

一种新型频率选择表面单元研究

朱华新 郭颖 李帅 孙亚军

江南大学理学院, 江苏 无锡 214122

摘要 以圆环单元为基础提出了一种新型的频率选择表面(FSS)结构单元,即在圆环单元内部设置一偶极子单元,运用谱域 Galerkin 方法对这种单元结构的传输特性进行了数值分析。结果表明该新单元结构在平面电磁波 30°和 45°倾斜入射的情况下,横电波(TE波)、横磁波(TM波)在 11.5 GHz 的透射比较高,而在 14 GHz 附近,TE、TM 波的透射特性完全相反,实现了极化分离的特点。

关键词 材料; 滤波器; 频率选择表面; 谱域法; 透射比; 带宽

中图分类号 TN975 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.101602

Study on a Novel Frequency Selective Surface Element

Zhu Huaxin Guo Ying Li Shuai Sun Yajun

School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

Abstract Based on the ring loop element, a new element which sets a dipole slot in the ring loop element is introduced. The new combining element frequency selective surface (FSS) structure is calculated Galerkin's method in the spectral domain. The transmittance of both transverse electric wave (TE wave) and transverse magnetic wave (TM wave) at skew angle incidence of 30° and 45° is high at about 11.5 GHz. But it also exhibits polarization splitter at about 14 GHz.

Key words materials; filters; frequency selective surface; spectral domain method; transmittance; bandwidth

OCIS codes 160.3918; 230.4000; 240.6700

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,能使入射电磁波在特定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方面对其进行了广泛而深入的研究。

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],但在一些特定的使用条件下,对要求频段不仅仅是截止或高透,如极化选择、中性分束等,面对这些新要求,需要精心设计FSS单元,以满足特定的要求。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FSS进行了分析研究,提出了一种新型的FSS单元,即在特定的频段实现带通,在另一些特定频段实现极化分离。

2 数值算法原理

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^[9],孔径单元由入射场激励出感应磁流,则单个单元的散射场可以表示为

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

式中 ω 为角频率, ϵ_0 为真空的介电常数, \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 $\mathbf{H}^{\text{inc}}+\mathbf{H}^s=\mathbf{Z}\mathbf{M}$,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,

收稿日期: 2014-04-20; 收到修改稿日期: 2014-05-22; 网络出版日期: 2014-08-22

作者简介: 朱华新(1983—),男,博士,讲师,主要从事光学薄膜及微结构材料设计等方面的研究。

E-mail: zhuhuaxing1312@163.com

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定理则可得到谱域表达式为^[10-11]

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

式中 μ_0 为真空的磁导率, a, b 分别为FSS单位在二维空间上两个方向的周期, k_0 为真空中对应波长的波矢大小, $\tilde{G}(\alpha_{mn}, \beta_{mn})$ 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 不再是连续的值,而是取一些离散的值,它们对应相应的Floquet谐波,其表达式为

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

式中 k_x, k_y 分别为入射平面波在照射平面 x, y 方向上的波矢分量, Ω 为FSS两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,此基函数表达式为

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

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

其中

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

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

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

3 理论设计

图1为新单元FSS结构示意图,图中1为FSS新单元(在圆环中间设置了一偶极子),具体参数为圆环内外半径分别为3.5 mm和3 mm,周期为 $P=8$ mm,为正方形栅格排布,中间设置的偶极子长宽分别为4.5 mm和0.75 mm,2为平板基底,厚度为 $d=5$ mm,相对介电常数为 $\epsilon_r=3$,正切损耗为 $\tan \delta=0.005$ 。

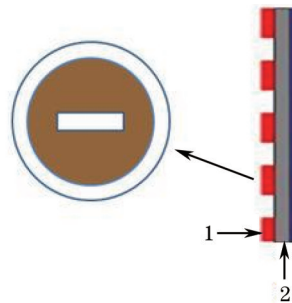


图1 新单元FSS结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the new FSS structure

圆环单元具有较宽的通带带宽,由于其良好的旋转对称特性,使其在平面电磁波倾斜入射的情况下具

有很好的抗交叉极化分离的特点,而偶极子单元恰好相反,在谐振波长处会表现出一定的交叉极化分离的特点,因此,原则上,只要将两者结合,组合成新的单元,就能实现在某些特定频段实现良好的无极化的带通特性,而在某些谐振频段实现交叉极化分离。

采用谱域法分别对圆环、偶极子进行研究,频率响应曲线分别如图2和图3所示。从图2中可以看出,圆环FSS单元具有较宽的带宽,横电波(TE波)、横磁波(TM波)在 30° 和 45° 倾斜入射的情况下,谐振中心频点在13 GHz左右,并且TM波的透射比高于TE波,通带带宽也要大很多,但在中心谐振频点附近,圆环对TE、TM波显示出较好的抗交叉极化能力。相反,在图3中可以看出,偶极子单元表现出强烈的极化分离特点,尤其是在谐振频点18.5 GHz附近, TM波有较高的透射比,但是TE波却在此频点透射比小于 -40 dB,两种不同的极化状态表现出了截然不同的透反特性,这是由偶极子单元自身的谐振特点决定的,在谐振频点附近表现出强烈的极化分离。

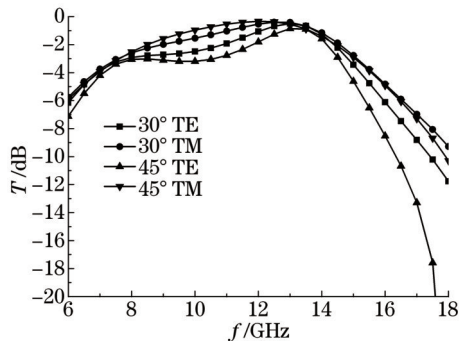


图2 圆环单元频率响应特性曲线

Fig.2 Curves of frequency response characteristics of ring loop

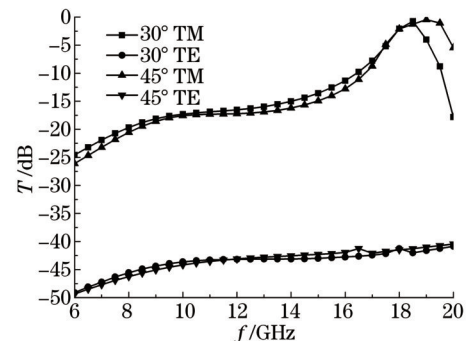


图3 偶极子单元频率响应特性曲线

Fig.3 Curves of frequency response characteristics of dipole

将两种FSS单元图形组合成的FSS新单元,其整体谐振特性绝不仅仅是两种单元谐振特性的简单叠加,将两种单元结合的过程中,两者分别激励出的感应磁流会发生耦合。在耦合作用影响下,两者的谐振频点均会有所漂移,应用谱域法求得的频率响应特性如图4和图5所示。

从图4中可以看出,TE、TM波在 30° 入射情况下,谐振频点在11.5 GHz,透射比分别为 -0.96 dB和 -0.77 dB,频率高于11.5 GHz时,TE波的透射比迅速下降,在15 GHz左右达到最低值,为 -36.25 dB,但此时TM波的透射比也只有 -2.86 dB,综合来看,在14 GHz频点处,极化隔离效果较好,此时TE、TM波的透射比分别为 -15.91 、 -1.19 dB,同样从图5中可以看出,TE、TM波在 45° 入射情况下,谐振频点也是11.5 GHz,透射比分别为 -1.48 dB和 -0.39 dB,说明此新单元的谐振角度稳定性较好,同样在高于谐振频点的频段,出现了类似于 30° 入射的情况,虽然在14.7 GHz处,TE波截止度达到了 -45.63 dB,但TM波的透射比偏低,仅为 -2.23 dB,因此,和平面波 30° 入射一样,在14 GHz处,表现出较好的极化隔离效果,TE、TM波的透射比分别为 -18.66 、 -1.43 dB。

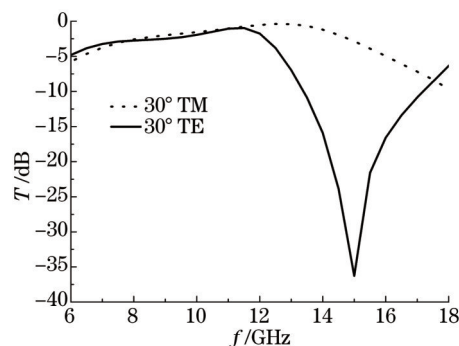


图4 以 30° 入射下组合单元FSS的频率响应曲线

Fig.4 Curves of frequency response under 30° incidence

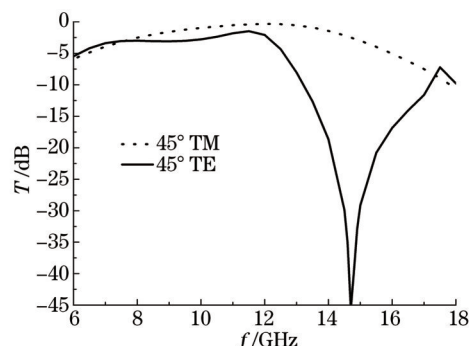


图5 以 45° 入射下组合单元FSS的频率响应曲线

Fig.5 Curves of frequency response under 45° incidence

综上所述,新单元实现了TE、TM波在11.5 GHz处的高透射比,而在14 GHz附近出现了TE、TM波极化分离的效果。与单独的圆环和偶极子相比,组合新单元的谐振频点均有所偏移,这是由两种单元耦合作用

所产生,但将两种单元组合后,使其各自发挥了作用,从而实现了特定的选频和极化分离性能。

4 结 论

利用谱域法对圆环和偶极子单元组合的新图形 FSS 单元进行了分析,通过对其频率响应特性曲线的研究,达到了预期的特有选频效果,充分展现了新单元的特点,实现了新的功能,在实际工程应用中,可根据具体的情况对该组合新单元进行结构参数调整,以适应工程中的具体要求,本研究为该新单元的使用提供了理论参考。

参 考 文 献

- 1 T K Wu. Frequency Selective Surface and Grid Array[M]. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1995.
- 2 B A Munk. Frequency Selective Surface: Theory and Design[M]. New York: A Wiley-Interscience Publication, 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]. Proceedings of the IEEE, 1988, 76(12): 1593-1615.
- 5 Hou Xinyu, Wan Wei, Tong Ming'an, *et al.*. Analysis on the loss and bandwidth properties of FSS with multilayer dielectric substrates[J]. Journal of 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 Qu Baolong, Li Xudong, Zhu Penggang. Design of frequency selective surface with double bands[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0824001.
曲宝龙,李旭东,朱鹏刚. 双带频率选择表面设计[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0824001.
- 13 Yu Miao, Gao Jinsong, Xu Nianxi. Diffractive characteristics of optically transparent frequency selective surface[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0831001.
于淼,高劲松,徐念喜. 光学透明频率选择表面的衍射特性[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0831001.
- 14 Zhao Huaxin, Jiang Yongxiang, Luo Tianqiong, *et al.*. Hollow optical fiber sensor based on surface plasmon resonance [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 32(6): 0628001.
赵华新,蒋永翔,罗天穹,等. 基于等离子体共振原理的空芯光纤传感器[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0628001.
- 15 Zhang Liang, Zhang Wei, Nie Qiuhua, *et al.*. Research progress of two-dimensional photonic crystal waveguide[J]. Laser & optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 030008.
章亮,张巍,聂秋华,等. 二维光子晶体波导研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(3): 030008.
- 16 Li Yongqian, Wang Binbin, Su Lei, *et al.*. Analytic model of optical constants for infrared absorption material with nanostructure[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1216002.
黎永前,王斌斌,苏磊,等. 微纳结构红外吸收材料光学常数的解析模型[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1216002.