

文章编号 1005-0388(2005)06-0699-04

# 一种新颖的光子带隙平面螺旋天线\*

徐 琰 张謨杰

(上海航天技术研究院 802 研究所, ffxuyan@hotmail.com, 上海 200090)

**摘要** 介绍了阿基米德螺旋天线的原理与设计方法, 仿真了背腔式阿基米德螺旋天线, 并与实际测试结果吻合; 研究了一种新颖的光子带隙平面螺旋天线, 这种天线用光子带隙代替金属反射腔作为反射面以得到单向波束, 仿真与实验发现, 光子带隙阿基米德螺旋天线的增益提高约有 2dB, 后瓣降低了 10dB, 在有效的工作带宽内天线的性能得到了改善。

**关键词** 光子带隙, 背腔式阿基米德螺旋天线, 周期性结构, 频率选择性, 反射相位

中图号分类 TN823.31 文献标识码 A

## Analysis and simulation of archimedean spiral antenna with photonic bandgap (PBG) structure

XU Yan ZHANG Mo-jie

(No. 802 Institute of SAST, ffxuyan@hotmail.com, Shanghai 200090, China)

**Abstract** This paper presents the principle and design of Archimedean spiral antenna. A cavity-backed Archimedean spiral antenna is analyzed and the reasonable agreement between theoretical evaluation and experimental measurement is acquired. A novel planar spiral antenna is studied in which PBG structure replaces conventional metallic cavity as a reflector to obtain unidirectional beam. Through theoretical predictions and experiments, it is found that the Archimedean antenna mounted over PBG structure increases the gain about 2dB and suppress the backlobe about 10dB. The antenna performance is improved in the effective operational frequency band.

**Key words** photonic bandgap, cavity-backed Archimedean spiral antenna, periodic structures, frequency selectivity, reflection phase

## 1 引言

阿基米德螺旋天线是一种超宽频带天线, 具有天线尺寸小、相位一致性及稳定性好等的优点。为了获得单向辐射, 工程上多采用背腔式阿基米德螺旋天线。利用光子晶体的频率选择性和零相位反射的特点, 采用光子晶体作为衬底取代反射腔, 可以设计一种新型的光子带隙阿基米德螺旋天线。

文献[1]讨论了基于 PBG 结构的等角螺旋天

线, 其中 PBG 结构是由在  $\epsilon_r = 10.2$  的介质板上周期钻孔而形成的, 钻的孔按三角形栅格排列。文献[2]讨论了距离金属介电平面 EBG 上方矩形螺旋天线的性能。与同样天线加理想导体反射板的性能比较, 都有明显的改善。

考虑到背腔式阿基米德螺旋天线的局限性, 决定采用 PBG 结构取代反射腔来提高天线的性能, 仿真和实验结果也验证了, 金属介电平面衬底上方阿基米德螺旋天线的性能比较背腔式阿基米德螺旋天

\* 收稿日期: 2004-08-07

线的性能,也有很大的改善。

## 2 阿基米德螺旋天线

### 2.1 阿基米德平面螺旋天线

阿基米德螺旋的半径随角度的变化均匀的增加,方程为

$$\rho = \rho_0 + \alpha\varphi \quad (1)$$

式中  $\rho_0$  是起始半径,  $\alpha$  为螺旋增长率,  $\varphi$  是幅角以弧度表示。双臂阿基米德螺旋天线如图 1(a)所示。

双臂阿基米德螺旋天线两臂方程分别为:

$$\begin{cases} \rho_1 = \rho_{01} + \alpha\varphi \\ \rho_2 = \rho_{02} + \alpha(\varphi + \pi) \end{cases} \quad (2)$$

用印刷电路技术来制造这种天线,使金属螺旋臂的宽度等于两条螺旋臂间的间隔,形成自互补天线。臂的宽度为:

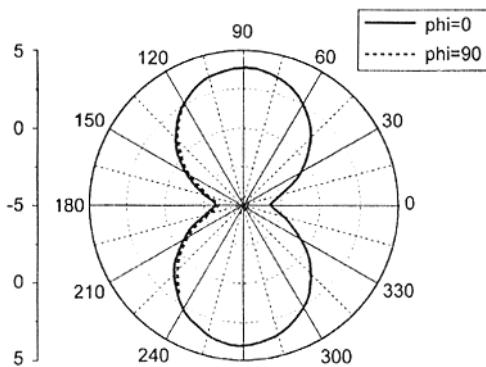
$$W = \rho_{02} - \rho_{01} = \frac{\alpha\pi}{2} \quad (3)$$

对于一个自互补天线结构,由巴比涅—布克(Babinet-Booker)原理可求得,具有两个臂的无限大结构,输入阻抗为  $188.5\Omega$ (实测值约为  $120\Omega$ )。

在螺旋的周长为一个波长附近的区域,形成平面螺旋的主要辐射区。当频率发生变化时,主要辐射区随之变动,但方向图基本不变,因此螺旋天线具有宽带特性。对应最低工作频率,天线必须要有  $1.25\lambda$  的周长。对最高工作频率,要由馈电点间的



(a) 双臂阿基米德螺旋天线



(b) 增益方向图

图 1 阿基米德螺旋天线及方向图

间隔尺寸来确定,其间隔也必须小于  $\lambda/4^{[3]}\sim[6]$ 。

### 2.2 仿真结果

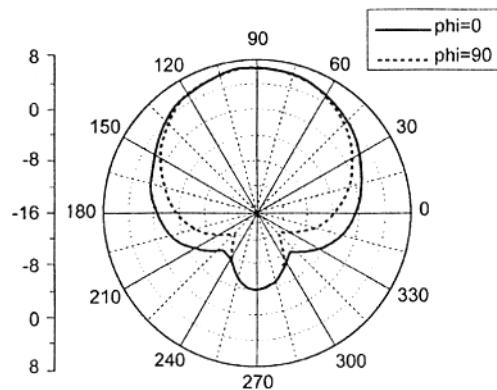
阿基米德平面螺旋天线印刷在  $\epsilon_r = 2.7$  的介质板上,采用 Ansoft HFSS 进行仿真,螺旋天线外径  $C \approx 1.36\lambda_0$ 。仿真结果如图 1(b)所示,天线双向辐射,增益约为  $3.8\text{dB}$ 。

## 3 背腔式阿基米德螺旋天线

平面螺旋天线在其平面的一边辐射右旋极化波,在另一边辐射左旋极化波。一般在其一边安装一个反射腔去掉不希望的极化,获得单向辐射。反射腔一般采用平底腔,腔深约为  $\lambda_0/4$ ,腔体直径与螺旋外径相同。仿真示意图与仿真结果分别如图 2(a)、(b)所示。天线增益约为  $6.6\text{dB}$ ,后瓣  $-10\text{dB}$ 。



(a) 仿真示意图



(b) 增益方向图

图 2 仿真示意图与仿真结果

仿真结果与实际产品测试结果的比较如图 3 所示,经比较发现,仿真结果与测试结果吻合。

仿真得到的增益值是理论结果,实际螺旋天线的增益较低。由于反射腔长度固定改变了螺旋天线的非频变特性,需要在反射腔内加吸收材料来减小谐振效应。这样引入了损耗,导致最后天线产品的增益很低。而且在整个频段范围内,天线增益值变

化较大。

背腔式阿基米德螺旋天线的测试结果:在2:1的工作频带内,天线的驻波小于2,圆极化轴比小于3dB,半功率波瓣宽度大于60°,在中心频率附近较窄的频段内圆极化增益可达5dB。

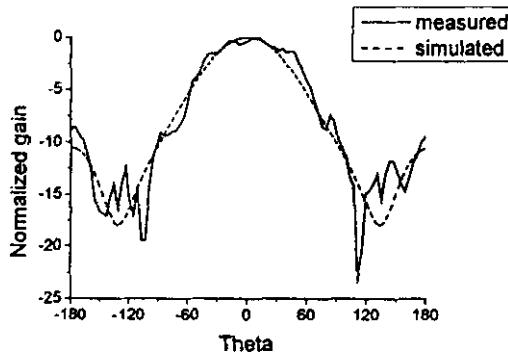


图3 仿真结果与实际产品测试结果的比较

## 4 光子带隙平面螺旋天线的设计和仿真

### 4.1 光子晶体的简介

近几年光子晶体这种新型介质材料引起了人们的广泛关注,这种新型微波功能材料是一种介质在另一种介质中周期排列所组成的周期结构,能够产生光子带隙(Photonic Band Gap,以下简称PBG)。被介质包围的由一维、二维或三维周期性单元组成的光子带隙材料可以阻止电磁波在某个方向上或所有方向上的传播,表明光子带隙结构有独特的频率选择特性。它的频率选择特性可通过控制周期性结构的参数来实现。人们第一次有可能以类似半导体集成电路控制电流传输的方式,来精确控制电磁波的传输。因此,光子带隙结构材料又被称为“电磁波半导体”。

近年来,人们对光子带隙结构(PBG)在微波工程中的应用以特别的关注。将PBG结构用于集成电路和天线的设计,可以减小交叉干扰和抑制表面波,抑制功率放大器、滤波器的高次谐波,提高天线的增益,改变天线的辐射特性,改善电路性能。

### 4.2 光子带隙平面螺旋天线的设计

普通的平面天线由于衬底的透射等原因,向空间发射的能量有很多损失;如果用光子晶体作衬底,由于电磁波不能在衬底中传播,能量几乎全部发射向空间。这就改变了天线的辐射特性,不用反射腔和吸收材料就很容易获得所需要的单向辐射。而且

由于光子晶体频率选择性和零相位反射的特点真正实现了螺旋天线的非频变特性,这是一种性能非常高的新型低剖面天线。

这里用作衬底的是一种蘑菇状周期结构的金属介电平面光子带隙电磁结构。这种结构由一层方形的金属突起物在平面上周期排列形成,每个正方形(或是正六边形)的正中都有一个竖直的金属孔与底层的金属板相连通,在顶层与底层的连续层间是均匀连续的电介质。其中金属层为铜,介质层是环氧玻璃布层压板或四氟层压板。从外观上看,这样的结构像是在金属层上生长有许多规律排列的“蘑菇”。这种有高阻抗表面特性的结构就人为的构成了PMC表面<sup>[7]~[9]</sup>。所采用的双层正方形斑图金属介电平面的示意图如图4所示。

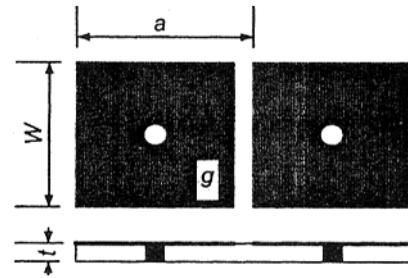


图4 正方形斑图示意图

取微波基板材料 $t = 1.8\text{mm}$ , $\epsilon_r = 2.2$ ,正方形单元具体尺寸为 $a = 8.0\text{mm}$ , $w = 7.6\text{mm}$ , $g = 0.4\text{mm}$ ,共 $12 \times 12$ 周期结构。

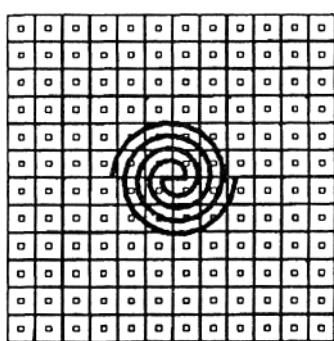
螺旋天线外径 $C \approx 1.36\lambda_0$ ,放置在离光子晶体板约0.1波长的位置,光子带隙平面螺旋天线的仿真示意图如图5(a)所示。

### 4.3 光子带隙平面螺旋天线的仿真与测试结果

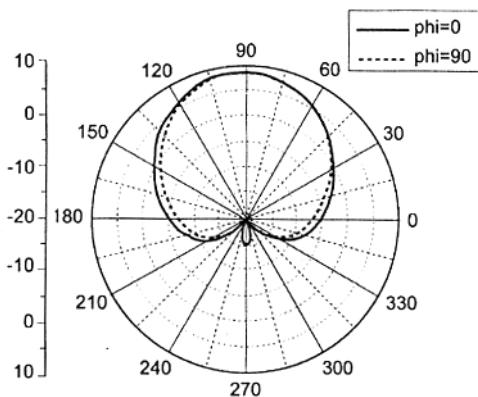
图5(b)为光子带隙平面螺旋天线方向图仿真结果,天线增益约为8.7dB,后瓣-23dB。从仿真结果可以发现,与背腔式阿基米德螺旋天线相比:光子带隙平面螺旋天线的增益提高了约有2.1dB,后瓣降低了13dB,天线的性能得到明显的改善。

光子带隙平面螺旋天线仿真结果与实际产品测试结果的比较如图6所示,天线实测的后瓣比仿真值大,但也降低了10dB,从增益和后瓣性能改善的方面看,测试结果与仿真结果基本吻合。

分析整理测试结果:在约1GHz的工作频带内,天线的驻波小于2,圆极化轴比小于3dB,半功率波瓣宽度在70°左右,圆极化增益达7dB以上,在该频点天线增益提高了2dB,天线增益明显提高。

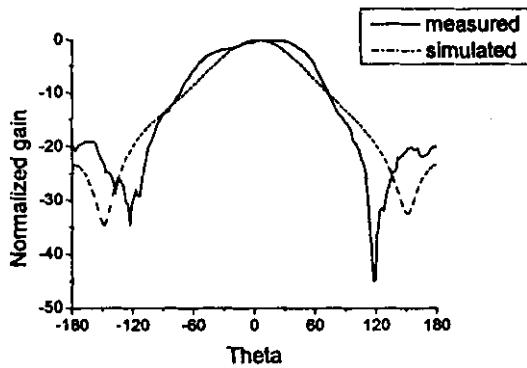


(a) 仿真示意图



(b) 增益方向图

图 5 光子带隙天线的仿真示意图与仿真结果

图 6 光子带隙平面螺旋天线仿真结果  
与实际产品测试结果的比较

## 5 结论

光子晶体作为一种新型的微波材料,将为小型高效微波系统的设计与制备提供全新的思路,带来又一场科技革命。将光子晶体应用于平面螺旋天线,能得到高增益、低后瓣、小型化的宽频带天线。

需要指出的是,阿基米德螺旋天线是超宽带天

线,天线和光子晶体板组合后的带宽受光子晶体板阻带带宽的限制,还不能达到超宽带,阻带带宽约为光子带隙中心频率的 20% 左右,实验也验证了这点。但在以后的工作中,可以通过使用可调谐的光子晶体板等方法来达到超宽带的性能。

## 参考文献

- [1] T H Liu, W X Zhang, M Zhang *et al.*. Low profile spiral antenna with PBG substrate[J]. Electronics letters, 2000, 36, April: 60~63.
- [2] H Nakano, M Ikeda, K Hitosugi, *et al.*. A spiral antenna backed by an electromagnetic band-gap material [J]. IEEE AP-S Int. Symp., 2003, 4, June: 482~485.
- [3] 林昌禄,主编. 天线工程手册[M]. 北京:电子工业出版社,2002.
- [4] 康行健. 天线原理与设计[M]. 北京:国防工业出版社,1995.
- [5] 纪奕才,郭景丽,刘其中. 加载法向模螺旋天线的研究[J]. 电波科学学报,2002,17(6):573~576.  
Y C Ji, J L Guo, Q Z Liu. The loaded normal mode helical antennas [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2002, 17(6):573~576.
- [6] Warren L Stutzman. Antenna Theory and Design [M]. JOHN WILEY & SONS, INC. New York, 1998.
- [7] Sergio Clavijo, Rodolfo E Díaz, and William E McKinzie. Design methodology for sievenpiper high-impedance surfaces: An artificial magnetic conductor for positive gain electrically small antennas [J]. IEEE AP, 2003, 51 (10):2678~2689.
- [8] Fan Yang, Yahya Rahmat-Samii. Reflection phase characterizations of the EBG ground plane for low profile wire antenna applications [J]. IEEE AP, 2003, 51 (10):2691~2703.
- [9] Ying Zhang, Jürgen von Hagen, Marwan Younis, *et al.*. Planar artificial magnetic conductors and patch antennas [J]. IEEE AP, 2003, 51(10):2704~2712.

徐琰 (1977—),女,江苏人,毕业于西安电子科技大学电磁场与微波技术专业,硕士,现从事波导缝隙阵天线和宽带天线的研究工作。

张谟杰 (1943—),男,上海人,研究员,长期致力于导弹天线罩的研究工作,先后完成多项国家重点型号的研究课题,获国家级、部级科技进步奖 4 项,主持编写了有关导弹天线罩的国军标,在有关学术刊物和会议上发表学术论文 20 余篇,发表航天科技报告数篇。

## 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](http://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](http://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](http://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>