

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407403

基于 DE-GA 算法的阵列天线故障检测方法*

南敬昌^{1,2} 陈鑫^{1,2} 严洁^{1,2}

(1. 辽宁工程技术大学电子与信息工程学院 葫芦岛 125105;

2. 辽宁省无线射频大数据智能应用重点实验室 葫芦岛 125105)

摘要:为提高阵列天线故障检测的精度,提出了一种改进差分-遗传(DE-GA)算法。该算法融合了遗传(GA)算法和差分进化(DE)算法,在基因遗传过程中采取染色体双交叉策略,对陷入局部陷阱的个体信息进行重新引导;利用自适应权重优化后代的选择过程,提高算法对故障因子的灵敏性和适应能力。本文将该算法用于阵列天线的故障检测中,通过阵列公式建立天线的模型,对该模型的辐射方向图进行优化,使其与故障天线的已知辐射方向图逐渐拟合,以此推出故障阵列幅值。实验表明,本文提出的 DE-GA 算法与 DE 算法、GA 算法相比,适应度函数值最低点分别减小了 11.15% 和 12.90%,平均绝对误差分别减小了 19.36% 和 23.85%,均方误差分别减小了 12.90% 和 11.15%,最大误差分别减小了 12.30% 和 13.18%,具有更高的准确率,拟合能力更强。此外,在原有实验的基础上改变阵列的数量,该算法依然具有优良的稳定性,证明能够满足对大数量阵列的故障检测。

关键词: 阵列天线;故障检测;DE-GA 算法;双交叉策略;自适应权重

中图分类号: TP391.5;TN99 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5099

Array antenna fault detection method based on DE-GA algorithm

Nan Jingchang^{1,2} Chen Xin^{1,2} Yan Jie^{1,2}

(1. School of Electronic and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;

2. Liaoning Key Laboratory of Radio Frequency and Big Data for Intelligent Applications, Huludao 125105, China)

Abstract: To improve the accuracy of fault detection in array antenna, an enhanced differential evolution-genetic algorithm (DE-GA) is proposed. This algorithm combines the advantages of genetic algorithm (GA) and differential evolution (DE) by employing a dual crossover strategy to help individuals escape local optima. An adaptive weighting mechanism further optimizes offspring selection, enhancing the algorithm's sensitivity and adaptability to fault conditions. Applied to array antenna fault detection, the DE-GA algorithm models the array and optimizes its radiation pattern to match the known faulty pattern, allowing the faulty array's amplitude to be estimated. Experiments show that compared with DE and GA, DE-GA reduces the fitness function value by 11.15% and 12.90%, the mean absolute error by 19.36% and 23.85%, the mean square error by 12.90% and 11.15%, and the maximum error by 12.30% and 13.18%. This demonstrates higher accuracy and improved approximation capabilities. Additionally, the algorithm maintains excellent stability with larger arrays, making it suitable for large-scale fault detection.

Keywords: array antenna; fault detection; DE-GA algorithm; dual crossover strategy; adaptive weighting

0 引言

近年来,阵列天线作为无线通信领域的一项核心技术

术,在雷达、广播、声纳等多个领域发挥着至关重要的作用。然而,复杂的电磁环境和辐射体极易导致天线的构成单元发生故障,这些故障的存在会引起方向图失真、增益下降、旁瓣和纹波电平升高等问题,从而严重影响天线

性能和通信质量^[1-2]。因此,有效检测故障数量与精确检测故障位置对快速恢复天线性能具有重要意义^[3-4]。

在阵列天线故障检测技术的早期发展中,研究者们尝试建立阵列单元激励与辐射近场之间的矩阵关系,想通过求解逆矩阵来恢复激励,以实现故障检测^[5-6]。然而,这通常需要大量测量数据才能准确检测故障,这对于早期研究者来说是无法实现的。为了减少所需数据量,研究者们提出基于压缩感知^[7-9]的故障检测方法,该方法的核心是通过保持激励向量的稀疏性来达到减少测量次数的目的。在此基础上,研究者们提出利用差分阵列^[10]、随机傅里叶^[11](random Fourier features, RFF)、评估相位检索^[12]、非凸优化(non-convex optimization, NCO)以及 L1/L2 正则化^[13]等多种技术,这些方法有效降低了算法的重构误差,得到广泛运用。王芳芳等^[14]以相位为研究对象,通过相位误差矩阵来构建天线正向模型,然后交替迭代求解误差矩阵和阵元激励。熊灿^[15]提出一种基于压缩感知的相控阵天线失效单元诊断方法,通过对相位域的辐射场进行数据采样以重构单元激励,可以灵活地对相位进行调控。许煜辉^[16]通过融合正交匹配追踪算法(orthogonal matching pursuit, OMP)和贝叶斯压缩感知算法(bayesian compressive sensing, BCS),挖掘含有失效阵元的先验信息,构造对应的先验模型,得到质量更优的诊断算法。

随着人工智能技术发展成熟,基于智能算法的故障检测方法也取得显著进展。高嘉鹏^[17]提出一种基于多任务神经网络的考虑阵列误差的失效阵元诊断方法,采用辐射补偿的方法来提高预测的准确率,并提出区间分析来辅助网络训练来减少频率误差的影响。郑国亮^[18]建立一种基于深度学习的阵列天线故障检测模型,尝试将残差神经网络(residual neural network, ResNet)用于平面阵列的信噪比的预测。胡亚捷^[19]针对采样问题提出基于骨骼化采样的平面阵列诊断方法,并将其运用在双卷积神经网络诊断模型,分别得出幅度与相位信息,得到性能优秀的模型。

神经网络的加入提高了阵列天线故障检测的效率,但在训练过程中需要消耗大量的时间和硬件资源^[11-20]。为了克服这些限制,启发式算法(meta-heuristic algorithm, MHA)重新出现在研究者的视野。Zainud-Deen 等^[1]改进粒子群算法(particle swarm optimization, PSO),用于线性阵列天线中失效元素的检测和校正,以降低计算成本并提高检测精度。Zhao 等^[21]提出一种改进灰狼优化算法(grey wolf optimizer, GWO),通过利用 logistic-tent 双映射生成初始化种群,提高了全局搜索能力和收敛速度。Mitra 等^[20]提出一种新的非均匀激励天线故障检测方法,采用进化算法优化激励,得到拟合度最高的辐射方向图。通过现有研究可知,阵列天线的故障检测是多目标

的优化问题,传统算法无法同时处理离散数据与连续周期数据,这导致优化的结果无法让人信服。

为了进一步提升阵列天线故障检测的效率和准确性,本研究提出一种融合差分进化(differential evolution, DE)算法和遗传(genetic algorithm, GA)算法的差分-遗传(differential evolution-genetic algorithm, DE-GA)算法。通过利用 DE-GA 算法全局优化辐射方向图,直到与参考故障方向图拟合,然后比较不同辐射方向图与实际辐射方向图之间的差异,反推出单元幅度大小,实现故障定位。该方法可以有效地应对复杂的优化问题,并展示出卓越的全局搜索能力。

1 故障诊断策略

1.1 优化策略

DE 算法^[20]和 GA 算法都是模拟生物进化过程的智能搜索优化算法。DE 算法在处理连续参数的优化问题时,采用实数编码,能够更直接有效地处理连续值。但在解空间巨大的情况下,DE 算法需要多次迭代次数以逼近全局最优解。相比之下,GA 算法采用多种编码策略,能够解决包括离散和连续问题在内的各种优化问题。因此采用的优化策略融合了 DE 算法和 GA 算法,DE 算法的全局搜索能力可以快速定位到全局最优解的可能区域,GA 算法通过交叉和变异操作增加了种群的多样性,强化了局部搜索效果,实现了解的细致调整。通过引入自适应参数调整机制,算法可以根据迭代过程中的结果动态调整参数。这不仅加速了算法的收敛,还提高了解的质量,从而有效地提升了故障检测的准确率。DE-GA 算法流程如图 1 所示。

1) 突变基因产生。在种群成熟过程中,DE 算法执行前半部分的迭代。在每一代中,随机选择 3 个不同的个体 a, b, c 生成一个突变个体 v , 如式(1)所示。

$$v_i^{(Gen+1)} = x_a^{(Gen)} + F \cdot (x_b^{(Gen)} - x_c^{(Gen)}) \quad (1)$$

式中: $x_a^{(Gen)}, x_b^{(Gen)}, x_c^{(Gen)}$ 是从种群中随机选取的 3 个互不相同且与 v_i 不同的个体。 F 是差分权重,用于控制变异的幅度, Gen 是迭代次数。

2) 染色体交叉。通过交叉操作生成实验个体 u , 如式(2)和(3),如果 u 适应度比当前个体更好,就用 u 代替当前个体。遗传算法执行后半部分的迭代,交叉操作通过随机选择交叉点,将两个父代个体的部分基因组合生成子代,在交叉过程中,不但有父代之间的基因组合,还有父代与新生成子代的基因组合,这一操作使得父代基因得到及其完整地保存。

$$u^1 = x^1(1:p) + x^2(p:N) \quad (2)$$

$$u^2 = x^2(1:p) + x^1(p:N) \quad (3)$$

式中: p 是在 $(1:N)$ 随机选择的交叉点, $x^1(1:p)$ 是在 x^1

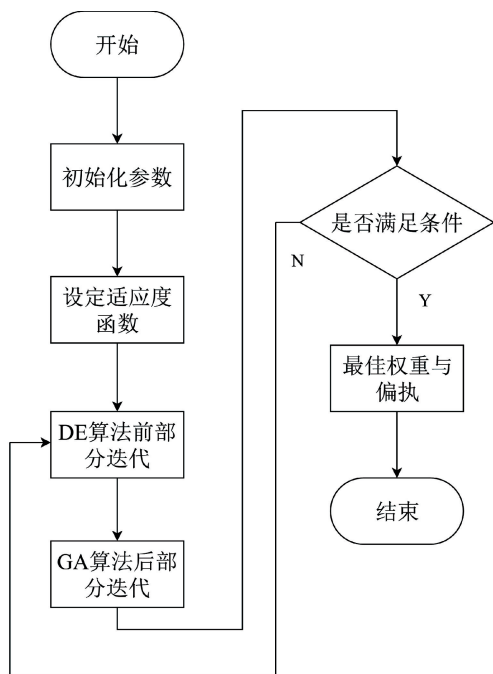


图 1 DE-GA 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of DE-GA algorithm

染色体上 $(1:p)$ 范围内的全部基因, $x^1(p:N)$ 是 x^1 染色体上的 $(p:N)$ 范围内的全部基因。

3) 突变基因选择。变异操作通过随机改变个体的某些基因, 如式(4)所示。

$$w_i = v_i(\text{rand}(1) < CR) \quad (4)$$

式中: $\text{rand}(1)$ 是区间内的随机数, CR 是变异概率, v 是发生突变的个体。

最后, 通过选择操作保持种群大小不变, 只保留最适应的个体 w , 每次迭代后, 评估当前所有个体的适应度, 并记录最佳适应值。

1.2 检测策略

故障检测的核心是适应度函数 $Fitness$ 的求解。首先, 计算出阵列天线的模拟故障辐射方向图与实际故障辐射方向图之间的欧式距离, 判断最终优化权重是否小于权重阈值, 若小于权重阈值, 将数组状态赋值为“0”, 否则, 将数组状态赋值为“1”。然后, 计算出优化后的天线的模拟故障辐射方向图, 与实际故障辐射方向图进行比较, 求解误差, 进行判决。若误差为 0, 保持当前阵列数组的状态, 否则, 减小权重, 返回权重比较。最后, 根据阵列数组中“0”确定故障发生的单元数量以及位置。

2 故障检测模型在阵列天线中的仿真

2.1 阵列天线的故障定义

模型将天线的故障是指导致天线性能降低的异常情

况, 包括完全失效、性能衰减、阵列不匹配等。实验中所采用的阵列天线数据来自故障天线数据, 在 MATLAB 中使用线阵列天线的单元数, 间距, 波束角以及归一化激励幅度来对故障天线进行建模。

2.2 阵列天线故障检测过程

步骤 1) 初始化。定义元素数 N 、元素间距 d 和波束转向角 θ 以及 DE-GA 算法的特定参数 (如交叉概率、变异概率等) 以及电磁场的基本参数。

步骤 2) 生成实际辐射公式。通过切比雪夫窗函数和天线阵列的几何参数生成参考辐射模式表达式为:

$$E(\theta) = \sum_{n=1}^N IW_n e^{j \cdot (k \cdot \lambda \cdot X_n \cdot \sin(\theta) + \alpha_n)} \quad (5)$$

式中: $E(\theta)$ 表示在 θ 角度下的辐射强度, θ 是从 $-\frac{\pi}{2} \sim \frac{\pi}{2}$ 的角位置, N 是天线阵列中的单元总数, IW_n 是 n^{th} 天线单元的切比雪夫窗权重, k 是波数, λ 是波长, X_n 是 n^{th} 天线单元的位置, α_n 是 n^{th} 天线元素的初始相位。

步骤 3) 推导天线故障公式。对于非均匀激励线性天线阵列, 算法所使用的阵列因子表达式为:

$$E(\theta)_{\text{faulty}} = \sum_{n=1}^N b_n e^{j \cdot (k \cdot \lambda \cdot X_n \cdot \sin(\theta) + \alpha_n)} \quad (6)$$

式中: $E(\theta)_{\text{faulty}}$ 是阵列天线的模拟故障模式, b_n 是 n^{th} 天线单元的归一化激励幅度权值, 对于故障单元为零, 对于非故障单元为非零值。

步骤 4) 适应度迭代。线阵列天线中波束转向角不发生改变, 模拟故障模式与参考模式的二范数可以简化为二者之间单元的距离, 适应度函数表达式为:

$$Fitness = \sum_{i=1}^M |E(\theta)_{\text{faulty}} - E(\theta)| \quad (7)$$

式中: $Fitness$ 是迭代度函数, 用来衡量故障与正常模式之间的差异, M 是 $\theta = -\frac{\pi}{2}$ 和 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 之间的样本个数。

步骤 5) 二值判决。通过步骤 4) 得到优化参数的最大最小值, 定义阈值, 进一步对数组元素状态进行二进制表示, 如式(8)所示。

$$E(\theta)_{\text{bin}} = \sum_{n=1}^N AN(n) \cdot b'_n e^{j \cdot (k \cdot \lambda \cdot X_n \cdot \sin(\theta) + \alpha_n)} \quad (8)$$

式中: $E(\theta)_{\text{bin}}$ 是二进制序列的数组因子, $AN(n)$ 和 b'_n 分别是天线阵列状态和 n^{th} 阵列单元的正确激励权值。

阵列状态是 0 或者 1, 分别表示故障单元和非故障单元。最优权重小于阈值, 数组状态赋值为“0”, 否则, 赋值为“1”。赋值结果需要经历误差检测, 误差公式为:

$$\text{error} = \text{sum}(\text{abs}(E(\theta) - E(\theta)_{\text{bin}})) \quad (9)$$

式中: sum 是求和函数, abs 是绝对值函数。

相应地, 误差非 0, 则减小权重, 返回步骤 4), 直到天线的所有数组因子误差都为 0, 检测过程结束, 天线的故

障检测流程如图 2 所示。

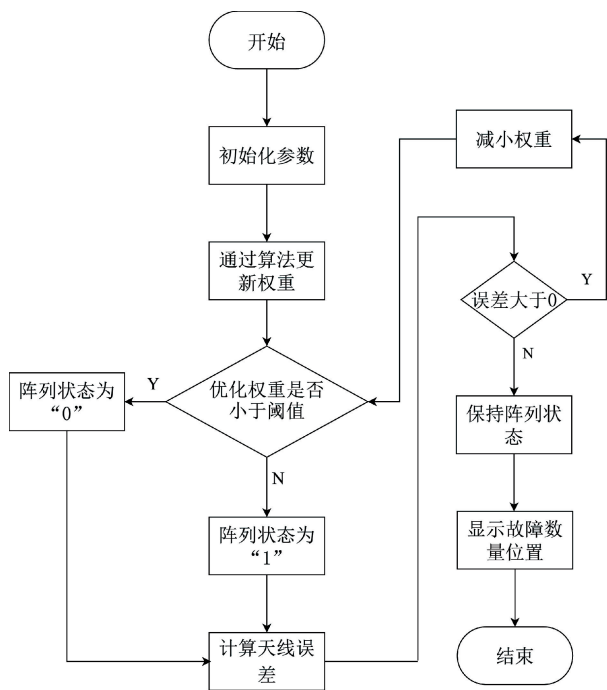


图 2 DE-GA 算法的故障检测流程图
Fig. 2 Fault detection flow chart of the DE-GA algorithm

3 实验结果与分析

在此优化问题中,目标是找出收敛最低点对应的值。值越小,表示找到的解与实际故障之间的差异越小。3 种算法的收敛结果如图 3 所示。可以看出,DE 算法和 GA 算法的收敛曲线在迭代 20 次以后变得趋于平缓,之后缓慢收敛,在 60 代左右收敛至最低点。经过融合后的 DE-GA 算法收敛效率明显提升,在中期就达到 GA 算法的收敛值,继续迭代后到最低点。最终结果为 DE-GA 算法最低点为 144.899 1,其次 GA 算法最低点为 163.083 3,DE 算法最低点为 166.354 8。由此可以看出本文提出的融合算法性能优于 DE 算法和 GA 算法。

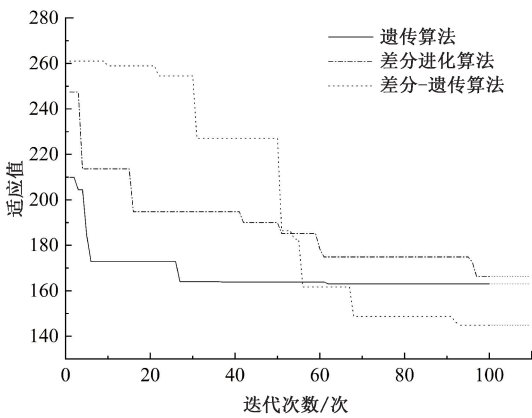
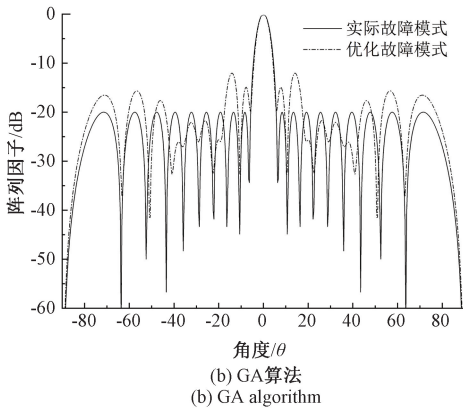
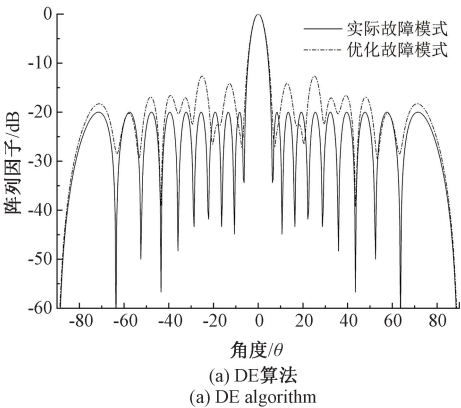


图 3 3 种算法的优化过程
Fig. 3 The optimization process of the three algorithms

图 4(a)~(c)为本文提出的算法与 DE 算法、GA 算法对故障天线辐射方向图的拟合曲线,图 4(d)为 Dolph-Chebyshev 空白对照曲线,即实际故障天线辐射方向图。可以看出,在主瓣附近,DE-GA 算法的拟合曲线几乎与实际结果几乎一致,而 DE 算法和 GA 算法的拟合曲线与实际结果相差太大。由表 1 也可得出,本文提出的方法检测出来的故障单元最接近实际故障情况,说明该方法拟合精度更高,鲁棒性更好。

表 1 3 种算法的检测结果		
Table 1 Detection of the three algorithms		
算法	故障单元	结果
DE	2 nd 、3 rd	未检测 4 th 、7 th 、19 th , 误检 3 rd
GA	2 nd 、7 th 、14 th	未检测 4 th 、19 th , 误检 14 th
DE-GA	2 nd 、4 th 、7 th	未检测 19 th
实际情况	2 nd 、4 th 、7 th 、19 th	-

表 2 更直观地从平均绝对误差 (MAE)、均方差误差 (RMSE) 和最大误差的拟合来比较各算法间的差距。从表中数据可知,DE-GA 算法的 MAE 比 DE 算法低 19.36%,比 GA 算法低 23.85%;DE-GA 算法的 RMSE 比



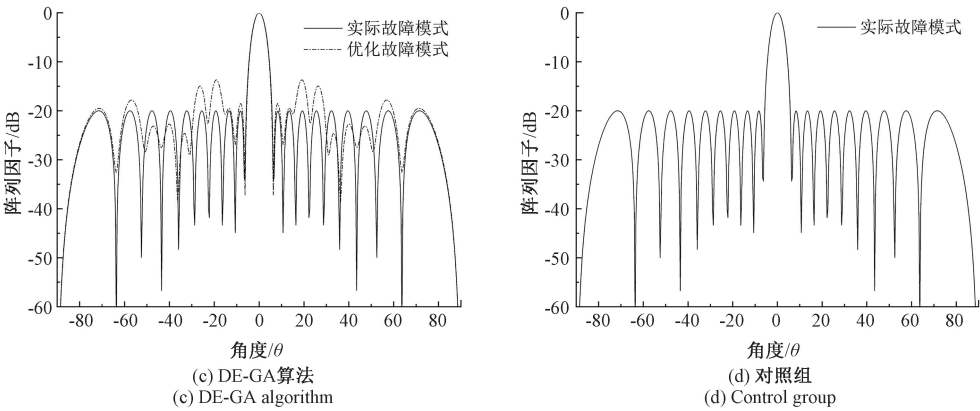


图 4 3 种算法的拟合曲线及其 Dolph-Chebyshev 综合曲线

Fig. 4 Fitting curves of the three algorithms and their Dolph-Chebyshev composite curves

DE 算法低 12.90%，比 GA 算法低 11.15%；DE-GA 算法的最大误差比 DE 算法低 12.30%，比 GA 算法低 13.18%。综上，所提出的故障检测方法对比 DE 算法和 GA 算法小幅度领先，可以提高对天线故障检测的准确性。

表 2 3 种算法性能指标

Table 2 Performance indicators of the three algorithms (%)			
算法	MAE	RMSE	最大误差
DE	19.36	12.90	12.30
GA	23.85	11.15	13.18

为了降低实验的偶然性，在处理大规模阵列天线的时候需采用类比实验求证。在类比实验中，将 DE-GA 算法用于其他 4 款天线的故障检测。图 5 为 5 款天线的优化过程，从 12 单元天线到 28 单元天线优化最低点依次为 128.985 4、140.190 4、144.899 1、159.482 7 和 158.527 3。与此同时，图 6(a) ~ (d) 所示 4 款天线的拟

合曲线也比较吻合实际辐射方向图。综上，增加阵列单元，基于 DE-GA 算法的故障检测技术依旧表现出优良的鲁棒性和泛化能力，初步推测该方法可推广至更多元阵列天线中。

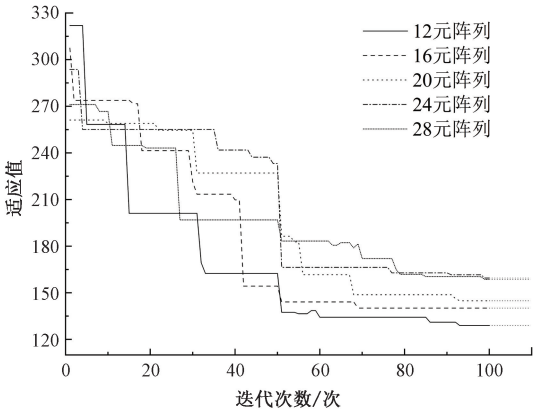
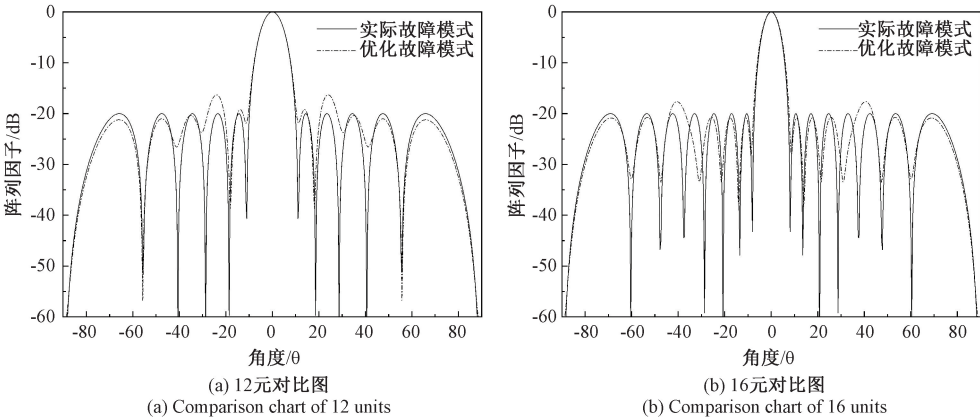


图 5 5 款天线在 DE-GA 算法中的优化过程

Fig. 5 The optimization process of five antennas in the DE-GA algorithm



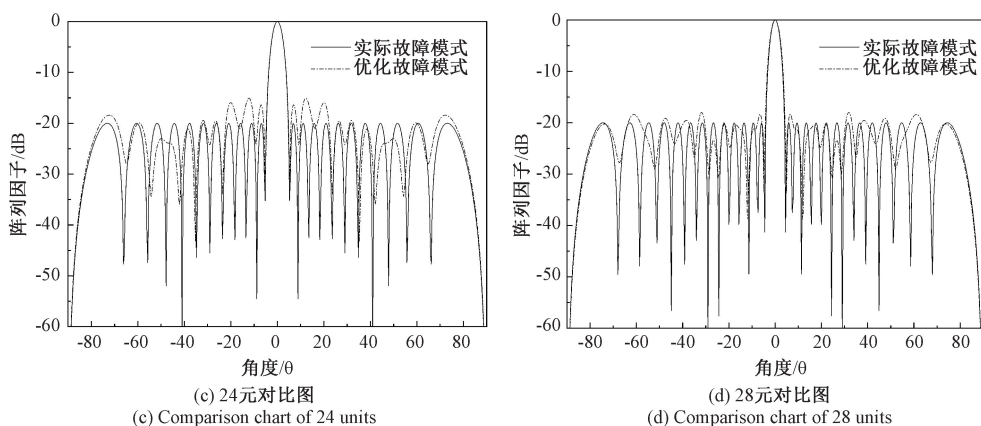


图 6 4 款天线经过 DE-GA 算法优化后的拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of the four antennas optimized by the DE-GA algorithm

4 结 论

在基于智能搜索算法的故障检测方法中,个体陷入局部陷阱往往是最糟糕的情况,尽管适应值到达一个较小值,也无法将它认作最优结果。针对这一问题,本文提出了一种差分-遗传算法。该算法在遗传算法的交叉环节中保证父代染色体与子代染色体也能进行交叉,扩展了种群多样性。同时,差分进化特有的自适应机制用于幅值权重的分配,优化了传统算法对多优化目标问题的处理速度和处理精度,提高了算法的收敛效率。

综上,将引入自适应机制后的智能搜索算法用于阵列天线的故障检测后,拓宽了阵列天线故障检测技术的探索道路,为阵列天线的实时故障检测提供了一个有效的手段。未来的研究方向将探索应用于大规模阵列天线的故障检测方法。

参考文献

- [1] ZAINUD-DEEN A S, MALHAT H A, BADWAY M M, et al. Detection and correction of faulty patterns in four-dimensional antenna linear array using partiale swarm optimization[C]. Proceedings of the 38th National Radio Science Conference (NRSC), 2021: 36-46.
- [2] 姜媛媛, 牛牧原, 陈万利. 基于 IWOA-SVM 的电路软故障诊断 [J]. 电子测量技术, 2022, 45(2): 159-165.
JIANG Y Y, NIU M Y, CHEN W L. Circuit soft fault diagnosis based on IWOA-SVM [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(2): 159-165.
- [3] 赵军, 苏润佳. 一种基于载波相位测量的阵列天线自适应校正技术 [J]. 电子测量技术, 2022, 45(15): 84-89.
ZHAO J, SU R J. An adaptive correction technology for array antennas based on carrier phase measurement [J].

Electronic Measurement Technology, 2022, 45(15): 84-89.

- [4] 苗峻, 窦修全, 聂宏印, 等. 基于阵列天线接收响应幅度修正的干涉仪算法 [J]. 电子测量技术, 2021, 44(24): 47-51.
MIAO J, DOU X Q, NIE H Y, et al. Interferometer algorithm based on array antenna received response amplitude correction [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(24): 47-51.
- [5] 李磊. 一种相控阵列天线幅相误差校准方法 [J]. 通信与信息技术, 2024(4): 39-42.
LI L. A method for calibrating amplitude and phase error of phased array antenna [J]. Communications and Information Technology, 2024(4): 39-42.
- [6] 李川, 伍依凡, 杨帅. 不平衡分布的数据驱动故障诊断的研究进展 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(8): 181-197.
LI CH, WU Y F, YANG SH. Research progress on data-driven fault diagnosis with unbalanced distribution [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(8): 181-197.
- [7] XIONG C, XIAO G B, HOU Y B, et al. A compressed sensing-based element failure diagnosis method for phased array antenna during beam steering [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(9): 1756-1760.
- [8] JIN Y, LI H Y, ZHANG D D, et al. Compressive tracking combined with sample weights and adaptive learning factor [J]. Concurrency and Computation-Practice & Experience, 2018, 30(23): e4398.
- [9] FAMORIJ O J, SHONGWE T. A recovery performance study of compressive sensing methods on antenna array diagnosis from near-field measurements [J]. Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 2021, 36(8): 973-979.

- [10] 韦子辉,蔡大鑫,叶兴跃,等. 基于改进二维 MUSIC 算法的蓝牙信号到达角估计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(10): 157-165.
WEI Z H, CAI D X, YE X Y, et al. Angle of arrival estimation of bluetooth signal based on improved 2D MUSIC algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(10): 157-165.
- [11] MIGLIORE M D. Array diagnosis from far-field data using the theory of random partial fourier matrices [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013, 12: 745-748.
- [12] FUCHS B, LE COQ L. Excitation retrieval of microwave linear arrays from phaseless far-field data [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(2): 748-754.
- [13] CEN Y, ZHANG L N, WANG K, et al. Iterative reweighted minimization for generalized norm/quasi-norm difference regularized unconstrained nonlinear programming [J]. IEEE Access, 2019, 7: 153102-153122.
- [14] 王芳芳,李开敏,张业荣. 无相位测量的阵列天线故障诊断方法 [J]. 电波科学学报, 2023, DOI: 10.12265/j. cjors. 2023262.
WANG F F, LI K M, ZHANG Y R. Fault diagnosis method of array antenna without phase measurement [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2023, DOI: 10.12265/j. cjors. 2023262.
- [15] 熊灿. 基于压缩感知的相控阵天线失效单元诊断方法 [D]. 上海: 上海交通大学, 2021.
XIONG C. Diagnosis method of failed unit of phased array antenna based on compressed sensing [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2021.
- [16] 许煜辉. 基于贝叶斯学习的阵列天线故障诊断方法研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2022.
XU Y H. Research on fault diagnosis method of array antenna based on Bayesian learning [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2022.
- [17] 高嘉鹏. 基于多任务神经网络的考虑阵列误差的失效阵元诊断 [D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
GAO J P. Failure element diagnosis based on multi-task neural network considering array error [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.
- [18] 郑国亮. 基于深度学习的阵列天线诊断方法研究 [D]. 宜昌: 三峡大学, 2022.
ZHENG G L. Research on diagnostic method of array antenna based on deep learning [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2022.
- [19] 胡亚捷. 阵元级和子阵级平面阵列故障诊断方法研究 [D].

成都: 电子科技大学, 2023.

HU Y J. Research on fault diagnosis methods of array element-level and sub-array-level planar arrays [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.

- [20] MITRA S, CHATTERJEE S, CHATTERJEE S, et al. Evolutionary algorithm-inspired binary sequence-based hybrid fault detection method for nonuniformly excited linear antenna array [J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2024, 2024(1): 9976061.
- [21] ZHAO K X, LIU Y, HU K. Optimal pattern synthesis of linear array antennas using the nonlinear chaotic grey wolf algorithm [J]. Electronics, 2023, 12(19): 4087.

作者简介



南敬昌, 分别在 1993 年、2003 年于辽宁工程技术大学获得学士学位及硕士学位, 2007 年于北京邮电大学获得博士学位, 现为辽宁工程技术大学教授, 主要研究方向为射频电路器件、多媒体信息编码、通信系统仿真等。

E-mail: nanjc886@sina.com

Nan Jingchang received his B. Sc. and M. Sc. degree both from Liaoning Technical University of Posts and Telecommunications in 2007, respectively. He is now a professor in Liaoning Technical University. His main research interests include RF circuits and devices, multimedia information coding and communication system simulation.



陈鑫 (通信作者), 2022 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 现为辽宁工程技术大学硕士研究生, 主要研究方向为深度学习与阵列天线等。

E-mail: 2015653719@qq.com

Chen Xin (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2022. He is now a M. Sc. Candidate at Liaoning Technical University. His main research interests include deep learning and array antennas.



严洁, 2022 年于重庆邮电大学移通学院获得学士学位, 现为辽宁工程技术大学硕士研究生, 主要研究方向为认知无线电、异构网络、排队论、无线资源分配。

E-mail: yanjie099046@qq.com

Yan Jie received her B. S. degree from the School of Mobile Communication, Chongqing University of Posts and Telecommunications in 2022. She is now a M. Sc. candidate at Liaoning Technical University. Her main research interests include cognitive radio, heterogeneous networks, queuing theory, wireless resource allocation.