DOI：10.3969/j.issn.1672-2337.2018.03.018

一种新型扇形环状频率选择表面的设计

韩　可[1,2]，葛俊祥[1,2]，盛夕琛[1,2]

（1.南京信息工程大学江苏省气象探测与信息处理重点实验室，江苏南京 210044；
2.南京信息工程大学电子与信息工程学院，江苏南京 210044）

摘　要：通过在矩形环为基本单元结构的基础之上设计了一种新型双频双极化低通高阻型频率选择表面(Frequency Selective Surface,FSS)。此结构将普通矩形环的每条边顺时针延长，再沿贴片的四周开槽矩形孔径后两边加载介质板的多层结构，实现了 Ka 波段带通、W 波段带阻的空间滤波特性。经过电磁仿真软件 HFSS 的仿真与优化，所设计的新型扇形环状 FSS 结构在 35 GHz 谐振频率处，插损为 0.02 dB，−0.5 dB 通带衰减带宽为 5.85 GHz；在 94 GHz 谐振频率处，反射系数为−54.57 dB，−20 dB 阻带带宽为 4.29 GHz，且在入射角 0°～30°范围内具有良好的极化稳定性和角度不敏感性。

关键词：频率选择表面(FSS)；低通高阻；极化稳定；角度不敏感

中图分类号：TN820　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1672-2337(2018)03-0338-05

Design of a Novel Fan Loop Frequency Selective Surface

HAN Ke[1,2], GE Junxiang[1,2], SHENG Xichen[1,2]

(1. *Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044, *China*;
2. *College of Electronic and Information Engineering*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044, *China*)

Abstract: A double-polarization, pass-band and stop-band frequency selective surface (FSS) based on the square ring element is presented for transmitting in Ka band and reflecting in W band. This structure is loaded on the middle of the two dielectric substrates, which is obtained by extending each edge of the ordinary rectangular ring, and then slotting rectangular aperture around the patch. Simulated results show that the insertion loss is about 0.02 dB at 35 GHz and the reflection coefficient is −54.57 dB at 94 GHz. The −0.5 dB pass-band bandwidth is about 5.85 GHz in Ka band and the −20 dB suppression bandwidth is about 4.29 GHz in W band. In addition, the designed FSS structure has good characteristics in polarization-independent and angular-insensitive when the incident angles vary from 0° to 30°.

Key words: frequency selective surface (FSS); low-pass and high resistance; polarization-independent; angular-insensitive

0　引　言

频率选择表面是由谐振单元按照一定规律排列成的二维周期性平面结构，对电磁波具有频率选择和极化选择的特性，能够有效地控制电磁波的透射和反射。频率选择表面主要分为贴片型和孔径型两种，贴片型是在介质基板表面周期性地印上规则的导体贴片；而孔径型是在金属板上周期性地开一些槽孔。这两种类型分别表现出全反射(贴片型)、全透射(孔径型)，分别被称为带阻型 FSS 或带通型 FSS[1-3]。频率选择表面的应用十分广泛，在天线罩[4]、极化器[5]、雷达截面(Radar Cross Section, RCS)[6]以及电磁吸收材料[7]等领域都有涉及。

目前关于多频段双极化 FSS 结构的研究有很

收稿日期：2017-10-23；修回日期：2017-12-01
基金项目：国家自然科学基金(No.61372066)；江苏省双创团队人才计划

多。如文献[8]基于矢量模式匹配法设计的方环复合 Y 型 FSS 结构，在 0°～45°范围内，Ku/Ka 波段传输特性良好[8]。文献[9]中设计了双层 Ku/Ka 波段 FSS 结构用于天线副反射面，实现了 Ka 波段透射、Ku 波段反射的特性。文献[10]利用 FSS 结构设计了一种 Ka 波段圆极化微带反射阵天线有效抑制了耦合，提高了增益，展宽了带宽。由于 35 GHz 和 94 GHz 这两个中心频率处大气传播衰减较小，是毫米波中最常用的两个频段，研究这两个频段基于 FSS 结构的双反射面天线是毫米波气象雷达发展的需要，对国内毫米波技术研究发展具有重要意义[11]，而这一技术最为关键的是用作副反射面的特定 FSS 结构，因此本文主要设计了一种新型 FSS 结构。

1　新型扇形环状 FSS 结构的物理模型设计与分析

1.1　FSS 理论分析

当平面电磁波照射 FSS 构成的周期结构是：每个单元都将产生感应电流，其大小由入射电磁波与 FSS 单元之间的耦合能量决定。该感应电流进而激发产生的散射场与原本入射场叠加形成了一个新的总场，这个总场对某个特定频率具有空间滤波特性[1]。

FSS 周期结构满足 Floquet 定理，除了相差一个相位因子，在相距为周期整数倍的横截面上 FSS 的场分布相同，并且满足相同的分布函数。因此，FSS 的辐射场可以用一组 Floquet 模表达。根据 Floquet 定理，周期结构的散射电磁场满足：

$$\Psi(x+p,y,z)=\Psi(x,y,z)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\beta x_0 p} \tag{1}$$

式中，$\Psi(x,y,z)$为沿 X 轴周期变化的周期系统中任意一点的场，p 为单元周期边长，βx_0 为基波的传播常数。

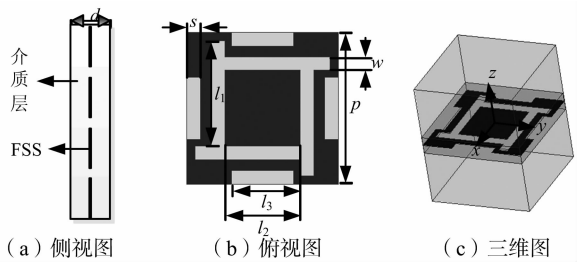
因为 $\Psi(x,y,z)$是单元周期边长 p 的周期函数，所以可以展开为傅里叶级数：

$$\Psi(x,y,z)=\sum_{n=-\infty}^{n=\infty} a_n(y,z)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}(\beta x_0+2n\pi/p)} \tag{2}$$

式中，$a_n(y,z)$为 Floquet 空间谐波的振幅。

1.2　物理模型设计

本文将矩形环每条边顺时针延长，再沿贴片的四周开槽矩形孔径，设计了一个在 Ka 波段透射、W 波段反射的新型扇形环状 FSS 结构[12]，然后将其两侧加载介质板，如图 1 所示。



（a）侧视图　（b）俯视图　（c）三维图

图 1　新型扇形环状 FSS 单元结构示意图

图 1(a)为 FSS 双边加载介质板的侧视图，图 1(b)为 FSS 单元结构的俯视图，图 1(c)为 FSS 单元结构的三维图。图中浅色代表介质基板，深色代表厚度为 0.035 mm 的金属铜。优化后的参数值为：单元周期边长 $p=2.91$ mm，该结构矩形环边长 $l_1=2.02$ mm，内侧小矩形贴片边长 $l_2=1.45$ mm，缝隙宽度 $w=0.26$ mm，挖去的矩形孔径长 $l_3=1.19$ mm，宽 $s=0.26$ mm。介质层采用非常适用于高频且传输损耗较低的 Rogers5880，相对介电常数 $\varepsilon_r=2.2$，介质损耗角正切 $\tan\delta=0.0009$，厚度 $d=0.508$ mm。参数值如表 1 所示。

表 1　频率选择表面的参数值

参数	参数值/mm
p	2.91
l_1	2.02
l_2	1.45
l_3	1.19
w	0.26
s	0.26
d	0.508

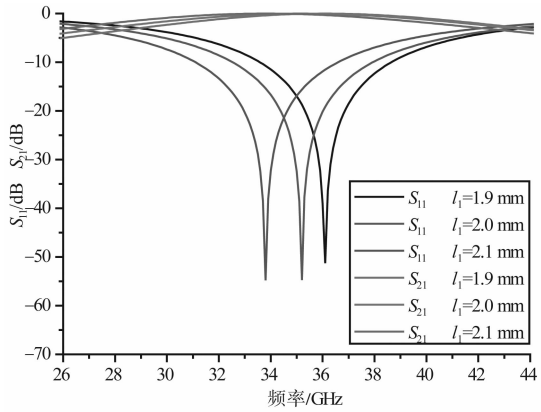
2　仿真结果分析

本文全部采用 Ansoft HFSS 软件对 FSS 进行仿真。利用 Master+Slave 边界条件，模拟无限大平面周期结构，实现对 FSS 传输特性的分析；通过 Floquet 端口可以设置电磁波的入射方向和极化方式，便于研究 FSS 结构的稳定性问题。

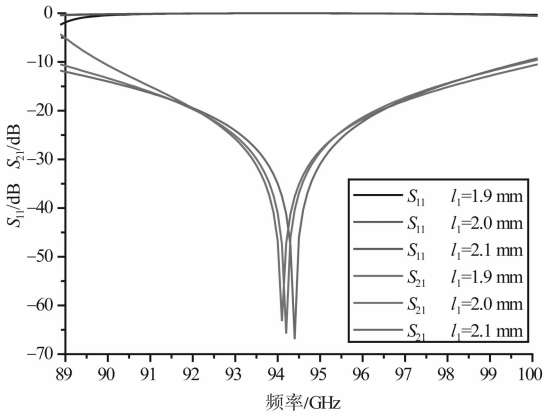
2.1　几何参数对传输特性的影响

矩形环边长 l_1 的影响研究，分别取 $l_1=1.9$ mm，2.0 mm 和 2.1 mm，垂直电磁波入射时 FSS 的频率响应特性如图 2 所示。随着 l_1 的增大，通

带中心频率向左偏移，分别为 36.1，35.2 和 33.8 GHz，−0.5 GHz 通带带宽基本不变。阻带中心频点偏移量小，几乎不产生影响。由仿真结果知，l_1 只对通带谐振频点起到调节作用。



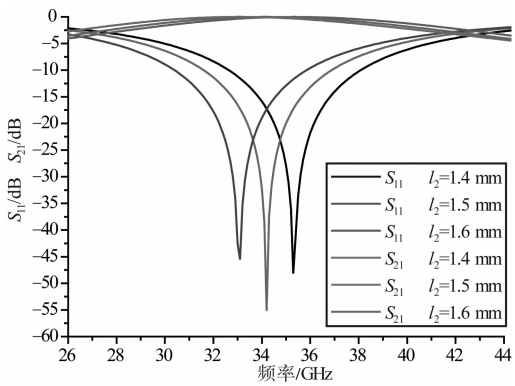
（a）Ka波段



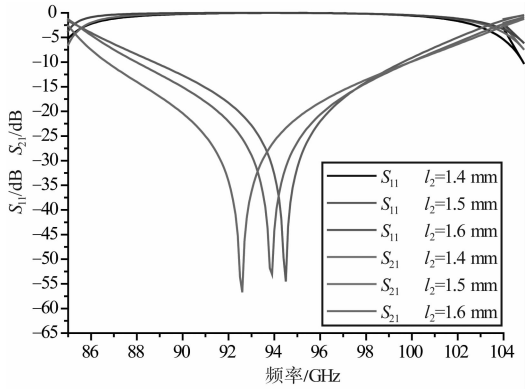
（b）W波段

图 2　垂直入射时 l_1 对 FSS 传输特性的影响

内部矩形贴片边长 l_2 的影响研究，分别取 l_2＝1.4 mm，1.5 mm 和 1.6 mm，垂直电磁波入射时 FSS 的传输特性如图 3 所示。随着 l_2 的增大，通带和阻带的中心频率均向左偏移，分别为 36.1，35.2，33.8，94.5，93.9 和 92.6 GHz，−0.5 dB 通带带宽略



（a）Ka波段

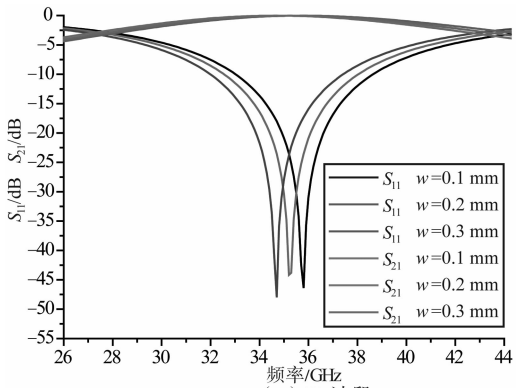


（b）W波段

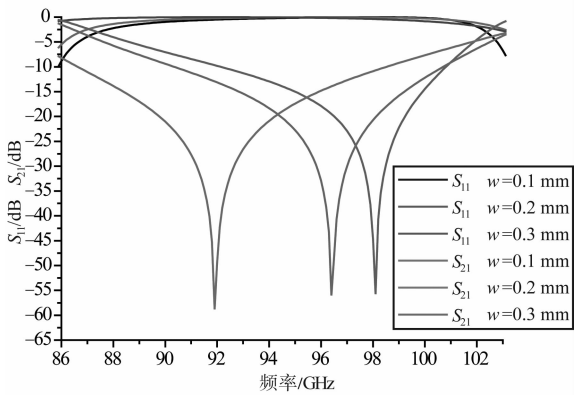
图 3　垂直入射时 l_2 对 FSS 传输特性的影响

有减小，−20 dB 的阻带带宽逐渐增大。结果表明，l_2 对通带和阻带同时起到调节作用。

矩形环间隙 w 的影响研究，分别取 w＝0.1 mm，0.2 mm 和 0.3 mm，垂直电磁波入射时 FSS 的传输特性如图 4 所示。随着 w 的增大，阻带中心频率向左偏移，分别为 98.1，96.4 和 91.9 GHz，−20 dB 阻带带宽逐渐增大。与阻带相比，通带中心频点变化量很小，几乎不受影响，即 w 主要对阻带起调节作用。



（a）Ka波段



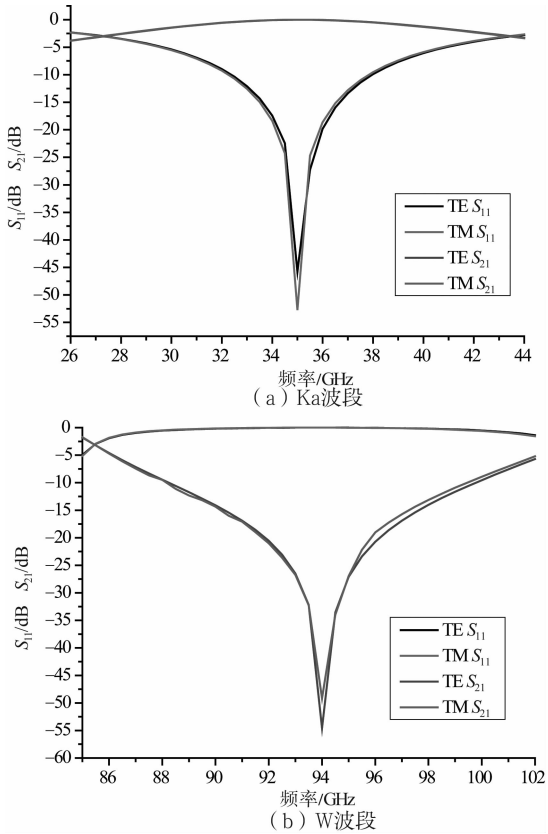
（b）W波段

图 4　垂直入射时 w 对 FSS 传输特性的影响

2.2　入射角和极化方向对传输特性的影响

在不同入射角度和极化方向下，FSS 传输特性的仿真结果如图 5、图 6 所示。

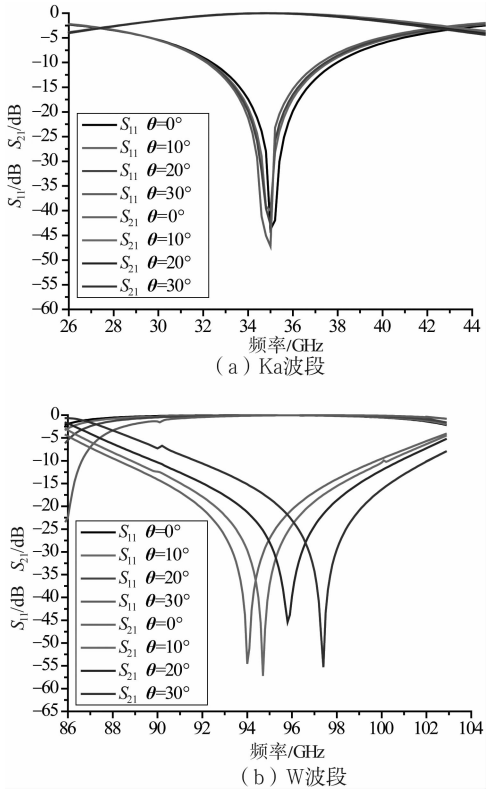
图 5 给出了不同极化时 FSS 传输特性。由图 5(a)可以看出，不同极化下通带中心频率均为 35 GHz，插损为 0.02 dB，－0.5 dB 带宽为 5.85 GHz，基本实现全透射。图 5(b)显示，不同极化下阻带中心频率为 94 GHz，反射系数达到－54.57 dB，－20 dB 带宽为 4.23 GHz。通过分析发现，不同极化下阻带和通带的频响特性曲线基本一致，证明所设计的 FSS 结构具有极化稳定性。



(a) Ka波段
(b) W波段

图 5　垂直入射时不同极化的传输特性

图 6 是 TE 极化下不同入射角的传输特性。从图 6(a)可以得到，随着入射角从 0°到 30°的增加，中心谐振点未发生偏移，透射率在－0.03 dB 以上，基本实现全透射，－0.5 dB 带宽略有减小。从图 6(b)看出，随着角度的增加，阻带谐振频率向高频偏移，－20 dB 带宽基本保持不变。虽然在入射角较大时阻带中心频点发生了偏移，但是偏移率小于 3.6%，反射系数优于－0.14 dB，且在 Ka 波段稳定性良好，实现了滤波特性。



(a) Ka波段
(b) W波段

图 6　TE 极化下不同入射角的传输特性

3　结束语

本文设计了一种新型扇形环状 FSS 结构，经过不断地仿真优化，实现了在 Ka 波段(35 GHz)透射，而在 W 波段(94 GHz)反射，且谐振频率在 35 GHz 时透射系数在－0.03 dB 以上，基本达到了全透射的要求，谐振频率在 94 GHz 时反射系数优于－0.14 dB，基本实现了全反射。这种结构对垂直极化和水平极化的入射波均具有良好的稳定性，并且对 0°～30°范围内的入射角不敏感，通带和阻带的带宽也比较宽。为 FSS 应用于卡塞格伦天线的副反射面的设计提供了一种在 Ka 波段透射、W 波段反射的宽带，极化和角度稳定的低通高阻型频率选择表面。为进一步设计和实验 35 GHz 和 94 GHz 双频共面天线提供了设计基础。

参考文献：

[1] MUNK B A. Frequency Selective Surface: Theory and Design[M]. New York: Wiley, 2000.

[2] WU T K. Frequency Selective Surface and Grid Array [M]. New York: Wiley, 1995.

[3] KNOTT E F, SHAEFFER J F, TULEY M T. 雷达散射截面:预估、测量和减缩[M]. 阮颖铮,陈海,韩晓英,等译. 北京:电子工业出版社,1988.
[4] 赵峻,徐晓文. 一种相控阵天线的FSS天线罩设计与分析[J]. 微波学报,2012(S1):50-54.
[5] 袁良,吴汤炜. 新型开口方环FSS圆极化器的研究与设计[J]. 科技视界,2017(5):108-109.
[6] GENOVESI S, COSTA F, MONORCHIO A. Low-Profile Array with Reduced Radar Cross Section by Using Hybrid Frequency Selective Surfaces[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2012, 60(5): 2327-2335.
[7] 卢俊,陈新邑,汪剑波. 圆环单元FSS对吸波材料特性的影响研究[J]. 物理学报,2008,57(11):7200-7203.
[8] 王秀芝,高劲松,徐念喜. Ku/Ka波段双通带频率选择表面雷达罩设计研究[J]. 物理学报,2013,62(23):370-375.
[9] SONG X Y, YAN Z H, ZHANG T L. Design of Tri-Band FSS Used as Subreflector in Ku and Ka Bands[C]// IET International Radar Conference, Hangzhou: IET, 2015:1-5.
[10] DENG Ruyuan, YANG Fan, XU Shenheng, et al. An FSS-Backed 20/30-GHz Dual-Band Circularly Polarized Reflectarray with Suppressed Mutual Coupling and Enhanced Performance[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2016, 65(2):926-931.
[11] 夏寒. 毫米波高隔离度正交极化卡塞格伦天线设计与研制[D]. 南京:南京信息工程大学,2015.
[12] 程赟. 新型单元微型化Ka波段频率选择表面的设计与仿真[D]. 武汉:武汉理工大学,2014.

作者简介:

韩 可 女,1991年出生,江苏宿迁人,硕士研究生,主要研究方向为FSS、天线设计。
E-mail:anjing_star1018@163.com

葛俊祥 男,1960年出生,江苏南京人,教授、博士生导师,主要研究方向为雷达系统、微波毫米波与天线技术、电磁散射与绕射理论。

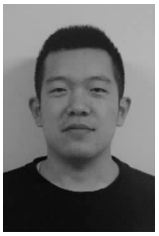
盛夕琛 男,1992年出生,江苏南京人,硕士研究生,主要研究方向为FSS、天线设计。

(上接第337页)

参考文献:

[1] 卢术平,宋海洋,易伟,等. 基于雷达知识库的知识辅助恒虚警检测算法[J]. 现代雷达,2017,39(6):46-49.
[2] 李钦,刘利民,黄巍,等. 基于改进的剔除平均多目标恒虚警处理方法[J]. 探测与控制学报,2015,37(2):59-61,65.
[3] PATRICIO M, FERREIRA F, OLIVEIROS B, et al. Comparing the Performance of Normality Tests with ROC Analysis and Confidence Intervals [J]. Communications in Statistics: Simulation and Computation, 2017, 46(10):7535-7551.
[4] 李亚超,周瑞雨,全英汇,等. 采用自适应背景窗的舰船目标检测算法[J]. 西安交通大学学报,2013,47(6):25-30.
[5] 樊小倩. 自适应恒虚警算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2014.
[6] 俞道滨,吴彦鸿,王宏艳. 相参压制干扰下的CFAR检测性能分析[J]. 电子信息对抗技术,2017,32(2):45-50.
[7] MAGAZ B, BELOUCHRANI A, HAMADOUCHE M. Automatic Threshold Selection in OS-CFAR Radar Detection Using Information Theoretic Criteria [J]. Progress in Electromagnetics Research B, 2011, 30: 157-175.
[8] FARROUKI A, BARKAT M. Automatic Censoring CFAR Detector Based on Ordered Data Variability for Nonhomogeneous Environments[J]. IEE Proceedings: Radar, Sonar and Navigation, 2005, 152(1):43-51.

作者简介:



芦永强 男,1992年生,河北邯郸人,硕士研究生,主要研究方向为信号与信息处理。
E-mail:418944040@qq.com

韩壮志 男,1972年生,河北石家庄人,副教授、硕士生导师,主要研究方向为信号与信息处理。