

一种新的基于UMVE和OS的恒虚警检测算法

郝程鹏 侯朝焕

(中国科学院声学研究所 北京 100080)

摘要: 为了充分利用参考单元所提供的信息,减少恒虚警损失,该文基于无偏最小方差估计(UMVE)方法和有序统计(OS)方法,提出了一种新的恒虚警检测器(MOSUM-CFAR)。它的前沿和后沿滑窗分别采用UMVE和OS方法产生两个局部估计,再对二者求和得到背景功率水平估计。在Swerling II型目标假设下,文中推导出MOSUM-CFAR在均匀背景下虚警概率 P_{fa} 和检测概率 P_d 及多目标环境下检测概率 P_d 的解析表达式,并与其它方案作了比较。分析结果表明MOSUM-CFAR在均匀背景和多目标环境下均具有相当好的检测性能。

关键词: 检测; 恒虚警; 无偏最小方差估计; 有序统计

中图分类号: TN911.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)06-1380-04

A Novel CFAR Algorithm Based on Unbiased Minimum-Variance Estimation and Ordered Statistics Estimation

Hao Cheng-peng Hou Chao-luan

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: In order to make full use of the cell information and decrease CFAR loss, A new CFAR detector (MOSUM-CFAR) based on unbiased minimum-variance estimation and ordered statistics estimation is presented in this paper. It takes the sum of UMVE of leading window and OS estimation of lagging window as a global noise power estimation. Under swerling II assumption, the analytic expressions of P_{fa} and P_d in homogeneous background are derived, and the analytic expression of P_d in multiple target situations is also derived. In contrast to other detectors, the MOSUM-CFAR detector has fairly well detection performance in both homogeneous background and multiple target situations.

Key words: Detection; Constant False Alarm Rate(CFAR); Unbiased Minimum-Variance Estimation(UMVE); Ordered statistics

1 引言

恒虚警处理是雷达和声纳自动检测中的一个重要组成部分,其基本原理是根据检测单元附近的参考单元估计背景干扰的平均功率,从而得到自适应的检测阈值,使检测时的虚警概率保持恒定。在大多数的应用场合下,参考滑窗中往往不可避免地会存在有多目标干扰。为了克服这个问题, Richard和Dillard在单元平均(CA)^[1]方法的基础上提出了删除均值(CM)^[2]恒虚警方法,即删除幅度较大的几个参考单元样本,对剩余样本求平均来得到背景功率水平估计。Rohling^[3]提出了有序统计(OS)恒虚警方法,它是对参考单元样本排序后,取其中的一个序值作为背景功率水平估计。在强干扰目标环境中,当未删除单元数等于OS的序值时,CM方法的性能与OS相差无几。文献[4]基于CM和OS方法,提出了 MOSUM-CFAR检测器,它在多目标环境下具有相当好的检测性能,却是以牺牲均匀背景下的检测性能为代价的。由于CM方法没有充分利用剩余样本所提供的信息,文献[5,6]又提出了无偏最小方差估计(UMVE)算法,它不同于

CM方法对剩余样本同等对待,而是采用加权方法来得到背景功率水平的无偏最小方差估计,有效地减少了恒虚警损失。本文基于高效的UMVE算法和OS算法,提出一种新的高性能的恒虚警检测器(MOSUM-CFAR),它的前沿和后沿滑窗分别采用OS方法和UMVE方法得到两个局部估计,再对二者求和产生背景功率水平估计。文中建立该检测器的数学模型,并分析它在均匀背景和多目标环境下的性能。

2 算法介绍与模型描述

本文假设接收噪声是高斯白噪声,平方律检波输出服从指数分布,目标类型是SwerlingII型,各参考单元统计独立同分布(IDD)。有目标时检测单元的概率密度函数(PDF)为

$$f(x) = \frac{1}{(1+\lambda)\mu} e^{-x/[(1+\lambda)\mu]}, \quad x > 0 \quad (1)$$

无目标时各参考单元所服从的概率密度函数(PDF)和概率分布函数(CDF)为

$$f(x) = \frac{1}{\mu} e^{-x/\mu}, \quad x > 0 \quad (2)$$

$$F(x) = 1 - e^{-x/\mu}, \quad x > 0 \quad (3)$$

其中 μ 是噪声功率水平, λ 是信号与噪声的平均功率之比。

下面先介绍无偏最小方差估计算法,然后给出MOSUM-CFAR检测器的数学模型。

2.1 无偏最小方差估计算法

为了解决CM方法没有充分利用剩余样本的问题,文献[5,6]提出了无偏最小方差估计算法,它是将参考单元采样值 $\{x_i\}$ 按幅值排序,得到排序后的序列 $\{x_{(1)} \leq \dots \leq x_{(k)} \leq \dots \leq x_{(n)}\}$,删除最大的 r 个样值,对剩余样值采用加权平均方法得到背景功率水平估计,所采用的统计量为

$$p = \frac{1}{n-r} \left(\sum_{j=1}^{n-r-1} x_{(j)} + (r+1)x_{(n-r)} \right) \quad (4)$$

显然,经排序后的样值之间不再满足统计独立,为了求出 p 的PDF,引入下面的线性变换,产生统计独立的随机变量

$$v_{(i)} = (n-r-i+1)(x_{(i)} - x_{(i-1)}), \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

根据式(5)可得

$$x_{(j)} = \sum_{i=1}^j \frac{v_{(i)}}{(n+1-i)}, \quad j = 1, \dots, n \quad (6)$$

将 p 用 $\{v_{(j)}\}$ 来表示,经不复杂的推导可得 r 的矩产生函数(MGF)为^[5]

$$M_p(u) = E[e^{-up}] = \left[1 + \frac{\mu u}{n-r} \right]^{-(n-r)} \quad (7)$$

可以看出,UMVE方法与基于 $n-r$ 个独立样本的CA方法性能相同,相当于基于 $n-r$ 个独立样本的最大似然估计。对式(7)取反拉氏变换,可得 p 的概率密度函数为

$$f(p) = \frac{(n-r)^{n-r}}{\mu} \left(\frac{p}{\mu} \right)^{n-r-1} \frac{e^{-(n-r)p/\mu}}{\Gamma(n-r)} \quad (8)$$

2.2 MOSUM-CFAR检测器模型

MOSUM-CFAR检测器的原理图如图1所示。图中的停止移位控制器^[7]和参考单元移位寄存器一起实现自动筛选功能,即将检测为目标的本剔除掉,使之不进入后沿参考滑窗。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方法估计背景功率水平。对于前沿滑窗来说,将滑窗内 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,先删除最大的 r 个样本,对剩余的 $n-r$ 个样本加权求和后取平均,得到局部估计 Y ,加权系数由式(4)给出。背景功率水平估计 $Z = X + Y$ 。 T 是根据相应的恒虚警算法和设定的虚警概率求出的门限系数。自适应判决准则为 $D \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} TZ$,其中, H_1 表示目标存在,

H_0 表示目标不存在。检测器的虚警概率为

$$\begin{aligned} P_{fa} &= P(H_1 | H_0) = \int_0^\infty f_z(z) \int_{Tz}^\infty \frac{1}{\mu} e^{-x/\mu} dx dz \\ &= \int_0^\infty e^{-Tz/\mu} f_z(z) dz = E[e^{-uz}] \Big|_{u=T/\mu} = M_Z(u) \Big|_{u=T/\mu} \quad (9) \end{aligned}$$

其中 $f_z(z)$ 是背景功率水平估计 Z 的概率密度函数, $M_Z(u)$ 是 Z 的矩产生函数。当 $u = T/[\mu(1+\lambda)]$ 时,式(9)转化成均匀背景下检测概率的表达式:

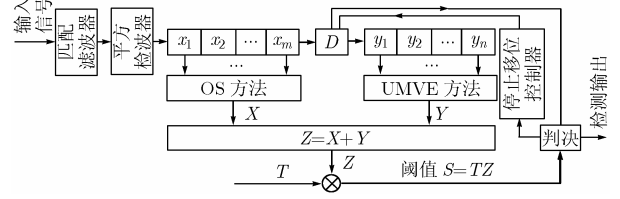


图1 MOSUM-CFAR检测器原理框图

$$P_d = P(H_1 | H_1) = M_Z(u) \Big|_{u=T/[\mu(1+\lambda)]} \quad (10)$$

可见求得背景功率估计 Z 的矩产生函数是分析检测器性能的关键。

3 均匀背景下MOSUM-CFAR检测器的性能

MOSUM-CFAR检测器使用如下两个局部估计:

$$X = x_{(k)}, \quad Y = \frac{1}{n-r} \left(\sum_{j=1}^{n-r-1} y_{(j)} + (r+1)y_{(n-r)} \right) \quad (11)$$

显然, X 和 Y 是独立的,采用OS方法得到的局部估计 X 的PDF^[3]为

$$f_X(x) = \frac{1}{\mu} \binom{m}{k} \left[1 - \exp(-x/\mu) \right]^{k-1} \exp[-(m-k+1)x/\mu] \quad (12)$$

X 的矩产生函数为

$$\begin{aligned} M_X(u) &= E[e^{-ux}] = \int_0^\infty e^{-ux} f_X(x) dx \\ &= \frac{m! \Gamma(m-k+\mu u+1)}{(m-k)! \Gamma(m+\mu u+1)} \quad (13) \end{aligned}$$

由式(7),采用UMVE方法得到的局部估计 Y 的矩产生函数为

$$M_Y(u) = \left[1 + \frac{\mu u}{n-r} \right]^{-(n-r)} \quad (14)$$

由于两个独立随机变量和的矩母函数等于各随机变量矩母函数的乘积^[8],所以 $Z = X + Y$ 的矩产生函数为

$$\begin{aligned} M_Z(u) &= M_X(u) \times M_Y(u) \\ &= \frac{m! \Gamma(m-k+\mu u+1)}{(m-k)! \Gamma(m+\mu u+1)} \times \frac{1}{\left(1 + [\mu u / (n-r)] \right)^{n-r}} \quad (15) \end{aligned}$$

均匀背景下,MOSUM-CFAR检测器的虚警概率和检测概率为

$$\begin{aligned} P_{fa}^{\text{MUMOS}} &= M_Z(u) \Big|_{u=T/\mu} \\ &= \frac{m! \Gamma(m-k+T+1)}{(m-k)! \Gamma(m+T+1)} \times \frac{1}{\left(1 + T/(n-r) \right)^{n-r}} \quad (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_d^{\text{MUMOS}} &= M_Z(u) \Big|_{u=\frac{T}{(1+\lambda)\mu}} = M_X(u) \Big|_{u=\frac{T}{(1+\lambda)\mu}} \\ &\quad \times M_Y(u) \Big|_{u=\frac{T}{(1+\lambda)\mu}} = P_d^L \times P_d^R \\ &= \frac{m! \Gamma(m-k+T/(1+\lambda)+1)}{(m-k)! \Gamma(m+T/(1+\lambda)+1)} \\ &\quad \times \frac{1}{\left(1 + T/[(1+\lambda)(n-r)] \right)^{n-r}} \quad (17) \end{aligned}$$

其中 P_d^L , P_d^R 是门限系数设为 T 时单独采用左、右滑窗估计背景平均功率时的检测概率。对任意设定的 P_{fa} 值,利用数值方法解式(16),可以得到门限系数 T 。

在均匀背景中, 表1给出了参考单元长度 $m = n = 16$, 检测概率 $P_d = 0.9$, 不同虚警概率时MOSUM, MOSCM和OS 3种检测器的CFAR损失。对于MOSUM和MOSCM-CFAR, 取 $k = 12$, $r = 4$, 它们具有容纳8个干扰目标的能力, 对于OS-CFAR, 为了与MOSUM-CFAR具有相同的干扰目标容许限度, 取 $k = 24$ 。从表1的结果可以看出, 均匀背景下, MOSUM的性能比MOSCM和OS获得了改善。

表1 3种检测器在均匀背景中的CFAR损失(dB)

检测器	MOSUM	OS	MOSCM
$P_{fa} = 10^{-4}$	0.928	0.964	1.061
$P_{fa} = 10^{-6}$	1.399	1.451	1.582
$P_{fa} = 10^{-8}$	1.880	1.944	2.104

表中: MOSUM: $m = n = 16$, $k = 12$, $r = 4$
 MOSCM: $m = n = 16$, $k = 12$, $r = 4$
 OS: $R = 32$, $k = 24$

4 多目标环境下MOSUM-CFAR检测器的性能

在多目标环境下, 为了分析方便, 本文仅讨论强干扰目标的影响。所谓强干扰是指干扰目标回波与背景杂波功率比INR无限大, 从而使干扰目标回波样本总是占据最高的有序采样, 一般来说, 这是一种最差的情况, 对于有限的INR, 检测损失将会变小。对于UMVE方法, 当参考单元长度为 n , 删除单元数为 r , 强干扰个数为 l 时的检测概率为^[5]

$$P_d = \binom{n-l}{n-r} \prod_{j=1}^k \left[1 + \frac{T}{(n-r)(1+\lambda)} - \frac{l}{n+1-j} \right], \quad l \leq r \quad (18)$$

对于OS方法, 当 n 个参考单元中存在 l 个强干扰时, 实际上我们所利用的是 $n-l$ 个样本中的第 k 个有序采样, 它的检测概率为

$$P_d = \frac{(n-l)! \Gamma(n-l-k+T+1)}{(n-l-k)! \Gamma(n-l+T+1)}, \quad l \leq n-k \quad (19)$$

表2 3种检测器在多目标环境下的CFAR损失(dB)

IL,IR	0,0	1,0	1,1	2,0	2,1	3,0	3,1	4,0	4,1	5,1	6,2
MOSUM	1.493	1.622	2.035	1.778	2.177	1.970	2.353	2.213	2.576	2.866	3.771
OS	1.541	1.798	2.076	2.076	2.379	2.379	2.710	2.710	3.080	3.501	4.591
MOSCM	1.603	1.758	2.081	1.943	2.253	2.169	2.454	2.453	2.731	3.080	3.892

表中: MOSUM: $m = 12$, $n = 20$, $k = 4$, $r = 2$
 MOSCM: $m = 12$, $n = 20$, $k = 4$, $r = 2$
 OS: $R = 32$, $k = 22$

参考文献

[1] Finn H M and Johnson R S. Adaptive detection mode with threshold control as a function of spatially sampled clutter-level estimates. *RCA Review*, 1968, 29(9): 414-464.
 [2] Richard J T and Dillard G M. Adaptive detection algorithms

对于MOSUM-CFAR, 左右滑窗中干扰目标数的容许限度分别为 $n-k$ 和 r , 当左、右滑窗中干扰目标数分别为 IL , IR 时, 根据式(17), 式(18)和式(19), 可得检测概率的解析表达式为

$$P_d = P_d^L \times P_d^R = \frac{(m-IL)! \Gamma(m-IL-k+T+1)}{(m-IL-k)! \Gamma(m-IL+T+1)} \binom{n-IR}{n-r} \left[\prod_{j=1}^k \left(1 + \frac{T}{(n-r)(1+\lambda)} - \frac{IR}{n+1-j} \right) \right], \quad IL \leq m-k, \quad IR \leq r \quad (20)$$

其中 T 采用均匀背景下获得的门限系数。

由于采用了自动筛选技术, 前沿滑窗内干扰目标数一般要多于后沿滑窗, 为了与这种实际情况相吻合, 对于MOSUM和MOSCM, 我们取 $m = 12$, $n = 20$, $k = 4$, $r = 2$, 对于OS, 选取 $R = 32$, $k = 22$, 这样3种检测器都具有容纳10个干扰目标的能力。多目标环境下MOSUM、MOSCM和OS3种检测器的CFAR检测损失由表2给出, 其中 $P_{fa} = 10^{-6}$, $P_d = 0.9$ 。从表2可以看出, MOSUM的CFAR损失比OS和MOSCM要小, 而且随着干扰目标数的增多, MOSUM的CFAR损失增加趋势与MOSCM相当, 比OS要缓慢得多。

5 结束语

本文基于无偏最小方差估计方法和有序统计方法, 提出了一种新的恒虚警检测器(MOSUM-CFAR), 它更为有效地利用了参考单元所提供的信息, 具有更少的恒虚警损失, 随后的分析验证了这个结论。在均匀背景和多目标环境下, MOSUM的性能比OS和MOSCM获得了改善。另外, 在杂波边缘环境中, MOSUM的性能应与MOSCM相当, 优于OS。同时, 它的处理时间只有OS的一半, 是一种更容易实现的CFAR方案。

for multiple-target situations. *IEEE Trans. on AES*, 1977, 13(4): 338-343.
 [3] Rohling H. Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations. *IEEE Trans. on AES*, 1983, 19(4): 608-621.
 [4] Meng Xiang-wei and He You. A new CFAR detector based on censored mean and order statistics. In: *Proceeding of*

- IEEE International Conference on Neural networks and Signal Processing, Nanjing, 1995: 1178-1181.
- [5] Ritcey J A. Performance analysis of the censored mean-level detector. *IEEE Trans. on AES*, 1986, 22(4): 214-224.
- [6] Nagle D T and Saniie J. Performance analysis of linearly combined order statistic CFAR detectors. *IEEE Trans. on AES*, 1995, 32(2): 522-533.
- [7] He You. Performance of some generalised modified order statistics CFAR detectors with automatic censoring technique in multiple target situations. *IEE Proc.-F, Radar and Signal Processing*, 1994, 141(4): 205-212
- [8] 何友, 关键等. 雷达自动检测与恒虚警处理. 北京: 清华大学出版社, 1999, 5, 第2章.
- 郝程鹏: 男, 1975年生, 博士, 副研究员, 主要研究方向为信号检测与估计、雷达、声纳恒虚警处理.
- 侯朝焕: 男, 1936年生, 研究员, 博士生导师, 中国科学院院士, 信息、信号处理和声学专家, 国家自然科学基金委信息科学部主任, 国家973项目首席科学家. 主要研究方向为信号处理与大规模集成电路设计.