

文章编号 1004-924X(2018)06-1362-08

## 一体化曲面共形频率选择表面雷达罩

王向峰\*, 高炳攀, 任志英, 林炎章, 陈 盈  
(福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 频率选择表面雷达罩能有效提高飞行武器的隐身性能, 而复杂不可展开曲面上频率选择表面的加工存在技术难题。本文利用 CST 仿真软件, 分析了基于 Y-型单元结构的二维无限大频率选择表面的电磁传输特性, 同时构建三维雷达罩内置相控阵天线模型, 分析了不同扫描角度下曲面雷达罩的透射率和瞄准误差, 从理论上论证了方案的可行性。在此基础上, 提出了一种基于多自由度激光机器人与旋转台联动的一体化曲面厚屏频率选择表面雷达罩加工方案。微波暗室测试结果表明, 制备的共形曲面 FSS 雷达罩带内透射率达到 80% 左右, 带外透射率低于 10%, 展示了良好的电磁滤波特性。这种工艺能够满足各种大型共形曲面 FSS 雷达罩的一体化加工需求。

**关键词:** 频率选择表面; 雷达罩; 激光机器人; 共形曲面

**中图分类号:** TN713 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182606.1362

## Integrated curved-surface conformal frequency selective surface radome

WANG Xiang-feng\*, GAO Bing-pan, REN Zhi-ying, LIN Yan-zhang, CHEN Ying

(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

\* Corresponding author, E-mail: xfwang@fzu.edu.cn

**Abstract:** Frequency Selective Surface(FSS) radomes can effectively improve the stealth performance of flying weapons. However, it is difficult to fabricate frequency selectivity on complex non-expandable surfaces. In this paper, CST simulation software was used to analyze the electromagnetic transmission characteristics of a two-dimensional infinitely large frequency selective surface, which is based on an array of Y-shaped unit structures. A 3-dimensional radome model with a built-in phased array antenna was employed to simultaneously analyze the transmittances and aiming errors at different scanning angles, to theoretically demonstrate the feasibility of the approach. Then, based on the linkage control of a multi-degree-of-freedom laser robot and a rotary table, an integrated approach was proposed to fabricate a thick-screen frequency selective surface radome. The results from tests conducted in a microwave anechoic chamber show that the prepared conformal FSS radome has a transmittance of about 80% and an out-of-band transmittance of less than 10%, demonstrating good electromagnetic filtering characteristics. This method can be used to fabricate a variety of large conformal FSS radomes.

**Key words:** Frequency Selective Surface (FSS); radome; laser robot; conformal surface

收稿日期: 2018-01-10; 修订日期: 2018-02-10.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(No. 2015J01246); 福建省闽江学者启动项目(No. 0020-510271)

## 1 引言

雷达罩是天线系统的防护装置,用于隔离外界环境的干扰<sup>[1]</sup>。雷达罩应具备良好的电磁传输性能,对自身信号的传输损耗较小,但是传统的雷达罩并不具备电磁波频选滤波功能。频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)是指介质上周期性排布的金属单元阵列单元结构,或金属表面周期性孔隙单元结构,这些单元形成“电振子结构”,对空间中的电磁波进行调控实现带通或带阻特性<sup>[2]</sup>。FSS可以应用在副反射器<sup>[3]</sup>、极化器<sup>[4]</sup>、偏振器<sup>[5]</sup>、滤波器<sup>[6]</sup>等场合,通过与光学或电子器件相结合来调控FSS的滤波特性是目前一个重要的研究方向<sup>[7-8]</sup>,其应用前景广阔。另一个重要的应用场合就是在飞行武器上,FSS与传统雷达罩复合形成FSS雷达罩,能够有效减小飞行器的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)<sup>[9]</sup>。FSS雷达罩使雷达工作频段内的电磁波正常传输,而在工作频带外的电磁波则根据外形反射,从而有效降低前向RCS,大幅度提高雷达系统的隐身性能。隐身雷达罩具有极大的军事应用前景<sup>[10-12]</sup>。

随着FSS理论的发展和仿真软件的应用,新型雷达罩不断涌现<sup>[13-15]</sup>。文献<sup>[16]</sup>和<sup>[17]</sup>公布了一种基于掩膜光刻技术的曲面FSS制备方法,然而,采用光刻工序流程繁琐、成本高昂,在不可展曲面上的应用受到限制。文献<sup>[18]</sup>、<sup>[19]</sup>和<sup>[20]</sup>采用对曲面进行分区,接着分别采用不同的方法制备柔性平面FSS,然后转移到曲面上进行拼接的方法。但这种方法存在转移误差较大、不同屏之间导电连续性受到破坏等问题。随着技术的发展,新的加工技术也开始被应用到曲面FSS结构的制备上,长春光机所的科研团队提出了采用3D打印技术制备曲面FSS衬底,并结合镀膜技术实现表面金属化<sup>[21]</sup>。同时,依赖于复杂机械装置和控制系统的3D直写技术<sup>[22]</sup>也被应用到曲面FSS的制作上。另外,温州大学<sup>[23]</sup>和大连理工大学<sup>[24]</sup>相继采用激光振镜扫描在曲面上刻蚀FSS。上述方法制备曲面FSS通常都要求在一定的基底上成型,其结构往往包括多层介质和FSS层,需要多种不同工艺配合实现,制造工序繁琐,且超音速飞行武器要求雷达罩具有良好的刚性和耐热性,

多层复合结构的设计容易产生鼓包和材料热膨胀不均匀导致的变形。目前,FSS雷达罩还未在国内实现工程化应用,与国外仍有较大差距。

本文利用CST仿真分析软件设计了一种Y型曲面带通FSS。根据准周期排布的原则构建了FSS雷达罩三维模型,采用曲面FSS内置相控阵天线的仿真分析模型研究了曲面FSS对相控阵天线辐射性能的影响。为获取曲面共形FSS雷达罩,采用一种新型的一体化大型曲面FSS雷达罩制作方法。利用纯铜板旋压加工制成具有良好刚性和耐热性的金属罩体,罩体平均厚度在0.7 mm左右,然后利用六自由度激光机器人和旋转台联动的柔性化加工系统实现曲面上单元结构的一体化加工,制备了与三维模型高度一致的FSS雷达罩样品。微波暗室测试结果表明,该厚屏带通FSS雷达罩具有良好的电磁性能。

## 2 FSS雷达罩设计和理论仿真

### 2.1 平面FSS设计和仿真分析

考虑到工艺可行性及Y型单元对入射波具有更好的角度稳定性和极化稳定性,圆锥形曲面选用Y型单元结构,如图1所示。假设FSS为二维平面的无限大周期性阵列,截取其中一个单元,引入周期性边界条件。对中心频率 $f=17$  GHz的FSS,以单元结构参数为变量,经过仿真优化,最终选取的结构参数为:臂宽 $w=2$  mm,臂长 $l=4.04$  mm,周期 $p=10$  mm,厚度 $d=1$  mm。

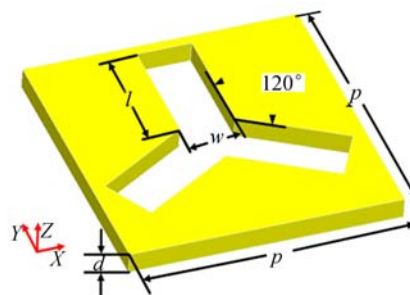


图1 Y型单元及其结构参数

Fig. 1 Y-shape unit and its critical parameters

该结构对应的传输曲线如图2(a)所示,图中S11和S21分别表示反射系数和传输系数。该结构具有较宽的通带,中心频率为17 GHz,带宽达到2 GHz以上,同时,在X波段具有良好的屏蔽

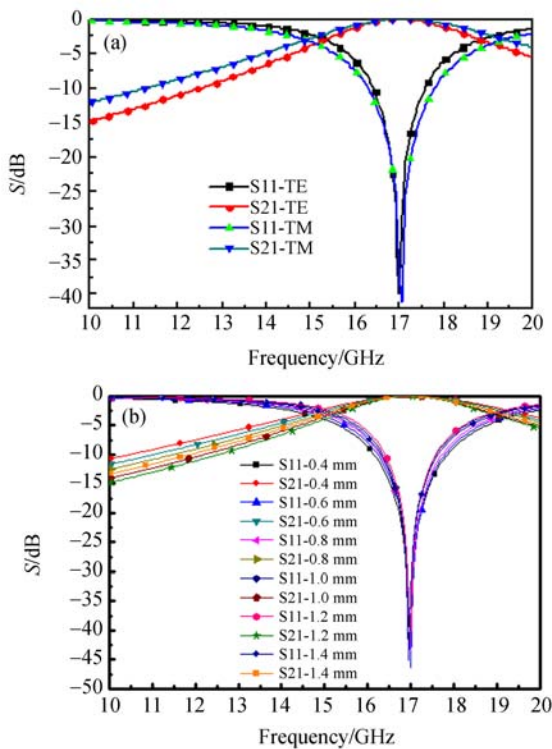


图 2 (a) Y 型 FSS 传输 (S21) 和反射 (S11) 曲线; (b) 金属层厚度变化对 Y 型 FSS 传输 (S21) 和反射 (S11) 曲线的影响

Fig. 2 (a) Y-shape FSS transmission (S21) and reflection (S11) curves; (b) Effect of metal layer thickness variation on Y-shaped FSS transmission (S21) and reflection (S11) curves

效果。为了进一步说明厚屏 FSS 设计方案的可行性,对厚度  $d$  进行了参数化扫描分析 (0.4 ~ 1.4 mm),不同厚度情况下的传输和反射系数曲线如图 2(b)所示。随着厚度的增加,传输通带的带宽减小,中心频率的位置产生微小的偏移,但是总体的传输/反射性能基本保持不变。

同时,对该 Y 型平面厚屏 FSS 的角度稳定性进行了扫描分析,其结果如图 3 所示。在入射角度  $0 \sim 40^\circ$  内,随着入射角度的增加,中心频率发生偏移,透射率降低。入射角度为  $40^\circ$  时插入损耗为 1.07 dB,对应的透射率为 78.16%。

在系统最大加工误差  $\pm 0.1$  mm 的范围内,对 Y 型单元结构参数变化对透射率的影响进行仿真分析。图 4(a)和 4(b)分别为臂宽  $w$  和臂长  $l$  在减小和增大 0.1 mm 时 FSS 传输曲线的变化,相关数据如表 1 所示。可以看到,  $w$  和  $l$  在

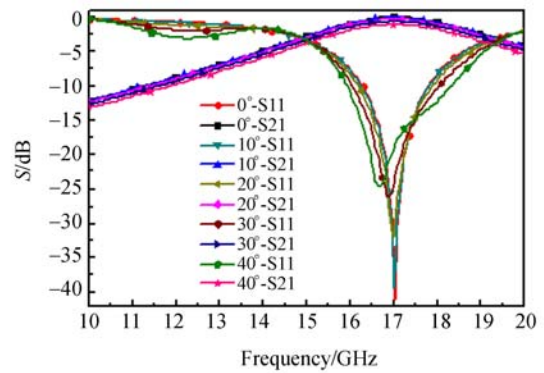


图 3 不同入射角度下, Y 型 FSS 的传输 (S21) 和反射 (S11) 曲线

Fig. 3 Transmission (S21) and reflection (S11) curves of Y-shape FSS at different incident angles

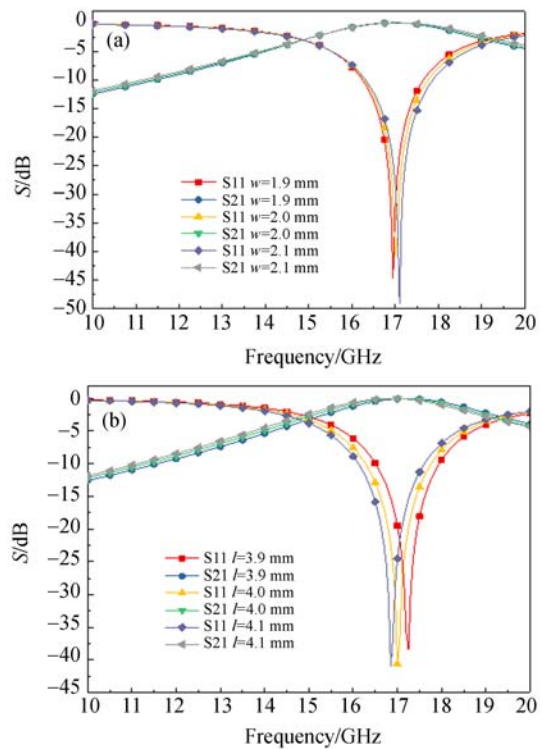


图 4 单元结构参数 (a) 臂宽  $w$ , (b) 臂长  $l$  对 Y 型 FSS 的传输性能的影响

Fig. 4 Effects of element structural parameters (a) arm width  $w$  and (b) arm length  $l$  on transmission performance of Y-shape FSS

$\pm 0.1$  mm 的范围内改变时,中心频率发生轻微偏移,17 GHz 的透射率稍有降低,但对总体滤波性能的影响很小。

表 1 FSS 单元结构参数对传输性能的影响

Tab. 1 Effects of element structural parameters on transmission performance

传输性能	$w/mm$			$l/mm$		
	1.9	2.0	2.1	3.9	4.0	4.1
中心频率 /GHz	16.95	17	17.1	17.25	17	16.85
17 GHz 透射率/%	99.95	100	99.94	98.97	100	99.75

2.2 曲面 FSS 的设计和仿真

前述内容关于 FSS 的设计和分析都是将 FSS 假设为二维无限大平面阵列。下面对有限的曲面 FSS 进行相应分析。为了研究曲面 FSS 结构的电磁性能,本文采用了基于曲面 FSS 内置相控阵天线的模型,分析曲面 FSS 结构加载下对天线辐射性能的影响,其仿真模型如图 5(a)所示。曲面 FSS 结构材料为铜,厚度 1 mm,单元结构参数采用图 1 中的设计。通过绕轴线和沿曲面等间隔排布形成曲面 FSS 结构,同一圈阵列中的单元间距  $p_1$  根据所在圆周的周长近似调整为仿

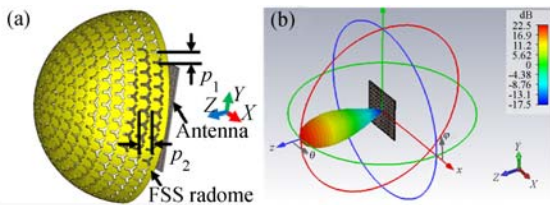
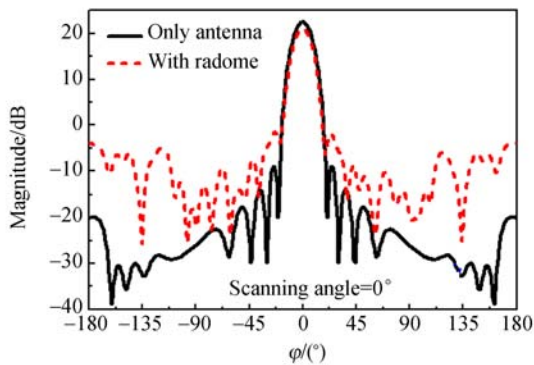
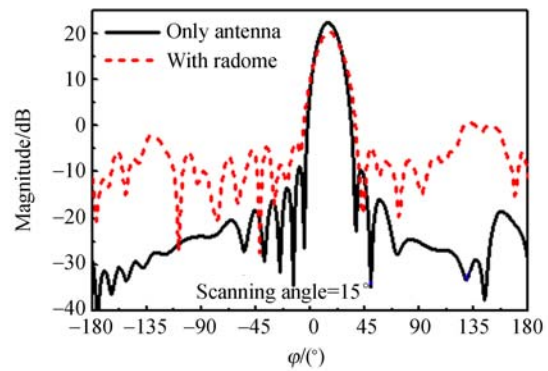


图 5 (a) 天线 + FSS 雷达罩仿真分析模型; (b) 天线辐射远场方向图

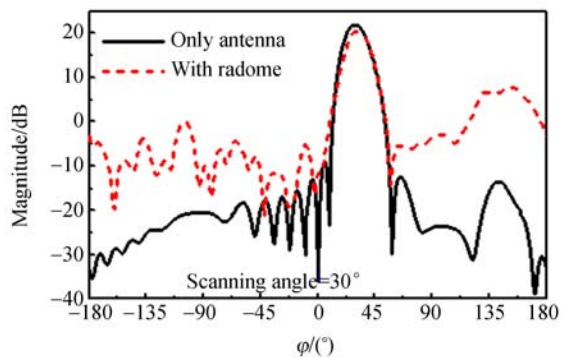
Fig. 5 (a) Simulation model of FSS radome and a phased array antenna; (b) Far field pattern of phased array antenna



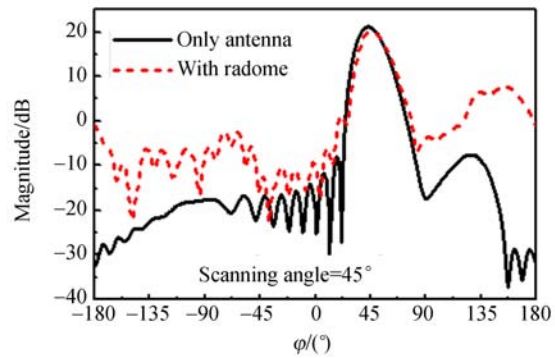
(a) 0°



(b) 15°



(c) 30°



(d) 45°

图 6 不同天线扫描角度下加载和未加载 FSS 雷达罩的天线辐射远场数据对比

Fig. 6 Comparison of far-field radiations of antenna with and without a FSS radome at different scanning angles

真分析时的周期,沿曲面的单元间距  $p_2$  保持为平面 FSS 仿真时的周期,因此,  $p_1 \approx 10$  mm,  $p_2 = 10$  mm。相控阵天线辐射主频率为 17 GHz,由同轴馈电的微带贴片天线单元组成,低副瓣 Taylor 加权使得相控阵天线具有更低的副瓣,天线的辐射远场方向图如图 5(b)所示。

基于如图 5 所示的模型,使相控阵天线沿着不同角度进行扫描,图 6(a)、6(b)、6(c)、6(d)分别为天线扫描角度为  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$  时天线在加载(虚线)和未加载 FSS(实线)的 XZ 面的辐射方向数据对比。由图可知,随着扫描角度的增加,主瓣宽度基本不变,而引入 FSS 天线罩之后副瓣增强,当扫描角度大于  $15^\circ$  时,主瓣指向偏移,瞄准误差显现。具体的透射率和瞄准误差如表 2 所示。

表 2 FSS 雷达罩透射率及瞄准误差

Tab. 2 Transmissivities and boresight errors of FSS radome

扫描角度 / $^\circ$	天线辐射 /dB	天线+FSS /dB	瞄准误差 / $'$	透射率 /%
0	22.47	21.07	0	72.4
15	22.32	20.39	36.96	64.1
30	21.89	20.45	42.79	71.8
45	21.45	20.08	2.08	72.9

### 3 共形 FSS 雷达罩的制备及测试

#### 3.1 共形曲面 FSS 雷达罩制备

雷达罩金属罩体的制作采用旋压成型工艺,材料为 T4 牌号的紫铜,厚度为 1.5 mm,加工完成的罩体底部直径为 340 mm,高度为 201.8 mm,罩体平均厚度为 0.7 mm,具有良好的刚性和耐热性。铜的密度为  $8.9 \text{ g/cm}^3$ ,经三维建模软件计算完成单元刻画之后的 FSS 雷达罩重量约为 1.18 kg,对飞行器的总体负载影响较小,若能进一步改进罩体制备工艺则可以获得厚度更薄、质量更轻的罩体。

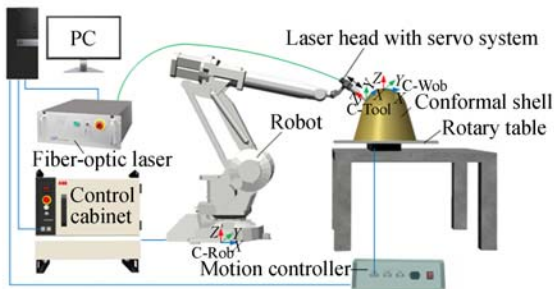


图 7 激光机器人加工系统示意图

Fig. 7 Schematic diagram of laser robot processing system

激光机器人加工系统示意图如图 7 所示,机器人本体为 ABB IRB1410 六自由度机器人,机器人系统的重复定位精度为 0.05 mm;旋转台采用联英精机 ZX120-200 高精度型电动旋转台,蜗轮蜗杆驱动,传动比为 180 : 1,重复定位精度为  $0.002^\circ$ ;加工系统采用 Nd : YAG 光纤激光器作为激光光源(1 064 nm, 500 W),由控制主机编写控制程序实现对机器人、旋转台的联动控制。上位机程序用 LabVIEW 编写,基于 RS232 串口通讯协议与机器人系统通讯,旋转台由运动控制卡和运动控制器控制。加工路径的规划在 ABB Robotstudio 仿真环境中进行。为了使仿真环境与实际场景具有一致性,需要建立工具坐标系和工件坐标系。工具坐标系 C-Tool 以激光头辐射激光的焦点位置作为坐标系原点,坐标系方向满足右手定则。工件坐标系 C-Wob 则用于工件的定位,以工作台面、夹具、工件作为参考对象建立,本文的工件坐标系建立于罩体顶部位置。接着导入如图 8(a)所示的 FSS 雷达罩三维模型,同一高度的一圈单元是一致的,每一圈单元仅需选取其中一个进行轨迹设计,以单元轮廓线作为机器人工具坐标系原点的运动轨迹,每一圈单元结构的加工轨迹以一个子程序的形式在程序中独立存在,方便自动加工时根据上位机指令进行调用。加工时,根据上位机的指令,首先由机器人完成一个单元结构的加工,一个单元加工完后,旋转台转动一定角度到下一个加工单元位置,一圈单元完成后,机械臂移动到下一圈待加工单元的起始位置,依上述步骤完成所有单元的加工。加工完成的 FSS 雷达罩样品如图 9(b)所示。

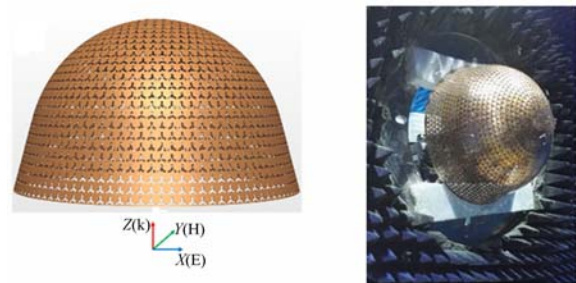


图 8 (a) FSS 雷达罩三维模型 (b) FSS 雷达罩样品

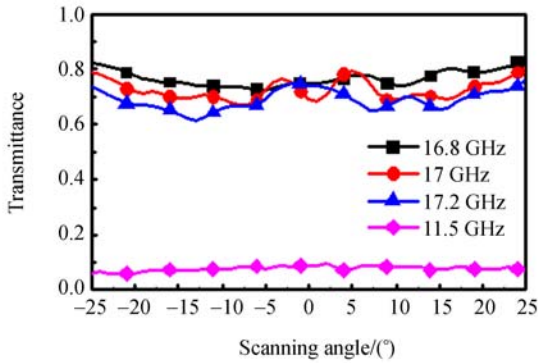
Fig. 8 (a) Three-dimensional model of FSS radome;

(b) FSS radome sample

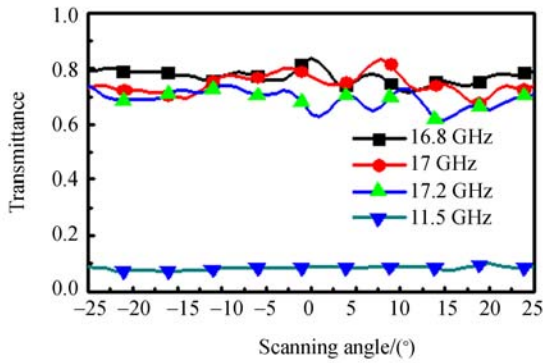
#### 3.2 样品测试结果及讨论

测试在微波暗室环境中进行,测试环境如图

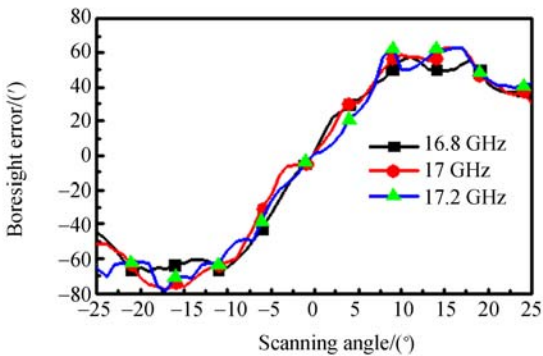
8(b)所示。测试数据包含天线扫描角范围内的功率传输系数及瞄准误差。功率传输系数对应未加 FSS 雷达罩和加载 FSS 雷达罩的天线功率最大值之比,瞄准误差对应未加 FSS 雷达罩和加载 FSS 雷达罩情况下天线零深的角度偏移量。在每一个扫描角度,分别在 H 面和 E 面进行测量,H 面和 E 面分别为磁场矢量、电场矢量与传播方向



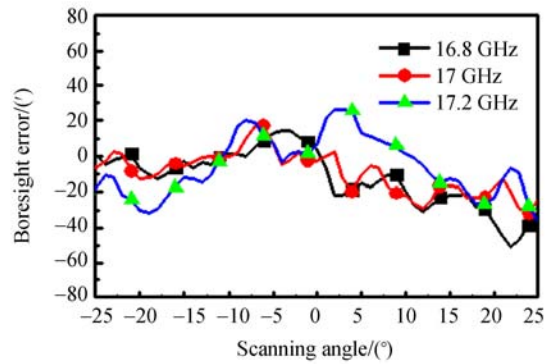
(a)H 面  
(a)H plane



(b)E 面  
(b)E plane



(c)H 面  
(c)H plane



(d)E 面  
(d)E plane

图 9 Y 型 FSS 雷达罩在 Ku 波段通带内(16.8~17.2 GHz)和 X 波段(11.5 GHz)信号辐射下的功率传输系数和通带内的瞄准误差

Fig. 9 Transmittances of Y-shape FSS radome and boresight errors at Ku-band (16.8—17.2 GHz) and X-band (11.5 GHz) of Y-shape FSS radome at Ku-band (16.8—17.2 GHz)

所在的平面。图 9(a)和图 9(b)为该 Y 型 FSS 雷达罩在通带内和阻带的功率传输系数。由测试结果可知,在 $\pm 25^\circ$ 的扫描范围内,该 Y 型 FSS 雷达罩具有较好的功率传输系数,功率传输系数在 0.65~0.85 之间。从图中观察到,在 16.8 GHz 时,透射率均值最大,达到 0.8 以上,意味着中心频率相较设计的 17 GHz 产生了偏移( $\sim 0.2$  GHz)。偏移主要受到单元在曲面上的排布影响。随着天线扫描角度在 $-25^\circ \sim 25^\circ$ 变化,带内信号的透射率受到单元排布的影响;而对于带外信号,其透射率基本平直,透射率低于 0.1,具有良好的带外信号抑制效果。实际上,由于曲面为不可展开曲面,在其头部位置的单元排布难以接近周期性排布准则,而距离头部位置越远则越接近正方形排布,即越接近周期性排布。图 9(c)和 9(d)分别表示天线信号为通带内时在 H 面/E 面的测试结果。由测试结果可知,在扫描角度 $\pm 25^\circ$ 的范围内,H 面的瞄准误差大于 E 面的瞄准误差,前者误差范围在 $\pm 80'$ 之间,后者的瞄准误差在 $\pm 40'$ 之间。

### 4 结 论

本文提出了一种单层厚屏带通 FSS 雷达罩

设计方案并进行了实验验证。这种 FSS 雷达罩嵌于飞行器前端,与天线绝热罩共形,可用于对现有飞行武器隐身性能的改良和防电磁干扰。采用相控阵天线内置于 FSS 雷达罩的三维仿真分析模型对曲面 FSS 的透波性能、瞄准误差等关键指标进行了系统分析。为了获得曲面共形 FSS 雷达罩,本文采用了一种全新的制备工艺,基于旋压成型获取金属罩体,进而采用多自由度激光机器

人和旋转台联动的加工方案加工 Y 型单元。实验结果显示,Y 型单元 FSS 雷达罩带内的信号透射率达到 80% 左右,X 波段的信号透射率低于 10%。这种工艺能够满足各种大型共形曲面 FSS 雷达罩的一体化加工需求,尤其是对于不可展开曲面。同时,单层厚屏 FSS 能够承受超音速飞行器飞行中与空气摩擦产生的高温,且具有良好的刚性。

### 参考文献:

- [1] KOZAKOFF D J. *Analysis of Radome-enclosed Antennas* [M]. Artech House, 1997.
- [2] MUNK B A. *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design* [M]. New York: John Wiley, 2000.
- [3] CHATTERJEE A, PARUI S K. Performance enhancement of a dual-band monopole antenna by using a frequency-selective surface-based corner reflector [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(6): 2165-2171.
- [4] YIN J Y, WAN X, REN J, *et al.*. A circular polarizer with beamforming feature based on frequency selective surfaces [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7:41505.
- [5] HE Y, SHEN Y, FENG X, *et al.*. Homogenizing microwave illumination in thermoacoustic tomography by a linear-to-circular polarizer based on frequency selective surfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(6): 063703.
- [6] LIN Y, YAO H, JU X, *et al.*. Free-standing double-layer terahertz band-pass filters fabricated by femtosecond laser micro-machining[J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 25125-25134.
- [7] 王君,孙艳军,纪雪松,等. 光电可调控频率选择表面[J]. *光子学报*, 2018, 47(3): 0324002.  
WANG J, SUN Y J, JI X S, *et al.*. Photoelectric controllable frequency selective surface [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(3): 0324002. (in Chinese)
- [8] 徐阳,高劲松,徐念喜,等. 低频带通与带阻自由切换的频率选择表面[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(1): 142-149.  
XU Y, GAO J S, XU N X, *et al.*. A frequency-selective surface structure arbitrarily switched between band-pass and band-stop responses at low frequency [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(1): 142-149. (in Chinese)
- [9] CHEN Z, WANG Y, WANG X, *et al.*. Reconfigurable frequency selective surface radome for tunable antenna RCS reduction[C]. *International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium, Florence, Italy: ACES*, 2017: 1-2.
- [10] LIU N, SHENG X, ZHANG C, *et al.*. Design of FSS radome using binary particle swarm algorithm combined with pixel-overlap technique [J]. *Journal of Electromagnetic Waves & Applications*, 2017, 31(5): 522-531.
- [11] WANG P, TANG P, LUO W, *et al.*. Design of dual-band frequency selective surface for antenna RCS reduction[C]. *Progress in Electromagnetic Research Symposium, Shanghai, China: PIERS*, 2016: 4116-4119.
- [12] PANWAR R, LEE J R. Progress in frequency selective surface-based smart electromagnetic structures: A critical review [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 66: 216-234.
- [13] 焦健,徐念喜,冯晓国,等. 基于十字单元的可调谐互补屏频率选择表面[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(6): 1430-1437.  
JIAO J, XU N X, FENG X G, *et al.*. Tunable complementary frequency selective surfaces based on cross-elements [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1430-1437. (in Chinese)
- [14] MAHIMA P, SANGEETHA B, NARAYAN S, *et al.*. EM design of hybrid-element FSS structure for radome application [C]. *India Conference, 2016 IEEE Annual, Mumbai, India: INDI-CON*, 2016: 1-4.
- [15] 王岩松,高劲松,陈新,等. 具有低空气隙敏感度的雪花单元频率选择表面[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(8): 1949-1956.  
WANG Y S, GAO J S, CHEN X, *et al.*. Snow

- loop element frequency selective surface with low sensitivity to air gaps [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(8):1949-1956. (in Chinese)
- [16] DULL D L, JENSEN D G, TICHENOR D R. Method for making precision radomes: U S, US5650249[P]. 1997.
- [17] AKINS R D, WALVOORD J. Ablative process for printed circuit board technology: U S, US5472828[P]. 1995.
- [18] GREGOIRE D J. 3D artificial impedance surfaces [C]. *Antennas and Propagation Society International Symposium, Chicago, USA: APSURSI*, 2012; 1-2.
- [19] GREGOIRE D J. 3-d conformal metasurfaces [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2013, 12: 233-236.
- [20] WILLIAMS V G, MACFARLAND A B, SALADIN E C, et al.. Thermoformed frequency selective surface: U S, US7414593B2[P]. 2008.
- [21] LIANG F, GAO J. A novel method for fabricating curved frequency selective surface via 3D printing technology[C]. *International Symposium on Optoelectronic Technology and Application 2014; Laser Materials Processing, and Micro/Nano Technologies, Beijing, China: OTA*, 2014: 9295-929513.
- [22] CASALE D M, ROLLINS D S. 3D direct write patterning apparatus and method of generating patterns on doubly-curved surfaces :U S,0265042 [P]. 2014.
- [23] 魏鑫磊. 雷达罩频率选择表面的设计及激光精密加工技术研究[D]. 温州:温州大学, 2016.  
WEI X L. *Design and Laser Precision Machining Technologies for Frequency Selective Surface Radome* [D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2016. (in Chinese)
- [24] 方家萌. 不可展频率选择表面的加工方法研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2016.  
FANG J M. *Research on the Processing Method of Non-developable Frequency Selective Surface* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)

#### 作者简介:



王向峰(1977—),男,河南洛阳人,研究员,博士生导师,1998年于河南师范大学获得学士学位,2006年、2009年于美国莱斯大学分别获得硕士、博士学位,主要从事超快速光学、太赫兹、飞秒激光微加工及超材料等方面的研究。E-mail: xfwang@fzu.edu.cn



高炳攀(1992—),男,福建泉州人,硕士研究生,2015年于福州大学获得学士学位,主要从事曲面频率选择表面加工技术的研究。E-mail: bpgao@qq.com

(本栏目编辑:曹 金)