

多频段十字分形频率选择表面*

王珊珊^{1)2)†} 高劲松¹⁾ 梁凤超¹⁾ 王岩松¹⁾ 陈新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 100049)

(2010年6月17日收到; 2010年9月8日收到修改稿)

利用分形单元的自相似性将分形结构应用于频率选择表面(FSS)领域使单屏 FSS 具有多频谐振的特性, 在各波段实现简易、多频带通滤波器的设计. 以易加工的十字单元为例, 经过递归、迭代产生二阶十字分形单元, 给出描述单元几何分布的公式; 应用周期矩量法结合 Floquet 定理及阻抗边界条件得到描述 FSS 表面电流分布的电场积分方程, 对 FSS 传输特性规律进行数值分析, 采用遗传算法对分形单元参数进行全局优化得到了在 9.2 GHz 和 29.4 GHz 谐振的单屏 FSS 设计; 最后采用成熟的镀膜、光刻工艺制备十字分形 FSS 样件并在微波暗室进行 FSS 传输特性测试, 理论与实验结果一致.

关键词: 频率选择表面(FSS), 分形单元, 多频段, 周期矩量法(PMoM)

PACS: 07.50.-e, 07.50.Hp

1. 引言

频率选择表面(FSS)由周期性排布的金属贴片单元或金属屏上周期性排列的开孔单元构成, 是一个对电磁波的入射角、极化方式、频率均有选择作用的空间滤波器^[1-3], 它在电磁频谱的各个波段都有着广泛应用. 近年来, 现代通信设备越来越需要集成化、可多频段工作的天线(如毫米波/红外复合制导共口径天线的二向色镜), 相应的, 结构简单、具有多频谐振特性的 FSS 也成为研究热点. 将分形理论应用于 FSS 领域可以利用分形单元的自相似性使单屏 FSS 具有多频谐振的特性, 取代多屏或级联 FSS 等复杂结构, 降低工程应用难度. 关于 FSS 的相关应用, 国内多采用研究成熟的周期单元, 对分形 FSS 关注度较低; 国外自 1991 年 Parker 等通过折叠方形金属环和四阶 Hilbert 曲线成功实现分形 FSS 单元起对分形理论在 FSS 领域的应用进行探索, 并取得了一定的研究成果^[4,5], 由于分形 FSS 单元结构参数多且易受限于制作工艺精度, 所以至今仍无行之有效的设计方法.

本文以十字分形单元为例, 结合 Floquet 定理及

阻抗边界条件应用周期矩量法系统深入地分析了电磁波以不同角度入射时孔径型带通 FSS 的传输特性规律, 采用遗传算法对分形单元参数进行全局优化得到所需的多频 FSS 设计, 最后在微波暗室中对其传输特性进行实验验证, 为需求越来越多的毫米波/红外复合制导共口径天线的二向色镜、滤波器等器件提供了结构简单的多频 FSS 设计, 为分形 FSS 实现工程应用提供了图形选择依据和设计方法.

2. 分形 FSS 模型及理论分析方法

2.1. 分形 FSS 数值分析方法

FSS 的理论分析方法主要有矩量法、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其周期扩展, 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; 另外, 与有限元法和时域有限差分法相比, 矩量法离散方程的求解收敛速度快且精度高, 但是矩量法的通用性较差. 本文主要应用周期矩量法对分形 FSS 的传输特性进行数值分析.

* 中国科学院国防创新基金(批准号: CXJJ-149), 中国科学院优秀博士论文、院长奖获得者科研启动专项基金(批准号: 076231J070)资助的课题.

† E-mail: michaela1031@hotmail.com

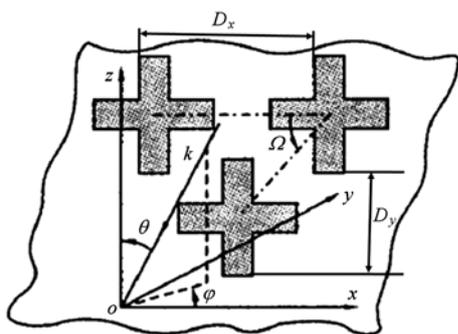


图1 单屏周期阵列几何示意图

图1为周期单元的结构示意图, FSS屏置于 x - y 平面, \mathbf{k}_0 为入射电磁波波矢, D_x 和 D_y 则对应 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. 对于孔径型带通电磁周期结构可应用 Floquet 定理及边界条件描述 FSS 表面的散射场^[6], 电磁波入射至 FSS 表面时会激励起无限个 TE 或 TM 本征模式和相应的空间谐波^[7], 此时的散射场可以表示为一无穷谐波求和, 通过建立起 FSS 周期单元的电场与感应电流的联系, 进而得到描述导电单元表面电流分布的电场积分方程

$$\begin{aligned} & - \begin{bmatrix} E_x^{\text{inc}}(x, y) \\ E_y^{\text{inc}}(x, y) \end{bmatrix} \\ & = \frac{2\pi}{j\omega\epsilon_0 D_x D_y} \sum_{-\infty}^{\infty} \sum_{-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} k_0^2 - \alpha_m^2 & -\alpha_m \beta_n \\ -\alpha_m \beta_n & k_0^2 - \beta_n^2 \end{bmatrix} \\ & \quad \times \tilde{\mathbf{G}}(\alpha_m, \beta_n) \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{J}}_x(\alpha_m, \beta_n) \\ \tilde{\mathbf{J}}_y(\alpha_m, \beta_n) \end{bmatrix} \\ & \quad \times e^{j\alpha_m x} e^{j\beta_n y} - Z_s \begin{bmatrix} J_x \\ J_y \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\alpha_m = \left(\frac{2m\pi}{D_x} \right) + k_x^{\text{inc}}, \quad (2)$$

$$\beta_n = \left(\frac{2n\pi}{D_y} \right) + k_y^{\text{inc}}, \quad (3)$$

其中 E_x^{inc} 与 E_y^{inc} 分别为入射电场在 x, y 方向的分量, 同理, $k_x^{\text{inc}}, k_y^{\text{inc}}$ 为波矢 \mathbf{k}_0 的分量, $\tilde{\mathbf{G}}(\alpha_m, \beta_n)$ 为并矢格林函数的谱域表达式, 由电磁场边界条件可得

$$\begin{bmatrix} E_x^s(x, y) \\ E_y^s(x, y) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_x^{\text{inc}}(x, y) \\ E_y^{\text{inc}}(x, y) \end{bmatrix} = Z_s \begin{bmatrix} J_x \\ J_y \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$Z_s = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (5)$$

Z_s 为金属屏的波阻抗, $Z_0 \approx 377 \Omega$ 是自由空间阻抗, 假设 FSS 金属屏为理想导电层, 则 $Z_s = 0$. 将感应电流 J_x 与 J_y 用 roof-top 基函数^[8,9]展开, 电流分布如图2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

$$J_x = \sum_{m=-M/2n}^{M/2-1} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} I_x(n, m) B_x(n, m), \quad (6)$$

$$J_y = \sum_{m=-M/2n}^{M/2-1} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} I_y(n, m) B_y(n, m). \quad (7)$$

电流基函数

$$B_x(n, m) = \Lambda\left(n + \frac{1}{2}\right) \Pi(m), \quad (8)$$

$$B_y(n, m) = \Pi(n) \Lambda\left(m + \frac{1}{2}\right). \quad (9)$$

对于 roof-top 离散

$$\Pi(m) = \begin{cases} 1, & |y - m\Delta y| \leq \frac{\Delta y}{2}, \\ 0, & |y - m\Delta y| > \frac{\Delta y}{2}, \end{cases} \quad (10)$$

$$\Lambda(n) = \begin{cases} 1 - \frac{|x - n\Delta x|}{\Delta x}, & |x - n\Delta x| \leq \Delta x, \\ 0, & |x - n\Delta x| > \Delta x. \end{cases} \quad (11)$$

将(6)–(11)式代入(4)式应用矩量法求解即可得到周期单元上的未知电场, 进而可以求出单屏 FSS 的传输系数.

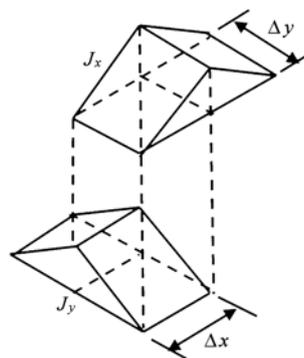


图2 Roof-top 基函数电流分布

2.2. 十字分形 FSS 几何模型

单屏分形 FSS 具有多频谐振特性主要是由于分形结构具有局部和整体的自相似性, 所以我们可以直接使用递归算法生成十字分形 FSS 对周期单元进行设计和实现. 图3为十字分形单元示意图及结构参数, 由于三阶单元表面电流分布复杂且对制作工艺精度要求高而单屏一阶单元只有一个谐振点, 所

以本文主要以二阶十字分形单元为研究对象.

对于二阶十字,令单元迭代比例为 F ,则分形单元的几何分布如(12),(13)式表述, Y_{p+1} 为原始单元经过 y_1-y_4 的变换并进行 $p+1$ 次迭代后的中心位置,其中 F 值的大小是有限制的,必须保证迭代单元不能交叉,对于十字分形单元,迭代比例 F 不能大于 0.5 以避免二次单元连接,因此分形 FSS 的不同谐振频点有一定的间隔,第一谐振频率 f_1 会小于 1/2 倍的第二谐振频率 f_2 ,这一限制可通过更复杂的分形单元改善.二阶十字的相似性维数 D 由(14)式决定.

$$y_{1,2,3,4} = F \left(x \pm \frac{\sqrt{2}}{2}(1-F), y \pm \frac{\sqrt{2}}{2}(1-F) \right), \quad (12)$$

$$Y_{p+1} = Y_p \cup y_{1,2,3,4}(Y_p), \quad (13)$$

$$D = \frac{\ln 4}{\ln \frac{1}{F}}. \quad (14)$$

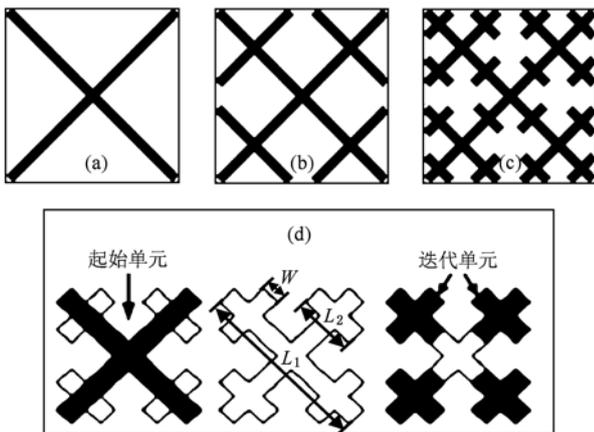


图3 十字分形单元示意图 (a)一阶;(b)二阶;(c)三阶;(d)分形单元迭代过程图

2.3. 遗传优化算法

遗传算法(genetic algorithm, GA)可以将分形结构的多个参数进行全局优化以得到需要的多频 FSS 设计,遗传算法基本原理在大量文献中均有较为全面的阐述^[10].这里我们将通带设置在 9.2 GHz, 29.4 GHz,透过率大于 85%,对 -3 dB 带宽没有要求,介质厚度固定为 0.02 μm ,单元采用正方形栅格排布方式.分形周期单元离散为 16×16 ,金属部分为“1”,孔径为“0”,编码长度为 8 位.为了保证算法的离线性能及收敛性,将初始群体规模设置为 150,遗传算子分别为排序选择,单点交叉和单点变异,交叉概率 0.7,变异概率 0.1,最大进化代数 300,参

数优化结果为: $L_1 = 14.4401 \text{ mm}$, $L_2 = 5.1497 \text{ mm}$, $W = 1.5046 \text{ mm}$,图 4 为十字分形 FSS 的数值结果.

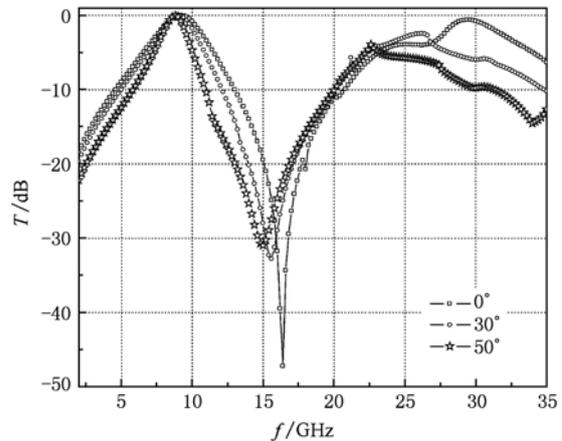


图4 不同入射角度分形 FSS 的传输特性

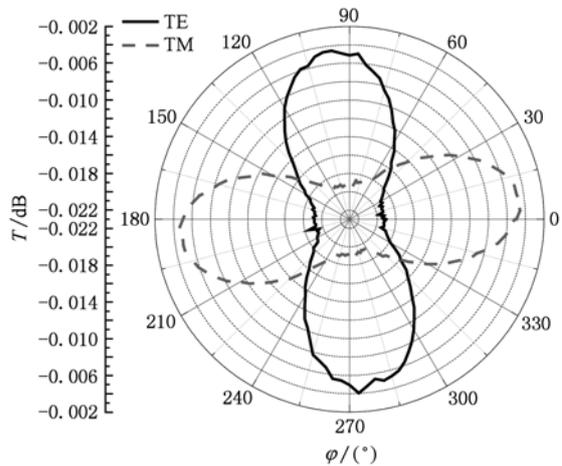


图5 $f=9.2 \text{ GHz}$,正入射, φ 改变时 FSS 在入射波不同极化方式下的透过率对比

任何周期单元的谐振频率均与其单元尺寸直接相关,经遗传算法优化后我们得到在 $f_1 = 9.2 \text{ GHz}$ 和 $f_2 = 29.4 \text{ GHz}$ 谐振的双频 FSS,相应的谐振波长 $\lambda_{1,2} \approx 2 \times L_{1,2}$ 由图 4 可知,随着入射角度的增加,第一谐振频率 f_1 向低漂移了 400 MHz,透过率基本不变,这一变化趋势与纯介质的相反.这是因为 FSS 与介质的特征向量分别用阻抗 Z 和导纳 η 表示,而 $\eta = 1/Z$;带宽变窄,从 3.5 GHz 减至 1.9 GHz,电磁波 H 面入射时, FSS 的带宽随着入射角度的增加大约以 $\cos\theta$ 比例减小. f_2 的传输特性具有严重的角度效应,谐振点向低漂移了 6.8 GHz,透过率下降了 3.3 dB,这是由于进行算法优化时选取适应度函数(评价函数)未考虑角度效应.使分形结构的谐振频率

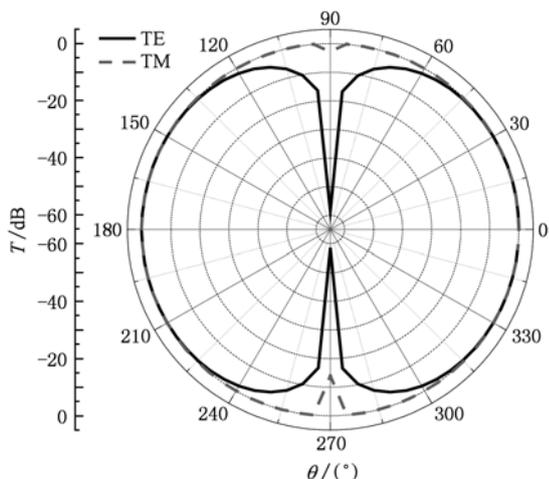


图6 $f=9.2\text{ GHz}$, $\varphi=90^\circ$, θ 不同时 FSS 在入射波不同极化方式下的透过率对比

均具有较好的角度稳定性以满足实际工程应用是完全可以实现的,除了在选择评价函数时考虑入射角度这个参数,缩减单元间距也可以减小传输特性对角度的敏感性.

图5与图6是在第一谐振频率 $f=9.2\text{ GHz}$ 时考察分形 FSS 的极化特性及角度稳定性的计算结果.当 φ 从 $0^\circ-360^\circ$ 改变时, FSS 的最大值与最小值分别为 -0.0046 dB 和 -0.0195 dB , 具有较好的圆极化特性;另外,垂直极化与水平极化的透过率变化趋势恰好相反,这是由周期单元的特征模阻抗 Z_{mn} 决定的,当电磁波垂直极化入射时,阻抗为

$$\frac{k_0}{\sqrt{k_0^2 - \alpha_{mn}^2 - \beta_{mn}^2}} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}, \text{ 当水平极化时, 阻抗则为 } \frac{\sqrt{k_0^2 - \alpha_{mn}^2 - \beta_{mn}^2}}{k_0} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}, \text{ (2) 式与 (3) 式中 } k_x^{\text{inc}} =$$

$k_0 \sin\theta \cos\varphi, k_y^{\text{inc}} = k_0 \sin\theta \sin\varphi$. 当 $\varphi=90^\circ$ 、电磁波垂直极化入射角度 $\theta < 60^\circ$ 时,透过率基本不变,但 $\theta > 60^\circ$ 时, FSS 的传输特性急剧恶化, TM 极化入射的变化规律与 TE 的一致,但透过率下降程度较缓和.由此可见,我们优化得到的分形 FSS 设计具有较好的圆极化特性,满足了工程中电磁波大入射角度应用对角度稳定性的要求,为分形 FSS 进一步的深入研究和工程实现提供了借鉴.

3. 实验验证

采用成熟的镀膜及光刻复制技术在厚度为 $0.02\ \mu\text{m}$ 的 $500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 覆铜聚酰亚胺薄膜

(介电常数 $\epsilon=2.9$, $\tan\delta \approx 0.007$) 上制作分形 FSS 样件并在微波暗室中进行其传输特性的测试,测试系统如图4(a)所示,矢量网络分析仪为安捷伦 N5244A,发射与接收天线是恒达迷你型喇叭天线,电磁波为垂直极化入射;图4(b)为 FSS 样件;图5为计算结果与测试结果对比,由于实验条件所限,这里只对 $4-12\text{ GHz}$ 波段的传输特性进行实验验证.图5(b)为 FSS 的实验结果与数值结果的对比,测试是由三段天线 ($4-6\text{ GHz}$, $6-8\text{ GHz}$, $8-12\text{ GHz}$) 共同完成的,所以在 6 GHz , 8 GHz 数据连接处有明显的抖动,差值是在测试误差允许范围内的,理论结果与实验结果基本符合.

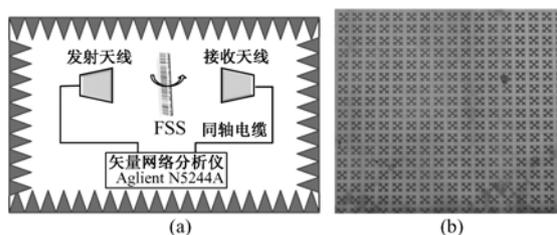


图7 分形 FSS 传输特性测试 (a) 测试系统装置; (b) FSS 实验样件

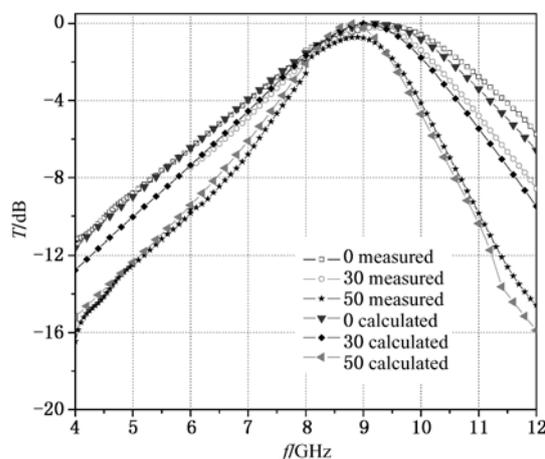


图8 不同入射角度下十字分形 FSS 传输特性的理论结果与实验结果对比

4. 结 论

为了使单屏 FSS 具有多频谐振的特性,本文将分形结构应用于 FSS 领域,直接使用递归算法生成十字分形 FSS 单元,给出分形单元的几何分布公式,并结合 Floquet 定理应用矩量法对 FSS 的散射场进行周期展开,通过建立 FSS 周期单元的电场与感应

电流的联系得到描述 FSS 单元表面电流分布的电场积分方程,系统深入研究了分形 FSS 的传输特性并应用遗传算法对单元结构参数进行优化,理论结果与实验结果符合,理论方法准确有效.在实际应用

中可以通过改变单元尺寸得到所需谐振点的多频分形 FSS,但需要注意第二谐振频率的角度稳定性问题.分形 FSS 可以扩展到红外甚至光学波段应用于多波段复合制导,具有广阔的应用前景.

- [1] 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]
- [2] 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]
- [3] Fang C Y, Zhang S R, Lu J, Wang J B, Sun L C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5023 (in Chinese) [方春易、张树仁、卢俊、汪剑波、孙连春 2010 物理学报 **59** 5023]
- [4] Jordi Romeu, Rahmat-Samii Y 1999 *Proc. IEEE Antennas and Propagation Soc. Int. Symp.* **3** 1734
- [5] Gianvittorio J P, Rahmat-Samii Y 2001 *Proc. IEEE Antennas and Propagation Soc. Int. Symp.* Dig 640—643
- [6] Lu J, Chen X Y, Wang J B 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7200 (in Chinese) [卢俊、陈新邑、汪剑波 2008 物理学报 **57** 7200]
- [7] Munk B A 200 *Frequency selective surface: theory and design* (New York: Wiley)
- [8] 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]
- [9] Chi H C, Mittra R 1990 *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **38** 40
- [10] Charkravarty S, Mittra R, Lanuzza L 2002 *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **50** 284

Multiband fractal cross dipole frequency selective surface*

Wang Shan-Shan^{1)2)†} Gao Jin-Song¹⁾ Liang Feng-Chao¹⁾ Wang Yan-Song¹⁾ Chen Xin¹⁾

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 Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 17 June 2010; revised manuscript received 8 September 2010)

Abstract

Fractal structures has self-similar properties so that they can be applied in the field of frequency selective surface (FSS) as unit cell and the fractal FSS has the nature of simple, multi-band characteristics on single layer FSS which can be used as spatial pass filters for the incident angle, polarization and the frequency of the electromagnetic wave. Take fractal cross dipole as example, which we can obtain by recursive algorithm and iterative technique, this work gives the expressions of the fractal elements' geometry and then characterizes the FSS transmission response by the electric field integral equation for the current distribution on the single FSS screen derived from the Floquet's periodic theory under impedance boundary condition. Genetic algorithm was applied to globally optimize the structure parameters in order to get the design of the double resonant FSS. Finally, FSS sample was prepared by optical lithography and measured in the anechoic chamber. Experimental results show good agreement with the calculations we made for the design of FSS with resonant frequencies 9.2 GHz and 29.4 GHz, which was what we expected from the periodic method of moment.

Keywords: frequency selective surface (FSS), fractal element, multiband, periodic method of moment

PACS: 07.50.-e, 07.50.Hp

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

† E-mail: michaela1031@hotmail.com