

基于 HHO 算法的三频微带天线设计

徐天宇 单志勇

东华大学

DOI:10.12238/acair.v3i2.13562

[摘要] 本文提出了一种基于哈里斯鹰优化算法(HHO)的三频微带天线设计方法,旨在解决传统多频段天线设计中效率低、参数优化复杂的问题。通过结合HHO算法与HFSS电磁仿真软件,对天线的结构参数进行多目标优化,显著提升了天线的回波损耗与阻抗匹配性能。优化后的天线在2.40–2.48GHz、3.4–3.8GHz和5.15–5.83GHz三个频段的最低反射系数分别达到–15dB、–28dB和–20dB,且阻抗带宽覆盖三个目标频段,该方法为多频段微带天线的智能化设计提供了有效解决方案。

[关键词] 三频微带天线; 哈里斯鹰优化算法; 参数优化; 回波损耗; 阻抗匹配

中图分类号: TP301.6 **文献标识码:** A

Tri-band Microstrip Antenna Design Based on HHO Algorithm

Tianyu Xu Zhiyong Shan

Donghua University

[Abstract] In this paper, a tri-band microstrip antenna design method based on the Harris Hawk Optimization (HHO) algorithm is proposed, aiming to solve the problems of low efficiency and complex parameter optimisation in the design of traditional multi-band antennas. By combining the HHO algorithm with the HFSS electromagnetic simulation software, the structural parameters of the antenna are optimized in a multi-objective manner, and the return loss and impedance matching performance of the antenna are significantly improved. The optimized antenna achieves the lowest reflection coefficients of –15 dB, –28 dB and –20 dB in the frequency bands of 2.40–2.48 GHz, 3.4–3.8 GHz and 5.15–5.83 GHz, respectively, and the impedance bandwidths cover the three target bands, the method provides an effective solution for the intelligent design of multi-frequency-band microstrip antennas.

[Key words] tri-band microstrip antenna; Harris Hawk optimization algorithm; parameter optimization; return loss; impedance matching

微带天线因其体积小、成本低、易集成等优点,在无线通信系统中得到广泛应用。然而,多频段微带天线的设计面临两大挑战,一是多个谐振频段的阻抗匹配难以同时优化,二是结构参数与电磁性能之间的非线性关系导致传统试错法效率低下。目前,智能优化算法(如遗传算法^[1]、粒子群算法^[2])已被引入天线设计领域,但仍存在收敛速度慢、易陷入局部最优等问题。

哈里斯鹰优化算法(HHO)是一种基于群体捕猎行为的元启发式算法,通过模拟哈里斯鹰的围攻、追捕和突袭策略,实现了高效的全局搜索与局部开发能力。本文将HHO算法应用于三频微带天线的参数优化中,结合HFSS电磁仿真软件,构建了“算法-仿真”协同优化框架。通过适应度函数的设计,平衡了三频段的S11指标,最终实现了高性能三频微带天线的快速设计。

1 哈里斯鹰算法及联合仿真平台

哈里斯鹰算法^[3]是一种基于群体智能的无梯度优化算法,通过模拟哈里斯鹰捕猎行为构建优化框架:

探索阶段: 采用两种均等概率的探索策略,分别是基于历史位置的静态栖息策略和基于猎物位置信息的动态群体协作策略,实现解空间的全局搜索。

过渡机制: 引入逃逸能量模型驱动阶段转换,逃逸能量系数E由初始随机值E0和迭代衰减函数构成($E=2E_0(1-t/T)$)。跳跃强度 $J=2(1-r)$ 反映猎物动态逃逸能力,当 $|E|>1$ 保持探索,当 $|E|\leq 1$ 触发开发阶段。

开发阶段: 基于猎物状态(逃逸概率 $r\in(0,1)$ 与剩余能量 $|E|$)分别执行四种捕猎策略,如表1所示:

该算法通过能量衰减机制实现探索和开发的动态平衡,利用多模态策略增强局部搜索能力,体现了生物捕猎行为与优化搜索过程的机理映射。

表1 哈里斯鹰算法的四种捕猎策略

状态条件	围捕策略
$r \geq 0.5$ 且 $ E \geq 0.5$	渐进式软包围
$r \geq 0.5$ 且 $ E < 0.5$	强制型硬包围
$r < 0.5$ 且 $ E \geq 0.5$	俯冲强化软包围
$r < 0.5$ 且 $ E < 0.5$	俯冲锁定硬包围

智能优化算法与电磁仿真技术的协同设计框架通过将Python实现的元启发式算法(如HHO)与HFSS自动化流程深度整合,显著提升天线设计效率。其技术流程在于:首先通过算法策略生成初始/迭代种群,并在HFSS中构建参数化天线模型及配置电磁求解参数;随后利用Python接口动态调整天线尺寸参数,驱动联合仿真获取回波损耗、辐射特性等关键数据;接着基于目标函数解析仿真结果生成适应度反馈,形成闭环优化机制;最终采用双重收敛准则(最大迭代100代或最优解停滞10代)动态终止迭代,输出全局最优解。该框架通过算法与仿真实时交互,在确保优化精度的同时降低计算资源消耗,攻克了传统设计自动化不足与效率低下的难题。

2 三频微带天线结构

单极子微带天线^[4]通过将微带辐射贴片枝节作为单极子,并以接地板作为反射面构成。本文设计的三频单极子微带天线如图1所示,其结构包含三个单极子,分别位于微带馈线的左、中、右侧。通过差异化的单极子长度(对应不同谐振频率)实现三频工作。单极子与馈线间的耦合效应易导致工作频段偏移,为此在中间单极子引入矩形槽,并在馈线两侧增设短枝节。矩形槽通过引入容性分量,短枝节通过感性分量补偿天线电抗,从而降低反射系数并扩展阻抗带宽。

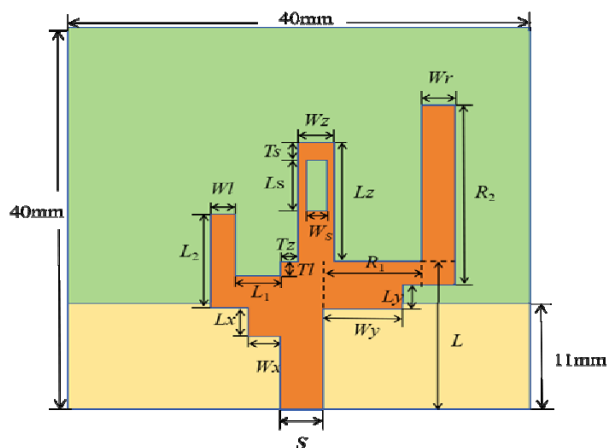


图1 三频微带天线结构图

天线介质层采用R04003材料($\epsilon_r=3.38$, $\tan \delta=0.0027$),下表面为接地板。微带馈线宽度为 S 。左侧单极子含水平段与垂直段,右侧单极子含水平段与垂直段且与左侧单极子的纵向偏移距离为 T_1 。中间单极子尺寸为 $L_z \times W_z$,与馈线横向间距为 T_z ,其矩形槽尺寸为 $L_s \times W_s$,纵向间距为 T_s 。两侧短枝节尺寸分别为 $L_x \times W_x$

和 $L_y \times W_y$ 。该天线拟覆盖2.40~2.483GHz (WLAN)、3.4~3.8GHz (5G中频)及5.15~5.825GHz (WLAN)三频段,对应中心频率2.45GHz、3.6GHz和5.49GHz。基于波长理论,单极子四分之一波长在自由空间中分别为122mm、83.2mm和55mm,在介质中缩短为66.4mm、45.2mm和30mm,但实际长度需通过实验确定以抵消耦合效应。

3 初始尺寸参数及反射系数

根据工作频率和一般状态下单极子的长度,并结合手动调参,得到天线的初始参数取值如表2所示。

表2 天线的初始参数取值

参数	取值(mm)	参数	取值(mm)
S	3.5	Wz	3
L1	3	Tz	1
L2	6.5	Ls	5
W1	2	Ws	1
R1	8	Ts	1
R2	21.8	Lx	3
Wr	2	Wx	1
L	13.4	Ly	1
T1	2	Wy	3
Lz	14		

在初始参数取值下,天线的反射系数(S11)如图2所示,可以看出天线在低频段中心频率2.45GHz处的S11约为-10dB,在中频段(3.4-3.8GHz)的S11均小于-10dB,高频段(5.15-5.825GHz)反射系数过高,基本都在-10dB以上,因此需要调整尺寸参数,降低反射系数。

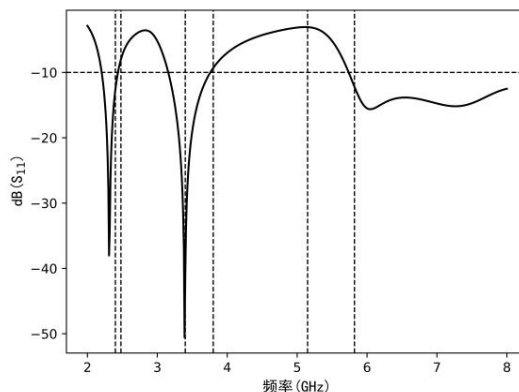


图2 初始参数取值的天线的S11

4 适应度函数和解空间

设计的适应度函数需要包括三频段的反射系数,由于三频段带宽有明显差异,因此在设计适应度函数时要将低频段和中频段的反射系数权重适当调高。为优化三频段S11,采用适应度函数如式(1)所示:

$$Fitness = 6 \sum_{f_1=2.40}^{2.48} S(f_1) + 1.5 \sum_{f_2=3.40}^{3.80} S(f_2) + \sum_{f_3=5.15}^{5.83} S(f_3) \quad (1)$$

其中 $S(f)$ 表示天线工作在频率 f 时的反射系数, 权重系数为

6(低频)、1.5(中频)、1(高频),以强化对窄带反射系数的优化。在初始参数基础上设置参数取值范围,为了避免尺寸冲突并保持相对充分的探索空间,设置参数取值范围如表3所示。

表3 参数取值范围

参数	取值范围(mm)	参数	取值范围(mm)
S	2.5-4.5	Wz	2-3.5
L1	2.5-5	Tz	0.5-2.5
L2	6-8	Ls	1-7
W1	1-3	Ws	0.3-1.5
R1	7-11	Ts	0.5-4
R2	18-24	Lx	0.6-4
Wr	1-3	Wx	0.6-4
L	12-16	Ly	0.6-4
T1	1-3	Wy	0.6-8
Lz	12-16		

5 HHO算法优化结果

将HHO算法的种群数量设置为30,迭代上限为100次, HFSS求解频率范围设置为2-7GHz,频率采样间隔为0.01GHz,之后执行优化过程。图3展示的是当前最优解和迭代次数的关系。当算法迭代54次时,10代内的当前最优解不变,迭代过程停止,最终得到的适应度值为27.45。

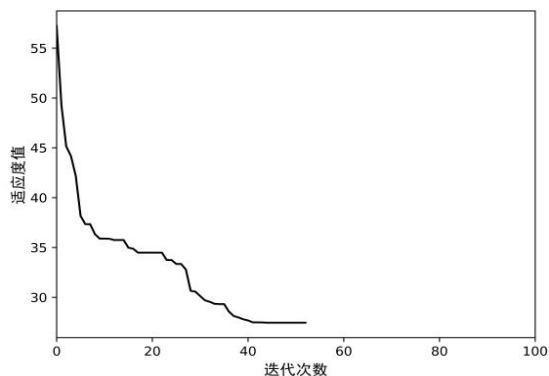


图3 当前最优解和迭代次数的关系

最优解对应的最优参数取值如表4所示:

表4 最优参数取值

参数	取值(mm)	参数	取值(mm)
S	3.359	Wz	2.848
L1	3.857	Tz	1.352
L2	9.301	Ls	5.801
W1	1.462	Ws	0.579
R1	8.992	Ts	3.582
R2	18.779	Lx	1.659
Wr	1.469	Wx	1.614
L	14.538	Ly	1.151
T1	1.251	Wy	6.319
Lz	12.745		

通过Python实现的HHO算法与HFSS电磁仿真软件HFSS的深度协同,构建了高效的天线智能设计范式。如图4所示为优化后天线的S11,相对原天线大大降低,且在三个目标频段上S11均小于-10dB,验证了智能算法在高维电磁优化问题中的实际工程效能。

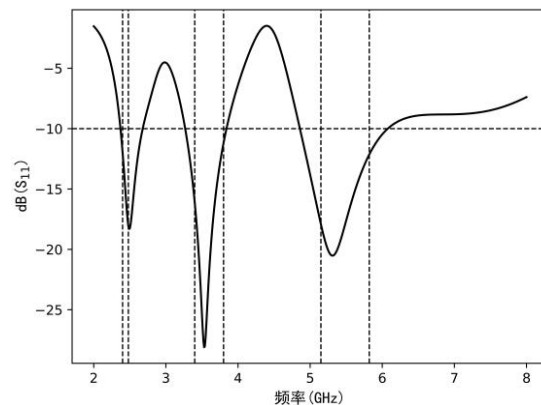


图4 优化后天线的S11

6 结语

本文设计了一种可以工作在三个频段的微带天线结构,之后基于HHO算法和联合仿真平台,设计适应度函数和解空间,自动优化该三频微带天线的结构参数尺寸,最终使得天线在目标频段内的S11大大降低,阻抗带宽同时覆盖三个目标频段。

[参考文献]

[1] LAMBORA A, GUPTA K, CHOPRA K. Genetic Algorithm—A Literature Review[C]//proceedings of the 2019 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing(COMITCon), Faridabad, India, 2019.

[2] SHAMI T M, EL-SALEH A A, ALSWAITI M, et al. Particle Swarm Optimization: A Comprehensive Survey[J]. IEEE Access, 2022, 10: 10031-10061.

[3] HEIDARI A A, MIRJALILI S, FARIS H, et al. Harris hawks optimization: Algorithm and applications[J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 97: 849-872.

[4] 李明洋, 刘敏. HFSS天线设计[M]. 电子工业出版社, 2014.

作者简介:

徐天宇(1999--),男,汉族,安徽亳州人,硕士研究生,研究方向:群智能算法、天线优化。

单志勇(1967--),男,汉族,上海松江人,博士,副教授,通信作者,研究方向:电磁场与微波技术、无线通信、人工智能。