# 有源周期性结构控制电磁波反射波束指向研究

苏东林 周 焱

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

**摘 要**: 提出有源反射的概念. 利用如光带隙电磁结晶结构、高阻抗结构等周期性结构的带隙特性和阻抗特性,通过在类似高阻抗表面的周期性金属单元表面铺设有源器件——变容二极管,控制周期性结构的性能,建立有源周期性结构,影响入射电磁波的传播特性,实现对反射波束的指向的有源控制和有效改变. 仿真实验证明采用单层或双层有源周期性结构表面,可以有效控制反射波束的相位和角度指向.

**关 键 词**: 有源反射; 光带隙; 高阻抗表面; 有源周期性结构; 变容二极管

**中图分类号**: O 451; TN 926

**文献标识码**: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2007)02-0164-05

# Study of active periodical structure's controlling the direction of reflector electromagnetic wave

Su Donglin Zhou Yan

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract**: The conception of active reflection was presented. Using the periodical surface's character of band gap and impedance transition of electromagnetic crystal structure such as photonic band gap(PBG), frequency selection surface(FSS), high impedance surface(HIS) and so on, the varactor diode was put onto the approximate HIS's surface to join each cell of metal on top layer to realize the electronic control for periodical structure. The active periodical structure was eslablished. The propagation characteristic of incident electromagnetic wave was effected and controlling the reflected phase and direction of reflector electromagnetic wave were realized. The simulation test proves that this method and technology can control reflector wave's phase and direction of on working frequency band by using single or double layer active periodical structure effectively.

**Key words**: active refelction; photonic band gap; high impedance surface; active periodical structure; varactor diode

在飞行器隐身的研究中,将雷达探测照射到机身表面的入射电磁波被反射的电磁波束有意图地改变,使之反射到敌方无法探测的方向是一项很有意义也是当今非常热门的研究. 其中针对表面结构的研究方法是极其重要的,对于机身表面的结构,按照通常的涂敷吸波材料的形式,可以通过电磁分析方法分析其反射和透射的性质,如文献[1]在各向异性分层介质条件下,得到了横向场传播的本征波解,给出了计算各向异性介质界面的反射和透射系数的解析表达式,最后对金属表面单轴各向异性涂层的反射特性进行了分析.

目前电磁结晶等周期性结构被广泛地应用在电子设计领域,其中光带隙(PBG,Photonic Band Gap)结构在微波电路、光纤通信及纳米材料的设计中的应用已经得到业内的认可,如文献[2]. 而频率选择表面(FSS,Frequency Selection Surface)也是一种近年来发展迅速的周期性结构表面,其中在雷达天线罩上的应用是很成功的,主要

**收稿日期**: 2006-03-20

**基金项目**: 武器装备预研基金资助项目(51410050203HK0161;51437030105HK010);国家自然科学基金资助项目(10577004)

**作者简介**: 苏东林(1960—),女,北京人,教授, sdl@buaa.edu.cn.

是针对雷达反射截面(RCS,Radar Corss Section)的减缩而发展的一种表面特性结构,如文献[3].而基于高阻抗表面(HIS,High Impedance Surface)、FSS 和 PBG 等周期性结构在各个领域的应用,目前如何将人工控制方案施加到这些周期性结构之中成为研究的热点和难点,文献[4－7]分别对 HIS 表面和 FSS 表面结构电磁波反射的性质进行了分析,讨论了高阻抗电磁波反射表面的奇异性质及其入射和反射角度.

采用电控有源电磁结晶结构,通过电子调整飞行器表面的电磁场反射边界的位置,实现将飞行器的散射场移出受威胁的区域.这种新的隐身思路,可以称为有源反射.有源反射技术不需检测入射雷达波的信息,只取决于飞行器自身的飞行姿态.为使有源反射技术具有主动性(实时),根据飞行器的作战使命,预先优化设计有源电磁结晶结构的物理结构及电控方案,确保来自受威胁方向的入射波的散射场均可被移出受威胁区域.为使飞行器的隐身效果具有隐蔽性,通过电控方法和预置的优化算法控制被移出的电磁波束的波束和指向,是这一技术的发展方向.本文着眼于讨论有源反射的基本原理,第一节介绍有源隐身和有源反射技术的实施载体有源周期性结构,第二、三节介绍有源反射概念,以及其后的实验仿真和总结.

## 1　有源周期性结构

高阻抗型周期性结构是近年来 PBG 研究的热点之一,如文献[8].高阻抗结构可以看作铺设在介质层上表面的周期性金属贴片结构和下表面的金属地通过一个个通孔相连接而构成的类似“蘑菇”形状或者说图钉形状的周期性结构排列.通孔的长度和介质层的厚度一致,一般为 $\lambda/4$,由于下表面的金属地为短路状态,由微波网络阻抗变换的原理可知,上表面的周期性贴片金属单元结构所呈现的电路状态应该是开路状态,即高阻抗状态.这种金属平面的阻抗可以由并行的薄片电感、薄片电容等来等效.

通过外加电的方式控制周期性结构的阻带、通带性质是研究 PBG 等周期性结构目前的热点之一.通过对高阻抗表面的某些改进,可以有效地建立电控周期性结构的模型,如图 1 所示.将每个金属单元与相邻金属单元间以变容二极管连接,正负极连接方式如图.将二极管负极所连接的金属单元中间的通孔结构直接透过金属地平面并将通孔壁与旁边的金属地隔离开,用以连接外加电控源,而与二极管正极相连接的金属单元中的通孔保持和金属地面接通.这样的结构形式保证了在给一部分通孔结构外加电的情况下,表层金属单元和邻近的金属单元间产生电位差,从而驱动变容二极管的容值变化.从本文第三节的讨论可以知道,变容二极管的容值变化不仅仅改变了周期性结构的等效网络,而且很大程度上影响了电介质层的某些电参数,从而使入射电磁波的性质产生了改变.

在后面的研究中,由于制作工艺及实际工程条件的影响,介质基板的厚度小于 $\lambda/4$ 一样可以对减缩 RCS 产生明显的效果,而且在有源变容二极管加在贴片单元上的时候,通孔的长度被有效缩短,也是可以减薄基板的原因,如文献[8－10].这样的结构是一种类似的高阻抗结构,称之为有源周期性结构.

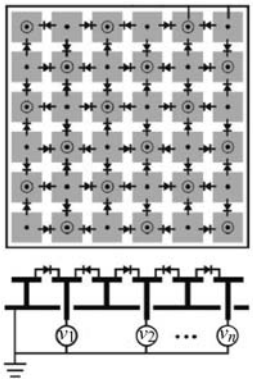



图 1　有源控制单层高阻抗型周期性表面结构

## 2　有源周期性结构改变反射波束指向

通过铺设了周期性表面结构的金属-电介质地结构平面,改变电磁波的传播特性.这样的整个表面可看作一种人工磁导体面,其反射相位的变化随频率的变化可以从 $+\pi$ 到 $-\pi$,如图 2 所示,而在谐振频率处为 0°.通过有源器件的控制,如变容二极管的控制,可以建立可控阻抗表面,应用偏压控制响应频率以及反射相位.这里主要是通过电控产生一种可控相位梯度,可以在二维空间改变反射波束±40°左右,并且可以比通常的反射阵列表面提供更宽的带宽,如文献[10].

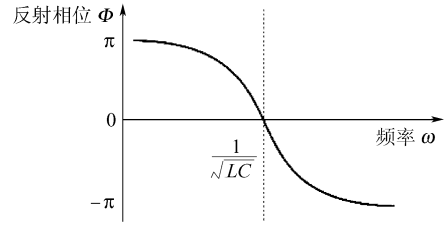



图 2　电磁波照射到周期性结构表面后反射相位

高阻抗表面周期性结构通过连接地面和上层周期性结构单元的通孔实现上层周期性结构的全部接地短路,从而呈现高的阻抗.这种结构甚至可以应用到喇叭天线上,使天线的波束更窄,更集中.这种极像蘑菇或图钉形状的结构相当于电容加载,可以使电路基片的厚度小于 $\lambda/4$.这样的材质对于两种极化方向提供一种高阻抗的边界条件($Z_s \geqslant 377\ \Omega$).这样就提供了一种表面波带隙,其独特的反射相位和角度性能,在飞机隐身电路研究方面具有很广阔的应用前景.

电磁波照射到周期性结构表面,对于多层周期性结构来说,入射的波在被多层的金属单元辐射和散射后,会形成透射波、透射栅瓣以及反射波和反射栅瓣等,如图3所示.设垂直周期性结构的轴为 $z$ 轴,平行于平面以及纸面的轴为 $x$ 轴,则通常反射波的表面相位是

$$\phi = \mathrm{Im}\left\{\ln\left(\frac{Z_s-\eta}{Z_s+\eta}\right)\right\} \tag{1}$$

其中 $\eta=377\ \Omega$ 是自由空间中的波阻抗.

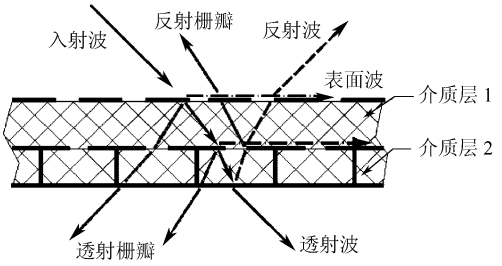



图3 周期性结构表面中电磁波传播示意图

在远低于谐振频率的状态下,以相移 $\pi$ 进行表面反射,就像通常的电路系统一样,随着频率向谐振频率靠近,反射相位下降.在远高过谐振频率点的频率时,可以达到或接近 $-\pi$,同时表面所呈现的阻抗可以表示为

$$Z_s = \mathrm{j}\omega L/(1-\omega^2 LC) \tag{2}$$

可调节阻抗表面:有效地调节电参数 $L$ 和 $C$ 就可以调控这种特殊的地平面的反射频率.这样的周期性阻抗表面,可以称之为分布式移相器.而如果反射相位可以作为沿着表面移动位置的函数,则可以利用这一性质进行波束转向.相位的线形梯度 $\partial\phi(x,y)/\partial x$ 可以反映这种入射微波波束在 $xz$ 面的反射角度.

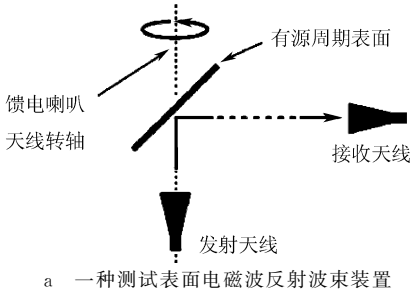
$$\theta = 2\arctan\left(\frac{\lambda}{2\pi}\cdot\frac{\partial\phi(x,y)}{\partial x}\right) \tag{3}$$

高阻抗表面的谐振频率和反射相位可以通过改变等效电容和电感的值来进行相应的调整.$L=\mu t$,$\mu$ 和 $t$ 是导磁率和厚度.除非找到磁活性材料,否则只能通过改变基板厚度来控制 $L$.而调节电容简单的多,只要改变金属结构单元的几何形状和排列组合方式就可以,或通过增加可调的集总参数的电容.

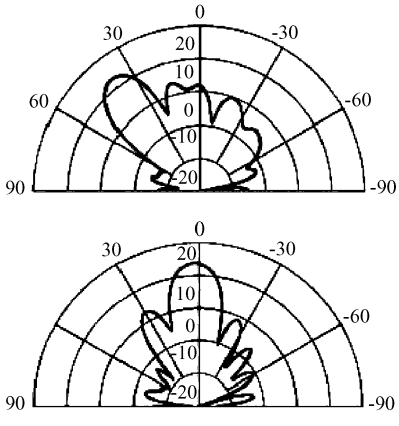
在周期性结构中的每一个单元都与其它相邻的4个单元用反偏二极管相连.当改变二极管上的电压时,就可以控制相邻单元间的电容值,从而调节谐振频率.这个处于反偏状态的中间结构单元,可称之为中间偏置单元,它通过一个通孔穿过地板与背面的控制线网络相连接,通过背面的控制线路,就可以控制各个中间偏置单元上所加的偏置电压,而且偏置线路并不影响前表面上的电磁场的结构.对于天线应用形式来说,天线方向图、最大增益方向就可以像被编程序一样随着由整个表面决定的反射相位的变化而控制,如文献[9].

图4所示是 Daniel 建立的测试表面型结构的电磁波反射波束的实验方法,对于矩形单层周期性表面结构,测试结果清晰地反映了单层高阻抗结构反射波束在变容二极管负电压控制下电控状态下所发生的变化.

对于所建立的有源周期性结构.可调节范围直接与周期性结构单元间的等效电容的大小相关,而且带宽也是由等效电容的大小来控制的.测量带宽与可用作波束改变反射器的瞬时带宽直接相关,因为具有较为陡峭的相位和角度曲线的反




a 一种测试表面电磁波反射波束装置




b 反射波瓣变化示意图

图4 测试原理及测试示意图

射阵列比在一个较广阔的频率范围内形成一个连续的相位和角度变化要实现起来困难的多,而有源周期性结构在这方面有独特的优势,如下一节的仿真分析结构显示.

## 3　实验仿真

利用高频电磁仿真软件(HFSS,High Frequency Simulation System)仿真分析有源周期性结构对入射电磁波的反射相位和角度变化可以采用两种仿真方法.第 1 种方法是在 HFSS 中模拟出变容二极管的变容能力,可以针对变容二极管在整个系统中所起到的主要作用,用一个无源实体来代替,并设此实体的介电常数可变.通过以上的分析,可知介电常数的改变直接影响其电容的变化,这样,就用无源模块模拟了有源的二极管器件,如图 5.

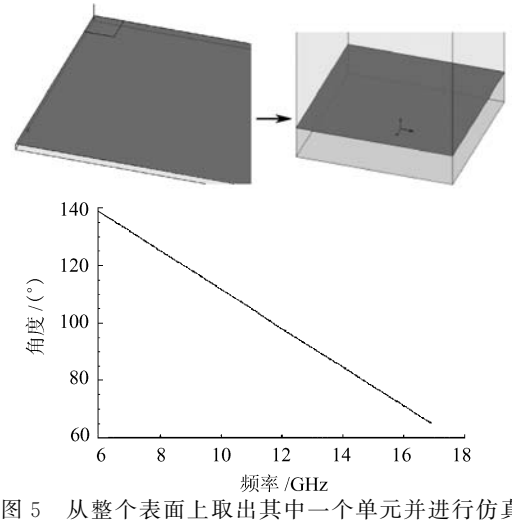



图 5　从整个表面上取出其中一个单元并进行仿真

第 2 种方法是直接在整个周期性结构模型中,改变电可控层的矩形贴片的尺寸,原理也是间接改变了其之间的耦合电容,只是这样的改变是对于仿真其性能而假设的改变,实际情况下是无法实现的.

基于以上方法,分别对不同层数的有源周期性结构进行 HFSS 分析,对于变容二极管的容值变化范围取通常的 3～20 pF,这里暂时不针对任何实际型号的二极管,只取普通的变容量程座作为代表性研究. 同时对应的模块值的虚部为 0.2～0.7 的变化范围.而对于多层的周期性结构采用第 2 种方法变换各层金属贴片的尺寸模拟互相连接变容二极管电容的容值变化,或两种方法结合使用,幅度在±40%以内.同时 HFSS 软件中仿真各结构周期性边界条件下单元在垂直入射电磁波的情况下,各频率点的反射角度.由于基片设计采用的是 $\varepsilon_r=10.2$,所以在周期为 5 mm 时,其周期性结构的基本谐振频点在 7 GHz 附近.下面就平面金属、单层及多层有源周期性结构分别加以仿真,所有结构取 5 mm×5 mm 单元并在 HFSS 中设立周期性边界条件.

理论仿真结果表明:单层有源周期性结构将入射波的主波束反射相位和角度极大的改变,如图 6,通过式(1)～式(3)可知,反射波束角度发生了根本的改变.而采用的双层矩形、圆形和三层有源控制周期性结构分别在整个频率仿真范围内使反射相位和角度发生了改变,如图 7～图 9 所示.

由于在国内制作多层高频板的工艺各项条件差距比较大,而且加工精度无法达到这么高的情况下,无法制作实际的实验件测试得到进一步的第一手数据资料.而针对特定的技术任务和指标,在 HFSS 上建立准确的仿真模型,仿真其相位和角度的变化的方法应该是可行的.

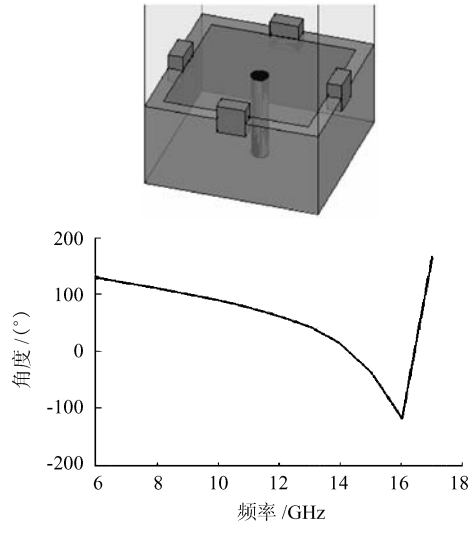



图 6　单层周期性结构的 HFSS 反射角度仿真

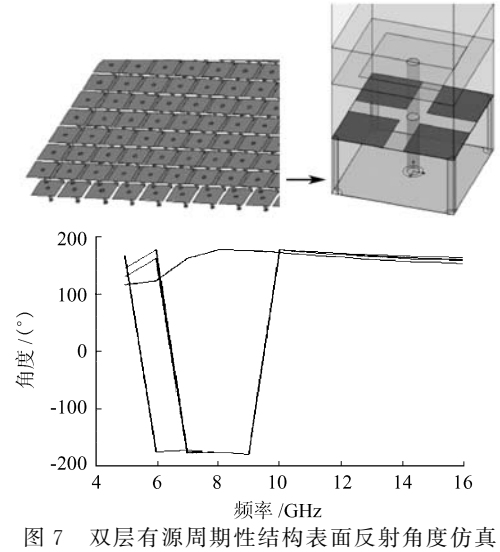



图 7　双层有源周期性结构表面反射角度仿真

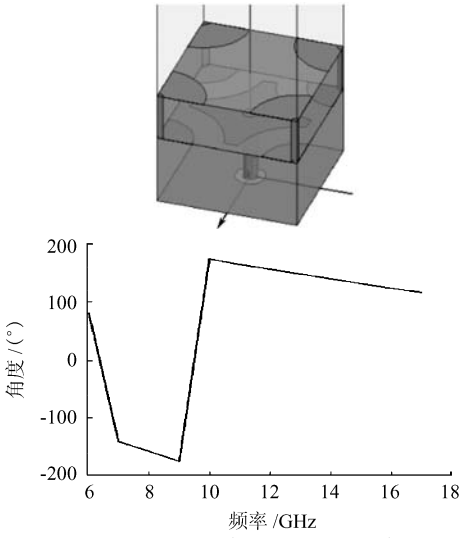



图8 底层矩形单元、表层圆形单元的有源周期性结构反射角度

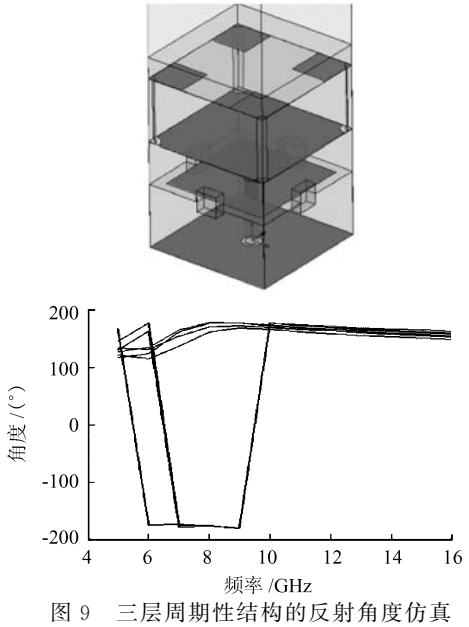



图9 三层周期性结构的反射角度仿真

## 4 结束语

通过对有源周期性结构对入射电磁波传播特性的影响分析,以及表面对垂直入射电磁波反射波束角度的仿真结果,可以知道在类似高阻抗结构的上层金属单元间铺设变容二极管,有效地改变了电控层的电学性质,使整个表面结构产生了改变电磁波传播性质的效果,并且对于不同的单元及有源控制方式,其相位和角度变化灵活多样,同时有角度变化可以反映出其反射波束指向的有效变化.而由于周期性结构可以在二维方向上作用,其与吸波材料结合以及外形共形的能力也很强,在军事及民用工程中都有很广阔的应用前景.

## 参考文献(References)

[1] 郑宏兴,葛德彪,张成. 金属表面各向异性涂层的反射系数[J]. 西安电子科技大学学报,2000,27(5):590-593
Zheng Hongxing, Ge Debiao, Zhang Cheng. Reflection coefficient of anisotropic coat on the metal surface[J]. Journal of Xidian University,2000,27(5):590-593(in Chinese)

[2] John D, Robert D, Joshua N. Photonic crystals[M]. New York: Princeton University Press, 1995

[3] 侯新宇,万伟,佟明安,等. 带有多层介质衬底FSS的损耗和带宽特性分析[J]. 微波学报,1999,15(4):366-370.
Hou Xinyu, Wan Wei, Tong Ming'an. Analysis on the loss and bandwidth properties of FSS with multi-layer dielectirc substrates[J] Journal of Microwaves, 1999,15(4): 366-370(in Chinese)

[4] 张冶文,陈鸿. 高阻抗的电磁波反射表面——光子晶体的实际应用之一[J]. 电工技术杂志,2001(12):10-12
Zhang Yewen, Chen Hong. Electromagnetic wave reflection surface with high-impedance: an example of application of photonic crystal[J]. Electrotechnical Journal,2001(12):10-12(in Chinese)

[5] Simovski Constantin R, de Maagt Peter, Melchakova Irina V. High-impedance surfaces having stable resonance with respect to polarization and incidence angle[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2005,53(3):908-914

[6] Barkeshli S, Bilenko H, Ersoy L. A new reflection and transmission analysis of a finite size frequency selective subreflector due to a finite source; a plane wave spectrum approach[R]. 0-7803-2009-3, 1994:2128-2131

[7] Tennant A, Chambers B. A single-layer tuneable microwave absorber using an active FSS[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2004,14(1):46-47

[8] Sievenpiper D F. High-impedance electromagnetic surfaces, a dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of doctor of philosophy in electrical engineering[M]. Los Angeles:University of California, 1999

[9] Song Hongxin, Zhang Wenxun. Analysis of FSS with reactance device loaded dipoles and bias feed grating-normal incidence[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994,3(3):2116-2119

[10] Sievenpiper Daniel F, Schaffner James H, Song H Jae, et al. Two-dimensional beam steering using an electrically tunable impedance surface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003,51(10):2713-2722

(责任编辑:娄 嘉)