

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.04.019

引用格式:陈毅乔. 曲面双层带通频率选择表面天线罩设计[J]. 电讯技术, 2016, 56(4): 458-462. [CHEN Yiqiao. Design of a curved radome with double-layer band-pass frequency selective surface[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(4): 458-462.]

曲面双层带通频率选择表面天线罩设计*

陈毅乔**

(中国西南电子技术研究所, 成都 610036)

摘 要:针对复杂曲面外形严重影响频率选择表面(FSS)天线罩传输特性的问题,提出了一种基于表面寻迹技术的曲面 FSS 天线罩设计方法。首先通过平面网格剖分对曲面进行拟合及表征,然后采用表面寻迹算法对 FSS 阵列的排布位置进行计算,最后将平面 FSS 结构投影于曲面外形,从而提高了曲面 FSS 阵列的排布及建模精度。采用该方法完成了某 K 频段 A 夹层曲面 FSS 天线罩的设计及测试,结果表明该曲面 FSS 罩的传输特性与平面 FSS 基本一致,且对天线辐射方向图影响较小,有效消除了复杂曲面外形对天线罩传输特性的影响。

关键词:曲面天线罩;频率选择表面;表面寻迹技术;A 夹层;K 频段

中图分类号:TN820.81 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2016)04-0458-05

Design of a Curved Radome with Double-layer Band-pass Frequency Selective Surface

CHEN Yiqiao

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract:For the problem that the complex curved profile seriously affects the transmission properties of frequency selective surface(FSS) radome, a design method based on path tracing technique is proposed. First, the method uses plane mesh to fit and characterize the curved surface. Then, it uses the path tracing algorithm to calculate the arrangement of FSS. Finally, the plane FSS structure is projected on the curved surface. So the arrangement and modeling of curved FSS are more accurate. The design method is applied to design a K band A-sandwich curved FSS radome, and the fabricated radome is tested and verified. The results indicate that the transmission properties of the curved FSS radome agree well with those of the plane structure, and the antenna radiation pattern is less affected, so the effect of the complex curved profile is eliminated effectively.

Key words:curved radome; frequency selective surface; path tracing technique; A-sandwich; K band

1 引 言

频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)是指由周期性排布的金属贴片或孔径单元组成的二维周期性结构。基于周期性的谐振结构, FSS 对不同频率的入射波可呈现为透射或反射的电磁特性,实现空间滤波的作用。

带通 FSS 应用于天线罩,可在保证天线工作带内辐射特性的条件下,反射带外入射波,从而有效降低天线的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS),对隐身飞行器的设计具有重要意义^[1]。双层 FSS 结构与单层相比,能实现更好的入射角和极化稳定性,且可获得带内平顶、带外快速下降的频率响应曲

* 收稿日期:2015-09-28;修回日期:2015-12-31 Received date:2015-09-28;Revised date:2015-12-31

** 通信作者:seedcyq@163.com Corresponding author:seedcyq@163.com

• 458 •

线^[2],更加适合于带通 FSS 天线罩的应用。

天线罩为满足飞行器的气动、隐身性能要求,往往具有复杂的流线曲面外形,从而对 FSS 天线罩的设计带来巨大困难。目前通过母线分段设计的方式可以对规则的旋转体表面(如圆锥面、球面等)进行 FSS 排布设计,但不适用于非旋转体表面^[3-4]。通过表面分片、平面展开等方式可对双曲率表面进行 FSS 排布处理^[5-6],但存在不连续的接缝,且表面越复杂,不连续接缝越多,对天线罩的传输特性影响越大。

本文提出了一种基于表面寻迹的曲面 FSS 天线罩设计方法,并实现了复杂曲面双层 FSS 天线罩的设计;通过天线罩的加工及测试,验证了该方法的有效性和可行性。

2 设计原理及方法

对于复杂曲面 FSS 天线罩,目前仅可采用表面分区、平面展开的设计方法。因此,罩体表面须划分为多个局部可展开平面区域进行处理,并形成大量不连续接缝,从而影响 FSS 的排布精度及天线罩的传输特性。

2.1 设计原理

针对上述问题,本文提出在相邻平面分区之间建立数学联系,并让不同分区内的相邻 FSS 单元也满足周期排布要求,从而消除各分区之间的不连续接缝。

本文采用了网格剖分的方式对复杂曲面进行区域划分,并通过网格结点、共公边等信息建立了网格数据结构,从而使各区域间建立了完整几何关系。

FSS 的排布设计可分解为根据初始 FSS 单元位置、排布间距、排布形式,对相邻单元的位置进行递归计算的过程。平面 FSS 的间距连线映射到曲面上应为两点间的最短路径,即满足费马原理。因此,曲面 FSS 单元的相对位置可采用表面寻迹技术计算确定。

2.2 表面寻迹方法

表面寻迹技术可根据费马原理、曲表面参数,对某方向入射的光线在表面的传播路径进行计算,主要的算法有差分方法、龙格-库塔方法等^[7]。因此,基于剖分参数曲面、相邻 FSS 单元的方向及距离信息,采用表面寻迹技术,即可计算得到该相邻单元的位置及表面法向信息。

本文采用平面网格剖分方式,可在保证与天线罩外形拟合的条件下,简化表面的参数方程,大大降低寻迹的计算量。

简化处理后,寻迹路径仅需满足:单个网格内的路径须为直线;相邻网格展开成一个平面时,其上的同一路径合起来为直线。

2.3 设计步骤

综上所述,基于表面寻迹技术的曲面 FSS 设计方法,可有效解决不连续接缝的问题,并具有以下设计步骤:

- (1)对 FSS 布排的曲面进行平面网格剖分,并使剖分误差满足平面近似的精度要求;
- (2)对剖分网格进行数据分析,建立公共边等数据结构,对曲面外形结构进行表征;
- (3)确定初始排布单元的位置,并运用网格数据结构信息,对各单元的位置和表面法向进行几何寻迹计算;
- (4)根据计算信息,对 FSS 阵列图案的各单元进行平面图案建模;
- (5)设定单元间距范围要求,对不满足间距要求的单元(重叠单元)进行剔除;
- (6)将局部 FSS 阵列图案在曲面表面进行投影,得到曲面 FSS 布排图案。

对于上述步骤 1,即网格剖分的部分,可运用具有网格剖分功能的软件完成,如 FEKO、Ansys;步骤 2~5 可采用 Matlab、C 等程序进行编程,实现对单元布阵信息的自动及快速求解;步骤 6,即图案投影,可运用具有图形 CAD 功能的软件进行实现。

3 曲面 FSS 天线罩设计

采用该方法对某 K 频段复杂曲面双层带通 FSS 天线罩进行设计,通带的中心频率为 f_0 ,即中心频率的自由空间波长为 λ_0 。

3.1 罩壁结构设计

天线罩的结构可分为单层、A 夹层、B 夹层、C 夹层和多层结构等。其中,A 型夹层由两个致密、电气上很薄的蒙皮和一个较厚的低密度芯子组成,具有高的强度和重量比,适用于尺寸较小的飞行器上的鼻锥天线罩或流线型天线罩。同时,A 夹层结构的两个致密蒙皮适合于 FSS 屏的加载,且夹嵌于蒙皮内部可获得更稳定的传输带宽。

FSS 天线罩蒙皮材料选用了环氧酯树脂基体和石英纤维布混合的复合材料,该复合材料具有较低介电常数和损耗正切、结构强度高、工艺性好等优点,其 K 频段的介电常数为 3.36,损耗正切为 0.01。天线罩芯子选用轻质高强度的聚甲基丙烯酸酯泡沫,K 频段的介电常数为 1.1,损耗正切为 0.005,如

图 1 所示。

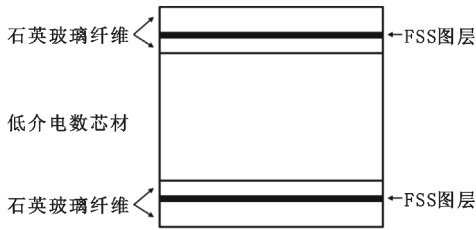


图 1 FSS 天线罩壁结构
Fig. 1 FSS radome wall structure

3.2 FSS 结构设计

该 K 频段双层带通 FSS 结构的设计,采用了对称双屏 butterworth 型 FSS 天线罩设计方法^[8],以保证 FSS 天线罩传输的互易性。为实现频率响应良好的极化一致性,选择了轴旋转对称的六边形环缝单元结构;为减小 FSS 排布周期,实现 FSS 天线罩良好的角度稳定性,采用了三角排布形式。

对天线罩及 FSS 结构进行优化设计,以保证大角度入射条件下传输曲线的平顶特性。设计后,天线罩芯板厚度为 $0.217\lambda_0$,蒙皮厚度为 $0.042\lambda_0$,两层 FSS 图案结构分别置于天线蒙皮结构内部,其距离天线罩外表面的距离为 $0.028\lambda_0$ 。该正六边形环缝的内径为 $0.175\lambda_0$,外径为 $0.301\lambda_0$,正六边形单元的外径为 $0.336\lambda_0$,如图 2 所示。

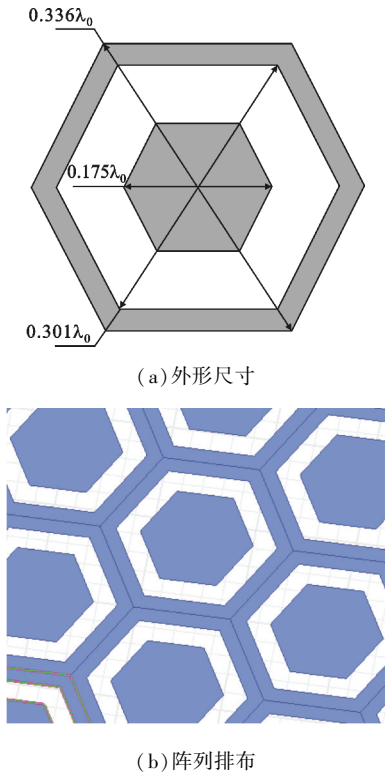
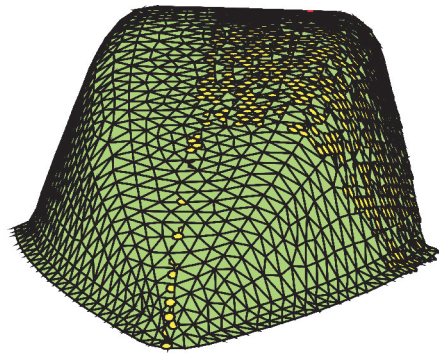


图 2 FSS 尺寸及阵列排布
Fig. 2 Dimension and arrangement of FSS

3.3 FSS 曲面排布设计

该曲面天线罩具有复杂三维曲面外形,且为不可展开曲面。采用基于表面寻迹技术的曲面 FSS 排布设计方法,对该曲面罩表面进行了网格剖分,并根据 FSS 排布周期进行寻迹计算,如图 3 (a) 所示。根据寻迹计算信息,对 FSS 阵列进行了平面建模及剔除。在此采用了 FSS 单元的互补图案(六边形环)进行建模,可简化建模过程,并得到相同投影图案,如图 3 (b) 所示。可以看出,该曲面天线罩 FSS 阵列排布均匀,且完全消除了不连续接缝的影响。



(a) 表面剖分及寻迹

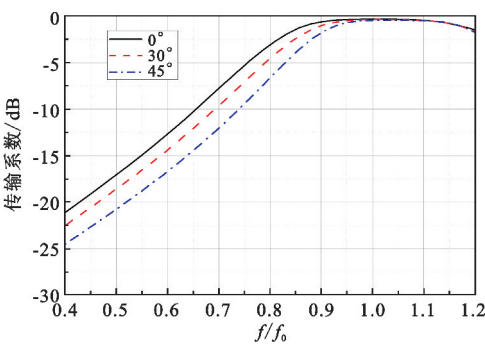


(b) FSS 建模及剔除

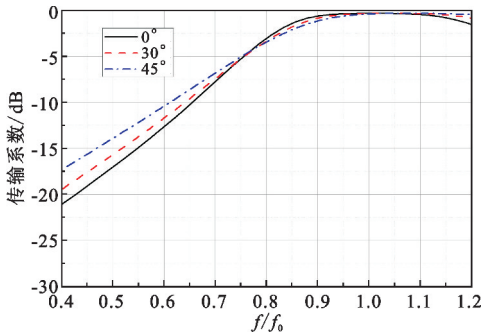
图 3 曲面天线罩 FSS 排布
Fig. 3 FSS arrangement on the curved radome

3.4 数值计算及分析

采用基于 Floquet 模式的有限元全波分析方法,对平面 FSS 周期结构进行数值计算,其传输特性随频率变化曲线如图 4 所示。从计算结果可看出;其传输特性随入射角变化的影响较小;且在 $0.95f_0 \sim 1.05f_0$ 的频段内(K 频段)传输损耗小于 0.8 dB,频率 $0.5f_0$ (X 频段)的传输系数小于 -13.9 dB,达到了良好的 K 频段带通的频率选择特性。



(a) TE 波



(b) TM 波

图 4 平面 FSS 结构传输系数仿真结果
Fig.4 Simulated transmission coefficient of the plane FSS structure

4 天线罩测试及验证

根据上述曲面 FSS 天线罩的设计,采用了曲面金属图案刻蚀技术实现了 FSS 图案在内蒙皮的成形;在内蒙皮刻蚀 FSS 图案后,继续敷制完成其内蒙皮,并采用一体化加工工艺完成了及 300 mm × 300 mm 的平面 FSS 样件及该曲面 FSS 天线罩的制作,如图 5 所示。

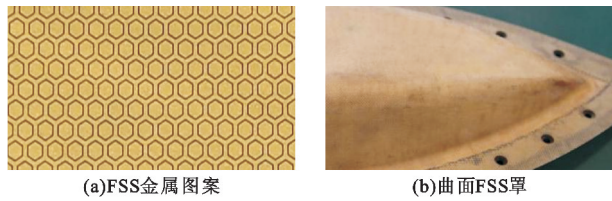


图 5 曲面 FSS 罩样件实物图

Fig.5 Photo of the manufactured curved FSS radome

4.1 传输特性测试

FSS 天线罩传输特性在微波暗室内进行了测试,其测试原理框图见图 6。应用矢量网络分析仪,分频段对天线罩进行了传输系数的宽带测试。通过采用时域门技术,对测试环境的多径影响、测试目标的边缘绕射等进行了消除,进一步提高了测试精度。

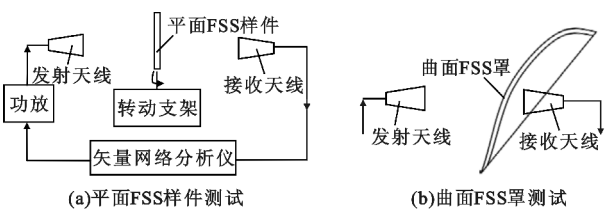
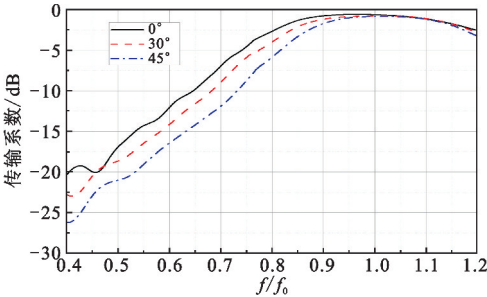


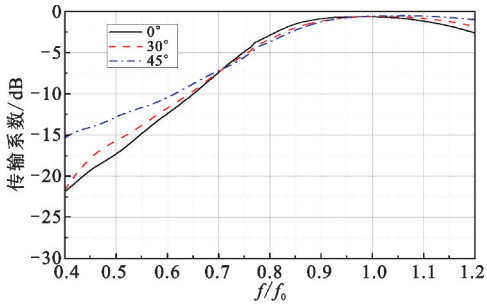
图 6 FSS 罩传输系数测试系统

Fig.6 Transmission coefficient test system of FSS radome

采用上述测试方法,对平面 FSS 样件不同入射角度、不同极化的传输特性进行了测试,其结果如图 7 所示。



(a) TE 波



(b) TM 波

图 7 平面 FSS 结构传输系数测试结果
Fig.7 Measured transmission coefficient of the plane FSS structure

从图 7 的测试结果可看出:平面 FSS 样件具有良好的频率选择特性,在频率 $0.5f_0$ 的传输系数小于 -12.9 dB;在 $0.95f_0 \sim 1.05f_0$ 的通带内,其传输损耗小于 1 dB,其测试结果与仿真结果吻合。

采用上述测试方法及图 6 的天线罩放置情况,对该曲面 FSS 天线罩不同极化的传输特性进行了测试,结果如图 8 所示。

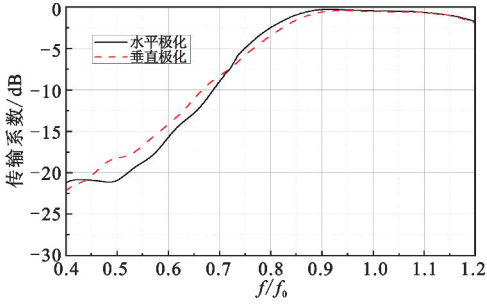


图 8 FSS 天线罩传输系数测试结果

Fig.8 Measured transmission coefficient of the curved FSS radome

从图 8 的测试结果可看出:该曲面 FSS 罩在频率 $0.5f_0$ 的传输系数小于 -17 dB ;在 $0.95f_0 \sim 1.05f_0$ 的通带内,其传输损耗小于 0.7 dB 。测试结果与平面 FSS 罩(入射角 0° 情况)的传输特性基本一致,这与该天线罩的放置情况相关。

4.2 电性能影响测试

该曲面 FSS 天线罩已在某 K 频段天线中进行了应用。在透波频点 f_0 ,对比测试了天线加罩前、后的增益方向图,天线和天线罩的相对位置关系与图 6 中的接收天线和天线罩一致,其测试结果如图 9 所示。

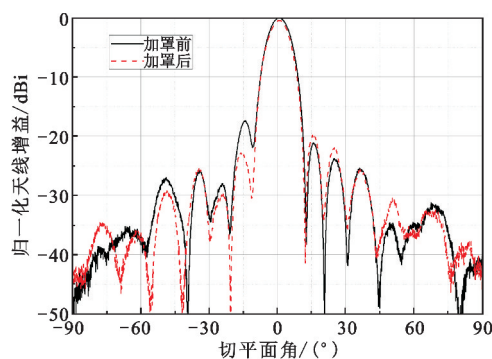


图 9 加罩前、后天线增益图测试结果

Fig. 9 Comparison of the measured gain pattern with and without the radome

从图 9 的测试结果可看出:加罩前、后天线增益仅下降了约 0.5 dB ,波束变窄了约 4% ,天线副瓣约有 2 dB 的改善;该曲面 FSS 天线罩在通带频段对天线辐射方向图的影响较小。

5 结束语

本文提出了一种基于表面寻迹技术的曲面 FSS 天线罩设计方法,与现有的分片设计法相比,有效消除了分片间的不连续接缝,提高了曲面 FSS 阵列排布精度。采用该方法完成了某 K 频段曲面 FSS 天线罩的设计及测试,结果表明该天线罩的传输特性与平面 FSS 结构相吻合,且对天线辐射方向图影响较小,有效消除了复杂曲面外形对天线罩传输特性的影响,为复杂曲面 FSS 罩设计提供了有效的技术途径。下一步将开展在曲三角网格剖分的条件下该方法的计算效率及适应性研究。

参考文献:

[1] 鲁戈舞,张剑,杨洁颖,等.频率选择表面天线罩研究现状与发展趋势[J].物理学报,2013,62(19):100-110.
LU Gewu, ZHENG Jian, YANG Jieying, et al. Status and

development of frequency selective surface radome[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(19):100-110. (in Chinese)

- [2] 武哲,武振波.双层 FSS 结构电性能研究[J].电子学报,2005,33(3):517-520.
WU Zhe, WU Zhenbo. Research on electrical performance of dual layer FSS configuration[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(3):517-520. (in Chinese)
- [3] 赵芳芳,曹群生,胡明春.有限大曲面频率选择表面的建模[J].计算机与数字工程,2011,39(4):5-7.
ZHAO Fangfang, CAO Qunsheng, HU Mingchun. Modeling of frequency selective surface for finite curved surface [J]. Computer&Digital Engineering, 2011, 39(4):5-7. (in Chinese)
- [4] SIPUS Z, BOSILJEVAC M. Improving the convergence of double series summation encountered in the analysis of curved frequency selective surfaces [C]//Proceedings of the 6th European Conference on Antennas and Propagation. Rome, Italy: IEEE, 2011:2716-2719.
- [5] 侯新宇,张澎,卢俊,等.一种双曲率雷达罩的频率选择表面分片设计[J].弹箭与制导学报,2006,26(1):123-125.
HOU Xinyu, ZHANG Peng, LU Jun, et al. A novel frequency selective surface patch design for double curved radome[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, 26(1):123-125. (in Chinese)
- [6] 吕明云,祝明,王焕青,等.复杂曲面 FSS 加工系统研究[J].航空学报,2005,26(4):254-257.
LYU Mingyun, ZHU Ming, WANG Huangqing, et al. Digital machining system of complex curved surface FSS[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica, 2005, 26(4):254-257. (in Chinese)
- [7] CHEN X. Geodesic computation on NURBS surfaces for UTD analysis[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter, 2013(12):194-197.
- [8] 徐念喜,冯晓国,梁凤超,等.对称双屏 butterworth 型频率选择表面的设计[J].光学精密工程,2011,19(7):1486-1494.
XU Nianxi, FENG Xiaoguo, LIANG Fengchao, et al. Design of symmetric dual butterworth type of frequency selective surface [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(7):1486-1494. (in Chinese)

作者简介:



陈毅乔(1983—),男,四川成都人,2008 年于电子科技大学获工学硕士学位,现为工程师,主要研究方向为低可探测天线和隐身天线罩。

CHEN yiqiao was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1983. He received the M. S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2008. He is now an engineer. His research concerns low detectable antennas and stealth radomes.

Email: sccdcyq@163.com