

双带频率选择表面设计

曲宝龙^{1,2} 李旭东¹ 朱鹏刚¹

(¹ 兰州理工大学甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)
² 长江大学化学与环境工程学院, 湖北 荆州 434023)

摘要 为了实现频率选择表面(FSS)的双带特性,设计了由矩形栅格和三圆环组合单元 FSS。对 FSS 的谱域求解方法进行了详细的描述。采用谱域法分析了不同角度和极化入射波下 FSS 的频率响应性能。结果表明,所设计的 FSS 对于不同入射角度和极化电磁波具有稳定的双带、平顶传输及陡峭下降边缘特性。双带特性大致表现为 1.8~5.4 GHz 的阻带和 5.4~20.0 GHz 的通带。阻带谐振频率稳定在 3.1 GHz 左右,而通带在 -4 dB 的平顶传输带宽达 14.3 GHz 以上。其陡峭下降边缘特性表现为 S 波段信号强烈反射,而其他波段信号通过,从而实现多波段通讯。该结构 FSS 可应用于卫星通信、雷达罩及其他相关领域。

关键词 表面光学;频率响应特性;谱域法;频率选择表面;组合单元

中图分类号 TN713; TN957 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0824001

Design of Frequency Selective Surface with Double Bands

Qu Baolong^{1,2} Li Xudong¹ Zhu Penggang¹

¹ State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-Ferrous Metal Materials,
Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China

² College of Chemistry and Environmental Engineering, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China

Abstract In order to realize double-band properties of frequency selective surface (FSS), the composite element FSS, composed of rectangle grid and three-ring loop element, is presented. The spectral domain solution method is described in detail for FSS. The frequency response properties of FSS are analyzed for electromagnetic waves with different incident angles and polarizations based on the spectral domain method. The result shows that the designed FSS can maintain stable double-band, flat top transmission and sharp skirt properties for electromagnetic waves with different incidence angles and polarizations. The double-band properties show stop-band from 1.8 GHz to 5.4 GHz and pass-band from 5.4 GHz to 20.0 GHz. The resonant frequency of stop-band is situated at about 3.1 GHz, and the bandwidth of flat top transmission is over 14.3 GHz at -4 dB. The sharp skirt properties show that the S-band signal is reflected intensively and other band signals are transmitted, and multi-band communication is achieved. The composite FSS can be used in satellite communications, radomes and other fields.

Key words optics at surfaces; frequency response property; spectral domain method; frequency selective surface; composite element

OCIS codes 240.6700; 160.4670; 230.4000

1 引 言

频率选择表面(FSS)可以用作空间滤波器,它与电磁波相互作用表现出不同的滤波特性。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^[1,2]。FSS 频率响应特性依赖于单元的形状和尺寸、介质衬底的厚度和介电参数^[3,4]。单元阵列方式和形状决定 FSS 带通、带阻、低通、高通或多带属性^[5],其他参数则控制着频率响应特性

收稿日期: 2012-02-04; **收到修改稿日期**: 2012-03-30

基金项目: 国家自然科学基金(50271016,50571042)资助课题。

作者简介: 曲宝龙(1978—),男,博士研究生,讲师,主要从事复合材料内电磁场效应数值计算方面的研究。

E-mail: qubaolong_78@163.com

导师简介: 李旭东(1959—),男,博士,教授,主要从事材料微结构计算方面的研究。E-mail: lixd@lut.cn

曲线的形状和位置。FSS 的宽带传输和陡峭下降边缘特性在通信和各种雷达罩的天线反射器中有广泛应用^[6,7]。传统上,可采用双层 FSS 获得宽带传输特性,但双层 FSS 制作比较困难。也可以采用对称介质衬底来达到宽带传输,但介质衬底厚度要达到 1/4 波长,增加了传输损耗。

FSS 国内外研究流行多种算法,如谱域法^[8]、传输线法^[2]、网络端口算法^[9]和遗传算法^[10]等。在这些算法中,Taso 等^[11]在 1982 年提出的谱域分析法不仅数学模型简单,而且计算量较小、计算精度高。近年来,大量的实验证明了谱域法在计算 FSS 频率响应特性中的精确性与可靠性^[12~14]。

FSS 频率响应特性由单元尺寸、周期、衬底电性能等诸多因素决定,在组合单元中,其影响因素还包括单元电磁效应耦合,组合单元的频率响应特性一直是国内外研究的热门方向^[15]。为了获得稳定的双带特性、宽带传输和陡峭下降边缘特性,本文以矩形栅格和三圆环组合形式设计了一种新的 FSS 单元,采用谱域法计算了其频率响应特性,谱域方程的求解方式采用 Galerkin 法。分析了 1~25 GHz 范围内单元结构参数、入射角度和极化对 FSS 频率响应的影响。

2 单元模型及谱域分析方法

2.1 FSS 单元的几何模型

组合 FSS 结构如图 1 所示。单元排列方式选取为正方形排列,周期 $D_x = D_y = 10.9$ mm,矩形栅格宽度 $W = 0.5$ mm,圆环内半径 $R_1 = 1.0$ mm,圆环外半径 $R_2 = 1.4$ mm,在每个周期内圆环单元采用正三角形排列,选用这样的排列方式是出于极化

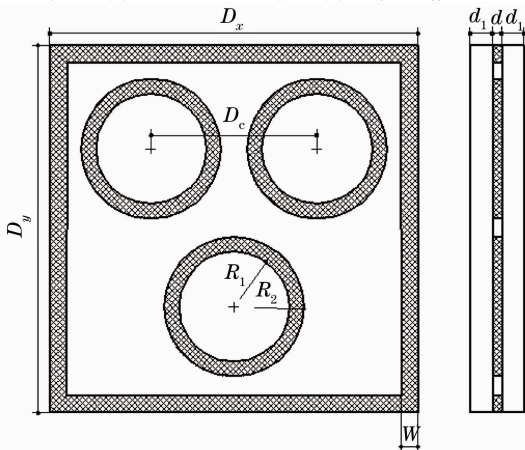


图 1 组合单元 FSS 结构示意图

Fig. 1 Structure of composite element FSS

稳定特性的考虑,圆环中心距 $D_c = 4.6$ mm,介质衬底厚度 $d_1 = 0.5$ mm。

参照同类研究文章^[5,6,8],设置衬底的相对介电常数的大概数值区间(0.1~4.0),通过优化设计得到,当衬底的相对介电常数参数为 0.9 时,曲线的极化稳定性较好。

2.2 谱域分析方法

谱域法即谱域中的模式分析方法,其简单过程如下:首先通过修改单个单元的积分方程,采用单个单元与 FSS 阵列单元贡献一致的方法得到解,也就是对单个单元的散射场表达式应用二维傅里叶变换,并结合 Floquet 定理,即可得到 FSS 单元阵列的磁场积分谱域表达式方程。然后运用谱域 Galerkin 法求出电流谱函数的解,进而计算散射场,得出反射和透射系数。

利用电磁场二重性原理,假设 J 是 FSS 结构上由入射电磁场激励起的感应电流,则单个单元的散射场可表示为

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

式中

$$A(r) = \int G(r, r') J(r') dr', \quad (2)$$

$G(r, r')$ 为自由空间格林函数,表达式为

$$G(r, r') = \frac{\exp(-jk_0 |r - r'|)}{4\pi |r - r'|}, \quad (3)$$

式中 $|r - r'|$ 为观察点 r 到源点 r' 的距离, k_0 为自由空间波数。

假设 FSS 单元为理想导体(PEC),则在 FSS 单元表面有 $E_t = E_t^s + E_t^{inc} = 0$ (下标表示切向磁场),应用傅里叶变换,即可得到谱域表达式为

$$-\begin{bmatrix} E_x^{inc}(x, y) \\ E_y^{inc}(x, y) \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \begin{bmatrix} k_0^2 - \alpha^2 & -\alpha\beta \\ -\alpha\beta & k_0^2 - \beta^2 \end{bmatrix} \times \tilde{G} \begin{bmatrix} \tilde{J}_x \\ \tilde{J}_y \end{bmatrix} \exp(j\alpha x) \exp(j\beta y) d\alpha d\beta, \quad (4)$$

式中自由空间波数 $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ 。对于 $k_0^2 > \alpha^2 + \beta^2$, 谱域并矢格林函数 $\tilde{G} = \frac{-j}{2 \sqrt{k_0^2 - \alpha^2 - \beta^2}} \mathbf{I}$, 否则 $\tilde{G} = \frac{1}{2 \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 - k_0^2}} \mathbf{I}$, \mathbf{I} 为单位张量。应用 Floquet 定

理,将谱域法推广到周期阵列贴片,有

$$J(x) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \tilde{J}_m \exp\left[j\left(\frac{2m\pi}{D_x} + k_x\right)x\right], \quad (5)$$

$$J(y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{J}_n \exp\left[j\left(\frac{2n\pi}{D_y} + k_y\right)y\right], \quad (6)$$

式中 k_x 和 k_y 为扫描角决定的 Floquet 传播常数, $k_x = k_0 \sin \theta \cos \phi$; $k_y = k_0 \sin \theta \sin \phi$ 。 D_x 和 D_y 分别表示沿 x 轴和 y 轴方向的周期长度, \tilde{J}_m 和 \tilde{J}_n 是傅里叶

级数的系数。

将(5),(6)式代入(4)式,有

$$-\begin{bmatrix} E_x^{\text{inc}}(x, y) \\ E_y^{\text{inc}}(x, y) \end{bmatrix} = \frac{2\pi}{j\alpha\epsilon_0 D_x D_y} \times \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} k_0^2 - a_m^2 & -\alpha_m \beta_n \\ -\alpha_m \beta_n & k_0^2 - \beta_n^2 \end{bmatrix} \times \tilde{G}(\alpha_m, \beta_n) \begin{bmatrix} \tilde{J}_x(\alpha_m, \beta_n) \\ \tilde{J}_y(\alpha_m, \beta_n) \end{bmatrix} \exp(j\alpha_m x) \exp(j\beta_n y). \quad (7)$$

由于 FSS 阵列是二维周期结构,由傅里叶变换的性质可知, α 和 β 不再是连续的值,变为 α_m 和 β_n , 它们对应相应的 Floquet 谐波, $\alpha_m = \frac{2m\pi}{D_x} + k_x^{\text{inc}}$, $\beta_n = \frac{2n\pi}{D_y} + k_y^{\text{inc}}$ 。

FSS 屏是二维周期阵列,其上下表面的未知等效电流的方程一样,方程是奇异的,不能求解。但在电场离散积分方程中,可将上下表面对应的未知数相加作为新的未知数,这样未知数的个数就减少为原来的一半,而单纯对于上表面或下表面来说,所包括的未知数是线性无关的,因此新引入的未知数可以解出。

将感应电流 J_x 和 J_y 用 rooftop 基函数^[12~14]展开(测试函数与基函数形式相同),电流分布如图 2 所示,将周期单元离散为 $N \times M$ 个,则由快速傅里叶变换得到感应电流表达式为

$$J_x = \sum_{m=-M/2}^{M/2-1} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} I_x(n, m) B_x(n, m), \quad (8)$$

$$J_y = \sum_{m=-M/2}^{M/2-1} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} I_y(n, m) B_y(n, m), \quad (9)$$

式中 $I_x(n, m)$ 和 $I_y(n, m)$ 为电流分布函数, $B_x(n, m)$ 和 $B_y(n, m)$ 分别为 x, y 方向上的子域基函数:

$$B_x(n, m) = \Lambda(n + 1/2) F(m), \quad (10)$$

$$B_y(n, m) = F(n) \Lambda(m + 1/2). \quad (11)$$

对于 rooftop 离散函数有

$$F(m) = \begin{cases} 1, & |y - m\Delta y| \leq \frac{\Delta y}{2} \\ 0, & |y - m\Delta y| > \frac{\Delta y}{2} \end{cases}, \quad (12)$$

$$\Lambda(n) = \begin{cases} 1 - \frac{|x - n\Delta x|}{\Delta x}, & |x - n\Delta x| \leq \Delta x \\ 0, & |x - n\Delta x| > \Delta x \end{cases}. \quad (13)$$

由(12),(13)式可见,子域外的单元权重为零。利用模函数的正交性将积分方程转化为矩阵方程,应用 Galerkin 矩量法求解方程(7),就可以求出周

期单元上的未知电场,进而可以得到周期表面的等效电流分布,最后求出反射场和透射场。

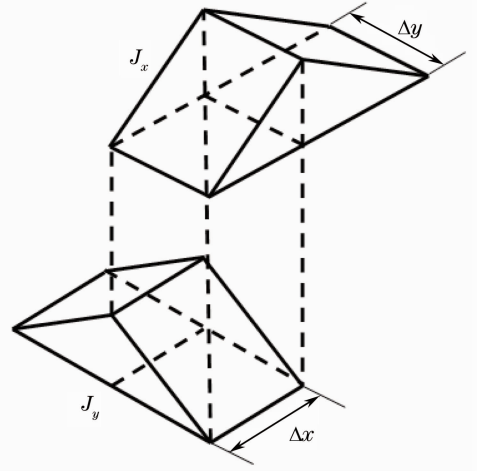


图 2 rooftop 基函数电流分布

Fig. 2 Current distribution of rooftop basic function

3 数值结果分析

3.1 双带特性及宽带传输特性

FSS 的频率响应特性与单元结构参数有直接关系,单元的边长与宽度直接影响单元上的电流分布。本研究所设计的组合单元同时拥有带阻和带通的双带特性,带阻特性由圆环决定,带通特性由矩形栅格决定,而二者的任一结构参数变化都将直接影响组合单元的频率响应特性。

由图 3 可见,当矩形栅格宽度 $W = 0.5$ mm,圆环内半径 $R_1 = 1.0$ mm,圆环外半径 $R_2 = 1.4$ mm,圆环中心距 $D_c = 4.6$ mm 时,组合单元的谐振频率为 3.2 GHz,谐振频率处的透射率为 -72.00 dB, -4 dB 的阻带带宽为 4.3 GHz,通带带宽为 15.7 GHz,由曲线形状来看,该组合单元具有明显的双带特性。这种双带频率响应特性不仅仅是两种结构特性的简单叠加。入射电磁波使得 FSS 产生感应电流,作为组合单元的矩形栅格和三圆环的感应电场会发生耦合作用。其中,低频率段的带阻特

性主要由圆环单元决定,高频率段的带通特性主要由矩形栅格单元决定。在组合单元耦合作用下,产生了平顶宽带传输和陡峭下降边缘特性。该 FSS 的陡峭下降边缘特性能将 S 波段(2~4 GHz)和其他高频波段(C、X 和 Ku 波段)的相邻信号分离开。

使用该结构 FSS 的天线系统,可以对 S 波段信号形成强烈反射(不高于-11 dB),而同时使 C、X 和 Ku 等其他波段信号透射,从而实现多波段通讯。理论上,调整该单元的结构参数,可以实现其他波段的多波段通讯。

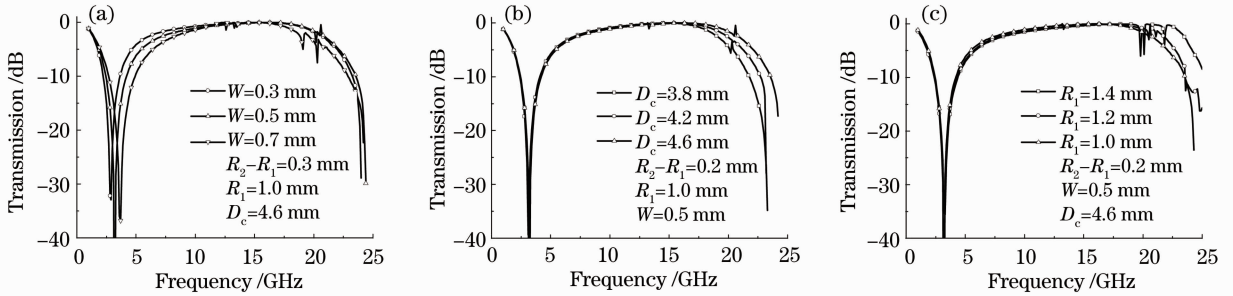


图 3 单元结构参数对 FSS 频率响应特性的影响。(a)不同的 W 对 FSS 的影响;

(b)不同的 D_c 对 FSS 的影响;

(c)不同的 R_1 对 FSS 的影响
Fig. 3 Influence of the structure parameters of element on the frequency response of FSS. (a) Influence of different W ; (b) influence of different D_c ; (c) influence of different R_1

图 3(a)为 W 变化而其他参数不变对 FSS 频率响应特性的影响,而图 3(b)和(c)分别对应于结构参数 D_c 和 R_1 变化情况。表 1 中的数据分别对应结构参数 W 、 D_c 、 R_1 变化时,FSS 频率响应特性的主要指标。由图 3(a)可见,当 W 增加时,频率响应特性曲线向高频漂移, W 从 0.3 mm 增加至 0.7 mm,谐振频率向高频漂移了 0.9 GHz,阻带带宽增加了 1.8 GHz,而通带带宽减小了 2.7 GHz。由此可见,单元宽度增加会导致 FSS 传输带宽增加的传统观点并不确切,在某些组合单元中,这种情况刚好相反。对比图 3(b)和(c), D_c 和 R_1 变化对曲线漂移影响较小,但对带宽有一定的影响。 D_c 和

R_1 增加将导致阻带带宽和通带带宽不同程度增加。但二者对谐振频率处的透射率影响趋势则相反。从单元结构参数的分析来看,阻带的谐振频率对 W 变化比较敏感,而这三种结构参数对通带的传输带宽均有不同程度的影响。由图 3 的曲线变化趋势结合表 1 中的主要指标数据可以预见,适当增加 D_c 、 R_1 并减小 W 将会使 FSS 的平顶特性更加明显。此外, W 和 R_1 的增加将会导致曲线过早出现栅瓣,如图 3(c)所示,当 $R_1=1.4$ mm 时,曲线在 20 GHz 处出现较大栅瓣。在 FSS 应用中要综合考虑 3 种结构参数的优化设计。

表 1 FSS 不同结构参数对频率响应特性的影响对比

Table 1 Comparison of the frequency response affected by different structure parameters of FSS

Structure parameters /mm	Stop-band		Pass-band			
	Resonant frequency /GHz	Transmission /dB	Bandwidth /GHz	Bandwidth /GHz		
W	0.3	$D_c=4.6$ mm	2.9	-33.92	3.5	16.3
	0.5	$R_1=1.0$ mm	3.2	-72.00	4.3	15.7
	0.7		3.7	-36.79	5.3	13.6
D_c	3.8	$W=0.5$ mm	3.1	-39.36	4.1	14.0
	4.2		3.2	-52.36	4.3	14.8
	4.6		$R_1=1.0$ mm	3.2	-72.00	4.3
R_1	1.0	$W=0.5$ mm	3.2	-72.00	4.3	15.7
	1.2		3.2	-57.64	4.6	16.1
	1.4		$D_c=4.6$ mm	3.3	-35.53	4.8

3.2 角度稳定性及极化特性

FSS 频率响应特性的优劣还要考虑到对不同入射角性能稳定性和电磁波的极化特性。图 4 和图 5 分别为不同入射角度 TE 极化和 TM 极化的 FSS 频率响应特性曲线。从曲线图来看,无论是 TE 极化或 TM 极化情况,对不同入射角,FSS 频率响应依然保持良好的双带特性、平顶宽带传输和陡峭下降边缘特性。

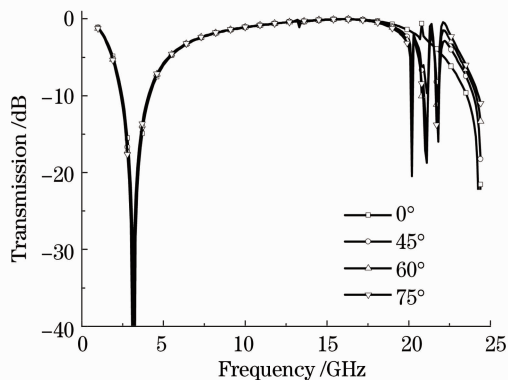


图 4 TE 极化不同入射角的频率响应

Fig. 4 Frequency response of FSS for different incidence angles (TE polarization)

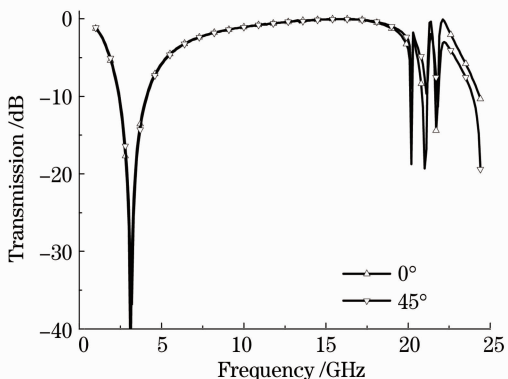


图 5 TM 极化不同入射角的频率响应

Fig. 5 Frequency response of FSS for different incidence angles (TM polarization)

对于 TE 极化来说,对不同的入射角,FSS 的谐振频率始终保持在 3.2 GHz,十分稳定,而阻带的带宽也比较稳定。但随着入射角的增大,通带的带宽明显减小,在 -4 dB 处查看,入射角由 0°增加到 75°,通带带宽由正入射的 15.7 GHz 减小至 14.2 GHz。引起这一变化的主要原因是在斜入射情况下,20 GHz 处出现了第一栅瓣,这个栅瓣是无法避免的,且在后续的 21.1、21.8 GHz 处将陆续出现第 2、第 3 栅瓣。在 TM 极化下,FSS 依然保持了良好的双带特性,在

0°和 45°入射角下,其谐振频率分别为 3.1 GHz 和 3.2 GHz,且通带仍能保持 14.3 GHz 以上的平顶传输带宽,但在 20 GHz 之后不可避免地出现一系列栅瓣。栅瓣的出现是由于阻抗虚部出现奇点,实部发生变化,在栅瓣方向提供能量所引起的。栅瓣的出现对 FSS 的角度稳定性有很大影响,不可避免,但可以通过调整单元结构参数提高栅瓣起始频率,以扩展通带带宽。

4 结 论

基于谱域法对矩形栅格和三圆环组合单元这一新型 FSS 进行了分析和双带应用研究。该 FSS 的典型特点是双带特性、平顶宽带传输和陡峭下降边缘特性,在不同的极化与入射角下,其频率响应特性十分稳定,可用于宽带传输和分离相邻波段信号,适用于卫星通信、雷达罩及其他相关领域。

参 考 文 献

- Lu Jun, Sun Guancheng, Cai Hongxing. Transmission characteristic of far-infrared frequency selective surface [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(6): 41~44
- 卢俊,孙贯成,蔡红星. 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
- A. L. P. S. Campos. Analysis of FSS with dielectric losses at millimeter wave band using the transverse transmission line method [J]. *International J. Infrared and Millimeter Waves*, 2007, **28**(2): 139~147
- He Zhang, Jun Lu, Guancheng Sun *et al.*. Influence of substrate process tolerance on transmission characteristics of frequency-selective surface [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(1): 54~56
- A. L. P. S. Campos, A. G. d'Assunção, M. A. B. de Melo. Frequency selective surfaces with anisotropic dielectric superstrates [J]. *International J. Infrared and Millimeter Waves*, 2000, **21**(3): 461~475
- B. A. Munk. *Frequency Selective Surface: Theory and Design* [M]. New York: Wiley, 2000. 27~29
- 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
- Jia Hongyan, Gao Jinsong, Feng Xiaoguo *et al.*. Novel composite element frequency selective surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1596~1600
- 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
- A. L. P. S. Campos, A. G. d'Assunção. A sensitivity analysis of frequency selective surfaces at millimeter wave band [J]. *International J. Infrared and Millimeter Waves*, 2004, **25**(1): 15~27
- Weihai Fang, Shanxia Xu. Scattering characteristics of dielectric periodic structure composed of left-handed materials with arbitrary oblique incidence [J]. *J. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2008, **29**(11): 1060~1069
- H. Shim, J. Lee, F. Y. Lee *et al.*. Optimal design of frequency selective surface by genetic algorithm [J]. *International J. Precision Engineering and Manufacturing*, 2010, **11**(5): 725~732

- 11 C. H. Taso, R. Mittra. A spectral-iteration approach for analyzing scattering from frequency selective surfaces[J]. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 1982, **30**(2): 303~308
- 12 Wang Shanshan, Gao Jinsong, Feng Xiaoguo *et al.*. Design methods of fractal frequency selective surface based on quasi-optical waveband[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0416001
王珊珊, 高劲松, 冯晓国 等. 基于矩量法分析准光学波段的分形频率选择表面[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0416001
- 13 Hongyan Jia, Jinsong Gao, Xiaoguo Feng. Closely packed dense frequency selective surface[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(6): 441~442
- 14 Huaxin Zhu, Jinsong Gao, Jingli Zhao *et al.*. Effective medium theory applied to frequency selective surfaces on periodic substrates[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(12): 1175~1177
- 15 Qu Baolong, Li Xudong, Zhang Zibin *et al.*. Design and study of combination element frequency selective surface [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(10): 101603
曲宝龙, 李旭东, 张自斌 等. 组合单元频率选择表面的研究设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(10): 101603

栏目编辑: 韩 峰