

一种具有良好带通性能的二阶频率选择表面设计与验证

李育青¹, 裴志斌¹, 屈绍波^{1,2}, 徐卓², 周航¹, 林宝勤³

(1. 空军工程大学理学院, 陕西 西安 710051; 2. 西安交通大学电子陶瓷与器件教育部重点实验室, 陕西 西安 710049; 3. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要 高阶频率选择表面(FSS)具有工作带宽易控制、通带内插损小、带外抑制强、通带边缘上升性和陡降性好等特点。提出并设计了一种具有良好带通性能的二阶FSS。该FSS结构是由2层介质板上加载3层具有圆结构的金属层,最外2层为圆金属贴片,中间一层为开圆缝隙金属层。利用直线法对FSS结构进行分析计算,并加工实验样件对结果予以证实。结果表明:该3层FSS具有二阶单通带的特性,3 dB带宽为4.21 GHz,相对带宽为21%,通带平稳光滑,带内插损小,对不同入射角度、不同极化方式的电磁波保持很好的稳定性。

关键词 频率选择表面(FSS);带通性能;角度稳定性,极化稳定性

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.04.016

中图分类号 TN015 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)04-0073-05

频率选择表面(Frequency Selective Surfaces, FSS)是由大量相同单元按二维周期性排列构成的单层或多层平面结构。FSS在微波、红外乃至可见光波段都有广泛的应用,采用FSS技术制作的带通隐身雷达罩,能够有效地降低飞机鼻锥方向的雷达RCS,从而实现对探测雷达波的隐身^[1-2]。

近年来,国外对FSS的研究已经非常成熟^[1-6],在实际中也已被广泛应用。国内开展相关研究起步较晚,也取得了一定的成果:武哲等人探讨了双层频率选择表面结构电性能^[7];高强等人通过分形结构的频率选择表面对双频双极化展开详细的研究^[8];李小秋等人分析了双层的频率选择表面传输特性^[9]。高阶FSS由于极点间相互耦合的作用,具有工作带宽易控制、通带内插损小、带外抑制强、通带边缘上升性和陡降性好、对大入射角稳定性更好的特性。目前大多数的研究主要集中在FSS的基础理论上或比较简单的单层或者2层的FSS结构上,对于3层以上的复合结构实现高阶性能的FSS的理论研究和实验验证还比较少。

圆形结构具有良好的对称性,在优化时也只用调节一个参数,在工程应用中易于设计和实现。基于此,本文提出并设计了一种加载在双层介质板的3层圆结构的二阶单通带FSS,并利用直线法对结构进行了求解,对仿真结果进行详细分析,并加工样件进行实验测试。

1 单元结构设计

图1为此FSS单元结构图。该结构是在双层F4B-2介质板上加载的3层FSS,上下2个外层为金属圆贴片,圆半径 $r_{out} = 2.10$ mm,中间一层为开圆孔缝隙金属板,圆半径 $r_{middle} = 1.30$ mm,图中阴影部分为金属,金属贴片层和金属板层厚度均为 $h_2 = 0.017$ mm。单元结构周期 $D_x = D_y = D = 5.00$ mm,介质板厚度为 $h_1 = 0.60$ mm,介电常数 $\epsilon_r = 2.65$,介质层损耗正切值为0.001。

* 收稿日期:2010-12-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50632030;60871027;60901029);国家重点基础研究发展计划资助项目(2009CB623306);陕西省电子信息系统综合集成重点实验室基金资助项目(200905A)

作者简介:李育青(1987-),男,福建晋江人,硕士生,主要从事频率选择表面的研究。

E-mail: christian-lyq@163.com

2 直线法求解 FSS

应用直线法对此 3 层 FSS 单元进行求解,见图 2。

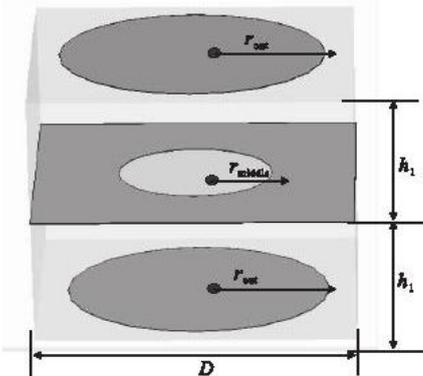


图 1 FSS 单元结构图

Fig. 1 The diagram of the FSS structure

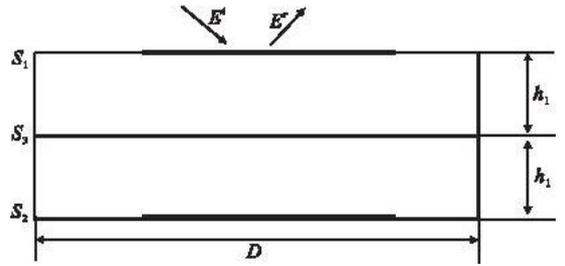


图 2 FSS 结构示意图

Fig. 2 The sketch map of the FSS

设激励源为一平面波 E^i , 入射方向为 (θ, φ) 。设外层贴片 S_1, S_2 上的感应电流分别为 J_1, J_2 , 中间层 S_3 上下面的磁流为 $M, -M$, 现将中间层 S_3 密封以后, 中间夹入的导体面以上的总场可分为 4 部分:

$$E = E^i + E^r + E_{J_1}^S + E_M^S \quad (1)$$

$$H = H^i + H^r + H_{J_1}^S + H_M^S$$

而导体面以下的总场则可分为:

$$E = E_{J_2}^S + E_{-M}^S \quad (2)$$

$$H = H_{J_2}^S + H_{-M}^S$$

首先, 在 FSS 结构贴片、缝隙均不存在的情况下, 可以很方便的得出导体面及介质层所产生的反射场 E^r , 这样, 利用金属贴片 S_1, S_2 上切向电场为零, 以及缝隙 S_3 中切向磁场连续性条件, 可得出如下 3 个等式:

$$(E_{J_1}^S + E_M^S)|_{s_1} = -(E^i + E^r)|_{s_1}$$

$$(E_{-M}^S + E_{J_2}^S)|_{s_2} = 0 \quad (3)$$

$$(H_{J_2}^S + H_{-M}^S - H_{J_1}^S - H_M^S)|_{s_3} = (H^i + H^r)|_{s_3}$$

根据直线法可得出贴片 S_1 上电流 \tilde{J}_1 与其产生的电场 $\tilde{E}_{J_1}^S$ 之间的变换域阻抗方程:

$$\begin{bmatrix} \tilde{E}_{J_1}^S \\ \tilde{E}_{J_1}^S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{Z}_{11}^J & \tilde{Z}_{12}^J \\ \tilde{Z}_{21}^J & \tilde{Z}_{22}^J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{J}_1 \\ \tilde{J}_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

综合上述结果, 在贴片层 S_1, S_2 上的总散射电场, 以及缝隙 S_3 上下面总散射磁场在变换域可以表达为:

$$\begin{aligned} \tilde{E}^S \Big|_{s_1} &= [\tilde{Z}^J] [\tilde{J}] + [\tilde{T}^M] [\tilde{M}] \\ \tilde{E}^S \Big|_{s_2} &= [\tilde{Z}^J] [\tilde{J}] + [\tilde{T}^{-M}] [-\tilde{M}] \\ \tilde{H}^S \Big|_{s_3}^u &= [\tilde{T}^J] [\tilde{J}] + [\tilde{Y}^M] [\tilde{M}] \\ \tilde{H}^S \Big|_{s_3}^d &= [\tilde{T}^J] [\tilde{J}] + [\tilde{Y}^{-M}] [-\tilde{M}] \end{aligned} \quad (5)$$

在将式(5)反变换到空域后, 由于电磁流在贴片层和缝隙中存在, 因此, 在空域中, 可根据贴片层以及缝隙的空间分布, 对所得空域矩阵进行减化整理, 最后根据式(3)可建立矩阵方程:

$$\begin{pmatrix} Z^J & 0 & T^M \\ 0 & Z^J & T^M \\ -T^J & T^J & Y^{-M} - Y^M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_1 \\ J_2 \\ M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -E^i - E^r \\ 0 \\ H^i + H^r \end{pmatrix} \quad (6)$$

求解方程组(6),可以得出贴片层 S_1 、 S_2 以及缝隙 S_3 上的感应电磁流值,将结果再转换到变换域后,可以得出各个电磁流在不同区域所产生的场,从而得到整个 FSS 单元的全域解。

3 传输特性分析

3.1 通带性能分析

图 3 为在 TE 极化波正入射时此 FSS 的 S_{11} 和 S_{21} 频率响应曲线。可以看出,FSS 的通带为二阶特性的通带,它的 2 个极点分别为 18.41 GHz 和 19.78 GHz。此时,2 个极点相互间耦合非常好,形成一个平稳光滑且插损很小的通带,它的 3 dB 工作通带为 18.13 - 22.34 GHz,带宽为 4.21 GHz,相对带宽为 21%。从 S_{21} 曲线可以看出,在整个通带内曲线都非常平整光滑,没有特别大的差损点,且中心插损最大仅为 0.10 dB。而在通带外, S_{21} 曲线迅速降到 -20 dB 以下并一直保持,所以它的带外抑制也非常好。因此,此 FSS 具有很好的通带性能。

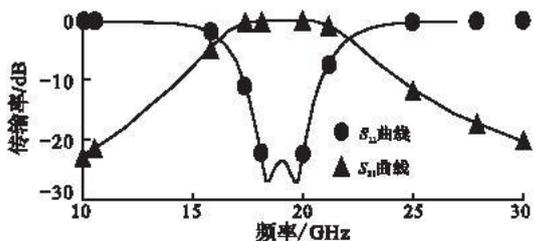


图 3 TE 波正入射时 FSS 的 S_{11} 和 S_{21} 传输特性响应曲线
Fig. 3 Simulated reflection and transmission coefficient of the FSS with normal TE wave

3.2 角度稳定性

在实际应用中,入射波的角度范围往往很大。因此,一个具有较好效果的 FSS 结构需要在通带范围内对角度较好的稳定性。选取在 TE 极化波下 0° 、 15° 、 30° 、 45° 这 4 个角度入射时的 S_{21} 传输特性曲线进行分析,见图 4。从图中可以看出, 0° 入射时,它的 3 dB 通带为 18.13 - 22.34 GHz,带宽为 4.21 GHz,中心最大损耗为 0.10 dB; 15° 入射时,它的 3 dB 通带为 18.17 - 22.41 GHz,带宽为 4.24 GHz,中心最大损耗为 0.11 dB; 30° 入射时,它的 3 dB 通带为 18.28 - 22.56 GHz,带宽为 4.32 GHz,中心最大损耗为 0.14 dB; 45° 入射时,它的 3 dB 通带为 18.46 - 22.68 GHz,带宽为 4.22 GHz,中心最大损耗为 0.69 dB。从 0° 到 45° ,工作通带仅仅漂移了 0.28 GHz,且带宽几乎维持在 4.21 GHz 左右;而通带最大损耗在 45° 时也仅为 0.69 dB;另外,从通带整体来看,在大角度入射时,通带还是保持平稳光滑的性质。因此,此 FSS 具有很好的角度稳定性。

3.3 极化稳定性

从单元结构模型可以知道,此结构具有上、下、左、右的良好四面对称性。因此,对于不同极化方式的电磁波,它的频率响应特性也应该是大致相同的。选取 TE 波与 TM 波分别入射时此 FSS 的频率响应特性曲线进行分析,见图 4 - 5。

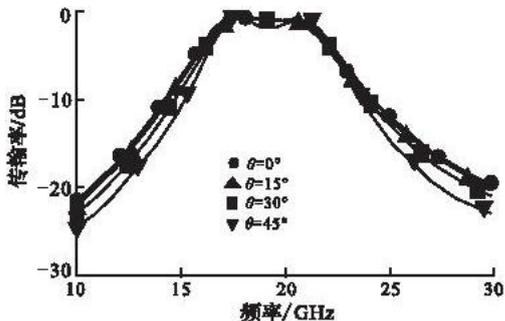


图 4 TE 波入射时 0° - 45° 的 S_{21} 频率响应特性曲线

Fig. 4 The simulated transmission coefficient of the FSS with different TE wave

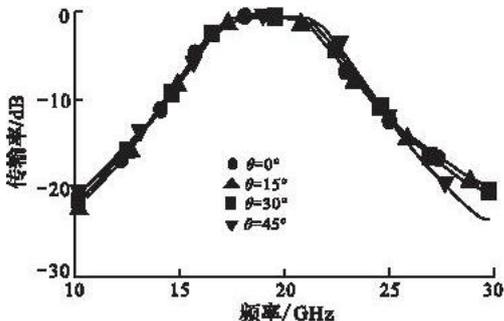


图 5 TM 波入射时 0° - 45° 的 S_{21} 频率响应特性曲线

Fig. 5 The simulated transmission coefficient of the FSS with different TM wave

在 TM 极化时, 0° 入射时,3 dB 工作通带为 18.14 - 22.37 GHz,带宽为 4.24 GHz,最大损耗为 0.10 dB; 15° 入射时,通带为 18.19 - 22.46 GHz,带宽为 4.27 GHz,最大损耗为 0.11 dB; 30° 入射时,通带为 18.28 - 22.61 GHz,带宽为 4.33 Hz,最大损耗为 0.12 dB; 45° 入射时,通带为 18.38 - 22.79 GHz,带宽为 4.41 GHz,

最大损耗仅为 0.13 dB。从 0° 到 45° , 在 TM 极化方式下, FSS 的工作通带仅漂移了 0.38 GHz, 最大差损仅 0.13 dB, 工作带宽从 4.24 GHz 稍微展宽到 4.41 GHz 左右。

通过与 TE 极化波入射 FSS 的具体通带指标相比较, 可以知道: TE 波和 TM 波入射时, FSS 工作通带的性质、对角度的稳定性几乎是一致的。因此, 此 FSS 具有很好的极化稳定性。

4 实验测试

利用印刷电路板技术制备此 FSS 结构单元的实验样件, 大小为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 。利用自由空间法测试设备对实验样件进行角度稳定性和极化稳定性的实验测试, 以验证理论计算结果。测试频段为 14 - 26 GHz。

测试时, 可以通过转动 FSS 样件改变电磁波的入射角度, 得到 FSS 实验样件在不同入射角度时传输率曲线。以 FSS 屏表面的中垂线为轴线, 同时 90° 旋转 2 个测试喇叭来实现电磁波磁化方式的转变, 分别得到 TE 波和 TM 波的测试曲线, 测试结果见图 6 - 7。从结果可以看出: 测试结果曲线有一定起伏, 这主要是由于测试环境、实验条件和加工样件的误差所致, 但整体看实验测试曲线与仿真计算曲线还是基本稳合, 验证了此 FSS 的性能。

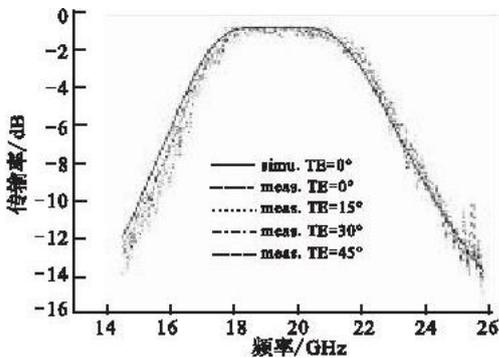


图 6 TE 波测试的传输曲线与正入射仿真曲线

Fig. 6 The comparison of transmission coefficient between measured results under different angles TE wave and simulated results with normal TE

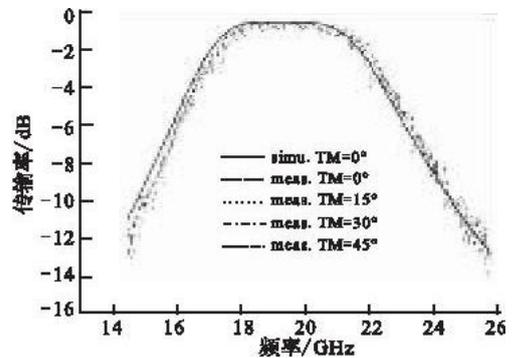


图 7 TM 波测试的传输曲线与正入射仿真曲线

Fig. 7 The comparison of transmission coefficient between measured results under different angles TM wave and simulated results with normal TM

5 结束语

本文设计出了一种由圆环金属贴片和圆缝隙金属屏加载于介质层叠组成的 3 层 FSS, 利用直线法对结构单元进行了求解, 得到了不同入射角度、不同极化方式下这种单元 FSS 的频率响应特性曲线, 同时对频率响应特性曲线进行详细具体的分析。采用印刷电路板技术制备出了相应的实验样件, 利用自由空间法测试设备对样件进行了近场测试, 测试值与计算值基本一致。

计算和实验结果表明: 这种圆结构的 3 层 FSS 具有二阶单通带性能, 它的带宽约为 4.21 GHz, 相对带宽为 21%, 通带平稳光滑, 在通带内插损小, 且对不同角度、不同极化方式入射的电磁波保持很好的稳定性, 具有很高的工程应用价值。

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] Pous R, Pozar D M. A frequency - selective surface using aperture couples microstrip patches[J]. IEEE trans antennas propagat, 1991, 39: 1763 - 1769.
- [4] Abbaspour Tamijani A, Schoenlinner B, Sarabandi K, et al. A new class of bandpass frequency selective structures[C]//IEEE AP - S int symp. Columbus: IEEE press, 2003: 817 - 820.

- [5] Fotheringham E, Romisch S, Smith P C, et al. A lens antenna array with adaptive optical processing[J]. IEEE trans antennas propagat, 2002, 50: 607 – 617.
- [6] Abbaspour Tamijani A, Sarabandi K K, Rebeiz G M. Antenna – filter – antenna arrays as a class of bandpass frequency selective surface[J]. IEEE trans microw theory tech, 2004, 52(8): 1781 – 1789.
- [7] 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 electronic sinica,2005, 33(3):517 – 520. (in Chinese)
- [8] 高强,闫敦豹,袁乃昌,等. 双频双极化频率选择表面[J]. 电子与信息学报,2007,29(2):506 – 508.
GAO Qiang, YAN Dunbao, YUAN Naichang, et al. Dualband and dual – polarized frequency selective surfaces[J]. Journal of electronics and information technology,2007,29(2):506 – 508. (in Chinese)
- [9] 李小秋,冯晓国,高劲松. 双屏频率选择表面传输特性的研究[J]. 微波学报,2009,25(5):16 – 18.
LI Xiaoqiu, FENG Xiaoguo, GAO Jinsong. Research on transmission characteristic of double screen frequency selective surfaces [J]. Journal of microwaves,2009,25(5):16 – 18. (in Chinese)

(编辑:徐敏)

The Design and Validation of A Second – order FSS with Good Band – pass Performances

LI Yu – qing¹, PEI Zhi – bin¹, QU Shao – bo^{1,2}, XU Zhuo², ZHOU Hang¹, LIN Bao – qin³

(1. Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Electronic Materials Research Laboratory, Key Laboratory of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Based on that the high order band – pass frequency selective surface (FSS) has the advantages of bandwidth controllable flexibility, stable performance, flat pass band and low insertion loss, a second – order FSS with good band – pass performances is designed in this paper. The designed FSS is composed of two layers of dielectric boards loaded with three layers of metallic patterns sheets. The two outer layers are of circular metallic patches while the middle layer is of circular aperture. The straight – line method is used to analyze and calculate the structure of the FSS, and a test sample is fabricated and measured to verify the results. The experiment results show that such a three – layer FSS has the desired second – order band – pass properties, the 3 dB bandwidth is of 4.21 GHz, the relative bandwidth is 21% , and the pass – band is quite flat and smooth in which the insertion loss is low. Moreover, the FSS can keep stable performances under different incident angles and polarization states.

Key words: frequency selective surfaces; band – pass performances; angular stability; polarization stability