

文章编号: 1000-5862(2015)02-0150-04

宽带频率选择表面带阻滤波器的优化设计

张 蒙 骆兴芳* 张 芳

(江西师范大学物理与通信电子学院 江西 南昌 330022)

摘要: 现代通信需要宽带频率选择表面(Frequency Selective Surfaces, FSS) 滤波器的应用. 利用六边形阵列良好的宽带特性, 设计了一款带宽达到 7 GHz 以上的多层 FSS 滤波器结构, 设计采用优化算法差分进化(differential Evolution, DE) 算法, 谱域矩量法用来分析 FSS 结构的频率响应, 仿真结果显示该结构具有良好的角度和极化稳定性, 为高带宽的通信需求提供了数据参考.

关键词: 频率选择表面; 差分进化算法; 谱域矩量法; 六边形

中图分类号: TN 454 **文献标志码:** A **DOI:** 10. 16357/j. cnki. issn1000-5862. 2015. 02. 07

0 引言

频率选择表面(FSS)^[1-3]能对不同频率、入射角和极化状态下的电磁波呈现滤波特性, 表现出空间电磁滤波器的功能, 在电磁频谱的各个波段有着广泛的应用. 随着现代无线通信技术的高速发展, 要精确高效地传输声音、数据和多媒体信息, 获得更大的信息容量, 设备中越来越多地要使用宽带天线, 而设计具有宽带特性的 FSS 也成为了研究热点.

设计一个具有特定宽带频率效应的 FSS 结构, 受到多参数约束, 包括 FSS 周期单元形状和尺寸、栅格形式和尺寸以及介质衬底的几何结构和电特性等. 试探法需要设计者反复不断尝试, 不快捷, 而利用优化算法可以大大提高设计效率. 常用的优化算法有遗传算法(GA)^[4]、粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)^[5]和差分进化算法(Differential Evolution, DE)^[6]还有各种算法混合的应用^[7]. 文献[8-9]对常用的几种优化算法进行了比较, 证明了 DE 和 PSO 在收敛性和计算时间上优于 GA, 并且在很多应用中如在雷达吸波材料的优化^[10]、天线阵列的优化^[11], DE 优于 PSO. 本文采用 DE 优化算法来优化 FSS 周期结构. 传统的 DE 在多层 FSS 的设计上仍然会出现收敛速度慢和优化失败的情况, 改进 DE 算法使其收敛性更快, 使其更为有效地应用到优化 FSS 结构, 尽快地获取需要的频率响应具有重要的科学意义.

现代微波通信系统需要具有良好的通阻带和宽频带特性的滤波器, 包括平坦的通带特性和陡峭的截止特性, 带外抑制好, 插入损耗小, 并且具有极化和角度的稳定性. 传统的单层 FSS 存在窄带和不够理想的频率响应特性. 采用宽带特性的单元块和多层结构是实现宽带稳定 FSS 结构的首选. 六边形结构具有稳定的宽带效应, 本文选择六边形多层阵列结构作为宽带滤波器应用的 FSS 结构.

FSS 频率响应的数值计算部分采用基于 Floquet 定理的谱域 MoM 法. 宽带意味着频率点增多, 谱域 MoM 方法中最花费计算时间的操作就是阻抗矩阵的求解和矩阵方程获得电流分布的收敛性, 特别是执行频率扫描和角度扫描时. 在谱域 MoM 中利用较少的基函数和 Floquet 模获得高准确度和稳定性的预测结果, 可以解决大矩阵的收敛问题, 同时大大减少计算机运行时间.

本文聚焦在宽带 FSS 滤波器的设计算法研究上, 设计过程包括 FSS 频率响应的计算和结构参数的优化 2 个部分, 分别采用高准确性的谱域 MoM 分析方法和高收敛性的 DE 优化算法. 本文对 DE 优化算法进行了改进, 使其收敛性更强, 设计出 FSS 结构具有良好的宽带带阻特性, 可考虑空间电磁滤波器的应用.

1 结构模型及设计方法

1.1 FSS 结构模型

典型的六边形结构如图 1(a) 所示, 图 1(a) 中 l

收稿日期: 2014-11-17

基金项目: 江西省自然科学基金(20122BAB201027) 资助项目.

通信作者: 骆兴芳(1976-), 女, 新疆昌吉人, 教授, 博士, 主要从事电磁场与微波器件的研究.

为六边形臂长 w 为臂长的宽度 g 为 2 个相邻六边形的间隙宽度. P_a 和 P_b 为周期六边形结构在 x 和 y 方向的周期宽度. 图 1 (b) 出示了 2 层六边形周期性结构镶嵌在 3 层介质中的 FSS 多层结构. 此结构用来优化实现特定的频率响应来满足宽带滤波器需求.

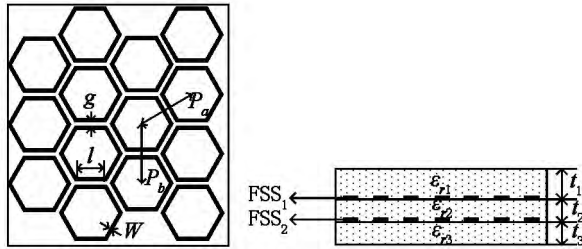


图 1 (a) 六边形 FSS 表面结构; (b) 多层结构侧面

谱域 MoM 方法用来分析 FSS 结构的频率响应, 考虑到六边形的细边和电流分布的精确性, 分段正弦基函数被选用, 图 2 出示了被分成 $P + 1$ 段的任意弯曲细线, 其中 P_{th} 个偶极子上的电流可以表示为

$$J_p(\rho) = \begin{cases} \hat{l}_p P_w(W) \frac{\sin k(l - l_{p-1})}{\sin k \Delta l_p}, & l \in [l_{p-1}, l_p], \\ \hat{l}_{p+1} P_w(W) \frac{\sin k(l_{p+1} - l)}{\sin k \Delta l_{p+1}}, & l \in [l_p, l_{p+1}], \end{cases} \quad (1)$$

其中 k 为介质的波数. $\Delta l_p = |\rho_p - \rho_{p-1}|$ $\rho = \hat{x}x + \hat{y}y$ l 和 w 分别为线的长度和宽度.

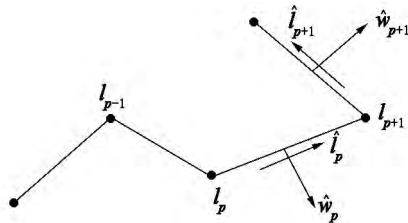


图 2 任意弯曲细线

1.2 改进 DE 优化算法

通过 2 个方面改进 DE 优化算法. 首先是控制参数的改进. DE 主要涉及种群规模、变异浓度、交叉概率这 3 个控制参数. 控制参数的优化配置目的是在 DE 搜索初期能够保证较大的种族多样性, 从而加快收敛速度, 但这样容易陷入本地收敛. 变异率太大, 算法搜索效率较低, 变异率太小, 种群多样性降低, 易出现早熟现象. 采用自适应控制参数调整的策略, 在算法运行期间实现对变异浓度和交叉概率的动态调整, 而不再采用统一的参数. 这样在进化初期时的变异强度增大, 避免早熟现象. 随着变异个体的适应性与最优个体适应性差距的变小而定量地减小变异算子. 这样即提高了算法收敛速度, 又保证了算法的

全局搜索能力.

另一方面是差分策略的改进. 图 3 是所采用的 DE 算法流程图. 相比于传统的 DE, 增加了新产生的个体 X^i 和当前最优个体 X^{best} 的竞技, 还增加了新产生的个体和非优个体之间的竞技. 这样的策略可以使新的种群信息较快更新为更优秀的个体, 加快了收敛速度.

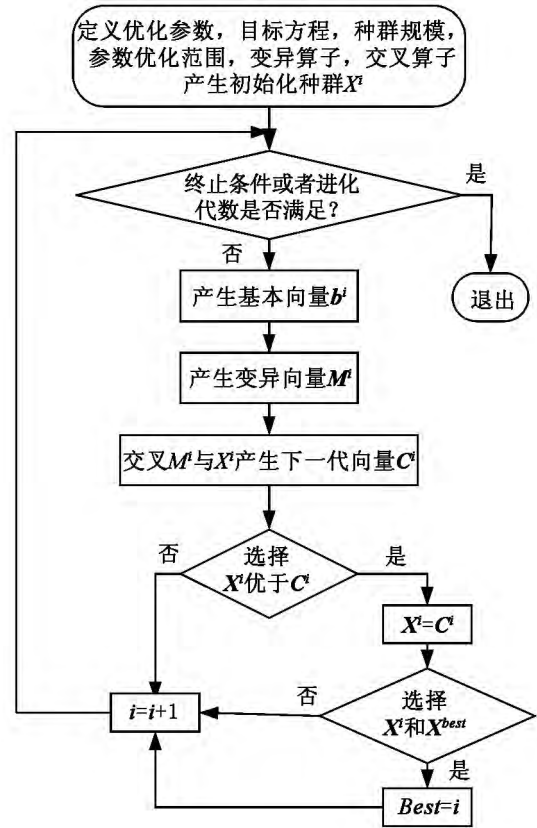


图 3 改进的差分进化算法流程图

1.3 宽带 FSS 滤波器的设计

本部分利用改进的 DE 算法优化设计出具有宽带频率响应的 FSS 结构. FSS 的优化变量较多, 如 FSS 各层的单元形式, 单元的排列方式, 介质的电性能等. 图 4 给出了利用差分进化算法进行 FSS 的优化和设计流程图. FSS 的优化设计过程是一个搜索求解的过程, 它是以 FSS 的分析问题为前提和基础的. 搜索过程是先根据给定的目标频率响应要求, 通过优化程序的步骤: 初始化、变异过程、交叉过程、选择过程得出一组初始解, 然后带入分析程序计算其频率响应, 并与给定要求的频率响应进行比较, 没有达到要求就继续重复优化步骤再得出一组新的参数值, 重复以上步骤, 直至求得满足要求的解, 也就是获得 FSS 相关的结构参数值, 即单元形式、尺寸, 单元的排列方式、介质参数等.

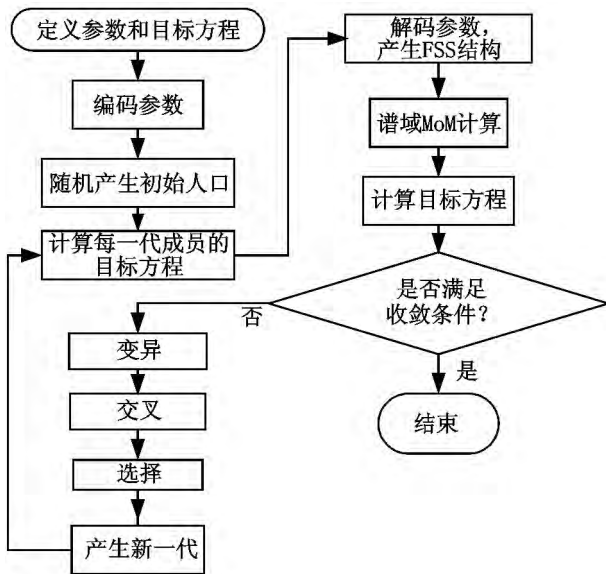


图4 用差分进化算法设计 FSS 的流程图

宽带 FSS 带阻滤波器的设计包括选取六边形结构作为阵列单元,建立起求解单元频率响应的谱域 MOM 算法分析程序,编写 DE 优化算法的程序,通过目标方程把优化和分析部分结合起来,运行程序,找到最优解满足需要的频率响应,获得 FSS 的结构参数。

2 六边形宽带带阻 FSS 滤波器结构设计

六边形的结构如图 5 所示,设计目标为阻带在 9.4 ~ 17 GHz 的带阻滤波器,要求阻带的反射系数大于 -0.5 dB 并且结构具有稳定的频率响应(随入射角度和极化变化不大)。取 $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r2} = \epsilon_{r3}$, 并且细线宽度 $w = 0.1$ mm。DE 算法优化参数矩阵为 $x = [l \ g \ \epsilon_r \ t_1 \ t_2 \ t_3]$, 即 $N_{par} = 6$ 。理想的带阻频率响应曲线如图五所示,目标方程定义为

$$f(x) = \sum_{freq=9.4}^{17} | [R(x)]_{freq} + 0.5 |, \quad (2)$$

其中 $freq$ 是阻带的频率点。

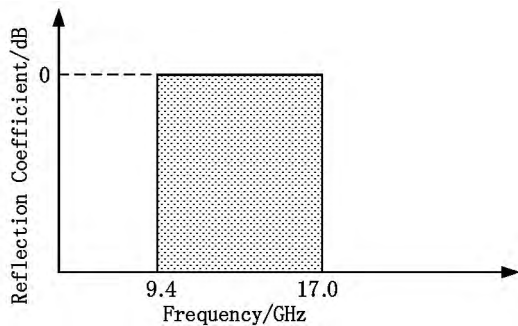


图5 理想带阻滤波器频率响应

DE 程序中搜索参数设置为 $P_{cross} = 0.9$, $P_{mut} =$

0.7。人口尺寸设置为 $N_{pop} = 35.6$ 个优化参数的搜索范围为 $2.0 \text{ mm} \leq l \leq 8 \text{ mm}$, $0 < g \leq 1 \text{ mm}$, $1.0 < \epsilon_r \leq 6.0$, $0 < t_1 \leq 2.0 \text{ mm}$, $0 < t_2 \leq 2.0 \text{ mm}$, $0 < t_3 \leq 2.0 \text{ mm}$ 。运行频率范围设为 8 ~ 20 GHz, 0.5 GHz 的步进,包括 25 个频率点。

程序运行后,优化结果为 $[l \ g \ \epsilon_r \ t_1 \ t_2 \ t_3] = [3.825 \text{ mm} \ 0.101 \text{ mm} \ 2.2 \ 0.645 \text{ mm} \ 1.836 \text{ mm} \ 0.602 \text{ mm}]$ 。图 6 展示了获得的六边形阵列的反射系数频率响应。可以观察到,该阵列在 9.4 ~ 17GHz 具有良好的带阻响应,平坦的阻带及快速陡降。因为六边形的对称性,阵列在正交入射时,TE 和 TM 极化没有明显的区别。图 7 展示了 TE30° 和 TE45° 入射的反射系数,从图 7 中可观察到六边形阵列相对于入射角具有稳定的频率响应。另外,此六边形阵列在 TE 正交入射时的传输响应也在图七中显示,可以看到,阻带的传输系数小于 -20dB,再次证明了优化设计出的阵列结构具有好的带阻滤波器性质。

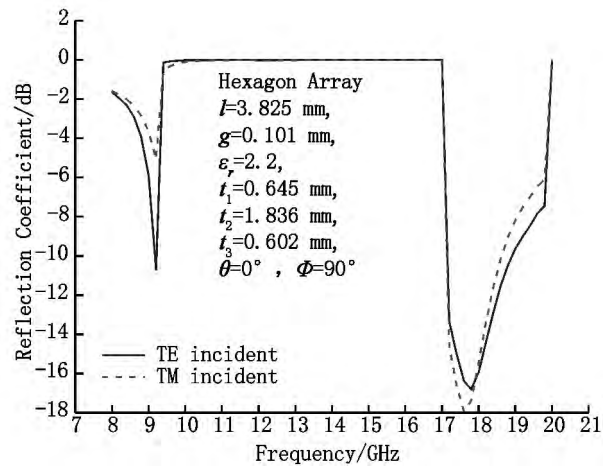


图6 获得的六边形阵列在 TE 和 TM 正交入射时的反射系数

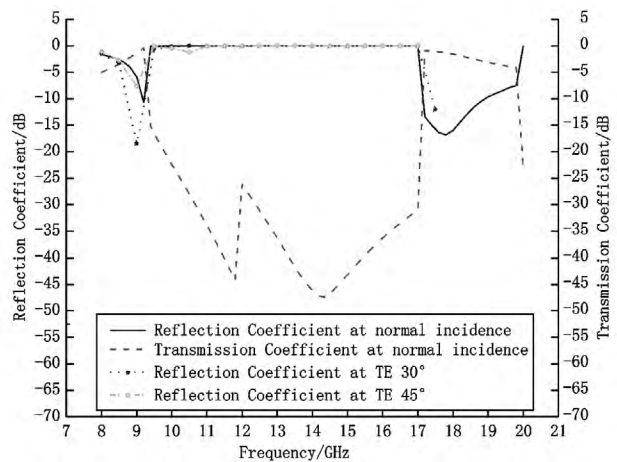


图7 不同入射角的反射频率响应以及正交入射时的传输频率响应

3 结论

在当今对宽带需求越来越高的通信时代,设计作为宽带多频带滤波器应用的 FSS 结构具有广阔的应用前景和巨大的市场价值. 本文利用 DE 优化算法设计了一个具有宽带带阻滤波器特性的六边形 FSS 结构,谱域 MOM 用来分析 FSS 结构的频率响应,仿真结果显示了好的稳定阻带特性,平坦阻带及角度稳定性.

4 参考文献

- [1] Munk B A. Frequency selective surfaces: theory and design [M]. New York: John Wiley & Sons Inc 2000.
- [2] Munk B A. Finite Antenna Arrays and FSS [M]. New York: John Wiley & Sons Inc 2003.
- [3] Mittra R ,Chan C H ,Cwik T ,Techniques for analyzing frequency selective surfaces—A review [J]. Proc IEEE ,1988 , 76(12) : 1593-1615.
- [4] Seokho Yun ,Bossard J A ,Mayer T S ,et al. Angle and polarization tolerant midinfrared dielectric filter designed by genetic algorithm optimization [J]. Applied Physics Letters 2010 96(22) : 223101-223103.
- [5] Genovesi S ,Mittra R ,Monorchio A ,et al. Particle swarm optimization for the design of frequency selective surfaces [J]. IEEE Antennas Wireless Propagat Lett 2006 5(1) : 277-279.
- [6] Luo Xingfang ,Qing A ,Lee C K. Application of the differential-evolution strategy to the design of frequency selective surfaces [J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering ,2005 ,15 (2) : 173-180.
- [7] Vesterstram J ,Thomsen R. A comparative study of differential evolution ,particle swarm optimization ,and evolutionary algorithms on numerical benchmark problems [J]. IEEE Congress on evolutionary computation ,2004 ,2: 1980-1987.
- [8] Goudos S K ,Zahans Z D ,Baltzis K B ,et al. A comparative study of particle swarm optimization and differential evolution on radar absorbing materials design for EMC applications [EB/OL]. [2014-09-13]. 10. 1109/EMCEUROPE. 2009. 5189697.
- [9] da F Silva P H ,Cruz R M S ,Assunção A G D' . Blending PSO and ANN for optimal design of FSS filters with Koch island patch elements [J]. IEEE Trans Magnet 2010 46 (8) : 3010-3013.
- [10] Goudos S ,Siakavara K ,Samaras T ,et al. Self-adaptive differential evolution applied to real-valued antenna and microwave design problems [J]. IEEE Trans Antennas Propagat 2011 59(4) : 1286-1298.
- [11] Hejazi H A ,Mohabati H R ,Hosseini S H ,et al. Differential evolution algorithm for security-constrained energy and reserve optimization considering credible contingencies [J]. IEEE Trans Power Systems 2011 26(3) : 1145-1155.
- [12] 刘海文 ,雷久淮 ,赵玉龙 ,等. 基于双模开环谐振器的双通带带通滤波器设计 [J]. 江西师范大学学报: 自然科学版 2013 37(5) : 488-491.
- [13] 刘海文 ,蒋浩 ,雷久淮 ,等. 基于开环谐振器和非对称耦合线的三通带带通滤波器设计 [J]. 江西师范大学学报: 自然科学版 2014 38(4) : 370-373.

The Design of Wide-Band Band-Stop Filter with Frequency Selective Surfaces Hexagon Array

ZHANG Meng ,LUO Xingfang* ,ZHANG Fang

(School of Physics Communication and Electronics ,Jiangxi Normal University ,Nanchang Jiangxi 330022 ,China)

Abstract: The application of wide-band frequency selective surfaces (FSS) filter is required in modern communication. A multi-layered hexagon FSS array which has more than 7 GHz bandwidth is presented by employing the good wide characteristics of hexagon array. The optimization algorithm ,the differential Evolution (DE) is employed and the frequency response of FSS structure is analyzed by the spectral domain Method of Moments (MoM) . The simulated results demonstrate that the proposed structure has the good stability of angle and polarization which provide the reference data for wide-band telecommunication.

Key words: frequency selective surface; differential evolution; spectral-domain method of moments; hexagon array

(责任编辑: 冉小晓)