

# 改进鹈鹕优化算法在天线优化中的应用

朱浩 单志勇\*

东华大学信息科学与技术学院, 中国·上海 201620

**摘要:** 针对天线参数优化过程中存在计算复杂度高且在传统扫描方法下效率低的难题, 该文提出一种改进鹈鹕优化算法 (Improve pelican optimization algorithm, IPOA) 用以优化天线。在传统鹈鹕优化算法基础上, 首先通过引入 Tent 混沌映射初始化种群, 利用混沌映射的随机性、规律性和遍历性特点来提升种群多样性; 其次, 在鹈鹕优化算法引入自适应柯西变异策略, 通过周期变化的变步长增强个体向周围探索的能力, 有助于算法跳出局部最优陷阱; 同时融入贪婪原则保留优异个体信息利于种群向食物源收敛。最后将其应用于求解一款圆极化微带天线的性能优化问题, 优化后的天线工作于 2.4~2.66GHz, 阻抗带宽为 260MHz (10.4%), 轴比带宽为 100MHz (4%), 满足设计要求, 该结果验证了 IPOA 在天线优化问题上具有的优越性和工程实用性。

**关键词:** 鹈鹕优化算法; 混沌映射; 柯西变异; 天线优化; 圆极化微带天线

## The Application of Improved Pelican Optimization Algorithm in Antenna Optimization is Studied

Hao Zhu Zhiyong Shan\*

Institute of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai, 201620, China

**Abstract:** To address the challenges of high computational complexity and inefficiency inherent in conventional scanning methods for antenna parameter optimization, this study introduces an Improved Pelican Optimization Algorithm (IPOA). The proposed methodology enhances the conventional Pelican Optimization Algorithm through three key innovations. First, a Tent chaotic mapping mechanism is implemented for population initialization, exploiting the inherent randomness, structural regularity, and ergodic uniformity of chaotic systems to amplify population diversity. Second, an adaptive Cauchy mutation operator with cyclically modulated step sizes is integrated to augment individual exploration capacity, thereby mitigating premature convergence in local optima. Concurrently, a greedy selection criterion preserves elite solutions to accelerate convergence dynamics. The efficacy of IPOA is experimentally validated through the optimization of a circularly polarized microstrip antenna. The optimized prototype demonstrates an operational bandwidth spanning 2.4–2.66 GHz, achieving notable performance metrics: an impedance bandwidth of 260 MHz (10.4% fractional bandwidth) and an axial ratio bandwidth of 100 MHz (4% fractional bandwidth), both satisfying stringent design specifications. These empirical results substantiate IPOA's superior optimization capability and engineering applicability in antenna design applications.

**Keywords:** pelican optimization algorithm; chaotic mapping; cauchy variation; antenna optimization; circularly polarized microstrip antenna

## 0 前言

在传统的天线优化过程中, 需要研究人员使用电磁仿真软件 (如 CST、Ansys HFSS), 根据专业知识和经验积累, 人为地改动天线尺寸以优化天线性能, 从而设计出符合要求的天线; 而面对复杂的天线结构优化问题时, 传统天线优化过程仿真计算量急剧增大, 运行时间变长, 效率低下, 大大消耗研究人员精力<sup>[1]</sup>。

群智能优化算法是一种模拟自然界中生物群体行为特征的优化算法, 具有全局搜索能力强、适应性强、并行性强和易于实现的优点。鹈鹕优化算法<sup>[2]</sup> (Pelican optimization algorithm, POA) 具有收敛速度快, 搜索能力强的特点, 因此使用鹈鹕优化算法对天线进行优化, 理论上有益于提高效率, 节省研究人员精力。

率, 节省研究人员精力。

## 1 原始鹈鹕优化算法

鹈鹕优化算法是以鹈鹕捕猎过程为原型而建立的群智能优化算法。该过程主要由靠近猎物和水面展翼这两种行为构成。鹈鹕个体会在种群不断的更新迭代中向最优解逼近。

### 1.1 种群初始化

该过程将随机生成种群中每个鹈鹕的位置, 表示在问题搜索空间中潜在的可行解, 公式如式 (1) 所示。

$$X=r \odot (X_{ub}-X_{lb}) \quad (1)$$

式中:  $X$  为个体的位置向量,  $X_{ub}$  和  $X_{lb}$  分别为搜索空间的上下界,  $r$  为各元素为 0~1 的随机向量, 上述位置向量维度与问题维度一致。

### 1.2 靠近猎物行为

在这一阶段，鹈鹕会确定猎物的位置，并向该区域靠近。其中，猎物的位置是在搜索空间内随机产生的。该行为的数学表达式如式（2）所示。

$$X_{p1} = \begin{cases} X + r \odot (P - I \cdot X), & F_p < F; \\ X + r \odot (X - P), & \text{else.} \end{cases} \quad (2)$$

式中， $X_{p1}$  表示鹈鹕个体发生靠近猎物行为后的位置； $P$  表示猎物的位置，在搜索空间内随机生成； $I$  表示一个取值为 1 或 2 的随机数； $F_p$  表示猎物位置对应的适应度值， $F$  表示当前个体的适应度值。

同时，个体位置更新令其满足贪婪策略，如果更新后位置对应的适应度优于当前位置，则个体保留此次更新；否则，舍弃本次更新。

该行为提升了个体对不同区域的搜索范围，增强算法的全局搜索能力。

### 1.3 水面展翼行为

在第二阶段，鹈鹕靠近猎物附近的水面时，会展开翅膀将鱼向上推，然后将猎物收集到喉囊中。这种策略使得鹈鹕能捕获攻击区域内更多的鱼。这一行为的数学表达如式（3）所示。

$$X_{p2} = X + R \cdot (1 - \frac{t}{T}) (2 \cdot r - 1) \cdot X \quad (3)$$

式中， $X_{p2}$  为鹈鹕个体进行水面展翼行为后的位置； $R$  为一个常数，等于 0.2； $t$  为当前迭代次数， $T$  为最大迭代次数； $R \cdot (1 - t/T)$  为个体搜索领域的半径大小，该值能显著改变算法的开发能力。

同样，该个体位置更新也令其满足贪婪策略，如果更新后位置对应的适应度优于当前位置，则个体保留此次更新；否则，舍弃本次更新。这一过程增强了局部搜索能力和资源利用效率。

## 2 改进鹈鹕优化算法

### 2.1 混沌初始化策略

由于 POA 算法的种群初始化是随机生成，这样当个体较少时，存在个体不能在搜索空间内均匀分布。因此，论文在原始 POA 算法中引入 Tent 混沌映射<sup>[3]</sup>，使用混沌序列替代原来的随机初始化序列，通过采用混沌初始化策略，依赖混沌序列的随机性、规律性和遍历性特点，可以提高模型对全局最优搜索能力及避免局部最优能力。其数学表示如式（4）所示。

$$X_{n+1} = \begin{cases} r \odot X_n, & 0 \leq x_n < 0.5 \\ r \odot (1 - X_n), & 0.5 \leq x_n \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

### 2.2 自适应柯西变异策略

为了避免算法陷入局部最优陷阱，引入自适应柯西变异策略。在每次迭代过程中，筛选出种群的最优个体和最劣个体，使其进行柯西变异，如果变异个体优于原有个体则保

留。通过该方法可以增强个体向周围探索的能力，有助于算法跳出局部最优陷阱。柯西变异策略的数学表达式如下：

$$X' = X + Rs \cdot C \odot (X_{ub} - X_{lb}) \quad (5)$$

其中， $X, X'$  为种群中执行柯西变异前后相应个体的位置矢量； $X_{ub}, X_{lb}$  为搜索空间的上界和下界； $C$  为服从标准柯西分布的随机因子，标准柯西分布的概率密度函数如式（6）所示。 $Rs$  是自适应步进控制参数，用于控制变异幅度，其数学表达式如（7）所示。

$$f(x; x_0, \gamma) = \frac{1}{\pi \gamma [1 + (\frac{x - x_0}{\gamma})^2]} \quad (6)$$

$$Rs = 0.01 \left| \sin\left(\frac{\pi \cdot t}{0.01 \cdot T}\right) \right| \quad (7)$$

令该参数随种群迭代次数呈周期变化，以平衡种群迭代过程的求解和避免局部最优的能力。

### 2.3 算法步骤

综上，改进的鹈鹕优化算法执行步骤如下：

步骤 1：依据 Tent 混沌序列初始化鹈鹕种群个体，并计算其适应度值；

步骤 2：种群个体执行靠近猎物行为，择优更新至种群；

步骤 3：种群个体执行水面展翼行为，择优更新至种群；

步骤 4：最优个体以及最劣个体执行自适应柯西变异策略，择优更新至种群；

步骤 5：筛选出最优个体；

步骤 6：停止迭代条件判定，输出最优解；如果满足，则停止算法，否则重复步骤 2~ 步骤 6；

步骤 7：返回最优值。

## 3 在天线优化中的应用

基于 IPOA 优化一款圆极化微带贴片天线结构参数。如图 1 所示，该天线模型整体尺寸为 60mm × 60mm × 3mm，相对介电常数 4.4 的 FR4 材料为衬底，工作频率设计为 2.5GHz，馈电方式为单点微带线馈电，通过对上方贴片切角开槽以及在接地面加载圆环状缺陷地结构来获得圆极化性能。该模型待优化参数总计有 13 个，经过在 HFSS 上的初步测试确定了天线结构参数的范围如表 1 所示。

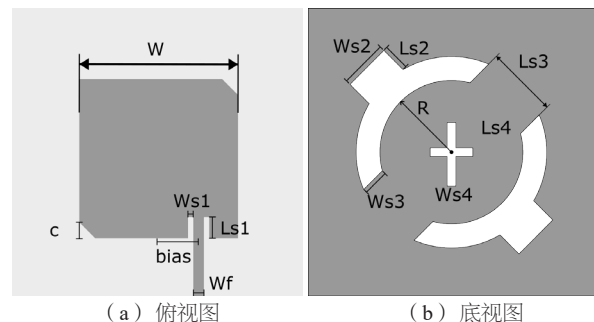


图 1 拟议天线结构图

表 1 天线尺寸边界条件

参数	区间 (mm)	参数	区间 (mm)	参数	区间 (mm)
W	[20,35]	Wf	[1,8]	bias	[-5,10]
Ls1	[0,20]	Ws1	[0,20]	c	[0,10]
Ls2	[0,15]	Ws2	[0,15]	R	[10,25]
Ls3	[0,15]	Ws3	[0,5]	Ls4	[0,10]
Ws4	[0,10]				

为提升天线 2.3~2.5GHz 的性能，使用 IPOA 对天线模型进行优化，种群设置为 30，问题维度等于天线优化参数数量为 13，最大迭代次数设置为 150，当最优值连续 10 代不变时终止迭代。同时，为了使算法能够量化天线性能，建立适应度函数如式 (8) 所示，使用加权和法量化天线阻抗匹配和圆极化性能，将多目标优化问题转换为单目标优化问题。

$$F(X) = \sum_{BW} 5 \max(0, S_{11} + 10) + \max(0, AR - 3) \quad (8)$$

其中， $S_{11}$ 、AR 代表频带 BW 内各采样点 S 参数和轴比。适应度值表示天线性能，值越小表示天线在该频带内的性能表现越好。未平衡算力与精度，本次实验在频带内取 21 个采样点，即每 0.01GHz 采样一次<sup>[4]</sup>，(见图 2、表 2)。

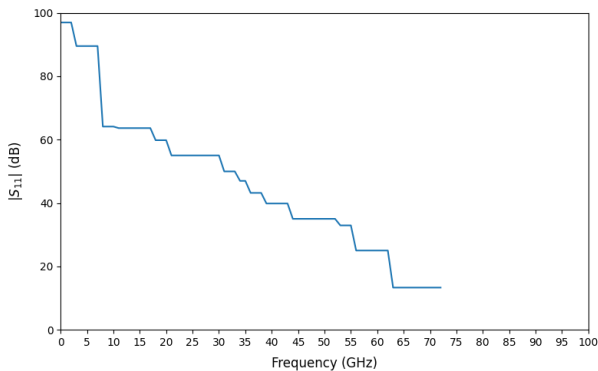


图 2 最优个体的适应度值变化

表 2 优化后的尺寸参数

参数	值 (mm)	参数	值 (mm)	参数	值 (mm)
W	26.28	Wf	5.70	bias	7.00
Ls1	15.02	Ws1	9.05	c	12.10
Ls2	8.32	Ws2	8.65	R	14.65
Ls3	4.15	Ws3	2.05	Ls4	9.54
Ws4	1.60				

对应的天线在 HFSS 上的仿真结果如图 3 所示。天线的工作频率为 2.4~2.66GHz，阻抗带宽为 260MHz (10.4%)，轴比带宽为 100MHz (4%)。算法优化结果基本满足设计要求。

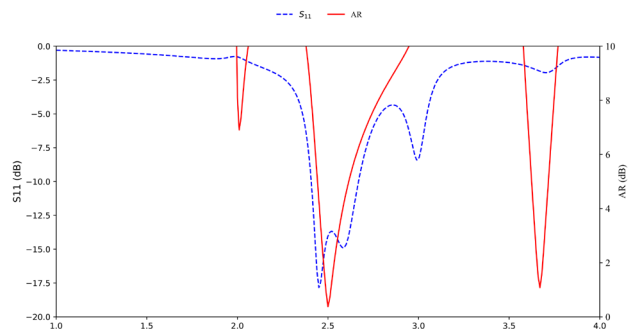


图 3 天线优化结果

### 4 结语

论文提出了一种改进的鹌鹑优化算法 (IPOA)，通过引入 Tent 混沌映射和自适应柯西变异策略结合，使鹌鹑优化算法的全局探索能力和局部开发能力得到提升。最后将 IPOA 应用于一种圆极化微带贴片天线的结构优化问题，验证了 IPOA 在天线优化问题的适用性和可靠性。

### 参考文献:

- [1] XU Xiaoxian, XU Pengying, WANG Yan, et al. Intelligent design of reconfigurable microstrip antenna based on adaptive immune annealing algorithm[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022(71):1-14.
- [2] TROJOVSKÝ P, DEHGHANI M. Pelican optimization algorithm: a novel nature-inspired algorithm for engineering applications[J]. Sensors, 2022, 22(3):855
- [3] 刘秉玄, 马剑龙, 吕文春, 等. 基于混沌映射和动态协同机制的风力机翼型气动性能综合优化[J]. 太阳能学报, 2025, 46(1):17-24.
- [4] 张少丰, 李书琴. 引入精英反向学习和柯西变异的混沌蜉蝣算法[J]. 计算机工程与设计, 2024, 45(1):187-196.

作者简介: 朱浩 (2000-), 男, 硕士, 从事群智能算法、天线优化研究。

通讯作者: 单志勇 (1967-), 男, 博士, 副教授, 从事电磁场与微波技术、无线通信、人工智能等研究。