

文章编号 :1001-2486(2007)02-0051-05

## 电磁带隙结构单脊波导缝隙相控阵天线的实验研究\*

郑秋容<sup>1</sup>, 陈夏萌<sup>2</sup>, 付云起<sup>1</sup>, 袁乃昌<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学微波技术发展中心, 湖南长沙 410073; 2. 95316 部队, 广东广州 510000)

**摘要** 提出一种电磁带隙结构交错排列的单脊波导缝隙相控阵天线, 并与相同尺寸的普通单脊波导缝隙相控阵天线作比较。测试结果表明该天线的方向图得到了明显的改善, 单元之间的耦合系数减小, 背瓣的辐射电平显著降低, 扫描特性得到了改善, 同时也说明了电磁带隙结构可以取得比扼流槽更好的抑制表面波的效果。这对于提高单脊波导缝隙相控阵天线的辐射性能具有重要意义。

**关键词** 单脊波导缝隙相控阵天线; 光子带隙结构; 辐射方向图; 表面波

中图分类号: TN011 文献标识码: A

## A Study of a Single Ridged Wave-guide Slot Phased Antenna with Electromagnetic Band-gap Structure (EBG)

ZHENG Qiu-rong<sup>1</sup>, CHEN Xia-meng<sup>2</sup>, FU Yun-qi<sup>1</sup>, YUAN Nai-chang<sup>1</sup>

(1. Microwave Technology Development Center, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Unit 95316 of PLA, Guangzhou 510000, China)

**Abstract** A single ridged wave-guide slot phased antenna (SRWSPA) with a photonic band-gap structure which is alternately arranged on the antenna is presented. Another antenna with identical dimensions on a metal ground plane is also included, so that a direct performance comparison can be made. Measured data shows an obvious improvement of radiation pattern, a reduction of coupling coefficient between elements, a significant reduction of back lobe and an improvement of scanning performance. Meanwhile it also proves that the structure is more effective to suppress the surface wave than the choke ring. This is significant in improving the radiation performance of the single ridged wave-guide slot phased antenna.

**Key words** SRWSPA; EBG structure; radiation pattern; surface wave

单脊波导缝隙天线是一种新型的相控阵天线辐射单元, 由于体积小, 重量轻, 结构简单, 便于密封, 不影响飞行器的空气动力性能, 因而被广泛用于雷达(如机载预警雷达)和通信领域。跟许多平面天线一样, 单脊波导缝隙天线由于缝隙口径处的不连续性, 电磁场会发生畸变, 存在高次模和绕射电流, 增加天线的后向辐射功率损失, 因此该种天线存在比较高的后瓣。传统的微波天线为了减小天线的后向辐射功率损失, 通常在天线上使用金属接地面。对于单脊波导缝隙天线而言, 理论上无限大金属接地面可以阻止天线的后向辐射, 消除后瓣。但是在实际应用中, 接地面不可能是无限大的, 同时, 由于受到使用环境的限制, 接地面也不可能特别大。波导缝隙在接地面上形成的径向传播表面波会在有限尺寸的接地面边缘形成绕射, 仍然在天线的后向形成比较显著的辐射功率损失。迄今为止, 人们已采用一些方法去抑制表面波, 其中包括扼流槽和电磁带隙结构(EBG)结构等。1999年, D. Sievenpiper提出了一种谐振型的EBG结构<sup>[1-2]</sup>, 这种结构的电磁带隙结构对某一频段的平面波具有高阻特性, 也就是结构本身具有表面波带隙特性。在目前公开的电磁带隙结构用于微波天线的资料中主要涉及微带天线、螺旋天线、线天线、行波天线等多种天线形式, 都取得了比较好的效果。由于电磁带隙结构是平面结构, 因此也可以用来作为波导缝隙天线的接地面。但是目前尚无公开技术资料涉及单脊波导缝隙天线接地面这一方面的技术方案。

\* 收稿日期 2006-10-27

基金项目: 国家部委资助项目(51307); 国家自然科学基金资助项目(60401011)

作者简介: 郑秋容(1973—)男, 博士生。

本文在单脊波导缝隙相控阵天线中采用这种 EBG 结构,利用其表面波带隙特性抑制天线的表面波的传播,降低天线单元间的耦合系数,为改善相控阵天线的扫描特性提供了新的途径。最终的研究可以发现,带有这种电磁带隙结构接地面的天线比普通带有扼流槽天线 E 面的单元耦合电平有了明显的减少,方向图有了显著的改善。

### 1 EBG 结构

在这种相控阵天线阵列中,天线单元之间的间距可以容纳 2~3 个 sievenpiper 结构单元<sup>[3-5]</sup>。图 1 所示的为 Sievenpiper 电磁带隙结构的几何平面图。因其结构紧凑,制作简单,而且表面波在带隙内衰减较大的特点,我们制作了 F<sub>4</sub>BK(聚四氟乙烯玻璃覆铜箔板,介电常数  $\epsilon_r = 3.5$ ,厚度  $t = 3\text{mm}$ )的电磁带隙结构接地面。单脊波导缝隙天线阵列工作于 S 波段 3.1~3.4GHz,因此本次设计的带隙中心频率为 3.25GHz,电磁带隙结构参数为:周期间距  $P = 10.2\text{mm}$ ,单元边长  $W = 10\text{mm}$ ,过孔直径  $d = 1\text{mm}$ 。

本次设计的电磁带隙结构接地面采用微波网络分析仪测试的表面波带隙结果如图 2 所示。在 3.02~3.6GHz 范围内,表面波传输系数下降了 16~43dB,这正是表明了 3.02~3.6GHz 就是设计所需的表面波带隙。

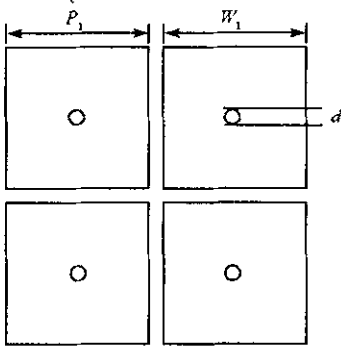


图 1 电磁带隙结构示意图

Fig. 1 Figure of EBG

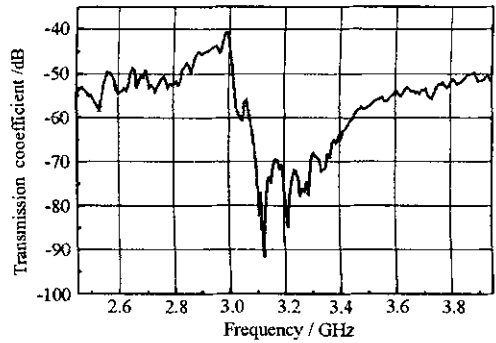


图 2 光子带隙测试曲线图

Fig. 2 Testing curve of EBG

### 2 单脊波导缝隙相控阵天线

如图 3 所示,单脊波导缝隙相控阵的脊波导的宽边长度  $a = 42\text{mm}$ ,而对应频率的矩形波导的宽边尺寸约为  $a = 72\text{mm}$ 。可见,单脊波导可以显著减小天线阵列单元间的间距,有利于天线阵列的大角度扫描。每个单脊波导天线采用独立的同轴工分馈电。每一个单脊波导宽边纵缝线性阵中包括 10 个辐射缝隙,缝隙距离波导中心线的偏移量不同,中心单元偏移大,约为 5.78mm,靠近波导两端的缝隙偏移量逐渐减小到 0.78mm。天线辐射单元的激励振幅呈切比雪夫分布,实现天线的低副瓣电平。天线阵共包括 16 个这样的线性阵列。天线单元与单元之间已经采用扼流槽,阻止表面电流的流动。由于各缝隙偏离波导的中心线距离不同,这就给电磁带隙结构接地面的安装造成困难。但在缝隙的横向方向上,缝隙的周期是一致的,因此本文采用如图 4 的电磁带隙结构加装方法。加装时,直接将接地面用螺钉固紧在天线表面。具体的结构如图 5 所示。在两个缝隙之间加上 3 个周期的电磁带隙结构单元,整个电磁带隙结构阵面是交错排列的。同时,为了使天线的谐振频率保持始终落在带隙之内,可在缝隙的周围与电磁带隙结构之间留有一定的空间,以减小缝隙与电磁带隙结构之间的耦合<sup>[6]</sup>。

### 3 测试结果与讨论

#### 3.1 驻波特性

图 6 给出了普通单脊波导缝隙天线阵与电磁带隙结构单脊波导缝隙天线阵的回波损耗( $S_{11}$ )曲线图。由图中可以看出,虽然由于光子带隙结构的存在,天线的回波损耗相对变差,但仍然落在带隙之内,也均在 -10dB 以下,仍然得到比较好的匹配,天线的辐射效率并不会会有明显损失。另外,电磁带隙结

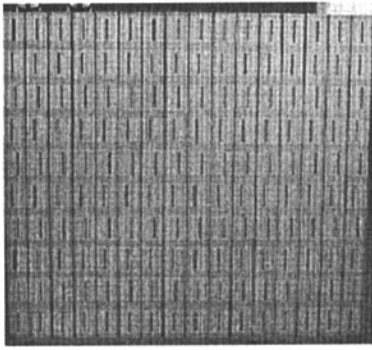


图3 普通单脊波导缝隙天线阵

Fig.3 Conventional SRWSPA

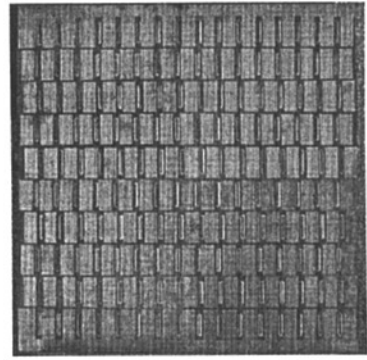


图4 带EBG单脊波导缝隙天线阵

Fig.4 SRWSPA with EBG

构天线的回波损耗相对于普通天线的回波损耗变差了,这是因为电磁带隙结构接地面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,必须对缝隙天线阵进行调整。但本文只做比较性的实验,在带隙内取S11相同值的工作频率下,比较天线的工作性能。

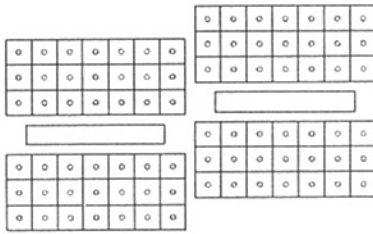


图5 EBG与缝隙的相对位置图

Fig.5 Relative position of EBG and slots

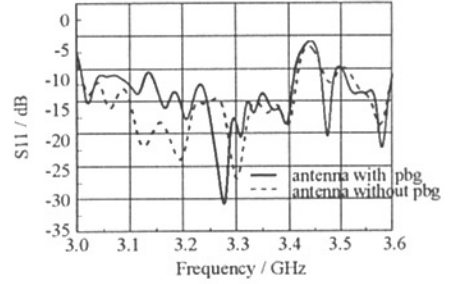


图6 天线阵的回波损耗曲线

Fig.6 Return wave loss curve of antenna array

### 3.2 耦合系数

如图7和图8所示,对于普通单脊波导缝隙天线阵,在E面上,天线单元之间存在比较强的互耦,这是波导缝隙天线的共同特性,主要是由于金属平板支持TM型的表面波,缝隙上的电场等效于磁流,横向排列时耦合较大,而纵向排列时耦合较小。但加上电磁带隙结构以后,E面的耦合系数下降比较明显。在天线的工作频段3.1~3.4GHz上,相邻天线单元E面的耦合系数下降了2~10dB。间隔一个单元的两天线的E面耦合系数下降了3~20dB。这同时也说明了电磁带隙结构个数越多,抑制表面波的效果越明显。这对单脊波导缝隙相控阵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

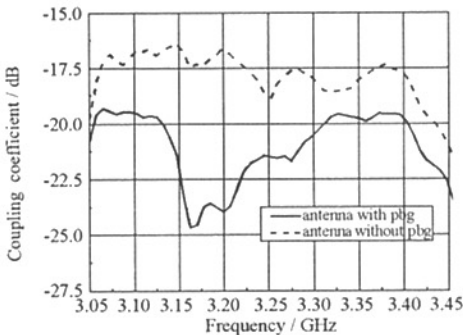


图7 相邻单元耦合系数测试曲线

Fig.7 Coupling coefficient testing curve of neighboring elements

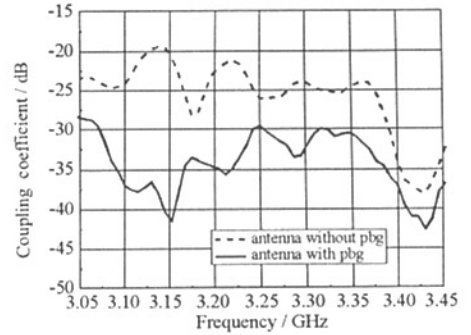


图8 间隔一个单元耦合系数测试曲线

Fig.8 Coupling coefficient testing curve of spaced one element

要意义。

### 3.3 单元方向图

图 9 为天线阵边缘单元有源测试方向图,也就是阵列中只激励一个单元,其余所有单元均端接匹配负载所测的方向图。图中虚线为普通单元的辐射方向图,实线为加装电磁带隙结构的单元辐射方向图。对于普通的单脊波导缝隙天线边缘单元,由于其一侧为自由空间,因此该天线的表面波在其边缘将向空间产生辐射和绕射,前向绕射会对天线的辐射产生干扰, $E$ 面辐射方向图上出现的波纹就是由于这种干扰形成的,而后向绕射则增加了天线的后瓣辐射电平。普通单元方向图主瓣较宽,后瓣电平较高。

图 10 为天线阵列的中间单元有源方向图。由于该单元远离阵列的边缘以及位于每个单元之间的扼流槽的存在,阵列边缘对中间单元的辐射性能影响不大,因此在加装电磁带隙结构前后的方向图变化不大。由此可见,越靠近边缘的单元,电磁带隙结构对其方向图的改善越明显。加装电磁带隙结构后,不同单元的有源单元方向图更加近似,不像金属接地面情况下与其他单元的影响密切相关。这一现象的出现,显然证明了在使用电磁带隙结构接地面之后,其他所有单元对观察单元的影响是很小的。而出现这一变化的唯一原因就是电磁带隙结构接地面的引入,它所特有的频率带隙抑制了阵列单元之间的互耦,消除了单元之间的影响。

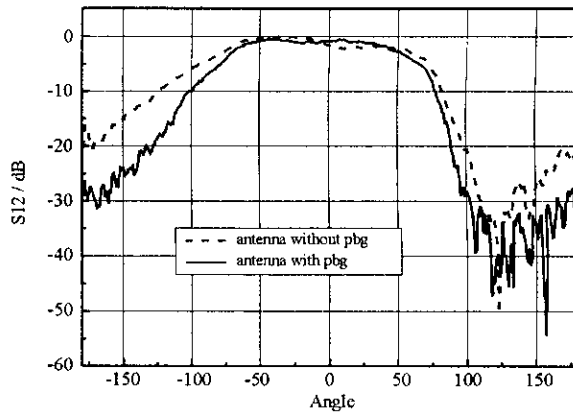


图 9 边缘单元测试方向图

Fig. 9 Testing radiation pattern of edged element

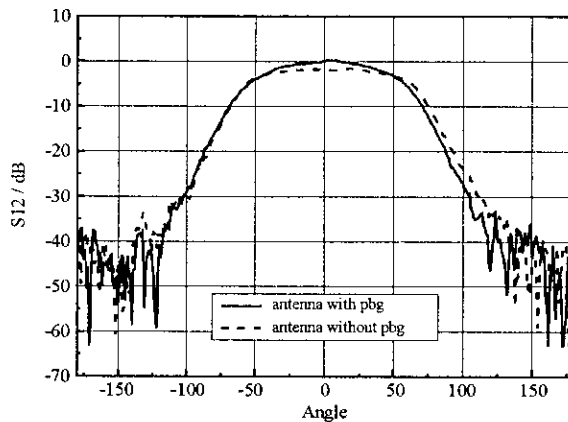


图 10 中间单元测试方向图

Fig. 10 Testing radiation pattern of central element

### 3.4 天线阵方向图

图 11 给出了这两个天线阵的归一化  $E$  面辐射方向图。所测方向图的频率为 3.28GHz,此时两个天线具有相同的回波损耗系数  $S_{11}$  均为  $-21.7\text{dB}$ 。从图中可以看出,电磁带隙结构单脊波导天线产生了更加理想的方向图,说明电磁带隙结构已经起到了抑制表面波的作用,减小了表面波在接地面边缘的和交角处的绕射。在普通天线阵中, $E$ 面方向图的副瓣和后瓣较高。在  $+40^\circ \sim +180^\circ$ 和  $-180^\circ \sim -40^\circ$

之间  $E$  面方向图的值是  $-22 \sim -50\text{dB}$ 。加上电磁带隙结构以后,  $E$  面方向图变得比较尖锐, 对称性更好。在  $+40^\circ \sim +180^\circ$  和  $-180^\circ \sim -40^\circ$  方向上  $E$  面方向图的值是  $-25 \sim -60\text{dB}$ , 降低了  $3 \sim 10\text{dB}$ 。从结果可以看出, 加装电磁带隙结构接地面后, 天线阵列的辐射方向图得到了改善, 在原先天线低副瓣设计的基础上进一步减小了天线的副瓣电平。可见, 利用电磁带隙结构接地面的优良带隙特性可以有效抑制波导缝隙多元阵列的侧向辐射。

图 12 为这两个天线在扫描  $70^\circ$  时的天线方向图。从图中可以看出当天线扫描到  $70^\circ$  时, 加装电磁带隙结构的单脊波导缝隙天线阵比普通天线阵主瓣尖锐, 副瓣减少了  $2 \sim 3\text{dB}$ , 特别是后瓣改善更为明显, 减小了  $5 \sim 20\text{dB}$ 。特别是在  $-127^\circ$  上, 普通天线的  $E$  面方向图的值是  $-21\text{dB}$ , 加装电磁带隙结构后,  $E$  面方向图的值为  $-45\text{dB}$ , 减小了  $24\text{dB}$ 。这完全说明在整个相控阵天线的扫描过程中, 电磁带隙结构接地面都能有效地抑制天线的表面波的传播, 在波导缝隙天线单元之间加入电磁带隙结构代替导体作为相控阵的接地面可以有效地减小天线宽扫描角状态下的匹配难度, 极大地改善了天线的扫描特性。

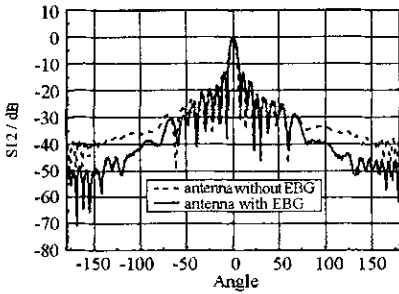


图 11  $E$  面测试方向图

Fig. 11 Testing radiation pattern of  $E$ -plane

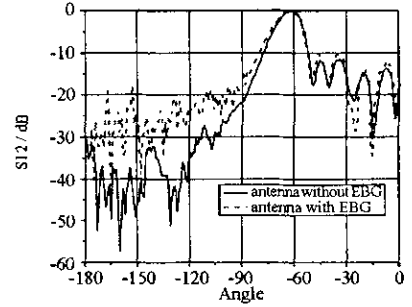


图 12  $70^\circ$  扫描特性比较图

Fig. 12 Comparative figure of scanning property at  $70$  degree

## 4 结论

实验结果表明, 采用电磁带隙结构的单脊波导缝隙相控阵天线与普通单脊波导缝隙相控阵天线相比, 电磁带隙结构能够改善天线的方向图, 极大地降低了  $E$  面各单元间的耦合系数, 提高天线的整体性能。同时也证明了在相控阵天线的整个扫描过程中, 电磁带隙结构接地面都能有效地抑制天线的表面波的传播, 极大地改善天线的辐射方向图。这对实现其他电磁带隙结构相控阵天线具有重要参考价值。本文是对电磁带隙结构改善相控阵天线性能作了初步探讨, 还有很多问题需要在以后的工作中加以研究和分析。

## 参考文献:

- [1] Sievenpiper D F. High-impedance Electromagnetic Surfaces with a Forbidden Frequency Band[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. , 1999 , 47 ( 11 ) : 2059 - 2074.
- [2] Yablonovitch E. Photonic Band-gap Structures[J]. J. Opt. Soc. Amer. B , 1993 , 10 ( 2 ) 283 - 295.
- [3] Zhang G H , Yuan N C. Radiation Characteristics Improvement in Waveguide-fed Slot Antenna with a High Impedance Ground Plane[J]. Microwave and Optical Technology Letters 2005 45.
- [4] 付云起, 董创明, 等. 平面微波电磁带隙结构的表面波带隙[J]. 国防科技大学学报 2002 25(2) 76 - 78.
- [5] Gonzalo R G. Coupling between Patch Antennas on Photonic Crystals[C ]//Proc. 24th ESTEC Antenna Workshop , Noordwijk , the Netherlands , May 30 - June 2001 6 - 10.
- [6] Coccoli R , Yang F , Itoh T. Aperture-coupled Patch Antenna on UC-EBG Substrate[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. , 1999 , 47 ( 11 ) : 2123 - 2130.

