

文章编号 1004-924X(2011)03-0561-06

窄通带高透过频率选择表面

苏学军¹,高劲松²,朱华新^{2,3},赵晶丽²,冯晓国²

(1. 海军航空工程学院,山东烟台 264001;

2. 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; 3. 中国科学院研究生院,北京 100039)

摘要:为使大周期下带宽较窄的频率选择表面(FSS)结构透过率较高,以 Y 环单元为基础提出了一种提高通带透过率的新方法。该方法在周期单元内设置圆形孔径,通过增大占空比来提高透过率。运用谱域 Galerkin 方法数值分析了这种结构的传输特性,结果显示,确定 $R=0.5$ mm,单元周期内圆孔个数为 12 时,中心频点 10 GHz 的透过率提高了 0.11 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。开圆孔 Y 环的中心频点透过率在电磁波垂直入射的情况下为 -0.62 dB,比对应 Y 环提高了 0.21 dB,而在 30° 和 45° 倾斜入射的情况下,TE 波的透过率分别为 -0.66 dB 和 -0.81 dB,比对应 Y 环分别提高了 0.32 dB 和 0.27 dB; -3 dB 带宽分别为 1 GHz 和 0.8 GHz,两种结构的带宽基本一致。得到的结果表明,提出的方法是大周期下提高通带透过率的一种行之有效的方法。

关键词:滤波器;频率选择表面;透过率;带宽

中图分类号:TN975;TN761 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20111903.0561

Frequency selective surface with narrow passband and high transmittance

SU Xue-jun¹, GAO Jin-song², ZHU Hua-xin^{2,3}, ZHAO Jing-li², FENG Xiao-guo²

(1. *Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;*

2. *Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

3. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

Abstract: On the basis of Y loop elements, a new method to set circular slots on the periodic element to improve the narrow bandwidth of a Frequency Selective Surface (FSS) structure was presented. The FSS structure was calculated by Galerkin's method in the spectral domain when the optimum radius was set to be 0.5 mm and the number of the circular slots to be 12, and the transmittance in the resonance frequency of 10 GHz has increased by 0.11 dB. The plane sample was fabricated by depositing coatings and a lithograph technology, and obtained measured values are in good agreement with the calculated values. The results show that the transmittance of this structure is about -0.62 dB at the resonance frequency, which has increased by 0.21 dB under the perpendicularity incidence com-

收稿日期:2010-07-29;修订日期:2010-10-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60478053)

pared with that of the Y loop without circular slot. Furthermore, the transmittances at TE 30° and 45° incidence are -0.66 dB and -0.81 dB, respectively, which has increased about 0.32 dB and 0.27 dB compared with those from the Y loop without circular slots. The bandwidth difference between the two structures is negligible, which are about 1 GHz and 0.8 GHz under TE 30° and 45° incidence, respectively. These results indicate that this method is an effective way to improve the transmittance of large periodic FSS structure at the resonance frequency.

Key words: filter; Frequency Selective Surface(FSS); transmittance; bandwidth

1 引言

频率选择表面(Frequency Selective Surfaces, 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等方面对其进行了广泛而深入的研究。

传统的孔径型 FSS 通常在雷达波段^[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]。FSS用于天线罩时,一般需要尽量窄的通带宽度,常用的方法是将 FSS 单元周期变大,从而使带宽压缩,但付出的代价是通带透过率的下降,尤其是在电磁波 TE 极化大角度入射的情况下其透过率下降得更快,从而影响整个 FSS 结构的特性,因此提高通带透过率是 FSS 设计的关键点。目前,专论提高通带透过率的文章少见,但随着 FSS 应用于天线罩的工程化研究,此类问题逐渐凸显,通带透过率损失的大小将直接影响雷达制导的效果,同时在增加通带透过率的前提下,还需要考虑不影响其他特性,如通带半宽度,阻带屏蔽效能等。

FSS 设计涉及多项参数,如单元图形的尺寸、大小及周期等,而 FSS 的仿真也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,但目前的优化设计也还很不成熟。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过率的新方法,即在 FSS 屏上再设置一些圆孔,类似于金属网栅结构^[9-12],增加开孔部分即增大了空占比,

于是起到了提高透过率的作用,从而弥补了由入射角度引起的透过率下降,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,会使通带位置漂移,甚至降低通带的透过率。

2 数值计算原理

孔径型 FSS 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:

$$\mathbf{H}^s(x, y) = -j\omega\epsilon_0 \mathbf{F}(x, y) + \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{F}(x, y)), \quad (1)$$

式(4)中 \mathbf{H}^s 为散射波磁场强度, \mathbf{F} 为磁场的矢量势, 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 定理则可得到谱域表达式:

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

式(2)中 $\tilde{G}(\alpha_{mn}, \beta_{mn})$ 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:

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

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

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

式(4)中 θ, φ 分别为平面波入射角和方位角。

用矩量法求解方程(2),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,进而代入方程(2)中即可以求出等效磁流 \mathbf{M} ,得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

整个系统结构由 4 部分组成,如图 1 所示。平板基底厚度为 7.2 mm,其介电常数 $\epsilon_r = 3.3$,正切损耗 $\tan \delta \leq 0.007$;胶合层厚度为 90 μm ,介电常数 $\epsilon_r = 2.6$,正切损耗 $\tan \delta \leq 0.009$;覆铜薄膜基底厚度为 25 μm ,介电常数 $\epsilon_r = 3$,正切损耗 $\tan \delta < 0.005$ 。

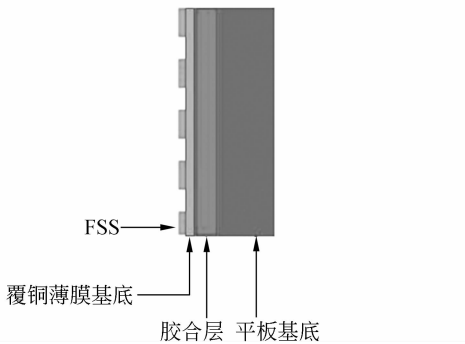


图 1 FSS 的分析模型

Fig. 1 FSS model

FSS 结构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,本文从 Y 环单元入手,然后在此基础上设置开孔,使其在大周期下,TE 波角度变化时透过率降低更小,Y 环单元的结构参数如图 2 所示。

经反复调整该 Y 环的结构参数,确定取 $W =$

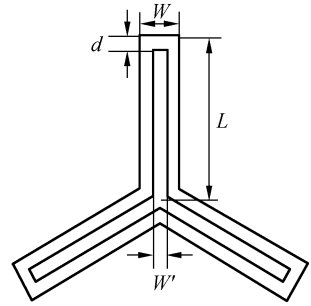


图 2 Y 环单元尺寸示意图

Fig. 2 Dimensions of Y loop element

1.7 mm, $W' = 0.3$ mm, $d = 0.7$ mm, $L = 4.7$ 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 $a = 12$ mm, $b = 10.39$ mm。周期的继续增大虽然会进一步压缩带宽,但同样会引起栅瓣出现,从而使得通带的透过率下降,因此周期的尺寸要适当。由于是正三角形排布时倾斜角 $\Omega = 60^\circ$,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。

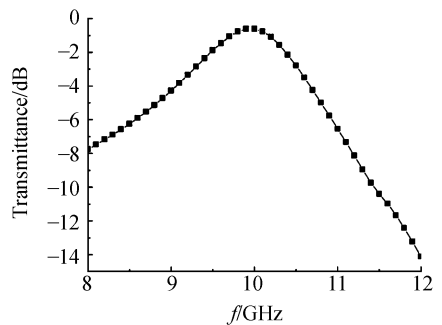


图 3 正入射下 Y 环单元 FSS 的频率响应曲线

Fig. 3 Curve of frequency response under perpendicular incidence

由图 3 看出,此 Y 环单元的中心频点约为 10 GHz,透过率为 -0.61 dB。由于单元周期较大,随着电磁波入射角度的增加,TE 波的通带透过率下降很快,而对于某些天线罩却是要求在大角度情况下还要保证较高的透过率,因此本文采取在此基础上设置开孔。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)来使表面开孔部分增

加电磁波通过的几率,从而提高通带的透过率(类似于金属网栅,通过增大空占比来提高光学波段的透过率)。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。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后的中心频点 10 GHz 透过率。

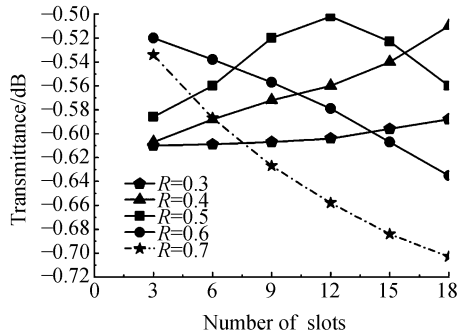


图 4 设置不同圆孔后对应中心频点的透过率

Fig. 4 Transmittance at resonance frequency vs different radii and number of circular slots

为了保证 Y 环单元的旋转对称性,在圆孔设置时以 3 的倍数增加,使圆孔均匀分布在 Y 环 3 个腿分开的区域。从图 4 中可以看出,当设置半径 $R=0.3$ mm 的圆孔时,增加的量很不明显,而当 $R=0.4$ mm 时,透过率有增加的趋势,但圆孔的个数可能较多;当 $R=0.5$ 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,使得透过率逐渐下降;当 $R \geq 0.6$ mm 时,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过率急剧下降,认为这主要是由中心谐振频点的偏移引起的。本文最终选择了 $R=0.5$ mm 的圆孔,一个单元内圆孔的个数为 12,结果显示,通带的透过率为 -0.5 dB,比图 2 的初始结构透过率提高了约为 0.11 dB,设置圆孔的 Y 环如图 5 所示,如此选择是因为其圆孔的数量比较合理,若选择半径 $R < 0.5$ mm 的圆孔,按照图 4 所示的趋势,圆孔的数量将会较多,从而加大了工艺的复杂性。

图 5 中圆孔的设置尽量均匀分布于 Y 环 3 个腿分开的区域,这样能保证 Y 环的旋转对称性,使得该结构有较好的极化稳定性和角度稳定性。

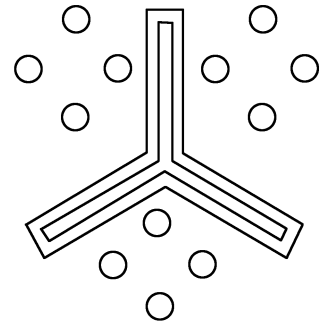


图 5 设置圆孔的 Y 环单元

Fig. 5 Y loop with circle slot

4 实验制作及测试

通过镀膜与光刻技术制备出 $300 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ 的两个试验件,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。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两个测试天线及转台。测试分两步:(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。

正入射情况下图 2 的 Y 环与图 5 结构的测试透过率曲线如图 6 所示,无圆孔的 Y 环的中心频点测试透过率为 -0.83 dB,而带圆孔的中心频点透过率为 -0.62 dB,相比提高了 0.21 dB, -3 dB 带宽约为 1.3 GHz。

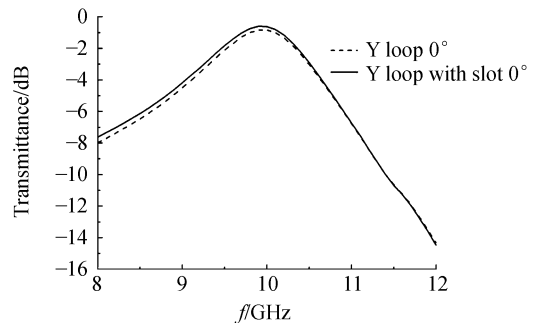


图 6 正入射情况下两种结构透射比对照

Fig. 6 Measured frequency response characters under perpendicular incidence

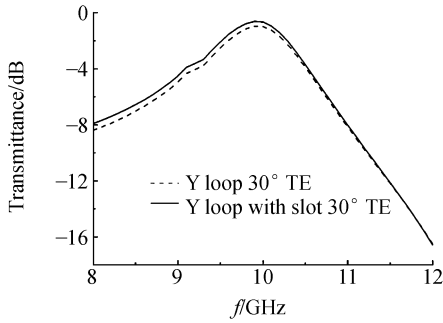


图7 30°TE波入射情况下两种结构透射比对照

Fig. 7 Measured frequency response characters under incidence of TE 30°

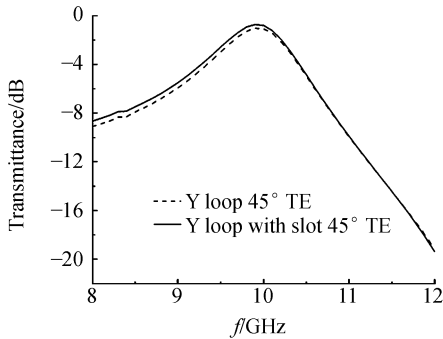


图8 45°TE波入射情况下两种结构透射比对照

Fig. 8 Measured frequency response characters under incidence of TE 45°

图7和图8分别为30°和45°入射情况下TE波两者的实测透过率曲线,30°入射情况下,带有圆孔Y环的透过率为-0.66dB,其对应的无圆

孔Y环的透过率为-0.98dB,前者比后者提高了0.32dB,-3dB带宽约为1GHz;45°入射情况下,带有圆孔Y环的透过率为-0.81dB,其对应的无圆孔Y环的透过率为-1.08dB,前者比后者提高了0.27dB,-3dB带宽约为0.8GHz。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,而通带透过率也逐渐变小,这与理论仿真是一致的,通过在单元周期内设置圆孔,使得透过率下降的速度明显减小,而且透过率的提高较垂直入射也更明显。

5 结论

基于加大FSS单元周期可以起到压缩带宽作用的原理,本文提出了一种减少透过率降低的方法,即在单元内再设置圆孔,运用谱域 Galerkin法得到当圆孔的半径 $R=0.5\text{ mm}$,个数为12个时,能够得到较理想的透过率。采用镀膜与光刻技术制作出了相应的等效平板试验件,并在微波暗室中对试验件进行了测试。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,透过率提高了0.21dB,在30°和45°TE波入射的情况下,透过率分别提高了0.32dB和0.27dB,相比垂直入射提高更明显,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。实验表明这种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,又能保证较高透过率。

参考文献:

[1] WU T K. *Frequency selective surface and grid array*[M]. New York: A Wiley-interscience Publication, 1995.

[2] MUNK B A. *Frequency selective surface: Theory and Design*[M]. New York: A Wiley-interscience Publication, 2000.

[3] 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. LU J, ZHANG J, SUN L CH. Experimental comparison of the characteristics of Y element and Y loop element [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 219-224. (in Chinese)

[4] MITTRA R, CHAN C H, CWIK T. Techniques for analyzing frequency selective surfaces-a review [J]. *Proceeding of the IEEE*, 1988, 76(12): 1593-1615.

[5] 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. HOU X Y, WAN W, TONG M A, et al.. Analysis on the loss and bandwidth properties of FSS with multilayer dielectric substrates[J]. *Journal of Microwave*, 1999, 15(4): 366-370. (in Chinese)

[6] 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.

- LI X Q, GAO J S, ZHAO J L, *et al.*. A novel element of frequency selective surface for radome[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(6):3803-3806. (in Chinese)
- [7] JIA H Y, GAO J S, FENG X G, *et al.*. Frequency selective surface with a flat topped passband[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, 5(12):715-716.
- [8] JIA H Y, GAO J S, FENG X G. Closely Packed Dense Frequency Selective Surface [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, 6(6):441-442.
- [9] URICH R. Far-infrared properties of metallic mesh and its complementary structure [J]. *Infrared Physics*, 1967, 7(1):37-57.
- [10] WHITBOURN L B, COMPTON R C. Equivalent-circuit formulas for metal grid reflectors at a dielectric boundary[J]. *Appl. Opt.*, 1985, 24(2):217-220.
- [11] 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. FENG X G, FANG L, SUN L CH. Characteristic dimension design and fabrication of metallic mesh [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1):59-64. (in Chinese)
- [12] 刘小涵, 冯晓国, 赵晶丽, 等. K9 基底细薄铜网上的化学镀镍 [J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(10):2185-2191. LIU X H, FENG X G, ZHAO J L, *et al.*. Electroless nickel plating of thin copper mesh on K9 substrate[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10):2185-2191. (in Chinese)

作者简介:



苏学军(1967—),男,天津人,副教授,硕士生导师,1989年于浙江大学获得学士学位,1995年于山东大学晶体材料研究所获得硕士学位,现为海军航空工程学院基础实验部副主任,主要从事光学晶体薄膜、红外纳米材料等方面的研究。Email: suxuejun10207@163.com



高劲松(1968—),男,吉林白城人,研究员,博士生导师,1989年于浙江大学获得学士学位,2005年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,现为中科院长春光学精密机械与物理研究所,中科院光学系统先进制造技术重点实验室常务副主任,主要从事光学薄膜与电磁功能薄膜等方面的研究。E-mail: gaojs@ciomp.ac.cn



朱华新(1983—),男,江苏宜兴人,博士研究生,2006年于长春理工大学获得工学学士学位,主要从事光学薄膜及隐身薄膜材料方面的研究。E-mail: zhu-huaxing1312@163.com



冯晓国(1974—),男,吉林长春人,博士,副研究员,硕士生导师,1988年于吉林工业大学获得工学学士学位,2006年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得理学博士学位,主要从事光学精密仪器设计和新型电磁力能材料等方面的研究。E-mail: fxg@163.com



赵晶丽(1962—),女,吉林长春人,高级实验师,主要从事光刻复制工艺的研究。E-mail: fxg@163.com