

遗传算法在超材料优化设计中的应用及实现

常红伟¹, 马华², 屈绍波¹, 张介秋¹, 王甲富¹

(1.空军工程大学理学院,陕西西安,710051;

2.西安交通大学电子与陶瓷教育部重点实验室,陕西西安,710049)

摘要 利用遗传算法对超材料进行优化设计,是近年来超材料优化设计的重要方法之一。设计了一套 MATLAB 与商业电磁仿真软件 CST 微波实验室的交互仿真体系,在 MATLAB 环境中编写遗传算法主程序,然后离线调用 CST 软件进行模型仿真计算,从而将具有强大全局寻优能力的遗传算法充分应用到超材料的优化设计中。然后以 Y 字紧凑型结构的二阶带通频率选择表面优化设计为例,采用基于罚函数法的遗传算法对这种设计思路进行了验证,取得了良好的设计效果。结果表明:与以往的设计方法相比,该方法编程简单,通用性强,设计周期短,优化效果好,同时可以推广到其他类型的超材料结构的优化设计中。

关键词 超材料;遗传算法;优化设计;交互仿真

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.03.021

中图分类号 TN820 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)03-0089-04

A Design and Realization of Optimization of Meta-materials Based on Genetic Algorithm

CHANG Hong-wei¹, MA Hua², QU Shao-bo¹, ZHANG Jie-qiu¹, WANG Jia-fu¹

(1.Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2.Electronic Materials Research Laboratory, Key Laboratory of the Ministry of Education Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Optimization of meta-materials with the genetic algorithm is one of the most effective methods in the design of meta-materials in recent years. An integral system with interactive simulation of MATLAB and CST Microwave Studio is developed, and the main program of genetic algorithm is written in MATLAB with simulation and computation in CST to realize optimization of meta-materials by genetic algorithm with power of global optimization. Taking the compact second-order frequency selective surface optimization for example, the thinking of design is verified based on penalty function genetic algorithm, and a good effectiveness is obtained. Compared to the previous realizing way, this method is simple in programming operation, better in generality, and only needs a short circle design, simultaneously the method can be applied to other kinds of meta-materials.

Key words: meta-materials; genetic algorithm; optimization design; interactive simulation

收稿日期:2013-11-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11204378,11274389,11304393,61302023)

作者简介:常红伟(1988-),男,河北衡水人,硕士生,主要从事超材料应用研究.E-mail: changhongweigood@aliyun.com

引用格式:常红伟,马华,屈绍波,等.遗传算法在超材料优化设计中的应用及实现[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(3):89-92. CHANG Hongwei, MA Hua, QU Shaobo, et al. A design and realization of optimization of meta-materials based on genetic algorithm[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(3): 89-92.

具备天然材料所欠缺的超常物理性质的人工复合结构——超材料^[1-3] (metamaterial) 是近年来的研究热点之一,超材料优化设计是超材料研究的重要方向。一些仿生高级优化算法如遗传算法^[4]、粒子群算法^[5]、蚁群算法、模拟退火算法及混合算法^[6]等被广泛应用。其中,遗传算法具备强大的收敛性,优异的鲁棒性和算子的多样性等优点。遗传算法应用于超材料优化设计大体可以分为2类:①“在线式”的实现:即算法与超材料结构的仿真计算共同编程^[7]。一般是将超材料结构建立物理模型,用矩量法、有限元法或时域有限差分法等计算结构参数。这种方式可以大大缩短遗传算法中个体适应度的计算,加快算法的进化过程,但编程非常复杂,通用性差;②“离线式”的实现:即算法与超材料结构的仿真计算分散进行,遗传算法计算适应度所需的超材料结构性能指标由其它方式得到。比如文献^[8]中采用直接实验测量超材料结构的性能^[9],然后人工传递给遗传算法的适应度函数。但对于种群规模较大的遗传算法来说,每个个体都进行实验测量也是不现实的。因此,本文提出一种新的离线式实现方式,优化设计出工作在X波段的,性能良好的带通频率选择表面(Frequency Selective Surface)。

1 超材料优化设计实现

本文以 MATLAB 中的遗传算法工具箱为依托,利用商用 CST 软件中提供的 MATLAB 软件的接口,建立了一个 MATLAB 与 CST 联合仿真体系。首先在 CST 中建立结构模型,设定好边界条件和结构变量,选好仿真频段,然后将遗传算法中种群的个体也就是含有超材料结构参数的数组传送到 CST 仿真软件中,赋值给相应的参数变量,然后进行超材料结构的仿真计算,仿真结束后主程序读取相应的结果数据并进行分析加工,最后把整理后的数据传入到适应度函数中进行适应度的计算,再根据每个个体的适应度值进行后期的选择、杂交和变异运算,生成下一代的个体,判断是否满足终止条件,若满足则停止进化,输出结果,不满足则重复上述进化过程。具体流程见图 1。

同时,针对参数多且精度高的超材料优化设计,本文采用实数编码的遗传算法,克服了二进制编码中串长较长、物理意义不明确的缺点。应用上述方式对超材料结构进行优化设计通用性强,适用于各种类型的超材料,当超材料的结构和优化目标发生变化时,仅需在 CST 中重新建立新的模型,编写合适的适应度函数即可。

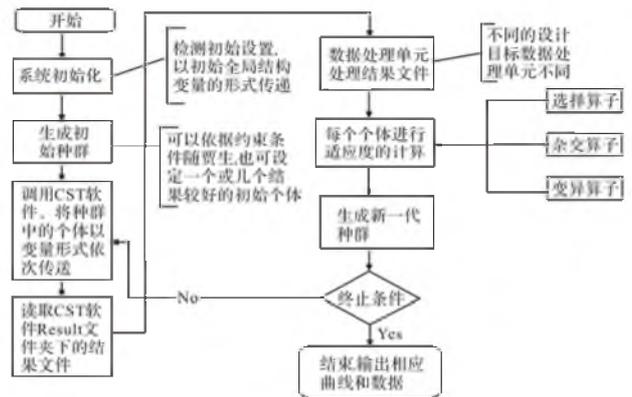


图1 联合仿真系统的程序流程图

Fig.1 Flow chart of the united system

2 基于罚函数遗传算法的频率选择表面优化设计

选取文献^[10]中工作在X波段的Y字紧凑型频率选择表面(FSS)为优化对象,结构见图2。它包括3层金属结构和2层厚度为 h 的F4B-2介质板,其中上下2层金属贴片结构相同,为倒角Y字贴片,贴片角长度为 l ,宽度为 w ,中间为一个金属板上刻蚀对应的Y字形缝隙,缝隙角长度为 l_0 ,宽度为 w_0 ,图2右侧为计算结构的单元,为了使设计的FSS单元周期尽可能小,本文采用紧凑型的布阵方法,结构单元周期为 d_y 。

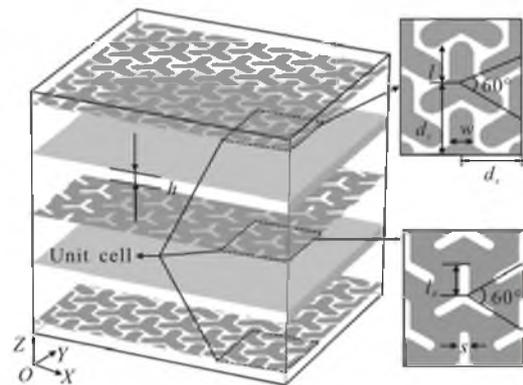


图2 选取的FSS结构图

Fig.2 Configuration of the FSS

2.1 基于罚函数法的适应度函数设计

一个性能优异的FSS要求带内传输系数高,带内插损尽量小,带外传输系数尽量低,过渡带窄而陡峭,并且对大入射角和不同极化模式的电磁波保持稳定特性^{[11]237-261}。但同时满足这些目标的FSS较难获得,文献^[10]中的FSS通带范围没有完全覆盖X波段,带宽较窄,应用受到限制。因此本文优化设计的主要目标就是在尽量保证其它优良特性的同时,拓展工作频带。因此适应度函数选为:

$$f(x) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \Delta f_i}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (1)$$

式中: f_{\max} , f_{\min} 分别为优化频段的最大、最小频率; Δf_i 为优化频段内通带差损小于 1 dB 的各个频带的带宽。本文优化频段为 X 波段,为取得更好的优化效果将 f_{\max} 设为 13 GHz, f_{\min} 设为 7 GHz。同时必须注意到:该适应度函数优化过程中只考虑了频率选择表面带内的效果,而带外特性没有加以限制,因此为保证优化设计过程中带外特性为阻带,采用罚函数法对上述适应度函数进行调整:

$$f'(x) = \begin{cases} f(x) & , \text{个体为单通带 FSS} \\ f(x) + p(x) & , \text{个体为非单通带 FSS} \end{cases} \quad (2)$$

$$p(x) = \begin{cases} 0 & , \text{所有的 } S_{11}^a > -10 \text{ 且 } S_{11}^b > -10 \\ 10 & , \text{存在 } S_{11}^a < -10 \text{ 且 } S_{11}^b < -10 \\ 20 & , \text{所有的 } S_{11}^a < -10 \text{ 且 } S_{11}^b < -10 \end{cases} \quad (3)$$

式(2)中, $f(x)$ 为原适应度函数, $f'(x)$ 为调整后的适应度, $p(x)$ 为罚函数。设计中 CST 电磁仿真软件的仿真频率为 2~20 GHz,以其他仿真频段内的反射率 S_{11} 作为约束指标,考虑约束条件不满足的程度和计算效率之间的关系,罚函数设置见式(3),式中 S_{11}^a 的仿真频段为 2~7 GHz, S_{11}^b 的仿真频段为 13~18 GHz。

2.2 遗传算法中其它参数的设置

遗传算法初始种群数目设为 20,其中选取文献[10]的结果作为一个初始个体,剩余的初始个体在满足约束条件下由工具箱中创建种群函数随机产生;选择算子采用传统的轮盘选择法和精英保留策略,每一代保留 2 个优秀个体;杂交算子采用算术杂交算子,变异算子采用基于约束条件的标准变异算法,杂交率设为 0.8,变异率设为 0.01,最大遗传代数设为 30。根据图 2 所示结构,各个参数在符合几何构型及加工规格等约束下满足以下约束条件:

$$\begin{cases} -l + (1/2 + 1/2\sqrt{3})w \leq -0.2 \\ l + (2/\sqrt{3} - 1/2)w - d_y \leq -0.2 \\ l_0 + (2/\sqrt{3} - 1/2)w_0 - d_y \leq -0.2 \end{cases} \quad (4)$$

各参数的取值范围设为 $[l, w, l_0, w_0, d_y, h] \subseteq [0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 2.5, 0.5; 5, 5, 5, 5, 7.5, 1.1]$

2.3 仿真结果对比和分析

算法运行结果见图 3。由图 3 中种群的平均适应度走势可以看出,各代中不满足约束条件的个体逐渐减少,算法趋于收敛。同时,随着代数的递增,最佳个体也在不断优化,经过 30 代的迭代进化所得最优解见表 1。

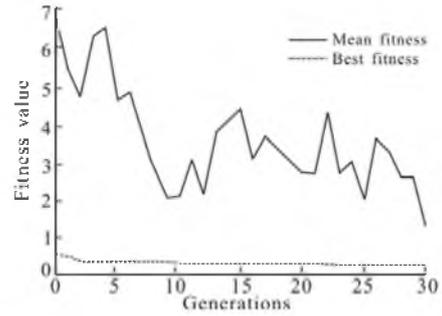


图 3 各代的平均适应度值和最佳适应度值
Fig.3 Mean fitness and best fitness of generations

表 1 优化前后个体的结构参数

Tab.1 Structure parameters before and after optimization

| 参数/ μm | 文献[10] | 优化后 |
|-------------------|--------|-------|
| l | 3.350 | 3.141 |
| w | 1.800 | 1.949 |
| l_0 | 2.450 | 2.878 |
| w_0 | 0.700 | 2.631 |
| d_y | 5.00 | 5.46 |
| h | 1.000 | 1.095 |
| 覆铜厚度 | 0.017 | 0.017 |

图 4 为电磁波正入射时,优化前后的 S 参数对比。由图 4 可以看出,在 X 波段优化后的 FSS 有一个明显的传输通带,带内反射系数出现 2 个分别发生在 8.73 GHz 和 12.35 GHz 的谐振零点。通带中心频率为 10.58 GHz,3 dB 带宽为 7.05 GHz (6.93~13.98 GHz),相对带宽为 66.6%,相比文献[10]中 3 dB 带宽 3.41 GHz (8.40~11.81 GHz)和相对带宽为 34.1%,带宽扩展了 3.64 GHz,相对带宽提升了 95.3%,且 X 波段通带内插损均低于 -0.5 dB。同时,优化后周期单元尺寸 d_x 和 d_y 的值均不大于 $\lambda_0/4$,带内中心反射率低于 -10 dB。

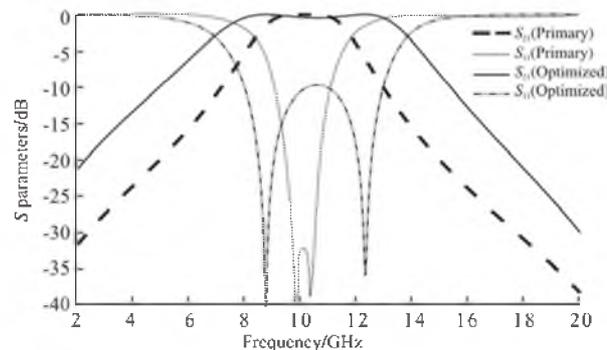


图 4 仿真 S 参数结果

Fig.4 Simulation result of S parameter

该 FSS 在不同入射角和不同极化下电磁波的传输性能见图 5。对于 TE 极化,随着入射角的增加,带宽基本不变,带内插损增大,但仍小于 -3 dB,角度稳定性一般;而对于 TM 极化,随着入射角的增加,带宽略有增加,带内插损反而减小,FSS 性能

稳定。整体来说,优化后的 FSS 对于不同极化方式和不同入射角度均具有比较好的稳定性。

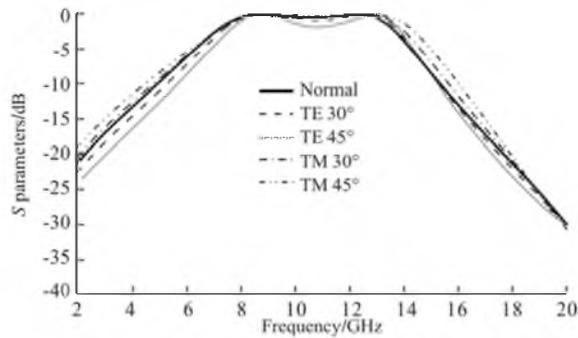


图5 不同情形下的传输系数

Fig.5 Transmission coefficients in different conditions

3 结语

本文通过 MATLAB 和 CST 联合仿真体系实现了遗传算法对频率选择表面的优化设计,取得了良好的设计效果,验证了这种优化方式的可行性。与以往的设计相比,整个优化过程由交互系统自动完成,简单易行,通用性强。同时,利用遗传算法对频率选择表面进行优化设计,周期短,效率高,可以推广到其他超材料结构设计中。

参考文献(References):

- [1] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena [J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 1999, 47(11): 2075-2084.
- [2] 王斌科,王新华,顾超,等. 二维圆柱超材料隐身罩的设计与测试[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2010, 11(1): 78-81.
WANG Binke, WANG Xinhua, GU Chao, et al. The design and measurement of two-dimensional cylinder metamaterial cloak [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2010, 11(1): 78-81. (in Chinese)
- [3] 周航,裴志斌,彭卫东,等. 屈绍波零折射率超材料对喇叭天线波前相位的改善[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2010, 11(6): 70-74.
ZHOU Hang, PEI Zhibin, PENG Weidong, et al. Improvement of the horn antenna's wave-front phase using zero-index metamaterial[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2010, 11(6): 70-74. (in Chinese)
- [4] SHEN Yan, GUO Bing, GU Tianxiang. Particle swarm optimization algorithm and comparison with genetic algorithm [J]. Journal of UEST of China, 2005, 34: 696-699.
- [5] Chang L, Liao C, Lin W, et al. A hybrid method based on differential evolution and continuous ant colony optimization and its application on wide band antenna design [J]. Progress in electromagnetics research, 2012, 122: 105-118.
- [6] Holland J H. A adaptation in natural and artificial systems [M]. Ann Arbor: The university of michigan press, 1975.
- [7] 汪剑波,卢俊. 双屏频率选择表面结构的遗传算法优化[J]. 物理学报, 2011, 60(5): 050703.
WANG Jianbo LU Jun. Double screen frequency selective surface structure optimized by genetic algorithm [J]. Phys sinica, 2011, 60(5): 050703. (in Chinese)
- [8] 孙良奎,程海峰,周永江,等. 一种基于超材料的吸波材料的设计与制备[J]. 物理学报, 2011, 60(10): 10108901.
SUN Liangkui, CHENG Haifeng, ZHOU Yongjiang, et al. Design and preparation of a radar-absorbing material based on metamaterial [J]. Phys sinica, 2011, 60(10): 10108901. (in Chinese)
- [9] 裴志斌,顾超,屈绍波,等. 自由空间法测试超材料的电磁参数 [J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2008, 9(5): 67-70.
PEI Zhibin, GU Chao, QU Shaobo, et al. Measurement of electromagnetic parameters of metamaterials by free-space method [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2008, 9(5): 67-70. (in Chinese)
- [10] Zhou Hang, Qu Shaobo, et. al. A compact second-order frequency selective surface with broadband response [J]. Microwave and optical technology letters, 2012, 54(2): 392-384.
- [11] 屈绍波,王甲富,马华,等. 超材料设计及其在隐身技术中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
QU Shaobo, WANG Jiafu, MA Hua, et al. Metamaterial design and applications in stealth technology [M]. Beijing: Science press, 2013. (in Chinese)

(编辑:徐敏)