

DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2019.06.007

基于一种改进的最大类间方差的恒虚警算法^{*}

李 翔, 贾 杰

(南昌航空大学信息工程学院, 南昌 330000)

摘 要: 在背景环境先验信息未知的条件下, 为提高 CFAR 检测器在多目标环境下检测性能, 提出一种基于改进的最大类间方差方法的 CFAR 检测器。将均方差与有序差分思想引入类间方差, 分析改进的最大类间方差的增量值, 由最大增量值处对应的最佳阈值划分出均匀杂波单元与干扰目标单元, 利用均匀杂波单元估计背景噪声功率, 得到检测门限。仿真结果表明, 所提出的算法在均匀环境下 CFAR 损失更小, 检测性能接近 CA-CFAR; 在多目标干扰环境下抗干扰能力更为稳定。

关键词: 最大类间方差; 一阶差分; 均方差; 恒虚警; 目标检测

中图分类号: TN957.51 **文献标志码:** A

Constant False Alarm Detector Based on Improved Maximum Between-cluster Variance

LI Xiang, JIA Jie

(School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330000, China)

Abstract: To improve the detection performance of CFAR detector in multi-target jamming environment, this paper propose a new CFAR based on the improved maximum between-cluster variance, with the unknown prior information of background environment. We introduce the mean square deviation and ordered difference into the between-cluster variance and analyze the increment of the improved maximum inter-class variance. Then in order to estimate the background noise power and get the detect threshold, we make good use of the uniform clutter unit divided by the optimal threshold corresponding to the maximum increment. Simulation results show that the proposed algorithm has smaller CFAR loss which close to CA-CFAR in uniform environment and has more stable anti-interference ability in the multi-target jamming environment.

Keywords: maximum between-cluster variance; first order difference; mean square deviation; constant false alarm; object detection

0 引言

在雷达信息提取之前, 需要进行目标检测。由于实际杂波环境中存在干扰目标, 影响检测过程, 导致检测器性能发生恶化。雷达利用回波信号来探测目标, 而目标周围常常存在各种干扰^[1], 雷达恒虚警检测就是根据背景环境特性和要求选择某种最优检测算法实现目标回波检测。目前为止, 研究人员已提出多种恒虚警技术。单元平均检测算法(CA-CFAR)^[2]在均匀环境下, 检测性能达到最优, 在非均匀环境下, 由于该算法无法有效剔除干扰单元, 检测性能发生严重恶化。为了改善非均匀环境下的检测性能, Trunk 和 Hansen 分别提出最小检测算法(SO-CFAR)^[3]和最大检测算法(GO-CFAR)^[4]。SO-CFAR 能够有效解决多目标干扰引起的目标掩蔽问题, 当前后窗同时存在干

扰时, 检测性能明显下降, 且在均匀环境下存在一定的 CFAR 损失。GO-CFAR 主要针对边缘环境下的目标检测, 当参考单元中存在干扰目标时, 容易引起更大的损失。随后研究人员相继提出有序统计(OS-CFAR)^[5], 删除平均(CMDL-CFAR)^[6]和剔除平均(TM-CFAR)^[7]等算法, 在多目标环境下, 能够有效抑制干扰目标对检测门限估计的影响, 但在均匀环境下, 存在较大 CFAR 损失, 同时背景噪声功率的估计依赖于背景先验信息。

文献[8]提出基于支持向量机的 CFAR 检测。利用参考单元先验数据训练 SVM 模块, 由当前参考单元的变异指数(VI)值产生决策函数, CFAR 模块根据该函数产生适合当前环境的门限值。该算法运用机器学习的方法, 自适应判断环境特征, 给出相应的门限值, 但是训练过程需要大量数据且计算成本较高。

^{*} 收稿日期: 2018-11-06

基金项目: 国家自然科学基金(U1431118); 国家基本项目(61263012); 江西省南昌航空大学研究生创新专项基金(YC2017026)资助

第一作者简介: 李翔(1993-), 男, 安徽滁州人, 硕士研究生, 研究方向: 目标检测。

文献[9]提出删除单元平均 CFAR 算法。该算法利用当前参考单元的临近单元计算该参考单元块的门限值,判断并剔除干扰单元,并及时更新参考单元以及相应的门限值。通过不断遍历更新,能够准确剔除干扰单元,且 CFAR 损失较小,由于算法需要多次重复遍历所有参考单元,计算量较大。文献[10]提出一种改进的均匀杂波提取方法(AD-CFAR)。该方法通过 K 样本 Anderson-Darline 检验的方法实现对参考单元块的分类,剔除存在干扰的单元块中的最大值,并与均匀杂波类合并求出门限值。该算法对杂波单元进行分块处理,计算效率高,均匀环境下 CFAR 损失小。当某一参考单元块中存在多目标时,检测性能出现恶化。文献[11]提出一种基于有序差分的自适应删除单元平均 CFAR 检测器。针对有序参考单元一阶差分后的数据,利用假设检验的方法剔除干扰单元,并用剩余检测单元估计出背景噪声功率。该方法计算简单具有较好的鲁棒性,但是无法剔除小功率干扰,影响检测结果。文献[12]提出一种基于 KL 散度和大津法联合的方法对检测背景进行分类。运用 KL 散度计算出检测单元之间的分布距离,基于最大类间方差方法得到的分割阈值对分布距离进行分类,据此,检测背景被分为均匀区域和非均匀区域。由于该算法依据数据先验分布信息分别计算各个参考单元之间的 KL 散度,并且传统最大类间方差方法(OTSU)对分布距离集合中的边缘值存在错分的情况,导致检测性能难以达到理想状态。

针对上述传统最大类间方差方法的缺点,同时,为了充分利用均匀杂波单元信息估计背景噪声功率,进一步提高多目标环境下 CFAR 检测器的检测性能,文中基于传统最大类间方差方法,引入一阶差分(FOD)和均方差思想,提出基于改进的最大类间方差恒虚警检测算法(FOTSU-CFAR)。同时推导 FOTSU-CFAR 算法门限因子求解表达式。实验对比表明:均匀环境下 FOTSU-CFAR 具有更小的 CFAR 损失;多目标环境下,具有更强的抗干扰能力;杂波边缘环境下虚警控制能力更强。

1 检测模型描述

假设只考虑单脉冲平方律检测,检测包络服从瑞利分布,目标模型为 Swerling II 型^[10],输入到 CFAR 处理器中样本单元统计独立,且服从指数分布。检测单元的假设, H_1 表示有目标存在, H_0 表示仅存在杂波。二元假设检验的概率密度函数(PDF)为:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\mu} \exp(-\frac{x}{\mu}) & H_0 \\ \frac{1}{\mu(1+\lambda)} \exp(-\frac{x}{\mu(1+\lambda)}) & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: μ 是杂波与噪声的总功率; λ 是目标的信噪比; x 表示参考单元随机变量。

均匀杂波环境下,参考单元服从独立同分布,概率分布函数(CDF)为:

$$F(x) = 1 - \exp(-\frac{x}{\mu}) \quad x > 0 \quad (2)$$

2 FOTSU-CFAR 原理

2.1 最大类间方差算法改进

针对小功率干扰,传统的最大类间方差方法会将其错分为均匀杂波单元,影响背景噪声功率的估计,导致检测性能降低。利用均方差值与有序差分的方法对传统最大类间算法改进,能够有效找出最佳阈值,改善小功率干扰错分的情况,提高 CFAR 检测性能。

取参考窗长度为 N ,参考单元分别为 $X = \{x_i | i = 1, \dots, N\}$,设定阈值 T 取值范围为整个参考单元功率值,在取定每个 T 值下,将 X 中元素分别与 T 比较,小于 T 的参考单元组成新样本 S_0 ,大于 T 的组成新样本 S_1 :

$$\begin{cases} x_i \in S_0, n_0 = n_0 + 1, x_i < T \\ x_j \in S_1, n_1 = n_1 + 1, x_j > T \end{cases} \quad (3)$$

给定上述两新样本的均方差分别为 σ_0, σ_1 :

$$\sigma_0 = \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^{n_0} (x_i - \mu)^2 \quad (4)$$

$$\sigma_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{j=1}^{n_1} (x_j - \mu)^2 \quad (5)$$

在类间方差表达式中,以样本均方差替换均值差的平方,则样本 S_0, S_1 改进的类间方差表示为:

$$g = w_0 \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^{n_0} (x_i - \mu)^2 + w_1 \frac{1}{n_1} \sum_{j=1}^{n_1} (x_j - \mu)^2 \quad (6)$$

式中: w_0, w_1 分别表示样本 S_0, S_1 中元素个数占总样本 X 的比例; μ 表示总样本 X 功率均值。

将阈值 T 遍历参考单元功率值,根据上式得到相应阈值下的类间方差 g ,并按升序排序:

$$\bar{g} = [g(1) \leq g(2) \leq \dots \leq g(N)] \quad (7)$$

对排序后的类间方差做一阶差分处理:

$$\bar{G}_{N-1} = [g(i+1) - g(i) \quad i = 1, \dots, N-1] \quad (8)$$

由于 T 的值与类间方差 g 一一对应,对上述改进的类间方差 g 的增量 \bar{G}_{N-1} 进行分析, \bar{G}_{N-1} 最大值所对

应的 $g = (i + 1)$ 即为最佳阈值 T_k 所对应的方差值, 由找出的最佳阈值 T_k 将参考单元划分出均匀杂波单元与干扰目标单元。

2.2 估计背景功率

利用参考单元与由上述过程得到最佳阈值 T_k 比较, 得到两个新的单元样本 \bar{S}_0, \bar{S}_1 :

$$\begin{cases} \bar{S}_0 = \{x_i | X > T_k\} \\ \bar{S}_1 = \{x_i | X < T_k\} \end{cases} \quad (9)$$

式中: \bar{S}_0 表示均匀杂波单元; \bar{S}_1 表示存在干扰的参考单元; X 表示参考单元。剔除样本 \bar{S}_1 , 利用样本 \bar{S}_0 包含的参考单元估计背景噪声功率:

$$Z = \frac{1}{L} \sum_{i=r}^s x(i) \quad (10)$$

3 门限因子的确定

当 K 个干扰目标位于不同的参考单元时, 利用文中算法将干扰目标剔除后, 整个滑窗被划分成 $(K + 1)$ 个不连续子滑窗, 对这些子滑窗不改变各自位置前提下依次进行前后衔接, 形成新的均匀参考单元。每个子滑窗中包含的参考单元服从统计独立且同分布, 背景噪声估计表示为:

$$Z = \sum_{j=1}^{K+1} A_j \quad (11)$$

根据矩母函数的性质 Z 矩母函数(MGF)为:

$$\phi_Z = \prod_{j=1}^{K+1} \phi_{A_j} \quad (12)$$

由于每个部分内部参考单元是均匀的, 故 OTSU-CFAR 检测器的虚警概率表示为:

$$P_{fa} = \prod_{j=1}^{K+1} \phi_{A_j}(u) \Big|_{u=\alpha/\mu} = \prod_{j=1}^{K+1} \left(1 + \frac{\alpha}{N_j}\right)^{-N_j} \quad (13)$$

式中: A_j 表示第 j 个子滑窗估计的背景功率; ϕ_{A_j} 表示 A_j 的矩母函数; N_j 表示第 j 个子滑窗内参考单元数目。门限因子 α 可由上式求得。

4 性能仿真分析

在 MATLAB 环境下, 利用 Monte-Carlo 多次实验的方法, 对提出的 FOTSU-CFAR 算法在均匀环境、多目标干扰环境和杂波边缘环境下的检测性能进行仿真分析。本次实验设定目标类型为 Swerling II 型; 仿真次数 $M = 10^5$; 参考窗长 $N = 36$; 在均匀环境和多目标干扰环境下的虚警率 $P_{fa} = 10^{-6}$ 。

4.1 均匀环境下检测性能仿真分析

图 1 为均匀环境下 FOTSU-CFAR 与 CA、SO、CM-LD、OS、AD 检测性能比较的结果。OS 序值 $k = 24$ 。由图 1 可以得出: 该背景下, CA-CFAR 检测性能最优; 在信噪比 $R_{SN} < 27$ dB 时, FOTSU-CFAR 检测概率高于其他类比算法, CFAR 损失更小, 检测性能接近 CA-CFAR。

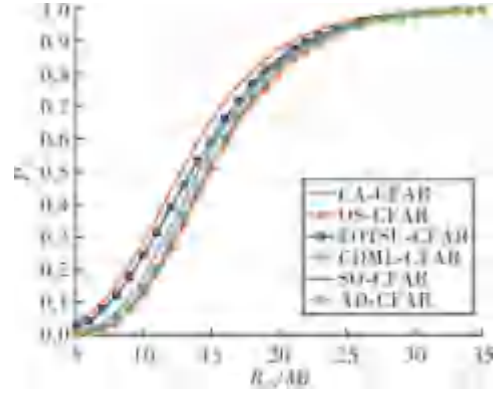


图 1 均匀环境下 FOTSU-CFAR 与其他检测器性能比较

4.2 多目标干扰环境下检测性能仿真分析

由于干扰目标可能存在于单侧窗或双侧窗, 考虑到干扰仅在单窗下, 前沿干扰与后沿干扰情况类似, 因此本实验选定分析前沿窗干扰与双窗干扰的情况。假定待检测单元与干扰单元的功率相等。

图 2 为前沿窗仅存在一个干扰的情况下, 各个检测算法的性能比较。CA-CFAR 由于无法排除干扰的影响, 检测性能明显恶化; 在 $R_{SN} < 25$ dB 时, FOTSU-CFAR 具有更高的检测概率, 这是因为相比于 CMLD-CFAR、AD-CFAR 删除杂波块的思想, FOTSU-CFAR 算法更为有效的剔除杂波干扰单元, 且充分利用剩余杂波单元信息估计背景噪声功率。

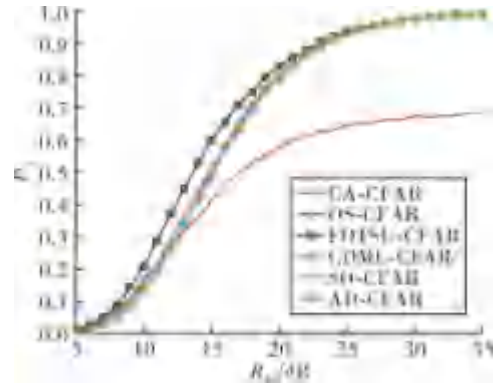


图 2 前窗存在一个干扰下 FOTSU-CFAR 与其他检测器性能比较

图 3 为前后窗各存在一个干扰目标时, 检测算法的性能比较。由图 3 可得出: FOTSU-CFAR 检测性能最好, 略优于 AD-CFAR; SO-CFAR、CA-CFAR 性能明显恶化。这是由于前后窗均存在干扰, 导致 SO-CFAR

和 CA-CFAR 估计出的杂波背景功率偏高,检测概率明显下降; CDML-CFAR 将排序后末尾功率较大的参考单元删除,能够很好解决干扰目标对背景功率估计的影响; AD-CFAR 采用 Anderson-Darling 检验的方法识别并剔除干扰杂波,由于检测包络服从瑞利分布,对剩余参考单元利用 CA-CFAR 方法估计背景功率,因此能够较为充分的利用参考单元信息; FOTSU-CFAR 运用改进的最大内间方差的方法,能够自适应识别并剔除干扰目标单元,最大程度上保留无干扰单元,检测性能最优。

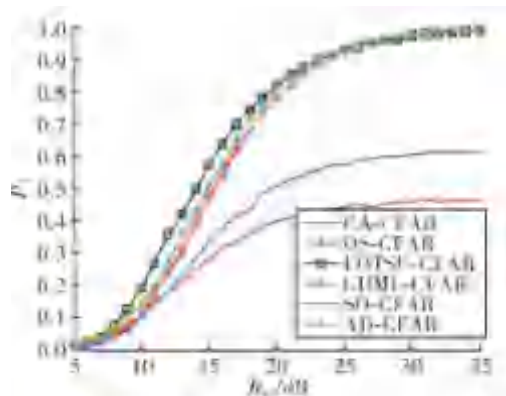


图3 前后窗均存在一个干扰下 FOTSU-CFAR 与其他检测器性能比较

4.3 杂波边缘环境下检测性能仿真分析

图4为 $R_{SN} = 5$ dB 时各个检测器虚警控制性能。可以看出,由于 FOTSU-CFAR 算法通过利用改进的最大内间方差作为判决准则,有效剔除干扰单元,在 $N_c = 16$ 时, FOTSU-CFAR 虚警尖峰最低,控制能力稍强于其他类比算法。

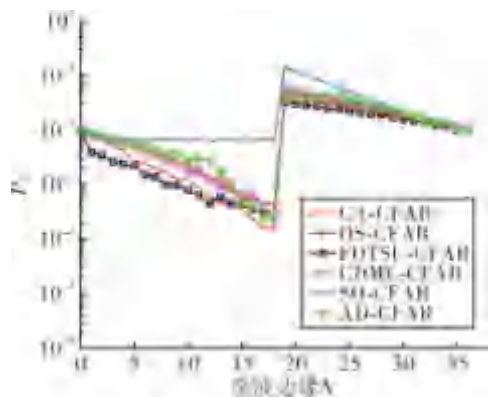


图4 杂波边缘下 FOTSU-CFAR 与其他检测器性能比较

5 结论

针对传统检测算法对参考单元中存在小功率干扰目标剔除不完全,同时未能充分利用均匀杂波单元信息估计背景噪声功率的问题,提出一种基于改进的最大类间方差方法的恒虚警算法。根据设定的阈值,计算改进的最大类间方差值,并对其进行一阶差分处

理找出最佳阈值,由该阈值将参考窗划分出均匀杂波单元与干扰杂波单元,进而估计出背景噪声功率,得到检测门限。该算法克服了因干扰单元剔除的不完全而影响噪声功率估计偏大,导致检测性能严重下降的问题。在均匀环境下,文中提出的检测算法相比于 CA-CFAR 仍存在一定的 CFAR 损失,但优于其他对比的检测算法;在多目标干扰环境下,检测性能对比最优,具有更强的抗干扰能力。

参考文献:

- [1] 吴旂. 雷达信号恒虚警检测处理研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [2] FINN H M. Adaptive detection mode with threshold control as a function of spatially sampled clutter-level estimates [J]. RCA Rev, 1968, 29: 414 - 465.
- [3] TRUNK G V. Range resolution of targets using automatic detectors [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1978, AES-14(5): 750 - 755.
- [4] HANSEN V G, SAWYERS J H. Detectability loss due to "greatest of" selection in a cell-averaging CFAR [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1980, AES-16(1): 115 - 118.
- [5] ROHLING H. Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1983, AES-19(4): 608 - 621.
- [6] RICKARD J T, DILLARD G M. Adaptive detection algorithms for multiple-target situations [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1977, AES-13(4): 338 - 343.
- [7] GANDHI P P, KASSAM S A. Analysis of CFAR processors in nonhomogeneous background [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1988, 24(4): 427 - 445.
- [8] WANG Leiou, WANG Donghui, HAO Chengpeng. Intelligent CFAR detector based on support vector machine [J]. IEEE Access, 2017, 5: 26965 - 26972.
- [9] NARASIMHAN R S, VENGADARAJAN A, RAMAKRISHNAN K R. Design and efficient implementation of censored cell averaging CFAR for non-homogeneous background [C]//IEEE. Proceedings of 2018 IEEE Aerospace Conference. [S.l.]: IEEE, 2018: 1 - 12.
- [10] ZHANG W, ZHANG G, QIAN G. Anderson-Darling test based CFAR detection [C]//IEEE. Proceedings of 2009 First International Conference on Information Science and Engineering. [S.l.]: IEEE Computer Society, 2009: 497 - 500.
- [11] JIANG W, LI W C, YANG H G, et al. Automatic censoring CFAR detector based on ordered data difference with noncoherent integration [C]//IEEE. Proceedings of 2016 CIE international conference on Radar. [S.l.]: IEEE, 2016: 1 - 4.
- [12] 位飞. 基于背景在线信息提取的雷达目标检测 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 19 - 20.