

具有陡降特性的新型混合单元频率选择表面*

王岩松[†] 高劲松 徐念喜 汤洋 陈新

(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)

(2013年11月25日收到; 2013年12月30日收到修改稿)

频率选择雷达罩是频率选择表面(FSS)的重要应用之一, 为了获得频率选择雷达罩更好的隐身性能, 设计了一种基于开孔单元FSS新型单元FSS. 这种新型单元是在原有开孔单元周期边界处增加条形孔构成, 其传输性能兼具开孔型和贴片型FSS的特征, 因此称作混合单元频率选择表面. 以FSS在某导弹雷达罩上的应用为背景, 采用周期矩量法及离散粒子群算法进行设计优化. 仿真结果表明, 新型混合单元FSS与对应的开孔型FSS相比具有更陡峭的过渡带和更低的阻带透过率; 与双屏FSS相比具有更低的通带插入损耗和更薄的厚度, 且结构和制作工艺相对简单. 采用自由空间法对等效平板样件进行传输性能测试, 测试和仿真曲线符合较好, 验证了设计的准确性和可行性. 新型混合单元FSS特别适用于敌我双方工作频段接近的情形, 它的提出为FSS隐身雷达罩研制提供了一条可行性较高的新途径.

关键词: 频率选择表面, 混合单元**PACS:** 84.40.-x, 84.30.Vn**DOI:** 10.7498/aps.63.078402

1 引言

频率选择表面(frequency selective surfaces, FSS)是由周期排列的金属贴片单元或金属屏上周期排列的开孔单元构成的一种新型人工电磁材料, 这种材料在单元谐振频率附近呈全反射(贴片)或全传输(开孔)特性, 具有空间滤波的功能^[1-4]. 相应的, 贴片单元FSS称为带阻型FSS, 开孔单元FSS称为带通型FSS, 以十字形单元为例的FSS单元结构及典型滤波曲线如图1所示. FSS最主要的应用之一就是利用带通型FSS研制飞行器隐身雷达罩, 其主要原理是将己方雷达制导频段设计在FSS的通带, 将敌方雷达探测频段设计在FSS的阻带, 从而使己方制导天线自由发射和接收, 而对于敌方探测雷达波则利用雷达罩的低RCS外形散射到四周空间, 使探测方向回波大大减弱, 从而提高飞行器隐身、抗干扰和突防性能^[5-7]. 基于上述原理, 理想的FSS雷达罩应在通带具有较低的损耗, 而在带外

则沿快速滚落的边缘进入阻带, 且阻带透过率越低越好. 为了实现上述性能, 理论上的最佳方法是采用双屏或多屏FSS级联结构^[8-10]. 但是, 多屏FSS结构由于需要填充作为阻抗变换器使用的介质层, 且介质层厚度约为中心波长的四分之一, 这将导致整个FSS结构厚度非常大, 对于有限的雷达罩空间往往不适用^[11]. 同时, 具有一定厚度的多层介质自身的损耗会使通带性能劣化, 复杂的结构和工艺也限制了它的应用. 针对这一问题, 本文提出了一种兼具带通和带阻特性的新型混合单元FSS, 采用相对简单的单屏FSS结构获得了理想的滤波性能. 本文首先以FSS在某导弹雷达罩上的应用为背景, 采用周期矩量法及离散粒子群算法进行FSS滤波性能的设计优化, 分别给出了混合单元FSS、对应的开孔单元FSS及双屏FSS的最优设计结果并进行对比, 然后给出新型混合单元FSS的滤波机理, 最后通过等效平板测试验证了设计的可行性和准确性.

* 长春光机所重点实验室基金(批准号: YZGX1SJ13A)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: wangyansong99@163.com

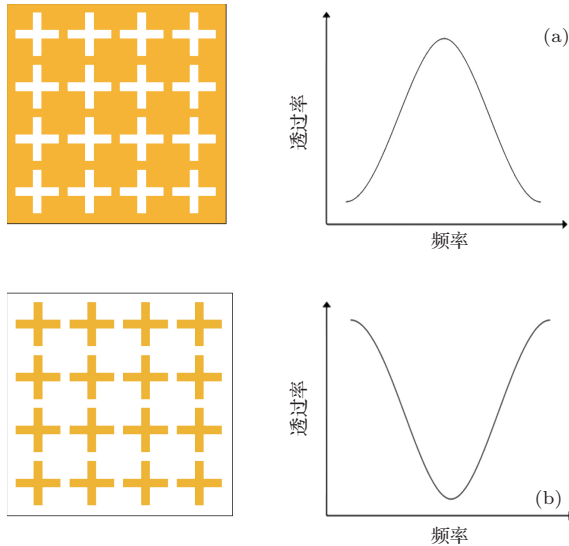


图1 两种类型单元结构及典型滤波曲线示意图 (a) 带通型; (b) 带阻型

2 仿真设计

2.1 设计目标

以FSS在某雷达罩上的应用为背景进行FSS仿真设计. 该雷达罩介电常数 $\epsilon \approx 3.15$, 损耗正切 $\text{tg} \delta = 0.005$, 壁厚 26.9 mm. 己方天线工作在 Ku 频段, 中心频点 f_0 . 假想敌方探测雷达工作在 X 频段 (8—12 GHz). 因此, 设计目标如下: 原雷达罩加载 FSS 后, 0° — 40° 入射角度范围内, 通带内 $f_0 - \Delta f$, f_0 , $f_0 + \Delta f$ 三个频点处透过率较原罩

降低不超过 10%, 阻带 (X 频段) 平均透过率不高于 10%. 另外, 从实际应用角度出发, 限制 FSS 结构的厚度不超过 3 mm.

2.2 基本结构

为了实现通带较低的插入损耗及好的角度稳定性, 单屏 FSS 加载设计采用文献 [12] 提到的结构——将空气层作为介质匹配层, 并用电性能与空气相近的蜂窝板替代文献 [12] 中的电介质桁架支撑结构, 其介电常数 $\epsilon = 1.05$, 损耗正切 $\text{tg} \delta < 0.005$. 基本开孔单元选择 Y 环单元 [13,14], 以正三角形阵列排布, 新型混合单元则通过在 Y 环单元的周期边界相邻的两侧增加条形孔获得. 图 2 是两种单屏 FSS 设计的结构示意图. 本文设计的 FSS 阵列基底为聚酰亚胺薄膜, 介电常数 $\epsilon = 3.0$, 损耗正切 $\text{tg} \delta = 0.005$, 厚度 25.4 μm . 胶层介电常数 $\epsilon = 2.65$, 损耗正切 $\text{tg} \delta = 0.008$, 厚度 50 μm .

2.3 设计优化

本文采用周期矩量法进行 FSS 仿真计算, 其基本思想是首先对一个周期单元构建谱域形式下的积分方程, 然后利用 Floquet 定理得到整个周期阵列的谱域积分方程, 再将其离散为一个线性方程组, 最后求解这个方程组即可获得 FSS 的传输系数.

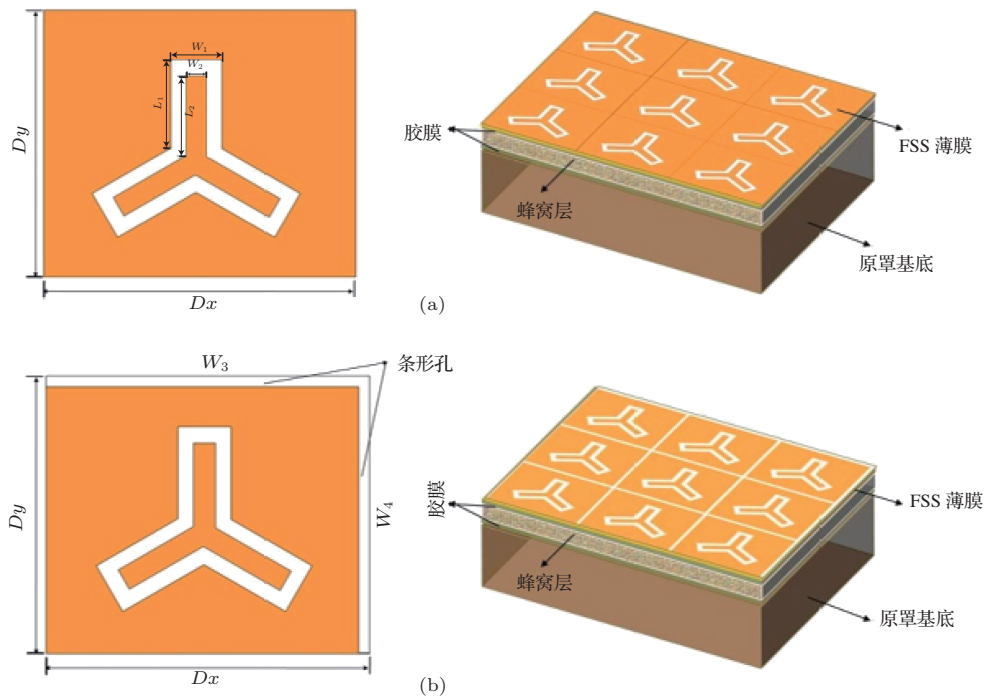


图2 单屏 FSS 加载 (a) 常规 Y 环单元及等效平板; (b) 新型混合单元及等效平板示意图

根据 Mittra 等对谱域积分方程的推导, 一个周期单元的谱域积分方程可表示为^[14]

$$\begin{bmatrix} H_x^s \\ H_y^s \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{j\omega\mu_0} \begin{bmatrix} k_0^2 - \alpha^2 & -\alpha\beta \\ -\alpha\beta & k_0^2 - \beta^2 \end{bmatrix} \times \mathbf{G} \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{mx} \\ \mathbf{J}_{my} \end{bmatrix} e^{j\alpha x} e^{j\beta y} d\alpha d\beta, \quad (1)$$

式中, H_x^s 和 H_y^s 分别为 FSS 散射磁场的 x 分量和 y 分量, k_0 为自由空间波数, α 和 β 分别为周期方向 D_x 和 D_y 方向上的传播因子, \mathbf{J}_m 和 \mathbf{G} 分别表示谱域中 FSS 结构缝隙处感应磁流和自由空间格林函数. 利用 Floquet 定理, 在 (1) 式的基础上获得整个周期阵列的谱域积分方程表达式

$$\begin{bmatrix} H_x^s \\ H_y^s \end{bmatrix} = \frac{4\pi}{j\omega\mu_0 D_x D_y} \times \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \begin{bmatrix} k_0^2 - \alpha_{mn}^2 & -\alpha_{mn}\beta_{mn} \\ -\alpha_{mn}\beta_{mn} & k_0^2 - \beta_{mn}^2 \end{bmatrix} \times \mathbf{G}(\alpha_{mn}, \beta_{mn}) \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{mx}(\alpha_{mn}, \beta_{mn}) \\ \mathbf{J}_{my}(\alpha_{mn}, \beta_{mn}) \end{bmatrix} \times e^{j\alpha_{mn}x} e^{j\beta_{mn}y}. \quad (2)$$

由 Fourier 变换的性质可知, (2) 式具有离散的平面波谱, 因此 $\mathbf{J}_m(\alpha_{mn}, \beta_{mn})$ 只有在离散的点上才取非零值, α_{mn}, β_{mn} 同样也成为相应 Floquet 谐波沿周期方向上的传播因子. 接下来采用一组全域基函数 B_x 和 B_y 展开等效磁流, 本文构造的全域基函数表达式为

$$B_{xpq}(x, y) = \hat{x} \frac{T_p(2x/a)}{\left[1 - (2x/a)^2\right]^{1/2}} \times \sin\left[\frac{q\pi}{a}\left(x + \frac{a}{s}\right)\right], \quad (3a)$$

$$B_{ypq}(x, y) = \hat{y} \sin\left[\frac{r\pi}{a}\left(y + \frac{a}{s}\right)\right] \times \frac{T_s(2y/a)}{\left[1 - (2y/a)^2\right]^{1/2}}, \quad (3b)$$

其中 $p, s = 0, 1, 2, \dots, q, r = 0, 1, 2, \dots$, T_i 表示 i 阶 Chebyshev 函数. 将 (2) 式和 (3) 式联立便可以确定周期混合结构的散射场, 与入射场相比便可以确定 FSS 结构的传输特性.

FSS 设计是一个多参数优化过程, 本文采用离散粒子群算法 (discrete particle swarm optimization, DPSO) 进行优化. 该方法属于一种启发式全局优化算法, 与传统的遗传算法 (genetic algorithm, GA) 相比容易实现, 无需交叉和变异操作, 涉及的参数少, 具有更快的收敛速度, 同时具有优越的消息共享机理, 能够有效地解决复杂模型特别是非线性和组合优化问题.

首先, 将 FSS 结构参数离散化. 需要优化并离散化的 FSS 参数主要包括: 单元周期 D_x 和 D_y , Y 环单元参数 L_1, L_2, W_1, W_2 , 条形孔参数 W_3, W_4 , 单屏 FSS 结构中的蜂窝板厚度 D 以及双层 FSS 结构中的匹配介质厚度等. 然后, 通过权重系数 Ψ , FSS 的透射率 T 及其期望值之间的约束实现目标函数的建立. 设 0° — 40° TE 电波扫描时, 通带内 $f_0 - \Delta f, f_0, f_0 + \Delta f$ 三个频点处透过率较原罩降低不超过 10%, 阻带 X 波段透过率在 10% 以下, 则目标函数 Φ 可以构建为

$$\begin{aligned} \Phi = & \Psi_L \min \left[\sum_{Li=1}^3 (T_{Li}^{\text{FSR}} - 0.1)^2 \right] \\ & + \Psi_{\max} \left\{ [(T_{f_0-\Delta f}^{\text{FSR}} - T_{f_0-\Delta f}^{\text{Radome}}) - 0.1]^2 \right. \\ & + [(T_{f_0}^{\text{FSR}} - T_{f_0}^{\text{Radome}}) - 0.1]^2 \\ & \left. + [(T_{f_0+\Delta f}^{\text{FSR}} - T_{f_0+\Delta f}^{\text{Radome}}) - 0.1]^2 \right\}, \quad (4) \end{aligned}$$

其中, 权重系数为

$$\Psi_L \min = \begin{cases} 0, & T_{Li} \leq 0.1, \\ 1, & \text{其他}, \end{cases}$$

$$\Psi_{\max} = \begin{cases} 0, & T_{\max} \geq 0.1, \\ 1, & \text{其他}, \end{cases}$$

T_{Li}^{FSR} 表示阻带三个频点的期望值, $T_{f_0-\Delta f}^{\text{FSR}}, T_{f_0-\Delta f}^{\text{Radome}}, T_{f_0}^{\text{FSR}}, T_{f_0}^{\text{Radome}}, T_{f_0+\Delta f}^{\text{FSR}}, T_{f_0+\Delta f}^{\text{Radome}}$ 则表示通带三个频点处加载 FSS 的雷达罩与未加载 FSS 时雷达罩透过率期望值.

然后, 将 (2) 式通过 (4) 式反复迭代, 最终优化获得混合单元结构参数为 $D_x = 8.20$ mm; $D_y = 7.10$ mm; $L_1 = 3.03$ mm; $L_2 = 2.82$ mm; $W_1 = 1.72$ mm; $W_2 = 0.50$ mm; $W_3 = 0.14$ mm; $W_4 = 0.16$ mm, $D = 2.0$ mm.

通过相同的仿真优化方法得到双屏 FSS 结构参数, 此处不赘述.

3 设计结果与分析

3.1 设计结果

图3是三种结构FSS的仿真曲线,可以看到三种设计的通带都具有近矩形化的特征,角度稳定性较好,但由于厚壁基底罩的调制作用,无法完全消除滤波曲线的“爬行波”.图4将入射角为 20° 时原罩与分别加载三种FSS结构后的仿真曲线进行对比.从图中可以看到,原罩在X频段透过率较高,加载了三种结构的FSS后X频段透过率均有不同程度降低.双屏FSS在临近通带处(13—15 GHz)下降最为迅速,单屏的常规Y环单元设计和新型混合单元设计相差不多,但到了12 GHz附近,二者逐渐拉大距离,新型混合单元设计的透过率开始以较快速度下降,并且在9.5 GHz附近陡降至-48 dB,呈现出带阻型滤波曲线特征,这也是它区别于其他两种设计最显著的特征.加载FSS前后雷达罩通带 f_0 处透过率值和阻带透过率值分别列于表1和表2.可以看到,相同入射角度下,混合单元FSS与常规开孔型FSS通带接近,双屏FSS通带损耗略大,三者阻带最优透过率分别为-15.15 dB, -48.03 dB和-27.11 dB,平均透过率分别为-14.1 dB, -21.6 dB和-20.3 dB,说明混合单元FSS与常规开孔型FSS相比,通带性能相当,阻带抑制效果更好;与双屏FSS相比,阻带性能相当、通带损耗更小.总体而言,新型混合单元FSS不但能够兼顾通带和阻带的性能,而且结构及制作工艺简单,因此综合性能最好.

表1 加载FSS前后雷达罩通带 f_0 处透过率值比较/%

	0°	10°	20°	30°	40°
未加载FSS	88.6	89.6	90.8	85.4	67.5
加载常规单屏FSS设计	87.4	89.0	91.0	83.8	64.9
加载新型单屏FSS设计	91.2	91.7	90.0	80.9	67.8
加载双屏FSS设计	81.0	81.5	82.0	81.0	79.5

表2 加载FSS前后雷达罩阻带透过率值比较/dB

	最优值	最劣值	平均值
未加载FSS	-2.56	-0.24	-1.68
加载常规单屏FSS设计	-15.15	-7.17	-10.92
加载新型单屏FSS设计	-48.03	-10.87	-20.17
加载双屏FSS设计	-27.11	-16.33	-21.55

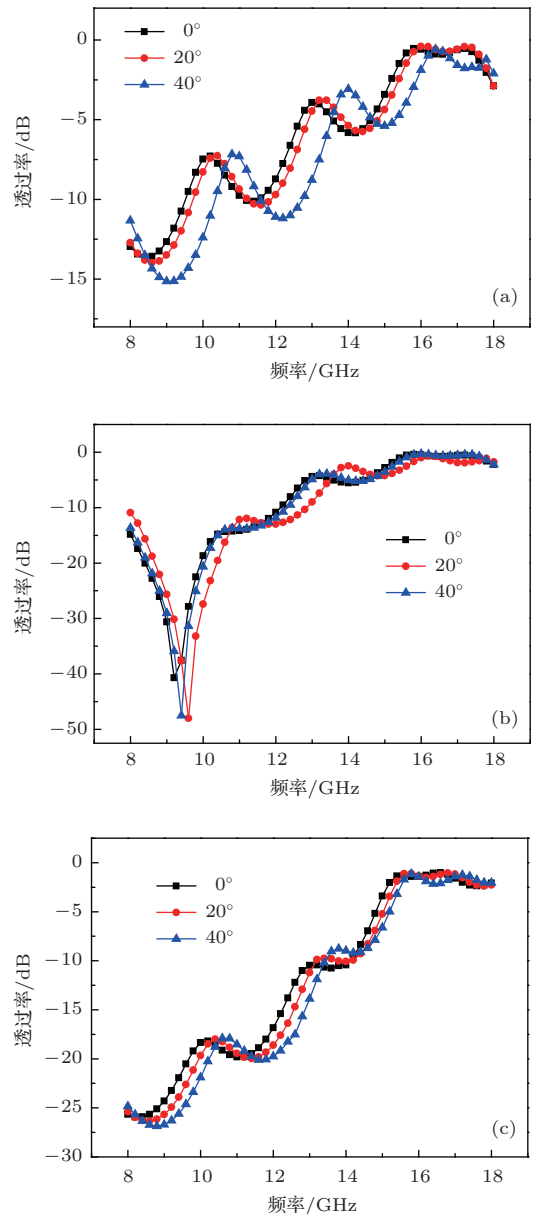


图3 仿真曲线(a)常规Y环单元单屏FSS(b)新型混合单元单屏FSS(c)双屏FSS

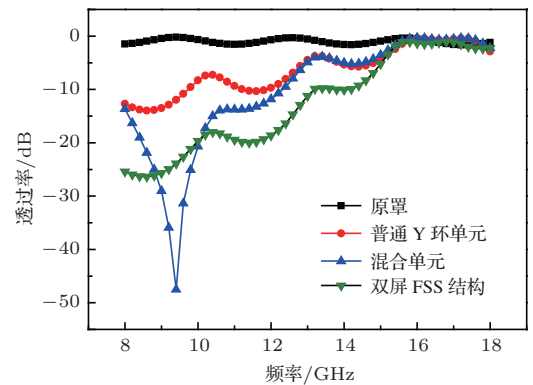


图4 原罩与分别加载三种FSS结构时的仿真曲线(入射角 20°)

3.2 机理分析

混合单元 FSS 兼具带通型及带阻型 FSS 的传输特性, 这主要是由于混合单元以开孔单元为主体形成了带通 FSS 传输模式, 而在开孔单元周期边界增加条形孔, 将原本连通的导电金属层也按周期分割, 则构成了开孔单元周围的贴片单元而形成带阻 FSS 传输模式. 也就是说, 混合单元图形中的金属部分同时扮演了开孔型 FSS 的基底以及贴片型 FSS 的贴片这两种角色. 为了进一步验证这一结论, 本文还设计了两组混合单元 FSS 进行对比分析, 第一组保持 Y 环尺寸不变, 将条形孔尺寸逐渐增大; 第二组保持条形孔尺寸不变, 将 Y 环单元尺寸逐渐增大. 正入射时这两组 FSS 的仿真曲线分别如图 5(a), (b) 所示. 可以看到, 第一组曲线随条形孔尺寸增大, 阻带峰值频点逐渐向高频移动, 而通带保持不变; 第二组曲线随 Y 环尺寸增大, 通带及阻带中心频点均逐渐向低频移动. 这两组设计结果完全符合开孔型 FSS 及贴片型 FSS 的基本谐振规律. 第一组设计中条形孔增大导致贴片有效谐振长度减小, 因此阻带峰值频点向高频移动, 而 Y 环尺

寸不变使通带曲线保持不变; 第二组设计中 Y 环尺寸增大使通带中心频点向低频移动, 同时 Y 环尺寸增大使贴片有效谐振长度增大使阻带峰值频点向低频移动. 上述结果表明, 混合单元中开孔单元决定通带性能, 而开孔单元周围的金属贴片部分决定阻带性能, 这也解释了为什么混合单元 FSS 与对应的开孔单元 FSS 具有几乎完全一致的通带(图 4), 而通过对条形孔大小及位置的调整, 可使带阻 FSS 的全反射区域恰好位于带通 FSS 的阻带. 值得注意的是, 混合单元不属于复合单元范畴, 它与普通复合单元的不同之处在于复合单元通常是不同形状、大小的贴片单元的组合或不同形状、大小的开孔单元的组合, 而混合单元则是开孔单元和贴片单元的组合, 且单元中的金属层既是开孔单元的基底, 又作为独立的贴片单元, 是一种独特而巧妙的 FSS 单元构成方式.

4 实验验证

采用印刷电路板法在聚酰亚胺柔性基底上制作出 FSS 图形阵列, 如图 6 所示. 然后将雷达罩基底介质板、蜂窝板、胶膜及 FSS 柔性薄膜采用模压法层合制成等效平板. FSS 传输性能测试采用自由空间法, 自由空间法测试系统以安捷伦 N5244A 型矢量网络分析仪为核心设备, 两个点聚焦透镜天线作为发射和接收天线, 将试件放置于两透镜天线的焦平面上, 通过转台控制入射角度, 测试状态如图 7 所示.

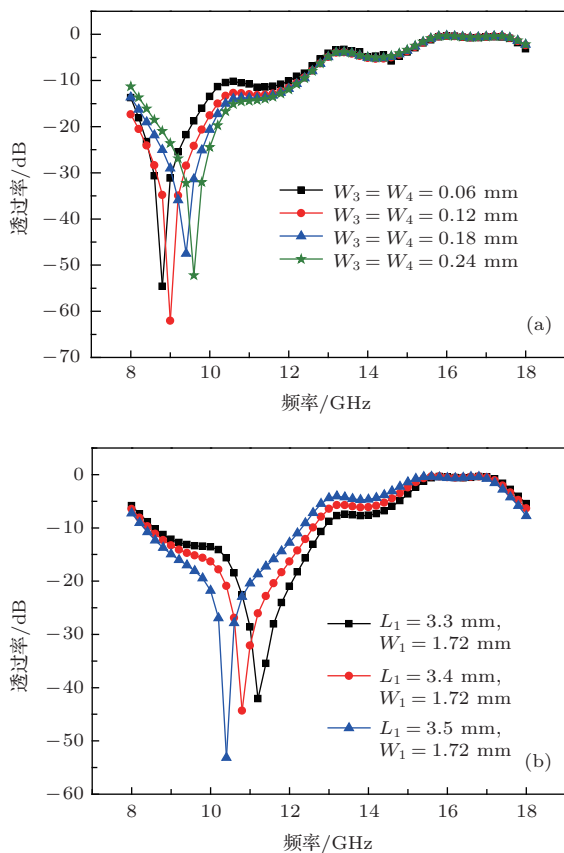


图5 混合单元 20° 入射时的仿真曲线 (a) 改变条形孔尺寸; (b) 改变 Y 环尺寸

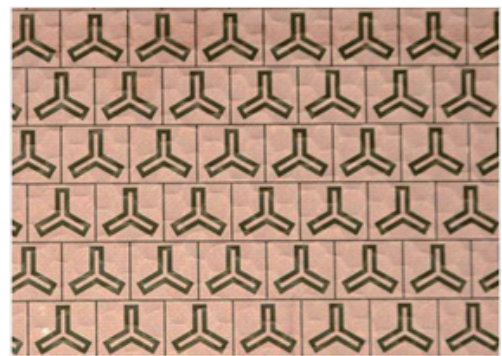


图6 混合单元 FSS 图形阵列

图 8 为 20° 角入射时 FSS 等效平板的仿真和测试曲线. 可以看出测试和仿真曲线在通带符合得很好, 但阻带中心频点略有偏差, 这可能是由于优化得到的条形孔宽度仅为 120 μm 左右, 而加工尺寸偏差约为 30 μm, 图形尺寸没有远大于加工偏差导

致阻带中心频点偏移. 但总的来说, 这一测试结果基本验证了新型混合单元设计的特点.

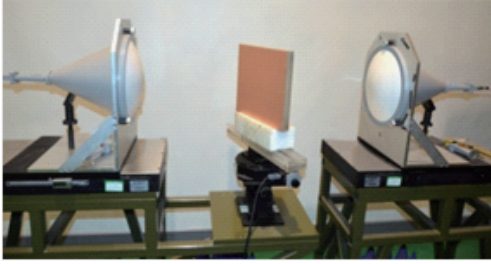


图7 混合单元FSS等效平板测试状态

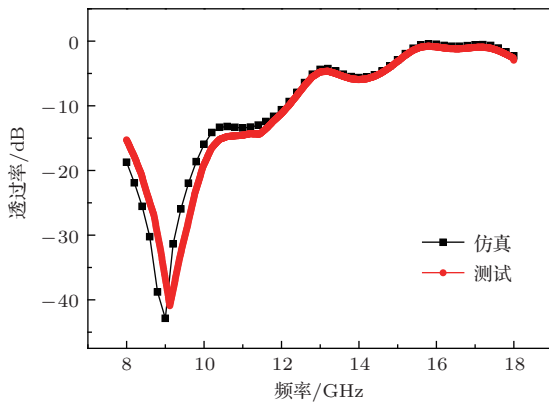


图8 新型混合单元在入射角为 20° 时的测试与仿真曲线对比

5 结 论

在常规开孔型FSS单元周期边界增加条形孔获得了一种新型混合单元FSS, 通过合理的设计, 可以使其传输曲线的通带与对应的常规开孔型FSS基本一致, 而在阻带则呈现出带阻型FSS的特征, 从而使阻带透过率快速大幅下降. 这主要是由于混合单元图形中的金属部分同时起到开孔型FSS的基底以及贴片型FSS的贴片两种作用. 本文的研究结果表明, 新型混合单元传输曲线的通带由开孔单元决定, 阻带由开孔单元周围的贴片决定, 其谐振规律与常规开孔单元/贴片单元一致, 因此可根据实际使用需求, 通过调整中心开孔单元与边界条形孔的尺寸得到所需的传输性能. 与常规开孔单元FSS相比, 新型混合单元FSS具有更陡峭的过渡带和更低的阻带透过率; 与双屏FSS相比, 新

型混合单元FSS具有更低的通带插入损耗, 厚度更薄, 且结构和工艺相对简单. 因此, 新型混合单元FSS的提出为FSS隐身雷达罩的研制提供了一条可行性较高的新途径, 尤其适用于敌我双方工作频段接近的情形. 当然, 本文对新型混合单元只是进行了初步的探讨, 对混合单元其他的组成方式及其滤波规律还有待于进一步深入系统研究.

参考文献

- [1] Wang X Z, Gao J S, Xu N X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 167307 (in Chinese)[王秀芝, 高劲松, 徐念喜 2013 物理学报 **62** 167307]
- [2] Zhang J, Gao J S, Xu N X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 147304 (in Chinese)[张建, 高劲松, 徐念喜 2013 物理学报 **62** 147304]
- [3] Lin B Q, Zhao S H, Wei W, Da X Y, Zhen Q R, Zhang H Y, Zhu M 2014 *Chin. Phys. B* **23** 024201
- [4] Yuan Z D, Gao J, Cao X Y, Yang H H, Yang Q, Li W Q, Shang K 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 014102 (in Chinese)[袁子东, 高军, 曹祥玉, 杨欢欢, 杨群, 李文强, 商楷 2014 物理学报 **63** 014102]
- [5] Lu G W, Zhang J, Yang J Y, Zhang T X, Kou Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 198401 (in Chinese)[鲁戈舞, 张剑, 杨洁颖, 张天翔, 寇元 2013 物理学报 **62** 198401]
- [6] Wang X Z, Gao J S, Xu N X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 237302 (in Chinese)[王秀芝, 高劲松, 徐念喜 2013 物理学报 **62** 237302]
- [7] Meng Z J, Lü M Y, Wu Z, Huang J 2008 *Chin. J. Radio Sci.* **23** 1123(in Chinese) [蒙志军, 吕明云, 武哲, 黄俊 2008 电波科学学报 **23** 1123]
- [8] Wu T K 1995 *Frequency-selective surface and Grid Array*(New York:Wiley) pp102-106
- [9] Wang J B, Lu J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 057304 (in Chinese)[汪剑波, 卢俊 2011 物理学报 **60** 057304]
- [10] Wang L C, Zhang Q, Feng X L 2012 *Modern Radar* **34** 63(in Chinese) [王立超, 张强, 冯晓磊 2012 现代雷达 **34** 63]
- [11] Munk B A 2000 *Frequency Selective Surface:Theory and Design* (1st Ed.) (New York: Wiley) pp1-20
- [12] Chen X, Gao J S, Xu N X, Wang Y S, Feng X G 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 217307 (in Chinese)[陈新, 高劲松, 徐念喜, 王岩松, 冯晓国 2012 物理学报 **61** 217307]
- [13] Pelton E L, Munk B A 1974 *Antennas and Propagation* **32** 799
- [14] Li X Q, Gao J S 2006 *Opt. Precision Eng.* **14** 219 (in Chinese) [李小秋, 高劲松 2006 光学精密工程 **14** 219]

A novel frequency selective surface of hybrid-element type with sharply decreased stop-band*

Wang Yan-Song[†] Gao Jin-Song Xu Nian-Xi Tang Yang Chen Xin

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

(Received 25 November 2013; revised manuscript received 30 December 2013)

Abstract

Frequency selective radome is one of the most important applications of frequency selective surface (FSS). In order to obtain better stealth performance, a novel element FSS, based on a regular slot element FSS, is presented in this paper. The novel element consists of a slot element in the center and at least two slot strips placed on the periodic boundary. We call such FSS the “hybrid-element type FSS” because it exhibits characteristics of both slot type and patch type FSS. Simulation and optimization work is carried out by using a period moment method and a discrete particle swarm optimization method based on the application requirements of a missile radome. Simulation results show that the hybrid-element type FSS has much steeper transition section between pass-band and stop-band, and much lower transmittance in stop-band when compared with the corresponding slot type FSS. The new FSS also has much lower insertion loss in pass-band, much thinner thickness, much simple structure and fabrication process when compared with the ordinary two-layer FSS. Equivalent sample plate is fabricated using printed circuit method and tested using the free space method. Good fit between simulation and testing results verify the accuracy and feasibility of this novel FSS design. The hybrid-element type FSS is especially suitable for the stealth radome when working frequencies of both sides are very close. It provides a simple and feasible approach for developing frequency selective radome.

Keywords: frequency selective surface, hybrid element

PACS: 84.40.-x, 84.30.Vn

DOI: [10.7498/aps.63.078402](https://doi.org/10.7498/aps.63.078402)

* Project supported by the Foundation for Key Laboratory of CIOMP, China (Grant No. YZGX1SJ13A).

† Corresponding author. E-mail: wangyansong99@163.com