

文章编号 1004-924X(2008)11-2076-05

新型单元的频率选择表面

贾宏燕^{1,2}, 高劲松¹, 冯晓国¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要:通过对传统的十字单元进行改进,设计了一种新型单元的频率选择表面(FSS)。利用模式匹配法,从理论上对比分析了传统十字单元 FSS 和这种新型单元 FSS,研究了 TE 波入射时角度变化和大角度入射时极化方式变化对中心频率的影响,并采用镀膜和光刻技术制备了新型单元 FSS 的实验样件。在微波暗室中进行了测试,得到的实验曲线与理论仿真曲线基本一致。结果表明,传统十字单元 FSS 不能实现中心频率的角度稳定性,TE 波 $0^\circ\sim 45^\circ$ 的中心频率漂移为 300 MHz,并且 45° 入射时中心频率的极化稳定性很差,漂移量为 800 MHz;而新型单元 FSS 具有中心频率的角度稳定性,TE 波 $0^\circ\sim 45^\circ$ 的入射中心频率漂移量仅为 100 MHz,同时对大的入射角度具有中心频率的极化稳定性。

关键词:频率选择表面;极化稳定性;谐振频率;角度稳定性

中图分类号: TN713 **文献标识码:** A

Novel element frequency selective surface

JIA Hong-yan^{1,2}, GAO Jin-song¹, FENG Xiao-Guo¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: In order to improve the transmission property of Frequency Selective Surface (FSS) structure, a novel element FSS containing an improved cross element was presented. By applying modal matching approach, the novel element FSS was compared with the traditional cross element FSS theoretically. The influence of the changing angles of TE incidence and the polarizations of large angle incident waves on center frequency was researched. With coating technology and lithography, FSS samples with improved elements were made. The tests were carried out in a microwave darkroom. The measured curve shows a good agreement with the emulated curve. The results show that the traditional cross element FSS can not have angle independence on TE incident waves or polarization independence on large angle incidence, the drift of resonant frequency is 300 MHz for $0\sim 45^\circ$ TE incidence, and 800 MHz for different polarizations of 45° incident wave; In modified structure, the resonant frequency of FSS remains independent of incident angles, the drift of resonant frequency is only 100 MHz for $0\sim 45^\circ$ incident wave, also, the resonant frequency maintains the independence for different polarizations.

Key words: Frequency Selective Surface (FSS); polarization independence; resonant frequency; independence of incident angle

收稿日期:2007-12-05;修订日期:2008-01-24.

基金项目:中国科学院国防创新基金资助项目(No. CXJJ-149)

1 引言

频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)是一种二维周期阵列结构,可以用作空间滤波器,与电磁波相互作用表现出明显的带通或带阻的滤波特性^[1-2]。FSS 具有特定的频率选择作用而被广泛地应用于微波、红外至可见光波段^[3-5]。金属屏上周期性的开孔单元构成的 FSS 结构,因其能够实现谐振频率电磁波的完全透射,其他频段电磁波的完全反射,通常称为带通 FSS。

描述 FSS 频率响应特性的主要指标有中心频率、中心频率处的透过率、传输带宽等。这些特性主要取决于 FSS 谐振单元的形式,单元的排布方式以及周围介质的电性能^[6]。影响这些特性的因素很多,其中入射波的极化方式与入射角度是两个重要的影响因素。在 FSS 的实际工程应用中,很多情况下入射波的极化方式是未知的,并且入射角度范围大,此时要采用一种对不同入射角度和极化方式性能都稳定的 FSS 结构,即兼具极化和角度稳定性的 FSS。

传统正方形栅格排布的十字单元 FSS 具有结构的对称性,在正入射时具有极化稳定性,但是当入射电磁波的入射角度增大时,谐振频率随极化方式的改变有很大的漂移,这极大地降低了 FSS 的性能;另一方面十字单元和一般普通单元一样随入射角度的变化,中心频率不具备角度稳定性,漂移量很大。这是 FSS 实现工程应用急需解决的问题。

FSS 的角度稳定性问题引起了人们的极大关注:侯新宇等通过优选图形单元-Y 孔单元的方法来实现 FSS 对入射角度的稳定性^[7];Munk 等则是采用加载电介质的方式改善大角度入射时 FSS 的传输特性^[1]。但是上述两种解决方法也存在一定的缺陷:Y 形单元极化稳定性不好^[8-9];加载电介质又往往会增加传输损耗^[10]。同时对于 FSS 极化稳定性的问题,正入射时可以选取对称单元实现极化稳定性,但是工程应用中往往涉及到大的入射角度,此时仅仅依靠单元的对称性已经不能实现结构的极化稳定性。

本文提出了一种简单有效的新方法,以传统的正方形栅格排布的十字单元 FSS 为基础,把每个十字单元末段加载一段箭头形的孔径,给出了

一种改进的新型单元 FSS 设计。这种改进的 FSS 结构在具有角度稳定性的同时,兼具大角度极化稳定性的特性。为了进行对比分析,分别对传统十字单元 FSS 结构和改进单元 FSS 结构,利用模式匹配方法进行了理论分析,并制作了实验样件,在微波暗室中进行测试。理论计算结果得到了实验验证。

2 理论分析

分别对传统十字单元 FSS 和改进的 FSS 结构,应用模式匹配法进行分析。将周期阵列前后自由空间电磁场分别以 Floquet 谐波模式展开,然后在周期阵列表面上应用横向场连续条件,便可以得到关于周期单元上未知电场的积分方程。

孔径电场的积分方程如下:

$$\sum_{r=1}^2 \frac{2A^r \Phi_{00}^r}{\eta_{00}^r} = \sum_{r=1}^2 \left[\frac{1}{\eta_{00}^r} + \frac{1}{Z_{00}^r} \right] \Phi_{00}^r \cdot \int_a \mathbf{E}_b \times \Phi_{00}^{r*} \cdot \mathbf{Z} ds + \sum_{r=1}^2 \sum_{i=2}^{\infty} \left(\frac{1}{\eta_{pq}^r} + \frac{1}{Z_{pq}^r} \right) \Phi_{pq}^r \int_a \mathbf{E}_b \times \Phi_{pq}^{r*} \cdot \mathbf{Z} ds$$

$$\text{透射系数: } T_1^r = \int_a \mathbf{E}_b \times \Phi_{00}^{r*} \cdot \mathbf{Z} ds$$

$$\text{反射系数: } R_1^r = \int_a \mathbf{E}_b \times \Phi_{00}^{r*} \cdot \mathbf{Z} ds - A^r$$

式中, A^r 为入射波振幅。 Φ_{pq}^r 是一组完备正交的 Floquet 模式,其中 $p=q=0$ 时 $i=1$, 此时对应的 Floquet 模代表平面波, $i \geq 2$ 对应 p, q 不同时为零的其他 Floquet 模。“*”表示复共轭。 \mathbf{E}_b 为未知孔径电场。 $r=1, 2$ 分别对应 TE 和 TM 极化。 $Z_{pq}^{r(1)}$ 表示任意 i 阶 Floquet 模的等效模阻抗, 并且:

$$Z_{pq}^{r(1)} = \eta_{pq}^{r(1)} \frac{\eta_{pq}^r + j\eta_{pq}^{r(1)} \tan(r_{pq}^{(1)} t_1)}{\eta_{pq}^{r(1)} + j\eta_{pq}^r \tan(r_{pq}^{(1)} t_1)}$$

未知孔径电场 \mathbf{E}_b 选择一组合理的基函数将积分方程中的未知量展开。然后用 Galerkin 方法将积分方程转化为线性方程,对线性方程求解可得出未知电场的展开系数,进而可得到自由空间的传播系数。

3 传统十字和改进单元 FSS 的数值结果与分析

2.1 传统十字和改进单元 FSS 的设计结构

按照 MUNK 的基础模型,十字单元周长接

近于一个波长时将发生谐振现象^[1]。可以根据这个模型进行单元的参数设计。具体参数标注如图 1 所示。图 2 给出了传统十字单元 FSS 阵列图。在传统十字单元基础上,在十字末段分别加载箭头形的孔径,给出一种改进的新型单元,如图 3 所示。

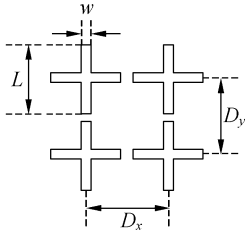


图 1 十字单元 FSS 参数

Fig. 1 Parameters of cross element FSS

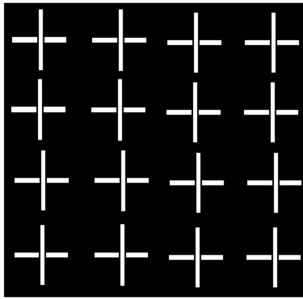


图 2 传统十字单元 FSS

Fig. 2 Conventional cross element FSS

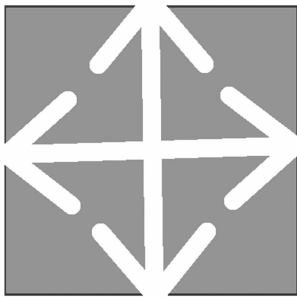


图 3 改进的十字单元

Fig. 3 Improved cross element

传统 FSS 周期阵列参数设置:阵列周期 $D_x = D_y = 16$ mm,孔径宽度 $w = 0.5$ mm,臂长 $L = 15$ mm。入射波均取 45° 入射角,选取频段为 $2 \sim 16$ GHz。为了进一步对比分析,图 4 所示的改进单元 FSS 结构,单元臂长为 10 mm,每个箭头形孔径总长度为 5 mm,夹角 90° ,其它参数设置与

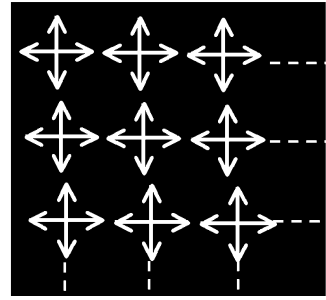


图 4 改进的十字单元 FSS

Fig. 4 Improved cross element FSS

传统 FSS 结构相同。

本文分别对传统十字单元 FSS 结构和改进单元 FSS 结构进行两个方面的对比研究:(1)确定入射角度(考虑大角度情况)下 FSS 中心频率的极化稳定性。选取电磁波入射角度为 45° ,极化方式由 TE 转变为 TM;(2)确定极化方式下 FSS 中心频率的角度稳定性。选取入射电磁波为 TE 波,入射角度从 0° 变化到 45° 。

3.2 45° 入射电磁波不同极化方式对两种 FSS 中心频率的影响

45° 入射电磁波,TE、TM 两种不同极化方式时,分别对两种 FSS 结构得出频率与传输系数曲线,如图 5、6 所示。图 5 表明传统 FSS 结构在 TE 极化电磁波 45° 入射时,中心频率为 9.8 GHz。当入射波源变为 TM 极化时为 9 GHz,向低频方向漂移 800 MHz。而改进单元 FSS 结构的中心频率表现出很好的极化稳定性,如图 6 所示,中心频率稳定在 8.8 GHz。

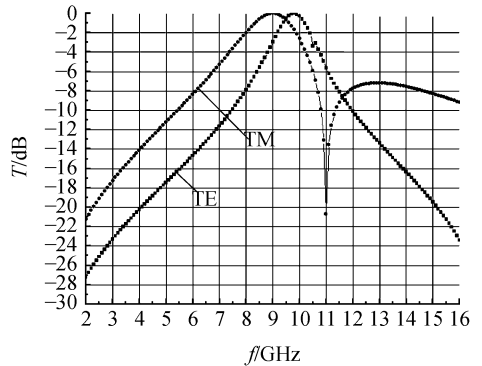


图 5 传统十字单元 FSS 在 45° 入射角不同极化方式下的频率响应

Fig. 5 Frequency responses of conventional cross element FSS in different polarizations at 45° incidence

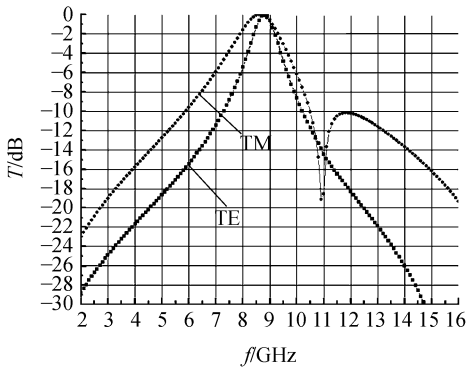


图 6 改进十字单元 FSS 在 45° 入射角不同极化方式下的频率响应

Fig. 6 Frequency responses of improved cross element FSS in different polarizations at 45° incidence

波源极化方式的改变对两种 FSS 结构中心频率的影响有很大不同,改进单元 FSS 结构对入射波源极化方式不敏感。

3.3 相同极化方式不同入射角度对两种 FSS 频率响应特性的影响

FSS 工程应用中经常涉及到不同角度入射的情况,因此在考虑极化稳定性的同时,必须考察 FSS 的中心频率对不同入射角度的稳定性。下面针对上述两种 FSS 结构,分别计算出正入射时的中心频率,然后改变入射角度得出不同入射角度下原中心频率处的透过率系数,由中心频率处透过率的变化可以得出中心频率的角度稳定性。两种 FSS 结构正入射时中心频率分别为 9.5 GHz 和 8.9 GHz。选取角度变化范围为 $0^\circ \sim 45^\circ$,步长为 5° 。计算结果如图 7 所示。

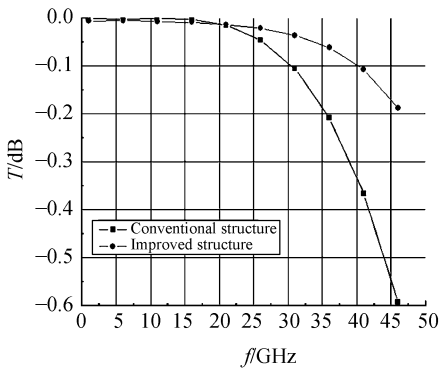


图 7 两种 FSS 结构在不同入射角的中心频率透过率
Fig. 7 Resonant frequency transmission coefficients of two kinds of FSS structures in different incident angles

由图 7 给出的数据可以很明显的看出,对于传统十字单元 FSS 结构,入射波的入射角度由 0° 逐渐变化到 45° 时,中心频点的透过率随入射波角度的变大而降低:正入射时透过率为 -0.0015 dB, 45° 入射时变为 -0.593 dB。中心频率点的透过率降低是由于中心频率随入射角度变化发生了漂移。这在很多涉及到大角度范围应用的情况,限制了 FSS 的应用。相比较而言,对于改进的 FSS 结构,入射角度由正入射逐渐变化到 45° 时,中心频率透过率几乎不发生改变:正入射时为 -0.006 dB, 45° 入射时为 -0.18 dB。

通过计算可以看出,传统的 FSS 结构不具备角度稳定性,也不能在大角度入射情况下实现极化稳定性;改进结构的 FSS 具有更优的传输特性,对 TE、TM 两种不同的极化方式给出完全相同的中心频率,并且同时具有中心频率的角度稳定性。

4 实验测试

采用镀膜和光刻技术^[11]制备了改进单元 FSS 的实验样件,大小为 $500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$,可以等效认为是无限周期的 FSS^[12]。在微波暗室中对实验样件进行极化稳定性的实验测试,以验证理论计算结果。

电磁波取不同的极化方式,测试 FSS 结构的极化稳定性。对于大角度入射时 TE 波与 TM 波的转换,测试时,必须通过天线旋转 90° 来实现,

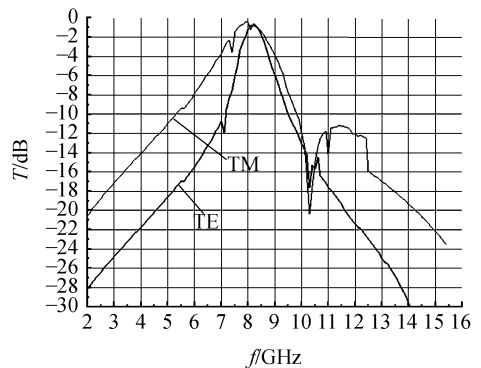


图 8 改进十字单元 FSS 在 45° 入射角不同极化方式下的频率响应测试曲线

Fig. 8 Measured frequency response curves of improved cross element FSS in different polarizations at 45° incidence

而把通常使用的 FSS 屏沿表面的中轴线旋转 90° 的方法,仅能实现正入射时电磁波极化方式的转变。改进单元 FSS 结构实验样件测试结果见图 8,实验样件的测试中心频率为 8.2 GHz,向低频方向漂移 0.6 GHz,这是实际测试样件的薄支撑介质基底引起的。测试曲线与理论计算曲线基本一致。改进单元 FSS 的中心频率不受源极化的约束。

5 结 论

入射波的极化方式和入射角度一直是影响

FSS 传输特性的两个重要因素。本文选取正方形栅格十字单元 FSS 结构为基础进行改进,设计了一种新型单元频率选择表面。结果均表明:传统的十字单元 FSS 在大角度入射时不再具有中心频率的极化稳定性,TE 波入射时,也不能实现中心频率的角度稳定性。而改进单元 FSS 在 TE 波 0° 到 45° 入射时中心频率漂移量仅为 100 MHz,同时具有中心频率的角度稳定性和极化稳定性。这种新型的单元可以应用在很多入射波的极化方式是完全未知而且涉及到曲面大角度入射的情况,如无线电通讯领域以及隐身雷达罩的设计,以实现更好的传输特性。

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] CHEN C C. Transmission of microwave through perforated flat plates of finite thickness[J]. *IEEE*,1973,21(1):1-6.
- [4] 孙连春. 频率选择表面技术在导弹电子战中的应用[J]. *电子对抗*,2002,2(46):1-3.
SUN L CH. Application of frequency selective surface technology in missile electronic warfare[J]. *Electromagnetic Countermeasure*, 2002,2 (46):1-3. (in Chinese)
- [5] 卢俊. 远红外频率选择表面的传输特性分析[J]. *光电工程*,2006,33(6):41-44.
LU J. Transmission characteristics of far-infrared frequency selective surface[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006,33(6):41-44. (in Chinese)
- [6] HE B. Effects of fabricated error on transmission performance of double layer frequency selective surface configuration[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(5): 599-603.
- [7] 侯新宇. 一种双曲率雷达罩的频率选择表面分片设计[J]. *弹箭与制导学报*,2006,26(1):123-125.
HOU X Y. A novel frequency selective surface patch design for double curved radome[J]. *Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance*, 2006,26(1):123-125. (in Chinese)
- [8] 卢俊. Y 形和 Y 环形单元特性的试验对比研究[J]. *光学精密工程*,2005,13(2):219-224.
LU J. Experimental comparison of the characteristics of Y element and Y loop element[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 219-224. (in Chinese)
- [9] 李小秋. Y 环单元 FSS 结构参数对频率特性的影响[J]. *光学精密工程*,2006,14(6):1070-1075.
LI X Q. Effects of Y loop element FSS structure parameter on frequency response[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 1070-1075. (in Chinese)
- [10] 侯新宇,万伟,佟明安,等. 介质损耗对频率选择表面传输特性的影响[J]. *电子科学学刊*,2000,22(5):871-874.
HOU X Y,WAN W,TONG M A,*et al.*. Influence of dielectric loss on the transmission properties of frequency selective surfaces[J]. *Journal of Electronics*,2000,22(5):871-874. (in Chinese)
- [11] 张立国,陈迪. SU-8 胶光刻工艺研究[J]. *光学精密工程*,2002,10(3):266-269.
ZHANG L G, CHEN D. Research on SU-8 resist photolithography process[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10 (3): 266-269. (in Chinese)
- [12] CHEN G R. Study on Frequency selective surface with square loop slots[J]. *Journal of Engineering and Electronics*,2000,11(4):11-16.

作者简介:贾宏燕(1980—),女,山东泰安人,博士研究生,主要研究方向为薄膜光学与频率选择表面的设计等。E-mail: jiayanzi0928@126.com

通讯作者:高劲松(1968—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要研究方向为薄膜光学与镀膜、光刻及隐身技术等。E-mail:gaojs@ciomp.ac.cn