基于矩量法分析准光学波段的分形频率选择表面

王珊珊^{1,2} 高劲松¹ 冯晓国¹ 梁凤超¹ 赵晶丽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 在准光学系统中,频率选择表面(FSS)主要作为高效分离准光学高斯波束的无源滤波器运用于多频率信道。 利用分形结构局部与整体的自相似性将分形理论应用于 FSS 领域,将分形结构作为 FSS 的周期单元使单屏 FSS 具有多频谐振的特性,从而实现简易、多频无源带通滤波器件的设计。以常见的十字单元为例,经过递归产生二阶 十字分形单元,结合 Floquet 周期理论和边界条件应用矩量法对分形 FSS 的传输特性进行理论分析与设计,获得在 准光学波段 58 GHz 和 145 GHz 处谐振的单屏 FSS,谐振频率的透射率均大于 95%。通过分析改变分形 FSS 的结 构参数对其传输特性的影响,得出二阶十字 FSS 的第一谐振频率 f₁ 主要由原始单元臂长 L₁ 决定而第二谐振频率 f₂ 对迭代单元臂长 L₂ 较敏感,f₁ 的传输特性较稳定的设计规律。考察了电磁波入射角度与极化方式变化时十字 分形 FSS 频率响应的稳定性。

关键词 表面光学;频率选择表面;分形单元;多频谐振;矩量法 中图分类号 TN975 **文献标识码** A doi: 10.3788/AOS201131.0416001

Design Methods of Fractal Frequency Selective Surface Based on Quasi-Optical Waveband

Wang Shanshan^{1,2} Gao Jinsong¹ Feng Xiaoguo¹ Liang Fengchao¹ Zhao Jingli¹

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

Abstract Frequency selective surface (FSS) is mainly used as passive filters to separate optical Gaussian beam in quasi-optical system. The multiband FSS on single screen can be designed using self-similar fractal elements as periodic cells. Take cross element for example we can obtain second-order cross fractal element by recursive algorithm. The method of moments is employed to characterize the transmission properties of fractal band-pass FSS combining with Floquet's periodic theory and boundary conditions. The transmissivity of multiband FSS with resonant frequencies of 58 GHz and 145 GHz are all above 95%. After analyzing the influence of changing the structural parameters of fractal FSS on its transmission characteristic, it is known that the first resonant frequency f_1 is decided by the arm length L_1 of the original element and the second resonant frequency f_2 is sensitive to the arm length L_2 of the iterative element, the stability of the transmission characteristics of f_1 is better than f_2 . We examine the stability of the fractal FSS frequency response when changing the incident angle and polarization of the electromagnetic wave.

Key words optics at surfaces; frequency selective surface; fractal elements; multiband resonant frequencies; method of moments

OCIS codes 160.3918; 230.4000; 240.6700

导师简介:高劲松(1968-),男,博士,研究员,主要从事光学薄膜及隐身材料等方面的研究。

E-mail: gaojs@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2010-07-02; 收到修改稿日期: 2010-11-03

基金项目:中国科学院国防创新基金(CXJJ-149)资助课题。

作者简介: 王珊珊(1983—), 女, 博士研究生, 主要从事频率选择表面等功能性材料方面的研究。

E-mail: michaela1031@hotmail.com

1 引 言

频率选择表面(FSS)是由特定形状的谐振单元 沿一定方向排列形成的周期性阵列平面结构,是一 个对电磁波的人射角、极化方式和频率均有选择作 用的空间滤波器,它在电磁频谱的各个波段都有着 广泛的应用^[1~3]。在准光学系统中,FSS 主要作为 高效分离准光学高斯波束的无源滤波器运用于多频 率信道。1996年,美国发射的极轨气象卫星中的辐 射计 AMSU-B就使用了 FSS 以完成将入射的高斯 波分成3束不同频率段的波束输出^[3]。近年来,随 着现代通信技术的迅速发展,对通信设备集成化、高 效化的要求越来越明显。相应的,结构简单且具备 多频谐振特性的 FSS 也成为研究热点。

分形结构的起始单元与迭代单元间具有自相似 性,利用这一特性将分形结构作为周期单元应用于 FSS领域使单屏 FSS 具有多频谐振的特性,不仅可 以通过调整单元的迭代比例得到实际需要的多通带 分束器,还可以取代级联 FSS 等复杂结构满足通信 设备的简易、集成化要求。国外自 1991 年起, Parker 等^[4]对分形结构在多频谐振器件中的应用 进行探索研究,取得了一定的研究成果;国内大多应 用特性研究成熟的单元,对前沿关注度较低,所以对 于分形 FSS 这种精细复杂的单元至今仍无高效准 确的设计方法。

本文以常见的十字单元为例,用递归算法生成 二阶十字单元,结合 Floquet 定理与边界条件应用 矩量法对十字分形 FSS 的电磁特性进行理论计算 和设计,定量地分析了分形 FSS 的结构参数对其频 率响应特性的影响并考察了当电磁波入射角度和极 化方式改变时该结构的角度稳定性和极化稳定性。 通过研究周期单元各尺寸参数对 FSS 频率响应特 性的影响规律,为分形 FSS 的设计提供了设计指导 和经验参考。

2 单元模型及理论分析方法

2.1 分形单元的几何模型

图 1 为二阶十字分形单元的示意图及结构参数, 十字分形单元可以直接由递归算法进行二次迭代生 成,单元在 x,y 方向的周期大小均为 2 mm,原始单元 臂长 L_1 = 1.8 mm,二阶单元臂长 L_2 = 0.8 mm,迭代 比例 F = 0.44,两者臂宽相等 W = 0.125 mm,单元的 相似性维数为 D = ln4/ln2.25 = 1.71。对于规则的 FSS 单元,谐振频率可依据单元尺寸进行估算,以十 字孔径单元为例,谐振波长约为臂长的 2 倍,按照该 方法估算及上述单元参数,十字分形单元的谐振频 率 f_0 约为 83 GHz 和 187.5 GHz。FSS 的承载基 底选用低损耗的覆铜聚酰亚胺薄膜(PI),其相对介 电常数 ϵ = 0.29,正切损耗 tan δ = 0.005,厚度 d = 0.02 mm;周期单元采用正方形栅格排布方式,电磁 波电场矢量垂直于入射平面入射。





2.2 理论计算方法

图 2 为电磁波激励 FSS 的参数示意图,FSS 屏 置于 x-y 平面,k。为入射电磁波波矢, T_x 和 T_y 对 应 x 与 y 方向的周期, θ 是入射波与 FSS 屏法线方 向的夹角,而 φ 是波矢方向在 x-y 平面的投影与 x轴方向的夹角。假设入射电磁波为均匀平面波, FSS 是二维无限大周期结构,根据 Floquet 周期定 理,电磁波入射时会激励起无限个 TE 或 TM 本征 模式和相应的空间谐波使散射场可表示为一无穷谐 波求和,所以可以将反射场和透射场展开成带有未 知系数 Floquet 模的无穷级数形式。另外还要假设 电磁波入射到 FSS 单元时,每个单元具有等同的振 幅,这利于有效确定二维周期结构的并矢格林函 数^[5]。结合阻抗边界条件:

$$\begin{bmatrix} E_{s}^{s}(x,y) \\ E_{y}^{s}(x,y) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{x}^{i}(x,y) \\ E_{y}^{i}(x,y) \end{bmatrix} - Z_{s} \begin{bmatrix} J_{x} \\ J_{y} \end{bmatrix} = 0, \quad (1)$$

就可以建立起周期单元的电场与其表面感应电流的 联系,进而得到描述导电单元表面电流分布的电场 积分方程(EFIE):

$$\begin{bmatrix} E_x^{i}(x,y) \\ E_y^{i}(x,y) \end{bmatrix} = \frac{2\pi}{j\omega \varepsilon_0 T_x T_y} \sum_{-\infty}^{\infty} \sum_{-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} k_0^2 - \alpha_m^2 & -\alpha_m \beta_n \\ -\alpha_m \beta_n & k_0^2 - \beta_n^2 \end{bmatrix} \times \tilde{\boldsymbol{G}}(\alpha_m \beta_n) \begin{bmatrix} \tilde{\boldsymbol{J}}_x(\alpha_m,\beta_n) \\ \tilde{\boldsymbol{J}}_y(\alpha_m,\beta_n) \end{bmatrix} \exp(j\alpha_m x) \exp(j\beta_n y) - Z_s \begin{bmatrix} J_x \\ J_y \end{bmatrix},$$
(2)

式中

$$\alpha_m = \left(\frac{2m\pi}{T_x}\right) + k_x^{\rm i}, \qquad (3)$$

$$\beta_n = \left(\frac{2n\pi}{T_y}\right) + k_y^i, \qquad (4)$$

式中 Z_s 为金属屏波阻抗,假设 FSS 金属层是理想导 电层,则 $Z_s = 0_s E_x$ 与 E_y 是电场在x, y 方向上的分 量,同理, K_x 与 K_y 是波矢的分量,上标 s 与 i 分别对 应散射场和入射场,m,n 为 Floquet 模谐因子,m, $n = -\infty, \dots, -1, 0, 1, \dots, +\infty$ 。



图 2 电磁波激励时 FSS 参数示意图 Fig. 2 FSS paramter diagrams with electromagneticwave stimulation

对于论文中涉及的单屏 FSS 散射体是非常薄 的物体,这类物体上表面未知等效电流的方程和对 应的物体下表面未知等效电流方程是一样的,这样 组成的方程是式奇异的,不可求解。但是在电场离 散积分方程中,可以将上表面未知数加上其对应的 下表面未知数作为新的未知数,这样未知数的个数 就从 n 减为 n/2,由于对应于上表面未知数的 n/2 个方程是线性无关的,因此新引入的未知数可以解 出,而离散磁场积分方程则不具有上述性质。因此, 对于非常薄的散射体,只能应用电场积分方程。

将感应电流 J_x 与 J_y 用 roof-top 基函数^[5~7]展 开(检验函数形式与基函数相同),电流分布如图 3 所示,若将周期单元离散为 $N \times M$ 个,则由快速傅 里叶变换(FFT)得到感应电流表达式为

$$J_{x} = \sum_{m=-M/2}^{M/2-1} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} I_{x}(n,m) B_{x}(n,m), \quad (5)$$

$$J_{y} = \sum_{m=-M/2} \sum_{n=-N/2} I_{y}(n,m) B_{y}(n,m), \quad (6)$$

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

$$B_x(n,m) = \Lambda(n+1/2)\Pi(m), \qquad (7)$$

$$B_{y}(n,m) = \prod(n)\Lambda(m+1/2), \qquad (8)$$

对于 roof-top 离散:

$$\Pi(m) = \begin{cases} 1, \mid y - m\Delta y \mid \leq \frac{\Delta y}{2} \\ 0, \mid y - m\Delta y \mid > \frac{\Delta y}{2} \end{cases}, \quad (9)$$

$$\Lambda(n) = \begin{cases} 1 - \frac{|x - n\Delta x|}{\Delta x}, & |x - n\Delta x| \leq \Delta x \\ 0, & |x - n\Delta x| > \Delta x \end{cases}$$
(10)



图 3 roof-top 基函数电流分布

Fig. 3 Current distribution of roof-top basic function 很明显,子域外的单元权重均等于零。利用波 导模函数的正交性将积分方程转化为矩阵方程,应 用伽略金矩量法求解(2)式,即可得到周期单元上的 未知电场,进而可以得到周期表面的未知电流,最终 求出单屏 FSS 的透射系数或反射系数。

FSS的理论分析方法主要有矩量法^[8~10]、有限 元法和时域有限差分法,由于矩量法允许先计算一 个单元的辐射特性后再将结构周期扩展,而其它方 法则需对整个结构进行剖分,所以计算分形单元这 种精细复杂单元时,矩量法可有效节省时间。

3 数值结果分析

3.1 多频谐振特性

周期结构的谐振频率与单元尺寸是直接相关的,单元的电流分布与单元外边长有关,单元的宽度 不仅决定了FSS的谐振带宽,还很大程度上决定了 单元的末端电流分布。分形结构利用自身局部和整 体的相似性及尺寸差异使分形单元具有多频谐振的 特性,所以可以根据实际需要通过改变分形单元的 迭代次数和迭代比例决定周期结构的通带个数和谐 振频率。谐振频率及其透射率、-3 dB带宽是衡量 FSS 传输特性的重要指标,主要对不同单元尺寸参 数对分形 FSS 传输特性的影响进行分析。

由图 4 可知,当 L_1 =1.8 mm, L_2 =0.8 mm,W= 0.1 mm 时,FSS 分别在准光学波段 58 GHz 和 145 GHz处谐振,具有非常明显的双频谐振特性,但 与估算的谐振频点 83 GHz 和 187.5 GHz 差异较大, 这主要是由于迭代单元与起始单元之间的耦合改变 了臂长的有效电长度而造成的。另外,FSS 的承载基 底也会影响中心频点的位置。图 4(a)为 L_1 变化、其 它参数不变时对 FSS 谐振频点及透射率的影响,相应 的,图 4(b)为 L_2 变化, L_1 =1.8 mm,W=0.1 mm 时 的传输特性曲线;图 4(c)则对应于 W 变化, L_1 = 1.8 mm, L_2 =0.8 mm。从传输曲线及表 1 中不难 看出,当 L_1 从 1.7 mm 增至 1.9 mm 时, $f \propto 1/L$, FSS 的第一谐振频率 f_1 与第二谐振频率 f_2 分别向 低频漂移了 5 GHz 和 4 GHz,透射率均变化较小, 带宽减小了 4.25 GHz,这是由于 L_1 的增大减小了 原始单元的单元间距的同时减弱了迭代单元间的耦 合作用所导致的; L_2 从 0.8 mm 减至 0.6 mm 时, f_1 向高漂移了 2 GHz,透射率基本不变,但 f_2 的传输 特性恶化明显,中心频点向高漂移了 53 GHz 且透 射率下降了 3 dB,对 L_2 的变化非常敏感;与 L_1 , L_2 对 FSS 传输特性的影响相比,臂宽 W 变化的影响较 小, f_1 与 f_2 分别变化了 3 GHz 和1 GHz,透射率基本 不变,带宽分别变化了 3.37 GHz 和 1.85 GHz。由此 可见, f_1 主要由 L_1 决定而 f_2 则对 L_2 较敏感,且 f_1 的传输特性较稳定,在实际应用中可依据这一特性通 过适当调整原始单元与迭代单元的尺寸参数来得到 所需谐振频点的分形 FSS 设计。表 1 的数据对应于 图 4 的传输曲线,分别为臂长 L_1 (或臂长 L_2 、臂宽 W)变化,其它参数不变时 FSS 传输特性的主要衡 量指标。



图 4 周期单元参数对 FSS 频率响应特性的影响。(a) L_1 的变化对 FSS 的影响,(b) L_2 的变化对 FSS 的影响,(c) W 的变化对 FSS 的影响

Fig. 4 Influence of the structural parameters of periodical cells the frequency response of FSS. (a) influence of

different L_1 , (b) influence of different L_2 , (c) influence of different W on FSS

Table 1	Comparison of	of the	transmission	characteristics	affect b	y different	structure	parameters	of frac	etal FSS

Structure		Fir	est resonant fre	quency	Second resonant frequency			
parameters /mm		$f_1/{ m GHz}$	T_1/dB	Bandwidth /GHz	f_2/GHz	T_2/dB	Bandwidth /GHz	
	1.7	60	-0.069	12.82	146	-0.131	8.43	
L_1	1.8	58	-0.046	14.07	145	-0.150	7.16	
	1.9	55	-0.038	16.17	142	-0.549	4.18	
	0.6	60	-0.043	18.37	198	-2.27	_	
L_2	0.7	60	-0.039	17.37	183	-3.29	10.12	
	0.8	58	-0.046	14.07	145	-0.15	7.16	
W	0.065	55	-0.07	10.70	144	-0.28	5.31	
	0.1	57	-0.063	12.55	145	-0.21	5.86	
	0.125	58	-0.046	14.07	145	-0.15	7.16	

3.2 角度稳定性及极化特性

FSS的工程应用中经常涉及到一定角度范围入 射的情况,而且入射电磁波极化方式的改变对FSS周 期结构的传输特性影响有很大不同,因此在考虑分形 FSS的中心频率对不同入射角度稳定性的同时还要 考察FSS的极化稳定性。图5为电磁波垂直极化入 射,角度分别为0,20°和30°时FSS的频率响应特性, 单元尺寸参数如3.1节所述。当入射角度变化时,*f*1 始终为 58 GHz 不变, f_2 由 145 GHz 增至 146 GHz; T_1 从-0.046 dB 减至-0.054 dB, T_2 则从-0.15 dB 减至-1.05 dB,分别减小了 0.008 dB 和 0.9 dB; f_1 带宽减小了 4.11 GHz,随着入射角的增大,带宽大 约以 cos θ 的比例减小,电磁波水平极化入射的情况 相反,以 1/cos θ 的比例增大。图 6 为 θ 在 0~360° 范围内,谐振点 58 GHz 和 145 GHz 处在波源不同 极化方式下的透射率,不论入射波以何种方式入射, f_1 的透射率基本不变(θ =90°时存在奇异点,能量流 失严重), f_2 在 θ >60°时透射率急剧下降,能满足实 际工程应用需求,第一谐振频点的传输特性较第二 谐振频点稳定。在FSS设计过程中还需关注栅瓣 对传输特性的影响,在电磁波正入射时,FSS在距离 f_2 =148 GHz处出现栅瓣,这是由于阻抗虚部出现 奇异点而且实部发生变化,需要在栅瓣方向提供能 量所引起的。栅瓣的出现对谐振频率的透射率及角 度稳定性都有较大的影响,虽然栅瓣不可避免,但在 一定程度上,可以通过缩小单元间距或改变单元排 布方式来获得一个足够高的自由空间栅瓣起始 频率。



图 5 电磁波入射角改变时 FSS 的传输特性曲线





图 6 θ改变时 58 GHz 和 145 GHz 处的透射率 Fig. 6 Transmission coefficient at 58 GHz and 145 GHz when θ changes

4 结 论

近年来,FSS 作为分离准光学高斯波束的无源 滤波器有着越来越广阔的应用领域,利用分形单元 的自相似性将分形理论应用于 FSS 领域,直接经过 递归算法生成二阶十字 FSS 周期单元,得到在准光 学波段 58 GHz 和 145 GHz 处双频谐振的单屏 FSS 设计,满足现代工程应用集成化、高效率等日益苛刻 的要求。本文应用周期矩量法对 FSS 的传输特性 进行理论分析,总结了十字分形单元尺寸参数对其 频率响应特性的影响规律,不仅通过调节单元尺寸 参数可得到 FSS 较高的传输系数,该结构还具有较 好的角度稳定性和极化稳定性,为分形 FSS 的设计 与应用提供了经验参考。

参考文献

1 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

- 2 Lu Jun, Wang Jianbo. Research on asymmetric" Jerusalem" unit [J]. Chin. Opt. Lett., 2009, 7(5): 419~420
- 3 Zhu Huaxin, Feng Xiaoguo, Zhao Jingli *et al.*. Design of antireflection and band pass frequency selective surface combining coatings for ZnS optical window[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2766~2770

朱华新,冯晓国,赵晶丽等. ZnS光窗上增透与带通频率选择表面组合膜设计[J]. 光学学报,2010,30(9):2766~2770

- 4 Jordi Romeu, Y. Rahmat-Samii. A fractal based FSS with dual band characteristics[J]. Proc. IEEE Antennas and Propagation Soc. Int. Symp., 1999, 3: 1734~1737
- 5 B. A. Munk. Frequency Selective Surface: Theory and Design [M]. NewYork; Wiley, 2000
- 6 Xiaoqiu Li, Jianmin Zhou, Jinsong Gao. Analysis, fabrication, and measurement of Y aperture element frequency selective surface[J]. Chin. Opt. Lett., 2007, 5(11): 660~661
- 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 Sheng Xinqing. Essentials of Computational Electromagnetics [M]. Beijing: Science Press, 2004. 133~134 盛新庆. 计算电磁学要论[M]. 北京:科学出版社, 2004. 133~134
- 9 T. K. Wu. Frequency selective surface and grid array [M]. New York: Wiley, 1995