

## 紧凑型电磁带隙结构在短路微带天线中的应用

郑秋容 袁乃昌 付云起

(国防科技大学微波技术发展中心 长沙 410073)

**摘要:** 该文提出一种带有紧凑型电磁带隙结构的短路微带天线, 并与相同尺寸和普通短路微带天线作比较。测试结果表明该电磁带隙结构天线在增益上增加了 3dB, H 面的交叉极化有了明显的改善。同时也证明了设计具有同样谐振频率的电磁带隙结构单元, 使用这种紧凑型结构的单元边长尺寸仅为普通结构的 50-60% 左右。这对最终实现电磁带隙结构微带相控阵天线具有重要意义。

**关键词:** 微带天线; 电磁带隙结构; 辐射方向图; 高阻表面

中图分类号: TN823

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)06-1500-03

## Application of Compact Electromagnetic Band-Gap Structure to Shorted Micro-strip Antenna

Zheng Qiu-rong Yuan Nai-chang Fu Yun-qi

(College of Electronic Technology and Engineering, NUDT, Changsha 410073, China)

**Abstract:** A micro-strip shorted antenna with Compact Electromagnetic Band-Gap structure (CEBG) is presented. A shorted antenna with identical dimensions on a conventional ground plane is also included, so that a direct performance comparison can be made. Measured data shows a gain improvement of 3dB and a significant reduction in cross polarization for the CEBG antenna. Meanwhile it also proves that to design the same resonant frequency, the CEBG structure cell size is only about 50-60% of conventional structure, and this is significant in realizing EBG micro-strip phased antenna array.

**Key words:** Micro-strip antenna; EBG structure; Radiation pattern; High impedance ground plane

### 1 引言

所谓光子晶体是指具有一定光子带隙(Photonic Band-Gap, PBG)的一种人造周期性电介质结构<sup>[1]</sup>。目前其研究范围已涉及到光学、电磁学、声学波段, 在微波和毫米波领域经常称其为电磁带隙(Electromagnetic Band-gap, EBG)结构。对EBG结构在微波和毫米波领域的应用研究已经取得了许多成果, 例如在微带电路里可以用EBG结构实现带阻滤波器, 谐振器, 可以抑制谐波, 提高放大器效率等; 在天线方面可以用其实现抛物面天线反射面, 可以加载于微带天线用于抑制表面波, 从而改善天线方向图等。加利福尼亚大学的Sievenpiper教授提出了一种谐振式的EBG结构<sup>[2]</sup>, 这种结构称之为Sievenpiper结构。这种结构对某一频段的平面波(TE模以及TM模)具有高阻特性, 也就是结构本身具有表面波带隙特性。这种结构具有两种特性: 一是对在其表面传播的表面波(频率位于其阻带之内)具有抑制作用。二是对其表面上方入射的平面波具有同相反射的效果。经过各种抑制方法的比较, 人们<sup>[3,4]</sup>发现采用周期结构的高阻表面是到目前为止抑制表面波最有效的方法。

但在实际应用中, Sievenpiper结构的单元尺寸却成为了

其应用的一个瓶颈。在微带相控阵列中, 天线单元间距不能超过二分之一自由空间波长, 否则会在方向图中出现栅瓣。天线单元之间的间距只能容纳 2-3 个 Sievenpiper 结构单元<sup>[5,6]</sup>。另一方面, 在微带相控阵中, 有时为了减小微带天线的面积, 天线采用短路壁微带天线, 这样可以使得在不改变谐振频率的情况下, 使天线单元的边长减小一半。在本文中, 将采用一种新型CEBG结构应用于短路壁微带天线中, 利用其表面波带隙特性抑制天线的表面波的传播, 改善天线的方向图, 降低天线的交叉极化电平。我们制作了两个材料相同(F<sub>4</sub>BK聚四氟乙烯玻璃覆铜箔板)的微带天线。一个微带天线的周围布满了电磁带隙结构, 另一个不加电磁带隙结构。最终的研究可以发现, 带有电磁带隙结构的微带天线比普通天线增益上增加了 3dB, 同时H面的交叉极化有了明显的减少。

### 2 EBG 结构

图 1 和图 2 所示的为常用的 Sievenpiper EBG 结构与紧凑型 EBG 结构的几何平面图。在设计电磁带隙结构时,  $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$ 。一旦材料确定, 则  $L$  也随之确定, 所以只能通过改变电容  $C$  来改变谐振频率。在本文的紧凑型 EBG 结构中, 将提出一种交指电容的概念, 本次设计的电磁带隙的结构如图 2 所示, 它不是一个正方形贴片, 两个相邻单元之间的边缘互相交错产生一个大的交指电容(图 2), 从而提

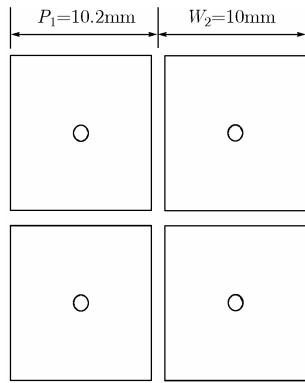


图 1 Sievenpiper EBG

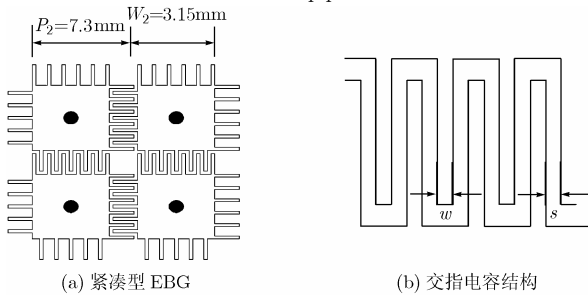


图 2

高电容  $C$  的值, 达到减小电磁带隙结构面积的目的。电容  $C$  的值为<sup>[7]</sup>

$$C = \frac{(\epsilon_r + 1)\epsilon_0 K(k)}{2K(k')} (N - 1)l$$

$w$  和  $s$  表示交指的宽度和间距,  $N$  表示交指的数目,  $l$  表示指长,  $k = \frac{\sqrt{(a+b)^2 - a^2}}{a+b}$   $a = s/2$ ,  $b = (w+s)/2$ ,

$k' = \sqrt{1 - k^2}$ ,  $K(k)$  表示第一类完全椭圆积分函数,  $\epsilon_r$  为介质的相对介电常数。要使设计的电容最大, 必须使得交指的宽度与间距相等。基于这个原则, 本次设计的谐振频率设为 3.0GHz, 电容参数为:  $w = s = 0.15\text{mm}$ ,  $l = 4\text{mm}$ , 正方形贴片的长度为 3.15 mm。而采用常用的 Sievenpiper EBG 结构模型, 得到的参数为: 正方形宽度为 20mm, 周期长度为 20.2mm。很显然, Sievenpiper 的结构过于庞大, 不适合于本次设计的作为相控阵单元的尺寸要求。

正基于此, 本文采用图 2 中的紧凑型 EBG 结构, 表面波带隙位于 3.0GHz 周围的窄带之内。采用微波网络分析仪测试的 EBG 的表面波带隙与模型计算吻合较好, 测试结果如图 3 所示。在 2.9-3.1GHz 范围内, 表面波传输系数下降了 15-20dB, 这正是表明了 2.9-3.1GHz 就是本次设计所需的表面波带隙。

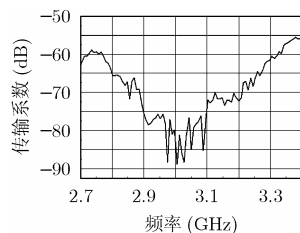


图 3 电磁带隙测试曲线

### 3 短路微带天线

图 4 和图 5 给出了两个短路贴片天线的结构图。工作于主模的矩形微带天线其内场分布在贴片的中心处, 电场为零, 在该处沿着与辐射边平行的方向将上贴片与接地面导通而不会影响内场的分布。然后将其中一半舍去即构成如图 4 所示的短路微带天线。图中  $L \approx \lambda_g / 4$ ,  $\lambda_g$  为天线谐振中心频率所对应的介质波导波长。通过调节探针的位置可以实现微带天线与同轴线之间的良好匹配。辐射贴片同轴探针半径为  $\gamma_0 = 0.5\text{mm}$  距短路片的中心距离为  $x_p = 2\text{mm}$ 。贴片天线的尺寸为  $L = 14.8\text{mm}$ ,  $W = 14.8\text{mm}$ , 厚度为  $d = 2.0\text{mm}$ , 介电常数为  $\epsilon_r = 2.65$ 。由于在 EBG 等效媒质模型中没有考虑过孔的半径, 所以为了制作方便, 本次采用的过孔半径为 0.4 mm。由于 EBG 的金属贴片和过孔减少了腔体的有效体积, 微带天线的谐振频率会有所提高, 同时为了使天线的谐振频率保持始终落在带隙之内, 可在贴片导体的周围与电磁带隙结构之间留有一定的空间, 以减小耦合<sup>[8]</sup>。

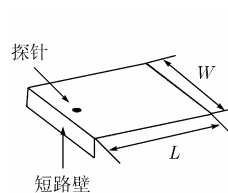


图 4 普通短路微带天线

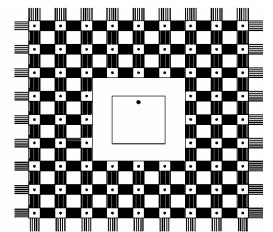


图 5 带 EBG 短路微带天线

### 4 测试结果与讨论

#### 4.1 驻波特性

图 6 给出了普通短路微带天线与电磁带隙结构短路微带天线的回波损耗( $S_{11}$ )曲线图。由图中可以看出, 虽然由于电磁带隙结构的存在, 天线的谐振频率有所偏高, 但仍然落在带隙之内。电磁带隙结构微带天线的 -10dB 回波损耗带宽比普通微带天线小。这是因为电磁带隙结构的频率带隙阻止了表面波的传播, 部分表面波能量被反射回了天线, 造成了天线回波损耗的变化。要想得到良好的匹配, 必须对微带天线进行调整。但本文只做比较性的实验, 在带隙内取  $S_{11}$  相同值的工作频率下, 比较天线的工作性能。

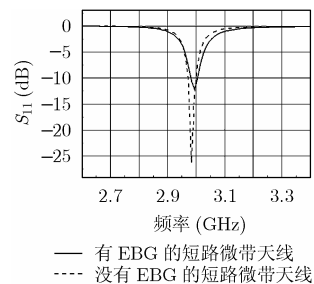


图 6 微带天线的回波损耗曲线图

#### 4.2 天线方向图

图 7 和图 8 中给出了这两个短路贴片天线的归一化 E面

和H面的辐射方向图。所测方向图的频率为 2.97GHz, 因为此时两个天线具有相同的回波损耗系数 $S_{11}$ , 均为-12dB。从图中可以看出, CEBG贴片天线产生了更加光滑的方向图, 说明电磁带隙结构已经起到了抑制表面波的作用, 从而减少了介质材料边缘的散射。在E面方向图中, 表面波的改善非常明显。在普通微带贴片天线中, E面方向图的不对称性以及起伏(在 $+306^\circ \sim +15^\circ$ 之间)主要是由于馈电探针和短路壁的阻挡效应而产生的反射波所引起的。在 $+336^\circ$ 方向上, E面方向图的值是-7.5dB。加上电磁带隙结构以后, E面方向图相对来说变得比较光滑尖锐, 对称性更好。在 $+336^\circ$ 方向上, E面方向图的值是-3dB, 提高了 4.5dB。H面方向图更加光滑, 背瓣有所减小, 同时主瓣方向提高了 4.5dB。

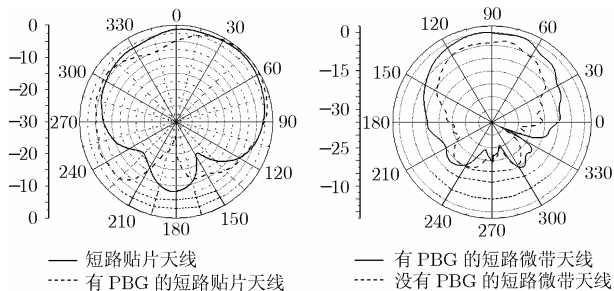


图 7 E面测试方向图

图 8 H面测试方向图

### 4.3 交叉极化特性

如图 9 所示, 对于普通短路微带天线, H 面的交叉极化电平非常高。这是短路微带天线的共同特性, 主要是由于贴片天线在短路壁连接处的不连续性引起的。但加上电磁带隙结构以后 H 面的交叉极化电平下降比较明显。在 $+105^\circ$ 方向上, H 面的交叉极化电平下降了 7.5dB。在 $+300^\circ$ 方向上, H 面的交叉极化电平下降了 20dB。这在微带相控阵体天线中减小阵列单元之间的耦合, 提高天线阵的方向性具有重要意义。

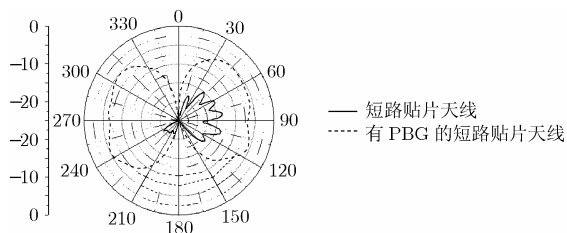


图 9 H面交叉极化侧视图

## 5 结束语

实验结果表明, 采用 CEBG 电磁带隙结构的短路微带天

改善其方向图, 极大地降低了 H 面的交叉极化电平, 从而提高天线的整体性能。同时本文也证明了设计具有同样谐振频率的电磁带隙结构单元, 使用这种紧凑型 EBG 结构的单元尺寸仅为普通 Sievenpiper EBG 结构的 50-60% 左右。这对最终实现电磁带隙结构微带相控阵天线具有重要意义。

## 参考文献

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics, *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [2] Sievenpiper D F. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band [J]. *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, 1999, 47 (11): 2059-2074.
- [3] 付云起, 童创明等. 平面微波光子晶体的表面波带隙[J]. 国防科技大学学报, 2002, 25(2): 76-78.
- [4] 付云起, 袁乃昌等. 适合于电路集成的 PBG 结构微带线[J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(4): 120-122.
- [5] Gonzalo R G. Coupling between patch antennas on photonic crystals [J]. In Proc. 24th ESTEC Antenna Workshop, Noordwijk, The Netherlands, May 30-June 1, 2001: 6-10.
- [6] Iluz Z, Shavit R, and Bauer R. Micro-strip antenna phased array with electromagnetic band-gap substrate [J]. *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, 2004, 52(4): 1446-1453.
- [7] Alley D. Interdigital capacitors and their applications to lumped-element microwave integrated circuits [J]. *IEEE Trans. on MTT*, 1970, 18(12): 1028-1033.
- [8] Coccoli R, Yang F, and Itoch T. Aperture-coupled patch antenna on UC-PBG substrate [J]. *IEEE Trans on Microwave Theory Tech.*, 1999, 47(11): 2123-2130.

郑秋容: 男, 1973 年生, 博士生, 从事电磁场数值计算、微带天线、波导缝隙天线、光子晶体研究。

袁乃昌: 男, 1965 年生, 国防科技大学电子科学与技术系主任、教授、博士生导师, 中国电子学会雷达分会天线专委会委员, 八六三 308 主题发展战略研究组成员, 美国 Advanced Science 协会会员, 美国纽约科学院院士, 主要研究领域为微波毫米波电路、光子晶体、相控阵天线等。

付云起: 男, 1975 年生, 博士, 主要从事电磁场数值计算、微带天线、雷达超宽带技术、光子晶体研究。

线与普通短路微带天线相比, CEBG 能够提高天线的增益,