

基于 OS 和 UMVE 的最大选择恒虚警检测算法

王坚浩¹, 严利华², 马明²

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 空军第一航空学院, 河南 信阳 464000)

摘要:为了提高恒虚警检测器在多目标环境下的检测性能及有效控制杂波边缘环境中虚警率的上升,基于结合高效的无偏最小方差估计(UMVE)算法提出了一种新的最大选择恒虚警检测算法(OSUMGO-CFAR),它的前、后沿滑窗分别采用 OS 和 UMVE 方法得到两个局部估计,将其中的最大值作为背景杂波功率水平估计,去设置自适应检测门限。在 Swerling II 型目标假设下,推导了该算法在均匀背景下的矩产生函数 MGF、平均判决阈值 ADT、多目标环境下检测概率 P_d 和杂波边缘环境中虚警尖峰的数学解析表达式。采用数值计算的方法,将恒虚警损失及虚警尖峰分别作为衡量算法在多目标和杂波边缘环境下性能优劣的标准。分析结果表明,该算法在多目标和杂波边缘引起的非均匀背景中的性能,均比 OSTMGO 和 GOSGO 算法得到了改善。

关键词:检测;恒虚警;无偏最小方差估计;虚警尖峰

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2008)05-0038-05

在雷达自动检测系统中,恒虚警(CFAR)检测算法是一种提供检测阈值的数字信号处理算法,根据实际杂波强度自动调整门限以实现一种近似恒定的虚警率,这是以检测损失作为代价的,通常将这种恒虚警损失(CFAR-LOSS)作为评价检测算法性能优劣的尺度。当背景杂波中存在干扰目标时,经典的方法是采用有序统计(OS)^[1]、删除平均(CM)^[2]、剔除平均(TM)^[3]等算法。文献[4,5]提出了一种无偏最小方差估计(UMVE)算法,它采用加权的方法来对杂波强度的无偏最小方差进行估计,从而减小了恒虚警损失。但是,该算法在杂波边缘环境中将导致虚警率上升,而采用最大选择(GO)^[6]方法能较好地控制虚警率上升。

本文基于结合高效的 UMVE 算法与 GO 方法的优点,提出了一种新的恒虚警检测器(OSUMGO-CFAR)算法,它的前沿和后沿滑窗分别采用 OS 和 UMVE 方法得到两个局部估计,将其中的最大值作为背景杂波功率水平估计,去设置自适应检测门限,有效控制了杂波边缘环境中虚警率的上升。

1 检测模型描述

假设背景噪声检测包络服从瑞利分布,且只考虑单脉冲平方检测,目标模型为 Swerling II 型。检测单元和各个参考单元的观测是统计独立的,且都服从指数分布。当参考单元中不存在目标时,它们具有相同的概率密度函数(PDF)和概率分布函数(CDF),分别为

$$f(x) = \frac{1}{\mu} \exp\left(-\frac{x}{\mu}\right), F(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{\mu}\right), x > 0 \quad (1)$$

当参考单元中存在目标时,它们的概率密度函数(PDF)为

$$f(x) = \frac{1}{(1+\lambda)\mu} \exp\left[-\frac{1}{(1+\lambda)\mu}\right], x > 0 \quad (2)$$

收稿日期:2008-02-26

基金项目:国家“863”计划资助项目(2006AAX01XXX)

作者简介:王坚浩(1982-),男,浙江余姚人,硕士生,主要从事雷达信号处理研究;E-mail:hamilton_wang@sina.com
严利华(1965-),男,浙江余姚人,教授,主要从事雷达信号处理、雷达对抗研究。

1.1 无偏最小方差估计算法

剔除平均(TM)算法提高了对杂波强度估计的有效性,该算法先剔除最大和最小的参考单元采样值,然后对剩余的参考单元采样值求平均,由于各有序样值的方差并不一致,故可以对它们加权平均来改善检测性能。无偏最小方差估计算法先将参考单元采样值 $\{y_i\}$ 按幅值排序得到排序后的序列 $\{y_{(i)} \leq y_{(i+1)}, i = 1, 2, \dots, n-1\}$, 删除最大的 r 个样值,将剩余样值采用加权平均的方法得到背景杂波功率水平估计。因此,采用 UMVE 算法得到的概率密度函数和概率分布函数^[4,5]分别为

$$f(y) = \frac{(n-r)^{n-r}}{\mu} \left(\frac{y}{\mu}\right)^{n-r-1} \frac{e^{-(n-r)y/\mu}}{\Gamma(n-r)}, \quad F_Y(y) = 1 - e^{-(n-r)y/\mu} \sum_{i=0}^{n-r-1} \frac{[(n-r)y/\mu]^i}{i!} \quad (3)$$

1.2 OSUMGO - CFAR 检测器数学模型

OSUMGO - CFAR 检测器参考滑窗长度 $R = m + n$, 它的前后沿滑窗分别采用 OS 方法和 UMVE 方法估计背景杂波功率水平。对于前沿滑窗来说,将滑窗内的 m 个样本数据排序,取第 k 个最小值作为局部估计 X 。对于后沿滑窗来说,先剔除掉最大的 r 个样本,对剩余的 $n - r$ 个样本加权求和后取平均作为后沿滑窗的局部估计 Y 。OSUMGO - CFAR 检测器选取两个局部估计的最大值作为检测器对杂波功率水平估计,即

$$Z = \max(X, Y) \quad (4)$$

Z 的 PDF 为

$$f_z(z) = f_x(z)F_Y(z) + f_Y(z)F_X(z) \quad (5)$$

2 OSUMGO - CFAR 在均匀背景中的性能分析

设置门限的统计量是个随机变量,检测器的性能由检测概率和虚警概率决定,检测概率和虚警概率分别为

$$P_d = P\{H_1 | H_1\} = M_z(u) |_{u=T[\mu(1+\lambda)]}, P_{fa} = P\{H_1 | H_0\} = M_z(u) |_{u=T\mu} \quad (6)$$

可见分析检测器性能的关键就在于求得背景杂波功率估计 Z 的矩产生函数(MGF)。

OSUMGO - CFAR 前沿滑窗采用 OS 方法得到的局部估计 X 的 PDF 和 CDF 分别为

$$f_X(x) = \frac{k}{\mu} \binom{m}{k} (1 - e^{-x/\mu})^{k-1} e^{-(m-k+1)x/\mu}, F_X(x) = \sum_{i=k}^m \binom{m}{i} (1 - e^{-x/\mu})^i e^{-(m-i)x/\mu} \quad (7)$$

式(3)为采用 UMVE 方法得到的局部估计 Y 的 PDF 和 CDF。

设 Z 的 MGF 为

$$M_z(u) = M_1(u) + M_2(u) \quad (8)$$

式中, $M_1(u) = \int_0^\infty e^{-uz} f_X(z) F_Y(z) dz =$

$$k \binom{m}{k} \left[\frac{\Gamma(m-k+1+u\mu)\Gamma(k)}{\Gamma(m+u\mu+1)} \right] - \frac{k}{n-r} \binom{m}{k} \sum_{i=0}^{n-r-1} \sum_{j=0}^{k-1} \binom{k-1}{j} (-1)^j \left(\frac{n-r}{R+1-k+j+u\mu} \right)^{i+1} \quad (9)$$

$$M_2(u) = \int_0^\infty e^{-uz} f_Y(z) F_Y(z) dz = \sum_{i=k}^m \binom{m}{i} \sum_{j=0}^i \binom{i}{j} (-1)^j \left(\frac{n-r}{R+j-i+u\mu} \right)^{n-r} \quad (10)$$

把式(9)、式(10)代入式(8)可得 OSUMGO - CFAR 检测器的 MGF 为

$$M_z(u) = \frac{m! \Gamma[m-k+1+u\mu]}{(m-k)! \Gamma[m+u\mu+1]} - \frac{k}{n-r} \binom{m}{k} \sum_{i=0}^{n-r-1} \sum_{j=0}^{k-1} \binom{k-1}{j} (-1)^j \left[\frac{n-r}{R+1-k+j+u\mu} \right]^{i+1} + \sum_{i=k}^m \binom{m}{i} \sum_{j=0}^i \binom{i}{j} (-1)^j \left[\frac{n-r}{R+j-i+u\mu} \right]^{n-r} \quad (11)$$

可求得 OSUMGO - CFAR 的平均判决阈值 ADT^[7]为

$$ADT = T \sum_{i=0}^k \frac{1}{m-k+i} - \frac{Tk}{(n-r)^2} \binom{m}{k} \sum_{i=0}^{n-r-1} (i+1) \sum_{j=0}^{k-1} \binom{k-1}{j} (-1)^j \left(\frac{n-r}{R+1-k+j} \right)^{i+2} + T \sum_{i=k}^m \binom{m}{i} \sum_{j=0}^i \binom{i}{j} (-1)^j \left(\frac{n-r}{R+j-i} \right)^{n-r+1} \quad (12)$$

在均匀背景中,对于任意给定的 P_{fa} , 解式(8) 可得 OSUMGO - CFAR 检测器的门限系数 T 。对于特定的 P_{fa} 、 m 、 n 、 k 和 r 值, 解式(12) 可以得到 OSUMGO - CFAR 检测器的 ADT 值。表 1 给出了 $m = n = 16, r = 2, P_{fa} = 10^{-6}$ 时 k 不同取值情况下的 T 和 ADT 值。由表 1 可以看出, 最优的 k 值位于 $k = 10$, 此时平均判决阈值 $ADT = 20.5$, 而 OSTMGO^[8] 在 $m = n = 16, r_1 = 9, r_2 = 2$ 时的 ADT 值为 20.36, 这时它们具有相同的抗干扰能力, 故 OSUMGO - CFAR 在均匀背景中的性能与 OSTMGO 相当。

表 1 OSUMGO - CFAR 检测器的门限系数 T 与平均判决门限 ADT

Tab. 1 Threshold coefficient and ADT of OSUMGO - CFAR

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
T	23.8	23.8	23.7	23.4	23.0	22.4	21.6	20.6	19.5	18.3	16.9	15.5	13.9	12.1	10.3	8.1
ADT	23.8	23.8	23.7	23.4	23.1	22.5	21.9	21.2	20.8	20.5	20.6	21.1	21.9	22.9	24.4	27.5

3 OSUMGO - CFAR 在多目标环境下的性能分析

在多目标环境下, 仅分析强目标的影响, 也就是假定干扰与杂波功率比 INR 基本是无限的。因此, 干扰目标的回波总是占据最高的有序统计量, 这在某种意义上是一种最糟的情况分析, 对于有限的 INR, 检测损失将变小^[9]。 $(m - k)$ 是前沿滑窗中干扰目标数容许的限度, r 是后沿滑窗中干扰目标数容许的限度, 将 $(m - IL)$ 、 $(n - IR)$ 、 $(r - IR)$ 代替前、后沿滑窗数学模型中的参数 m 、 n 、 r 可获得 OSUMGO 在多目标环境中的检测概率解析表达式为

$$P_d = \frac{(m - IL)! \Gamma[m - IL - k + 1 + \frac{T}{1 + \lambda}]}{(m - IL - k)! \Gamma[m - IL - k + 1 + \frac{T}{1 + \lambda}]} - \frac{k}{n - r} \binom{m - IL}{k} \sum_{i=0}^{n-r-1} \sum_{j=0}^{k-1} \binom{k-1}{j} (-1)^j \left[\frac{n-r}{R+1-IL-IR-k+j+\frac{T}{1+\lambda}} \right]^{i+1} + \sum_{i=k}^{m-IL} \binom{m-IL}{i} \sum_{j=0}^i \binom{i}{j} (-1)^j \left[\frac{n-r}{R-IL-IR+j-i+\frac{T}{1+\lambda}} \right]^{n-r}, \quad IL \leq m - k, IR \leq r \quad (13)$$

式中: T 为采用均匀背景下的门限系数; IL 、 IR 分别为前后沿滑窗中的干扰目标数。

对于 GOSGO^[10], 选取 $m = n = 16, k_1 = 12, k_2 = 14$; 对于 OSTMGO, 选取 $m = n = 16, k = 12, r_1 = 9, r_2 = 2$; 对于 OSUMGO, 选取 $m = n = 16, k = 12, r = 2$, 这样 3 种检测器都具有容纳 6 个干扰目标的能力。表 2 给出了多目标环境下 3 种检测器的恒虚警检测损失 (CFAR - LOSS), 其中 $P_{fa} = 10^{-6}, P_d = 0.5$ 。从表 2 中可以看出, OSUMGO - CFAR 在多目标环境下的性能是优于 OSTMGO 和 GOSGO 的。

表 2 3 种检测器在多目标环境下的 CFAR - LOSS

Tab. 2 CFAR - LOSS of three detectors in multi - targets environment

IL, IR	0,0	1,0	1,1	2,0	2,1	2,2	3,0	3,1	3,2	4,0	4,1	4,2
GOSGO	1.763	1.911	2.643	2.185	2.803	4.031	2.714	3.612	4.190	3.879	4.096	4.764
OSTMGO	1.480	1.801	2.114	2.293	2.530	3.041	3.073	3.202	3.524	4.478	4.518	4.640
OSUMGO	1.274	1.615	1.932	2.083	2.271	2.517	2.624	2.873	3.150	3.321	3.507	4.158

4 OSUMGO - CFAR 在杂波边缘环境下的性能分析

在杂波强度发生急剧变化, 即出现杂波边缘的非均匀背景中, 若检测单元处于弱杂波区, 检测器的检测能力会降低; 若检测单元处于强杂波区^[9], 虚警概率则会上升。当强杂波区从前沿滑窗进入, 检测单元也进入强杂波区, 而后沿滑窗仍处于弱杂波区时, 虚警率上升最为严重, 是虚警率上升的峰值, 称为虚警尖峰, 以

此来衡量 CFAR 检测器在出现杂波边缘时虚警率上升的程度。若弱杂波服从强度参数为 μ 的分布,而强杂波服从强度参数为 μ' 的分布,定义杂波强度比为 $\gamma = \mu'/\mu$,则虚警尖峰的计算公式为

$$P_{fa} = \int_0^\infty f_z(z) \left[\int_0^\infty \frac{1}{\mu'} \exp\left(-\frac{x}{\mu'}\right) dx \right] dz = \int_0^\infty f_z(z) \exp\left(-\frac{Tz}{\mu'}\right) dz \quad (14)$$

式中 $f_z(z)$ 仍通过式(5)来求,但 $f_X(z), F_X(z)$ 为强度参数 μ' 的分布, $f_Y(z), F_Y(z)$ 为强度参数 μ 的分布,于是虚警尖峰为

$$P_{fa} = \frac{m! \Gamma(m - k + 1 + T)}{(m - k)! \Gamma(m + 1 + T)} - \frac{k}{r(n - r)} \binom{m}{k} \sum_{i=0}^{n-r-1} \sum_{j=0}^{k-1} \binom{k-1}{j} (-1)^j \left[\frac{\gamma(n-r)}{R+1-k+jT} \right]^{i+1} + \sum_{i=k}^m \binom{m}{i} \sum_{j=0}^i \binom{i}{j} (-1)^j \left[\frac{\gamma(n-r)}{R+j-i+T} \right]^{n-r} \quad (15)$$

对于前、后沿滑窗长度 $m = n = 16$,杂波强度比为 $\gamma = 15$ dB 时,并考虑检测器有相同的抗干扰能力,表 3 给出了 GOSGO、OSTMGO 和 OSUMGO 门限系数 T 和虚警尖峰的大小。从表 3 中可以看出,在出现杂波边缘的非均匀背景中,OSUMGO 提供了较好的杂波边缘保护能力,它的虚警尖峰与 OSTMGO 稍低,比 GOSGO 小一个数量级。

表 3 $\gamma = 15$ dB 时 3 种检测器虚警率 P_{fa}
Tab. 3 False alarm rate of three detectors ($\gamma = 15$ dB)

CFAR	$T(P_{fa} = 10^{-6})$	虚警率上升的峰值
GOSGO	10.72 ($k_1 = 12, k_2 = 14$)	1.234E - 0 004
OSTMGO	12.66 ($k = 12, r_1 = 9, r_2 = 2$)	4.195E - 0 005
OSUMGO	15.5 ($k = 12, r = 2$)	3.806E - 0 005

5 结束语

本文基于高效的无偏最小方差估计(UMVE)算法提出了一种新的最大选择恒虚警检测算法(OSUMGO - CFAR)。数值计算结果表明,该算法在多目标及杂波边缘环境中的性能均比 OSTMGO 与 GOSGO 获得了改善,尤其是对杂波边缘引起的虚警尖峰的控制能力明显强于 GOSGO,在均匀背景中的性能与 OSTMGO 相当。该算法采用自动筛选技术,增强了它的抗干扰目标能力,参数 r 的选择也有较大的自由度,样本排序时间还不到 OS 的一半,是一种比较容易实现的 CFAR 方案。

参考文献:

- [1] Blake S. CFAR Theory for Multiple Targets and Nonuniform Clutter[J]. IEEE Trans On AES, 1988, 24(6): 785 - 790.
- [2] Richard J T, Dillard G M. Adaptive Detection Algorithms for Multiple - target Situations[J]. IEEE Trans On AES, 1977, 13(4): 338 - 343.
- [3] Gandhi P P, Kassam S A. Analysis of CFAR Processors in Nonhomogeneous Background[J]. IEEE Trans on AES, 1988, 24(4): 427 - 445.
- [4] Ritcey J A. Performance Analysis of the Censored Mean - level Detector[J]. IEEE Trans on AES, 1986, 22(4): 212 - 224.
- [5] Nagle D T, Sanie J. Performance Analysis of Linearly Combined Order Statistics CFAR Detector[J]. IEEE Trans on AES, 1995, 32(2): 522 - 533.
- [6] Hansen V G. Constant False Alarm Rate Processing in Search Radars[J]. IEEE International Radar Conference, 1973, 12(4): 325 - 332.
- [7] Roling H. Radar CFAR Thresholding in Clutter and Multiple - target Situations[J]. IEEE Trans on AES, 1983, 19(4): 608 - 621.
- [8] 何友, 孟祥伟. 一种新的基于有序统计和剔除平均的最大选择恒虚警检测器[J]. 电子学报, 1998, 26(3): 227 - 232. HE You, MENG Xiangwei. A New Greatest Selection CFAR Detector Based on Ordered Statistics and Trimmed Mean[J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(3): 227 - 232. (in Chinese)
- [9] 崔蕾, 曲长文, 黄勇. 海杂波背景下小目标、检测及其运动信息的提取[J]. 海军航空工程学院学报, 2007, 22(1): 137 - 140. CUI Lei, QU Changwen, HUANG Yong. Dim Target Detection and Motion Information Extraction with Sea Clutter Background

- [J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2007, 22(1): 137 - 140. (in Chinese)
- [10] He You. Performance of Some Generalized Modified Order Statistics CFAR Detectors with Automatic Censoring Technique in Multiple - target Situations[J]. IEEE Proc F, 1994, 141(4): 205 - 212.

(编辑:田新华)

A New Greatest Selection CFAR Algorithm Based on Ordered Statistics And Unbiased Minimum - Variance Estimation

WANG Jian - hao¹, YAN Li - hua², MA Ming²

(1. Engineering Institute, Air Force Engineering University Xi'an 710038, China; 2. The First Aeronautic Institute of Air Force, Xinyang 464000, Henan, China)

Abstract: In order to improve the detection performance of constant false alarm detectors in multi - targets environment and effectively control the rise of false alarm rate at the clutter edges, a new CFAR detecting algorithm (OS-UMGO - CFAR) is proposed based on efficient unbiased minimum - variance estimation (UMVE). In this algorithm, OS and UMVE methods are respectively adopted to create two local noise power estimations, the maximum value of them is used to set an adaptive detection threshold. Under Swerling II assumption, the analytic expressions of MGF and ADT in homogeneous background are derived, again the analytic expressions of Pd in multi - targets environment and the peak of false alarm rate at clutter edges are derived. With numerical analysis, the CFAR - LOSS and peak of false alarm rate are taken respectively as the measurement of performance in multi - targets environment and at the clutter edges. The analysis results show that the algorithm is better than OSTMGO and GOSCO in performance in non - homogeneous background.

Key words: detection; constant false alarm rate (CFAR); unbiased minimum - variance estimation; peak of false alarm rate

(上接第 23 页)

Orbit, Trajectory and System Integration Design and Optimization of Multi - Stage Solid Rocket

XIAO Fei, XIANG Min, ZHANG Wei - hua

(College of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China)

Abstract: Considering the mutually interacting phenomenon of such aspects as trajectory, orbit and system, this paper designs a suitable trajectory and presents a mathematical model of system/trajectory/orbit integration design and optimization for the small - sized multi - stage solid rocket. By adopting Adaptive Simulated Annealing, Hooke - Jeeves direct searching method, Multi - Island Genetic Algorithm, Successive Approximation method and Directed Heuristic searching method, a major/trajectory/orbit integration optimization for a multi - stage solid rocket is performed aimed at 300 km LEO, and then the optimization results of the five methods are compared with each other. According to the results, here comes to a conclusion that: the model of integration optimization is reasonable; parameter optimization of major design integrated with trajectory optimization digs out the vehicle's merit to a great extent; what's more, the optimization has great effect on vehicle design, and the liquid fuel consumed in orbit - transfer is decreases by 12%. The models and the software can be generalized to the scheme demonstration and conceptual design of other solid rockets.

Key words: trajectory; orbit; integration optimization; multi - stage solid rocket