

基于 FSS 技术的天线罩电性能设计影响因素研究

杨帆 张春波 张明秀 蔡汝峰 张天翔

(航天特种材料及工艺技术研究所,北京 100074)

文 摘 对 FSS 天线罩电性能所涉及的透波、隐身技术指标的基本问题进行了研究分析,提出了 FSS 天线罩对单元结构、介质加载、谐振频率、带宽、栅瓣等影响因素的设计方法,得出了 FSS 天线罩电性能设计应选择合理的单元结构、减小单元尺寸并紧凑周期排列以及选择合理的天线罩结构。

关键词 频率选择表面,天线罩,电性能

中图分类号:TN957

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.04.016

Electrical Performance Design of Radome Based on FSS Technical

YANG Fan ZHANG Chunbo ZHANG Mingxiu CAI Rufeng ZHANG Tianxiang

(Research Institute of Aerospace Special Materials and Processing Technology, Beijing 100074)

Abstract FSS is a crucial approach to realize the wave-transparent and stealth performance of radome. Based on the research and practice results of the electric performance of domestic and foreign FSS radome, research and analyze of the electric performance problems involved in the wave-transparent and stealth technical indicators of the FSS radome, some ways are put forwarded to deal with the design of the wave-transparent and stealth performance. It points out that the choice of small unit, close cycle and the choice of reasonable radome structure is the key to obtain excellent electrical performance in the design of the electric performance of FSS radome.

Key words Frequency selection surface(FSS), Radome, Electric performance

0 引言

天线罩不仅承载空气动力、结构强度、耐环境、结构质量等要求,还要满足天线系统对其电性能的需求。天线罩电性能的需求不仅包含透波性能,还应具有隐身特性、陡截止特性等。频率选择表面(FSS)是一种对于场的空间滤波器,可实现在工作频段内电磁波的低损耗传输,在工作频段外可以有效缩减 RCS 值,抑制电磁波传输,实现隐身。将 FSS 技术与天线罩技术有效结合,可构成基于 FSS 技术的透波/隐身天线罩,提高飞行器电性能^[1-2]。

传统介质天线罩的透波、隐身两个技术指标相互矛盾,而 FSS 技术可实现透波、隐身多功能一体化。本文以 FSS 技术为基础,对 FSS 天线罩电性能设计要素、谐振频率、带宽、隐身特性进行了研究,指出了 FSS 天线罩电性能设计关键。

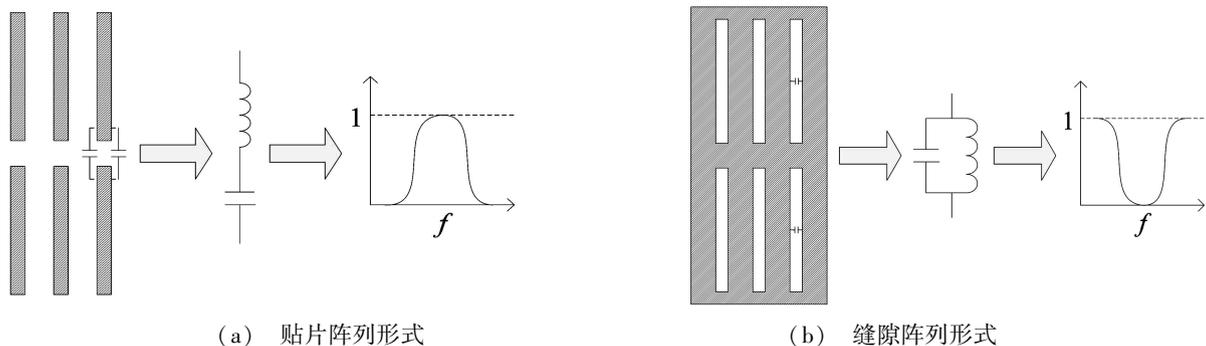
1 FSS 天线罩电性能设计影响因素

1.1 FSS 的基本原理

FSS 是一种周期性排列的具有带通或带阻特性的金属表面结构,可实现对电磁波的频率选择。FSS 的电磁特性主要取决于 FSS 单元结构、周期性分布、载体介质特性、介质加载方式、电磁波入射角度及极化方式等。利用 FSS 技术设计、制作的天线罩,既可以在天线工作频段内实现电磁波的低损耗传输,又可以在工作频段外的特定频段实现 RCS 的缩减,达到飞行器隐身特性。

FSS 可分两类基本形式:贴片阵列形式与缝隙阵列形式,如图 1 所示。

图 1(a)所示的谐振电偶极子阵列即为贴片阵列形式。假设电磁波从左向右入射,电场对电子产生作用力使其振荡,在某一频率下,所有的入射电磁波能量都被转移到电子的振荡上,使得透射系数为零。该频率点即谐振点,FSS 呈反射特性,其他非谐振频率电磁波仍可以通过。



(a) 贴片阵列形式

(b) 缝隙阵列形式

图1 FSS 两类基本形式阵列

Fig. 1 Two basic types of FSS

图1(b)所示为与之互补的缝隙阵列形式。当电磁波照射到FSS表面时,激发电子移动,同时沿缝隙产生感应电流。特定频率下,运动的电子在吸收大量能量的同时透过缝隙向外辐射能量,此时,阵列透射系数高,呈现通带特性,其他频段内则呈现阻带特性。

出正确的FSS单元结构是实现其优良电特性的根本。因为单元结构不仅仅决定了天线罩的带通或带通特性,同时也会存在带宽宽或窄的差异。除此之外,不同单元结构的FSS对电磁波入射角度变化与极化变化时所表现的电性能稳定性也存在一定的差异。常见的经典FSS单元形式如图2所示。

1.2 FSS 结构设计

在设计具有透波或隐身特性FSS天线罩时,设计

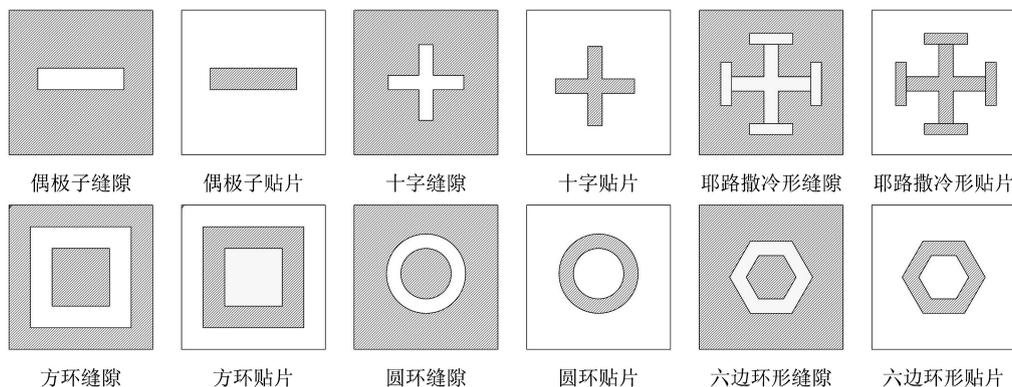


图2 常见FSS单元经典形式

Fig. 2 Classic form of FSS unit

根据不同单元阵列所表现出的电特性,可将圆型和六边型单元作为宽带单元,且单元紧密排列时,尽量减小间距,也可增大带宽;而方型、十字型、耶路撒冷型单元则可作为窄带单元结构形式。

载是必不可缺的。大多数天线罩的罩壁横断面结构可分为单层、A夹层、B夹层、C夹层和多层结构等。天线罩介质层间可固化FSS金属屏。介质层既可实现对柔性FSS屏的支撑作用,也可对FSS电性能起到改善的作用。FSS单元与介质层之间必须相互匹配,才能实现优良的电磁特性。只有将两者整体设计,才可同时满足FSS天线罩对电、热、力等性能的要求。

FSS阵列的响应特性除与自身结构紧密相关外,还受其单元栅格方式和排列周期的影响。FSS的排列方式主要分为三角形栅格排列和矩形栅格排列两种。排列周期的选择以避免在规定频段内出现栅瓣及表面波为依据。三角形栅格排列,最大间距 $d < \frac{1.15}{1+\sin\theta} \lambda_0$, 矩形栅格排列,最大间距 $d < \frac{1}{1+\sin\theta} \lambda_0$ 。单元的不同排列方式会有不同的紧密程度,从而造成周期阵列的不同栅瓣特性。

介质加载可实现FSS天线罩在通带内的恒定带宽和平坦顶部的传输特性。介质层的介电常数、损耗角正切、厚度均可显著改变FSS天线罩结构的电性能特性。介质层厚度增大时,FSS天线罩的谐振频率并非单调减小,而在一定的频段范围内形成通带。一般情况下,其谐振频率与介电常数相关,介电常数越小,其谐振频率越大。

1.3 介质加载

在FSS天线罩实际工程应用设计中,介质层的加

以两层缝隙型 FSS 的 A 夹层天线罩结构为例,如图 3 所示,每层介质板除了具有支撑 FSS 作用外,都有特定的电性能作用:在给定电磁波入射角度和极化方式前提下,外面两层介质板,可提供恒定带宽;中间一层介质板则决定 FSS 天线罩传输曲线顶部的凹陷程度;两层 FSS 阵列决定着带宽和谐振频率。FSS 屏放置在介质层中间可以获得较小插入损耗。介质加载还可以减小阵列单元的尺寸和间距,从而推迟栅瓣现象的出现^[3]。

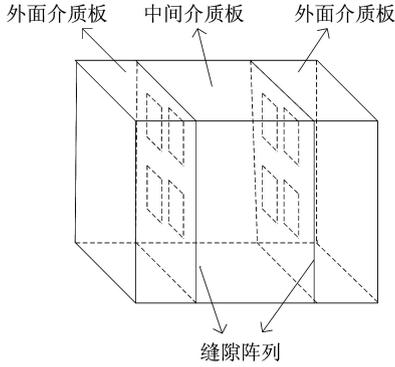


图 3 两层缝隙型 FSS 的 A 夹层天线罩结构示意图
Fig. 3 schematic diagram of sandwich radome structure of the two slit-type FSS

2 FSS 天线罩透波性能设计

2.1 谐振频率设计

天线罩曲线外形、天线波束水平及俯仰方向的扫描均会造成电磁波大角度传输情况,最大入射角有时可达 80°以上。对于线极化天线,垂直、水平极化两种形式均会同时存在。大入射角、极化变化均会恶化 FSS 天线罩的频率响应,而天线罩则必须要有稳定的频率响应特性。

FSS 单元的结构尺寸对其谐振频率起主要作用。在不考虑介质加载的前提下,预估 FSS 阵列谐振频率的近似方法是:对于缝隙型单元,其平均周长应近似等于一个波长 λ ,如圆环、方环、六边形环等;对于贴片型单元,其贴片最大长度应近似等于半波长 $\lambda/2$,如三极子单元、耶路撒冷十字形单元等。

设计 FSS 天线罩时,减小阵列单元周期,可弱化入射角的变化对 FSS 天线罩电性能影响,有助于天线罩获得稳定的谐振频率^[4-5]。

复杂的电磁环境(如大入射角、极化变化等)会造成 FSS 阵列谐振频率的漂移,而在 FSS 两侧进行介质加载可使 FSS 天线罩谐振频率趋于稳定。例如, FSS 两侧加载相对介电常数为 ϵ_r 的有限厚度介质,根据麦克斯韦方程可知,其谐振频率将处于 $f_0 \sim f_0/\sqrt{\epsilon_r}$ 之间。FSS 天线罩最外面的两层介质板必须为 $\lambda/4$ 的阻抗变换器,其厚度约 $\epsilon_r/4$ 或稍大一点。此时设计的谐振频率对于大入射角、极化变化不敏感。

2.2 带宽设计

FSS 的带宽主要取决于单元间隔 D_x 和 D_y 。当 D_x 或 D_y 增加时,比如 10%,那么带宽将大约减小 10%。假如同时增加 10%,那么带宽将大约减小 20%。对于许多 FSS 单元来说,带宽增大或减小的同时也伴随着谐振频率的微小漂移^[6]。

在 FSS 带宽设计中,选择合适的单元结构也极为重要。例如,宽带设计时,选择圆环或六边形环等单元结构更易获得较宽的带宽,而三腿加载单元等结构可在窄带设计中优先考虑。

FSS 金属屏的厚度应小于 $\lambda/1000$ 。如果增加金属屏的厚度,可减小缝隙阵列的带宽^[7]。

3 FSS 天线罩隐身性能设计

FSS 天线罩在满足其工作频段内呈现平坦顶部、恒定带宽等优良传输特性的同时,还应当具有陡截止特性,且特定频带内能有效缩减 RCS 值,以实现天线罩隐身特性^[8]。

平面波以一定角度入射到 FSS 天线罩表面时,首先在阵列表面激起各个方向散射波,但并不是所有方向的散射波都能实现能量向远处有效传输。然而,只有满足一定相位条件的方向上才能沿一定方向传播能量,从而形成栅瓣。栅瓣对 FSS 电性能有严重影响,栅瓣的出现不但会把入射电磁波能量分散,更重要的是会造成目标位置的误判或暴露。当电磁波入射角增大时,栅瓣的影响将会造成天线罩电性能急剧恶化,不可忽视。若栅瓣现象发生在隐身频段内,则必须通过设计给予抑制。

本文分析栅瓣现象,首先分析一维 FSS 情况,然后推广到二维 FSS 周期^[9-10]。

假设,入射角为 θ ,相邻单元间距为 D_x ,任意结构单元比它相邻单元延迟相位为 $\beta D_x \sin\theta$,在发生电磁波透射、反射时,任意结构单元比它相邻单元又超前 $\beta D_x \sin\theta$ 相位,所以,在周期单元阵列中透射或反射出的电磁波具有相位相同的特点,电磁波可以在该方向上传播。

然而,满足一定相位条件的方向也可能存在电磁波传播,设栅瓣可能出现方向为 θ_g ,则在这个方向上每个单元比它相邻单元延迟的总相位为 $\beta D_x (\sin\theta + \sin\theta_g)$ 。当这个延迟相位等于 2π 整数倍时,电磁波在 θ_g 方向也具有相同相位,电磁波就可以在这个方向传播。总之,在仅考虑 FSS 周期阵列时,出现栅瓣情况可表示为:

$$\beta D_x (\sin\theta + \sin\theta_g) = 2n\pi \quad (1)$$

式中, $\beta = 2\pi/\lambda_g$ 。

出现栅瓣的频率可表示为:

$$f_g = \frac{c}{\lambda_g} = \frac{nc}{D_x(\sin\theta + \sin\theta_g)} \quad (2)$$

当 $\theta_g = 90^\circ$ 时, 栅瓣出现的频率最低, 用公式表示为:

$$f_{g0} = \frac{nc}{D_x(\sin\theta + 1)} \quad (3)$$

由此可见, 出现栅瓣的最低频率只与单元间距 D_x 和入射角 θ 有关。

针对频率为 f_0 的入射波, 在经过二维周期单元阵列后无栅瓣出现的条件表示为:

$$f_0 < f_{g0} \quad (4)$$

即:

$$f_0 < \frac{nc}{D_x(\sin\theta + 1)} \quad (5)$$

由上式可得:

$$D_x < \frac{nc}{f_0(\sin\theta + 1)} \quad (6)$$

当 $n = 1, \theta = 90^\circ$ 时, 有:

$$D_x < \lambda/2 \quad (7)$$

由式(7)可知, 在不加载介质时, FSS 周期相邻单元间距 D_x 小于 $\lambda/2$ 时就不会产生栅瓣现象。

综上所述, 在不加载任何介质情况下, 一般保持 FSS 单元周期小于二分之一波长即可不引起栅瓣现象的出现。但是, 电磁波在具有介质支撑的 FSS 天线罩结构中传输时, 介质层的存在会导致表面波以俘获栅瓣的形式出现。因此, 在 FSS 天线罩设计时, 为满足其隐身性能, FSS 单元尺寸、单元周期均应尽量小, 以避免隐身频段内出现栅瓣现象。

4 结论

FSS 技术因优异的透波、隐身性能, 已成为隐身天线罩发展一个重要方向。本文结合相关理论和实践结果对 FSS 天线罩电性能设计影响因素进行研究。

(1) FSS 天线罩谐振频率设计, 以单元谐振原理为基础, 依据介质的电磁属性、厚度等进行最佳匹配设计, 从而获得大角度稳定性、极化稳定性的谐振频

率。

(2) FSS 天线罩带宽设计, 选择合适的单元结构, 同时对其单元间距进行相应设计。

(3) FSS 天线罩隐身设计, 应尽量减小单元尺寸, 并进行紧密排列, 以避免在隐身频段内出现栅瓣现象, 造成目标位置的误判或暴露。

总之, FSS 天线罩电性能设计时, 选择适当的小尺寸 FSS 单元结构并紧密排列以及设计合理的天线罩结构是获得优异电性能的关键。

参考文献

- [1] 孙连春. 频率选择表面技术在导弹电子战中的应用 [J]. 电子对抗, 2002, 46 (2): 1-3
- [2] Munk B A. Frequency selective surfaces: theory and design [M]. New York: A Wiley Interscience Publication, 2000: 9-25
- [3] 武振波, 武哲, 吕明云. 双层频率选择表面电磁特性数值模拟研究 [J]. 电波科学学报, 2004, 19 (6): 663-668
- [4] 张耀锋. 频率选择表面分析与优化设计 [D]. 西北工业大学, 2003
- [5] Munk B A. Periodic surface for large scan angles [P]. United States Patent 3,975,738, Jan. 29. 1974
- [6] 刘茂田, 傅文斌. 一种多层结构天线罩的透射性能分析 [J]. 空军雷达学院学报, 1999, 13(2): 21-23
- [7] 崔尧. 基于带通雷达罩应用的 FSS 分析与仿真 [J]. 西北工业大学, 2006
- [8] Munk B A. Finite antenna arrays and FSS [M]. New York: Wiley, 2000
- [9] Hu Xiaodong, Zhou Xiliang, Wu Linseng, et al. A miniaturized dual-band frequency selective surface (FSS) with closed loop and its complementary pattern [J]. Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, 2009 (8): 1374-1377
- [10] 侯新宇. 复杂介质加载频率选择表面的特性分析及雷达罩应用研究 [D]. 西北工业大学, 1998

(编辑 任涛)