

一种基于遗传算法的 AMC 结构设计

高 强, 闫敦豹, 袁乃昌

(国防科技大学微波技术发展中心, 湖南长沙 410073)

摘 要: 采用遗传算法 (Genetic Algorithm, 简称 GA) 设计了一种新型的 AMC 结构, 这种结构是由高阻频率选择表面形成的. 此结构应用于缝耦合微带天线时, 可使天线背瓣降低 10dB, 增益上升 2~3dB. 这对设计天线提供了重要的参考价值. 制作了实际天线, 测量结果和仿真结果基本吻合.

关键词: 遗传算法; 人工磁导体; 高阻频率选择表面; 缝耦合微带天线

中图分类号: TN822 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 09-1686-04

A Genetic Algorithm-Based AMC Structure

GAO Qiang YAN Dun-bao YUAN Naichang

(Microwave Center, NUDT, Changsha, Hunan 410073 China)

Abstract A genetic-algorithm-based AMC structure, which is made up of high-impedance frequency selective surface, is introduced. The aperture-coupled microstrip antenna using this structure has 10dB less back radiation and 2~3dB more gains than a conventional one. This structure has important reference value to the manufacture of an antenna. Practical antenna is fabricated and the measured results basically agree with the simulated well.

Key words genetic algorithm; artificial magnetic conductor (AMC); high-impedance frequency selective surface (HZ-FSS); aperture-coupled microstrip antenna

1 引言

光子晶体是指具有一定光子带隙 (PBG-Photonic BandGap) 的一种人造周期性电介质结构^[1]. 在微波与毫米波领域称其为电磁带隙 (EBG-Electromagnetic Band-gap) 结构. 1999年, 美国青年学者 D. Sievenpiper 提出了一种新型的 EBG 结构, 由于其对某一频段的表面波具有高阻特性, 所以称其为高阻表面 (High Impedance Surface)^[2], 它的一个重要特性就是对垂直于其表面入射的平面波具有同相位反射的效果, 即反射波与入射波的相位没有发生变化, 而金属表面会使反射波产生 180 度的相位变化. 这种零反射相位特性类似于理想磁导体的特性, 所以具有这种特性的结构又被称为人工磁导体 (AMC-Artificial Magnetic Conductor). 人工磁导体结构可以广泛应用于天线, 实现低剖面天线^[3], 降低背瓣辐射, 提高增益, 改善天线的方向图^[3]等.

电磁优化问题大多都是非线性、多极值和不可微的复杂情况, 一般的优化方法难以达到全局最优. 而遗传算法^[4,5] (Genetic Algorithm, 简称 GA) 启迪于自然界生物从低级、简单到高级、复杂的进化过程, 借鉴达尔文的物竞天择、优胜劣汰、适者生存的自然选择和自然遗传机制, 通过模拟生物自然进化过程搜索最优解, 它本质上是一种求解

问题的高度、并行、随机、自适应全局搜索方法. 隐含并行性和对全局信息的有效利用能力是遗传算法的两大显著特点, 前者使遗传算法只需检测少量的结构就能反映搜索空间的大量区域, 而不需要优化模型中目标函数和约束函数的导数或其他辅助信息, 后者使遗传算法具有稳健性 (robustness). 文中利用 GA 优化了基于高阻频率选择表面 (High-Impedance Frequency Selective Surface, 简称 HZ-FSS) 的 AMC, 并把它应用于缝耦合微带天线, 结果使得天线方向图得到很大改善.

2 遗传算法

遗传算法包括五个基本要素: ①参数编码; ②初始群体设定; ③适应度函数设计; ④遗传操作 (选择、交叉、变异) 设计; ⑤控制参数设定 (主要指群体大小和使用遗传操作的概率等). 其基本流程如下

当用遗传算法来优化基于 FSS 的 AMC 时, 一般选下式为适应度函数

$$f_{1obj} = \sum_{i=1}^{N_{freq}} | \text{Real}(\Gamma(\omega_i^{best})) - 1 |^2$$
$$f_{2obj} = \sum_{i=1}^{N_{freq}} | \text{Imag}(\Gamma(\omega_i^{best})) |^2 \quad (1)$$

Rea 和 Imag 是取实部和虚部函数, Γ 为反射系数, ω_i^{best} ,

$i = 1 \dots, N_{\text{freq}}$ 是感兴趣的频率点.

同时还需要对 FSS 单元进行离散化以便编码, 每个周期单元平均分为 $N_s \times N_s$ 个子块, 子块周期 $d = \frac{D}{N_s}$, 如图 2(b) 所示, “0”代表非金属化, “1”代表金属化; 同时还需要把各介质层的距离 l_i ($i =$

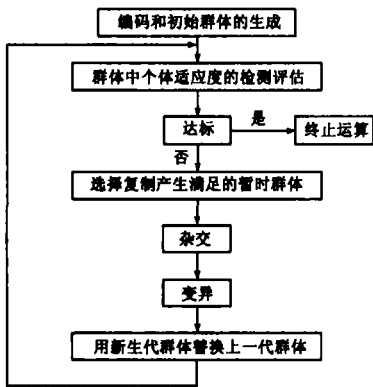


图 1 遗传算法的基本流程

1 2 ...) 也进行编码, 如果需要, 介电常数 ϵ_i ($i = 1, 2 \dots$) 也需要编码. 编码按下式进行:

$$P \leftarrow g_1 g_2 \dots g_{N_1} g_{N_1+1} g_{N_2+1} \dots g_{N_2} \dots \dots$$

$$x_l = x_l^{\min} + 2^{\frac{N_l-1}{N_l}} \frac{x_l^{\max} - x_l^{\min}}{2^{N_l-1}} \sum_{j=N_l+1}^{N_l} g_j 2^{j-1} \quad (2)$$

其中 x_l^{\max} 和 x_l^{\min} 为参数 x 的上下界, g_j 为码串中各基因座的基因值.

3 单层 FSS 的计算

图 2(a) 是 AMC 的结构图, 它是在单层 FSS 的介质存

底上加上理想接地面构成的. 我们采用广义散射矩阵法 (Generalized Scattering Matrix GSM) 来计算 AMC 的反射, 即先算出单层 FSS 的散射特性, 再和介质、理想导体级联得到.

参考文献 [7 ~ 10] 中提到的周期矩量法已很成熟, 本文只简要说明一下. 由于 FSS 的二维周期性结构, 所以电磁场满足 Floquet 定理, 这样就可以把无限大 FSS

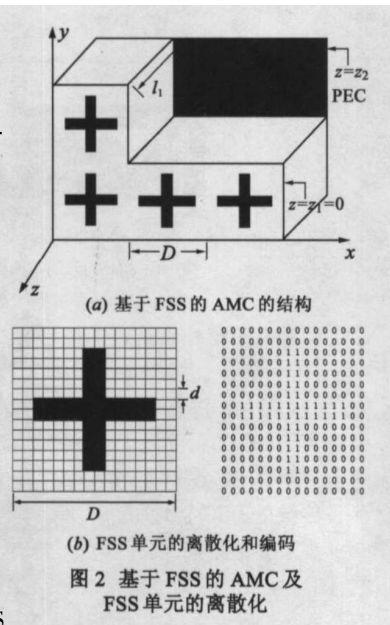


图 2 基于 FSS 的 AMC 及 FSS 单元的离散化

的求解集中在一个周期单元里. 待求解的方程为:

$$[S^i] = \begin{bmatrix} [S_{11}^i] + [S_{12}^i][P][T][S_{21}^i][P][S_{22}^i] & [S_{12}^i][P][T][S_{22}^i] \\ [S_{21}^i][P]([S_{21}^i] + [S_{22}^i][P][T][S_{11}^i][P][S_{22}^i]) & [S_{21}^i][P][S_{22}^i][P][T][S_{12}^i] + [S_{22}^i] \end{bmatrix}$$

$$E^i + E^s = 0 \quad (3)$$

其中 E^i 为入射场, E^s 为散射场. 应用 Floquet 定理, 散射场可以用 Floquet 模式、谱域格林函数和电流的傅立叶变换项表示, 这样式 (3) 可写为:

$$\begin{bmatrix} -E_x^{\text{inc}}(x, y, 0) \\ -E_y^{\text{inc}}(x, y, 0) \end{bmatrix} = \sum_{m, n=-\infty}^{m, n=+\infty} \begin{bmatrix} \tilde{G}_{xx} & \tilde{G}_{xy} \\ \tilde{G}_{yx} & \tilde{G}_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{J}_{x_m} \\ \tilde{J}_{y_n} \end{bmatrix} e^{j(k_{mx}x + k_{my}y)} \quad (4)$$

把未知电流用一组 rooftop 分域基函数 [7] 展开, 最后采用伽略金法便可求解未知电流, 一旦电流求出, FSS 的透射与反射系数便可求出.

4 多层 FSS 的计算

在分析多层 FSS 级联结构时, 先计算各层的 GSM, 然后先将前两层的 GSM 矩阵级联, 得到一个新的 GSM 矩阵; 然后再以此 GSM 矩阵为第一个矩阵, 与下一层矩阵级联, 再次得到一个新的 GSM 矩阵; 重复此过程, 直至求完最后一层. 下面以前两层 GSM 矩阵的级联为例, 详细说明此过程.

第一层 GSM 矩阵为

$$[S^1] = \begin{bmatrix} S_{11}^1 & S_{12}^1 \\ S_{21}^1 & S_{22}^1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

第二层 GSM 矩阵为

$$[S^2] = \begin{bmatrix} S_{11}^2 & S_{12}^2 \\ S_{21}^2 & S_{22}^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

两层之间的介质厚度为 d_1 , 在 FSS 与介质 1 的交界面上的入射波为 C_1, D_1 , 在介质 2 与第二层 FSS 的交界面上的入射波为 $C_2, D_2, A_1, B_1, A_2, B_2$ 分别为第一、第二层 FSS 上的反射波, 如图 4 所示

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}^1 & S_{12}^1 \\ S_{21}^1 & S_{22}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ D_1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} A_2 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}^2 & S_{12}^2 \\ S_{21}^2 & S_{22}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_2 \\ D_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

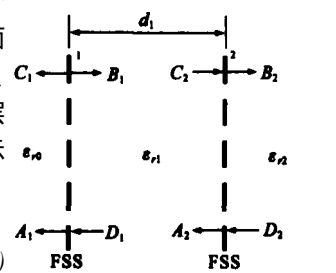


图 4 多层介质中的入射波与反射波

在介质 1 的第一个界面上的波 B_1, D_1 和第二个界面上的波 A_2, C_2 由矩阵 $[P]$ 相联系.

$$[D_1] = [P][A_2] \text{ 且 } [C_2] = [P][B_1]$$

其中 $[P]$ 是一对角阵, 对角上的元素为 $e^{-jk_z d_1}$, 它表示第 l 个谐波经过介质 1 时的相位延迟. 经过一系列复杂的矩阵运算, 可最终得到 A_1, B_2 和 C_1, D_2 的关系. 这也就是由前两层 FSS 级联后的 GSM 矩阵, 用 S^G 表示,

其中

$$[T] = ([I] - [S_{11}^2][P][S_{22}^1][P])^{1/2}$$

而单层 FSS 的 GSM 可由上一节求出. 对于文中的 AMC 结构, 由于第二层是 PEC, 所以 $[S_{11}^2] = [S_{22}^1] = -[I]$, $[S_{12}^2] = [S_{21}^1] = [0]$.

5 计算和实验结果

5.1 AMC的结构和反射特性

采用 $\epsilon_r = 10.2$ 厚度 $h = 4\text{mm}$ 介质材料, 单元周期 $D = 4.8\text{mm}$, $d = 0.3\text{mm}$, 要求在 5.3GHz 左右有零反射相位, 故 GA 只需对 FSS 单元的形状进行优化. GA 所用参数为 $N_{\text{pop}} = 50$ (初始群体的大小), $p_{\text{cross}} = 0.8$ 和 $0.001 \leq p_{\text{mut}} \leq 0.01$, 最后迭代产生的 FSS 形状如图 5 所示, 黑的部分

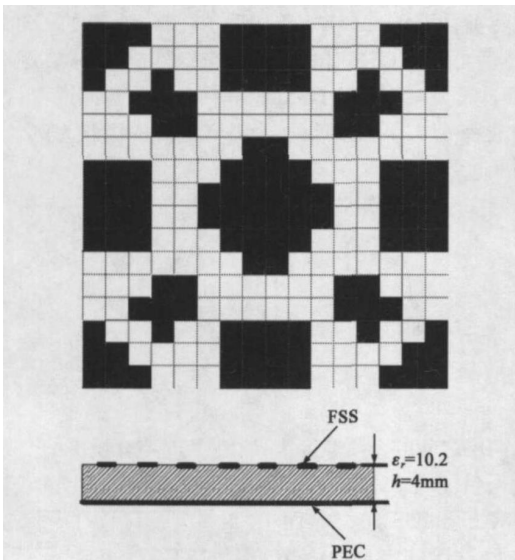
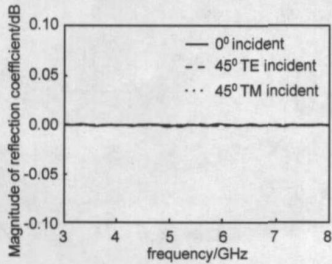
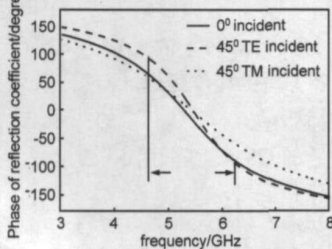


图 5 GA 优化的 AMC 的形状



(a) AMC 的反射幅度



(b) AMC 的反射相位

图 6 GA 优化的 AMC 的反射特性

为金属; 图 6 为它的反射特性曲线, 很明显反射幅度为 1, 而 $\pm 90^\circ$ 反射相位范围对应的就是反射相位带隙的带宽^[2], 带隙中心频率约为 5.3GHz 带宽为 1600MHz 并且受极化和入射角的影响很小.

5.2 缝耦合微带天线

缝耦合微带天线由于体积小、重量轻、馈电方便而广泛应用于各种射频电路里, 其结构见图 7(a), 选择参数为 $d_1 = 0.8\text{mm}$, $d_2 = 2\text{mm}$, $d_{\text{spacer}} = 1\text{mm}$, $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r2} = 10.2$, $L_p = W_p = 7\text{mm}$, $L_s = 5.8\text{mm}$, $W_s = 0.6\text{mm}$, $L_f = 22\text{mm}$, $W_f = 0.7\text{mm}$, 使得天线谐振落在上述 AMC 的反射带隙内.

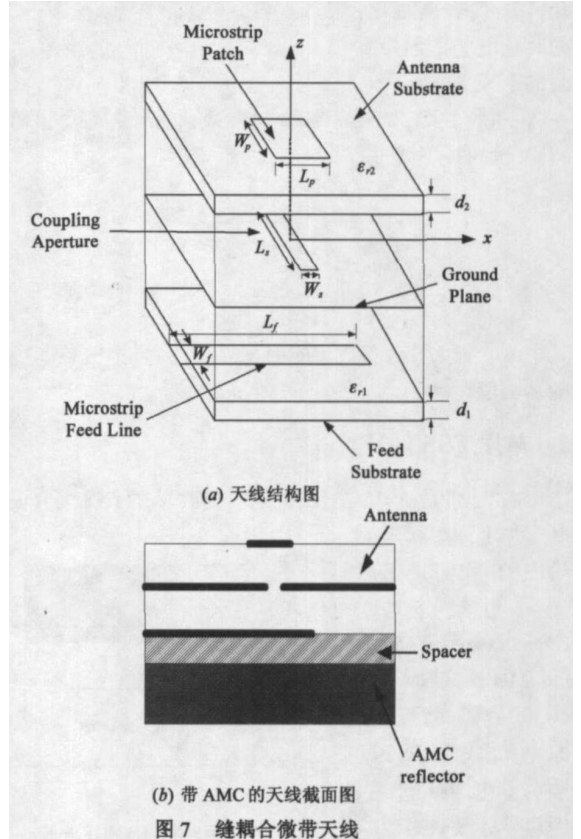


图 7 缝耦合微带天线

图 8 显示了用 Ansoft HFSS 仿真上述天线的结果. 很明显, 带 reflector 的缝耦合微带天线的背瓣降低 10dB 左右, 增益从 7dB 提高到 10.16dB 方向图得到很大的改善; 但是带 AMC 的天线比 PEC 的, 带宽稍宽, 匹配的也稍好. 这也说明 AMC 在作接地板时具有优越的特性, 可以用来代替传统的 PEC 接地板.

为了验证结果, 实际制作了带有 AMC 的缝耦合微带天线, 图 9 显示的测量结果与仿真结果基本吻合, 测量增益只有 8.85dB 偏差主要由于在压合天线时存在空气层所致.

6 结论

本文利用 GA 优化了 HZ-FSS 在指定的带隙内得到同相位反射的效果, 从而形成了 AMC 以此 AMC 为接地板, 制作了缝耦合微带天线, 相对于传统天线, 它的背瓣降

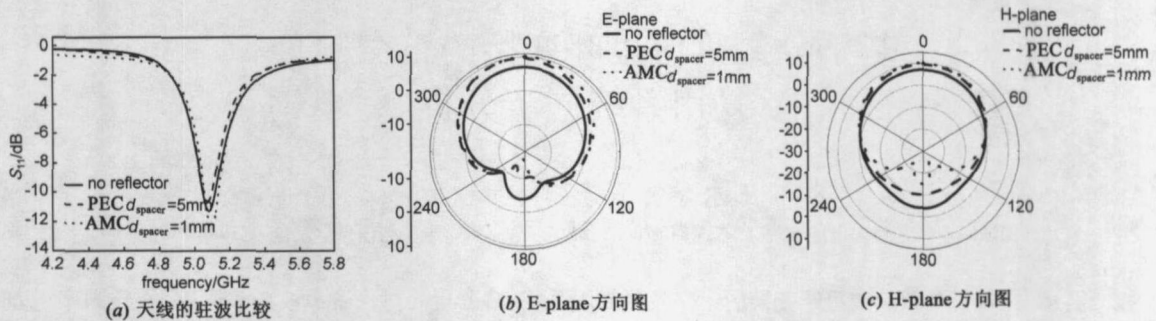


图 8 仿真的缝耦合微带天线在无反射器、PEC 反射器和 AMC 反射器时驻波与辐射特性

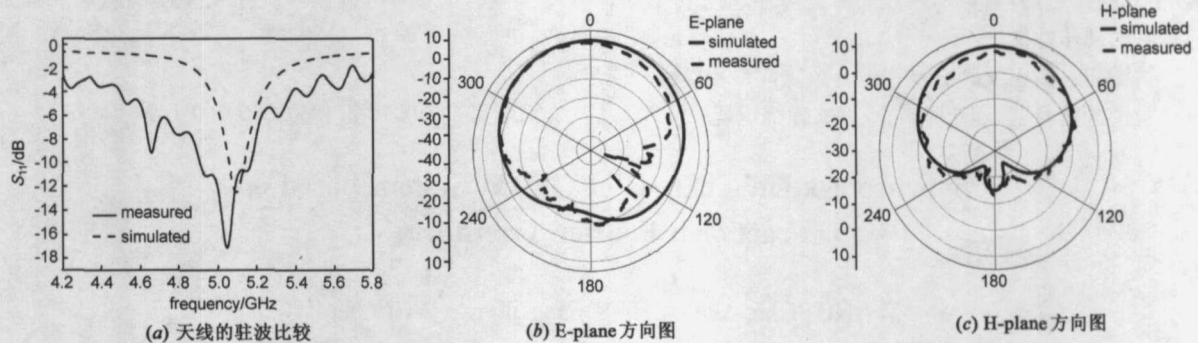


图 9 带 AMC 的缝耦合微带天线仿真与测量结果的比较

低,增益提高,方向图得到很大改善.这为天线的发展提供了一个新方向.

参考文献:

[1] E Yablonovitch Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Phys Rev Lett 1987, 58(20): 2059-2062

[2] D Sievenpiper Lijun Zhang Romulo F Jimenez Bras et al High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band[J]. IEEE TransMTT, 1999 47(11): 2059 - 2074

[3] Z Li Y Ralmat-San ü PBG, PMC and PEC surface for antenna applications A comparative study[J]. IEEE AP-S Dig 2000 674- 677.

[4] Daniel Swile and Eric Michielsen Genetic algorithm optimization applied to electromagnetics a review [J]. IEEE Trans Antennas Propagat 1997 45(3): 343- 353

[5] S Chakravarty R Mitra Application of the micro-genetic algorithm to the design of spatial filters with frequency - selective surfaces embedded in dielectric media [J]. IEEE Trans Electronagn Compat 2002 44(2): 338- 346

[6] Richard C Hall R Mitra Kenneth M Mitzner Analysis of multilayered periodic structures using generalized scattering matrix theory [J]. IEEE Trans Antennas Propagat 1998 36(4): 511- 517

[7] Raj Mitra ChiH Chan, Tom Cwck Techniques for analyzing frequency selective surfaces-a review [J]. Proceedings of the

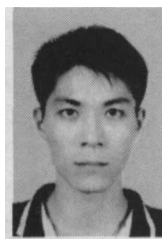
IEEE, 1988 76(12): 1593- 1614

[8] Chao-chun Chen Transmission through a conducting screen perforated periodically with apertures [J]. IEEE TransMTT, 1979, 18(9): 627- 632

[9] Bany J Rubin, Henry L Bertoni Reflection from periodically perforated plane using a subsectional current approximation [J]. IEEE Trans Antennas Propagat 1983 31(6): 829- 836

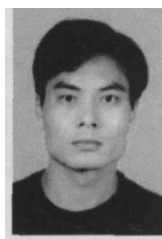
[10] Ben A Munk Frequency selective surface theory and design [M]. New York Wiley, 2001.

作者简介:



高 强 男, 1979 年出生, 河南, 2000 年于国防科学技术大学电子科学与工程学院分别获工学学士学位, 同年保送入国防科学技术大学电子科学与工程学院硕博连读, 研究方向包括光子晶体天线, 频率选择表面等.

E-mail gq19790324@163.com



闫敦豹 男, 1976 年出生于山东, 1999 年与 2002 年于国防科学技术大学电子科学与工程学院分别获工学学士与硕士学位, 目前于国防科学技术大学电子科学与工程学院攻读工学博士学位, 研究方向包括光子晶体天线, AMC 结构及应用, 宽带紧凑型微带天线等.

E-mail leopardwork@163.com