

## 低 RCS EBG 波导缝隙阵列天线\*

白佳俊<sup>1</sup>, 石东<sup>2</sup>, 付云起<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 航天东方红卫星有限公司, 北京 100000)

**摘要:**将 Mushroom 电磁带隙结构(Electromagnetic Band Gap, EBG)的表面波带隙和同相反射特性同时用于波导缝隙阵列天线的设计,利用 EBG 的带隙特性抑制天线阵中的表面波,以改善天线的辐射性能;利用 EBG 的同相反射特性实现天线雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)的减缩,天线综合性能得到较大提升。制作了 EBG 波导缝隙阵列样品,并对天线阵的阵元互耦、辐射方向图及天线阵 RCS 等指标进行了测试,结果与理论预期相吻合,有效地降低了阵元间互耦及天线阵 RCS。

**关键词:**电磁带隙;波导缝隙阵列天线;雷达散射截面;互耦

**中图分类号:**TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2015)01-125-05

## EBG waveguide slot array with RCS reduction

BAI Jiajun<sup>1</sup>, SHI Dong<sup>2</sup>, FU Yunqi<sup>1</sup>

(1. College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;  
2. China Spacesat Co., Ltd., Beijing 100000, China)

**Abstract:** Mushroom electromagnetic bandgap structure shows surface-wave bandgap and in-phase reflection, these two characteristics were simultaneously used for designing the waveguide slot array antenna. The surface-wave bandgap was used to suppress the surface-wave in antennas and arrays, which results in radiation performance improvement. In addition, the in-phase reflection could be used to reduce the RCS level of antennas and arrays, so as to improve their total performances. A sample of four-element EBG waveguide slot array antenna was made, and the indexes of mutual coupling, radiation pattern and RCS of the sample were tested. The result is similar with the theoretical expectation, which has effectively reduced the mutual coupling and the RCS level of antennas and arrays.

**Key words:** electromagnetic band gap; waveguide slot array antenna; radar cross section; mutual coupling

波导缝隙阵列天线由于体积小、重量轻、结构简单、便于密封等优点,被广泛应用于雷达和通信领域。当天线阵用于机载相控阵雷达时,通常被安放在雷达波能够直接照射的位置,以保证雷达的探测距离和探测范围。在这种情况下,天线将引起强的散射,这对整个飞行器的 RCS 影响很大。

对于机载雷达工作频带外的电磁波可以采用频率选择表面(Frequency Selection Surface, FSS)、吸波材料等方法,而频带内天线要有效辐射能量,所以很难避免敌方雷达波与天线相互作用。赋形、吸波材料等对天线的辐射性能影响较大,不能简单用于天线 RCS 的减缩。若天线阵倾斜放置以减小后向 RCS,天线的有效口径面积也会减少,从而造成低增益和宽波束。另外,天线单元间的互耦对波导缝隙阵列的

辐射特性和散射特性影响也很明显,必须加以抑制。

本文针对非对称加脊波导缝隙阵列<sup>[1]</sup>进行研究,提出了一种基于 Mushroom 电磁带隙结构(EBG)<sup>[2]</sup>的天线 RCS 减缩方法。EBG 结构同时具有表面波带隙和同相反射特性,通常情况下二者在频率范围上重合<sup>[3-4]</sup>,用于波导缝隙阵列设计时,可以嵌入辐射缝隙之间来减少天线阵间的互耦;也可以包围住整个天线阵,防止表面波到达天线阵列边缘,以消除边缘绕射带来的影响<sup>[5-7]</sup>。

本文主要研究了 EBG 波导缝隙阵列的设计,通过考察单元间互耦系数、辐射方向图、天线阵列 RCS 等指标,证明 EBG 结构能够改善非对称加脊波导缝隙阵列天线的辐射特性,同时有效缩减天线阵的 RCS。

\* 收稿日期:2014-06-10

基金项目:新世纪优秀人才支持计划基金资助项目(NCET-10-0894)

作者简介:白佳俊(1990—),男,山西晋中人,博士研究生,E-mail:baijiajun1990@163.com;

付云起(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:yunqifu@nudt.edu.cn

# 1 波导缝隙天线阵结构和 EBG 结构

## 1.1 非对称加脊波导缝隙天线阵

波导缝隙天线阵一般采用加脊波导的形式以降低波导宽度,从而可以满足阵列间距不出现栅瓣的要求。一般的加脊波导为单脊波导,设计相对简单,但是位于波导宽边上的辐射缝隙须偏离中心线,同时为了实现幅度加权,不同位置的缝隙偏移量也有所差别,缝隙长度也可能不同,如此缝隙将不在一条直线上。这样将带来两个问题:一是阵列沿扫描方向(也就是垂直缝隙方向)可能会出现寄生栅瓣;二是对于这种缝隙交错的结构,EBG 结构的嵌入也变得复杂。因此,我们设计了非对称加脊波导,即脊两侧的槽深不同,对波导内部的场进行调制,最终可以实现波导表面缝隙的长度相同,并且位于波导的中心线上,性能比原有阵列形式有所提高,而且大大降低了 EBG 天线结构设计的复杂度。实际制作的单根非对称单脊波导缝隙天线如图 1 所示,缝隙天线的结构参数为:缝隙长度  $s = 44.15\text{mm}$ ,宽度  $4\text{mm}$ ,缝隙周期  $d = 64.61\text{mm}$ ,脊波导横截面宽度  $a = 42.28\text{mm}$ ,高度  $28.16\text{mm}$ (此为波导整体高度,对应槽深的最大值),脊波导两边的槽深  $b_1$  和  $b_2$  交替变化,具体参数这里不再给出。天线工作于 S 波段:  $3.1\text{G} \sim 3.38\text{GHz}$ 。

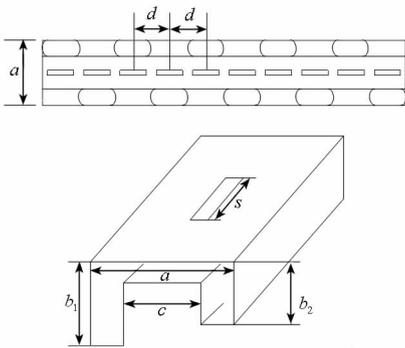


图 1 非对称加脊波导缝隙阵列天线  
Fig. 1 Asymmetric ridged waveguide slot array antenna

## 1.2 Mushroom EBG 结构及特性

Mushroom EBG 结构如图 2 中所示,制作在微波基板上,一侧刻蚀出周期排列的方形金属贴片,并通过导电过孔与另一侧的金属板相连。图 2 所对应的 EBG 结构参数为:介质基板的厚度  $h = 3\text{mm}$ ,相对介电常数  $\epsilon_r = 3.5$ ;单元的边长  $w = 10\text{mm}$ ,相邻贴片之间的距离  $g = 0.5\text{mm}$ ,导电过孔的半径  $r = 0.5\text{mm}$ 。这种 EBG 结构有两种独特的电磁特征:一是表面波带隙,如图 3 中实线所示

的测试结果,在其表面某个频率范围内的表面电磁波不能传播;二是同相反射特性,如图 3 中虚线所示的计算结果,这是利用周期时域有限差分法(Finite Difference Time Domain, FDTD)得到的无限大 EBG 结构的反射相位特性,在  $3.35\text{GHz}$  处其反射相位为  $0^\circ$ ,与金属表面恰好相差  $180^\circ$ ,也就是反相。同时还可以发现,反射相位为  $0^\circ$  的频率正好处于表面波带隙内,这是非常重要的,也正是本文中天线设计新方法的理论基础。将此 EBG 结构用于天线的设计,一方面 EBG 的表面波带隙可以抑制表面波的传播,改善天线辐射特性,这已经被大量的文献所证实;另一方面由于 EBG 表面的反射相位与金属表面的反射相位相差  $180^\circ$ ,如果二者组合起来形成天线的支撑面,那么它们分别反射的电磁波在空间将相互抵消,达到减小天线 RCS 的目的。当然,因为要同时考虑天线的辐射和散射特性,EBG 天线结构的设计将变得复杂得多。关于 EBG 天线设计的详细内容,将另外撰文报道,本文中只给出典型的实验测试结果来验证本文所提出的设计方法。

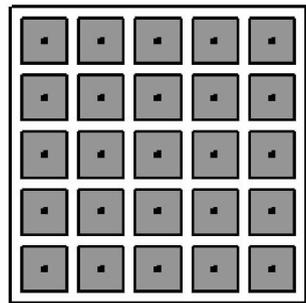


图 2 Mushroom EBG 结构示意图  
Fig. 2 Geometrical structure of Mushroom EBG

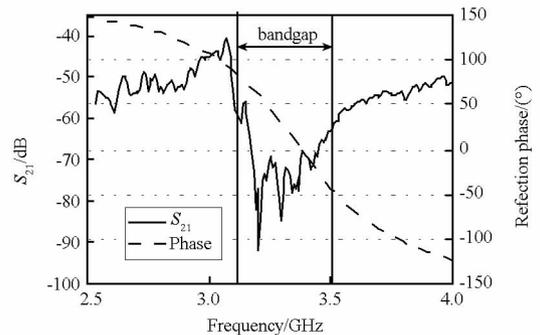


图 3 表面波带隙及同相反射特性  
Fig. 3 Surface-wave band gap and in-phase reflection performance

## 2 天线辐射特性

本文将 EBG 结构用于非对称加脊波导缝隙阵列天线的设计,其中单根波导上排列 10 个辐射

缝隙,然后 4 根同样的波导并列组成一个  $4 \times 10$  大小的天线阵,天线实际工作时沿与波导纵向垂直的方向扫描。与缝隙一致的方向为  $H$  面,天线阵设计为三角分布幅度加权,以降低天线副瓣电平。垂直方向为  $E$  面,也就是电场极化方向。考虑到天线本身的特点,EBG 只在  $E$  面加载,在两个缝隙之间加上 3 个周期的 EBG 单元。另外在天线周围也加载了 EBG 结构。制作的样品如图 4 所示,EBG 面覆盖粘合在天线阵表面。为了使天线的谐振频率不发生较大偏移,缝隙周围与电磁带隙结构之间需要留有一定的空间,也就是金属板表面;同时这样也保证了天线阵列表面有一部分是 EBG,一部分是金属面,从而实现对散射场的反相叠加。因此,对此天线的设计,充分体现了 EBG 各方面的特点。下面从多个方面给出天线的测试结果。

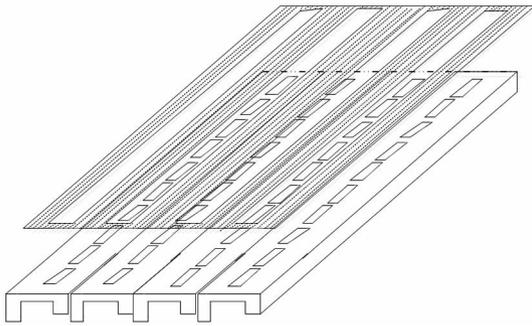


图 4 EBG 波导缝隙阵列天线四元阵样品  
Fig. 4 Sample of four-elements EBG waveguide slot array antenna

### 2.1 天线阵回波系数

图 5 所示为有无加载 EBG 结构波导缝隙天线阵的回波系数曲线。从图 5 中可以看出,金属接地面的波导缝隙天线阵  $-10\text{dB}$  的工作频段为  $3.20\text{G} \sim 3.45\text{GHz}$ ,加载 EBG 结构后,波导缝隙天线阵的回波系数变化不大,其  $-10\text{dB}$  的工作频段为  $3.20\text{G} \sim 3.38\text{GHz}$ 。EBG 加载对天线阵本身的匹配特性有影响,增加 EBG 结构后,某些频率上的回波系数有所恶化,这主要是因为 EBG 抑制表面波的本质就是将其散射掉,必然有一部分将沿逆向散射,从而影响原天线的辐射。但是天线本身基本上处于较好的工作状态,而且 EBG 天线阵的匹配特性还可以通过调整结构进一步优化。从图 5 中还可以进一步看出,EBG 结构的带隙频率覆盖了天线的工作带宽。

### 2.2 辐射方向图

从图 5 中可以看出,天线有无加载 EBG 结构在  $3.30\text{GHz}$  附近具有相同的回波系数  $-16.8\text{dB}$ ,

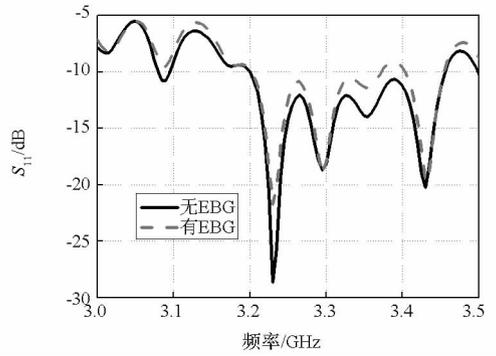
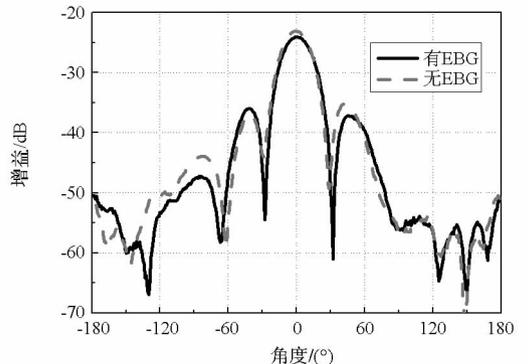
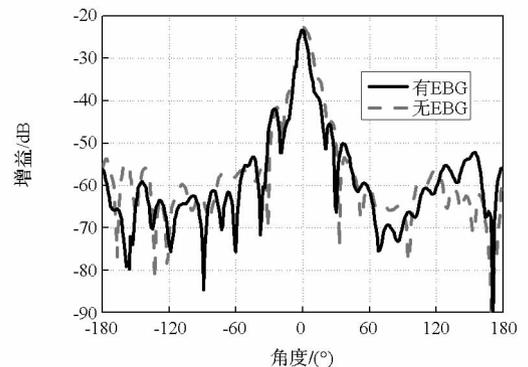


图 5 EBG 波导缝隙四元阵的回波损耗测试结果  
Fig. 5 Measurement results of return loss of four-elements EBG waveguide slot array antenna

为使天线具有相同的输入功率,取该频率点进行天线方向图的测试。图 6 为有无加载 EBG 结构天线阵的  $E$  面和  $H$  面方向图比较。从图 6 中可以看出,在主波束附近,它们方向图的形状基本一致,但是在侧向和后向的某些角度范围内,副瓣电平在应用 EBG 结构之后得到了明显的降低。但是从图中也可以看到,天线的增益略有损失,在某些角度副瓣电平也有所升高,这说明 EBG 天线阵的设计需要进一步优化,要和天线 RCS 的减缩相结合。



(a)  $E$  面方向图  
(a)  $E$ -plane pattern

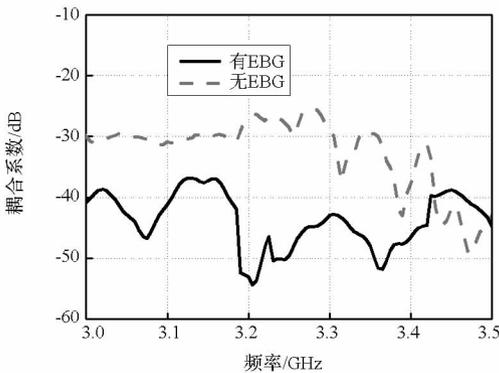


(b)  $H$  面方向图  
(b)  $H$ -plane pattern

图 6 EBG 波导缝隙四元阵方向图测试结果  
Fig. 6 Measurement results of  $E$  and  $H$  pattern of four-elements EBG waveguide slot array antenna

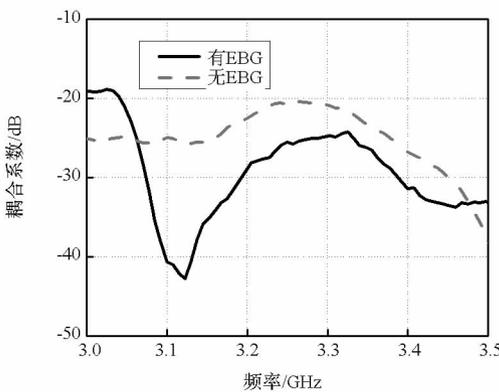
### 2.3 天线阵的互耦

天线阵列中的某一单元与其临近单元的互耦最强,随着单元间距的增加,互耦影响迅速变小,因此,我们只研究临近单元之间的互耦。天线阵的天线单元依次编号为 1 号、2 号、3 号和 4 号。在  $E$  面,天线单元之间本来为金属面,能够支撑表面波的传播,使得阵列单元之间互耦增加。在应用了 EBG 结构后,抑制了表面波的传播,降低了单元间的互耦系数。测试结果如图 7 所示,首先测试了中间两个单元即 2~3 之间的耦合,如图 7(a)所示,可以发现几乎在天线阵整个工作频段内,天线单元间的耦合系数都有不同程度的降低,在 3.30GHz 耦合系数降低了约 5dB。另外也测试了 1~3 之间的耦合系数,得到了类似的结果,因两个单元距离加倍,所以其耦合系数要比 2~3 之间的低,而在 3.30GHz 应用 EBG 后耦合系数降低了近 10dB。虽然本文提供的结果仅针对四元阵,但是通过这两组测试结果,可以说明 EBG 用于波导缝隙阵列可以有效地抑制阵列间的互耦。



(a) 2~3 单元耦合系数

(a) Coupling coefficients of 2~3 cells



(b) 1~3 单元耦合系数

(b) Coupling coefficients of 1~3 cells

图 7 EBG 波导缝隙四元阵互耦测试结果

Fig. 7 Measurement results of mutual coupling of four-elements EBG waveguide slot array antenna

综上所述来看,天线的总体辐射特性在一定程度上得到了改善。如果是作为大型相控阵天线,EBG 还可以有效地抑制扫描盲点,这在其他文献中有相关报道。虽然增益降低了约 0.5dB,但是与后面 RCS 降低约 8dB 相比较,综合性能得到了较大的提升。

### 3 天线散射特性

大型波导缝隙天线阵一般会在飞行器的头部方向产生较强的雷达散射,主要包括天线的模式项散射和结构项散射两部分。结构项散射由入射场引起,主要是天线阵面的镜面反射。对于波导缝隙相控阵天线,结构项散射远大于模式项散射<sup>[8]</sup>,因此消除天线的结构项散射可以有效地降低天线系统的 RCS。

EBG 结构用于天线的设计,其本身与辐射缝隙间要有一定的距离,以保证天线的正常工作,而这也正形成了金属表面。本文中基于 EBG 的 RCS 减缩,就是利用 EBG 表面的同相反射特性,与金属表面反射的电磁波相互抵消,达到消除天线阵面散射的目的。该方法在概念上相当于一种“无源抵消”,但是这种方法基于 EBG 结构,因此除了能够降低天线阵的 RCS,同时还能改善天线的辐射特性,使得天线阵列的综合性能得到较大的提升。

在前面给出的 EBG 波导缝隙天线的结构中,可以看到 EBG 结构占据了整个天线阵面的一部分,而另外的部分包括金属表面和辐射缝隙,这里辐射缝隙对 RCS 的贡献暂时不予考虑。这样天线阵面就相当于 EBG 结构和金属面组成的复合结构,当雷达波入射到天线阵面时,这两部分分别反射雷达波,由于它们的相位恰好相反,所以在空间叠加后将相互抵消,起到降低阵面散射的作用。散射消除的效果将取决于 EBG 和金属面结合的方式以及相互之间的面积比,本文通过 HFSS 软件对模型进行优化,最终得到了比较理想的结果。

在 3.30GHz 天线工作频率进行测试,测试过程中天线接匹配负载。测试频率点处的反射相位虽然不是 0°,但是与 EBG 同相反射频率点很接近,相位和金属面可以认为是反相的。图 8 中分别给出了天线阵  $E$  面和  $H$  面上天线散射的测试值,实线和虚线分别对应 EBG 结构和金属接地板的非对称单脊波导缝隙天线阵。

由图 8 可见,EBG 天线阵的 RCS 值在主波束内有明显的降低,比金属接地面的 RCS 值降低了 7.9dBm<sup>2</sup>,在此范围内也有明显的 RCS 减缩效

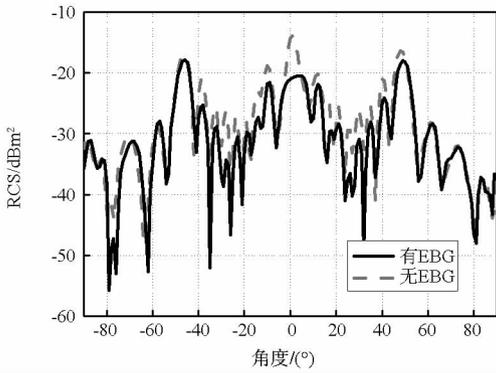
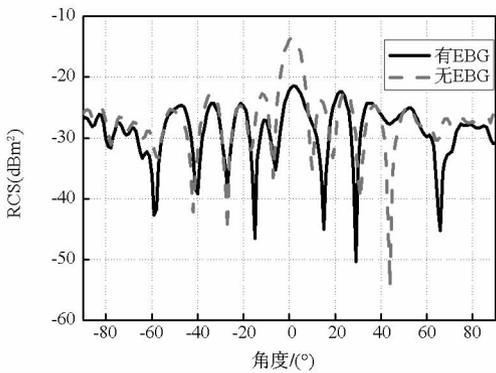
(a)  $E$  面 RCS(a) RCS of  $E$ -plane(b)  $H$  面 RCS(b) RCS of  $H$ -plane

图8 EBG 波导缝隙四元阵的 RCS 测试结果

Fig.8 Measurement results of RCS of four-elements EBG waveguide slot array antenna

果。 $E$  面和  $H$  面的效果有所差别,主要是因为 EBG 在阵列中的嵌入是为了抑制阵列  $E$  面间的互耦,所以 EBG 是条带,并与金属面构成了一维栅格。对于 EBG 天线 RCS 减缩,具体的结构需要深入研究,以求获得更好的优化结果,然后和 EBG 对天线辐射性能的影响相结合,改善天线辐射性能的同时实现 RCS 减缩。

## 4 结论

对于 EBG 用于天线的研究,本文提出了一种

新的方法,充分利用了 Mushroom EBG 结构表面波带隙和同相反射的特点,在改善天线辐射特性的同时,可以实现天线 RCS 的减缩,并将其用于波导缝隙天线阵的设计,给出了实验测试结果。本文提出的设计思想与原来 EBG 用于天线的设计思想相互融合,需要从天线辐射和散射两个方面进行优化。综合来看,基于本文方法设计的 EBG 天线,结构简单,具有良好的辐射性能和隐身效果。

## 参考文献 (References)

- [1] Li Y Q, Zhang H, Fu Y Q. RCS reduction of ridged waveguide slot antenna array using EBG radar absorbing material [J]. IEEE-Antenna and Wireless Propagation Letters, 2008 (7): 473-476.
- [2] Sievenpiper D, Zhang L J, Broas R F J, et al. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(11): 2059-2074.
- [3] Yang F, Rahmat-Samii Y. Electromagnetic band gap structures in antenna engineering [M]. New York: Cambridge University Press, 2009.
- [4] Fu Y Q, Yuan N C. Elimination of scanning blindness of phased array antennas using electromagnetic substrates [J]. IEEE-Antenna and Wireless Propagation Letters, 2004(3): 63-65.
- [5] Ebadi S. Mutual coupling reduction in waveguide-slot-array antenna using electromagnetic bandgap (EBG) structures [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2014, 56: 68-79.
- [6] Zheng Q R, Fu Y Q, Yuan N C. Asymmetric single ridged wave-guide slot antenna with a high impedance ground plane HIGP [C]//Proceedings of the Seventeenth Asia-Pacific Microwave Conference, 2005.
- [7] Li L, Dang X J, Li B, et al. Analysis and design of waveguide slot antenna array integrated with electromagnetic band-gap structures [J]. IEEE Antenna and Wireless Propagation Letters, 2006(5): 111-115.
- [8] 阮颖峥, 雷达截面理论与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.  
RUAN Yingzheng. The radar cross section theory and technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. (in Chinese)