

基于频率选择表面(FSS)技术的微小卫星 隐身天线罩设计

刘 斌¹, 刘晓春², 孙世宁², 周建江³, 张 翔⁴, 廖文和⁴

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 2. 中国航空工业济南特种结构研究所, 济南 250023;
3. 南京航空航天大学信息科学与技术学院, 南京 210016; 4. 南京航空航天大学高新技术研究院, 南京 210016)

摘 要: 天线是卫星的强散射源,降低天线的 RCS 是卫星隐身设计的重要研究课题之一,本文提出了一种基于频率选择表面技术的微小卫星天线罩设计方案,可有效降低卫星天线的 RCS。首先针对隐身天线罩设计要求,设计天线罩壁,包括各层介质的介电常数、厚度等。然后设计附着在罩壁上的 FSS 屏。进一步制作天线罩实物,通过在微波暗室进行天线罩扫频测试,实际测量该天线罩的频率响应特性,并测试星上天线方向图。结果表明,本文提出的天线罩设计可满足微小卫星天线在给定频段的阻带特性,并保持在给定正常工作频段的通带特性,说明该微小卫星隐身天线罩设计是有效的。

关键词: 微小卫星; 隐身; 雷达隐身; 天线罩; 频率选择表面(FSS)

中图分类号: V423.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2011)09-2009-06

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2011.09.020

Radome Design Using Frequency-Selective-Surface (FSS) Technique for Radar-Stealth Minisatellite

LIU Bin¹, LIU Xiao-chun², SUN Shi-ning², ZHOU Jian-jiang³,
ZHANG Xiang⁴, LIAO Wen-he⁴

(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, NUA, Nanjing 210016, China;
2. Research Institute for Special Structures of Aeronautical Composite AVIC, Jinan 250023, China;
3. College of Information Science & Technology, NUA, Nanjing 210016, China;
4. Academy of Frontier Science, NUA, Nanjing 210016, China)

Abstract: Since antenna is one of the strong scattering sources of a satellite, reducing the antenna RCS plays an important role in the design of the stealth satellite. In this paper, a radome design scheme for radar-stealth minisatellite is proposed by using the frequency selective surface (FSS) technique, to reduce the satellite antenna RCS. According to supposed design requirements for the radome, the design of radome wall is firstly performed, including determining the conductivity and thickness of the medium in each layer of the shield. Then, the design of the FSS screen adhered to the wall of the radome is performed. Next, a real radome is made up and its practical frequency response characteristics is obtained by using a sweep-frequency test in a microwave anechoic chamber. And also a antenna beam pattern test is made for the satellite. The results show that with the designed radome the minisatellite antenna can meet the stop-band characteristics in specified frequency bands and simultaneously remain the pass-band characteristics in normal working frequency bands, and our design is demonstrated to be effective.

Key words: Minisatellite; Stealth; Radar stealth; Radome; Frequency selective surface (FSS)

0 引言

采用伪装和隐身技术降低卫星的雷达反射信号,对在未来攻防中增强对敌方探测和监视系统的抵御能力具有重要意义。美国自上世纪 60 年代开展隐身卫星研究,至今已经发展到第三代。我国的隐身卫星研究尚处于空白。

天线是卫星的强散射源,在某些视角范围内对卫星 RCS 贡献高达 10dBsm 以上^[1],因此,降低天线的 RCS 是卫星隐身设计的重要研究课题。

带有频率选择表面(FSS, Frequency Selective Surface)的天线罩技术被广泛应用于航空领域,可有效降低机载雷达和弹载雷达的 RCS,是实现飞机和导弹隐身的重要手段。具有 FSS 的天线罩也被称为隐身天线罩。与雷达吸波材料不同,带有 FSS 的天线罩不吸收射频能量,仅起到频率滤波的作用。以具有带通型 FSS 的隐身天线罩的反射特性为例:在天线的工作频率范围内,天线罩呈现很好的透射性能,不影响天线的正常工作;而在通带外,天线罩呈现很好的反射特性,使得电磁波无法入射到内部天线,并利用天线罩的特殊外形将入射波反射到除鼻锥向之外的其它方向,有效降低飞机和导弹鼻锥向的 RCS^[2-4]。

国内在机载和弹载雷达的隐身天线罩方面已开展了大量研究^[5-8],其中一些已经实用化。本文进行我国卫星隐身技术研究的探索性研究,提出将带有 FSS 的隐身天线罩技术应用于微小卫星的隐身,这在国内隐身卫星研究尚属首例。主要思想是采用带有 FSS 的隐身天线罩包围卫星天线及其附属部件,通过天线罩的特殊外形控制卫星天线的电磁散射,实现星上天线的隐身,继而缩减卫星鼻锥方向的 RCS。

卫星天线与机载雷达相比,在性能和结构上有明显不同,因此卫星隐身天线罩设计不能简单按照已有机载雷达天线罩的设计思路进行设计,需要针对卫星天线的特点和卫星结构进行设计,具体体现在:(1)星地和星间通信要求卫星天线具有宽波束,一般为轴向 $\pm 70^\circ$,因此天线罩波束宽度应大于天线波束宽度;(2)星上天线数目较多,频率不同,频点集中在低频段,因此天线罩通带设计要求为低频宽带;(3)微小卫星由于功率的限制多使用无源天线,

天线增益较低,需要尽量减小天线罩对天线的插损;(4)卫星天线罩必须耐真空、冷黑、高低温交变、太阳辐照和粒子辐照等空间环境。

本文首先结合实际情况,设定微小卫星隐身天线罩的设计要求;然后根据给定的天线罩设计要求,对天线罩壁进行设计,确定与 FSS 设计相关的罩壁各层介质的介电常数、厚度等重要参数;进一步采用带通型 FSS 单元对附着在罩壁上的 FSS 屏进行设计;完成隐身天线罩实物制作后,在微波暗室对天线罩进行扫频测试和星上天线方向图测试,验证天线罩的阻带和通带性能。

1 隐身天线罩设计要求

1.1 卫星天线配置

假设在微小卫星顶部安装有 3 部天线,分别为通信接收天线、通信发射天线和 GPS 天线,并假设天线的工作频段、增益(鼻锥 $\pm 70^\circ$)和极化方式如表 1 所示。

表 1 微小卫星假定天线配置情况

Table 1 Supposed antenna configuration for a minisatellite

天线	工作频段	天线增益	极化方式
通信接收天线	2GHz	$\geq -9\text{dBi}$	左旋圆极化
通信发射天线	2.3GHz	$\geq -9\text{dBi}$	右旋圆极化
GPS 天线	1.5GHz	$\geq -4\text{dBi}$	左旋圆极化

1.2 天线罩设计要求

假设微小卫星的结构外形为六棱面型,如图 1 所示。因此,顶部天线罩需为六棱锥外形,如图 2 所示。

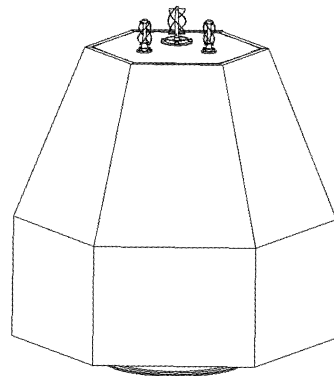


图 1 微小卫星外形结构示意图

Fig. 1 Shape of the minisatellite considered in this paper

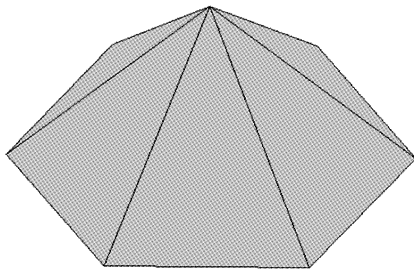


图2 天线罩外形示意图

Fig.2 Shape of the radome that will be installed on the top of the minisatellite given in Fig. 1

假设隐身天线罩的电性能设计要求为:通带为通信收、发天线和 GPS 天线的工作频段(如表 1 所示),且卫星鼻锥 $\pm 70^\circ$ 范围内的通带插损小于 3dB;阻带为 C 波段 5.2GHz - 5.7GHz,阻带插损大于 15dB。

1.3 设计难点

该隐身天线罩设计存在以下难点:(1) 阻带为 5.2GHz 至 5.7GHz,占据较宽频段;(2) 通带为 1.5GHz 至 2.3GHz,占据较宽频段,且频率较低;(3) 阻带频率为通带频率的倍频,需要同时考虑阻带和通带设计,减少相互影响;(4) 天线罩为六棱锥结构,FSS 屏不连续,各棱边对天线罩频响特性影响较大;(5) 天线工作范围为卫星鼻锥 $\pm 70^\circ$,范围大,需要尽量减小天线罩频响特性随方位角变化,保证谐振特性稳定;(6) 卫星天线为圆极化天线,需要尽量减小天线罩频响特性随极化方式变化,保证谐振特性稳定;(7) 需要考虑卫星星体反射对天线罩频响特性的影响;(8) 需要考虑天线罩金属安装支架可能引起的多径效应对天线罩频响特性的影响;(9) 耐真空、冷黑、高低温交变、太阳辐照和粒子辐照等空间环境。

2 天线罩壁设计

天线罩壁结构分为单层、A 型夹层、B 型夹层、C 型和多层结构等。其中,A 型夹层多用于尺寸较小的飞行器上的鼻锥天线罩或流线型天线罩,且具有较高的强度和重量比^[8],因此本文隐身天线罩壁设计选用 A 型夹层,FSS 结构将被加载于此夹层上。

A 型夹层一般由两个比较致密、电气上很薄的蒙皮和一个较厚的低密度芯子组成。本文隐身天线罩蒙皮复合材料选用双酚 A 型改性氰酸酯树脂基

体 B 型石英纤维增强复合材料。该复合材料采用预浸料热压罐加热、加压工艺成型,具有较低介电常数、损耗正切和吸水率,力学性能优良,且易成型,工艺性好^[9]。此外,该复合材料在 155℃ 高温下仍具有较高的结构强度,且在较宽含胶量范围内具有稳定的介电常数和损耗,有利于罩壁材料获得均匀介电性能,并在宽频范围内介电常数与损耗也相对稳定,有利于满足宽频带的性能要求。芯子选用蜂窝结构,材料为 Nomex 芳纶纸蜂窝。

出于电性能考虑,蒙皮通常对称附着于芯子之上。芯子的厚度应选择使两外蒙皮的反射基本上相互抵消,一般为 1/4 雷达波长,但同时也需考虑其它因素,如为保证阻带中心谐振频率处的频率响应特性,可适当减小芯子厚度^[9]。

用于粘贴 FSS 屏的基板选用由玻璃布和环氧板层压而成的薄板。环氧复合材料在许多空间环境试验和飞行试验中已获得成功应用,适合航天飞行器使用。

综上所述,罩壁各层采用介质的厚度、介电常数和损耗角正切值如表 2 所示。

表 2 罩壁各层介质参数

Table 2 Parameters of each layer medium of the radome wall

罩壁各层介质	厚度/mm	介电常数	损耗角正切
FSS 屏基板	0.1	4.5	≤ 0.02
复合材料蒙皮	0.5	3.2	≤ 0.014
胶膜	0.05	3.6	≤ 0.02
纸蜂窝夹芯层	8	1.1	≤ 0.005

3 FSS 屏设计

FSS 的设计实质上是搜索多变量函数在约束条件下的最优解问题。约束条件指对 FSS 的频率要求,如入射波极化状态、入射角范围、中心谐振频率、谐振宽度、带内损耗。多变量指影响 FSS 频率特性的因素,如单元形式、单元尺寸、单元的排列方式、介质的厚度和介电常数等。获得的最优解指满足给定频率要求的 FSS 单元形式、尺寸、排列方式、介质厚度和介电常数等,解不唯一^[9]。

对最优解的搜索过程是将各参数代入 FSS 分析程序,将得到的频率响应特性与设计要求的频率响应特性相比,通过不断修正各参数取值,反复迭代后,最终确定与设计要求的单元尺寸、间距和阵列排布方式。

单元尺寸是影响中心谐振频率的决定因素,而单元间距和阵列排列方式主要影响辐射带宽,因此,通常首先调整单元尺寸,使其满足中心谐振频率点的频率特性,然后通过调整单元间距和阵列排列方式,达到带内频率响应要求^[10-11]。

微小卫星的隐身特性要求天线罩所用 FSS 主要呈现带阻特性,因此选用贴片型 FSS 结构。单元形状选用复合双十字型,由耶路撒冷十字单元和四腿加载单元两种典型 FSS 单元结构组合而成,如图 3 所示。其中耶路撒冷十字单元是实现 FSS 带阻特性的典型单元,而四腿加载结构用于稳定入射波由于入射角变化和不同极化方式对 FSS 频率选择特性的影响,保持阵子谐振特性稳定。经过筛选,最终设计出的 FSS 结构如图 4 所示。

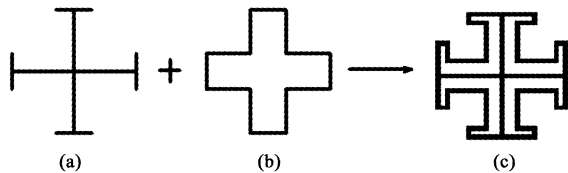


图 3 复合双十字型 FSS 单元组成

(a) 耶路撒冷十字;(b) 四腿加载结构;(c) 复合 FSS 单元

Fig. 3 Composition of the "composite double-cross" FSS cell

(a) Jerusalem cross; (b) Four-side loading structure;

(c) Composite FSS cell.

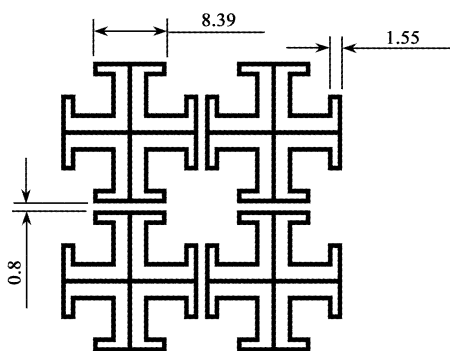


图 4 隐身天线罩采用的 FSS 阵子设计

Fig. 4 FSS cell design including the size of one FSS cell

and the space between two adjacent FSS cells

卫星隐身天线罩采用 A 型罩壁,设计出的 FSS 结构被加载于 A 型罩壁的外侧,即采用双屏 FSS 结构。双屏 FSS 目前被广泛应用于工程界,主要是因为双屏 FSS 的带宽比单屏 FSS 的带宽大,谐振带宽的边缘截止特性好,而且可消除单屏 FSS 产生的表

面波影响,提高传输或反射增益。

4 隐身天线罩电性能测试

4.1 天线罩扫频测试

通过天线罩的扫频测试,可以确定天线罩阻带的频率响应特性,频响特性由天线罩在不同频率下的插损来表现。

扫频试验使用双脊喇叭天线,天线口径 150mm×90mm,测试天线罩在 2~18GHz、水平极化、横滚角 0°和 30°、方位角 ±30°的插损值。测试数据由天线的功率电平值获得,并将天线的功率电平值换算为天线罩在特定方位角下,随频率变化的插损值。方位角为 0°时,双脊喇叭天线与天线罩的对称轴线重合,端面位于同一平面。天线罩置于转台中央,转台转动范围 -30°~+30°,转台每旋转 1°进行一次扫频测试。

图 5 为天线罩在 0°方位角,0°和 30°横滚角插损值的频响曲线。从图中可以看出,天线罩在 4.8GHz~6.0GHz 频率范围内,0°横滚角的插损在 20dB 以上,30°横滚角的插损在 25dB 以上,满足了天线罩阻带设计要求的在 5.2GHz~5.7GHz 频率范围插损大于 15dB。

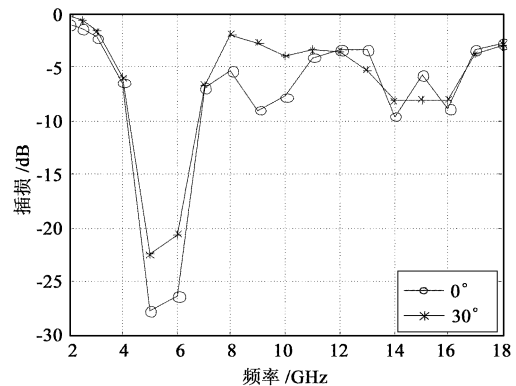


图 5 天线罩在 0°方位角、0°和 30°横滚角插损值随频率变化曲线

Fig. 5 Change of the radome loss with frequency for 0° aspect angle and 0°, 30° roll angles, respectively

4.2 天线增益方向图测试

测试天线罩对卫星顶部天线增益方向图的影响是卫星辐射特性测试的主要内容之一。为了测试天线的增益方向图,按照隐身卫星外形设计方案,制作了全尺寸辐射特性星,星体由金属板焊接而成。通

过测试三个顶部天线在安装天线罩和无天线罩两种状态下的增益方向图,对比验证天线罩的通带设计是否符合设计要求,即在通信收、发天线和 GPS 天线的作频段内天线带罩后插损不大于 3dB。

测试时采用螺旋天线作为发射源,测试通信发射天线、通信接收天线和 GPS 天线的增益方向图,方位角变化范围 $\pm 180^\circ$,横滚角采样间隔 30° 。

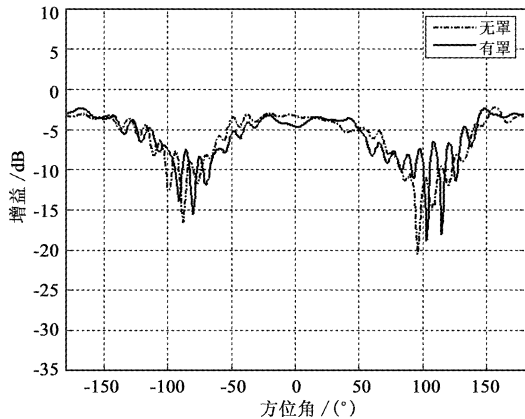


图 6 加罩和不加罩状态通信发射天线增益方向图
Fig. 6 Communication transmission antenna beampatterns with and without radome

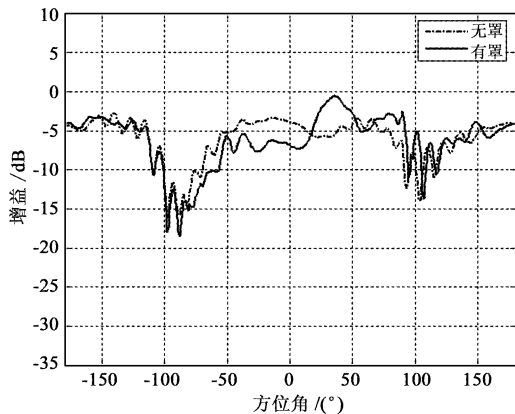


图 7 加罩和不加罩状态通信接收天线增益方向图
Fig. 7 Communication receiving antenna beampatterns with and without radome

图 6 至图 8 给出了 0° 横滚角时,三个天线有罩和无罩时的增益方向图变化,通过图中可以看出,天线罩满足设计要求的插损小于 3dB,但对通信接收天线(频率 2GHz)的影响较大。从图 7 可以看出,接收天线加罩后增益变化较明显,且增益方向图发生了明显的畸变,这是由于通信接收天线的频率更接近天线罩阻带设计中心频率的倍频。

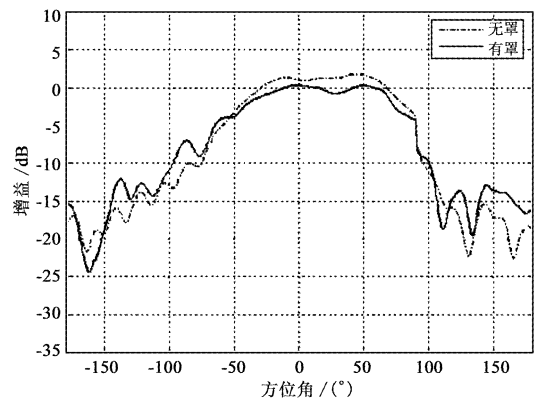


图 8 在加罩和不加罩状态下 GPS 天线增益方向图
Fig. 8 GPS antenna beampatterns with and without radome

5 结 论

本文进行了基于频率选择表面(FSS)的微小卫星隐身天线罩技术研究。根据设定的微小卫星隐身天线罩的设计要求,结合天线罩设计基本理论,给出了天线罩罩壁设计方案,并确定了带有 FSS 屏的隐身天线罩设计方案。对天线罩实物的扫频测试和天线增益方向图测试表明天线罩的阻带和通带特性满足设计要求,验证了本文提出的微小卫星隐身天线罩设计方案的有效性。

参 考 文 献

[1] Mitra R, Chan C H, Cwik T. Techniques for analyzing frequency selective surfaces a review[C]. Proceedings of the IEEE, 1988, 76 (12): 1593 - 1614.

[2] Chakravarty S, Mitra R. Design of a frequency selective surface (FSS) with very low cross-polarization discrimination via the parallel micro-genetic algorithm (PMGA) [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003, 51(7): 1664 - 1668.

[3] 张耀锋. 频率选择表面分析与优化设计[D]. 西安:西北工业大学硕士学位论文,2003, 3. [Zhang Yao-feng. Optimization design and analysis for FSS[D]. Xi'an: Master Dissertation of Northwestern Polytechnical University, 2003, 3.]

[4] 何显宗. 毫米波带通频率选择表面研究[D]. 长春:长春理工大学硕士学位论文,2008,4. [He Xian-zhong. Research on the millimeter wave band-pass frequency selective surface [D]. Master Dissertation of Changchun University of Science and Technology, 2008, 4.]

[5] 蒙志君,吕明云,武哲,等. 频率选择表面 A 夹层雷达罩的传输特性[J]. 光学精密工程, 2010, 18(5): 1175 - 1181. [Meng Zhi-jun, Lv Ming-yun, Wu Zhe, et al. Transmission properties of A-sandwich radome with frequency selective surface [J].

- Optics and Precision Engineering, 2010, 18(5): 1175 - 1181.]
- [6] 车海林, 何嘉航. 飞机雷达天线系统隐身技术研究 [J]. 飞机设计, 2009, 29 (6): 35 - 39. [Che Hai-lin, He Jia-hang. Research on stealth technology of aircraft radar antenna system [J]. Aircraft Design, 2009, 29(6): 35 - 39.]
- [7] 万顺生, 郭静, 王文涛. 飞行器雷达天线罩透波性能研究与测试 [J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41 (S): 57 - 61. [Wan Shun-sheng, Guo Jing, Wang Wen-tao. Research and testing on transmission performance of aircraft radome [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 41 (S): 57 - 61.]
- [8] 刘晓春. 机载雷达罩技术的发展 [J]. 航空科学技术, 1998, 3: 27 - 30. [Liu Xiao-chun. Technology development of airborne radome [J]. Aeronautical Science and Technology, 1998, 3: 27 - 30.]
- [9] Huang J, Wu T K, Lee S W. Tri-band frequency selective surfaces with circular ring elements [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994, 42(2): 166 - 175.
- [10] Vardaxoglou J C. Frequency selective surfaces: analysis and design [M]. New York: England Research Studies Press, 1997.
- [11] Jordi R, Yahya R S. Fractal FSS: A novel dual-band frequency selective surface [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, 48(7): 1097 - 1105.

作者简介: 刘斌 (1981 -), 男, 博士研究生, 主要从事微小卫星隐身技术研究。

通信地址: 江苏省南京市白下区御道街 29 号, 南京航空航天大学高新技术研究院 (210016)

E-mail: goshining@ sina. com. cn

(编辑: 沃云峰)