

一种介质-金属加载圆孔单元厚屏频率选择表面

唐光明[†] 苗俊刚 董金明

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

(2011年5月23日收到; 2011年7月25日收到修改稿)

厚屏频率选择表面能较好地改善 FSS 带宽性能, 是实现隐身雷达天线罩的有效手段. 为了全面掌握厚屏 FSS 的传输特性, 给 FSS 的工程应用提供可靠依据, 本文设计了一种介质-金属加载圆孔单元的厚屏频率选择表面. 采用矩量法对此结构进行分析计算, 主要研究了加载金属直径、加载介质厚度、电磁波入射角等几个参数对厚屏 FSS 传输特性的影响规律. 仿真实验结果表明: 带宽、中心频率及其透过率都对填充介质直径、加载金属直径、加载介质厚度、电磁波入射角和不同排列方式有不同程度的敏感性, 可以通过合理调整加载金属直径及加载介质厚度来获得较宽的通带和较高的透过率. 这为实现厚屏 FSS 在曲面隐身雷达天线罩上的应用提供了一种有价值的借鉴.

关键词: 厚屏频率选择表面, 介质-金属加载, 矩量法, 传输特性

PACS: 84.40.-x

1 引言

频率选择表面 (frequency selective surfaces, FSS) 是由结构完全相同的贴片或缝隙单元组成的二维平面周期阵列^[1]. 依据 FSS 厚度的不同, 有薄屏 FSS 与厚屏 FSS 之分. 从近年国内外公开发表的文献看, 学者们主要对薄屏 FSS 进行了研究. 由于 FSS 的军事用途, 国外很少公开报道有价值的研究数据, 国内学者近几年增加了对 FSS 的研究兴趣, 主要集中于用国外成熟的理论分析层数、结构参数、介质加载、排列方式和电磁波入射角对 Y 形、方形、圆形、十字形单元及其复合单元传输特性的影响, 为 FSS 在我国的工程应用提供了很多有价值的研究结果. 其中主要有, 武哲等用矩量法分析了 Y 形缝隙单元双层 FSS 的电磁特性并进行了数值模拟研究^[2]; 陈磊等采用谱域法结合阻抗法分析了十字形双层缝隙 FSS 的电性能^[3]; 王焕青等通过实验测试了介质加载对圆形 FSS 传输特性的影响^[4]; 卢俊等采用模匹配技术对 Y 形和圆环 FSS 进行分析^[5]并对 Y 形和 Y 环形单元 FSS 的传输特性做了实验对比研究^[6]; 李小秋等用谱域分析法研究了 Y 环单元^[7]和一种新型复合单元^[8] FSS 结构参数对其频率响应特性的影响, 用模式匹配技术分析了具有双频的十字形复合单元^[9]和另一种新型复合单元^[10] FSS 的传输特性, 并通过结合广义散

射矩阵和矩量法对双屏圆环单元^[11] FSS 的传输特性进行了数值计算和仿真; 贾宏燕等采用模式匹配技术分别分析了改变 Y 孔单元方式对 FSS 极化稳定性的影响^[12]、双屏 FSS 表面中间电介质层对传输特性的影响^[13]和一种新型组合单元 FSS 在大角度入射时极化方式改变对中心频率的影响^[14], 以及利用谱域法分别对两种新型组合单元 FSS^[15,16]和含基底 FSS 电介质匹配方式^[17]进行了理论分析和计算. 在以上针对薄屏的研究中, 通常采用双层薄屏或多层薄屏 FSS 级联以获得更好的带宽性能, 但这样却增加了结构的复杂度, 且多屏在介质匹配后往往会带来中心频率透过率易低的不利影响. 针对这两个问题, 在国内只有方易春等曾利用矩量法对有无介质填充圆孔单元厚屏 FSS 的传输特性进行研究^[18,19]的情况下, 本文设计了如图 1 所示的一种新型介质-金属加载圆孔单元的厚屏 FSS, 详细研究了加载金属及介质的直径和厚度、电磁波入射角度等参数对此结构传输特性的影响规律, 为厚屏 FSS 在雷达天线罩上的工程应用提供了可靠的设计依据.

2 理论分析

首先, 建立如图 2 所示的介质-金属加载圆孔

[†] E-mail: gmt971@ee.buaa.edu.cn

单元的厚屏 FSS 等效模型. 然后, 结合文献 [20] 的相关理论进行分析.

等效模型将介质 - 金属加载厚屏 FSS 圆孔单元分成两个自由空间区域 A 和 C 以及波导区域 B, 用孔径两侧磁流相等的磁场边界条件将这三个区域进行耦合; 孔径单元外的散射场用 Floquet 理论进行展开, 而孔径单元内的场展开为波导模式; 在 FSS 单元边界加上边界条件, 利用矩量法求解用矩阵形式表示的磁场耦合积分方程, 就能得到介质 - 金属加载厚屏 FSS 圆孔单元传输特性.

用同轴波导模函数表示孔径 1、孔径 2 左边和右边的磁流分别为

$$M_{S1}^L = -M_{S1}^R = M_{S1} = \sum_{p=0}^P A_p e_p^1, \quad (1)$$

$$M_{S2}^L = -M_{S2}^R = M_{S2} = \sum_{q=0}^Q B_q e_q^1, \quad (2)$$

孔径 1、孔径 2 切向磁场分别为

$$H_{T1}^L = T_{inc} H_{inc} - \sum_m Y_m^{MA} \frac{T_{1,1}^L}{2} \langle M_{S1}^L, h_m^F \rangle h_m^F, \quad (3)$$

$$H_{T1}^R = \sum_n Y_n^{1B} \frac{T_{1,1}^R}{2} \langle M_{S1}^R, h_n^{WG} \rangle h_n^{WG} - \sum_n Y_n^{NB} \frac{T_{1,2}}{2} \langle M_{S2}^L, h_n^{WG} \rangle h_n^{WG}, \quad (4)$$

$$H_{T2}^L = - \sum_n Y_n^{NB} \frac{T_{2,2}^L}{2} \langle M_{S2}^L, h_n^{WG} \rangle h_n^{WG} - \sum_n Y_n^{1B} \frac{T_{2,1}}{2} \langle M_{S1}^R, h_n^{WG} \rangle h_n^{WG}, \quad (5)$$

$$H_{T2}^R = - \sum_m Y_m^{PC} \frac{T_{2,2}^R}{2} \langle M_{S2}^R, h_m^F \rangle h_m^F, \quad (6)$$

因在孔径边界两侧的切向电场与切向磁场均相等, 所以联立方程 (1)–(6) 可得

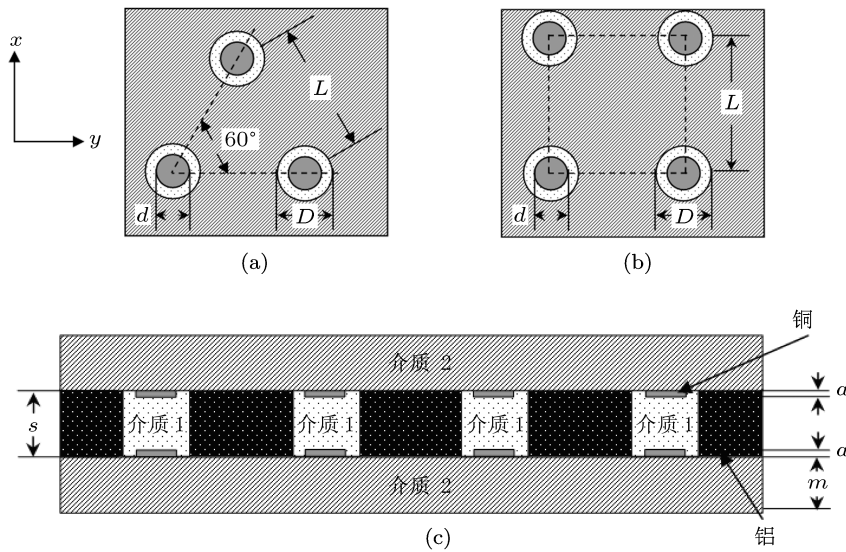


图 1 介质 - 金属加载圆孔单元的厚屏 FSS 结构图 (a) $x-y$ 平面无限扩展正三角形阵列 (剖面俯视); (b) $x-y$ 平面无限扩展正方形阵列 (剖面俯视); (c) 介质 - 金属加载圆孔单元的厚屏 FSS 结构 (剖面正视)

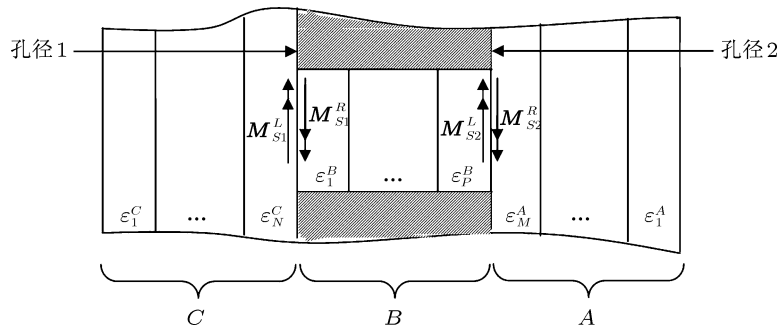


图 2 介质 - 金属加载圆孔单元的厚屏 FSS 等效模型

$$\begin{aligned}
 & T_{\text{inc}} \langle \mathbf{e}_i^1, \mathbf{H}_{\text{inc}} \rangle^* \\
 &= \sum_p A_p \sum_m Y_m^{MA} \frac{T_{1,1}^L}{2} \langle \mathbf{e}_p^1, \mathbf{h}_m^F \rangle \langle \mathbf{e}_i^1, \mathbf{h}_m^F \rangle^* \\
 &+ \sum_p A_p \sum_n Y_n^{1B} \frac{T_{1,1}^R}{2} \langle \mathbf{e}_p^1, \mathbf{h}_n^{WG} \rangle \langle \mathbf{e}_i^1, \mathbf{h}_n^{WG} \rangle \\
 &- \sum_q B_q \sum_n Y_n^{NB} \frac{T_{1,2}^L}{2} \langle \mathbf{e}_q^2, \mathbf{h}_n^{WG} \rangle \langle \mathbf{e}_i^1, \mathbf{h}_n^{WG} \rangle, \\
 & \tag{7}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 0 &= - \sum_q B_q \sum_n Y_n^{NB} \frac{T_{2,2}^L}{2} \langle \mathbf{e}_q^2, \mathbf{h}_n^{WG} \rangle \langle \mathbf{e}_j^2, \mathbf{h}_n^{WG} \rangle \\
 &+ \sum_p A_p \sum_n Y_n^{1B} \frac{T_{2,1}^L}{2} \langle \mathbf{e}_p^1, \mathbf{h}_n^{WG} \rangle \langle \mathbf{e}_j^2, \mathbf{h}_n^{WG} \rangle \\
 &- \sum_q B_q \sum_m Y_m^{PC} \frac{T_{2,2}^R}{2} \langle \mathbf{e}_q^2, \mathbf{h}_m^F \rangle \langle \mathbf{e}_j^2, \mathbf{h}_m^F \rangle^*. \tag{8}
 \end{aligned}$$

根据方程 (7)–(8) 得到如下矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} I_1^{\text{inc}} \\ \vdots \\ I_P^{\text{inc}} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{1,1}^{1,1} & Y_{1,2}^{1,1} & \cdots & Y_{1,P}^{1,1} & Y_{1,1}^{1,2} & Y_{1,2}^{1,2} & \cdots & Y_{1,Q}^{1,2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y_{P,1}^{1,1} & Y_{P,2}^{1,1} & \cdots & Y_{P,P}^{1,1} & Y_{P,1}^{1,2} & Y_{P,2}^{1,2} & \cdots & Y_{P,Q}^{1,2} \\ Y_{1,1}^{2,1} & Y_{1,2}^{2,1} & \cdots & Y_{1,P}^{2,1} & Y_{1,1}^{2,2} & Y_{1,2}^{2,2} & \cdots & Y_{1,Q}^{2,2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y_{Q,1}^{2,1} & Y_{Q,2}^{2,1} & & Y_{Q,P}^{2,1} & Y_{Q,1}^{2,2} & Y_{Q,2}^{2,2} & & Y_{Q,Q}^{2,2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_P \\ B_1 \\ \vdots \\ B_Q \end{bmatrix} \tag{9}$$

(9) 式中, $I_i^{\text{inc}} = 2T_{\text{inc}} \langle \mathbf{e}_i^1, \mathbf{H}_{\text{inc}} \rangle^*$. 对此矩阵方程进行计算就可求出 A_p 和 B_q , 即可得到介质 - 金属加载厚屏 FSS 圆孔单元的传输特性.

(1)–(9) 式中: M_{S1}, M_{S2} 是磁流; A_p, B_q 是待求系数; $\mathbf{H}_{T1}, \mathbf{H}_{T2}$ 是切向磁场; \mathbf{H}_{inc} 是入射波磁; \mathbf{h}_m^F 是自由空间模函数; \mathbf{h}_n^{WG} 是波导模函数; Y_m, Y_n 是介质导纳; $\mathbf{e}_p^1, \mathbf{e}_i^1, \mathbf{e}_q^2, \mathbf{e}_j^2$ 是同轴波导模函数; $T_{\text{inc}}, T_{1,1}^L, T_{1,1}^R, T_{1,2}, T_{2,2}^L, T_{2,1}, T_{2,2}^R$ 是传输系数.

3 数值结果

为了研究各种参数对介质 - 金属加载厚屏 FSS 传输特性的影响, 设计了如图 1 所示的单元结构.

其中 L 为单元间距, 取值为 40.00 mm, a, d 分别为加载金属铜的厚度和直径, D 为填充介质 1 的直径, m 为加载介质 2 的厚度, s 为厚屏铝板的厚度, 为了符合厚屏条件, 取值为 1.50 mm.

3.1 填充介质直径变化对介质 - 金属加载圆孔单元厚屏 FSS 传输特性的影响

首先, 对填充不同直径介质时正方形排列介质 - 金属加载厚屏 FSS 传输特性的影响进行了研究. 电磁波正入射, 取 $\theta = 0^\circ, \phi = 0^\circ$, 填充介质直径依次等于 20.00 mm, 25.00 mm, 30.00 mm. 通过矩量法仿真, 填充不同直径介质对正方形排列介质 - 金属加载厚屏 FSS 传输特性的影响如图 3 所示, 介质 - 金属加载厚屏 FSS 圆孔单元在填充介质直径不同情况下的传输特性如表 1 所示. 当填充介质直径 D 由 20.00 mm 增至 25.00 mm 时, 中心频率 f_0 向低漂移 0.40 GHz, 带宽增加 0.73 GHz, 透过率 T 增大 0.10 dB; 当介质直径 D 由 20.00 mm 增至 30.00 mm 时, 中心频率 f_0 向低漂移 0.40 GHz, 带宽增加 1.95 GHz, 透过率 T 增大 0.13 dB. 由此可知, 填充介质直径增加时对正方形排列介质 - 金属加载厚屏 FSS 单元中心频率影响呈下降趋势, 但是不敏感; 随着填充介质直径的增加, 带宽和中心频率透过率都增加, 且中心频率具有很高的透过率.

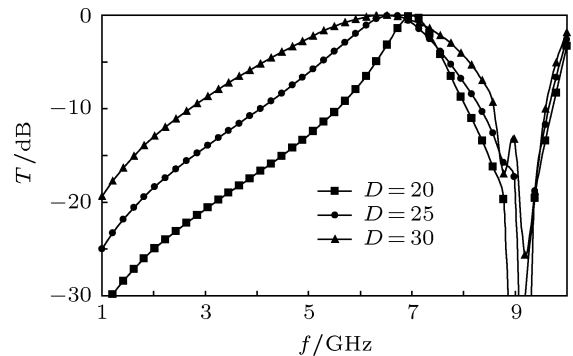


图 3 填充不同直径介质对正方形排列介质 - 金属加载圆孔单元厚屏 FSS 传输特性的影响

表 1 正方形排列介质 - 金属加载厚屏 FSS 圆孔单元在填充介质直径不同情况下的传输特性

介质直径 D/mm	中心频率 f_0/GHz	-3 dB 带宽 W/GHz	透过率 T/dB
30.00	6.50	2.90	-0.02
25.00	6.50	1.68	-0.05
20.00	6.90	0.95	-0.15

3.2 加载金属直径变化对介质 - 金属加载圆孔单元厚屏 FSS 传输特性的影响

其次, 采用电磁波正入射, 即 $\theta = 0^\circ, \varphi = 0^\circ$, 对加载不同直径金属时正方形排列介质 - 金属加载厚屏 FSS 传输特性的影响进行了研究. 加载金属直径依次等于 2.50 mm, 5.00 mm, 7.50 mm. 通过矩量法仿真得到如图 4 所示的结果, 比较数据如表 2 所示. 当加载金属直径由 2.50 mm 增至 5.00 mm, 中心频率 f_0 向低漂移 0.60 GHz, 带宽减少 0.05 GHz, 透过率 T 不变; 当加载金属直径由 2.50 mm 增至 7.50 mm 时, 中心频率 f_0 向低漂移 1.50 GHz, 带宽减少 1.15 GHz, 透过率 T 不变. 由此可知, 加载不同直径金属对正方形排列介质 - 金属加载厚屏 FSS 的中心频率和带宽都有影响, 随着金属直径的增加, 中心频率和带宽都呈下降趋势, 且具有较大的带宽, 平顶程度良好; 中心频率的透过率不变, 取小数点后两位有效数据时, 损耗为零.

表 2 正方形排列介质 - 金属加载厚屏 FSS 圆孔单元在金属直径不同情况下的传输特性

金属直径 d/mm	中心频率 f_0/GHz	-3 dB 带宽 W/GHz	透过率 T/dB
7.50	5.40	5.05	-0.00
5.00	6.30	6.15	-0.00
2.50	6.90	6.20	-0.00

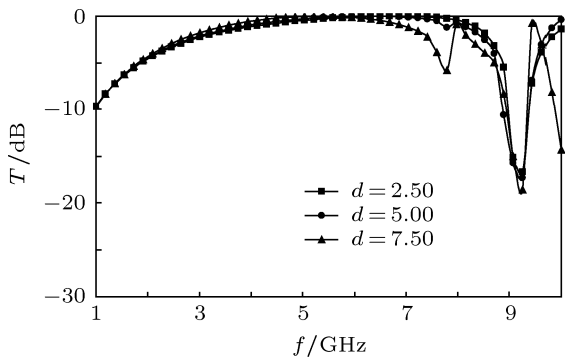


图 4 加载不同直径金属对正方形排列介质 - 金属加载圆孔单元厚屏 FSS 传输特性的影响

3.3 加载金属厚度变化对介质 - 金属加载圆孔单元厚屏 FSS 传输特性的影响

接着, 对加载不同厚度金属时正方形排列介质 - 金属加载厚屏 FSS 的传输特性进行了研究. 取 $\theta = 0^\circ, \varphi = 0^\circ$, 保证电磁波正入射, 加载金属厚度依次等于 0.10 mm, 0.35 mm, 0.60 mm. 通过矩量法仿真, 加载不同厚度金属对正方形排列介质 - 金属加载厚屏 FSS 传输特性的影响如图 5 所示, 传输

特性具体数据如表 3 所示. 当金属厚度 a 由 0.10 mm 增至 0.35 mm 时, 中心频率 f_0 和带宽 W 都没有变化, 透过率 T 减小 0.09 dB; 当金属厚度 a 由 0.10 mm 增至 0.60 mm 时, 中心频率 f_0 向低漂移 0.10 GHz, 带宽未变化, 透过率 T 减小 0.06 dB. 由此可知, 加载不同厚度的金属时, 正方形排列介质 - 金属加载厚屏 FSS 单元带宽和中心频率都很稳定, 且中心频率具有较好的透过率.

表 3 正方形排列介质 - 金属加载厚屏 FSS 圆孔单元在金属加载厚度不同情况下的传输特性

金属直径 a/mm	中心频率 f_0/GHz	-3 dB 带宽 W/GHz	透过率 T/dB
0.60	6.90	0.85	-0.16
0.35	7.00	0.85	-0.19
0.10	7.00	0.85	-0.10

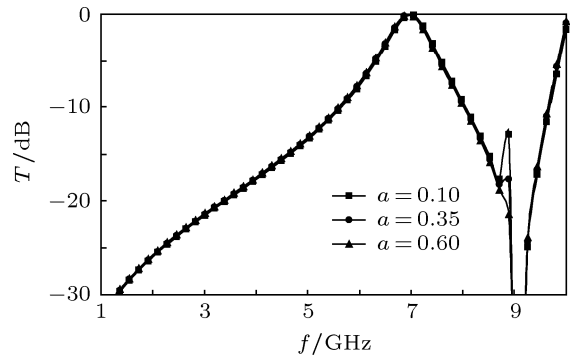


图 5 加载金属厚度不同时正方形排列介质 - 金属加载圆孔单元厚屏 FSS 的传输特性

3.4 加载介质厚度变化对介质 - 金属加载圆孔单元厚屏 FSS 传输特性的影响

然后, 对加载不同厚度介质时正方形排列介质 - 金属加载厚屏 FSS 传输特性的影响进行了研究. 电磁波正入射, 即 $\theta = 0^\circ, \varphi = 0^\circ$, 加载介质厚度依次取 1.00 mm, 2.00 mm, 3.00 mm. 通过矩量法仿真, 得到如图 6 所示的结果, 具体对比数据如表 4 所示. 当加载介质厚度 m 由 1.00 mm 增至 2.00 mm 时, 中心频率 f_0 向低漂移 0.50 GHz, 带宽减少 0.40 GHz, 透过率 T 没有变化; 当加载介质厚度 m 由 1.00 mm 增至 3.00 mm 时, 中心频率 f_0 向低漂移 0.90 GHz, 带宽减少 0.30 GHz, 透过率 T 减小 0.01 dB. 由此可知, 随着加载介质厚度的增加, 正方形排列介质 - 金属加载厚屏 FSS 中心频率、带宽都呈下降趋势, 平顶程度较好, 有较宽的带宽; 中心频率的透过率变化极小, 取小数点后两位有效数

据时, 损耗几乎为零.

表 4 正方形排列介质 - 金属加载厚屏 FSS 圆孔单元在加载介质厚度不同情况下的传输特性

介质厚度 m/mm	中心频率 f_0/GHz	-3 dB 带宽 W/GHz	透过率 T/dB
3.00	4.10	5.20	-0.01
2.00	4.50	5.10	-0.00
1.00	5.00	5.50	-0.00

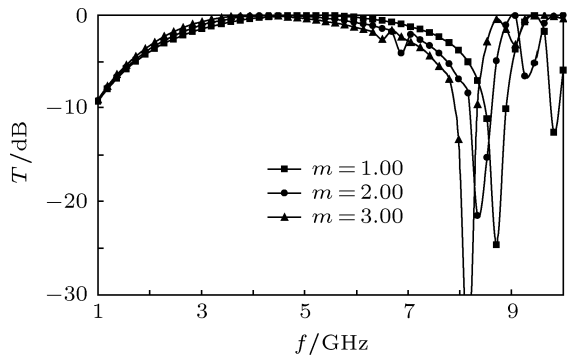


图 6 加载厚度不同的介质时正方形排列介质 - 金属加载圆孔单元厚屏 FSS 的传输特性

表 5 不同排列方式介质 - 金属加载厚屏 FSS 圆孔单元在入射角度不同情况下的传输特性

排列方式	入射角度 $\theta/(\text{°})$	中心频率 f_0/GHz	-3 dB 带宽 W/GHz	透过率 T/dB
正方形	60	5.20	0.10	-0.08
	30	7.80	0.70	-0.07
	0	7.00	0.80	-0.07
正三角形	60	5.60	0.05	-1.47
	30	6.30	0.50	-0.26
	0	7.00	0.80	-0.17

3.5 入射角变化对介质 - 金属加载圆孔单元厚屏 FSS 传输特性的影响

最后, 利用矩量法分别研究了电磁波在不同入射角下正方形排列、正三角形排列介质 - 金属加载厚屏 FSS 的传输特性. 电磁波入射角依次取 0° , 30° , 60° . 通过仿真分别得到如图 7 和图 8 所示的结果, 对比数据如表 5 所示. 正方形排列: 当 θ 由 0° 增加到 30° 时, 中心频率 f_0 向高漂移 0.80 GHz, 带宽减少 0.10 GHz, 透过率 T 不变; 当 θ 由 0° 增加到 60° 时, 中心频率 f_0 向低漂移 1.80 GHz, 带宽减少 0.70 GHz, 透过率 T 减小 0.01 dB. 正三角形排列: θ 由 0° 增加到 30° 时, 中心频率 f_0 向低漂移 0.70 GHz, 带宽减少 0.30 GHz, 透过率 T 减小 0.09 dB; 当 θ 由 0° 增加到 60° 时, 中心频率 f_0 向低漂移 1.40 GHz, 带宽减少 0.75 GHz, 透过率 T 减小 1.30 dB. 由此可知, 电磁波采用不同角度入射

时, 正方形排列、正三角形排列的介质 - 金属加载厚屏 FSS 大致具有相同的变化趋势: 中心频率和带宽都随着入射角度的增加而降低, 且带宽都很窄; 正方形排列与正三角形排列相比具有较好的中心频率透过率.

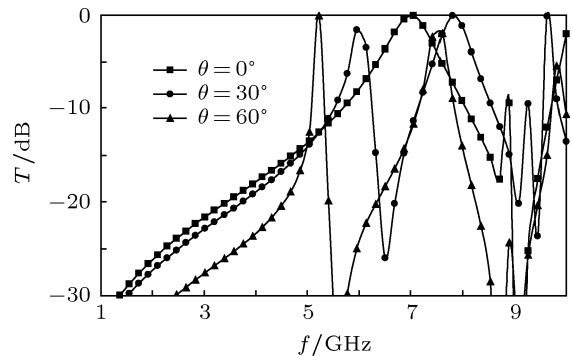


图 7 电磁波在不同入射角下正方形排列介质 - 金属加载圆孔单元厚屏 FSS 的传输特性

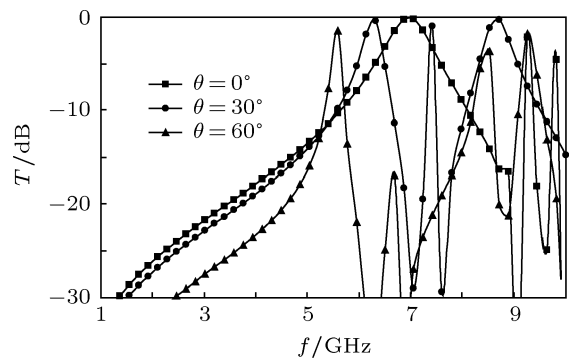


图 8 电磁波在不同入射角下正三角形排列介质 - 金属加载圆孔单元厚屏 FSS 的传输特性

4 结论

本文设计了一种介质 - 金属加载圆孔单元的厚屏 FSS, 利用矩量法对其传输特性进行了分析和数值仿真. 研究表明: 当填充介质直径增加时, 中心频率向低漂移, 带宽增加, 透过率增大; 金属厚度增加对中心频率和带宽影响不大, 透过率减小; 入射角度增加对正方形和正三角形排列方式具有相同的影响, 都使中心频率向低漂移, 带宽减少, 透过率减小; 特别地, 当加载金属直径在 2.50 mm 至 7.50 mm 之间时带宽范围为 5.05—6.20 GHz, 中心频率透过率为 100% (取小数点后两位有效数据时); 当加载介质厚度为 1.00—3.00 mm 时带宽范围为 5.20—5.50 GHz, 中心频率透过率也接近 100% (取小数点后两位有效数据时). 通过本文的研究, 了解和掌握了各种结构参数对介质 - 金属加载厚屏 FSS 圆孔单元传输特性的影响规律, 可以利

用调整加载金属的直径与加载介质的厚度, 获得具有较好带宽特性的厚屏 FSS, 克服双层或多层薄屏级联 FSS 带来的结构复杂、中心频率透过易低的不利影响. 这为实现厚屏 FSS 在曲面隐身雷达天线

罩上的实际工程应用提供了一种有价值的借鉴.

感谢孙静蕊给予的建议. 同时, 对匿名审稿专家和编辑提出的宝贵意见表示由衷的谢意.

- [1] Munk B A 2000 *Frequency Selective Surfaces Theory and Design* (New York: Wiley) p28
- [2] Wu Z, Wu Z B 2005 *Acta Elec. Sin.* **33** 517 (in Chinese) [武哲, 武振波 2005 电子学报 **33** 517]
- [3] Chen L, Dong J M 2006 *Space Electronic Technology* **4** 57 (in Chinese) [陈磊, 董金明 2006 空间电子技术 **4** 57]
- [4] Wang H Q, Lu M Y, Wu Z 2005 *Journal of Infrared and Millimeter Waves* **24** 27 (in Chinese) [王焕青, 吕明云, 武哲 2005 红外与毫米波学报 **24** 27]
- [5] Lu J, Sun L C 2004 *Journal of Changchun University of Science and Technology* **27** 80 (in Chinese) [卢俊, 孙连春 2004 长春理工大学学报 **27** 80]
- [6] Lu J, Zhang J, Sun L C 2005 *Optics and Precision Engineering* **13** 219 (in Chinese) [卢俊, 张靓, 孙连春 2005 光学精密工程 **13** 219]
- [7] Li X Q, Gao J S 2006 *Optics and Precision Engineering* **14** 1071 (in Chinese) [李小秋, 高劲松 2006 光学精密工程 **14** 1071]
- [8] 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]
- [9] Li X Q, Lu J, Jia H Y, Gao J S, Feng X G, Sun L C 2007 *Journal of Infrared and Millimeter Waves* **26** 146 (in Chinese) [李小秋, 卢俊, 贾宏燕, 高劲松, 冯晓国, 孙连春 2007 红外与毫米波学报 **26** 146]
- [10] 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]
- [11] Li X Q, Feng X G, Gao J S 2009 *Journal of Microwaves* **25** 16 (in Chinese) [李小秋, 冯晓国, 高劲松 2009 微波学报 **25** 16]
- [12] Jia H Y, Feng X G, Gao J S 2007 *Optics and Precision Engineering* **15** 978 (in Chinese) [贾宏燕, 冯晓国, 高劲松 2007 光学精密工程 **15** 978]
- [13] Jia H Y, Gao J S 2007 *Journal of CAEIT* **2** 593 (in Chinese) [贾宏燕, 高劲松 2007 中国电子科学研究院学报 **2** 593]
- [14] Jia H Y, Gao J S, Feng X G 2008 *Optics and Precision Engineering* **16** 2076 (in Chinese) [贾宏燕, 高劲松, 冯晓国 2008 光学精密工程 **16** 2076]
- [15] Jia H Y, Gao J S, Feng X G, Sun L C 2008 *Acta Optica Sinica* **28** 1596 (in Chinese) [贾宏燕, 高劲松, 冯晓国, 孙连春 2008 光学学报 **28** 1596]
- [16] 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]
- [17] Jia H Y, Gao J S, Feng X G 2008 *Journal of Microwaves* **24** 36 (in Chinese) [贾宏燕, 高劲松, 冯晓国 2008 微波学报 **24** 36]
- [18] Fang C Y, Zhang S R, Lu J, Wang J B, Sun L C 2010 *Optics and Precision Engineering* **18** 1278 (in Chinese) [方春易, 张树仁, 卢俊, 汪剑波, 孙连春 2010 光学精密工程 **18** 1278]
- [19] 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]
- [20] Wu T K 1995 *Frequency Selective Surface and Grid Array* (New York: Wiley) pp147-175

A dielectric-metal-loaded thick-screen frequency selective surface having circle aperture elements

Tang Guang-Ming[†] Miao Jun-Gang Dong Jin-Ming

(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

(Received 23 May 2011; revised manuscript received 25 July 2011)

Abstract

Thick screen frequency selective surface (FSS) is a very effective means of realizing the stealth radome, since it can better improve the bandwidth performance of FSS. In order to fully grasp the transmission characteristics of thick screen FSS and to provide a sound foundation of realizing their applications for bandpass radomes, a dielectric-metal-loaded thick-screen FSS is designed in this paper. The transmission properties of this structure are analyzed by using the moment method. The transmission characteristics of this structure are investigated when some parameters including the diameter of filling dielectric, the diameter of filling metal, the thickness of filling dielectric, incidence angle of electromagnetic wave, and unit spacing are changed. Simulation results show that the diameter of filling dielectric, the diameter of filling metal, the thickness of loading dielectric, thickness of filling metal, incidence angle of electromagnetic wave, and unit spacing can influence the transmission properties of the dielectric-metal-loaded thick-screen FSS. The diameter of filling metal and the thickness of loading dielectric can be adjusted appropriately in order to obtain a wide passband width and a better penetrating percentage of the central frequency. The novel structure provides a valuable reference for the application in stealth curved streamlined radomes.

Keywords: thick-screen frequency selective surfaces, dielectric-metal-loaded, moment method, transmission property

PACS: 84.40.-x

[†] E-mail: gmt971@ee.buaa.edu.cn