

二阶 Y 环频率选择表面的设计研究^{*}

高劲松¹⁾ 王珊珊^{1)2)†} 冯晓国¹⁾ 徐念喜¹⁾²⁾ 赵晶丽¹⁾ 陈 红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,长春 130033)

2) (中国科学院研究生院,北京 100039)

(2010 年 3 月 25 日收到;2010 年 5 月 19 日收到修改稿)

利用分形结构的自相似性将分形理论应用于频率选择表面(FSS)领域即可使在单屏 FSS 上具有多频段带通滤波的特性,结合 Floquet 周期边界条件,采用矩量法研究了二阶 Y 环分形 FSS 在不同入射角度下迭代比例因子 F 及单元排布方式对频率响应特性的影响规律,给出谐振频率的经验估算值. 计算及实验结果表明, FSS 的谐振频率主要由迭代比例因子及起始单元尺寸决定,而透过率及 -3 dB 带宽则对排布方式的改变较敏感. 实验结果与理论分析一致.

关键词: 频率选择表面,分形单元,二阶 Y 环,迭代因子

PACC: 7360

1. 引 言

频率选择表面(frequency selective surface,简称 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^[1,2]. 基于 FSS 的选频滤波特性,它在天线工程中主要应用于混合天线罩以及能实现天线多频复用的副反射面天线^[3,4]. 近年来,现代通信设备越来越需要小型化、可多频段工作的天线,相应地,简易、多频段 FSS 也成为研究热点. 将分形理论

应用于 FSS 领域,利用分形单元的自相似性使单屏分形 FSS 具有多频谐振特性,可取代级联 FSS 等复杂结构,具有重要的工程实用价值. 在 FSS 工程应用中,国内多采用研究较成熟的周期单元,对 FSS 前沿关注度较低. 国外自 1991 年开始, Romeu 和 Rahmat-Samii^[5], Gianvittorio 等^[6,7]对分形结构在 FSS 上的应用进行了深入地探索并取得了一定的研究成果. 但目前分形 FSS 仍没有准确高效的设计方法.

Y 环分形单元如图 1 所示,其中一阶 Y 环只有单一谐振点,而三阶 Y 环的第三谐振损耗大且单元

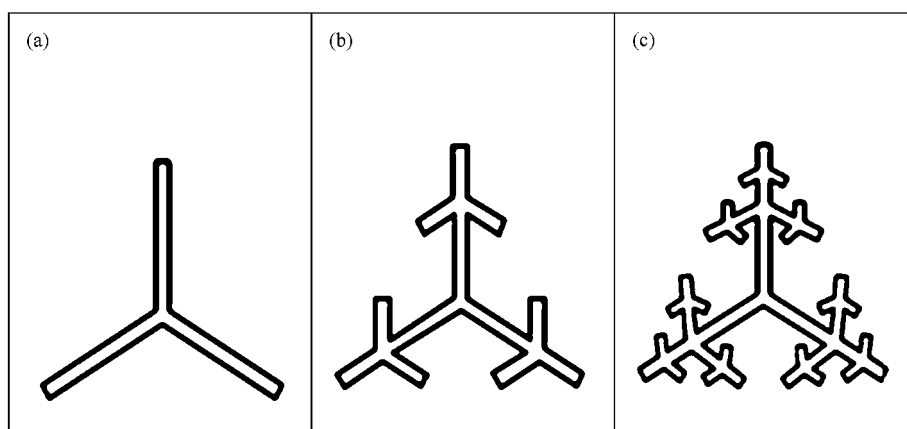


图 1 Y 环分形结构示意图 (a) 一阶 Y 环, (b) 二阶 Y 环, (c) 三阶 Y 环

^{*} 中国科学院国防创新基金(批准号: CXJJ-449)、中国科学院优秀博士论文和院长奖获得者科研启动专项基金(批准号: 076231J070)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: michaela1031@hotmail.com

耦合规律复杂, 不易实现曲面 FSS 的工程应用. 本文提出将迭代因子用于 FSS 谐振频率的估算与初步设计中, 简化了分形 FSS 的设计方法, 在工程常用的入射角范围内以仿真计算和实验测试为手段, 定量分析了迭代因子及排布方式对二阶 Y 环传输特性的影响, 给出谐振频率初步设计的经验估算常数, 为实现平面分形 FSS 的工程应用提供了可靠的设计依据和方法.

2. 分形 FSS 模型

分形单元的谐振频率个数由单元的迭代次数决定, 工程中可根据实际需要迭代任意次数, 但最终受限于制作工艺精度. Y 环分形单元是由起始 Y 环单元经过复制、缩放、平移或旋转产生的, 二阶 Y 环迭代单元的比例因子为 F , 其几何结构可以表述为:

$$y_1 = F \left(x, y + \frac{F}{1.5 + F} \right), \quad (1)$$

$$y_{2,3} = F \left(x \pm \frac{1-F}{2} y - \frac{1-F}{3+2F} \right), \quad (2)$$

$$Y_{n+1} = Y_n \cup y_1(Y_n) \cup y_{2,3}(Y_n), \quad (3)$$

其中 h 为原始 Y 环单臂长度, h' 为迭代单元的臂长如图 2 所示, Y_{n+1} 为原始单元经过 $y_1 \sim y_3$ 变换并进行 $n+1$ 次迭代后的几何位置, $h' = h(1-F)$. 这里需要注意的是, 只有原始单元与第一次迭代单元的单元间距不变, 多次迭代单元的间距随着迭代次数的增加是不断改变的.

结合周期边界条件, 采用矩量法对单屏分形 FSS 周期结构进行 Floquet 模展开, 通过满足 FSS 单元结构的电磁场连续边界条件形成电场积分方程, 矩阵形式为:

$$-\begin{bmatrix} E_x^{\text{inc}} \\ E_y^{\text{inc}} \end{bmatrix} = \frac{-j\omega\mu_0}{k_0^2} \begin{bmatrix} k_0^2 + \frac{\partial^2}{\partial x^2} & \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} & k_0^2 + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \end{bmatrix}, \quad (4)$$

(4) 式中, $A_x = G \cdot J_x$, $A_y = G \cdot J_y$, $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$, G 为自由空间 Green 函数, J 为 FSS 表面感应电流, 上标 inc 对应入射场. 对 (4) 式进行 Fourier 变换及 Floquet 模展开, 可以得到

$$-\begin{bmatrix} E_x^{\text{inc}}(x, y) \\ E_y^{\text{inc}}(x, y) \end{bmatrix} = \frac{2\pi}{j\omega\epsilon_0 ab} \sum_{-\infty}^{\infty} \sum_{-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} k_0^2 - \alpha_m^2 & -\alpha_m \beta_n \\ -\alpha_m \beta_n & k_0^2 - \beta_n^2 \end{bmatrix}$$

$$\times \tilde{G}(\alpha_m, \beta_n) \begin{bmatrix} \tilde{J}_x(\alpha_m, \beta_n) \\ \tilde{J}_y(\alpha_m, \beta_n) \end{bmatrix} e^{j\alpha_m x} e^{j\beta_n y}, \quad (5)$$

$$\alpha_m = \frac{2m\pi}{a} + k_x^{\text{inc}}, \quad (6)$$

$$\beta_n = \frac{2n\pi}{b} + k_y^{\text{inc}}, \quad (7)$$

式中 a, b 分别为 x 和 y 方向的周期大小, m, n 为 Floquet 模谐因子, $m, n = -\infty, \dots, -1, 0, 1, \dots, +\infty$. 将电场用一组基函数表述^[8,9], 对 (5) 式用矩量法求解, 进而根据所得矩阵方程求出基函数的系数, 最终可推出 FSS 结构的反射系数和透射系数. 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, 所以计算分形单元这种精细复杂单元时, 矩量法较时域有限差分法可有效节省时间^[10].

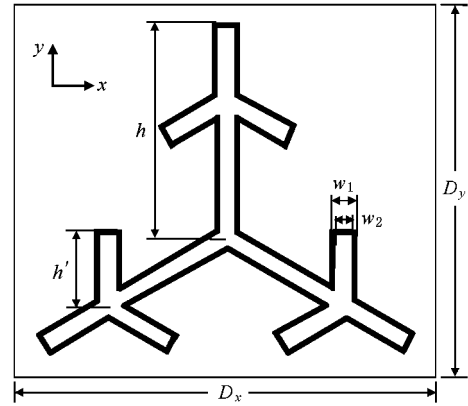


图2 二阶 Y 环结构参数示意图

3. 数值结果及特性分析

透过率及 -3 dB 带宽是衡量 FSS 传输特性的主要指标, 这里主要定量分析迭代因子 F 及单元排布方式的影响, 从而总结分形 FSS 设计方法. FSS 承载基底是介电常数 $\epsilon = 2.85$, 厚度 $d = 0.02$ mm 的覆铜聚酰亚胺薄膜, 单元采用正三角形栅格排布方式, 其具体参数为: $h = 15$ mm, $W_1 = 3.2$ mm, $W_2 = 1.2$ mm, $D_x = 30$ mm, $D_y = 25.98$ mm.

3.1. 迭代比例因子对 FSS 传输特性的影响

任何 FSS 单元的谐振频率都与其单元尺寸直接相关, 这里令 h 不变, 比例因子 F 的改变则意味着二阶单元极子长度的改变. 图 3 是电磁波垂直极化

入射时 F 由 0.27 变为 0.3 和 0.33 时分形 FSS 的频率响应特性. 表 1 为正入射时 F 的改变对谐振频率及透过率的影响对比.

对于 Y 环, 环的平均周长约等于一个谐振波长, 由上述单元参数可知, 一阶 Y 环周长为 93.6 mm, 则谐振点约为 3.21 GHz, 估算值与第一谐振点 f_1 的数值结果相吻合. 同样地, 第二谐振点 f_2 约为 10 GHz, 与数值结果相差较大, 这是由于原始单元与二阶单元耦合, 增加了二阶极子的有效电长度而使其谐振频率比独立极子低, 另外, 二阶单元的间距变化对谐振频率的降低也有贡献. 因此, 第二谐振频率不能简单地由其物理长度估算. 假设第二谐振波长 $\lambda_2 = \kappa L$, κ 为经验常数, L 为单元平均周长, 由上述数值结果及单元参数不难得出, 在此毫米波段 κ 约为 1.86. 由图 3 可以看出, 电磁波正入射, F 由 0.27 增至 0.30 和 0.33 时, f_1 与 f_2 均向低漂移了 200 MHz, f_1 的透过率

T_1 基本不变, 但 f_2 的透过率 T_2 减小了 0.28 dB, 与此同时, f_1 带宽由 750 M 变为 690 M, f_2 带宽则由 810 M 缩小到 720 M; 当电磁波入射角度改变时, f_1 带宽变化了 230 M, 而 f_2 带宽变化了 310 M. 由此可见, 第一谐振频率的传输特性较第二谐振频率更稳定, 迭代比例因子 F 主要决定谐振频率位置, 对其透过率及带宽影响较小. 这里需要注意的是, 栅瓣的传输特性对 F 的变化很敏感, 随着 F 的增大, 单元相互调制作用增强, 栅瓣透过率更高的同时离第二谐振点也越近, 这会恶化 f_2 的传输特性.

表 1 正入射时 F 对谐振频率的影响

F	第一谐振点		第二谐振点	
	f_1 /GHz	透过率 T_1 /dB	f_2 /GHz	透过率 T_2 /dB
0.27	3.4	-0.189	5.4	-0.069
0.30	3.2	-0.114	5.3	-0.118
0.33	3.2	-0.145	5.2	-0.350

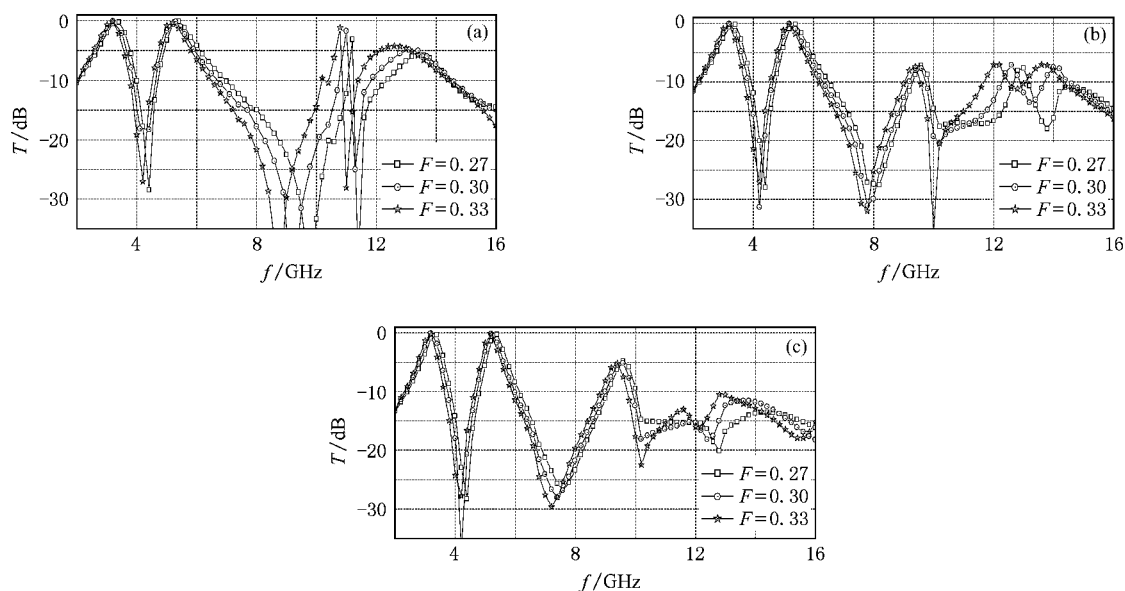


图 3 F 改变时 FSS 的传输特性对比 (a) 正入射, (b) 30° 入射, (c) 45° 入射

3.2. 排布方式对传输特性的影响

在某种程度上可认为单元排布方式的不同即为单元间距的不同, 它能够改变周期单元间的电场分布及电流调制情况, 进而改变 FSS 的谐振频率及其透过率. 这里我们将对比在 TE 极化方式下, 分形单元在正三角形 60° 和长方形 90° 栅格排列 (图 4) 时的频率响应特性, 其中 $F = 0.30$, 其他单元尺寸参数不变.

由图 5 及表 2 的数值结果可知, 入射角分别为

0°, 30° 和 45° 时, T_1 由 -0.117 降至 -0.119 dB, T_2 由 -0.118 降至 -0.129 dB, 分别降低 0.002 和 0.011 dB; 相应地, T'_1 与 T'_2 却降低了 0.039 和 0.361 dB (T'_1 和 T'_2 分别为单元采用 90° 排布方式时第一与第二谐振频点的透过率). 栅格排布方式对透过率的影响显而易见. 与长方形栅格排布方式相比, 采用三角形排布的带宽平均展宽 37 M, 这是由于 60° 栅格排布的单元更加紧密, 间距减小的缘故, 当厚介质加载 FSS 时, 排布方式对带宽及透过率的影响更加明显. 由此可见, 二阶 Y 环应该排列成三角形栅格. FSS

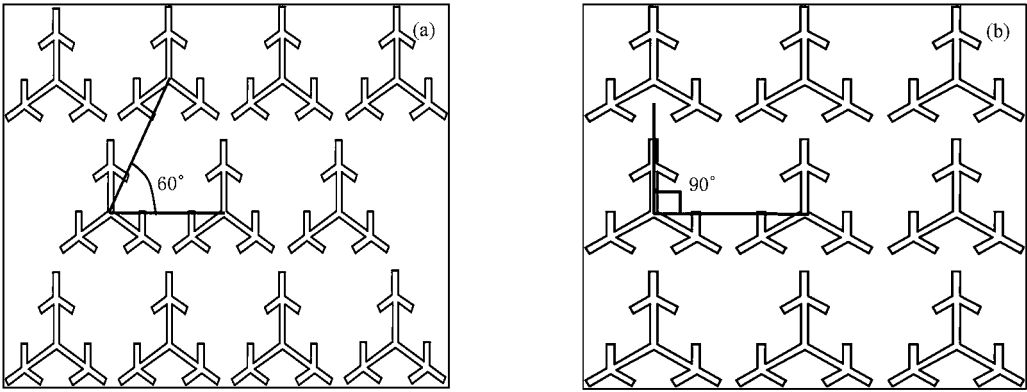


图4 分形 FSS 排布方式示意图 (a)60°栅格 ,(b)90°栅格

设计时还需注意的是单元排布方式的选择也会影响 FSS 的栅瓣及交叉极化特性. 为了避免栅瓣的产生,对于任何入射角度单元间距 D 都应满足 $\lambda_{\text{谐振}} < D < \lambda_{\text{真空}}$,单元间距越小,栅瓣频率就越高. 而调整二阶 Y 环臂之间的角度或是通过旋转 FSS 改变电磁波的入射方向就可以改善 FSS 的交叉极化特性.

表2 不同排布方式对 FSS 传输特性的影响

入射 角度	第一谐振点		第二谐振点	
	三角形 T_1	正方形 T'_1	三角形 T_2	正方形 T'_2
0°	-0.114	-0.16	-0.12	-0.01
30°	-0.117	-0.18	-0.12	-0.11
45°	-0.119	-0.20	-0.13	-0.37

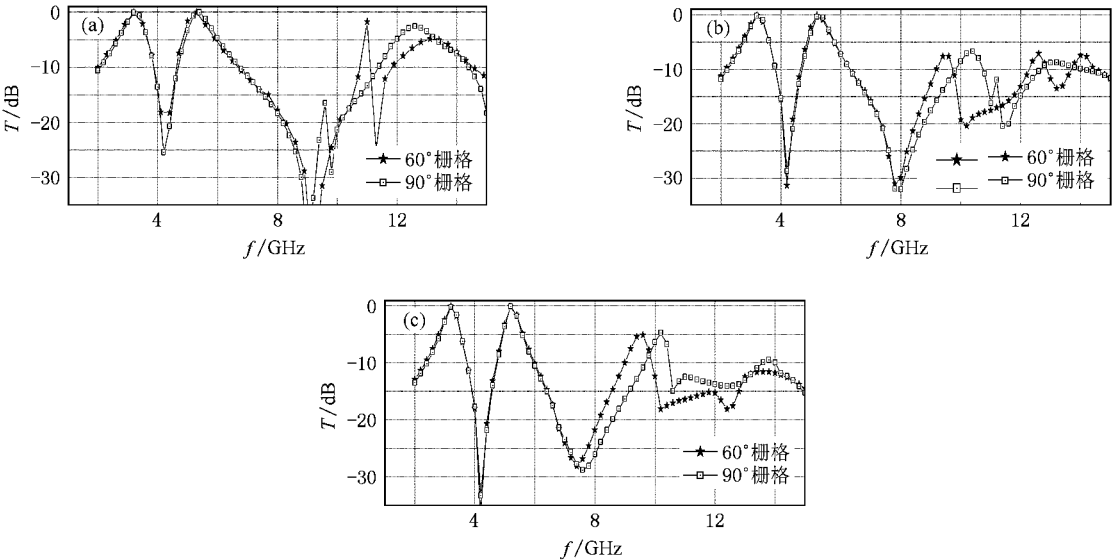


图5 不同排布方式下 FSS 的传输特性对比 (a)正入射 ,(b)30°入射 ,(c)45°入射

4. 实验测试

采用成熟的光刻工艺,在 600 mm × 500 mm 的覆铜聚酰亚胺薄膜基底上制作单屏分形 FSS,并在半电波暗室中对其频率响应特性进行了测试. 由于实验条件所限,仅测试 S (2—4 GHz) 和 C (4—8 GHz) 波段,实验测试系统如图 6 所示,图 7 为 FSS 样

件,实验测试结果如图 8 所示.

将 FSS 置于发射、接收天线中心(即天线的焦平面),用透镜天线测量 FSS,不仅可以得到窄的电磁波束,还可将焦平面处的入射电磁波近似为平面波^[11],这与数值计算中用到的平面波假设一致. 从测试结果看,60°栅格排列的 f_1 、 f_2 平均偏低 121 MHz, T_1 、 T_2 在 45°入射时分别下降 0.338 和 0.363 dB,其他入射角度透过率与数值结果符合. 而 90°栅

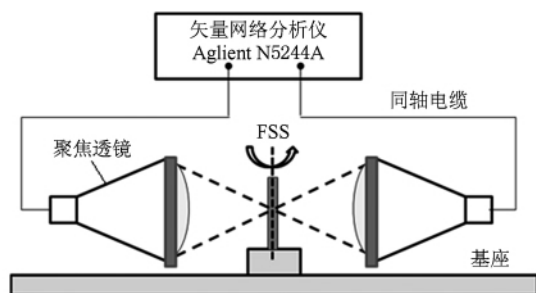


图6 FSS实验测量测试示意图

格排列的FSS,C波段谐振频率约偏低152 M,S波段向低漂移190 M,在不同入射角度下透过率分别下降0.41 dB、0.56和0.82 dB.这是因为测试时聚焦透镜间距离不变,而S波段波长较长,对天线间的距离较敏感,即FSS是否置于焦平面上对测试结果是有影响的,尤其是大角度入射情况下.另外,大角度入射时,FSS件处于偏置状态,样件的大小对FSS边缘的散射场分布有很大影响,总体来说,实验结果与数值计算基本一致.

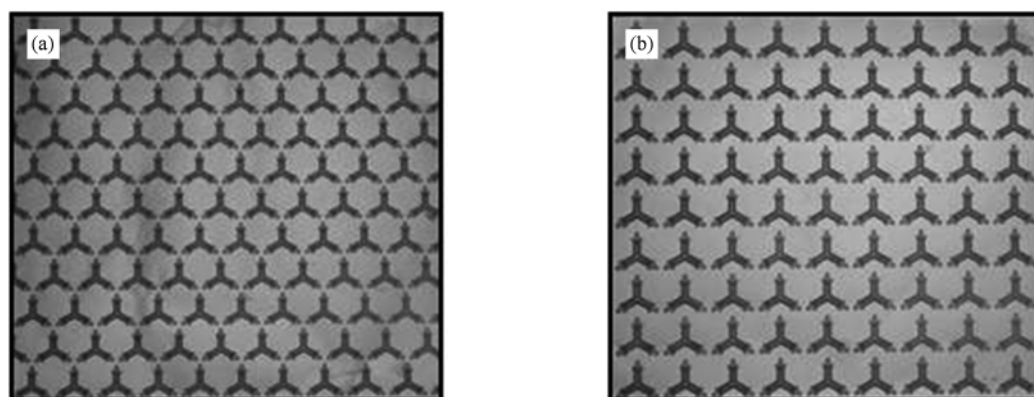


图7 FSS实验样件 (a)60°栅格,(b)90°栅格

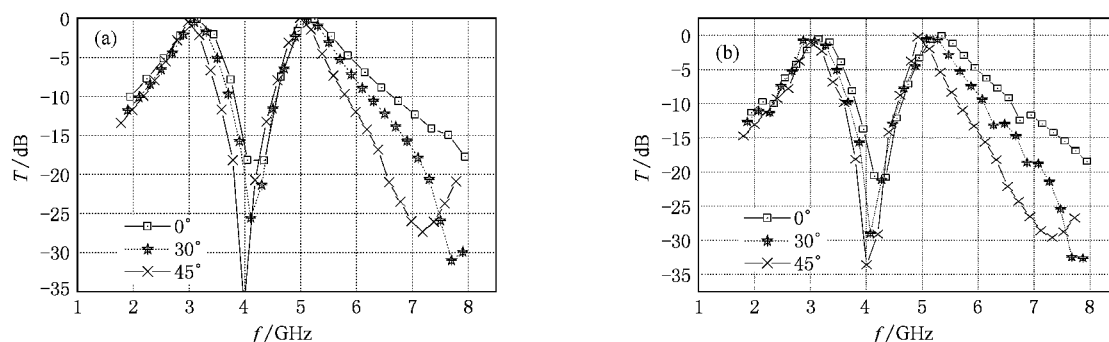


图8 分形FSS传输特性测量结果 (a)60°栅格排布,(b)90°栅格排布

5. 结 论

本文利用分形单元的自相似性可产生多谐振的特点将其应用于FSS领域,给出二阶Y环单元几何分布的迭代公式.结合周期边界条件,基于周期矩量法,对分形单元结构参数对FSS传输特性的

影响及规律进行探索研究,给出毫米波段估算分形FSS谐振频率的经验常数,得出了比例因子主要影响谐振点位置,而透过率及-3 dB带宽对FSS排布方式较敏感的结论,发现第一谐振频率响应特性较第二谐振更为稳定的特点.这为二阶Y环FSS的曲面工程实现提供了经验值参考,利于分形理论在多频段FSS工程领域的应用.

- [1] Mittra R, Chan C H, Cwik T 1988 *IEEE Proc.* **76** 1593
- [2] Li X Q, Feng X G, Gao J S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3193 (in Chinese) [李小秋、冯晓国、高劲松 2008 物理学报 **57** 3193]
- [3] Li X Q, Gao J S, Zhao J L, Sun L C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3803 (in Chinese) [李小秋、高劲松、赵晶丽、孙连春 2008 物理学报 **57** 3803]
- [4] Kraus J D, Marhefka R J (translated by Zhang W X) 2006 *Antennas* (Beijing: Electronic Industry Press) pp523—525 (in Chinese) [约翰·克劳森、马赫弗卡著, 章文勋译 2006 天线 (北京: 电子工业出版社) 第 523—第 525 页]
- [5] Romeu J, Rahmat-Samii Y 1999 *IEEE Proc. Int. AP-S Symp.* **3** 1734
- [6] Gianvittorio J P, Rahmat-Samii Y, Romeu J 2001 *IEEE Proc. Int. AP-S Symp.* **3** 640
- [7] Gianvittorio J P, Romeu J, Blanch S, Rahmat-Samii Y 2003 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **51** 3088
- [8] Munk B A 2000 *Frequency Selective Surface: Theory and Design* (New York: Wiley) pp69—81
- [9] Jia H Y, Gao J S, Feng X G, Sun L C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 505 (in Chinese) [贾宏燕、高劲松、冯晓国、孙连春 2009 物理学报 **58** 505]
- [10] Sheng X Q 2004 *Computational Electromagnetics* (Beijing: Science Press) p133 (in Chinese) [盛新庆 2004 计算电磁学要论 (北京: 科学出版社) 第 133 页]
- [11] Goldsmith P F, Gill G J 1986 *Microwave J.* **29** 207

Design and study of second-order Y-loop frequency selective surfaces^{*}

Gao Jin-Song¹⁾ Wang Shan-Shan^{1) 2)†} Feng Xiao-Guo¹⁾ Xu Nian-Xi^{1) 2)} Zhao Jing-Li¹⁾ Chen Hong¹⁾

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

2) (Graduate University of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

(Received 25 March 2010; revised manuscript received 19 May 2010)

Abstract

The multiband properties of self-similar fractals can be used to design multiband single-layer frequency selective surfaces (FSS). Combined with Floquet periodic boundary conditions, the moments method is applied to characterize the second-order Y-loop fractal FSS frequency response to different values of iterative scaling factor F and lattice as the incidence varies, and then the estimated empirical constant is obtained. Experimental results show good correlation to the calculations, indicating that the resonant frequencies are mainly determined by the iteration factor and the initial unit size, while the lattice impacts the transmission coefficient and bandwidth apparently.

Keywords: frequency selective surface, fractal elements, second-order Y loop, iterative factor

PACC: 7360

* Project supported by the National Defense Innovation Foundation of Chinese Academy of Science, China (Grant No. CXJJ-149), the Specialized Research Foundation for the Gainer of Outstanding Doctoral Thesis and Presidential Scholarship of Chinese Academy of Science, China (Grant No. 076231J070).

† Corresponding author. E-mail: michaela1031@hotmail.com