

一种提高频率选择表面通带透射比的新方法

朱华新^{1,2} 高劲松¹ 冯晓国¹ 赵晶丽¹ 梁凤超¹ 王岩松¹ 陈 新¹

(¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033)
²中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 为得到带宽较窄且透射比较高的频率选择表面(FSS)结构,以 Y 环单元为基础提出了一种提高通带透射比的新方法,即在周期单元内设置圆形孔径,运用谱域 Galerkin 方法对这种结构的传输特性进行了数值分析,确定 $R=0.4$ mm,单元周期内圆孔个数为 12,中心频点 15 GHz 的透射比提高 0.12 dB;采用镀膜与光刻相结合的技术制备了相应的试验件,并进行了微波测试,测试值与计算值基本一致。结果表明,开圆孔 Y 环的中心频点透射比在电磁波垂直入射的情况下为 -0.69 dB,比对应 Y 环提高 0.16 dB,而在 30° 和 45° 倾斜入射的情况下,TE 波的透射比分别为 -0.64 dB 和 -0.78 dB,比对应 Y 环分别提高了 0.345 dB 和 0.31 dB, -3 dB 带宽分别为 1.26 GHz 和 0.97 GHz,两种结构的带宽基本一致。因此这种方法是周期下提高通带透射比的有效方法。

关键词 光学器件;滤波器;频率选择表面;透射比;带宽

中图分类号 TN975 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0223002

A New Method of Improving Frequency Selective Surface Passband Transmittance

Zhu Huaxin^{1,2} Gao Jinsong¹ Feng Xiaoguo¹ Zhao Jingli¹ Liang Fengchao¹
Wang Yansong¹ Chen Xin¹

(¹Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)
²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Based on a Y loop element, a new method which sets circular slot on the periodic element to improve frequency selective surface (FSS) structure of narrow bandwidth and high transmittance is presented. The FSS structure is calculated by Galerkin's method in spectral domain. The optimum radius is 0.4 mm, and the numbers of the circular slot is 12. The resonance frequency is 15 GHz, and its transmittance is increased 0.12 dB. The plane sample is fabricated by depositing coatings and lithography. The agreement between the calculated and measured values is good. Compared with the Y loop without circular slot, the results show that the transmittance of this structure which is about -0.69 dB at the resonance frequency increased 0.16 dB under the normal incidence. The transmittance at TE 30° and 45° incidence are -0.64 dB and -0.78 dB, respectively. Compared with the Y loop without circular slot, the transmittance are increased about 0.345 dB and 0.31 dB, respectively. And the bandwidth difference between the two structures is negligible, and they are about 1.26 GHz and 0.97 GHz under TE 30° and 45° incidence, respectively. So this method is an effective way to improve the transmittance of large periodic FSS structure at resonance frequency.

Key words optical devices; filter; frequency selective surface; transmittance; bandwidth

OCIS codes 230.4000; 160.3918; 240.6700

收稿日期: 2010-05-24; **收到修改稿日期**: 2010-06-25

作者简介: 朱华新(1983—),男,博士研究生,主要从事光学薄膜及隐身材料设计等方面的研究。

E-mail: zhuhuaxing1312@163.com

导师简介: 高劲松(1968—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学薄膜的设计、制备及隐身材料等方面的研究。

E-mail: gaojs@ciomp.ac.cn

1 引言

频率选择表面(FSS)是由周期性排列的金属贴片单元(带阻型),或由金属屏上周期性的开孔单元(带通型)构成的一种二维周期阵列结构^[1,2]。FSS能够较好地控制电磁波的传输和散射,能使入射电磁波在谐振频率处发生全反射或全透射。自20世纪70年代以来,国内外学者已经从理论建模、数值计算、工艺实现及其工程应用对其进行了广泛而深入地研究。

传统的孔径型 FSS 通常用于雷达波段^[3,4],实现选择性的全透射,即只能透过自身的自导雷达波^[5,6]。对于天线罩而言,要求有尽量窄的通带宽度,通常采用的方法是将 FSS 单元周期变大,从而使带宽压缩,但付出的代价是通带透射比的下降,尤其是对于电磁波大角度入射的情况下 TE 极化波的透射比下降的更快,因此提高通带透射比成为关键点,而 FSS 设计本身是一个多参数设计,涉及到单元图形的尺寸、大小及周期等,并且 FSS 的仿真是一个较繁琐的数值计算过程。虽有一些优化设计相关的报道,但目前的优化设计还很不成熟。本文以谱域 Galerkin 法为基本分析方法^[7,8],利用电磁场中的二重性原理对含有一层介质衬底的带通 FSS

进行了分析研究,提出了一种提高通带透射比的新方法,即在 FSS 屏上再设置一些圆孔,这样开孔部分增加了透射比,从而减小了由于角度引起的透射比下降。但圆孔的大小必须要适合,否则由于圆孔与单元图形的相互耦合作用,使得通带位置漂移,甚至降低通带的透射比。

2 数值算法原理

对于孔径型的 FSS 而言,它是一种周期性排布的结构,利用电磁场中的二重性原理,孔径单元由入射场激励起感应磁流,则单个单元的散射场可以表示为

$$\mathbf{H}_s(x, y) = -j\alpha\epsilon_0 \mathbf{F}(x, y) + \frac{1}{j\alpha\epsilon_0} \nabla[\nabla \cdot \mathbf{F}(x, y)], \quad (1)$$

式中 \mathbf{H}_s 为散射波磁场强度, \mathbf{F} 为磁场的矢势, FSS 单元孔径表面切向磁场边界条件为 $\mathbf{H}_{inc} + \mathbf{H}_s = Z_s \mathbf{M}$, 其中 \mathbf{H}_{inc} , \mathbf{H}_s 分别为入射波和散射波的磁场强度, \mathbf{M} 为等效磁流,三者均为矢量, Z_s 为表面阻抗,一般 FSS 屏表面导电层阻抗较小,可视为理想导体(PEC)表面,即 $Z_s = 0$ 。应用傅里叶变换,并利用 Floquet 定理则可得谱域表达式

$$-\begin{bmatrix} H_{inc-x} \\ H_{inc-y} \end{bmatrix} = \frac{4\pi}{j\omega\mu_0 ab} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} k_0^2 - \alpha_{nm}^2 & -\alpha_{nm}\beta_{nm} \\ -\alpha_{nm}\beta_{nm} & k_0^2 - \beta_{nm}^2 \end{bmatrix} \tilde{G}(\alpha_{nm}, \beta_{nm}) \cdot \begin{bmatrix} \tilde{M}_x(\alpha_{nm}, \beta_{nm}) \\ \tilde{M}_y(\alpha_{nm}, \beta_{nm}) \end{bmatrix} \exp(j\alpha_{nm}x) \exp(j\beta_{nm}y), \quad (2)$$

式中 $\tilde{G}(\alpha_{nm}, \beta_{nm})$ 为谱域并矢格林函数,与 FSS 单元两侧的匹配介质有关。

由于 FSS 阵列是二维周期结构,由傅里叶变换的性质可知, α, β 不再是连续的值,而是取一些离散的值,他们对应相应的 Floquet 谐波,其表达式为

$$\begin{aligned} \alpha_{nm} &= \frac{2m\pi}{a} + k_x, \\ \beta_{nm} &= \frac{2n\pi}{b\sin\Omega} - \frac{2m\pi}{a} \cot\Omega + k_y, \end{aligned} \quad (3)$$

式中 Ω 为 FSS 2 个周期方向的倾斜角; a, b 分别为两个周期方向的单元周期值。

$$\begin{aligned} k_x &= k_0 \sin\theta \cos\varphi, \\ k_y &= k_0 \sin\theta \sin\varphi, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 θ, φ 分别为平面波入射角和方位角。

用矩量法求解(2)式,对于一般的规则图形单元可用全域基函数将要求解的感应磁流展开,其他图形单元如 Y 环的基函数选用子域基函数中的

Rooftop 展开,此基函数表达式:

$$B_x(x, y) = \Lambda_x(m + 0.5) \Pi_x(n), \quad (5)$$

$$B_y(x, y) = \Lambda_y(m) \Pi_y(n + 0.5), \quad (6)$$

式中

$$\Pi_x(n) = \begin{cases} 1, & |y - n\Delta y| < \frac{\Delta y}{2}, \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (7)$$

$$\Lambda_x(m) = \begin{cases} 1 - \frac{|x - m\Delta x|}{\Delta x}, & |x - m\Delta x| < \Delta x, \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (8)$$

式中 Δx 和 Δy 分别为离散的每个子单元的长和宽,用上述基函数展开的等效磁流代入(2)式中即可以求出等效磁流 \mathbf{M} ,进而可以求出反射系数和透射系数。

对于在 Y 环上设置圆孔实际上可看作基于 Y 环的一种复合结构,计算过程也与 Y 环类似,也是采用 Rooftop 子域基函数展开表面等效磁流。

3 理论设计

整个结构有 4 部分组成,如图 1 所示。1 为平板基底,厚度为 5.6 mm,其介电常数 $\epsilon_r=3.2$,正切损耗 $\tan \delta=0.007$;2 为胶合层,厚度为 $90 \mu\text{m}$,介电常数 $\epsilon_r=2.6$,正切损耗 $\tan \delta=0.009$,3 为覆铜薄膜基底,厚度为 $25 \mu\text{m}$,介电常数 $\epsilon_r=3$,正切损耗 $\tan \delta=0.005$,4 为 FSS。

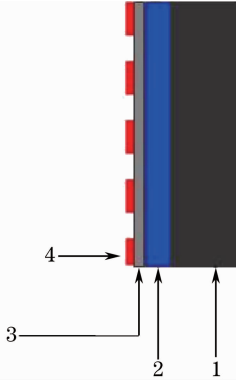


图 1 FSS 的分析模型
Fig.1 Model of FSS

FSS 结构中,需要对参数不断进行优化,才能确定单元的形状及尺寸,Y 环单元形状简单,工艺精度容易达到,适合三角形格子排布,而且电磁波大角度入射时,Y 环单元 FSS 中心频点的稳定性较好。因此先从 Y 环单元入手,然后在此基础上设置开孔,使其在角度变化情况下透射比降低更小,Y 环单元的结构参数如图 2 所示。

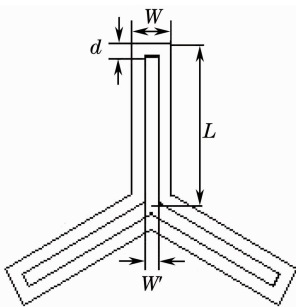


图 2 Y 环单元尺寸示意图
Fig.2 Dimensions of Y loop element

经反复调整该 Y 环的结构参数,取 $W=1.1 \text{ mm}$, $W'=0.3 \text{ mm}$, $d=0.4 \text{ mm}$, $L=3 \text{ mm}$,为了得到相对较窄的半宽度,单元周期在 x,y 方向上的值 $a=8 \text{ mm}$, $b=6.9 \text{ mm}$,由于是正三角形排布,倾斜角 $\Omega=60^\circ$,所以在两个方向上的周期值不一致。运用谱域 Galerkin 法进行计算,得到该结构的 FSS 在电磁波正入射情况下仿真频率响应特性如图 3 所示。

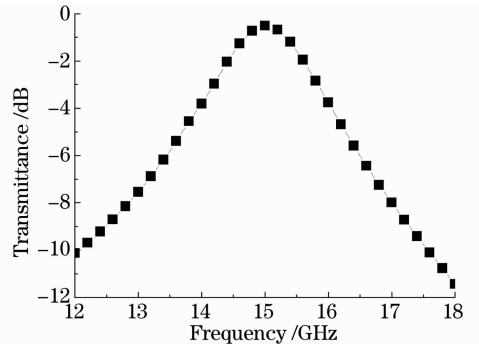


图 3 正入射下 Y 环单元 FSS 的频率响应曲线
Fig.3 Curve of frequency response of Y loop element FSS under the normal incidence

由图 3 看出,此 Y 环单元的中心频点为 15 GHz,透射比为 -0.63 dB 。由于单元周期较大,随着电磁波入射角度的增加,TE 波的通带透射比下降的很快。而对于某些天线罩而言,正是要求在大角度情况下还要保证较高的透射比,因此采取在此基础设置开孔的方法。由于为了达到带宽较窄,单元周期较大,表面的金属导电层所覆盖面积较大,设置开孔实际是通过圆孔增大表面的空占比(即开孔部分面积/金属覆盖面积),使得表面开孔部分增加电磁波通过的几率增大,从而提高了通带的透射比,类似于金属网栅^[9~11],它是一种高通滤波器,可以通过增大空占比,来提高光学波段的透射比。但是设置开孔的大小和数量要适当,不然会引起开孔与原 Y 环的耦合作用加剧,从而引起中心频点的漂移。如图 4 是在一个图形单元中设置不同半径的圆孔及不同的开孔数量下的中心频点 15 GHz 透射率。

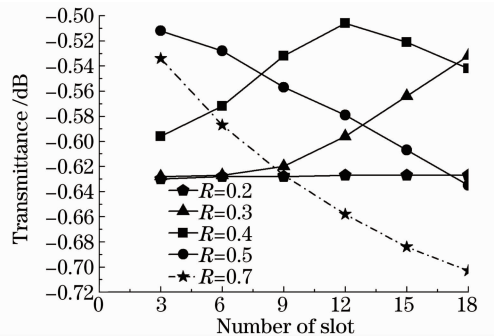


图 4 设置不同圆孔后对应中心频点透射比
Fig.4 Transmittance at resonance frequency versus different radius and numbers of circular slot

从图 4 中可以看出,当设置半径 $R=0.2 \text{ mm}$ 圆孔时,增加的量很不明显,而当 $R=0.3 \text{ mm}$ 时,透射比有增加的趋势,但圆孔的个数可能较多;当 $R=0.4 \text{ mm}$ 时可以明显看出圆孔数量在 12 时出现一

个最大值,当再增加圆孔个数时,圆孔与 Y 环的耦合作用明显加剧,使得透射比逐渐下降;当 $R \geq 0.5 \text{ mm}$,圆孔与 Y 环的耦合作用更加明显,随圆孔的数量增加在中心频点处的透射比急剧下降,其中主要是由于中心谐振频点的偏移引起。最终选择了 $R=0.4 \text{ mm}$ 的圆孔,一个单元内圆孔的个数为 12,通带的透射比为 -0.51 dB ,相比图 2 的初始结构透射比提高了 0.12 dB ,选择其是因为其圆孔的数量比较合理,若选择半径 $R < 0.4 \text{ mm}$ 的圆孔,按照图 4 所示的趋势,圆孔的数量将会较多,这样就加大了工艺的复杂性。

4 实验制作及测试

通过镀膜^[12~15]与光刻技术在制备出 $300 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ 的 2 个实验件,然后再胶合到平板基底上,其中一个为单一的 Y 环结构,另一个为 Y 环设置圆孔的结构,后者实验件如图 5 所示。将制备好的实验件在微波暗室进行测试,测试系统主要包括矢量网络分析仪和 2 个测试天线及转台。测试分 2 步:1)测试并记录无实验件时接收信号的幅度和相位,建立参考基准;2)插入实验件,测试接收信号的幅度和相位,将它们分别与参考基准相减得到实验件插入损耗和插入相位移。

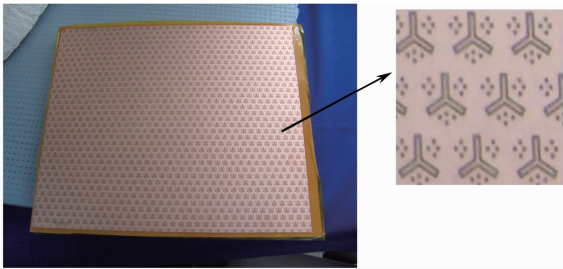


图 5 实际制作的实验件

Fig. 5 Photograph of FSS sample

正入射情况下图 2 的 Y 环与图 5 实验件的测试透射比曲线如图 6 所示。无圆孔的 Y 环的中心频点测试透射比为 -0.85 dB ,而带圆孔的中心频点透射比为 -0.69 dB ,相比提高了 0.16 dB , -3 dB 带宽约为 1.59 GHz 。

图 7 和图 8 分别为 30° 和 45° 入射情况下 TE 波两者的实测透射比曲线。 30° 入射情况下,带有圆孔 Y 环的透射比为 -0.64 dB ,其对应的无圆孔 Y 环的透射比为 -0.985 dB ,前者比后者提高了 0.345 dB , -3 dB 带宽约为 1.26 GHz ;在 45° 入射情况下,带有圆孔 Y 环的透射比为 -0.78 dB ,其对应的无圆孔 Y 环的透射比为 -1.09 dB ,前者比后者提高了

0.31 dB , -3 dB 带宽约为 0.97 GHz 。通过大角度测试的情况可以看出,在单元周期较大时,TE 波的通带带宽逐渐变小,而通带透射比也逐渐变小,这与理论仿真也是一致的,通过在单元周期内设置圆孔,使得透射比下降的速度明显减小,而且透射比的提高较垂直入射也更明显。

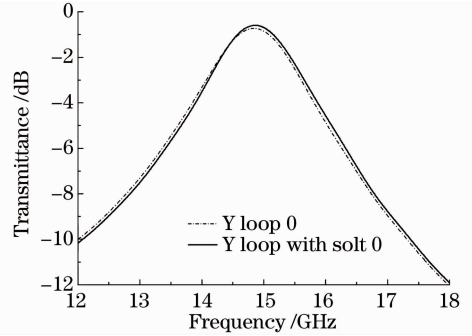


图 6 正入射情况下两种结构透射比对照

Fig. 6 Measured frequency response character under perpendicular incidence with two structures

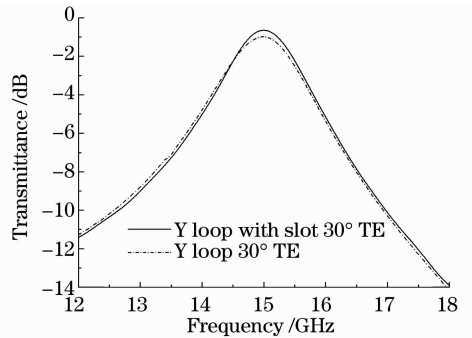


图 7 30° TE 波入射情况下两种结构透射比对照

Fig. 7 Measured frequency response character under TE 30° incidence with two structures

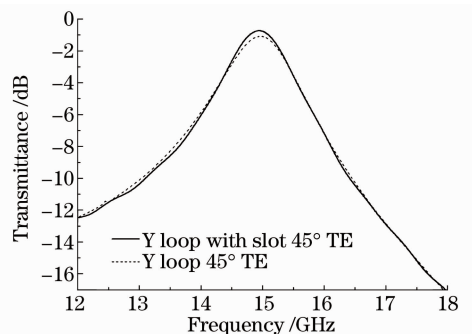


图 8 45° TE 波入射情况下两种结构透射比对照

Fig. 8 Measured frequency response character under TE 45° incidence with two structures

5 结 论

通过将 FSS 单元周期变大,可以起到压缩带宽的作用,本文提出了一种减少透射比降低的方法,即

在单元内再设置圆孔,运用谱域 Galerkin 法得到当圆孔的半径 $R=0.4$ mm,个数为 12 时,能够得到较理想的透射比,采用镀膜与光刻技术制作出了相应的等效平板实验件,并在微波暗室中对实验件进行了测试。

测试结果表明,与对应的 Y 环相比,在电磁波垂直入射的情况下,透射比提高了 0.16 dB;在 30° 和 45° TE 波入射的情况下,透射比的提高分别为 0.345 dB 和 0.31 dB,相比垂直入射时提高更明显,并且设置圆孔并不影响原结构的带宽,与原结构一致随着电磁波入射角度的增加 TE 波带宽进一步的变窄,与仿真一致。因此该方法是一种行之有效的新方法,可以应用于在飞行兵器隐身窗口上,既能保证相对较窄的带宽,又能保证较高透射比。

参 考 文 献

- 1 T. K. Wu. Frequency Selective Surface and Grid Array[M]. New York: Wiley-Intersci., 1995
- 2 B. A. Munk. Frequency Selective Surface: Theory and Design [M]. New York: Wiley-Intersci., 2000
- 3 Lu Jun, Zhang Jing, Sun Lianchun. Experimental comparison of the characteristics of Y element and Y loop element[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(2): 219~224
卢俊,张靓,孙连春. 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
- 4 R. Mittra, C. H. Chan, T. Cwik. Techniques for analyzing frequency selective surfaces-a review[J]. *Proc. IEEE*, 1988, **76**(12): 1593~1615
- 5 Hou Xinyu, Wan Wei, Tong Mingan *et al.*. Analysis on the loss and bandwidth properties of FSS with multilayer dielectric substrates[J]. *J. Microwave*, 1999, **15**(4): 366~370
侯新宇,万伟,佟明安等. 带有多层介质衬底 FSS 的损耗和带宽特性分析[J]. *微波学报*, 1999, **15**(4): 366~370
- 6 Li Xiaoqiu, Gao Jinsong, Zhao Jingli *et al.*. A novel element of frequency selective surface for radome[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(6): 3803~3806
李晓秋,高劲松,赵晶丽等. 一种适用于雷达罩的频率选择表面新单元研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(6): 3803~3806
- 7 Hongyan Jia, Jinsong Gao, Xiaoguo Feng *et al.*. Frequency selective surface with a flat topped passband[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(12): 715~716
- 8 Hongyan Jia, Jinsong Gao, Xiaoguo Feng. Closely packed dense frequency selective surface[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(6): 441~442
- 9 R. Ulrich. Far-infrared properties of metallic mesh and its complementary structure[J]. *Infrared Physics*, 1967, **7**(1): 37~57
- 10 L. B. Whitbourn, R. C. Compton. Equivalent-circuit formulas for metal grid reflectors at a dielectric boundary[J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(2): 217~220
- 11 Feng Xiaoguo, Fang Liang, Sun Lianchun. Characteristic dimension design and fabrication of metallic mesh [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(1): 59~64
冯晓国,方梁,孙连春. 金属网栅结构参数设计与制作[J]. *光学精密工程*, 2005, **13**(1): 59~64
- 12 Zhu Huaxin, Gao Jinsong, Wang Xiaoyi *et al.*. Design of homogeneous thin film combining with Fourier-Transform synthesis method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2436~2440
朱华新,高劲松,王笑夷等. 结合傅里叶变换合成法设计均匀薄膜[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2436~2440
- 13 Chunrong Xue, Kui Yi, Chaoyang Wei *et al.*. Optical constants of DUV/UV fluoride thin film[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(5): 449~451
- 14 Zhao Feifei, Zhao Baosheng, Zhang Xinghua *et al.*. Properties of germanium thin film and its application in photon counting imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3236~3240
赵菲菲,赵宝升,张兴华等. Ge 薄膜特性及其在光子计数成像系统中的应用[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3236~3240
- 15 Zhou Ming, Zhao Yuanan, Li Dawei *et al.*. Laser damage of optical film with the combined irradiation of 1064 nm and 532 nm pulse[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 3050~3054
周明,赵元安,李大伟等. 1064 nm 和 532 nm 激光共同辐照薄膜的损伤[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 3050~3054