

# 一种新型双阻带频率选择表面的设计

许志永<sup>1</sup>, 张厚<sup>1</sup>, 姜聿焘<sup>1</sup>, 谭西江<sup>2</sup>

(1.空军工程大学防空反导学院,陕西西安 710051; 2.93505部队,河北廊坊,065000)

**摘要** 提出一种新型双阻带 FSS 结构。新结构采用圆环贴片与叠加 Y 环贴片作为基本单元,利用 2 种贴片单元之间的耦合实现双阻带特性,应用谱域法对新型 FSS 单元进行分析设计,仿真验证不同角度不同极化方式的电磁波入射时新结构的传输特性,结果表明:该型 FSS 结构分别在 13.4~16.3 GHz(Ku 波段)和 19.3~28.4 GHz(K 波段)内形成 2 个 -5 dB 的传输禁带,并且具有较好的角度和极化稳定性。

**关键词** 频率选择表面;双阻带;角度稳定性;极化稳定性

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.03.012

**中图分类号** O441 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)03-0049-04

## A Design of Frequency Selective Surface on A Novel Dual Stop Band

XU Zhi-yong<sup>1</sup>, ZHANG Hou<sup>1</sup>, JIANG Yu-tao<sup>1</sup>, TAN Xi-jiang<sup>2</sup>

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;  
2. Unit 93505, Langfang 065000, Hebei, China)

**Abstract:** A novel monolayer frequency selective surface with dual-stop-band is presented, and this new structure is composed of circular aperture element and overlapping Y loop element to obtain these dual-stop-band characteristics by utilizing the coupling of the two elements. The spectrum domain approach and the electromagnetic simulation software are used to analyze the characteristics of the structure. The results show that the structure FSS forms two transmission prohibited bands with -5 dB within a lower stop band (between 13.4 GHz and 16.3 GHz) and a higher stop band (between 19.3 GHz and 28.4 GHz) respectively, and the new structure is good in angle stability and polarization stability. The novel FSS structure has a great application potential in the antenna multiplexer of different-frequency, radar anti-jamming and the realization of stealth of the antenna radome.

**Key words:** frequency selective surface; dual-stop-band; angle stability; polarization stability

频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS),是一种由无源谐振单元(金属贴片或孔径)在介质层上按周期性排列构成的单层或多层平面阵列

结构<sup>[1]</sup>。FSS可以有效地控制电磁波的反射与透射,当入射波的频率接近贴片或孔径的谐振频率点时,FSS表现出对入射波全反射或全透射特性<sup>[2]</sup>。

收稿日期:2013-08-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61372034)

作者简介:许志永(1989-),男,河南商丘人,硕士生,主要从事天线、电磁防护研究。E-mail: xuzhy1109@126.com

**引用格式:**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):49-52. 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): 49-52.

正是这种对入射波全反射和全透射的特性,使得频率选择表面得到了充分的研究<sup>[3-6]</sup>,并被广泛应用到了军工领域,尤其是在天线领域,可以将 FSS 用作雷达天线副反射面,通过选择性的反射或透射来自不同馈源不同频段的电磁波,实现天线的多频复用,提高天线的工作效率<sup>[7-8]</sup>。基于此,本文应用谱域法设计了一种新型双阻带 FSS 结构。

## 1 理论分析

当电磁波入射到频率选择表面上时,在 FSS 的金属表面上会产生感应电流,首先要建立散射场和感应电流之间的积分方程,然后进行离散计算。图 1 为设计的新频率选择表面, $\mathbf{X}$  和  $\mathbf{Y}$  为表面的切向方向, $\mathbf{Z}$  为法线方向, $\mathbf{X}$  和  $\mathbf{Y}$  方向上排列着无限的贴片,周期单元在  $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{Y}$  方向上的长度分别为  $a$ 、 $b$ ,入射波与  $\mathbf{Z}$  轴和  $\mathbf{X}$  轴的夹角分别为  $\theta$ 、 $\varphi$ 。

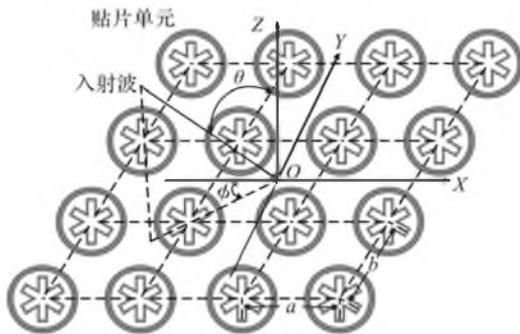


图 1 新型单元 FSS 结构

Fig.1 FSS structure with novel elements

此处,通常在计算中假设贴片为无限薄,则感应电流只有切向分量,根据散射场和感应电流的关系,可得散射场磁矢位和感应电流的关系为:

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_x(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ \mathbf{A}_y(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \end{bmatrix} = \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) * \begin{bmatrix} \mathbf{J}_x(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ \mathbf{J}_y(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  为感应电流产生的磁矢位; $\mathbf{J}$  为感应电流密度;“\*”为卷积; $\mathbf{G}$  为自由空间电场并矢格林函数,且:

$$\mathbf{G} = \frac{e^{-jk_0 r}}{4\pi r} \mathbf{I} \quad (2)$$

式中: $k_0$  为自由空间波数, $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ , $\omega$  为角频率; $\mathbf{I}$  为二阶单位并矢; $r$  为  $\mathbf{z}=0$  平面上场点到源点的距离, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。

贴片的散射场  $\mathbf{E}^s$  可由磁矢位  $\mathbf{A}$  得到:

$$\mathbf{E}^s = -j\omega\mu_0 \mathbf{A} + \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) \quad (3)$$

经计算可以得到如下散射场表达式:

$$\mathbf{E}^s(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \begin{bmatrix} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + k_0^2 & \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k_0^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_x \\ \mathbf{A}_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

对于导体贴片单元,其切向电场的边界条件可表示为:

$$\mathbf{E}_t = \mathbf{E}_i^s + \mathbf{E}_i^i = 0 \quad (5)$$

式中, $s, i$  分别对应散射场和入射场。再根据二维无限大周期结构满足 Floquet 定理可求得贴片单元周期结构的入射电场积分方程的谱域表达式为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_x^i(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ \mathbf{E}_y^i(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \end{bmatrix} = -\frac{2\pi}{j\omega\epsilon_0 ab} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} k_0^2 - a_m^2 & -a_m \beta_n \\ -a_m \beta_n & k_0^2 - \beta_n^2 \end{bmatrix} G(a_m, \beta_n) \begin{bmatrix} J_x(a_m, \beta_n) \\ J_y(a_m, \beta_n) \end{bmatrix} \exp(ja_m x) \exp(j\beta_n y) \quad (6)$$

式中: $\alpha_m = \frac{2m\pi}{a} + k_x^i$ ;  $\beta_n = \frac{2n\pi}{b} + k_y^i$ ;  $k_x^i$  和  $a$  分别为在  $x$  方向的入射波数和周期, $k_y^i$  和  $b$  分别为在  $y$  方向的入射波数和周期; $J$  为入射波激励起贴片单元上的感应电流。最后用矩量法求解上式,求出 FSS 结构的传输系数。计算时所选取的单元见图 1。

## 2 新型 FSS 单元的结构设计

整个单元结构由 3 部分组成,见图 2,图 2(a)中黑色部分为金属贴片。将该单元印制在介电常数为 2.2 的 FR4 介质基底上,基底厚度取 2.2 mm,胶合层厚度忽略不计。FSS 贴片单元由一个圆环贴片和一个叠加 Y 环贴片组合而成,由于该单元在结构上高度对称,具备了对入射角度和极化不敏感的特质,应用谱域法对新结构的几何参数进行优化计算,最终确定取  $a = b = 5.6$  mm,  $w = 0.6$  mm,  $c = 0.2$  mm,  $L = 1.8$  mm,  $l = 1.6$  mm,  $R = 2.4$  mm,  $r = 2.0$  mm,  $\varphi = 60^\circ$ 。

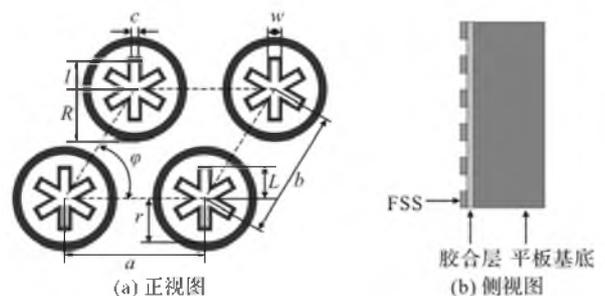


图 2 新型 FSS 结构单元

Fig.2 Structure of the novel FSS element

### 3 双阻带特性的仿真与分析

使用电磁仿真软件对图1的二维电磁结构进行仿真计算,结构单元设为 Unit Cell,入射波为垂直入射的 TE 波时,得到其传输系数曲线,见图3,从图3可以看出,新结构表现出双阻带特性,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-5 dB 的传输禁带。

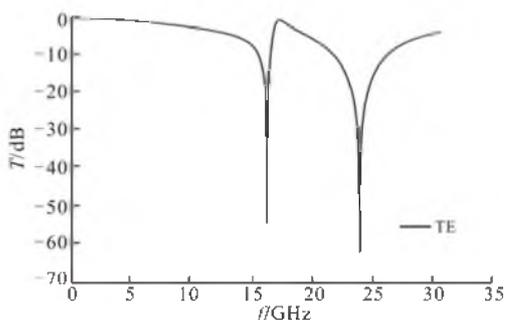


图3 TE波垂直入射时的传输系数

Fig.3 Transmission of the novel FSS for normal incident waves

该结构是一种组合型的新结构,分别研究相同条件下这3种FSS结构的传输特性,结果见图4,由图可知,新单元的特性并不只是2种单元结构特性的简单叠加,而是由于新结构中叠加Y环贴片与圆环贴片上感应电场之间的耦合作用,由叠加Y环决定的阻带谐振频率向高频漂移,从原来的20.8 GHz向高频漂移到23.4 GHz,而由圆环贴片决定的谐振频率从19.5 GHz向低频漂移到15.8 GHz。

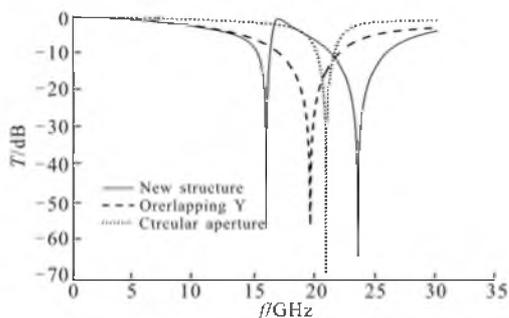


图4 3种FSS结构的传输系数

Fig.4 Transmission of the three FSS structure for normal incident waves

#### 3.1 FSS结构的角稳定性

由于FSS通常应用在具有一定入射角度的工程实践中,为此,在实际的工程设计中,对FSS结构的稳定性要求很高,因此,需要考察新型单元在不同入射角下的传输特性。

图5为TE极化方式下电磁波以 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 入射时新结构的传输系数,分析可知,随着入射角度增

大,第1阻带中心谐振频率分别为15.8 GHz、15.9 GHz、16.0 GHz,平均偏移率仅为0.6%, $-5$  dB带宽基本未变;第2阻带中心谐振频率分别为23.4 GHz、23.3 GHz、23.1 GHz,平均偏移量也仅为0.6%, $-5$  dB带宽分别为9.1 GHz、8.9 GHz、8.8 GHz,平均变化量仅为1.6%。

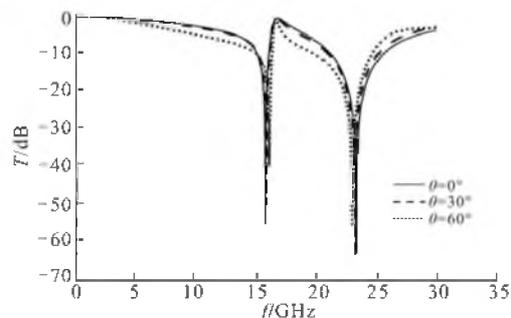


图5 TE波不同角度入射时的传输系数

Fig.5 Transmission of the novel FSS for different incident angles with TE polarized waves

图6为TM波以不同角度入射时的传输系数,由图可知,第1阻带中心谐振频率分别为16.0 GHz、16.1 GHz、16.1 GHz,平均偏移率仅为0.3%, $-5$  dB带宽基本未变;第2阻带中心谐振频率分别为23.6 GHz、23.3 GHz、22.9 GHz,平均偏移量仅为1.4%, $-5$  dB带宽分别为8.7 GHz、8.8 GHz、8.6 GHz,平均变化量仅为1.1%。

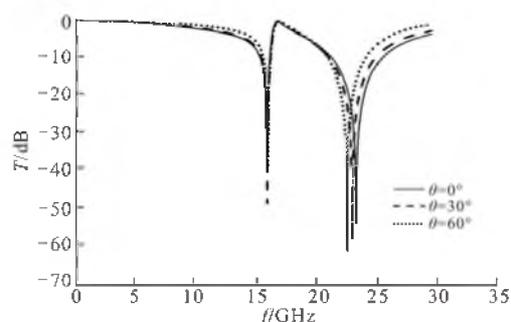


图6 TM波不同角度入射时的传输系数

Fig.6 Transmission of the novel FSS for different incident angles with TM polarized waves

综上所述可知,无论是TE波还是TM波入射,该型FSS结构均表现出很好的角稳定性。

#### 3.2 FSS结构的极化稳定性

实际应用中,入射电磁波的极化方式是未知的,因此,在选取FSS结构时要考虑到FSS的极化稳定性。基于此,本文对新设计的FSS结构的极化稳定性进行了研究,图7是垂直入射时不同极化波的传输特性,由分析可知,垂直入射时,TE极化波阻带中心频率分别为15.8 GHz和23.4 GHz;TM极化时分别为16.0 GHz和23.6 GHz,都仅向高频漂移了200 MHz,平均偏移量仅为1.0%,并且 $-5$  dB带

宽没有发生变化。

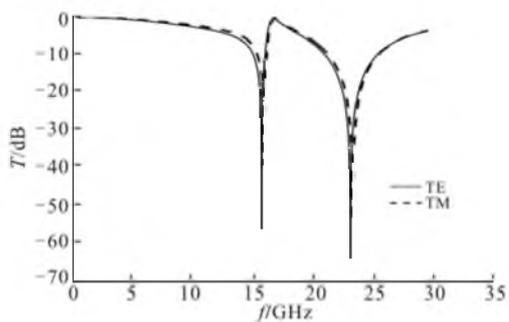


图7 TE、TM波垂直入射时FSS的传输系数

Fig.7 Transmission of the novel FSS for different polarized waves of  $0^\circ$  incident angles

图8是 $45^\circ$ 入射时不同极化波的传输特性。TE波为 $45^\circ$ 入射时的阻带中心频率分别为16.0 GHz和23.0 GHz, TM波入射时分别为16.1 GHz和23.0 GHz,仅向高频漂移了100 MHz和向低频漂移了200 MHz,  $-5$  dB带宽也基本未变。

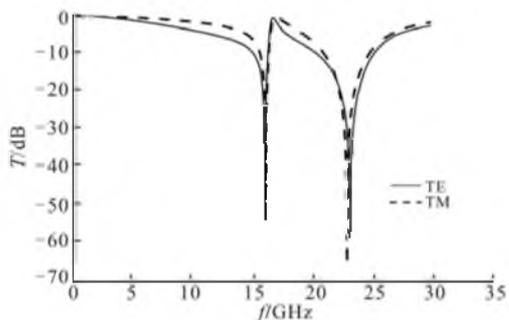


图8 TE、TM波 $45^\circ$ 入射时FSS的传输系数

Fig.8 Transmission of the novel FSS for different polarized waves of  $45^\circ$  incident angles

由此可以看出,该新型结构在不同的极化波入射时,表现出良好的双阻带特性,表明该结构具有较好的极化稳定性。

## 4 结语

本文基于谱域法设计了一种新型双阻带频率选择表面,并进行了仿真验证。研究表明该新型FSS表现出双阻带特性,并且具有很好的角度和极化稳定性,可以用来设计天线副反射面以实现天线的多频工作,还可以应用在超宽带天线的陷波以及雷达天线罩的设计等领域,具有广阔的应用前景。

### 参考文献(References):

- [1] Mittra R, Chan C, Cwik T. Techniques for analyzing frequency selective surfaces areview[J]. IEEE trans, 1988, 76(12): 1593-1615.
- [2] Ben A, Munk. Frequency selective surface: theory and

design [M]. New York: Wiley-interscience, 2000.

- [3] 贾宏燕,高劲松,冯晓国,等.一种新型组合单元频率选择表面[J]. 光学学报,2008,28(8):1596-1600.  
JIA Hongyan, GAO Jinsong, FENG Xiaoguo, et al. Novel composite element frequency selective surface [J]. Acta optica sinica, 2008, 28(8): 1596-1600. (in Chinese)
- [4] 吴翔,裴志斌,屈绍波.双阻带小型化频率选择表面的设计[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2011,12(2):86-89.  
WU Xiang, PEI Zhibin, QU Shaobo. The design of dual stop-band miniaturized frequency selective surface [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2011, 12(2): 86-89. (in Chinese)
- [5] 苏学军,高劲松,朱华新,等.窄通带高透过频率选择表面[J]. 光学精密工程,2011,19(3): 561-567.  
SU Xuejun, GAO Jinsong, ZHU Huaxin, et al. Frequency selective surface with narrow passband and high transmittance [J]. Optics and precision engineering, 2011, 19(3): 561-567. (in Chinese)
- [6] Kazuko Fuchi, Junyan Tang. Origami tunable frequency selective surfaces [J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2012, 11: 473-475.
- [7] 史为民,方大刚,陶玉明.毫米波/红外频率选择表面研究[J]. 电波科学学报,1995,10(2): 183-187.  
SHI Weimin, FANG Dagang, TAO Yuming. Research on mm-wave infrared frequency selective surface [J]. Chinese journal of radio science, 1995, 10(2): 183-187. (in Chinese)
- [8] 万顺生,王晓春,周一帆.频率选择表面天线复用副面的研究[J]. 南京航空航天大学学报,2005,37(6): 787-789.  
WANG Shunsheng, WANG Xiaochun, ZHOU Yifan. Antenna multiplexer of frequency selective surface [J]. Journal of Nanjing university of aeronautics & astronautics, 2005, 37(6): 787-789. (in Chinese)

(编辑:田新华)