入 EBG 结构。阵元间距为 13.12mm,也就是 0.35λ 。在 EBG 结构中的两个微带天线的反射系数曲线如图 10 所示,

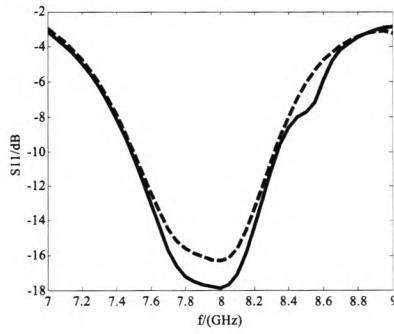


图10 微带天线反射系数

在 EBG 结构中的微带天线反射系数没有变化,即微带天线的匹配特性基本不受影响。对天线反射系数影响比较大的是天线与周围的一阶 Peano 结构的距离,适当调整优化可以得到良好效果。保持阵元间距不变,分别对有 EBG 结构和没有 EBG 结构的天线阵元互耦进行仿真,得到的结果如图 11 所示。

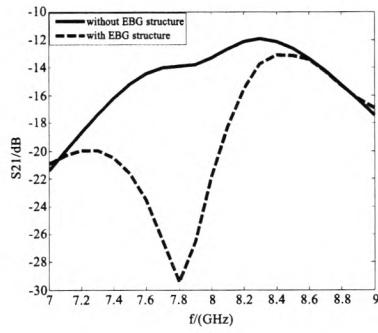


图11 天线阵元互耦曲线

从图 11 中可以看出,加入 EBG 结构后,阵元之间的互耦明显减小。在 8GHz 处阵元之间的互耦从 -13dB 降低到 -21dB 。所以 EBG 结构在天线阵中可以有效抑制表面波传输,同时保证天线阵元的间距,降低阵元之间的互耦,从而在

一定程度上消除天线阵的盲区,提高天线阵的性能。

4 结论

本文设计了 EBG 结构的圆极化微带天线,分析了天线与 Peano 周期结构与圆极化微带天线间距 2mm 时的工作特性及在天线阵应用中阵元之间的互耦抑制,一定程度上克服了电磁带隙结构必须和阵元保持足够距离的问题。由仿真结果可以得出 EBG 结构可以有效抑制表面波 8dB 以上,降低圆极化微带天线的后瓣 5dB 左右;在天线阵的应用中,这种结构可以抑制阵元之间的互耦,减小阵元间距,对电磁带隙结构微带天线阵的设计有重要意义。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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): 1930-1032.
- [3] 包秀龙, 等. EBG 结构在 35GHz 微带阵列天线中应用 [J]. 微波学报, 2005, 21(3): 36-38.
- [4] 朱辉, 刘经根. 基于微带阵列的天线设计与仿真 [J]. 计算机仿真, 2011, 28(5): 148-150.
- [5] 郑容秋, 袁乃昌, 付云起. 紧凑型电磁带隙结构在短路微带天线中的应用 [J]. 电子与信息学报, 2007, 29(6): 1500-1502.
- [6] 刘涛, 曹祥玉, 马嘉俊. 一种新型紧凑宽带平面电磁带隙结构 [J]. 电子与信息学报, 2009, 31(4): 1007-1009.
- [7] J McVay, A Hoofar, N Engheta. Small dipole antenna near Peano high-impedance surfaces [C]. Antenna and Propagation Society International Symposium, 2004. IEEE, 2004, 1: 305-308.
- [8] Jong Ryul Sohn, et al. Comparative analysis of four types of high-impedance surfaces for low profile antenna applications [C]. Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE, 2005, 1A: 758-761.
- [9] D Sievenpiper, et al. High-impedance electromagnetic surface with a forbidden frequency band [J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 1999, 47(11): 2059-2074.
- [10] 梁乐, 等. 一种电磁带隙结构的快速分析方法 [J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(5): 793-796.
- [11] 曹海林, 等. 电磁带隙微带天线馈源阵设计 [J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(3): 712-716.
- [12] Warren L Stutzman, Gary A Thiele 著, 朱守正, 安同一译. 天线理论与设计(第二版) [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.

作者简介

- 王帅涛**(1985-),男(汉族),河南省洛阳市人,硕士研究生,主要研究领域为电路与系统,微带天线技术的研究;
- 朱素英**(1964-),女(汉族),河南省新乡人,高级工程师,主要研究领域为电路与系统。

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>