

一种新的基于删除平均和单元平均的恒虚警率检测器

马 健, 王晟达, 徐松涛, 夏海宝
(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘 要:基于删除平均(CM)和单元平均(CA)提出了一种新型的恒虚警率检测器(CMCAM - CFAR),它采用CM和CA产生局部估计,再对二者平均实现对杂波功率估计。在Swerling II型目标假设和均匀背景下,推导出了它的检测概率(P_d)、虚警概率(P_{fa})和平均判决阈值(ADT)的解析表达式,并与有序统计(OS)恒虚警率(CFAR)检测器进行了比较。分析结果表明在均匀背景和多目标环境下CMCAM - CFAR检测器的性能均优于OS - CFAR检测器的性能。

关键词:删除平均;单元平均;恒虚警率;检测性能

中图分类号:TN95 **文献标识码:**A **文章编号:**1009 - 3516(2003)01 - 0026 - 04

CFAR处理是雷达自动检测的重要组成部分,通过设置一自适应门限来保持恒定的虚警率。该门限是通过假设杂波的统计模型,用有限个邻近参考单元(又称参考滑窗)的采样值估计得到的,因假设杂波与目标信号非相参,所以检测器仅用回波信号的包络。常见的CFAR检测器通常先估计出邻近有限个单元的杂波的平均功率,再和一个标称化因子 T (由虚警概率 P_{fa} 决定)相乘,把乘积结果 $S(S = T \cdot z)$,用作CFAR门限。事实上,如何选择能够代表杂波强弱变化情况的均值 z 是CFAR技术的一个关键,这个值的好坏直接影响CFAR检测器的性能。

Finn和Johnson提出了著名的单元平均恒虚警率(CA - CFAR)检测器^[1],它是对参考单元采样值求平均作为杂波功率估计。在均匀背景下,当参考滑窗的长度非常大时,CA - CFAR检测器对背景杂波功率的估计是最大似然估计,检测性能是最优的。但在杂波边缘环境和多目标环境中CA - CFAR检测器的性能严重下降^[2]。Rohling提出了有序统计恒虚警率(OS - CFAR)检测器^[3]。OS - CFAR检测器具有较好的检测性能,但在杂波边缘会引起虚警率上升^[4],另外当参考滑窗较长时,排序时间明显增加,从而难以实际应用。文献[5]提出了一种混合型CFAR处理方法,但因计算量大也难以实际应用。本文提出了一种新型CFAR检测器,称为CMCAM - CFAR检测器,采用CM^[6]和CA来产生局部估计,再对二者平均来实现对杂波功率水平估计,通过这种方法确定门限值,使CFAR检测器的性能得到提高。

1 检测原理

CMCAM - CFAR检测器原理框图如图1所示,其中 D 是检测单元,为防止目标能量泄漏到相邻参考单元影响杂波估计,将与检测单元邻近的两个阴影单元作为保护单元抑制掉。保护单元两侧 $m + n$ 个单元为参考单元, m 和 n 分别是前沿和后沿参考滑窗的长度。判决准则为

$$\begin{aligned} H_1: v > T \cdot Z \\ H_0: v < T \cdot Z \end{aligned} \quad (1)$$

式中: H_1 表示有目标, H_0 表示没有目标。 z 是杂波功率估计, T 是标称化因子。 v 代表检测单元采样值。 $x_i(i = 1, 2, \dots, m)$ 和 $y_j(j = 1, 2, \dots, n)$ 是参考单元采样值。停止移位控制器和参考单元移位寄存器结合构成自动筛选技术。如果根据(1)式做出检测单元有目标的判决(H_1 假设成立),则右边参考滑窗停止移位,同时删

除检测单元采样,这样所有通过左边滑窗并在检测单元被检测到的目标不再进入右边滑窗。左边滑窗采用 CM 方法估计杂噪功率 X , 右边滑窗采用 CA 方法估计杂噪功率 Y , 总的杂噪功率估计为 $z = X + Y$ 。CFAR 检测器的阈值 S 由 $z \cdot T$ 得到。

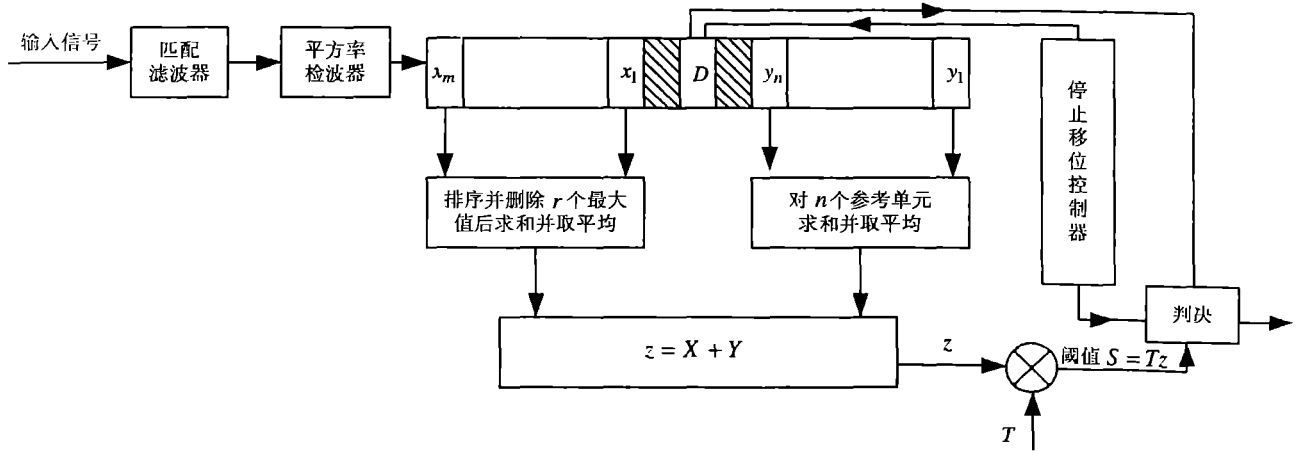


图 1 CMCAM - CFAR 检测器原理框图

在未知功率白色高斯噪声和均匀瑞利包络杂波背景及平方律检测的假设下, 每个参考单元的采样值及检测单元的采样值均服从指数分布, 其概率密度函数^[2] (PDF) 见式(2)。当 H_0 假设时, λ 是背景杂波加热噪声总的平均功率, 用 μ 表示; 当 H_1 的假设时, λ 是 $\mu(1 + R_{SN})$, 其中 R_{SN} 是信号与杂噪功率之比, 因此有式(3)。

$$f(t) = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{t}{\lambda}} \quad (t \geq 0) \quad (2); \quad \lambda = \begin{cases} \mu & H_0 \\ \mu(1 + R_{SN}) & H_1 \end{cases} \quad (3)$$

均匀杂波背景中参考滑窗中变量 $x_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 和 $y_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 是独立同分布 (IID) 的, 其 PDF 为式(4)。CMCAM 检测器的前沿和后沿滑窗局部估计分别采用 CM 方法和 CA 方法, 因此有式(5)。

$$f_{x_i}(x) = f_{y_j}(y) = \frac{1}{\mu} e^{-\frac{x}{\mu}} \quad x > 0 \quad (4); \quad X = \frac{1}{m-r} \sum_{i=1}^{m-r} x_i \quad Y = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j \quad (5)$$

由 CM 方法产生的前沿滑窗局部估计 X 的 PDF 为

$$f_x(x) = \sum_{j=1}^{m-r} \frac{a_j}{\mu} e^{-\frac{x}{\mu}} \quad (6)$$

其中

$$a_j = \frac{\prod_{l=1}^{m-r} c_l}{\prod_{\substack{l=1 \\ l \neq j}}^{m-r} (c_l - c_j)} = \binom{m}{r} \binom{m-r}{j-1} (-1)^{j-1} \left(\frac{m-j+1-r}{r} \right)^{m-r-1} \quad (7); \quad c_j = \frac{m-j+1}{m-r-j+1} \quad (8)$$

由 CA 方法产生的后沿滑窗局部估计 Y 的 PDF 为

$$f_y(y) = \frac{n^n}{\mu} \left(\frac{y}{\mu} \right)^{n-1} \frac{e^{-\frac{y}{\mu}}}{\Gamma(n)} \quad (9)$$

均匀背景下检测概率为

$$P_d = \int_0^{\infty} f_z(z) P\{v \geq Tz | H_1\} dz = \int_0^{\infty} f_z(z) \int_{Tz}^{\infty} \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{t}{\lambda}} dt dz = \int_0^{\infty} e^{-\frac{T}{\lambda} z} f_z(z) dz = M_z(u) |_{u=T/(1+R_{SN})} \quad (10)$$

式中: $f_z(z)$ 是估计值 z 的 PDF, $P\{v \geq Tz | H_1\}$ 是在 H_1 假设下 $v \geq Tz$ 的概率, $M_z(u)$ 是变量 z 的矩母函数 (MGF)。同理均匀背景下虚警概率为

$$P_{fa} = \int_0^{\infty} f_z(z) P\{v \geq Tz | H_0\} dz = M_z(u) |_{u=T} \quad (11)$$

$P\{v \geq Tz | H_0\}$ 是在 H_0 假设下 $v \geq Tz$ 的概率。

2 CMCAM - CFAR 检测器在均匀背景中的性能分析

在 CMCAM - CFAR 检测器中取两个局部估计的和作为总的背景杂噪功率估计即为式(12), z 的 PDF 为式(13)。 z 的 MGF 为式(14)。

$$z = X + Y \quad (12); \quad f_z(z) = \int_0^z f_x(x)f_y(z-x)dx \quad (13); \quad M_z(u) = M_x(u) \cdot M_y(u) \quad (14)$$

其中

$$M_x(u) = \int_0^\infty e^{-uz} f_x(z) dz = \sum_{j=1}^{m-r} \frac{a_j}{\mu u + c_j} \quad (15), \quad M_y(u) = \int_0^\infty e^{-uz} f_y(z) dz = \left(\frac{n}{\mu u + n}\right)^n \quad (16)$$

因此

$$M_z(u) = \left(\frac{n}{\mu u + n}\right)^n \sum_{j=1}^{m-r} \frac{a_j}{\mu u + c_j} \quad (17)$$

式(17) 分别代入式(10)、式(11) 中可得

$$P_d = \left(\frac{n}{\frac{\mu T}{1 + R_{SN}} + n}\right)^n \sum_{j=1}^{m-r} \frac{a_j}{\frac{\mu T}{1 + R_{SN}} + c_j} \quad (18), \quad P_{fa} = \left(\frac{n}{\mu T + n}\right)^n \sum_{j=1}^{m-r} \frac{a_j}{\mu T + c_j} \quad (19)$$

CMCAM - CFAR 检测器的平均判决阈值(T_{AD})的表达式为

$$T_{AD} = -\frac{T}{\mu} \frac{dM_z(u)}{du} \Big|_{u=0} = \frac{T}{\mu} \left[\mu \sum_{j=1}^{m-r} \frac{a_j}{c_j} + \sum_{j=1}^{m-r} \frac{\mu a_j}{c_j^2} \right] \quad (20)$$

在均匀背景下不失一般性,不妨设 $\mu = 1$, 则式(3) 可表示为

$$\lambda = \begin{cases} 1 & H_0 \\ 1 + R_{SN} & H_1 \end{cases} \quad (21)$$

将式(21) 代入式(18) 或(19)、式(20) 中可得

$$P_d = \left(\frac{n}{\frac{T}{1 + R_{SN}} + n}\right)^n \sum_{j=1}^{m-r} \frac{a_j}{\frac{T}{1 + R_{SN}} + c_j} \quad (22), \quad P_{fa} = \left(\frac{n}{T + n}\right)^n \sum_{j=1}^{m-r} \frac{a_j}{T + c_j} \quad (23)$$

$$T_{AD} = T \left[\sum_{j=1}^{m-r} \frac{a_j}{c_j} + \sum_{j=1}^{m-r} \frac{a_j}{c_j^2} \right] \quad (24)$$

在均匀背景中,对任意给定的 P_{fa} ,解(23)式可得 CMCAM - CFAR 的标称化因子 T 。对于 $P_{fa} = 10^{-6}$,前后沿滑窗长度 $m - n = 8$,表 1 给出了随着删除个数 r 的不同, T 和 T_{AD} 的具体数值。

表 1 $P_{fa} = 10^{-6}, m - n = 8$ 时 CMCAM - CFAR 检测器 T 和 T_{AD} 随 r 变化的情况

r	1	2	3	4	5	6	7
T	4.42	6.19	8.54	11.69	15.93	21.57	28.74
T_{AD}	27.75	28.25	28.58	28.79	29.12	30.04	32.33

在均匀背景中,表 2 给出了 CA、CMCAM 和 OS 检测器的 CFAR 损失。

表 2 $P_{fa} = 10^{-6}, P_d = 0.5, m - n = 8$ 时三种检测器在均匀背景中的 CFAR 损失 (dB)

CA	CMCAM($r=1$)	OS($k=12$)
2	2.84	2.87

由表 2 我们可以看出在均匀背景中 CMCAM - CFAR 的性能略优于 OS - CFAR ($k=12$) 的性能。

3 多目标情况下 CMCAM - CFAR 检测器性能分析

本文仅分析强干扰目标的影响,即假定干扰与杂噪功率比很大,干扰目标的回波总占据有序统计量的最高位置。当左边干扰目标的数目 l 小于或等于 $(m - r)$,它们所产生的效果相当于减少了有序统计参考单元的数目,可通过用 $(m - l)$ 代替前沿滑窗数学模型中的参数 m 来获得 CMCAM - CFAR 在多目标环境中的检

测性能,对弱干扰目标,检测损失将变小^[2]。OS在多目标环境中的CFAR损失根据文献[8]中的公式求得。表3给出了在Swerling II型目标条件下CMCAM和OS在出现多目标时的CFAR损失。

表3 $P_{fa} = 10^{-6}, P_d = 0.5, m - n = 8$ 时两种检测器在多目标环境下的CFAR损失(dB)

I	1	2	3
CMCAM($r=4$)	3.15	3.31	3.56
OS($k=12$)	3.48	4.17	5.13

由表3可以看出,在多目标环境下CMCAM - CFAR的性能优于OS - CFAR($k=12$)的性能。随着干扰目标的增多OS - CFAR的性能下降较大,而CMCAM - CFAR的性能下降较慢。

4 结论

本文基于删除平均(CM)和单元平均(CA)提出了一种新型的恒虚警检测器(CMCAM - CFAR),分析结果表明,在均匀背景中CMCAM - CFAR的性能略优于OS - CFAR($k=12$)的性能。在多目标条件下CMCAM - CFAR的性能优于OS - CFAR($k=12$)的性能,随着目标的增多在保持一定检测概率下,CMCAM - CFAR的CFAR损失能保持很小的增量且较OS - CFAR的损失小。CMCAM - CFAR采用了文献[2]提出的自动筛选技术,增强了它的抗干扰目标的能力,参数 r 也有较大的选择自由度。CMCAM - CFAR检测器的样本排序时间不到OS的一半,是一种比较容易实现的CFAR方案。

参考文献:

- [1] Finn HM, Johnson RS. Adaptive Detection Mode with Threshold control as a Function of spatially Sampled Clutter level Estimates [J]. RCA Review, 1968, 29: 414 - 464
- [2] 何友, 关键. 雷达自动检测与恒虚警处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [3] Rohling H. Radar CFAR Thresholding in clutter and multiple Target situation [J]. IEEE Trans on AES, 1983, 19(4): 608 - 621
- [4] Gandhi PP, Kassam SA. Analysis of CFAR Processors in Nonhomogeneous Background [J]. IEEE Trans on AES, 1988, 24(4): 427 - 445.
- [5] 唐京海, 王晟达, 陈国华. 一种混合型CFAR处理方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2001, 2(1): 62 - 65.
- [6] Richard J T, Dillard G M. Adaptive Detection Algorithm for multiple target situation [J]. IEEE Trans on AES, 1977, 13(4): 338 - 343.
- [7] He You, Meng Xiang Wei. Performance of a New Greatest of Selection CFAR Detector Based on Order Statistics and Censored Mean [A]. The Third International conference on signal processing [C]. Beijing, China, 1996, 565 - 567.
- [8] Nadav Levanon. Detection Loss Due to Interfering Targets in Ordered Statistics CFAR [J]. IEEE Trans on AES, 1988, 24(6): 678 - 681.

(编辑: 姚树峰)

A New CFAR Detector Based on Censored Mean and Cell Average

MA Jian, WANG Sheng - da, XU Song - tao, XIA Hai - bao

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

Abstract: A new CFAR detector (CMCAM) based on censored mean (CM) and cell average (CA) is proposed in this paper. In this detector the mean value of the local estimations of CM and CA is taken as the noise power estimation. Under Swerling II and homogeneous background assumption, the analytic expressions of P_d , P_{fa} and ADT are derived for the detector. The results show that the performance of CMCAM - CFAR detector is better than that of OS - CFAR detector in homogeneous background and multi - target situation.

Key words: censored mean; cell average; CFAR; detection performance