

# 小型化双频带阻频率选择表面的设计

钟 涛<sup>1</sup>, 张 厚<sup>1</sup>, 吴 瑞<sup>1</sup>, 林永范<sup>1</sup>, 许志永<sup>2</sup>

(1.空军工程大学防空反导学院,西安,710051;2.95844 部队,甘肃张掖,734000)

**摘要** 提出了一种具有双频特性的小型化带阻频率选择表面(Bandstop Frequency Selective Surface,BS-FSS)结构,通过调节所提出单元的结构参数可以实现对 BS-FSS 谐振频率的独立控制,在此基础上,设计了一款工作在 3.84 GHz 和 6.67 GHz 的 BS-FSS。仿真结果表明:所设计的 BS-FSS 的相对带宽分别为 57.8%和 12.9%,并且在工作频段内,对 TE 波和 TM 波均具有较好的极化、角度稳定度。此外,在相同介质条件下,设计的 BS-FSS 单元物理尺寸为 7 mm×7 mm,相比于传统的 FSS 单元,整体尺寸减小了 56.9%,小型化优势显著。

**关键词** 带阻频率选择表面;小型化;双频

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.04.015

**中图分类号** TN82 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)04-0081-04

## A Design of Miniaturized Dual-band Band-stop Frequency Selective Surface

ZHONG Tao<sup>1</sup>,ZHANG Hou<sup>1</sup>,WU Rui<sup>1</sup>,LIN Yongfan<sup>1</sup>,XU Zhiyong<sup>2</sup>

(1.Air and Missile Defense College,Air Force Engineering University, Xian 710051, China;

2.Unit 95844,Zhangye,734000 Gansu,China)

**Abstract:** A miniaturized dual-band band-stop frequency selective surface (BS-FSS) is proposed and analyzed. The resonance frequencies of the proposed BS-FSS can be adjusted by changing the structure parameters, and a miniaturized BS-FSS centered at 3.84 GHz and 6.67 GHz is designed and simulated. The simulated results indicate that the designed BS-FSS obtains bandwidths of 57.8% at 3.84 GHz and 12.9% at 6.67 GHz, and performs very well in the angle stability and the polarization stability within the operating bands. Besides, a whole size of the proposed BS-FSS unit cell is only  $7 \times 7 \text{ mm}^2$ , compared with the conventional FSS unit, the integral size is reduced by 56.9% at least, and the advantages of miniaturization are obvious.

**Key words:** Band-stop frequency selective surface (BS-FSS); Miniaturization; Dual-band

频率选择表面<sup>[1]</sup>(Frequency Selective Surfaces,FSS)是对电磁波起着滤波作用的周期平面结构,电磁波在通过频率选择表面时,其反射系数与传输系数随入射波的频率、入射方向、极化方式的改变而不同。正是这特殊的频率选择电磁特性,频率选择表面被广泛用于微波各领域:作为复合雷达罩,提

高雷达性能<sup>[2-4]</sup>;作为敏感设备的保护罩,隔离外来干扰与高功率微波毁伤<sup>[5]</sup>;与雷达吸波材料(RAM)一起使用,涂敷于飞行器表面来缩减其 RCS<sup>[6-9]</sup>等。

随着通信技术的迅猛发展,双/多频通信技术成为了现在研究发展的热点,FSS 的双频段或多频段设计节约了频谱资源的同时,提高了通信设备的抗

收稿日期:2015-07-13

作者简介:钟 涛(1992—),男,湖北荆州人,硕士生,从事天线与电磁兼容研究.E-mail: 408431907@qq.com

**引用格式:**钟涛,张厚,吴瑞,等.小型化双频带阻频率选择表面的设计[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(4):81-84. ZHONG Tao, ZHANG Hou, WU Rui, et al. A Design of Miniaturized Dual-band Band-stop Frequency Selective Surface[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(4): 81-84.

干扰能力<sup>[10]</sup>。FSS 依靠结构单元间的相互作用从而达到频率选择的特性<sup>[11]</sup>，而在实际应用中，传统 FSS 要达到理想的无限大平面的效果，必定受到物理空间的限制，同时，FSS 单元尺寸越大，电磁波斜入射时相邻单元间的相位差越大，导致 FSS 对入射角度越敏感，角度稳定性越差，小型化 FSS 就可以有效地解决这些问题，从而拓展 FSS 的使用范围。在解决 FSS 多频段设计与小型化设计的问题中，文献[11]从理论的角度分析了 FSS 工作的原理，并用以指导 FSS 的小型化设计；文献[12]提出了利用传统的金属贴片和网状结构联合的双层结构，小型化后的单元尺寸为  $0.208\lambda_0 \times 0.208\lambda_0$  ( $\lambda_0$  为工作中心频率点对应的波长)；文献[13]中研究了曲折型 FSS 和交指型 FSS 的小型化效果，并指出交指型 FSS 在小型化效果和带宽上较曲折型 FSS 有明显优势；文献[14]引入了一种新型双阻带 FSS，分别在 13.4~16.3 GHz (Ku 波段) 和 19.3~28.4 GHz (K 波段) 内形成了 2 个 -50 dB 的传输禁带；文献[15]基于 FSS-CSL 缝隙结构系统分析和设计了多频 FSS。在这些设计中，FSS 的小型化设计与双/多频设计没有得到较好的兼顾，在实际应用中会有一定限制。

本文基于 FSS 的滤波原理，提出了一种新型的小型化双频 BS-FSS 结构，通过软件仿真验证了其良好的极化、角度稳定性，最后通过对 BS-FSS 结构参数的调节，实现对谐振频率的独立控制，而且小型化设计与双频设计都达到了良好的效果。

## 1 FSS 的理论分析

当 FSS 受到电磁波照射时，其金属表面上会产生感应电流，在特定电磁波频率下，感应电流激发的散射场与原来的电磁场发生抵消，从而使电磁波不能通过 FSS，形成反射；而在其它电磁波频率下，感应电流激发的散射场不能抵消原来的电磁场，从而部分或全部电磁波能顺利地通过 FSS，见图 1。

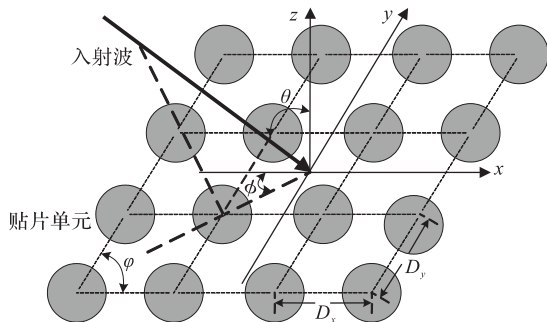


图1 FSS 结构图

Fig.1 Structure of FSS

图 1 自由空间中二维无限大 FSS 周期结构， $x$  和  $y$  方向的周期分别为  $D_x$ 、 $D_y$ ，根据 Floquet 定理<sup>[11]</sup>，周期结构的散射电磁场满足：

$$\begin{cases} S(x + mD_x, y, z) = S(x, y, z)e^{-j\beta_x mD_x} \\ S(x, y + nD_y, z) = S(x, y, z)e^{-j\beta_y nD_y} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\beta_x$  和  $\beta_y$  是分别表示沿  $x$  轴和  $y$  轴的复传播常数； $m, n$  是谐波因子，且  $m, n$  为整数。

由于  $S(x, y, z)$  是  $D_x$  和  $D_y$  的周期函数，故可以展开成 Fourier 级数：

$$S(x, y, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} G_m(y, z) e^{-j(\beta_x + 2\pi m/D_x)x} \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n(x, z) e^{-j(\beta_y + 2\pi n/D_y)y} \quad (2)$$

式中： $G_m(y, z)$ 、 $F_n(x, z)$  是 Floquet 空间谐波振幅，与  $x, y$  无关。当只考虑空间的基本谐波模式时，即  $m=0, n=0$ ，式(2)可以简化为：

$$S(x, y, z) = G_0(y, z)F_0(x, z)e^{-j(\beta_x x + \beta_y y)} \quad (3)$$

## 2 新型 FSS 结构单元的设计

根据 Ben A. Munk 的理论<sup>[1]</sup>可知：FSS 的谐振频率主要依赖于单元的尺寸，对于特定的结构，当尺寸与波长具有确定的关系时，FSS 结构上会发生电磁波的全反射或全透射。基于此理论，提出了图 1 所示的 FSS 单元结构(图中深色部分为金属贴片，浅色为介质板)，并以实现双频带的频率选择特性。对于该 FSS 单元结构，可以分解为 2 个方环贴片型结构的组合，其中方环贴片型结构二是 2 个相邻 FSS 单元的组合(图中虚框内的结构)。

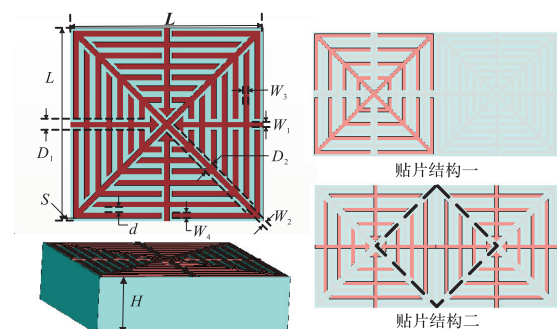


图2 新型 FSS 结构单元

Fig.2 Structure of novel FSS unit

分别取 FSS 结构参数  $L=7\text{ mm}$ ， $D_1=0.4\text{ mm}$ ， $D_2=0.4\text{ mm}$ ， $W_1=W_2=W_3=W_4=0.2\text{ mm}$ ， $d=0.2\text{ mm}$ ， $S=0.1\text{ mm}$ ，采用厚度为  $H=2.0\text{ mm}$ 、相对介电常数为  $\epsilon_r=4.3$ ，电损耗正切值  $\tan \delta=0.025$  的 FR4 介质板，应用电磁场仿真软件进行仿真，得该 FSS 在 TE 波和 TM 波垂直照射下的传输系数和反

射系数,见图 3(曲线有重叠)。

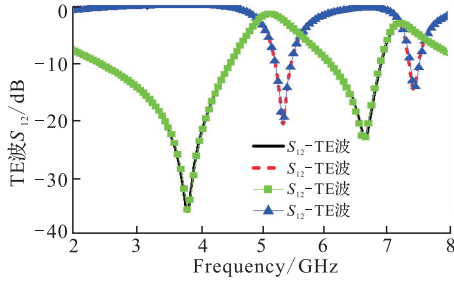


图 3 TE 波和 TM 波的反射系数与传输系数

Fig.3 Reflection and transmission characteristics of the structure

由图 3 可知,该 FSS 结构具有双频带阻的选择特性,阻带中心谐振频率分别为 3.84 GHz 和 6.67 GHz,对应 -10 dB 的阻带频率范围分别为 2.33~4.55 GHz、6.09 GHz~6.95 GHz。分析可知,该 FSS 单元的尺寸为  $0.089\lambda_0 \times 0.089\lambda_0$  ( $\lambda_0$  为第一谐振频率对应真空介质中的波长),与传统的 FSS 单元尺寸<sup>[12]</sup>  $0.208\lambda_0 \times 0.208\lambda_0$  比较,其尺寸缩减了 46.2%,具有良好的小型化效果。

为研究 BS-FSS 对电磁波的角度稳定性,当不同入射角的 TE 波和 TM 波照射在 BS-FSS 上时,BS-FSS 的传输曲线见图 4~5。

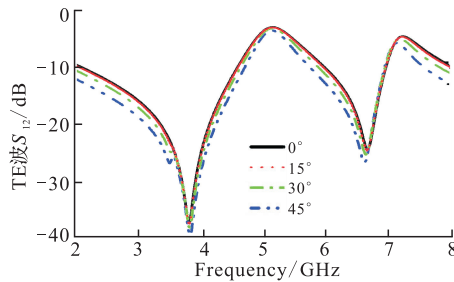


图 4 不同入射角度下 TE 波的传输系数

Fig.4 Transmission characteristics of TE plane wave on different angle

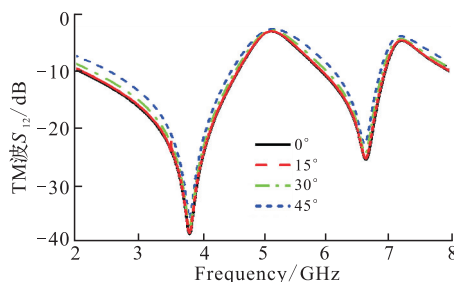


图 5 不同入射角度下 TM 波的传输系数

Fig.5 Transmission characteristics of TM plane wave on different angle

从图 4、图 5 中可以看出:当 TE 波入射时,随着入射角的增大,2 个阻带的带宽均变宽;当 TM 波入射时,随着入射角的增大,2 个阻带的带宽均变窄,入射角的变化几乎不影响电磁波的传输零点频率,故该 BS-FSS 对 TE 波和 TM 波都具有良好的角度

稳定性。

### 3 FSS 的双频特性分析

当照射在 BS-FSS 上的 TE 波和 TM 波频率分别为 3.84 GHz 和 6.67 GHz 时,BS-FSS 单元结构上的表面电流分布见图 6。

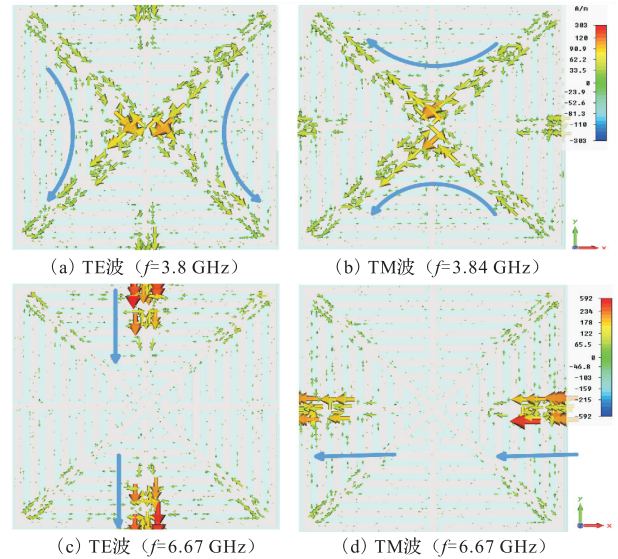


图 6 FSS 单元结构上的表面电流分布

Fig.6 Surface current on the FSS unit

根据 Ben A.Munk 的理论<sup>[1]</sup>可知,当电磁波照射在 BS-FSS 上时,电磁波在 BS-FSS 表面产生谐振,对应的谐振频率与 2 个金属贴片结构的长度相关。由图 6 可知:当 BS-FSS 工作在 3.84 GHz 时,电流主要分布于金属贴片结构 1,当 BS-FSS 工作在 6.67 GHz 时,电流主要分布于金属贴片结构 2;在 TE 波和 TM 波照射下,表面电流的流动方向不同。

以上分析可得:金属贴片结构 1 决定了第 1 个谐振频率的大小,金属贴片结构 2 决定了第 2 个谐振频率的大小。改变金属贴片结构 2 中结构参数  $D_2$  的大小,得到 TE 波的传输系数随  $D_2$  变化的曲线如图 7。

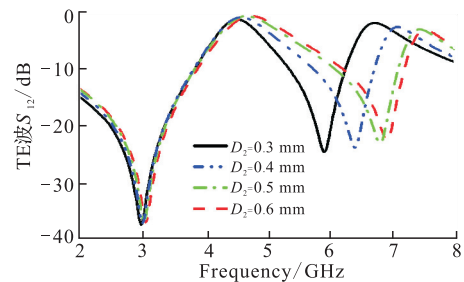


图 7  $D_2$  对 TE 波传输系数的影响

Fig.7 Effect of  $D_2$  to transmission characteristics of TE plane wave

从图 7 中可以看到,随着  $D_2$  的增大,第 2 谐振

频率增大,第1谐振频率几乎保持不变,从而实现第2谐振频率的独立控制。

## 4 结语

本文提出了一种新型小型化的双频 BS-FSS,并应用电磁仿真软件验证了其良好的极化、角度稳定性,研究了不同谐振频率下 BS-FSS 的表面电流分布,并通过调节结构参数实现了对谐振频率的独立控制。该 BS-FSS 具有小型化和双频滤波的特性,结构紧凑,在通信、雷达天线罩设计、雷达吸波材料及高功率微波防护等方面有着良好的应用前景。

### 参考文献(References):

- [1] MUNK Ben A. Frequency Selective Surfaces Theory and Design [M]. New York: Wiley - Interscience, 2000:22-50.
- [2] HUANG Cheng, PAN Wenbo, MA Xiaoliang, et al. Wideband Radar Cross Section Reduction of a Stacked Patch Array Antenna Using Metasurface[J]. IEEE Transaction on Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015,10:1109-1113.
- [3] 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 Phys. Sin, 2013, 62(19): 198401. (in Chinese)
- [4] NARAYAN Shiv, SANGEETHA B, JHA Rakesh Mohan. Frequency Selective Surfaces based High Performance Microstrip Antenna [M]. London: Springer Press, 2016: 1-30.
- [5] LI Meng, BEHDAD Nader. Frequency Selective Surfaces for High-Power Microwave (HPM) Applications[J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 2012, 17:568-571.
- [6] 祝寄徐,裴志斌,屈绍波,等.二阶双通带频率选择表面的设计与验证[J].电子元件与材料,2013,32(7):41-44.  
ZHU Jixu, PEI Zhibin, QU Shaobo, et al. Design and Validation of a Two Orders Dual-band FSS[J]. Electronic Components and Materials, 2013, 32(7): 41-44. (in Chinese)
- [7] YU Yimin, CHIU Chengnan, CHIOU Yihping, et al. A Novel 2.5-Dimensional Ultraminiaturized Element Frequency Selective Surface [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(7): 3657-3363.
- [8] LUO Guoqing, HONG Wei, LAI Qinghuo, et al. Frequency Selective Surfaces with Two Sharp Sidebands Realised by Cascading and Shunting Substrate Integrated Waveguide Cavities [J]. IET Microw Antennas Propag, 2008, 2 (1): 23-27.
- [9] 钟涛,张厚,吴瑞,等.90°极化转换的带通频率选择表面设计研究[J].电子元件与材料,2016,35(3):51-54.  
ZHONG Tao, ZHANG Hou, WU Rui, et al. Design and Study of 90° Polarization Rotating Band-pass Frequency Selective Surface [J]. Electronic Components and Materials, 2016, 35(3): 51-54. (in Chinese)
- [10] 袁子东,高军,曹祥玉,等.一种性能稳定的新型频率选择表面及其微带天线应用[J].物理学报,2014,63(1):014102.  
YUAN Zidong, GAO Jun, CAO Xiangyu, et al. A Novel Frequency Selective Surface with Stable Performance and Its Application in Microstrip Antenna [J]. Acta Phys Sin, 2014, 63(1): 014102 (in Chinese)
- [11] 王秀芝.小型化频率选择表面研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2014.  
WANG Xiuzhi. Study on the Miniaturized-Element Frequency Selective Surfaces [D]. Changchun: A Dissertation Submitted to University of Chinese Academy of Sciences in Partial Fulfillment of the Requirement, 2014. (in Chinese)
- [12] SARABANDI Kamal, BEHDAD Nader. A Frequency Selective Surface with Miniaturized Elements [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 2007, 55: 1239-1245.
- [13] 郑书峰.频率选择表面的小型化设计及优化技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2012.  
ZHENG Shufeng. Study on the Miniaturization and Optimization of Frequency Selective Surfaces [D]. Xi'an: Xidian University, 2012. (in Chinese)
- [14] 许志永,张厚,姜聿焘,等.一种新型双阻带频率选择表面的设计[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(3):49-53.  
XU Zhiyong, ZHANG Hou, JIANG Yutao, et al. A Design of Frequency Selective Surface on a Novel Dual Stop Band[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2014, 15(3): 49-53. (in Chinese)
- [15] 司马格.多频带/双边陡降频率选择表面的分析与设计[D].南京:南京理工大学,2014.  
SIMA Ge. Analyze and Design of Multi-band Frequency Selective Surface [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)

(编辑:姚树峰)