

# X波段曲面小型化带通型孔径中心频率选择表面的设计



王红伟<sup>1</sup>, 潘蕊<sup>2</sup>, 刘宁<sup>1</sup>, 盛贤君<sup>1</sup>

1. 大连理工大学, 辽宁 大连 116024

2. 北京航天长征飞行器研究所, 北京 100076

**摘要:**随着空间电磁环境的日益复杂,对天线罩无线通信的质量以及带外隐身提出了更高的要求。而频率选择表面(FSS)技术是一种常用技术。基于此,本文设计了一种作用于X波段的带通型孔径中心FSS结构。通过对比为原始十字缝隙FSS结构(Case1)以及变形FSS结构(Case2和Case3),发现将Case1结构进行曲折操作得到的变形FSS结构(Case3)在平面以及曲面状态下均具有较好的传输性能稳定性。Case3结构的谐振频率为10.56GHz, -3dB带宽为1.52GHz, 相对带宽为14.39%。当横电波(TE)和横磁波(TM)极化波的入射角度达到60°时,该结构的谐振频率偏移量均小于3.78%,因此,该结构具有较好的角度稳定性。当该FSS结构共形到圆心角为 $\pi/2$ 、半径为95.54mm的柱面上时,在x极化和y极化电磁波垂直入射下,最大谐振频率偏移量为4.5%,因此,该结构也具有较好的共形稳定性。且该FSS结构采用具有较小的正切损耗(0.25mm)的介质基板可进一步提高结构的透波率。由于具有低剖面、较好的角度稳定性以及共形稳定性,该FSS结构在需要共形的无线通信领域中具有良好的应用前景。

**关键词:**频率选择表面; 角度稳定性; 带通型; 小型化; 共形

中图分类号: TN015

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.06.006

频率选择表面(FSS)是由单元结构排列而成的二维周期无限大阵列,可以在一定频率范围以及特定的极化方式下对电磁波起到透射或反射作用<sup>[1]</sup>。由于优秀的滤波性能,FSS被广泛应用于天线罩通信系统、雷达截面积(RCS)的减小和电磁兼容等领域<sup>[2-4]</sup>。在上述领域中,基于FSS所设计的天线罩为一种典型的应用。

天线罩是保护天线系统免受外界环境影响的装置,一般安装在天线前面<sup>[5]</sup>。根据使用场景,可划分为航空型、地面型以及舰载型<sup>[6]</sup>。其中航空型天线罩为一类广泛应用于航空航天领域的高性能构件。为了满足空气动力学要求,航空型天线罩一般为流线型结构<sup>[7]</sup>。随着现代信息技术的发展,传统的介质天线罩不具备隐身功能,难以适应现代航空领域对天线罩隐身性能的需求。为了保证天线罩实现带内正常通信和带外隐身的性能,FSS技术因其结构轻便且具有选择特性,成为目前国内外应用最广泛的隐身天线罩

技术<sup>[8]</sup>。

FSS单元结构是由金属图案以及介质基板组成。依据FSS单元结构上金属图案构成方式,可分为贴片型FSS和孔径型FSS。而依据FSS频率响应又可分为带通型FSS和带阻型FSS,其中带通型FSS可实现对特定频率的电磁波的透射,带阻型FSS可实现对特定频率的电磁波的反射。通过合理设置FSS单元结构的金属图案,贴片型FSS和孔径型FSS在相同的频带范围内均可表现带通特性或带阻特性。此外,单元结构的排布方式也会影响FSS的透波特性。

近些年来,基于金属图案和介质基板的组合已提出具有不同传输性能的FSS。如采用曲折结构实现的小型化FSS<sup>[9-11]</sup>,采用1/4波长构成的宽带FSS<sup>[12]</sup>,采用多层一阶FSS耦合而成的陡截止FSS<sup>[13]</sup>等。上述FSS结构均为平面结构。而在实际天线罩应用中FSS结构通常为曲面结构<sup>[14]</sup>。为了保证曲面FSS天线罩无线通信的质量,需保证

收稿日期: 2024-09-06; 退修日期: 2024-12-24; 录用日期: 2025-02-24

基金项目: 航空科学基金(20220020063001)

引用格式: Wang Hongwei, Pan Rui, Liu Ning, et al. Design of curved miniaturized bandpass aperture central frequency selective surface for X band[J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(6): 49-57. 王红伟, 潘蕊, 刘宁, 等. X波段曲面小型化带通型孔径中心频率选择表面的设计[J]. 航空科学技术, 2025, 36(6): 49-57.

平面FSS结构共形到曲面结构时,传输性能变化较小。基于此,首先需对曲面FSS结构相较于平面FSS传输性能变化进行仿真分析,即得到曲面FSS结构的传输性能。

目前,对曲面FSS结构传输性能的仿真分析有以下4种:(1)将柱面FSS与天线结合起来,采用天线回波损耗参数来评估柱面FSS透波性能<sup>[15-17]</sup>。(2)利用波迭代方程计算半无限大曲面FSS结构的透波系数<sup>[18-20]</sup>。(3)将有限阵列的FSS结构放置在传输和接收喇叭天线之间,两个喇叭天线的端口能量之比即为FSS的传输系数<sup>[21]</sup>。该仿真分析模拟了试验条件,但所需网格量较大。(4)采用高斯平面波入射来近似模拟平面波设置,通过计算FSS和空气层透射方向的散射远场进而得到有限大曲面FSS的透波系数<sup>[22]</sup>。由于该仿真分析考虑了有限大阵列FSS结构的边缘效应以及周期截断效应,因此,更加接近实际测试结果。而且相比于第三种仿真分析,该仿真分析还具有计算网格少及计算速度高的优点。

将曲面FSS结构进行性能分析之后,需设计出性能较为稳定的曲面FSS结构。然而,目前大多数研究主要针对曲面带阻型FSS结构设计。Yong Wanyan等采用喷墨打印技术制作出位于X波段的柔性FSS结构,仿真结果表明,当FSS共形的柱面半径为200mm时,谐振频率偏移量为6.93%。Nauman采用印刷电路板技术设计出可以在X波段提供有效屏蔽的弯曲方环FSS结构,试验结果表明,当共形半径为240mm时,该结构具有较小的谐振频率偏移量。然而上述研究没有探讨单元结构变化对曲面FSS透波系数的演变规律。电子科技大学潘泰松课题组<sup>[23]</sup>通过对比直条纹、斜条纹和蛇条纹三种单元结构在不同弯曲半径下的透波系数,确定了蛇条纹结构具有较好的共形稳定性。共形稳定性定义为在弯曲共形条件下,FSS传输性能相比于平面FSS结构来说仍保持稳定<sup>[22]</sup>。上述FSS均为带阻型FSS,目前关于曲面带通型FSS的研究较少,大连理工大学盛贤君课题组<sup>[22]</sup>通过对比贴片中心连接型、贴片环形结构以及孔径环形结构共形在不同曲率下谐振频率及-3dB带宽偏移量,得到相应的性能演变规律,进而指导设计了一个在不同共形半径下透波性能稳定的小型化贴片型FSS结构。

由于带通型FSS广泛应用于天线罩无线通信中,且相比于贴片型FSS结构来说,孔径型FSS结构具有结构简单和易于共形在不可展曲面上的优点,因此,本文设计了三种孔径中心型FSS结构,通过仿真分析它们在不同共形半径上的传输性能,得到相应的性能演变规律,从而为设计具有较好的共形稳定性的孔径中心型FSS结构提供理论

设计的基础。

## 1 FSS结构设计

FSS的结构设计是基于等效电路模型(ECM)而来的。具体的步骤为:首先根据所需的频率响应得到ECM相应的电路参数值;之后利用ECM与FSS结构之间的映射关系设计出FSS拓扑结构;最后利用ECM中电路参数值与FSS结构的几何参数之间的关系得到FSS结构的几何尺寸。其中ECM与FSS结构之间的映射关系为:当电磁波入射时,FSS金属结构中电磁波电场方向平行的金属条带可以等效为电感,而电磁波电场方向垂直的金属缝隙可以等效为电容。

本文所设计的FSS结构均为单通带结构,相应的谐振频率均位于X波段,所采用的ECM如图1所示。该ECM由混合谐振器、介质基板阻抗 $Z_{\text{Sub}}$ 和自由空间阻抗 $Z_0$ 组成,其中混合谐振器为电感 $L_0$ 和串联 $L_1C_1$ 谐振器的并联组合。该ECM可以产生如下的传输极点和传输零点

$$\begin{aligned} f_z &= \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} \\ f_p &= \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_0+L_1)C_1}} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $f_z$ 为传输零点; $f_p$ 为传输极点; $L_1$ 和 $L_0$ 为图1中ECM的电感; $C_1$ 为图1中ECM的电容。

在得到ECM之后,与其相对应的孔径中心型FSS拓扑结构如图2所示。图2(a)为原始的中心十字结构,命名为Case1。图2(b)和图2(c)为变形的中心十字结构,分别命名为Case2和Case3。这些结构的侧视图如图2(d)所示,均印刷在厚度 $t=0.5\text{mm}$ 的介质基板F4B-2( $\epsilon_r=2.65$ , $\tan\delta=0.005$ )上。

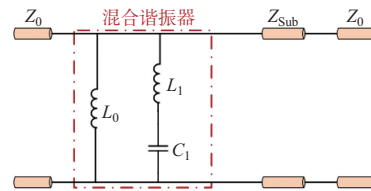


图1 FSS结构的等效电路模型

Fig.1 Equivalent circuit model of the FSS structure

为了更加清楚地了解图2所示孔径中心型FSS结构与图1所示ECM的映射关系,图3展示了当入射电磁波电场极化方向为 $y$ 方向时,这些结构所映射的电路元件。从图3中可以看出,包围金属孔径的外部金属贴片可以等效为电感 $L_0$ ,而包围金属孔径的内部金属贴片可以等效为电感 $L_1$ ,金属孔径可等效为电容 $C_1$ 。

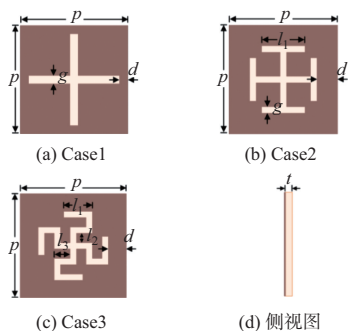


图2 孔径中心型FSS拓扑结构

Fig.2 Topology of the aperture central FSS

在得到ECM与FSS拓扑结构之间的映射关系后,利用参数拟合方法可得到满足所需频率响应的ECM电路参数,之后采用粒子群优化PSO算法进行FSS单元结构几何参数的优化<sup>[13]</sup>。该优化过程在CST微波工作室软件进行,其FSS结构四周为晶胞边界条件。当优化后FSS结构的频率响应与ECM的频率响应相吻合时,优化过程结束,此时得到的几何参数便为最终的几何参数。Case1~Case3最终的几何参数见表1,其对应ECM的电路参数见表2。

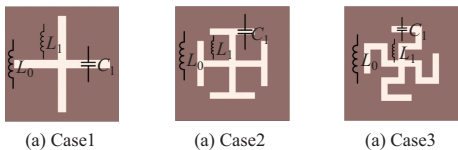


图3 等效电路元件分布

Fig.3 Distribution of equivalent circuit elements

表1 孔径中心型FSS的几何参数(单位:mm)

Table 1 Geometric parameters of aperture central FSS(Unit:mm)

| 几何参数  | $p$ | $d$ | $g$ | $l_1$ | $l_2$ | $l_3$ |
|-------|-----|-----|-----|-------|-------|-------|
| Case1 | 13  | 1   | 1   | —     | —     | —     |
| Case2 | 10  | 1.9 | 0.6 | 4     | —     | —     |
| Case3 | 10  | 1.7 | 0.6 | 2.7   | 0.9   | 1.5   |

表2 孔径中心型FSS的电路参数

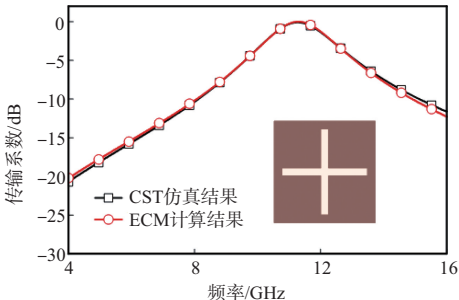
Table 2 Circuit parameters of aperture central FSS

| 电路参数  | $L_0/\text{nH}$ | $L_1/\text{nH}$ | $C_1/\text{pF}$ |
|-------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Case1 | 0.65            | 0.10            | 0.27            |
| Case2 | 0.62            | 0.29            | 0.22            |
| Case3 | 0.55            | 0.15            | 0.33            |

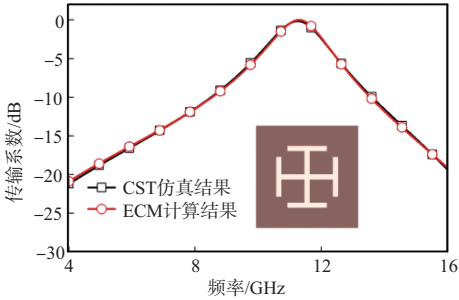
图4展示了FSS结构仿真传输系数以及对应的ECM计算传输系数的对比。从图4中可以看出,对于Case1~Case3,FSS仿真结果与ECM计算结果吻合性较好,从而验证了FSS结构设计步骤的有效性。

## 2 平面FSS结构性能分析

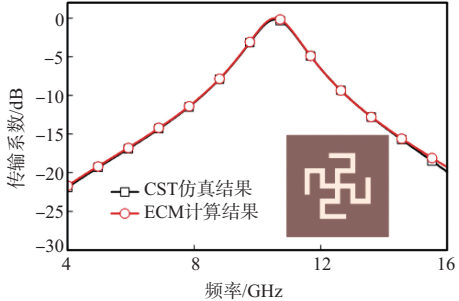
在得到满足所需频率响应的FSS结构后,需首先对其在平面状态下的角度稳定性进行分析,然后分析单元结构的数量对FSS结构透波系数的影响,从而得到用于曲面透波系数计算时所需的单元结构数量。



(a) Case1的全波仿真和计算结果



(b) Case2的全波仿真和计算结果



(c) Case3的全波仿真和计算结果

图4 平面孔径中心型FSS仿真和计算结果

Fig.4 Simulated and calculated results of the planar aperture central FSS

图5展示了Case1~Case3在电磁波斜入射下的传输系数。从图5(a)和图5(b)中可以看出,Case1在TM极化波斜入射下具有较大的谐振频率偏移量,且在TE极化波以60°入射时出现了高频寄生谐振。而将十字缝隙结构加入终端电容以及进行曲折变化均可在一定程度上提高十字缝隙FSS结构的角稳定性。

为了分析不同单元结构数量对FSS结构透波特性的影响并确定曲面共形的结构阵列,采用参考文献[22]中所提

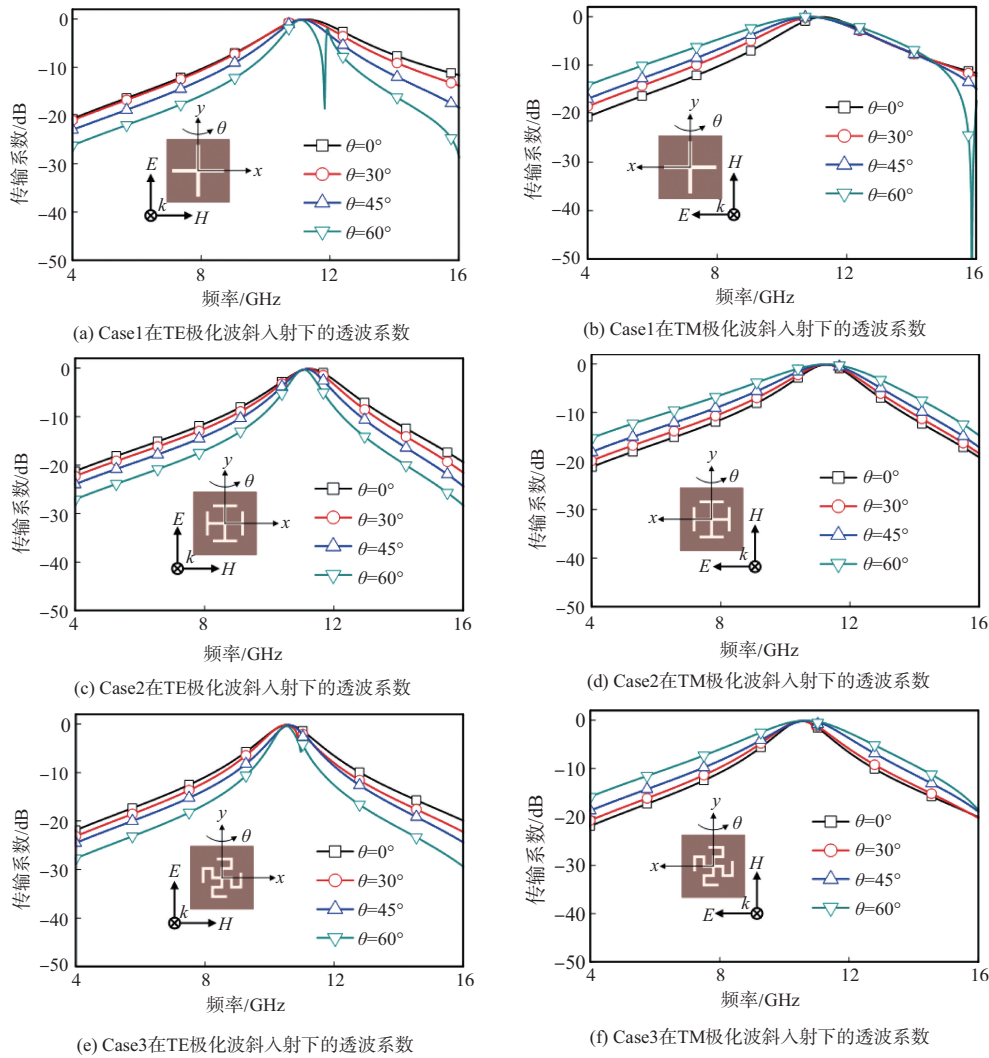


图5 平面孔径中心型FSS在斜入射下仿真结果

Fig.5 Simulated results of the planar aperture central FSS under oblique incidence

出的仿真设计,将FSS结构在CST软件中进行仿真,其中 $x$ 、 $y$ 和 $z$ 方向的边界条件为开放边界条件,采用的激励为高斯平面波。图6展示了具有不同单元结构数量的Case1~Case3的透波系数,当单元结构数量为 $11 \times 11$ 、 $13 \times 13$ 、 $15 \times 15$ 时,所提出FSS的透波系数在低频段均有波动,但Case1低频段波动相比于Case2和Case3较小,这与所设计FSS单元结构之间的耦合度有关。当所设计FSS单元周期 $p$ 变大或包围金属孔径的外部金属贴片的宽度 $d$ 变小时,单元结构之间的耦合度变弱,即在相同单元结构数量下,FSS低频段透波系数波动变弱,与无限大FSS透波系数吻合性变高。另外,增加单元结构数量也会降低FSS低频段透波系数的波动,从而逐渐逼近无限大FSS透波系数,这与实际结论一致。考虑到低频段透波系数的波动远

离目标频带且较多单元结构会增加计算网格,从而减慢计算速度,因此,针对Case1来说选取单元结构数量为 $11 \times 11$ ,而针对Case2和Case3来说选取单元结构数量为 $15 \times 15$ ,来进行曲面透波系数的计算。

### 3 曲面FSS结构性能分析

为了得到曲率变化对孔径中心型FSS透波性能的影响规律,将上述有限大阵列的FSS结构共形在具有不同曲率的圆柱上。由于圆柱的截面为圆形,为了更加直观表示FSS弯曲程度,引入以下的关系

$$\alpha * R = l, \rho = 1/R \quad (2)$$

式中, $l$ 为FSS结构阵列的边长; $\alpha$ 为圆心角; $R$ 为半径; $\rho$ 为曲率。图7为弯曲柱面横截面示意图。



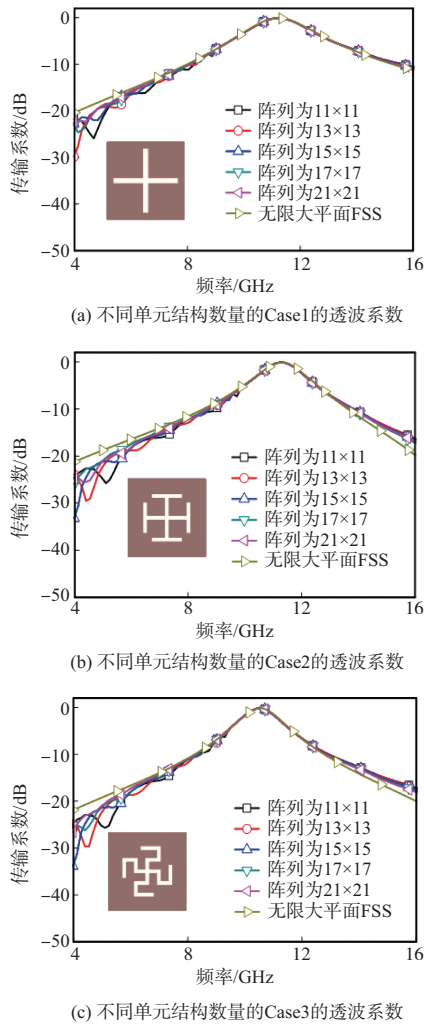


图6 不同单元数量的孔径中心型FSS的仿真结果

Fig.6 Simulated results of the aperture central FSS with different numbers of unit cells

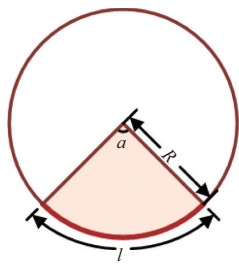


图7 柱面横截面示意图

Fig.7 Schematic diagram of cylindrical cross-section

图8为孔径中心型FSS结构共形在不同圆心角 $\alpha$ 的柱面上,在TE和TM极化波入射下的透波系数,由式(2)可知,当阵列边长一定时,曲面FSS对应的圆心角 $\alpha$ 与共形的柱面曲率 $\rho$ 呈正比关系。TE极化波的电场分量沿 $y$ 方向极化,TM极化波的电场分量沿 $x$ 方向极化。由于曲面结构的

透波系数与入射平面波电场极化方向和FSS弯曲方向均有关,因此,引入共面极化和交叉极化,共面极化定义为FSS弯曲轴向方向与电场极化方向平行,交叉极化定义为FSS弯曲轴向方向与电场极化方向交叉。从图8中可以看出,无论是在共面极化还是交叉极化,曲面Case2和曲面Case3谐振频率变化量均小于曲面Case1,说明将十字结构进行曲折操作或加入终端电容均可提高结构共形稳定性。

为了定量分析弯曲圆心角对孔径中心型FSS结构透波系数的影响规律,定义谐振频率变化量和-3dB带宽变化量。

$$\omega = \frac{f_a - f_{pla}}{f_{pla}} \quad (3)$$

$$B = \frac{b_a - b_{pla}}{b_{pla}}$$

式中, $\omega$ 为谐振频率变化量; $B$ 为-3dB带宽变化量; $f_a$ 、 $b_a$ 分别为FSS结构共形在圆心角为 $\alpha$ 的柱面上的谐振频率和-3dB带宽; $f_{pla}$ 、 $b_{pla}$ 分别为平面FSS结构的谐振频率和-3dB带宽。

Case1~Case3结构的 $\omega$ 和 $B$ 随着圆心角 $\alpha$ 的增大而变化的情况如图9所示。随着 $\alpha$ 的增大,在共面极化下,可知曲面Case1~Case3结构的谐振频率向低频移动,-3dB带宽逐渐变窄,且Case2和Case3的 $\omega$ 的绝对值均小于Case1。在交叉极化下,随着弯曲圆心角 $\alpha$ 的增大,Case1~Case3的-3dB带宽逐渐变宽,且Case2和Case3的 $\omega$ 的绝对值小于Case1。因此,采用弯曲曲折结构或加终端电容的方法均可有效提高孔径中心型FSS结构的共形稳定性。此外,该三种FSS结构在交叉极化下随弯曲圆心角的增大而变化的 $\omega$ 的绝对值均小于共面极化下的 $\omega$ 的绝对值,造成此现象的原因在于相较于在交叉极化下,在共面极化下,较多的电场分量以大角度入射到曲面FSS结构。从图9可以看出,当FSS共形到大圆心角的柱面上时,在共面极化下,Case3的 $\omega$ 的绝对值小于Case2,而在交叉极化下,这二者的 $\omega$ 的绝对值相差不大,因此,Case3的共形稳定性优于Case2的共形稳定性。

由上述分析可知,Case3的共形稳定性优于Case1和Case2。为了更加清楚地了解Case3的透波情况,其在共面极化和交叉极化下谐振频率处的透波率见表3。由表3可以看出,在共面极化下,当圆心角达到 $\pi/2$ 时,Case3的透波率较低。

为了进一步提高Case3共形在大圆心角曲面上的透波率,可以通过采用具有较小正切损耗的介质基板F4B( $\epsilon_r=2.2, \tan\delta=0.0007$ )的方法。图10采用厚度为0.5mm的F4B的Case3结构共形在不同圆心角曲面上的透波系数。从图10中可以看出,在共面极化下,当弯曲角度达到 $\pi/2$ 时,FSS

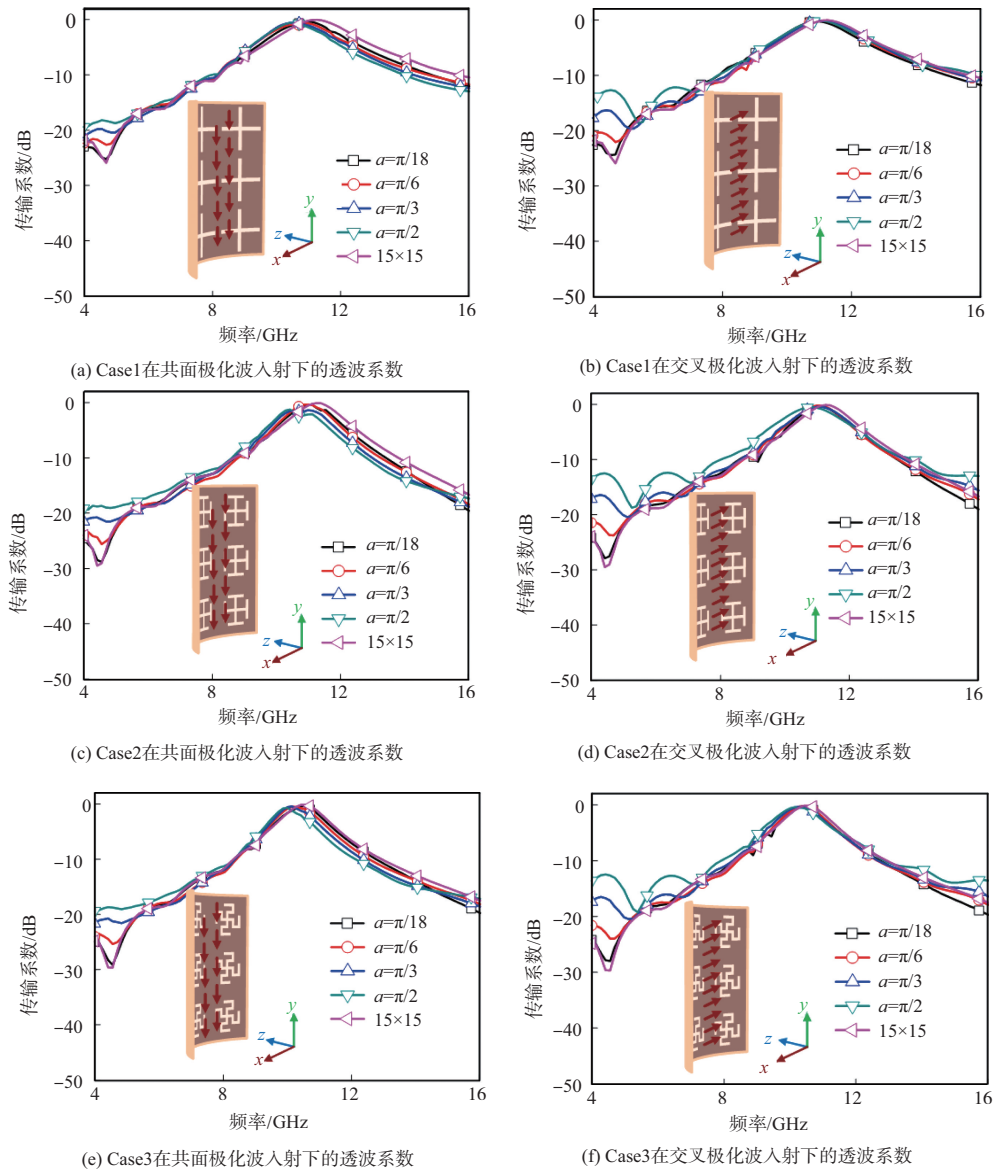


图8 曲面孔径中心型FSS在垂直入射下透波系数

Fig.8 Transmission coefficients of the curved aperture central FSS under normal incidence

结构的谐振偏移量为3.77%。而在交叉极化下,当弯曲角度达到 $\pi/2$ 时,FSS结构的谐振偏移量为2.51%。其在谐振频率处的相应的透波率见表4,对比表3可以得知采用该介质基板可以提高Case3在大圆心角曲面上的透波率。

## 4 结论

本文提出了应用曲面共形的谐振频率位于X波段的带通型孔径中心型FSS结构设计。通过对比原始十字缝隙结构Case1以及变形十字缝隙结构Case2和Case3共形在不同圆心角的柱面上的透波系数,可以得到以下几个结论:

(1)通过在原始十字缝隙结构上添加终端电容以及进

行弯曲曲折操作可以提高原始结构Case1的角度稳定性和共形稳定性,其中后者提高Case1的共形稳定性效果更好。

(2)Case1~Case3在共面极化下的共形稳定性弱于交叉极化下的共形稳定性,这是由于在共面极化下具有较多的大角度入射波。

(3)随着弯曲圆心角的增大,Case1~Case3的-3dB带宽在共面极化下逐渐变窄而在交叉极化下逐渐变宽,这是由结构的角稳定性引起的。

(4)通过采用具有较小正切损耗的介质基板可进一步提高FSS结构共形在大圆心角曲面上的透波率。由于所设计的Case3具有高共形稳定性和高角度稳定性,因此,该结

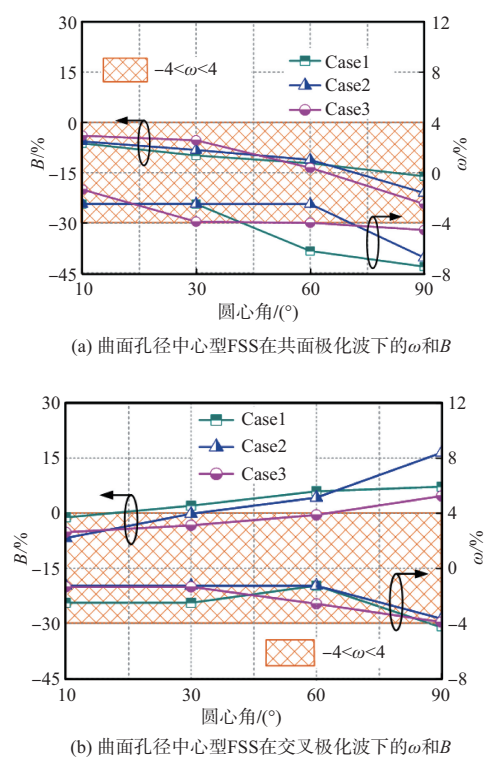


图9 曲面孔径中心型FSS在垂直入射下的 $\omega$ 和 $B$

Fig.9 The  $\omega$  and  $B$  of the curved aperture central FSS under normal incidence

表3 Case3在谐振频率处的透波率(单位:%)

Table 3 Transmission rate of Case3 at the resonance frequency(Unit: %)

| 圆心角极化 | $\pi/18$ | $\pi/6$ | $\pi/3$ | $\pi/2$ |
|-------|----------|---------|---------|---------|
| 共面极化  | 95.8     | 94.4    | 95.2    | 92.3    |
| 交叉极化  | 97.4     | 96.9    | 96.1    | 95.2    |

构在FSS天线罩无线通信系统中具有很好的应用前景。

AST

参考文献

[1] Munk B A. Frequency selective surface: Theory and design [M]. New York: John Wiley & Sons, 2000.

[2] Shang Yuping, Shen Zhongxiang, Xiao Shaoqiu. Frequency-selective rasorber based on square-loop and cross-dipole arrays [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62 (11): 5581-5589.

[3] 赵滢彤, 王钢林, 唐兴中, 等. X及Ku波段宽带极化转换超表面设计及RCS缩减应用[J]. 航空科学技术, 2024, 35(2): 100-105.

Zhao Yitong, Wang Ganglin, Tang Xingzhong, et al. Design of

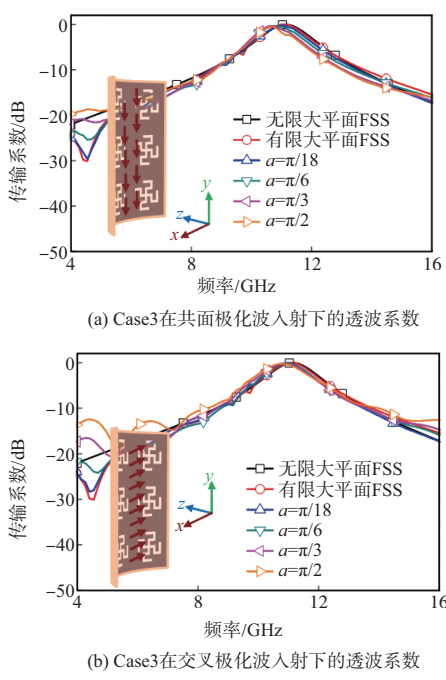


图10 介质基板为F4B的Case3在垂直入射下的仿真透波系数

Fig.10 Simulated transmission coefficients of Case3 with the dielectric substrate of F4B under normal incidence

表4 优化后的Case3在谐振频率处的透波率(单位:%)

Table 4 Transmission rate of the optimized Case3 at the resonant frequency(Unit: %)

| 圆心角极化 | $\pi/18$ | $\pi/6$ | $\pi/3$ | $\pi/2$ |
|-------|----------|---------|---------|---------|
| 共面极化  | 97.5     | 96.4    | 96.3    | 94.8    |
| 交叉极化  | 99.1     | 99.0    | 98.0    | 97.0    |

broadband polarization conversion metasurface for X and Ku bands and RCS reduction applications[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(2): 100-105. (in Chinese)

[4] Syed I S, Ranga Y, Matekovits L, et al. A single-layer frequency-selective surface for ultrawideband electromagnetic shielding[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014, 56(6): 1404-1411.

[5] 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): 198401.

Lu Gewu, Zhang Jian, Yang Jieying, et al. Status and development of frequency selective surface radome[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(19): 198401. (in Chinese)

[6] 唐亮, 潘宇轩. 频率选择表面天线罩研究现状综述[J]. 纤维复合材料, 2022, 39(3): 132-135 +144.

- Tang Liang, Pan Yuxuan. Research status of frequency selective surface radome[J]. *Fiber Composites*, 2022, 39(3): 132-135+144. (in Chinese)
- [7] 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 surfaces for finite curved surfaces[J]. *Computer and Digital Engineering*, 2011, 39(4): 5-7. (in Chinese)
- [8] 朱军, 曹群生, 方小星, 等. 曲面频选天线罩电性能设计研究[J]. *微波学报*, 2019, 35(1): 69-74.
- Zhu Jun, Cao Qunsheng, Fang Xiaoxing, et al. An electromagnetic performance analysis and design of curved frequency selective surface radome[J]. *Journal of Microwaves*, 2019, 35(1): 69-74. (in Chinese)
- [9] Zhao Zhenzhen, Li Jianxing, Shi Hongyu, et al. A low-profile angle-insensitive bandpass frequency selective surface based on vias[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2018, 28(3): 200-202.
- [10] Hong Tao, Xing Wenbo, Zhao Qiang, et al. Single-layer frequency selective surface with angular stability property[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(4): 547-550.
- [11] Ma Xin, Liu Yunzhe, Wan Guobin, et al. Angularly stable frequency-selective surface using shifted double-sided screens[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19(7): 1192-1196.
- [12] Al-joumayly M A, Behdad N. A generalized method for synthesizing low-profile, band-pass frequency selective surfaces with non-resonant constituting elements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(12): 4033-4041.
- [13] Liu Ning, Sheng Xianjun, Zhang Chunbo, et al. Design and synthesis of band-pass frequency selective surface with wideband rejection and fast roll-off characteristics for radome applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 68(4): 2975-2983.
- [14] 王向峰, 高炳攀, 任志英, 等. 一体化曲面共形频率选择表面雷达罩[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(6): 1362-1369.
- Wang Xiangfeng, Gao Bingpan, Ren Zhiying, et al. Integrated curved-surface conformal frequency selective surface radome[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(6): 1362-1369. (in Chinese)
- [15] Gu Chao, Gao Steven, Sanz-Izquierdo B, et al. 3-D coverage beam-scanning antenna using feed array and active frequency-selective surface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(11): 5862-5870.
- [16] Gu Chao, Izquierdo B S, Steven Gao, et al. Dual-band electronically beam-switched antenna using slot active frequency selective surface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(3): 1393-1398.
- [17] Han Liping, Cheng Gen, Han Guorui, et al. Electronically beam-steering antenna with active frequency-selective surface[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 18(1): 108-112.
- [18] Neto V P S, D' Assunção A G, Baudrand H. Analysis of finite size nonuniform stable and multiband FSS using a generalization of the WCIP method[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2018, 60(6): 1802-1810.
- [19] Yong Waiyan, Rahim S K A, Himdi M, et al. Flexible convoluted ring shaped FSS for X-band screening application[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 11657-11665.
- [20] Nauman M, Saleem R, Rashid A K, et al. A miniaturized flexible frequency selective surface for X-band applications[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, 58(2): 419-428.
- [21] Wang Linbiao, See K Y, Zhang Junwu, et al. Ultrathin and flexible screen-printed metasurfaces for EMI shielding applications[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2011, 53(3): 700-705.
- [22] Sheng Xianjun, Wang Hongwei, Liu Ning, et al. A conformal miniaturized band-pass frequency selective surface with stable frequency response for radome applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024, 72(3): 2423-2433.
- [23] Chen Sihong, Pan Taisong, Yan Zhuocheng, et al. Flexible serpentinelike frequency selective surface for conformal applications with stable frequency response[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(7): 1477-1481.



## Design of Curved Miniaturized Bandpass Aperture Central Frequency Selective Surface for X Band

Wang Hongwei<sup>1</sup>, Pan Rui<sup>2</sup>, Liu Ning<sup>1</sup>, Sheng Xianjun<sup>1</sup>

1. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

2. Beijing Aerospace Long March Aircraft Research Institute, Beijing 100076, China

**Abstract:** With the increasing complexity of the space electromagnetic environment, higher requirements are put forward on the quality of wireless communication received and out of band stealth of the radome. Frequency selective surface (FSS) technology is a commonly adopted technique. Based on this, a bandpass aperture center FSS structure working for X-band is designed in this paper. By comparing the original cross-gap FSS structure (Case1) with the deformed FSS structures (Case2 and Case3), it is found that the deformed FSS structure (Case3), which is obtained by zigzag operation of Case1, has better transmission performance stability in both planar and curved states. The resonance frequency of the Case3 structure is 10.56GHz, the  $-3\text{dB}$  bandwidth is 1.52GHz, and the relative bandwidth is 14.39%. When the incidence angle is up to  $60^\circ$  under the transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) polarized waves, the resonant frequency offset of the structure is less than 3.78%. Thus, this structure has better angular stability. When the FSS structure is conformal on a cylindrical surface with a central angle of  $\pi/2$  and a radius of 95.54mm, the maximum resonant frequency offset is 4.5% under normal incidence for x-polarized and y-polarized electromagnetic waves. Thus, this structure also has better conformal stability. Moreover, the conformal stability of the FSS structure can be further improved when the thickness of the dielectric substrate is reduced to 0.25mm. Due to the low profile, good angular stability, and conformal stability, the FSS structure has a good prospect for application in wireless communication that requires conformality.

**Key Words:** FSS; angular stability; bandpass; miniaturized; conformality

Received: 2024-09-06; Revised: 2024-12-24; Accepted: 2025-02-24

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(20220020063001)