

# 基于离散粒子群算法的频率选择表面 优化设计研究\*

徐念喜<sup>†</sup> 高劲松 冯晓国

(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)

(2014年2月15日收到; 2014年3月10日收到修改稿)

为了解决大角度照射下的单侧介质加载的频率选择表面 (frequency selective surfaces, FSS) 通带高透过率和阻带高反射率要求之间的矛盾, 本文采用离散粒子群算法 (discrete particle swarm optimization, DPSO) 优化设计 FSS 的周期间隔和图形几何尺寸等多个参数, 在通带高透过率和阻带高反射率要求之间寻求一个最优的折衷的设计目标. 仿真与试验表明: 在 TE 电波  $70^\circ$  照射下, 采用 DPSO 优化出的一个半波壁厚电介质加载的密集型 Y 环孔径结构, 其通带透过率达到 80%, 阻带透过率低于 30%, 从而为大角度照射下的天线罩提供一种优良 FSS 设计结果, 并为解决 FSS 通带高透过率和阻带高反射率要求之间的矛盾提供理论指导.

**关键词:** 天线罩, 频率选择表面, 离散粒子群算法

**PACS:** 84.40.-x, 84.30.Vn, 02.60.Pn

**DOI:** 10.7498/aps.63.138401

## 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金属屏上开孔单元组成的二维周期性结构<sup>[1,2]</sup>, 它能够使电磁波在谐振频点处发生全反射 (贴片型 FSS) 或全透射 (孔径型 FSS). 采用 FSS 技术与天线罩技术相结合形成 FSS 天线罩, 可使天线罩获得频率选择的功能. 即 FSS 天线罩对雷达的工作频段提供带通传输特性, 同时降低雷达工作频段以外的雷达散射截面 (RCS)<sup>[3-7]</sup>, 实现带外隐身. 大曲率流线型是现代天线罩的一个显著特征, 此时, 大角度照射下的 FSS 天线罩优化设计便成为当前 FSS 工程化应用上的一个技术瓶颈<sup>[8]</sup>.

FSS 天线罩设计主要由罩壁结构设计、单元图形设计、周期单元间隔以及图形几何尺寸等四个方面组成. 单侧介质加载的罩壁结构是现役型号天线罩隐身功能改造或升级最常采用的结构形式. Y 环单元形状简单, 工艺精度也很容易达到, 对任意极

化的情况都能够应用, 带宽比较窄, 中心频率对入射角的变化也比较稳定, 适合用在三角形格子排列的结构. 而现代天线罩的外形都是二次锥面, 由于表面要求周期性的原因, 希望 FSS 单元使用三角形格子排列, 所以 Y 单元和 Y 环单元最适合使用在大曲率流线型天线罩上.

根据国内外已公开的文献资料可知, Munk 首次引入平面波谱展开法与互导纳相结合的理论 (详见文献<sup>[1]</sup>), 在此基础上, Henderson 于 1983 年在其博士论文中完成了基于周期矩量法 (PMM) 的程序编制工作<sup>[9]</sup>, 该程序算法已成为美国计算无限大周期阵列结构的流行算法. 2005 年, 卢俊基于 Munk 的设计思想开展了 Y 形和 Y 环形单元特性的实验对比研究, 得到的结论是“从中心频率、带宽随介质衬底厚度、入射角度、不同极化方式的变化情况看, Y 环单元比 Y 孔有更稳定的性能”<sup>[10]</sup>. 2006 年, 侯新宇提出并发展了一种适于任意双曲率曲面天线罩的 FSS 设计方法, 采用局部平面-曲面修正分片方法所设计的 FSS 天线罩满足预期的各项性能指标要求<sup>[11]</sup>. 2008 年, 李小秋通过进一步缩短谐振

\* 国家自然科学基金 (面上) 项目 (批准号: 61172012) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: [xnxlzhy999@126.com](mailto:xnxlzhy999@126.com)

尺寸的方法提出了一种新型FSS单元,为FSS的深入研究,特别是为FSS在电磁波大角度入射曲面流线型天线罩上的应用提供了可靠的单元图形选择依据(详见文献[8]).2009年,武哲研究团队重点研究了单侧介质加载形式的FSS天线罩传输机理[12].2013年,夏步刚研究了二阶分形FSS两个通带中出现寄生谐振的问题,运用了离散粒子群算法进行优化,实现了保证工作稳定性前提下,抑制了双通带FSS寄生谐振[13].

综上所述,针对大角度照射下的FSS天线罩优化设计,FSS天线罩通带透过率与阻带反射率相互制约,在研究方法上,国内外学者很容易陷入复杂的数学计算的泥潭,本文采用离散粒子群算法优化设计Y环单元的周期间隔和图形几何尺寸等多个参数,在通带高透过率和阻带高反射率要求之间寻求一个最优的折衷的设计目标,为大角度照射下的天线罩提供一种优良的FSS设计,并为解决FSS通带高透过率和阻带高反射率要求之间的矛盾提供理论指导.

## 2 频率选择表面天线罩的滤波机理

频率选择表面天线罩常见的四种罩壁结构形式如图1所示,其中,图1(a)表示单侧介质加载结构,是本文重点研究的一种罩壁结构形式,图1(b)表示双侧介质对称加载结构,图1(c)表示双屏双侧介质对称加载结构,图1(d)表示双侧非对称介质加载,后三种罩壁结构是获得隐身功能和高电性能天线罩最常见的罩壁结构形式.通过单元谐振模式的分析可解释四种罩壁结构形式的滤波机理.

分析FSS天线罩的滤波机理,即将FSS作为一个二次辐射源,研究不同的单元谐振模式以及它们之间的相互作用对FSS滤波特性的影响.

以Y形单元为例,单元上不仅存在着多阶偶次谐振模式,如一阶偶次谐振模式、二阶偶次谐振模

式等,还存在着多阶奇次谐振模式,如一阶奇次谐振模式、二阶奇次谐振模式等.其中,一阶奇次谐振模式对应的频点位于一阶偶次谐振模式对应频点和二阶偶次谐振模式对应频点之间,如图2所示.基于FSS单元表面电流分布规律的研究可知,周期单元的上半部分电流从水平部分向上流,下半部分电流从水平部分往下流,如图2(c)所示,我们把这种电流分布称为弯曲模式.根据Foster阻抗理论可知,基本谐振模式与一阶奇次谐振模式之间必会产生一个零点,我们把该零点称为模式相互作用零点,它对应的频率将在 $f_0/2-f_0$ 之间.Munk将FSS等效为一个辐射振荡器时,发现FSS还存在负载阻抗零点.

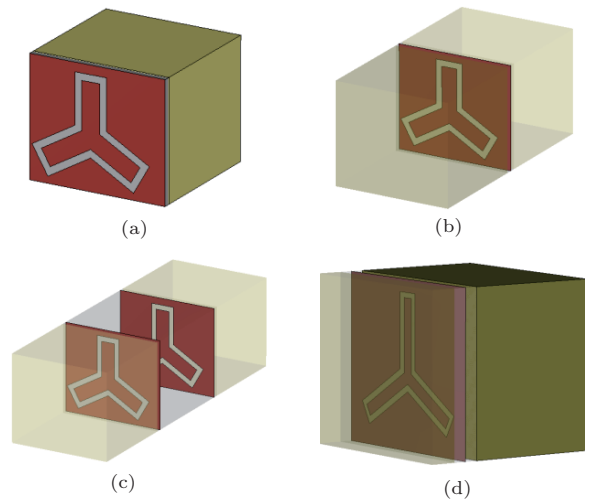


图1 频率选择表面天线罩常见的四种罩壁结构形式

理论上,任意频点、任意极化、任意角度入射的平面波,都能在周期单元表面激励起无数个偶次谐振模式和奇次谐振模式.但是,结合周期结构传播理论的分析不难发现,谐振模式若要能够传播,其谐振波长应当大于截止波长,谐振模式对应的频点不会产生Wood's奇异等.否则,谐振模式辐射时将会衰减,或者无法辐射.

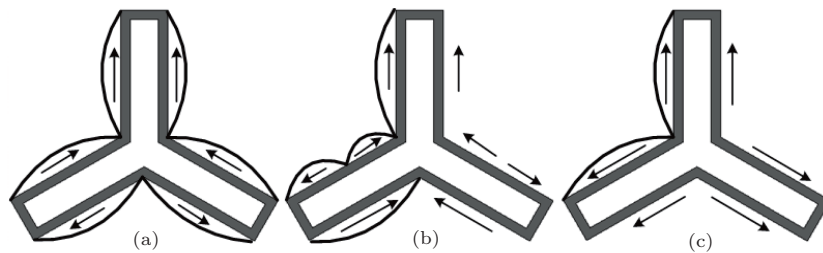


图2 Y形单元上电流分布呈现的一阶偶次谐振、二阶偶次谐振、一阶奇次谐振 (a) 一阶偶次谐振模式; (b) 二阶偶次谐振模式; (c) 一阶奇次谐振模式

当周期单元尺寸与工作波长一致时, 周期单元等效为谐振  $L-C$  回路, 周期单元产生谐振, 形成最强辐射. 这意味着, 周期单元尺寸决定了谐振频点的位置. 因此, 要在一个周期单元内设计满足技术指标要求的 FSS 时, 需要在谐振单元内, 优化设计单元图形设计、周期单元间隔以及图形几何尺寸.

采用三角形格子排列的结构, 在直角坐标系中, Y 环单元的周期间隔分别为  $D_x$  和  $D_y$ .

### 3 优化设计方法

#### 3.1 FSS 滤波特性的计算方法

目前, FSS 天线罩首选的图形结构如图 3 所示 [8,10], Y 环单元的特征尺寸包括: 外环臂宽  $W_{out}$ 、外环臂长  $L_{out}$ 、内环臂宽  $W_{in}$ 、内环臂长  $L_{in}$ .

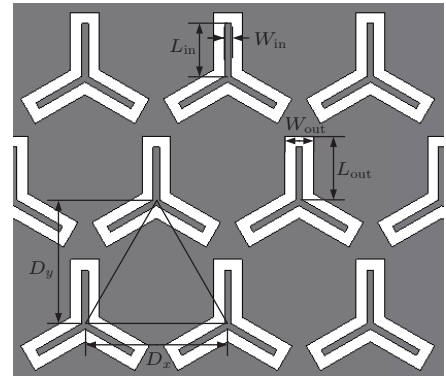


图 3 FSS 天线罩通常采用的 Y 形单元图形结构示意图

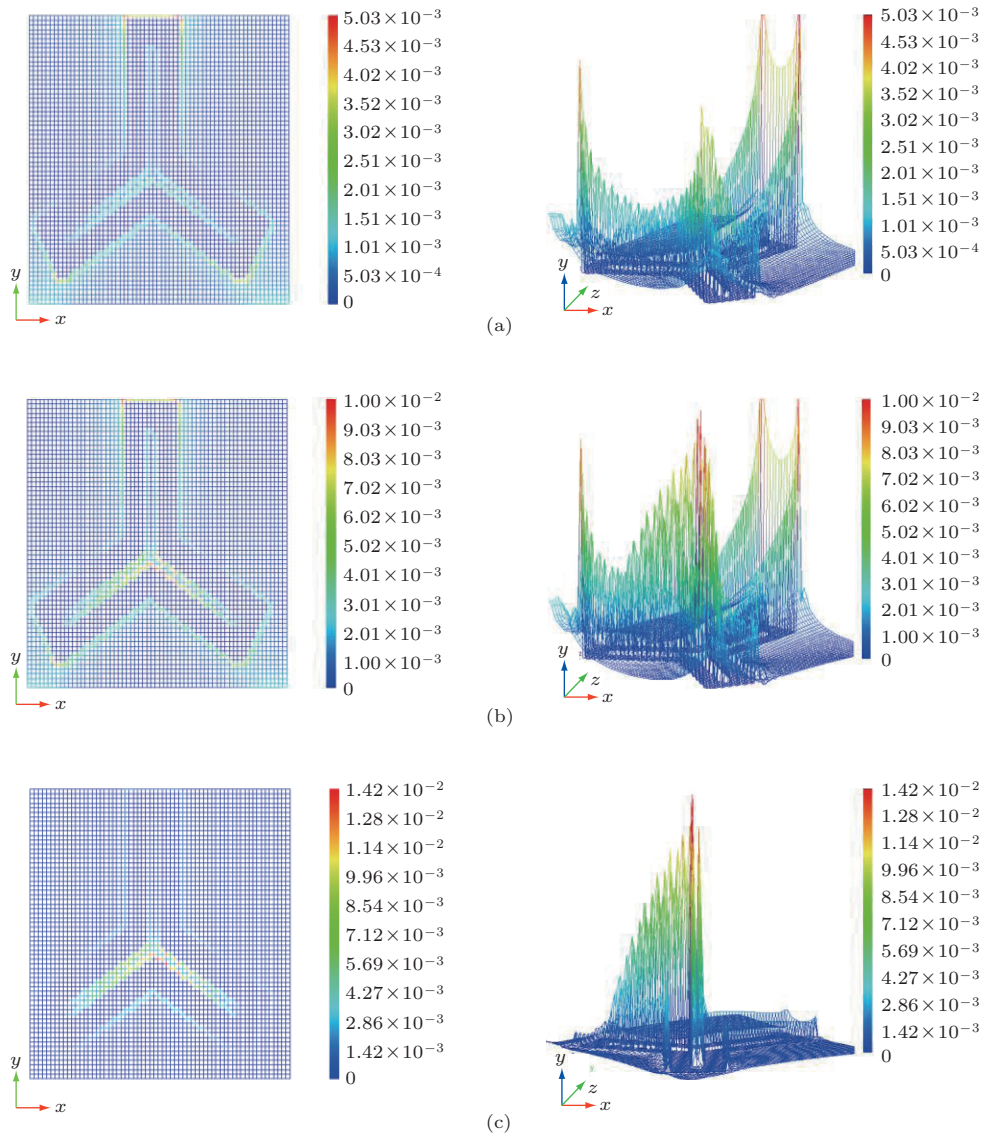


图 4 (网刊彩色) (a) 平面波垂直照射时 FSS 天线罩在  $f_{min}$  频点处的感应电流分布; (b) 平面波垂直照射时 FSS 天线罩在  $f_0$  频点处的感应电流分布; (c) 平面波垂直照射时 FSS 天线罩在  $f_{max}$  频点处的感应电流分布

为了准确评估和分析FSS的中心频点、透过率、-3 dB带宽以及表面感应电流等, 本文采用周期矩量方法(PMM), 具体计算推导过程可参考文献[9], 采用PMM分析FSS滤波特性的关键是选择恰当的基函数. 本文综合考虑了矩阵阶数和计算时间, 采用了一种结构简单的矩形孔径全域基函数, 如下式所示:

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

$$E_{yrs}(x, y) = \hat{y} \frac{T_r\left(\frac{2}{L_d}y\right)}{\left[1 - \left(\frac{2}{L_d}y\right)^2\right]^{1/2}} \times \sin\left[\frac{r\pi}{W_b}\left(y + \frac{W_b}{2}\right)\right], \quad (1b)$$

其中,  $W_b$  和  $L_d$  为矩形的宽和长,  $p, q, r, s = 0, 1, 2, \dots$ ,  $T_i$  表示  $i$  阶 Chebyshev 函数.

FSS 天线罩采用的罩壁结构形式如图 1(a) 所示, 其单侧加载的介质选取依据是半波壁厚的天线罩, 加载电介质的电参数为: 厚度  $d = 6.7$  mm, 相对介电常数  $\epsilon_r = 3.1$ , 损耗角正切值  $\tan \delta = 0.005$ . 在 11—19 GHz 的频域空间内, 当  $W_{out} = 1.3$  mm,  $L_{out} = 3$  mm,  $W_{in} = 0.3$  mm,  $L_{in} = 2.5$  mm,  $D_x = 6.5$  mm,  $D_y = 5.629$  mm 时, 采用  $128 \times 128$  个矩形基函数, 离散 FSS 天线罩一个周期单元, 其表面感应电流分布的计算结果如图 4 所示.

由图 4 可知,  $f_{min}$  频点处的感应电流分布主要集中在 Y 孔径单元,  $f_{max}$  频点处的感应电流分布主要集中在 Y 贴片单元, 由此可知, Y 孔径的  $W_{out}$ ,  $L_{out}$  是优化 FSS 低频波段滤波特性的主要因素, Y 贴片的  $W_{in}$ ,  $L_{in}$  是优化 FSS 高频波段滤波特性的主要因素.  $f_0$  频点处的感应电流分布趋势表现为高频电流分布与低频电流分布的组合, 因此, FSS 谐振频点的位置由 Y 孔径和 Y 贴片决定.

另外, 通过分析周期单元间隔对 FSS 滤波特性的影响规律可知,  $D_x$  和  $D_y$  主要决定周期单元之间的耦合状态, 对 FSS 滤波特性的影响包括表面感应电流的大小、中心频点的角度稳定性以及栅瓣三个方面.

上述结论不仅指明了带通 FSS 优化设计的主

要参量, 而且还为确定带通 FSS 特征尺寸的制备精度要求提供理论依据.

### 3.2 离散粒子群算法的基本原理

2006 年, Raj Mittra 等将粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 引入 FSS 设计中, 并通过实验验证得到如下结论: 相对于遗传算法, PSO 以容易在更小的种群数量以及更短的时间步长内取得优化收敛, 无论其优化算法部分采取遗传算法或粒子群算法, 其电磁计算部分多采用周期矩量法等的频域算法.

PSO 的基本原理是基于自然界中鸟群觅食行为, 通过鸟之间的信息传递与集体协作使得群体性能达到最优化, PSO 是一种对社会性动物的自组织行为进行建模仿真的优化算法. 首先, 把每个优化问题的解都抽象成一个在  $N$  维搜索空间中的没有体积和质量, 只有位置和速度的粒子, 其中, 每个粒子都是  $N$  维空间的向量, 分别用  $L_i = \{L_{i1}, L_{i2}, L_{i3}, \dots, L_{iN}\}^T$ ,  $S_i = \{S_{i1}, S_{i2}, S_{i3}, \dots, S_{iN}\}^T$  表示.  $N$  维空间中的所有粒子都有一个被优化的函数决定的适应值, 在每一代中, 所有粒子都是通过控制两个极值来调节自己的速度: 一个是单个粒子到目前为止发现的最好位置 (即粒子个体的飞行经验), 记为  $L_{ui} = \{L_{ui1}, L_{ui2}, L_{ui3}, \dots, L_{uiN}\}^T$ ; 另一个是整个群体到目前为止发现的最好位置 (即粒子全体的飞行经验), 记为  $L_{gi} = \{L_{gi1}, L_{gi2}, L_{gi3}, \dots, L_{giN}\}^T$ . 整个问题的求解过程可以表示为

$$S_{ij}^{\tau+1} = S_{ij}^{\tau} + c_1 r_1(\tau)(L_{uij}^{\tau} - L_{ij}^{\tau}) + c_2 r_2(\tau)(L_{gij}^{\tau} - L_{ij}^{\tau}), \quad (2)$$

$$L_{ij}^{\tau+1} = L_{ij}^{\tau} + S_{ij}^{\tau+1}, \quad (3)$$

其中, 下标  $i, j$  表示第  $i$  个粒子的第  $j$  维,  $\tau$  表示进化代数,  $c_1, c_2$  为学习因子,  $r_1(\tau), r_2(\tau)$  相互独立且在  $[0, 1]$  之间取值, 上述两式恰恰反映了一群粒子通过相互分享信息从而寻找最优位置即最优解的过程.

### 3.3 基于离散粒子群算法的优化设计结果

当确定 FSS 天线罩罩壁结构后, 其滤波特性的优化设计重点是需求 FSS 特征尺寸的最佳值. 针对这问题, 本文采用离散粒子群算法 (discrete particle swarm optimization, DPSO), 解决 FSS 的

$W_{out}, L_{out}, W_{in}, L_{in}, D_x, D_y, \epsilon_r, d$ 等多参数优化设计问题. DPSO优化设计流程如图5所示.

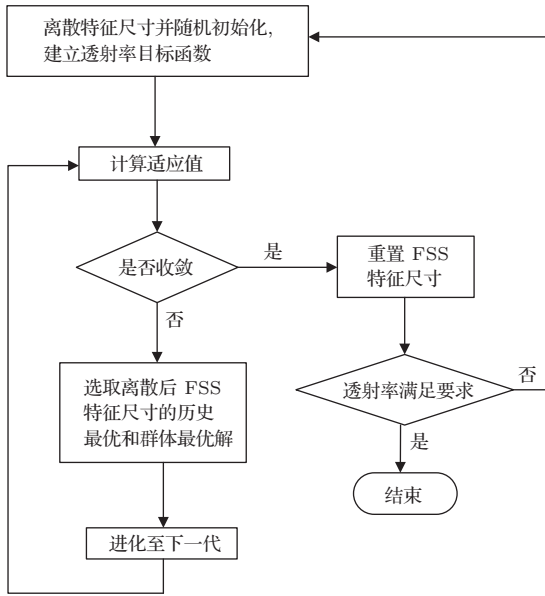


图5 采用DPSO算法优化FSS特征尺寸的流程图

在11—19 GHz频域范围内,  $W_{out}, L_{out}, W_{in}, L_{in}, D_x, D_y, \epsilon_r, d$ 给定初始值为1 mm, 3 mm, 0.3 mm, 2 mm, 8 mm, 6.928 mm, 3, 6 mm. 通过权重系数 $\Psi$ , FSS的透射率 $T$ 及其期望值建立优化函数, 求解FSS特征尺寸的最佳适应值. FSS天线罩工作频段为 $f_0 \pm \Delta f$ , 通带透过率期望值设为 $T_{max}$ , 阻带透过率期望值设为 $T_{min}$ , 则目标函数 $\Phi$ 可以表示为

$$\Phi = \Psi_{min} \times \left[ \sum_{i=1}^3 (T_i - T_{min})^2 \right] + \Psi_{max} \times \left[ (T_{f_0 - \Delta f} - T_{max})^2 + (T_{f_0} - T_{max})^2 + (T_{f_0 + \Delta f} - T_{max})^2 \right], \quad (4)$$

其中,  $\Psi_{min}$ 和 $\Psi_{max}$ 表示为阻带权重系数和通带权重系数, 取值如下式所示:

$$\Psi_{max} = \begin{cases} 0, & T_{f_i} \leq T_{max}, \\ 1, & \text{其他}, \end{cases} \quad \Psi_{min} = \begin{cases} 1, & T_{f_i} \leq T_{min}, \\ 0, & \text{其他}. \end{cases} \quad (5)$$

优化过程中, 电磁计算部分采用周期矩量法, 根据(4)式, 反复迭代最终确定FSS的 $W_{out}, L_{out}, W_{in}, L_{in}, D_x, D_y, \epsilon_r, d$ 最佳适应值.

根据FSS天线罩电性能和隐身性能指标要求, 确定FSS天线罩通带和阻带透过率, 这一部

分不是本文的重点. 假定, 通带透过率期望值 $T_{max} = 85\%$ , 阻带透过率期望值 $T_{min} = 30\%$ , 确定 $W_{out}, L_{out}, W_{in}, L_{in}, D_x, D_y, \epsilon_r, d$ 最佳适应值分别为1.3 mm, 2.9 mm, 0.3 mm, 2.4 mm, 8 mm, 4.6189 mm, 3.2, 7 mm. 采用周期矩量法, 计算垂直照射条件下的FSS频响特性曲线, 计算结果如图6所示. 由此证明, DPSO法是寻求FSS通带高透过率和阻带高反射率要求之间择衷的最佳技术手段.

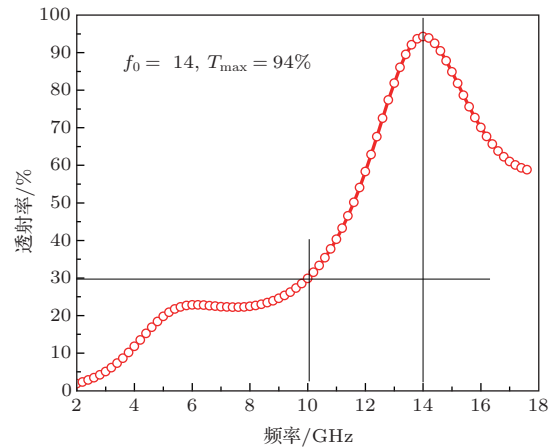


图6 采用周期矩量法算法垂直照射条件下, 计算得到的FSS频响特性曲线

#### 4 实验测试与验证

为了验证半波壁天线罩加载FSS后, DPSO法的实际优化效果, 采用层压法制作半波壁天线罩等效平板, 采用印刷线路版法制作图6对应的柔性FSS屏, 承载基底为聚酰亚胺膜(厚度为0.03 mm, 相对介电常数3, 损耗正切值0.005), 采用一层厚度为0.045 mm, 相对介电常数为2.6, 损耗正切值为0.005的胶膜, 将柔性FSS屏与天线罩等效平板层合, 形成图7所示的400 mm × 400 mm的FSS天线罩等效平板.

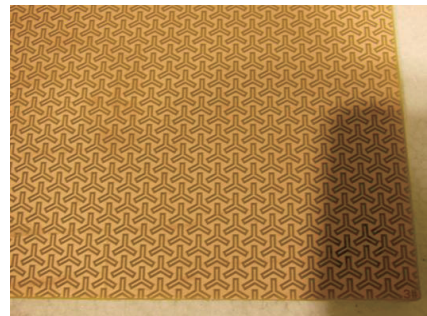


图7 FSS天线罩等效平板样品

采用自由空间法测试实验样件的通带透过率, 测试系统如图 8 所示.

在紧缩场条件下, 测试实验样件的阻带透过率, 测试系统如图 9 所示.



图 8 FSS 天线罩等效平板通带透过率测试系统

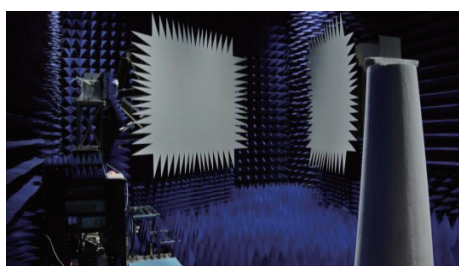


图 9 FSS 天线罩等效平板阻带透过率测试系统

测试通带 (Ku 波段) 透过率时, 采用扫频的方式, 将被测样件放在透镜天线的焦斑面上, 旋转平台完成不同角度测试, 扫描测试结果如图 10 所示. 测试阻带 (S 波段和 X 波段) 透过率时, 采用点频的方式, 经过 400 mm × 400 mm 的理想金属板校准后, 利用方向图换算成的点频测试结果如表 1 所示.

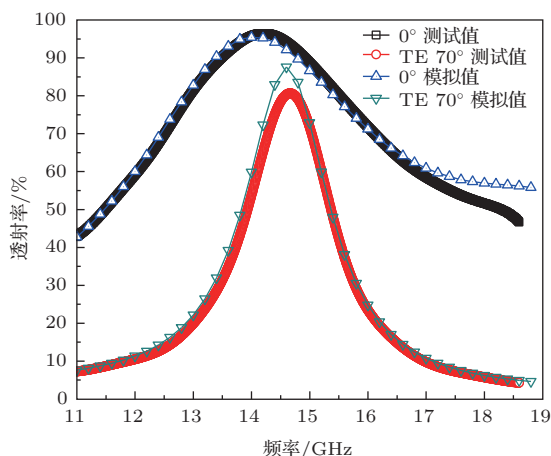


图 10 FSS 天线罩等效平板 Ku 波段透过率测试与仿真对比曲线

考虑测试系统误差 ±2%, 由图 10 和表 1 可知, 采用 DPSO 法, 优化设计的 FSS 天线罩等效平板,

Ku 波段通带透过率, 在 0—TE70° 扫描范围内,  $T_{f0}$  测试值均超过 80%, S 波段和 X 波段阻带透过率最高值分别为 8.76% 和 26.75%, 从而验证了本文研究方法的准确性和可靠性.

表 1 FSS 天线罩等效平板 X 波段和 S 波段最高透过率测试与仿真对比

频段	透过率仿真最高值/%	透过率仿真最高值/%
S 波段	8.6	8.76
X 波段	27.3	26.75

## 5 结 论

天线罩加载 FSS 后, 通带高透过率和阻带高反射率要求之间是一对不可调和的矛盾. 为了寻求一种最佳的折衷的 FSS 设计, 本文采用 DPSO 法, 以 FSS 天线罩常见的罩壁结构形式, 即单侧介质加载 FSS 为例, 通过分析 FSS 天线罩表面感应电流分布, 不仅指明了带通 FSS 优化设计的主要参量, 而且还为确定带通 FSS 特征尺寸的制备精度要求提供理论依据, 通过权重系数  $\Psi$ , FSS 的透射率  $T$  及其期望值建立优化函数, 求解 FSS 特征尺寸的最佳适应值. 经过仿真技术与实验测试相互验证, 在 TE 电波 70° 照射下, 采用 DPSO 优化出的一个半波壁厚电介质加载的密集型 Y 环孔径结构, 其通带透过率达到 80%, 阻带透过率低于 30%. DPSO 作为一种共性技术, 将为大角度照射下的天线罩提供一种优良 FSS 设计, 并为解决 FSS 通带高透过率和阻带高反射率要求之间的矛盾提供理论指导.

## 参考文献

- [1] Munk B A 2000 *Frequency Selective Surface: theory and design* (1st Ed. ) (New York:Wiley)
- [2] Wu T K 1995 *Frequency-Selective Surface and Grid Array*. (New York:Wiley)
- [3] 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]
- [4] 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]
- [5] Jiao J, Gao J S, Xu N X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 197303 (in Chinese)[焦健, 高劲松, 徐念喜 2013 物理学报 **62** 197303]
- [6] Tang G M, Miao J G, Dong J M 2012 *Chin. Phys. B* **21** 128401
- [7] Lin B Q, Qu S B, Tong C M, Zhou H, Zhang H Y, Li W 2013 *Chin. Phys. B* **22** 094103

- [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] Henderson L H 1983 *Ph. D. Dissertation* (Ohio State University, Department of Electrical Engineering)
- [10] Lu J, Zhang L, Sun L C 2005 *Opt. Precision Eng.* **13** 219 (in Chinese)[卢俊, 张靓, 孙连春等 2005 光学精密工程 **13** 219]
- [11] Hou X Y, Zhang P, Lu J, Wan W, Sun L C, Sun P L 2006 *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance* **26** 123 (in Chinese)[侯新宇, 张澎, 卢俊, 万伟, 孙连春, 孙品良 2006 火箭与制导学报 **26** 123]
- [12] Meng Z J, Lv M Y, Wu Z 2009 *Opt. Precision Eng.* **18** 1958 (in Chinese)[梅东牧, 吕明云, 武哲等 2009 光学精密工程 **18** 1958]
- [13] Xia B G, Zhang D H, Meng J, Zhao X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 174103 (in Chinese) [夏步刚, 张德海, 孟进, 赵鑫 2013 物理学报 **62** 174103]

## Study on the optimal design of frequency selective surfaces based on the discrete particle swarm optimization\*

Xu Nian-Xi<sup>†</sup> Gao Jin-Song Feng Xiao-Guo

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

( Received 15 February 2014; revised manuscript received 10 March 2014 )

### Abstract

The requirements of frequency-selective surface (FSS) between high transparency in pass band and high reflectance in stop band are contradictory, when they have loaded medium on one side and receive a large range of illumination. In order to solve the contradiction, this paper employs a discrete particle swarm optimization approach (hereafter referred to as a DPSO). In order to seek a balanced FSS with high transparency in pass band and high reflectance in stop band, the periodic intervals and geometrical dimensions of FSS-structures are optimized and designed by using the DPSO method. Simulation and test results indicate that the FSS of super dense Y loop elements in a half-loaded medium structure is presented in this paper: the transparency in pass band and stop band are 80% and 30% respectively. The DPSO method will offer an excellent FSS for the radome which receives a large range of illumination, and on the other hand, it provides a theoretical guidance for the requirements of FSS between high transparency in pass band and high reflectance in stop band.

**Keywords:** radome, frequency selective surfaces, discrete particle swarm optimization

**PACS:** 84.40.-x, 84.30.Vn, 02.60.Pn

**DOI:** 10.7498/aps.63.138401

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61172012).

† Corresponding author. E-mail: [rxnlzhy999@126.com](mailto:rxnlzhy999@126.com)