

电介质桁架对频率选择表面传输特性的影响*

陈新^{1)†} 高劲松¹⁾ 徐念喜¹⁾²⁾ 王岩松¹⁾ 冯晓国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)

(2012年6月1日收到; 2012年6月26日收到修改稿)

为了分析电介质桁架结构对频率选择表面 (FSS) 传输特性的影响, 以 Y 环单元的 FSS 和聚酰亚胺材质制备的桁架结构为例, 采用时域有限差分方法进行计算和分析. 建立物理模型并定义了孔径阻挡比 P , 通过分析证明了改变桁架的周期 T 以及肋骨的宽度 D 会对 FSS 的传输性能产生规律性影响, 成为衡量电介质桁架结构的主要参数, 且孔径阻挡比 P 的提高将增加传输损耗. 当 T 值由无限大变为 80 mm 时, 通带透过率平均下降超过 0.9 dB; 当 D 值由 0 变为 20 mm 时, 通带透过率平均下降超过 1 dB. 当 P 值小于 12.11% 时通带不产生偏移现象; 当 P 值小于 4.12% 时, 桁架对 FSS 的影响可忽略不计. 采用镀膜和光刻工艺制备 FSS 试件、数控机床加工方式制备电介质桁架, 并在微波暗室中进行测量, 验证实验与计算结果相符合, 为拟采用电介质桁架结构的 FSS 隐身雷达罩工程应用提供了理论与实验的参考依据.

关键词: 频率选择表面, 电介质桁架, 孔径阻挡比

PACS: 73.20.-r, 73.61.-r

1 引言

频率选择表面 (frequency selective surface, 简记为 FSS) 是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的一种二维周期阵列结构, 它能使电磁波在谐振频率处发生全反射或全透射, 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^[1-3]. 其中带通 FSS 的一个重要应用是在微波波段实现隐身雷达罩的设计^[4-6], 因此世界各国均十分重视对 FSS 的开发与应用.

对于 FSS 雷达罩最基本的要求是其具备稳定的传输特性, 通带透波率要满足应用指标, 减少带内传输损耗是设计 FSS 雷达罩的首要任务. Munk^[7] 指出采用加载电介质的方式可以改善电磁波大角度入射时 FSS 的传输特性, 此种方法需进行介质筛选和细致的匹配设计; 蒙志君等^[8] 从理论上分析含有空气间隙的隐身屏蔽罩设计能够提高谐振

频率的稳定性, 降低带内传输损耗, 是提升通带透过率的一种简便有效的方法. 而运用加入空气间隙的方式实现隐身雷达罩, 可以采用电介质桁架支撑 FSS 柔性屏的方法制备 FSS 蔽屏衬罩.

本文利用高阶 Floquet 模式在传播时衰减的特征, 使零阶模式和高阶模式分离以获得 FSS 稳定的传输特性. 采用时域有限差分法对加载电介质桁架的 FSS 模型进行理论分析并定义孔径阻挡比, 重点考察具备周期特性的电介质桁架结构对 FSS 传输特性的影响, 通过改变桁架周期以及肋骨宽度研究通带透过率和谐振频点产生的变化规律, 并用实验加以验证, 为拟采用电介质桁架结构的 FSS 雷达罩提供理论与实验的参考依据.

2 模型的建立

FSS 作为二维无限大周期结构, 其散射场是无穷多个 Floquet 模式叠加, 每个 Floquet 模式均为平

* 长春光机所第三期创新工程项目 (批准号: 093Y32J090) 和国家自然科学基金 (批准号: 61172012) 资助的课题.

† E-mail: chenxin19344834@sohu.com

面波. 在 FSS 雷达罩任意点的场分布可以通过平面波在分层电介质中的传播情况来确定. 平面波由零阶 Floquet 模式和高阶 Floquet 模式组成, 零阶 Floquet 模式传播时稳定且不衰减, 高阶 Floquet 模式传播时衰减且能量主要存在于周期表面附近. 因此利用高阶模式传播时衰减的特征, 参考文献 [8] 所述的空气间隔, 选择合适的空气厚度将零阶 Floquet 模式和高阶 Floquet 模式分离, 可获得稳定的 FSS 传输特性.

加载电介质桁架结构的 FSS 雷达罩, 其平面展开的结构如图 1 所示. 采用介电常数为 ε 的材料制备具有平面周期特性的桁架结构, 作为支撑 FSS 柔性屏的骨架网络, 平铺在一定厚度的无限大介质基底上, 使得相邻的肋骨彼此之间的空隙网格形成在介质板和 FSS 柔性屏之间的空气夹层, 从而实现具有空气层的 FSS 雷达罩方案. 通过调整电介质桁架的厚度 d 可以控制空气层的厚度, 改变桁架周期 T 以及肋骨宽度 D 可以改变桁架电介质与空气的分布比重, 即实现控制桁架结构的孔径阻挡比.

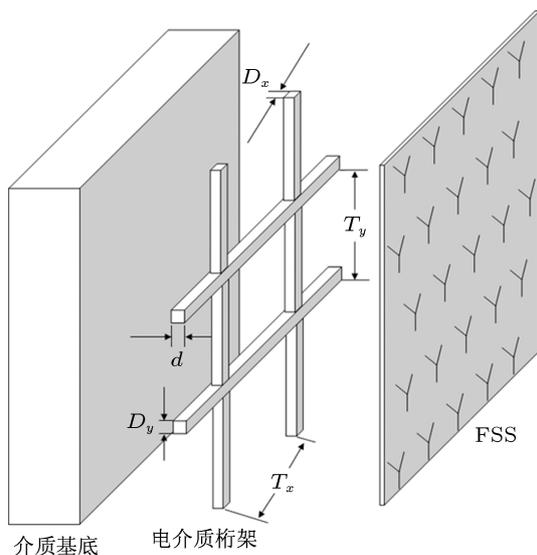


图 1 平面桁架 FSS 雷达罩结构示意图

孔径阻挡比定义为

$$P = \frac{D_x T_y + D_y T_x - D_x D_y}{T_x T_y}. \quad (1)$$

通过研究孔径阻挡比 P 对 FSS 传输特性的影响, 能够掌握优化电介质桁架结构的方法. 因此本文将从桁架周期 T 和肋骨宽度 D 两个变量出发, 重点研究孔径阻挡比 P 对 FSS 传输特性的影响.

3 数值方法的分析

FSS 的分析通常使用模匹配法、矩量法等 [1,7], 即利用某一离散网格点与空间所有离散网格点之间建立相互作用, 适合计算电大尺寸散射目标. 但对于含有复杂特殊结构的散射目标, 时域有限差分法则凸显出优势, 将其某一离散网格点与其相邻离散网格点之间建立相互作用, 能够充分反映复杂结构散射目标的电磁特性. 因此在处理图 1 所示的物理模型时, 采用时域有限差分法进行分析和计算具有较大的灵活性.

假设平面结构为无限大, 激励的电磁波为平面波, FSS 金属层无限薄. 含有桁架结构电介质的平面 FSS 雷达罩截面示意图如图 2 左所示. 考虑 FSS 的周期性并利用 Floquet 定理, 将计算局限在一个周期单元, 其周期大小为桁架结构的周期 T_x 和 T_y , 激励平面波具体表达式为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^i = & [\hat{e}_x (\cos \theta \cos \varphi \cos \phi - \sin \varphi \sin \phi) \\ & + \hat{e}_y (\cos \theta \sin \varphi \cos \phi + \cos \varphi \sin \phi) \\ & - \hat{e}_z \sin \theta \cos \phi] \cdot E_0 e^{-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}}. \end{aligned} \quad (2)$$

根据 Harms 提出的双平面波法 [9,10], 在周期为 T_x 和 T_y 的 X - Y 平面上施加周期边界条件, 在 $z = z_1$ 和 $z = z_2$ 处选用理想匹配层 (PML) 边界, 采用单色波激励逐点计算该模型的传输特性.

由 (2) 式决定的入射平面波时谐表达式为

$$E_z = E_0 \exp[j(\omega t - k_x x - k_y y)], \quad (3)$$

电磁场分量满足:

$$\begin{aligned} \mu \frac{\partial H_x}{\partial t} &= -\frac{\partial E_z}{\partial y}, \quad \mu \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial x}, \\ \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} &= \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

将 (4) 式进行差分离散, 即可得到迭代计算公式:

$$\begin{aligned} E_z^{n+1}(i, j) &= E_z^n(i, j) + \frac{\Delta t}{\varepsilon(i, j)} \\ &\times \left[\frac{H_y^{n+1/2}(i+1/2, j) - H_y^{n+1/2}(i-1/2, j)}{\Delta x} \right. \\ &\left. - \frac{H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) - H_x^{n+1/2}(i, j-1/2)}{\Delta y} \right], \quad (5) \\ H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) &= H_x^{n-1/2}(i, j+1/2) \\ &- \frac{\Delta t}{\mu(i, j+1/2)} \end{aligned}$$

$$\times \frac{E_z^n(i, j+1) - E_z^n(i, j)}{\Delta y}, \quad (6)$$

$$H_y^{n+1/2}(i+1/2, j) = H_y^{n-1/2}(i+1/2, j) + \frac{\Delta t}{\mu(i+1/2, j)} \times \frac{E_z^n(i+1, j) - E_z^n(i, j)}{\Delta x}. \quad (7)$$

在周期结构中电磁场满足 Floquet 定理, 即所有场分量幅值沿 X 方向和 Y 方向呈周期性分布:

$$\begin{aligned} \varphi(x + T_x, y, t) &= \varphi(x, y, t - \phi_x), \\ \varphi(x, y + T_y, t) &= \varphi(x, y, t - \phi_y), \end{aligned} \quad (8)$$

式中 φ 为电磁场的某一分量, $\phi_x = T_x \sin \theta / c$, $\phi_y = T_y \sin \theta / c$.

(8) 式对应频域为

$$\varphi(x + T_x, y + T_y, \omega)$$

$$= \varphi(x, y, \omega) \exp[-j\omega(\phi_x + \phi_y)]. \quad (9)$$

将时谐电磁场的表达式 (3) 代入 (9) 式得到周期方向上磁场表达式:

$$\begin{aligned} &H_y^{n+1/2}(i_a - 1/2, j) \\ &= H_y^{n+1/2}(i_b - 1/2, j) \exp(j\omega\phi_x), \\ &H_y^{n+1/2}(i_b + 1/2, j) \\ &= H_y^{n+1/2}(i_a + 1/2, j) \exp(-j\omega\phi_x), \end{aligned} \quad (10)$$

其中 i_a 和 i_b 分别为网格左右边界的编号. 在迭代计算中当 $t = n$ 时刻, 通过 (5) 式刷新电场分量, 其中 $i = i_a, \dots, i_b, j = j_a, \dots, j_b$. 当时间向前推进半个时间步, 即 $t = n + 1/2$ 时刻通过 (6), (7) 式和 (10) 式刷新磁场分量.

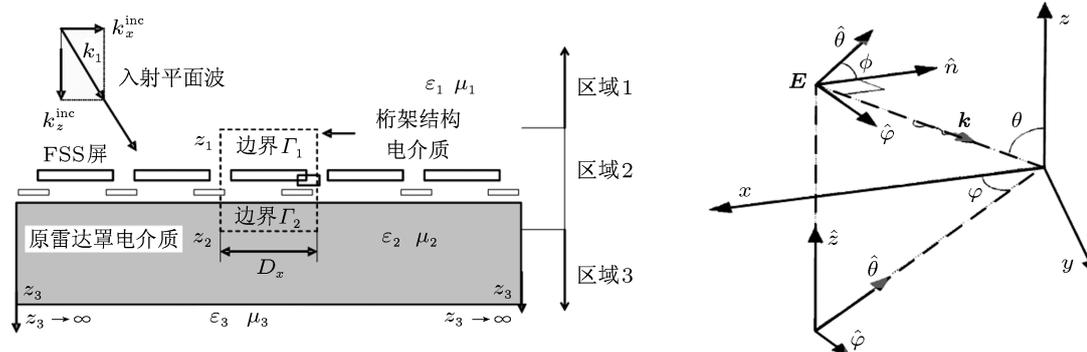


图2 平面桁架 FSS 雷达罩截面示意图 (左) 和计算坐标系 (右)

4 传输特性的讨论

采用上述分析方法计算图 1 所示的物理模型时, 选择空间网格尺寸 Δ 为 0.1 mm, 参阅文献 [8] 后令 $d = 2.5$ mm, 肋骨宽度 $D_x = D_y = D$, 桁架周期 $T_x = T_y = T$, 介电常数 $\epsilon = 3.0$, 损耗正切 $\text{tg} \delta = 0.005$; 柔性基底采用与桁架结构相同的材料, 厚度 25 μm ; 选用 Y 环单元的环孔臂长 $L = 3.65$ mm, 环孔臂宽 $W = 1.65$ mm, 贴片臂长 $l = 3.25$ mm, 贴片臂宽 $w = 0.85$ mm, 正三角形排布, X 方向周期为 8.5 mm; 基底介质厚度为 28 mm, 介电常数为 3.25, 损耗正切 0.004.

通过改变肋骨宽度 D 和桁架周期 T 观察 FSS 传输特性的改变, 寻找电介质桁架结构对 FSS 影响的规律, 进而给出能够符合实际应用条件的孔径

阻挡比.

4.1 肋骨宽度对传输特性的影响

选取电介质桁架的周期 T 为 240 mm, 考察肋骨宽度 D 分别为 2, 5, 10 和 20 mm 时, TE 极化电磁波以 0° 角入射时 FSS 的传输特性. 计算结果如图 3 所示, 随着 D 值的增大, 通带透过率整体下降. 对应四种 D 值的孔径阻挡比分别为 1.66%, 4.12%, 8.29% 和 15.97%. 当孔径阻挡比小于 4.12% 时, 可以忽略桁架结构对 FSS 的影响; 当孔径阻挡比大于 15.97% 时, 通带开始产生偏移的迹象.

4.2 桁架周期对传输特性的影响

选取桁架的肋骨宽度 D 为 5 mm, 考察桁架周

期 T 分别为 80, 160, 240 mm 和无限大时, TE 极化的电磁波以 0° 角入射时 FSS 的传输特性. 计算结果如图 4 所示, 随着 T 值的减小, 通带透过率整体下降, 但通带未产生偏移迹象. 通过计算得知, 对应三种 T 值的孔径阻挡比分别为 12.11%, 6.15% 和 4.12%. 当孔径阻挡比小于 4.12% 时, 可以忽略桁架结构对 FSS 的影响.

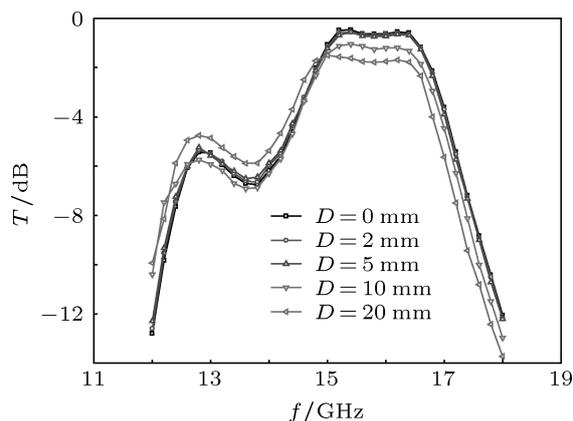


图3 不同 D 值时 FSS 的频率响应

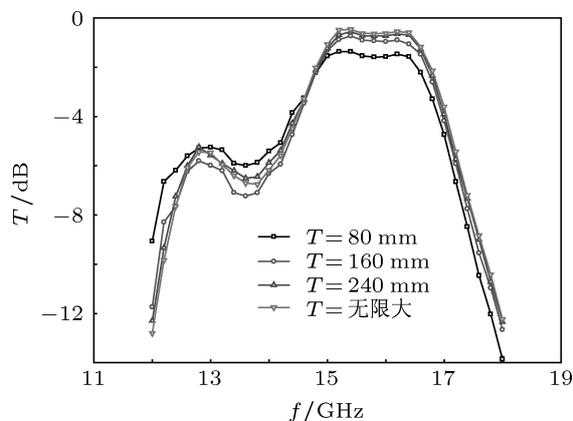


图4 不同 T 值时 FSS 的频率响应

5 实验验证

选取厚度为 $25 \mu\text{m}$, 尺寸大小为 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 的聚酰亚胺薄膜材料 (介电常数 $\epsilon = 3.0$, $\text{tg } \delta = 0.005$), 采用镀膜技术在其表面制备厚度为 $20 \mu\text{m}$ 的铜层, 并使用光刻、显影等工艺实现前述尺寸的 FSS 图形制备. 选取厚度为 2.5 mm , 与 FSS 屏相同尺寸的聚酰亚胺薄板材料, 使用数控机床加工的方式制备含有正方形网格的桁架结构, 如图 5 所示, 正方形网格边长为 80 mm , 肋骨宽度为 5 mm . 挑选介电常数 $\epsilon = 3.25$, $\text{tg } \delta = 0.004$ 的介

质板作为基底. 用少量胶带将三者边缘处紧密贴合在一起, 使 FSS 柔性屏表面平整均匀, 实现具有桁架结构的 FSS 平面样件, 其结构如图 6 所示.

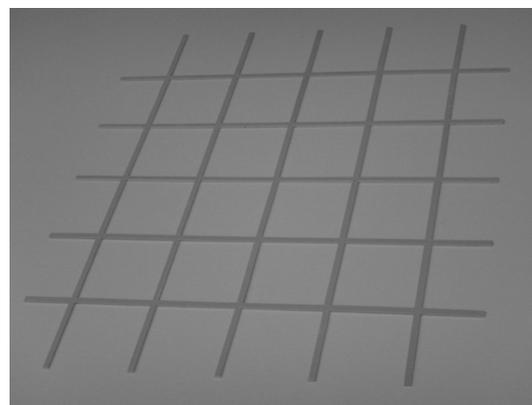


图5 桁架样品结构

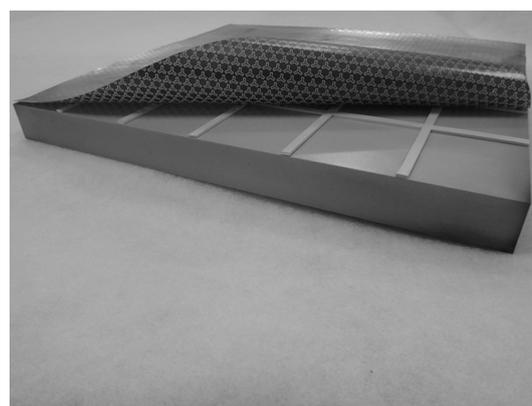


图6 测试样品结构

采用自由空间法在微波暗室中对该试验样品进行传输特性的测量, 测试原理如图 7 所示. 实验仪器包括安捷伦 N5244A 型矢量网络分析仪、喇叭天线和转台等, 测试频段为 $12\text{--}18 \text{ GHz}$, 电磁波为 TE 极化入射, 测试入射角度为 0° 和 30° . 测试过

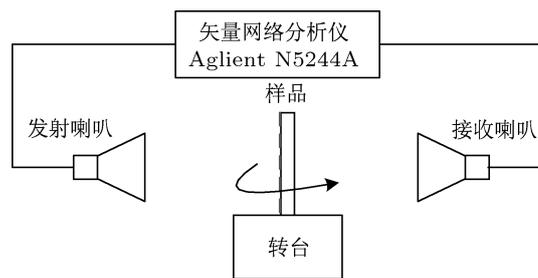


图7 实验原理图

程中, 调节矢量网络的接收机带宽为 1 kHz, 激励功率设为 10 dBm, 选择合适的孔径设置和时域门宽度, 将内部系统和外部环境中的噪声干扰去除, 实现平滑的传输特性曲线. 测试结果如图 8 所示, 理论计算与实验测量的结果基本一致, 验证了电介质桁架结构对 FSS 传输特性的影响规律.

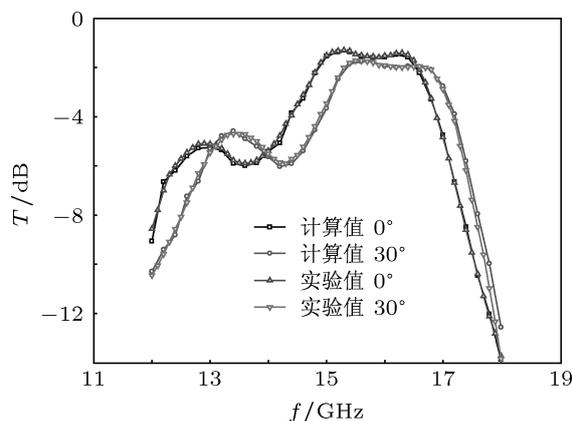


图 8 计算与测试结果对比

6 结论

本文以电介质桁架 FSS 雷达罩为模型, 采用时域有限差分法, 从孔径阻挡比方面分析具有周期特性的电介质桁架结构对 FSS 传输特性产生的影响. 理论计算与实验测试结果表明: 电介质桁架的周期 T 以及肋骨的宽度 D 是影响 FSS 通带稳定性的主要参数, 且孔径阻挡比 P 的提高将增加传输损耗. 当周期 T 从无限大变为 80 mm 时, 通带透过率平均下降超过 0.9 dB; 肋骨的宽度 D 从 0 变为 20 mm 时, 通带透过率平均下降超过 1 dB. 同时给出孔径阻挡比 P 的经验值: 当其小于 12.11% 时通带无偏移现象; 当其小于 4.12% 时, 桁架结构对 FSS 的谐振影响可忽略不计, 能够实现现在隐身雷达罩内增加空气层, 进而稳定 FSS 传输特性并提升工作频段的透过率, 为拟采用电介质桁架结构的 FSS 隐身雷达罩提供了理论和实验的参考依据.

- [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] 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, 王剑波, 孙连春 2010 物理学报 **59** 5023]
- [4] Pelton E L, Munk B A 1974 *IEEE Trans. Anten. Propag.* **32** 799
- [5] Mittra R, Chan C H, Cwik T 1988 *IEEE Proc.* **76** 1593
- [6] 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]
- [7] Munk B A 2000 *Frequency Selective Surface: Theory and Design* (New York: Wiley)
- [8] Meng Z J, Lü M Y, Wu Z, Huang J 2008 *Chin. J. Radio Sci.* **23** 1123 (in Chinese) [蒙志君, 吕明云, 武哲, 黄俊 2008 电波科学学报 **23** 1123]
- [9] Harms P, Mittra R, Ko W 1994 *IEEE Trans. Anten. Propag.* **42** 9
- [10] Turner G M, Christodoulou C 1999 *IEEE Trans. Anten. Propag.* **47** 4

The influence of dielectric truss on transmission characteristics of frequency selective surface*

Chen Xin^{1)†} Gao Jin-Song¹⁾ Xu Nian-Xi¹⁾²⁾ Wang Yan-Song¹⁾ Feng Xiao-Guo¹⁾

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) (*Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

(Received 1 June 2012; revised manuscript received 26 June 2012)

Abstract

In order to analyze the influence of dielectric truss structure on frequency selective surfaces (FSS) transmission characteristics, as an example, the FSS of Y ring unit and the truss made of polyimide are investigated by the finite difference time domain method. The relevant physical model is developed and pore blocking rate is defined. Through the analysis it is proved that the variations of truss period and rib width will affect the FSS, so they become the main parameters to measure dielectric truss structure, and that the improvement of the aperture stop ratio will increase transmission loss. When truss period changes from infinity to 80 mm the transmittance of passband is reduced by more than 0.9 dB on an average; when the ribs width increases from 0 to 10 mm, the transmittance of passband is reduced by more than 0.6 dB on an average. When aperture stop ratio is lower than 12.11%, the passband produces no shift. When aperture stop ratio is less than 4.12%, the influence of the truss on FSS is negligible. The FSS specimens is fabricated by coating and lithography process, the dielectric truss is machined by numerically controlled machine, and the microwave measurement is carried out in a dark room. The experimental results and the calculation results are verified to be in good agreement with each other. Therefore the present study presents an experimental and theoretical reference for designing the FSS stealth radar with the dielectric truss structure.

Keywords: frequency selective surface, dielectric truss, aperture blocking rate

PACS: 73.20.-r, 73.61.-r

* Project supported by the Third Innovation Project of CIOMP (Grant No. 093Y32J090), the National Natural Science Foundation of China (Grant No.61172012).

† E-mail: chenxin19344834@sohu.com