

文章编号: 1672-2892(2010)06-0665-04

一种新型微带端射平面树形天线的自动设计

成学, 黄卡玛

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 将一种新的优化算法—自然树生长竞争算法, 用于天线优化, 结合基于有限元方法(FEM)的电磁场数值仿真软件, 实现天线的自动设计, 并设计出的一种新型微带端射平面树形天线。在 5.77 GHz~5.93 GHz 频段内 $S_{11} < -10$ dB, 辐射方向保持良好的端射特性, 且在 5.8 GHz 的端射增益为 5.4 dBi。根据仿真结果, 制作一个原型天线并对其进行测试, 测试结果与仿真结果吻合良好。

关键词: 树形天线; 端射; 自动设计; 微带; 自然树生长竞争算法

中图分类号: TN82

文献标识码: A

Automated design of a novel microstrip plane tree-shaped antenna with end-fire characteristic

CHENG Xue, HUANG Ka-ma

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

Abstract: The Competitive Algorithm of Simulating Natural Tree Growth, a novel optimization algorithm, was applied to antenna design by calling the numerical electromagnetic simulation software based on Finite Element Method(FEM) to implement the automated antenna design, and then a novel microstrip plane tree-shaped antenna with end-fire characteristic was designed. This antenna maintained the end-fire radiation pattern with $S_{11} < -10$ dB in the frequency band from 5.77 GHz to 5.93 GHz, and the end-fire gain is 5.4 dBi at the frequency of 5.8 GHz. According to the simulated result, a prototype of the antenna was fabricated and tested. Good accordance was obtained between simulated and measured results.

Key words: tree-shaped antenna; end-fire; automated design; microstrip; competitive algorithm of simulating natural tree growth

天线是一种导行电磁波与自由空间电磁波之间的转换器件^[1]。无线应用的普及使得电磁环境日益复杂化, 对天线各项性能要求越来越高。由于传统的天线设计方法难以满足这些需求, 人们发展了天线自动设计方法并广泛应用^[2-4]。与传统的天线设计手段相比, 天线自动设计具有很多优势^[3-6], 它已成为天线设计新的发展方向。在天线自动设计过程中, 优化算法可替代传统方法中烦琐的人工劳动。目前广泛使用的优化算法主要有: 遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法、人工免疫算法等。这些优化算法在解决天线设计中的优化问题时, 虽然取得了一些成效, 但远远不能满足日益增长的工程要求, 特别是优化时间太长这一缺点, 常使它们在工程应用中不易被接受。为此人们在对上述优化算法进行改进的同时, 也在不断尝试更多新的优化算法。考虑到相对生物进化的漫长过程, 自然树的生长时间很短, 即生长比进化快得多, 黄卡玛教授基于自然树的生长过程提出一种全新的优化算法—模拟自然树生长的竞争算法^[7], 该算法机理比较简单, 很容易被人们理解和接受。

本文将自然树生长竞争算法应用于天线自动设计, 设计出了一种微带结构的新型端射树形天线。同时加工了天线实物, 并测量了其 S_{11} 参数和天线辐射方向图, 测量结果验证了该自然树生长竞争算法在天线设计中的有效性。

1 基于自然树生长竞争算法的天线自动设计

自然树的生长过程复杂, 本文只考虑树干和树枝的生长与凋落, 而不考虑树根和树叶的生长。

收稿日期: 2010-07-15; 修回日期: 2010-09-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60871064)

自然树生长竞争算法流程如图1所示^[8-9]。首先进行发芽操作形成主干，接着是一个迭代过程，直到收敛条件满足，最后输出结果。在每一次迭代中，对主干和树上所有枝条依次进行发芽操作、生长操作和凋落操作来产生新的枝条，改变枝条的长度、角度和凋落一些枝条。

自然树生长要取得足够的阳光来进行光合作用，枝条必须向阳光迅速生长，才能取得竞争优势。自然树生长竞争算法使用阳光适应度来描述一棵树的优化程度。定义整棵树的阳光适应度如下：

定义1 阳光适应度：

$$\eta = W_1(30 - \theta) + W_2 \text{Gain} \quad (1)$$

式中： θ 是天线主瓣方向角； Gain 是天线工作频段内的平均增益； W_1 为偏离角加权因子； W_2 为增益加权因子，它们的值根据优化目标分别设置为0.1和0.05。

自然树的生长需要从土壤中获取营养物质，然后把营养物质从根部输送到每一根枝条，营养物质的输送距离是有限制的，距离根部越远的枝条越难取得营养物质。因此，定义每一根枝条的营养因子为其顶端距根部总长度的归一化值，用来表征枝条从土壤中吸取营养的能力。

定义2 枝条*i*的营养因子：

$$\alpha_i = \exp(-c_1 \sum_{r=0}^m b_r) \quad (2)$$

式中： α_i 代表第*i*根枝条的营养因子； m 表示营养从根部传送到枝条*i*的顶端所经过的总枝条数目； b_r 是第*r*根枝条的长度； c_1 为调整阳光适应度的正常数。

在营养充足的条件下，如果枝条被遮挡而得不到充足的阳光将会凋落，因此定义枝条的遮挡因子来表示枝条被遮挡的情况。自然界中，自然树外层的枝条容易获得充分的阳光而具有竞争优势，越内层的枝条被遮挡的情况越严重。

定义3 枝条*i*的遮挡因子：

$$\beta_i = (1 - \frac{x_i}{x_{\max}})(1 - \frac{z_i}{z_{\max}}) \quad (3)$$

式中： x_i 和 z_i 为第*i*根枝条的终点坐标； x_{\max} 和 z_{\max} 为枝条在*x*和*z*方向的最大坐标值。

自然树通过产生新的枝条，改变枝条的长度、角度，凋落旧的枝条进行生长，可以极大地提高整棵树的阳光适应度，第*i*根枝条的长度生长方程可以定义为：

$$\begin{cases} l_i^{t+1} = l_i^t + D w_i^t v_i^t, & \eta^{t+1} > \eta^t \\ l_i^{t+1} = l_i^t, & \eta^{t+1} \leq \eta^t \end{cases} \quad (4)$$

式中： t 表示枝条向光探测生长的次数； l_i^t, l_i^{t+1} 分别表示枝条第*t*次和第*t+1*次向光探测生长后，枝条 b_i 的长度； v_i^t 表示枝条 b_i 第*t*次向光探测生长时的生长速率函数； w_i^t 表示枝条 b_i 第*t*次向光探测生长时的生长速率权重， η^t 是整棵树在第*t*次探测生长后的阳光适应度；如果枝条的长度增加即正向探测生长，则 $D=1$ ，反之 $D=-1$ 。枝条角度的竞争生长方程类似于长度的生长方程。

自然树的枝条会因为缺少营养或被严重遮挡而无法生存，最终凋落。在生长结束以后如果有枝条满足式(5)中的凋落条件，则对该枝条及其子枝条进行凋落：

$$\alpha_i < \kappa_1 \text{ or } \beta_i > \kappa_2 \quad (5)$$

式中： κ_1, κ_2 为(0,1)之间的正常数，它们分别表示枝条营养因子的最低阈值和遮挡因子的最大阈值。虽然枝条的凋落可能使当年整棵树的阳光适应度降低，但从整个生长过程来看，这有利于整棵树的阳光适应度向最好的方向发展。

天线自动设计的基本原理就是将天线设计转化为自然树生长算法的寻优过程，主要步骤如下：

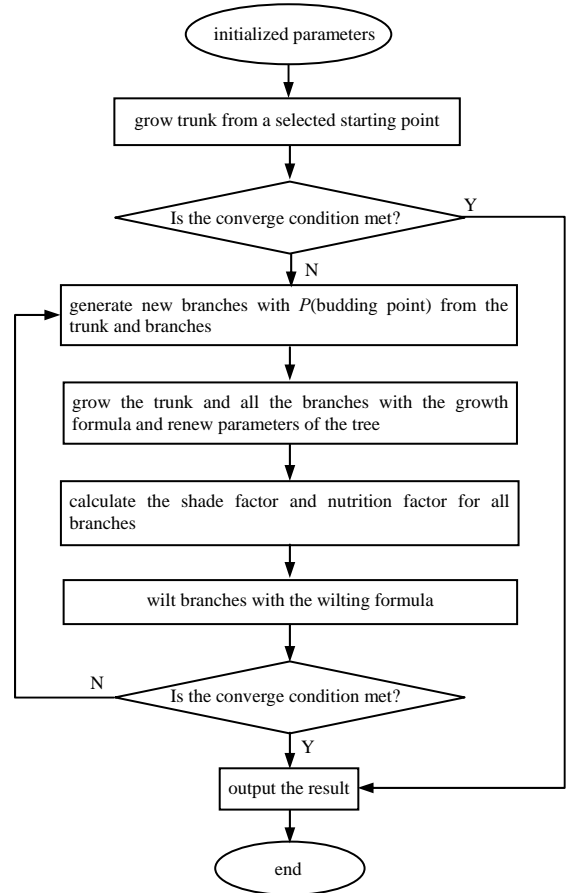


Fig.1 Flow chart of the proposed algorithm
图1 自然树生长竞争算法流程图

- 1) 首先将对天线设计要求转化为一个适应度函数, 也称目标函数, 如式(1)所示, 并设初值为 0。然后用适应度函数值的大小来定量天线性能的优劣, 引导自然树生长算法的优化方向。
- 2) 编写天线自动设计程序。本文采用主从进程模式, 主进程实现自然树的竞争生长, 得到天线结构; 从进程调用 HFSS 数值计算软件包, 得到天线的适应度函数值, 然后发送给主进程。
- 3) 主进程对适应度函数值进行判断, 选择新旧适应度函数值中较大的那个值。
- 4) 重复以上步骤, 直到得到满足天线设计指标的最佳结果。

2 天线的优化设计

天线结构如图 2 所示, 印刷于介电常数为 2.65 的正方形介质基板上, 介质基板厚度为 1 mm, 边长 $a=26$ mm, 约为中心频率波长的一半。接地板宽 $W=10.34$ mm, 天线采用 50Ω 同轴线馈电, 馈线长度 $f=2.87$ mm。根据图 1 中的流程图, 结合基于有限元算法的数值仿真软件 HFSS 和自然树生长竞争算法, 对该天线进行仿真优化^[9]。

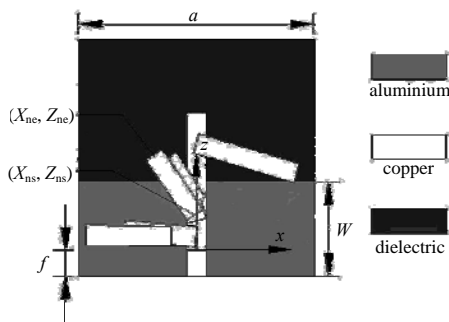


Fig.2 Configuration of the tree-shaped antenna
图 2 树形天线结构图

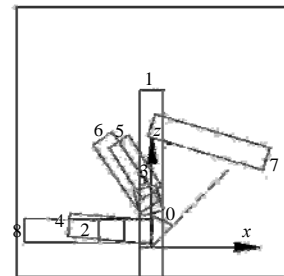


Fig.3 Optimized tree structure
图 3 优化后的树形天线结构

经过约 640 次仿真优化后, 天线性能基本达到设计要求, 在 5.77 GHz~5.93 GHz 频段内, 天线的 $S_{11} < -10$ dB, 辐射方向保持了良好的端射特性, 5.8 GHz 时的端射增益为 5.4 dBi, 天线辐射效率高达 99%, 表明该天线能有效地辐射电磁能量。如图 3 所示, 优化所得的天线共由 8 根枝条组成, 枝条的宽度为 2.24 mm, 各枝条坐标如表 1 所示。为了验证数值仿真的正确性, 本文加工了如图 4 所示天线实物, 并采用 Agilent E8362B 矢量网络分析仪对天线进行了测试, 图 5 给出了 S_{11} 参数仿真结果和测试结果, 测试结果和仿真结果基本吻合。图 6 分别给出了天线工作频率为 5.8 GHz 时, E 平面和 H 平面辐射方向图仿真结果和测试结果。由图可以看出, 天线保持良好的端射特性, 且测试和仿真结果基本吻合。

表 1 天线各枝条的坐标(mm)
Table 1 Coordinates of branches (mm)

No.	start point (x, z)	end point (x, z)
1	(0.00,0.00)	(0.00,15.00)
2	(0.00,1.43)	(-5.07,3.11)
3	(0.00,3.11)	(-0.64,2.46)
4	(0.00,3.11)	(-0.64,2.46)
5	(0.00,1.32)	(5.00,45.00)
6	(0.00,5.13)	(-3.19,4.87)
7	(-0.17,3.78)	(-18.33,36.00)
8	(-2.71,1.41)	(-9.59,-0.00)

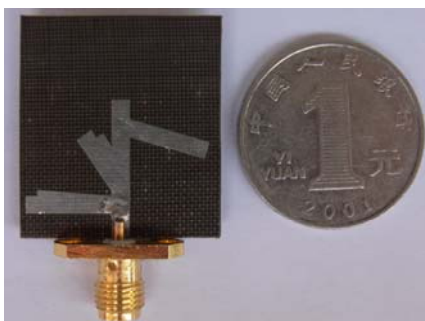


Fig.4 Prototype of the tree-shaped antenna
图 4 树形天线实物图

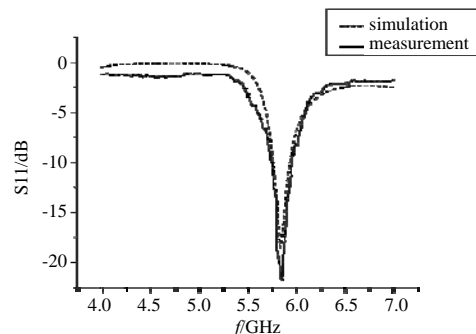


Fig.5 Measured and simulated results of S_{11}
图 5 天线 S_{11} 仿真与测试结果

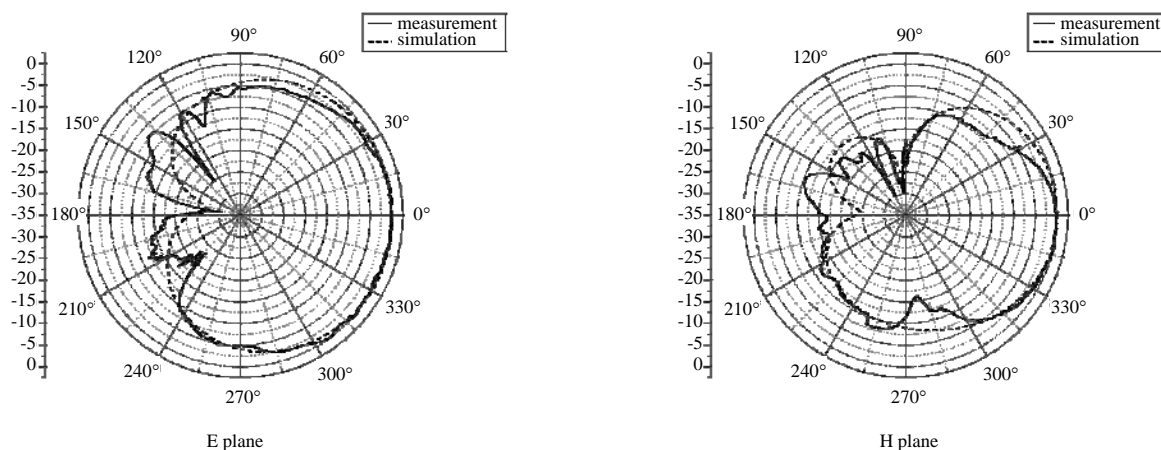


Fig.6 Measured and simulated results of radiation patterns for the antenna

图6 天线辐射方向仿真与测试结果

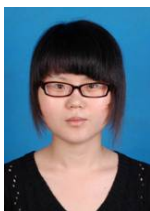
3 结论

本文将自然树生长竞争算法与电磁场数值仿真软件 HFSS 相结合,优化设计了一种新型微带端射平面树形天线。该天线具有尺寸小,重量轻,结构简单,易于加工和馈电的特点,实现了较好的端射性,天线的平面微带结构将使其在无线通信中有良好的应用前景。采用自然树生长竞争算法优化天线,可大大节省设计时间,提高设计精确度。

参考文献:

- [1] Kraus J D. Antennas: For all Applications[M]. 3rd ed. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2008.
- [2] 黄卡玛,赵翔. 电磁场中的逆问题[M]. 北京:科学出版社, 2005. (HUANG Ka-ma,ZHAO Xiang. The inverse problem in electromagnetic field[M]. Beijing:Science Press, 2005.)
- [3] 陈星,黄卡玛. NEC 和非堵塞式主从并行遗传算法应用于天线自动设计的研究[J]. 电子学报, 2004,32(8):1389-1392. (CHEN Xing,HUANG Ka-ma. A study applying NEC and non-blocking master-slave parallel genetic algorithms to automated antenna design[J]. Acta Electronica Sinica, 2004,32(8):1389-1392.)
- [4] 梁宇宏,陈星. 天线自动设计和"天基"系统[J]. 信息与电子工程, 2006,4(6):454-456. (LIANG Hong-yu,CHEN Xing. Automated Antenna Design and "Tian Ji" System[J]. Information and Electronic Engineering, 2006,4(6):454-456.)
- [5] Xing C,Huang K M. Automated design of a three-dimensional fishbone antenna using parallel genetic algorithm and NEC[J]. IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett., 2005,4(8):425-428.
- [6] Linden D S. Automated design and optimization of wire antennas using genetic algorithms[D]. Massachusetts Avenue Cambridge:Massachusetts institute of technology, 1997.
- [7] Lohn J D,Kraus W F,Linden D S. Evolutionary optimization of a ouadrifilar helical antenna[J]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2002,3(16-21):814-817.
- [8] Guo G W,Huang K M. Competition algorithm of natural tree growth and its application in curve fitting[J]. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2007,4(7-8):1301-1304.
- [9] Lu B,Huang K M. Competitive Algorithm of Simulating Natural Tree Growth and its Application in Antenna Design[C]// 2008 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Art of Miniaturizing RF and Microwave Passive Components. Chengdu:[s.n.], 2008:205-208.

作者简介:



成学(1985-),女,江苏省泗阳县人,在读硕士研究生,主要研究方向为算法和天线设计, email:victory_1@yahoo.cn.

黄卡玛(1964-),男,重庆市人,教授,中国电子学会理事,IEEE 高级会员,近年来主要从事电磁场理论、微波化学等方面的研究工作。