

Ku/Ka 波段双通带频率选择表面设计研究*

王秀芝¹⁾²⁾ 高劲松¹⁾ 徐念喜^{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) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2013年4月10日收到; 2013年5月17日收到修改稿)

为了实现双通带频率选择表面 (FSS) 在较厚介质基底、较大频带间隔和入射角度下的工程应用, 设计制备了一种性能优良的 Ku/Ka 波段双频 FSS 结构. 利用 FSS 栅瓣图分析了 FSS 具有稳定滤波特性的条件. 应用矢量模式匹配法计算了基于分形技术和复合图形技术的 FSS 的传输特性. 根据单元谐振模式和 FSS 传输特性归纳了厚介质基底、较远双通带 FSS 的设计原则, 最终优化出一种由方环复合“Y”环单元组成的 FSS 结构. 结果表明: 该结构在 6.7 mm 厚介质基底上 0°—45° 扫描范围内, 在 Ku/Ka 波段具有稳定的双频传输特性, 透过率均优于 75%. 这为设计基底厚度较大、频带间隔较远、入射角度要求较高的双带 FSS 结构提供了理论参考与实验依据.

关键词: 频率选择表面, 双通带, 分形结构 FSS, 复合结构 FSS

PACS: 73.61.-r, 73.90.+f

DOI: 10.7498/aps.62.167307

1 引言

频率选择表面 (frequency selective surface, FSS) 是指由介质表面上周期性排布的金属贴片单元或孔径单元组成的二维周期性结构^[1,2]. 它能够使电磁波在谐振频点发生全反射 (贴片型 FSS) 或全透过 (孔径型 FSS), 是一种对电磁波入射角度、极化方式以及频率均有选择作用的空间滤波器, 被广泛地应用于雷达、天线等领域^[3,4]. 随着雷达罩隐身性能的不断f提高以及现代通信技术的迅速发展, 通信系统的多频通信需求日益强烈. 相应地, 结构简单且具备多频谐振特性的 FSS 也成为研究热点^[5,6].

为了获得 FSS 多频谐振特性, 一般采用单元图形分形技术^[7-9] 和复合技术^[5,10,11]. 分形技术是利用单元的自相似性使单屏 FSS 同时具有多频谐振特性, 而复合技术是指在一个周期单元中设计多种图形结构使 FSS 实现多频谐振. 这两种技术通过周期单元图形设计, 均能在单屏 FSS 结构上实现多频传输, 替代了多屏级联的复杂 FSS 结构, 避免了多屏级联所带来的多屏精确对准、多介质匹配、剖

面厚度及欧姆损耗增加等问题, 有效地降低了工程难度. 因此, 采用分形结构和复合结构的多频谐振 FSS 得以广泛应用. 然而, 在以往的研究中, 这两种 FSS 主要用于通带间隔较小、基底较薄的双频结构中, 其入射角度也有较大限制, 这主要是由于在复合图形和分形结构中, 周期单元上电流谐振模式之间的相互影响较大, 使高次谐振滤波曲线容易劣化和难以稳定.

由于单屏 FSS 结构具有工程上的优越性, 本文选择利用分形技术和复合图形技术进行 FSS 设计和优选, 在厚度为 6.7 mm, 介电常数为 3.17 的基底上实现 Ku/Ka 波段双通带滤波特性. 一方面, 该结构第一通带谐振波长为厘米量级, 第二通带谐振波长为毫米量级, 双带中心间隔较大, 使设计难度增加; 另一方面, 该结构使用厚介质基底, 而基底越厚, 基底本身的滤波曲线震荡越剧烈, FSS 屏的调制作用也越受限, 这进一步增加了设计难度. 基于上述情况, 本文分析 FSS 具有稳定滤波特性的条件, 并从单元谐振模式入手, 分别对采用分形技术和复合技术的 FSS 进行分析和讨论, 归纳总结设计原则,

* 长春光机所创新三期工程项目 (批准号: 093Y32J090) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: xnxlzhy999@126.com

优化 FSS 结构, 最后通过实验验证设计的正确性和可行性.

2 物理机理分析

FSS 作为一种二维周期结构, 如图 1 所示, 其前向散射场和后向散射场是由无穷多个 Floquet 模^[1,12] 叠加而形成, 每个 Floquet 模对应一个振幅, 并以固定的 Floquet 相位进行传播. 第 (m, n) 阶 Floquet 模在 x 方向, y 方向上的传播常数 β_{xm}, β_{yn} 分别表示为^[12]

$$\begin{aligned} \frac{\beta_{xm}}{k_0\sqrt{pq}} &= \sin\theta\cos\varphi + \frac{\lambda_0}{\sqrt{pq}D_x}m, \\ \frac{\beta_{yn}}{k_0\sqrt{pq}} &= \sin\theta\sin\varphi + \frac{\lambda_0}{\sqrt{pq}D_y}n \\ &\quad - \frac{\lambda_0}{\sqrt{pq}D_x}m\cot\alpha. \end{aligned} \quad (1)$$

z 方向上的传播常数 β_{zmn} 满足关系式: $\beta_{zmn}^2 = k_0^2pq + \beta_{imn}^2, \beta_{imn}^2 = \beta_{xm}^2 + \beta_{yn}^2$.

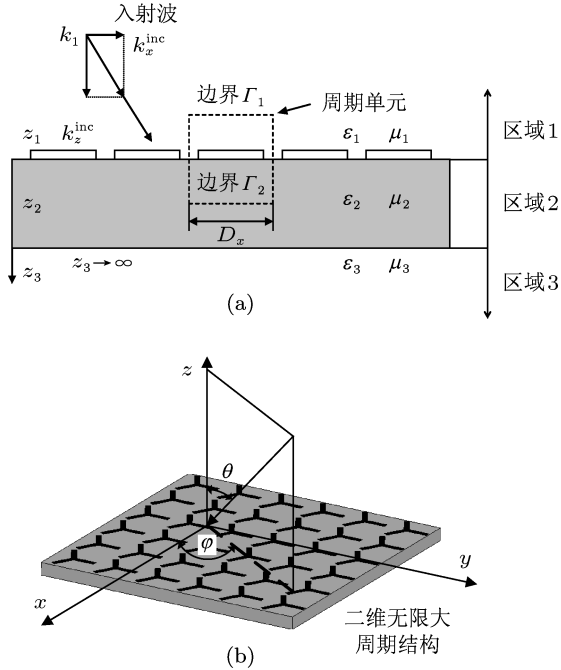


图 1 二维周期结构的散射物理模型 (a) 剖面图; (b) 俯视图

当 FSS 单元以任意栅格排布时, FSS 栅瓣图如图 2 所示. 其中, d_s 为 $(-1, -1)$ 模式距离主模的距离, 传播方向单位矢量在周期表面投影的轨迹用 $\sin\theta_s$ 表示, 投影与 x 轴夹角为 φ , 阵列栅格夹角为 α .

根据余弦定理, 得到 d_s 的表达式为

$$d_s = \sin\theta_s \cos(90^\circ - \alpha - \varphi)$$

$$+ \sqrt{1 - \sin\theta_s \sin(90^\circ - \alpha - \varphi)}. \quad (2)$$

由图 2 标注的几何关系得到, 主模传播区域内无高阶模传播的条件为

$$2\frac{\lambda}{D_x} \geq 1 + \sin\theta_s \cos\varphi, \quad \frac{\lambda}{D_x} \geq 1 + \sin\theta_s \sin\varphi. \quad (3)$$

不仅如此, $(-1, -1)$ 模式不能进入主模传播区域所在的单位圆内:

$$\sqrt{\left(\frac{\lambda}{D_x}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{2D_y}\right)^2} \geq d_s. \quad (4)$$

由 (3) 式和 (4) 式可知, 任意栅格排布时的衍射边缘波长^[13] $\lambda_d = \max(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ 其中,

$$\lambda_1 = \frac{D_x}{2}(1 + \sin\theta_s \cos\varphi),$$

$$\lambda_2 = D_y(1 + \sin\theta_s \sin\varphi),$$

$$\lambda_3 = \left(\frac{1}{D_x^2} + \frac{1}{4D_y^2}\right)^{-\frac{1}{2}} d_s.$$

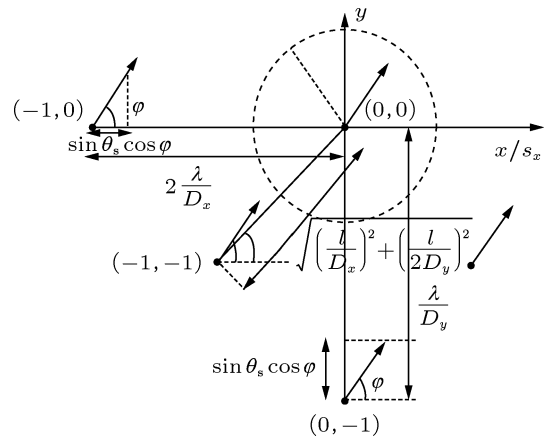


图 2 任意栅格排布时 FSS 栅瓣图

分析图 2 可知, 栅格排布的夹角 α 变化时, 进入主模传输区域内的高阶模式数也随着变化. 当 $\alpha < 30^\circ$ 时, 进入主模传输区域内的高阶模式数为 $(-2, -1)$ 或 $(2, 1)$; 当 $30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ 时, 进入主模传输区域内的高阶模式数为 $(1, -1)$ 或 $(1, 1)$ 或 $(-1, -1)$ 或 $(-1, 1)$. 当 $\alpha > 60^\circ$ 时, 进入主模传输区域内的高阶模式数为 $(0, -1)$ 或 $(0, 1)$ 模式^[1]. 任意栅格排布时的 FSS, 衍射边缘波长的取值如表 1 所示.

因此, FSS 具有稳定滤波特性的条件为: FSS 工作波长大于衍射边缘波长; 随着栅格排布的夹角 α 不同, 衍射边缘波长取值也不同.

表 1 栅格排布的夹角 α 变化时衍射边缘波长的取值

α	λ_d
$\alpha < 30^\circ$	λ_1
$30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	λ_2
$\alpha > 60^\circ$	λ_3

3 设计结果与讨论

FSS 具有稳定滤波特性的条件为 FSS 工作波长大于衍射边缘波长, 而衍射边缘波长与单元周期相关. 因此, 要在一个 FSS 周期内同时在 Ku 波段和 Ka 波段实现有效谐振, 就会存在着这样一对矛盾: 第一频带对应的主谐振波长要求单元周期大小在厘米量级, 而第二频带对应的主谐振波长要求单元周期大小在毫米量级. 为了调和这一矛盾, 在设计单元图形时应使第一频带对应的谐振图形在最小的周期内具有尽可能长的“波谐振”结构形式. 另外, 该 FSS 的一个谐振单元内包含两种不同的图形结构, 不同图形所产生的谐振模式间存在复杂的相互作用, 使 FSS 极易出现模式相互作用零点, 影响其滤波特性. 因此, 在设计过程中, 必须充分考虑和避免模式相互作用零点.

根据上述原则, 本文进行了 FSS 单元设计和优选. FSS 剖面结构如图 3 所示, 包括柔性 FSS 屏 (即覆铜聚酰亚胺膜)、航空航天专用粘结剂 ($d_1 = 0.045 \text{ mm}$, $\epsilon_1 = 2.8$, $\tan \theta_1 = 0.005$) 以及厚介质基底 ($d_2 = 6.7 \text{ mm}$, $\epsilon_2 = 3.17$, $\tan \theta_2 = 0.008$).

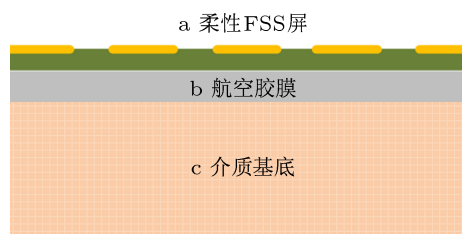


图 3 FSS 剖面结构图

图 4 设计了两种类型的分形结构 FSS. 图 4(a) 采用中心连接的“Y”孔分形单元. 单元周期和尺寸为: $D_x = 6 \text{ mm}$, $D_y = 5.196 \text{ mm}$; 一阶 Y 孔 $W = 0.55 \text{ mm}$, $L_1 = 2.8 \text{ mm}$; 二阶 Y 孔 $W = 0.55 \text{ mm}$, $L_1 = 1.2 \text{ mm}$. 图 4(b) 采用非连接的方环分形单元, 其单元周期和尺寸为: $D_x = 4 \text{ mm}$, $D_y = 4 \text{ mm}$; 一阶方环孔径 $L_1 = 3.625 \text{ mm}$, $W_1 = 0.3175 \text{ mm}$; 二

阶方环孔径 $L_2 = 2.375 \text{ mm}$, $W_2 = 0.375 \text{ mm}$.

应用全波分析法中的矢量模式匹配法^[14] 计算上述结构, 滤波曲线如图 5 所示. 由图 5(a) 可知, “Y”孔分形单元组成的 FSS 结构, 在基底较厚频带间隔较远的情况下, 很难形成稳定优良的第二频带. 由图 5(b) 可知, 方环孔径分形单元组成的 FSS 结构, 第二频带在倾斜入射时, 产生模式相互作用零点, 严重影响滤波特性. 这是由于频带间隔较远, 一阶方环孔径单元产生的高阶偶次谐振模式出现于二阶方环孔径单元产生的主谐振模式之前, 使二阶方环单元主谐振模式易受一阶单元影响. 因此, 设计过程中, 应使第二通带对应的主谐振模式波长大于第一通带对应的高次谐振模式波长.

基于上述分析, 本文采用自由度更大的复合图形技术进行设计. 与第一频带相对应的部分应该选择谐振尺寸相对较大的图形, 如六边形、圆形、方形等.

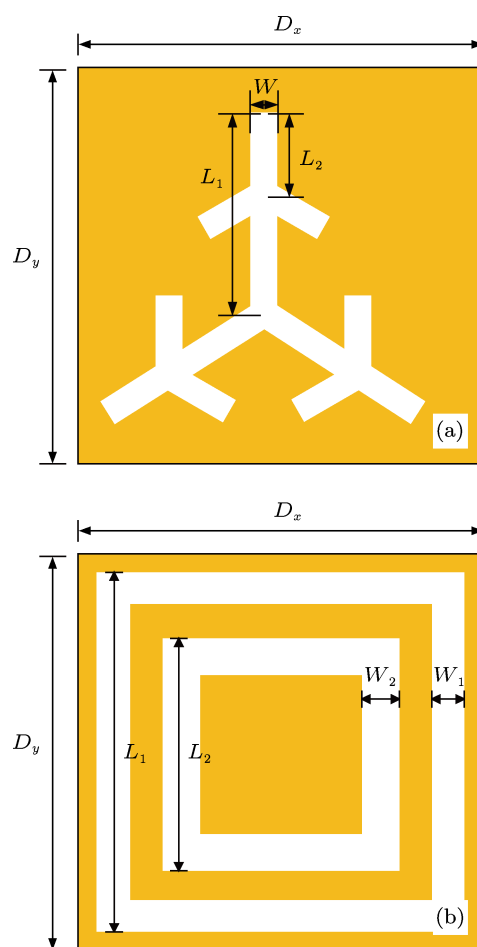


图 4 利用分形技术设计的 FSS 单元图形 (a) “Y”孔分形 FSS 单元; (b) 方环孔径分形 FSS 单元

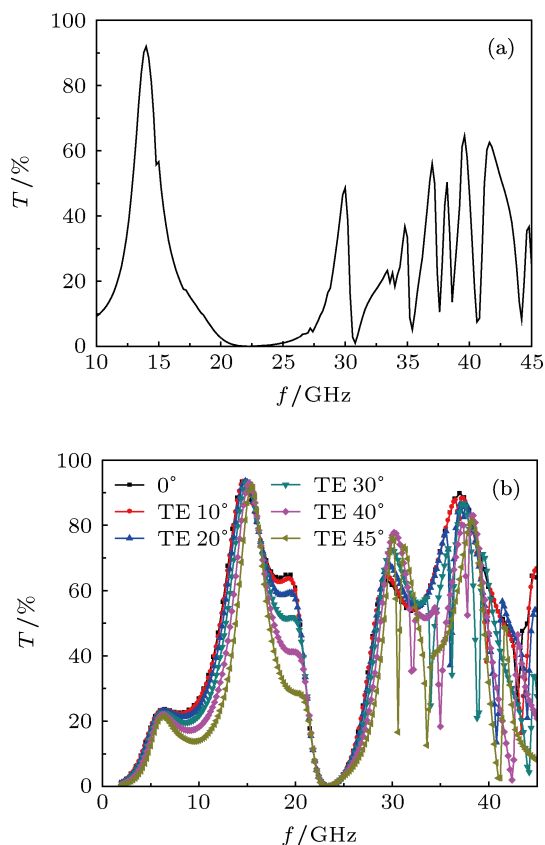


图5 (a)“Y”孔分形FSS传输曲线; (b)方环孔径分形FSS传输曲线

为了避免模式相互作用零点的出现, 本文最终设计优化了一种方环复合“Y”环单元的FSS结构, 如图6所示. 单元尺寸为: $D_x = 3.2\text{ mm}$, $D_y = 3.2\text{ mm}$; 方环的外边长 $2a_1 = 3\text{ mm}$, 内边长 $2a_2 = 2.7\text{ mm}$; “Y”环的 $w_{out} = 0.5\text{ mm}$, $L_{out} = 1.25\text{ mm}$, $w_{in} = 0.1\text{ mm}$, $L_{in} = 1.05\text{ mm}$. 滤波曲线如图7所示, 该结构有效抑制了模式相互作用零点的出现, 在 0° — 45° 具有稳定 Ku/Ka 双带滤波特性, 并且两个通带的透射率均优于 75%.

4 实验测试与验证

本文对图6的设计结果进行了实验验证. 由



图8 FSS制备工艺流程

于双波带通FSS的第二频带谐振波长为毫米量级, FSS单元尺寸中存在 0.1 mm 的“微尺寸”, 而目前印刷电路板技术加工误差接近 0.05 mm , 因此, 为了保证加工精度, 我们采用成熟的镀膜光刻工艺制备FSS屏, 工艺流程如图8所示.

经过图8所示工艺流程, 制备出尺寸为 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 的方环复合“Y”环单元FSS实验样件, 如图9所示.

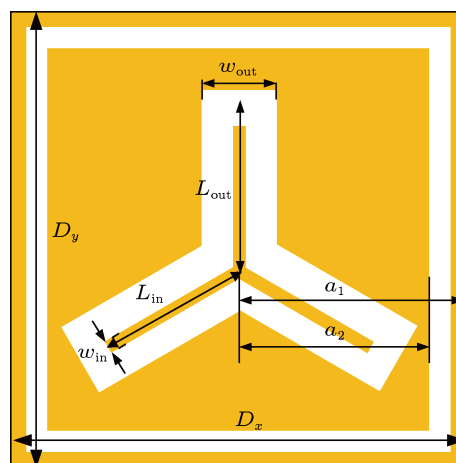


图6 方环复合“Y”环单元

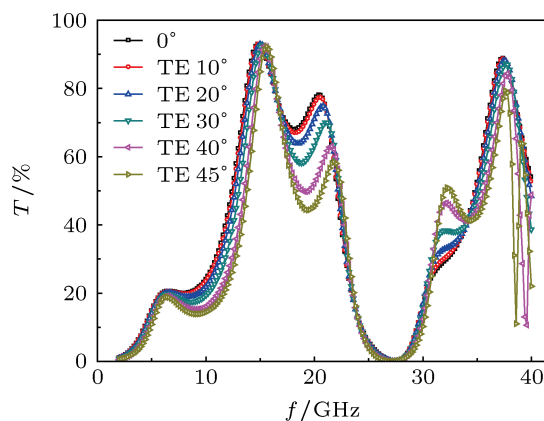


图7 方环复合“Y”环单元FSS传输曲线

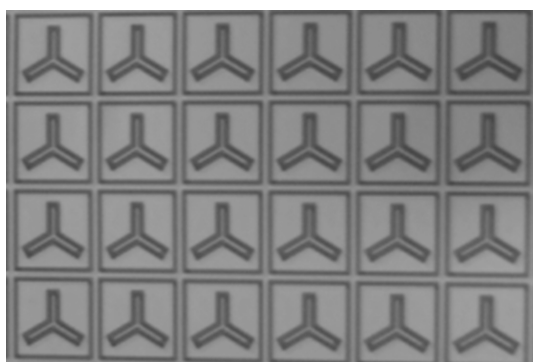


图9 采用镀膜光刻工艺制备的 FSS 样品

我们仅采用自由空间法对实验样品第一频带滤波特性进行了测试. 测试结果如图 10 所示.

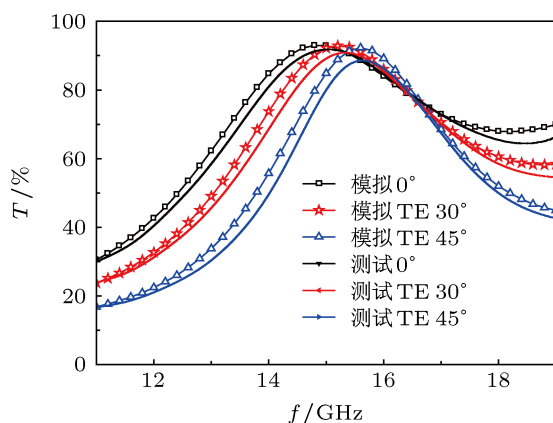


图 10 FSS 第一频带 TE 极化下计算与测试结果对比

由图 10 可知, 在 45° 扫描范围内, 测试结果与仿真结果的中心频点和 -3 dB 带宽符合, 透过率有所降低. 测试结果与仿真结果基本一致, 证明了该结构能够实现 Ku/Ka 波段双频传输特性, 同时也验证了间隔较远的双波段带通 FSS 设计方法的正确性.

5 结论

本文利用 FSS 栅瓣图分析了 FSS 具有稳定滤波特性的条件: 工作波长大于衍射边缘波长. 通过分析单元谐振模式及分形结构和复合结构 FSS 的传输特性总结出如下设计原则: 在设计单元图形时应使第一通带对应的谐振图形在最小的周期内具有尽可能长的“波谐振”结构形式; 第二通带对应的主谐振模式波长应大于第一通带对应的高次谐振模式波长; 避免模式相互作用零点的出现. 最终优化出一种具有优良滤波特性的方环复合“Y”环单元 FSS 结构. 该结构在厚度为 6.7 mm 的介质基底上能够实现 Ku/Ka 双频带传输功能, 在 0° — 45° 扫描范围内频带透过率优于 75%. 本文利用镀膜光刻工艺制备了实验样品, 其测量数据与仿真数据基本一致, 证明了设计方法的可行性, 为设计基底厚度较大、频带间隔较远的单屏 FSS 结构提供了参考.

- [1] 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]
- [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] Munk B A 2000 *Frequency Selective Surface: Theory and Design* (1st Ed.) (New York: Wiley)
- [4] Wu T K 1995 *Frequency-Selective Surface and Grid Array* (New York: Wiley)
- [5] Li X Q, Gao J S, Feng X G 2008 *Journal of Microwaves* **24** 7 (in Chinese) [李小秋, 高劲松, 冯晓国 2008 微波学报 **24** 7]
- [6] Salehi M, Behdad N 2008 *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* **18** 785
- [7] Gianvittorio P J, Romeu J, Blanch S, Rahamat-Samii Y 2003 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **18** 3088
- [8] Gao J S, Wang S S, Feng X G, Xu N X, Zhao J L, Chen H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7338 (in Chinese) [高劲松, 王珊珊, 冯晓国, 徐念喜, 赵晶丽, 陈红 2010 物理学报 **59** 7338]
- [9] Wang S S, Gao J S, Liang F C, Wang Y S, Chen X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 050703 (in Chinese) [王珊珊, 高劲松, 梁凤超, 王岩松, 陈新 2011 物理学报 **60** 050703]
- [10] Raiva A P, Harackiewicz F J, Lindsey J 2003 *Proceedings of the 27th Antenna Applications Symposium* Monticello, Illinois, September 17–19, 2003 p107
- [11] Jia H Y, Gao J S, Feng X G, Sun L C 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 1596 (in Chinese) [贾宏燕, 高劲松, 冯晓国, 孙连春 2008 光学学报 **28** 1596]
- [12] Arun K B 2005 *Phased Array Antennas: Floquet Analysis, Synthesis, BFNs, and Active Array Systems* (1st Ed.) (New York: Wiley)
- [13] Reed A J 1997 *Ph. D. Dissertation* (Texas: The University of Texas at Dallas)
- [14] Mittra R, Chan C H, Cwik T 1988 *Proc. IEEE* **76** 1593

Design and study of the dual-band frequency-selective surface operation at Ku/Ka-band*

Wang Xiu-Zhi¹⁾²⁾ Gao Jin-Song¹⁾ Xu Nian-Xi^{1)†}

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

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 10 April 2013; revised manuscript received 17 May 2013)

Abstract

In order to make the dual-band frequency-selective surface (FSS) used in the engineering conditions of thick substrate, wide band spacing and large incident angle, an FSS structure with dual-band at Ku-band and Ka-band is presented. The stable filtering condition of the FSS is analyzed by using the grating lobe diagram, and the transmission of the FSS with combination or fractal elements is calculated using the vector modal matching method. The design method of the dual-band FSS with thick substrate is obtained by analyzing the resonance mode of the element and the transmission of the FSS. By using those methods, an FSS with combination elements of the square and “Y” loops is designed. The simulated and tested results show that the dual-bands of the structure at Ku-band and Ka-band are stable and the transmissions of the two pass-bands are larger than 75% when the incident angle is varied from normal to 45°. This paper provides some theoretical and experimental references for the design of the dual-band FSS with thick substrate, wide band spacing and large incident angle.

Keywords: frequency selective surface (FSS), dual-band, fractal FSS, combination FSS

PACS: 73.61.-r, 73.90.+f

DOI: 10.7498/aps.62.167307

* Project supported by the Third Innovation of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences (Grant No. 093Y32J090).

† Corresponding author. E-mail: xnxlzh999@126.com