

文章编号: 1000-6893(2002) 02-0180-03

基于小生境遗传算法的分布式 OS-CFAR 检测系统优化与性能分析

王明宇¹, 俞卞章²

(1. 空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

(2. 西北工业大学 电子工程系, 陕西 西安 710072)

OPTIMIZATION AND PERFORMANCE ANALYSIS OF DISTRIBUTED OS-CFAR DETECTION BASED ON NICHE GENETIC ALGORITHMS

WANG Ming-yu¹, YU Bian-zhang²

(1. Missile Institute, AFEU, Sanyuan 713800, China)

(2. Department of Electrical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi an 710072, China)

摘 要: 利用小生境遗传算法, 对不同检测窗长度和检测信噪比的三传感器分布式 OS-CFAR 检测系统进行优化设计, 给出了一组针对不同检测环境与融合方式的搜索结果。分析表明, 对于非一致环境下分布式 OS-CFAR 检测系统, 小生境遗传算法是一种良好的优化算法。利用搜索结果, 研究了不同融合方式下环境变化对分布式 OS-CFAR 检测系统的性能影响, 结果表明, “或”融合对检测环境的非一致变化具有较强的鲁棒性, 而“3 选 2”融合和“与”融合对检测环境的变化比较敏感。

关键词: 遗传算法; 小生境; 非一致环境; 分布式恒虚警检测; 数据融合

中图分类号: TN911, O224 文献标识码: A

Abstract: In this paper, niche genetic algorithms are used to optimize the performance of a distributed 3-sensor OS-CFAR detection system with different reference lengths and signal-to-noise ratios. A set of quasi-optimum results is given and analyzed, which proves that niche genetic algorithms are efficient for this optimization. The influences of the nonidentity in environment on the performance of the distributed OS-CFAR detector for different fusion rules are discussed subsequently. The results indicate that when OR fusion is employed, the system is robust to the nonidentical variety of detection environment, while 2 of 3 and AND fusion are sensitive in the same situation.

Key words: genetic algorithms; niche; nonidentical environments; distributed CFAR detection; data fusion

分布式多传感器的恒虚警检测的研究最初始于 Barkat 和 Varshney^[1], 他们提出了分布式多传感器的检测模型, 并对不同融合规则下单元平均恒虚警(CA-CFAR)检测的性能优化问题进行了较全面的研究。文献[2, 3]对基于有序统计恒虚警(OS-CFAR)的分布式检测进行了一些初步的研究。在 OS-CFAR 检测中由于每个传感器具有 2 个可控门限参数: 序值 k 和加权系数 T , 使得其优化问题要比 CA-CFAR 检测复杂得多, 其性能分析大多局限于某些特殊的限定条件, 如仅有 2 个传感器、各传感器的检测环境一致以及限定部分参数等。但在典型的应用环境下, 分布式系统往往是非一致的, 一方面, 各传感器可能属于不同的类型; 另一方面, 多传感器系统还存在环境的非一致性, 即使是同种传感器, 由于检测环境的不同, 其

对某一特定目标的检测性能也会有所差异。目前, 对于这种非一致环境下分布式 OS-CFAR 检测系统的性能特点与规律还有待于进一步的研究与认识。笔者在以前的工作中利用遗传模拟退火算法, 对较典型的三传感器分布式 OS-CFAR 检测器在各传感器具有不同参考窗长度及检测信噪比等多种条件下的最优门限参数和融合规则进行了优化搜索, 得到了一组在不同检测条件下的准最优结果。本文利用另一种改进的遗传算法: 小生境(Niche)遗传算法^[4], 对同样条件下的三传感器分布式 OS-CFAR 检测器系统进行了优化搜索, 结果表明小生境遗传算法相对遗传模拟退火算法具有更好的收敛稳定性, 其搜索结果更接近最优解。随后, 对不同融合方式下各传感器检测信噪比发生变化时同一系统的检测性能进行了仿真计算, 通过与优化搜索结果进行比较, 研究了环境的非一致性对系统检测性能的影响, 得到了一些有

意义的结果。

1 分布式多传感器 OS-CFAR 检测

每个传感器相互独立, 采用平方律检波且为均匀检测背景的情况下, 各 OS-CFAR 检测器的虚警与检测概率分别为^[2]

$$P_{fm} = \prod_{j=0}^{k_m-1} \frac{N_m - j}{N_m - j + T_m}, \quad m = 1, 2, \dots, n \tag{1a}$$

$$P_{dm} = \prod_{j=0}^{k_m-1} \frac{N_m - j}{N_m - j + \frac{T_m}{1 + S_m}}, \quad m = 1, 2, \dots, n \tag{1b}$$

式中: k_m, T_m, N_m, S_m 分别为第 m 个传感器的门限值、门限加权系数、参考窗长度和信噪比; n 为传感器数目。在给定融合规则 f 的条件下, 融合后的检测概率 P_d 与虚警概率 P_f 由各传感器检测与虚警概率所唯一确定。恒虚警检测的目标就是在限定全局虚警概率 $P_{f0} = P_{f0}$ 的条件下令以下的目标函数取最大值

$$J = P_d((k_1, T_1), (k_2, T_2), \dots, (k_n, T_n)) + \epsilon [P_{f0} - P_f((k_1, T_1), (k_2, T_2), \dots, (k_n, T_n))] \tag{2}$$

式中: ϵ 为 Lagrange 算子。求该式的最大值相当于求解以下的偏微分方程组^[3]

$$\frac{\partial J((k_1, T_1), (k_2, T_2), \dots, (k_n, T_n))}{\partial T_m} = 0, \quad m = 1, 2, \dots, n \tag{3a}$$

$$P_f((k_1, T_1), (k_2, T_2), \dots, (k_n, T_n)) = P_{f0} \tag{3b}$$

n 个传感器分布式 OS-CFAR 检测器的设计问题相当于在每种融合规则下求解 N_1, N_2, \dots, N_n 次偏微分方程组, 其运算量与传感器数目呈指数关系, 常规的搜索算法很难求解。文献[2]在固定 (k_1, k_2, \dots, k_n) 时给出了“与”、“或”两种融合规则下的求解结果; 文献[3]中指出在各个传感器检测条件一致时, “与”、“或”2 种融合规则下最优解对应的 (k_m, T_m) 也是一致的。

2 小生境遗传算法

分析表明, 在给定融合规则的情况下, 多传感器分布式 OS-CFAR 系统的检测概率是一个典型的多峰函数。文献[4]指出, 小生境遗传算法 (Niche Genetic Algorithms) 是一种适用于多峰函数优化的遗传算法。该算法通过借鉴生物界中小生境 (Niche) 这一现象, 能够把群体中的各个个体分散到多个峰, 从而找到更多的局部最优解。用

于分布式多传感器 OS-CFAR 检测系统的优化时该算法描述如下:

(1) 进化代数 $t = 1$ 随机生成含 M 个个体的初始群体 $X(t)$, 每个个体由一种 (k_m, T_m, f) 参数组合的二进制编码组成; 计算每个个体的适应度函数 $y_i = k_F / (1 - P_d + P_f)$, 其中 k_F 为与虚警水平有关的特殊加权系数。

(2) 遗传复制 根据个体适应度大小, 按模拟赌盘操作方法进行比例选择运算, 得到 $X(t)$ 。

(3) 交叉运算 将 $X(t)$ 中的各个个体进行随机配对, 对 $M/2$ 对个体分别进行单点交叉操作, 得到 $X(t)$ 。

(4) 变异运算 对 $X(t)$ 进行均匀变异操作, 得到 $X''(t)$ 。

(5) 小生境淘汰运算 将 $X(t)$ 和 $X''(t)$ 组合成一个含 $M + M$ 个个体的新群体, 并求两两间的汉明距离, 如果该距离小于 1, 则对适应度较小的个体赋以适应度惩罚值 10^{-10} ; 对比较后的 $M + M$ 个个体依据新的适应度进行降序排序, 保留适应度最大的 M 个个体。

(6) 终止条件判断 若不满足终止条件, $t = t + 1$, 将第(5)步得到的 M 个个体作为新的下一代群体 $X(t)$, 转向第(2)步; 若满足终止条件, 则输出最优点, 算法结束。

3 结果与分析

图 1 是典型情况下小生境遗传算法与遗传模拟退火算法最大适应度函数的收敛过程。与遗传模拟退火算法及标准遗传算法相比, 小生境遗传算法具有良好的收敛稳定性。

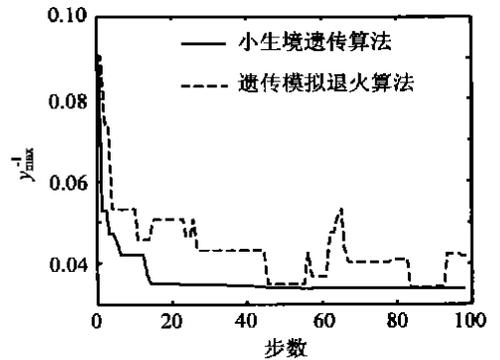


图 1 小生境遗传算法与遗传模拟退火算法的典型收敛过程
Fig. 1 Typical convergent process of NicheGA and genetic simulated annealing algorithms

实际计算中将 3 个传感器的分布式 OS-CFAR 检测按检测条件的不同分为 4 种情况, 每种检测条件下按融合规则的不同分别用小生境遗传

传算法搜索一组最优解。搜索结果如表1所示。

表1 不同检测条件和融合规则下三传感分布式最优 OS-CFAR 检测的搜索结果

($P_{f0} = 10^{-4}$, [] 内为遗传模拟退火算法的搜索结果)

Table 1 The optimum performance of the 3-station distributed detection system under different detection conditions and fusion rules

($P_{f0} = 10^{-4}$, here [] are the results searched by genetic simulated annealing algorithms)

检测条件	“或”融合	“3选2”融合	“与”融合
$N = (32, 32, 32)$ $S = (10, 10, 10)$ dB	$P_d = 0.6813$ [0.6738]	$P_d = 0.6404$ [0.6368]	$P_d = 0.4100$ [0.4084]
$N = (32, 32, 32)$ $S = (7, 10, 13)$ dB	$P_d = 0.7317$ [0.7297]	$P_d = 0.7069$ [0.7028]	$P_d = 0.5865$ [0.5870]
$N = (32, 24, 32)$ $S = (10, 10, 10)$ dB	$P_d = 0.6693$ [0.6679]	$P_d = 0.6347$ [0.6315]	$P_d = 0.4090$ [0.3692]
$N = (32, 24, 32)$ $S = (7, 10, 13)$ dB	$P_d = 0.7214$ [0.7185]	$P_d = 0.6976$ [0.6912]	$P_d = 0.5876$ [0.5862]

由表1结果可以看出,在相同的群体规模和搜索步数条件下,小生境遗传算法的收敛更稳定,在大部分情况下其搜索结果优于遗传模拟退火算法和标准遗传算法,证明小生境遗传算法对本问题的优化是一种更为有效的方法。

在前面的搜索中,假定各传感器的检测条件一致或有已知的变化,但实际应用环境中,各传感器的检测条件往往是随机变化的。下面讨论一定条件下检测条件的变化对分布式检测系统检测性能的影响。假设各传感器参考窗长度一致,其中1个传感器的信噪比和系统平均信噪比(dB)固定为10dB,另外2个传感器的信噪比向2个方向发生等幅漂移。采用表1第1种检测条件下的固定检测器参数,同时利用小生境遗传算法搜索相同条件下的准最优参数。3种融合方式下两种检测器参数的检测概率的计算结果如图2所示。

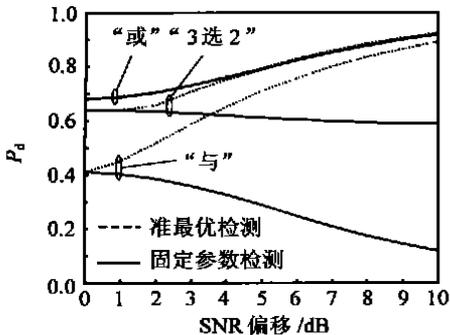


图2 非一致环境下三传感器分布式 OS-CFAR 系统检测性能比较($N = 32, P_{f0} = 10^{-4}$)

Fig. 2 Detection performance of 3-station distributed OS-CFAR system under nonidentical environments ($N = 32, P_{f0} = 10^{-4}$)

“或”融合的检测性能对环境的非一致变化具有良好的鲁棒性,其固定参数与最优检测之间仅存在微小的性能差异。而在“3选2”融合及“与”融合时,固定参数检测对环境的非一致变化敏感,与最优检测之间存在较明显的性能差异。这是因为在“3选2”融合及“与”融合中,检测性能对各传感器的检测条件都有较强的依赖性,某个传感器检测条件的恶化,会导致系统检测性能随之恶化,其中尤以“与”融合最为明显,而在“或”融合中则基本不存在这一问题。

4 结论

本文利用小生境遗传算法,对较典型的3传感器分布式系统在一致与非一致检测条件下进行了优化设计,给出了一组不同检测条件下检测概率的准最优结果,证明小生境遗传算法对解决该问题具有良好的适应性。对不同融合方式下固定参数检测与最优检测的性能仿真计算表明,在各传感器检测条件发生非一致变化时,“或”融合固定参数检测与最优检测的性能差异很小,对检测环境的变化表现出良好的鲁棒性。而在“3选2”融合及“与”融合时,在某种检测条件下设计为最优的检测系统性能会随着环境的非一致变化而迅速恶化。

参考文献

- [1] Barket M, Varshney P K. Decentralized CFAR signal detection[J]. IEEE Trans on AES, 1989, AES-25(3): 141-149.
- [2] Elias-Fuste A R, Broquetas-Ibars A, Antequera J P, et al. CFAR data fusion center with inhomogeneous receivers[J]. IEEE Trans on AES, 1992, AES-28(1): 276-285.
- [3] Uner M K, Varshney P K. Distributed CFAR detection in homogeneous and nonhomogeneous backgrounds[J]. IEEE Trans on AES, 1996, AES-32(1): 84-97.
- [4] 周明, 孙树栋编. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
(Zhou M, Song S D. Genetic algorithms: theory and application [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999.)

作者简介:



王明宇(1968-) 男,山东莒县人,讲师,现在西北工业大学攻读博士学位,主要从事制导雷达总体、多传感器恒虚警检测方面的研究工作。

俞卞章(1937-) 男,浙江嵊县人,教授,博士生导师,主要研究方向包括:雷达信号处理、多传感器分布式检测。

(责任编辑:俞敏)