

CMCAM 恒虚警率检测器性能分析

马健^{1,2}, 王晟达², 强勇³, 徐松涛²

(1.西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710129; 2.空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 3.西安电子工程研究所, 陕西 西安 710100)

摘要:分析了CMCAM恒虚警率(CFAR)检测器在杂波边缘中的性能。在斯威林II型目标假设下给出了它在杂波边缘情形中虚警尖峰的数学解析表达式,并与经典的有序统计(OS)恒虚警率检测器进行了比较。分析结果表明在杂波边缘环境中CMCAM检测器的虚警控制能力比OS检测器有效,当 $r \leq 7$ 时它的虚警尖峰比OS检测器的虚警尖峰要低1—2个数量级,当 $7 < r \leq 9$ 时CMCAM虚警尖峰也比OS低。结合文献[7]表明CMCAM检测器在均匀背景和由多目标及杂波边缘引起的非均匀背景中的性能均优于OS检测器的性能。CMCAM检测器采用了自动筛选技术,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检测器采用CM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,其样本排序时间只有OS检测器的一半,是一种比较容易实现的CFAR方案。

关键词:CMCAM;恒虚警率;虚警尖峰

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2009.04.007

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2009)04-0029-04

CFAR检测器通常先估计出邻近有限个单元杂噪的平均功率 Z ,再和一个标称化因子 T 相乘,把乘积结果用作CFAR门限。如何选择能够代表杂噪强弱变化情况的均值 Z 是CFAR技术的一个关键。Finn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噪功率水平估计。在均匀背景下,检测性能是最优的。但在多目标环境和杂波边缘环境中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]具有较好的检测性能,但在杂波边缘会引起虚警率上升^[4-5]。文献[6]提出一种混合型CFAR处理方法,但因计算量大也难以实际应用。在文献[7]中我们提出了一种新型的CFAR检测器,分析表明它在均匀背景中可以提供较好的检测性能,本文进一步分析它在非均匀背景中的性能。

1 检测原理

CMCAM-CFAR检测器原理框图见图1,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(也称参考滑窗), m 和 n 分别是前沿和后沿参考滑窗的长度。判决准则为:

$$v \begin{matrix} > \\ > \\ < \\ < \end{matrix} TZ \quad (1)$$

* 收稿日期:2008-09-02

基金项目:国防预研基金资助项目(51307050103)

作者简介:马健(1972-),男,江苏徐州人,讲师,博士生,主要从事雷达信号与信息处理研究;

E-mail:majiankg@163.com

王晟达(1962-),男,河北正定人,教授,主要从事雷达工程信号与信息处理、预警机系统信息处理研究。

式中: H_1 表示有目标; H_0 表示没有目标; Z 是杂噪功率水平估计; 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。如果根据式(1)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值, 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^[8] 方法估计杂噪功率水平 X , 右边滑窗采用 CA 方法估计杂噪功率水平 Y , 总的杂噪功率水平为 $Z = X + Y$ 。CFAR 检测器的阈值 S 由 ZT 得到。

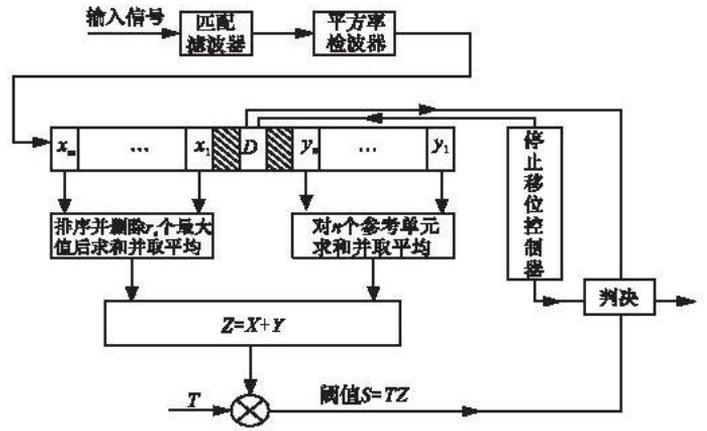


图 1 CMCAM-CFAR 检测器原理框图

Fig.1 Block diagram of CMCAM-CFAR detector

2 CMCAM-CFAR 检测器性能分析

为了简化对 CFAR 检测的性能分析, Rohling 将均匀和非均匀杂波背景简化为 3 种典型情况^[3], 即均匀杂波背景、多目标条件和杂波边缘。均匀杂波背景模型描述了参考滑窗中杂波是统计平稳的; 多目标条件描述了 2 个或 2 个以上的目标在空间上很靠近的情况; 杂波边缘描述了特性不同的背景区域间的过渡区。在均匀背景和多目标条件下 CMCAM-CFAR 检测器的性能优于 OS-CFAR 检测器^[7], 下面分析 CMCAM-CFAR 检测器在杂波边缘情况下的性能。

杂波边缘的典型例子是降雨区的边缘。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, 虚警概率则会上升, 后一种情况的危害性更大, 因它严重损害了对检测器恒虚警率的要求。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, 此时的虚警率上升最为严重, 称之为虚警尖峰, 通常以此衡量检测器在杂波边缘情况下虚警率上升的程度^[2]。

在未知水平的白色高斯噪声和均匀的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数值均服从指数分布, 其 PDF(概率密度函数)为^[2]:

$$f(t) = e^{-t/\lambda} / \lambda \quad (t \geq 0) \tag{2}$$

在参考单元中不存在目标的 H_0 假设下, λ 是背景杂波加热噪声总的平均功率水平, 用 μ 表示; 在存在目标的 H_1 的假设下, λ 是 $\mu(1 + R_{SNR})$, 其中 R_{SNR} 是信号与杂噪功率之比, 因此有:

$$\lambda = \begin{cases} \mu & , H_0 \\ \mu(1 + R_{SNR}) & , H_1 \end{cases} \tag{3}$$

在均匀杂波背景中参考滑窗中的变量 $x_i (i=1, 2, \dots, m)$ 和 $y_j (j=1, 2, \dots, n)$ 是独立同分布(IID)的, 其 PDF 为^[2]:

$$f_{x_i}(x) = f_{y_j}(x) = e^{-x/\mu} / \mu \quad , \quad x > 0 \tag{4}$$

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:

$$X = \frac{1}{m-r} \sum_{i=1}^{m-r} x_i \quad ; \quad Y = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j \tag{5}$$

由 CM 方法产生的前沿滑窗局部估计 X 的 PDF 为^[9]:

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

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

$$c_j = (m-i+1)/(m-r-i+1) \tag{8}$$

由 CA 方法产生的后沿滑窗局部估计 Y 的 PDF 为^[2]:

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

杂波边缘环境中只分析检测器控制虚警的能力,与目标模型无关,另外由于CFAR检测器与杂波的绝对强度无关,因此虚警概率只与两种杂波强度比有关。若弱杂波服从式(4)强度参数为 μ 的分布,而强杂波服从强度参数为 μ' 的分布,则定义杂波强度比 $\gamma = \mu' / \mu$ 。现在考虑检测单元恰好处于强杂波区的情况,也就是说,前沿滑窗进入强杂波区,而后沿滑窗仍处于弱杂波区,那么虚警尖峰的计算公式为^[10]:

$$P_{fa} = \int_0^\infty f_z(z) \int_{Tz}^\infty \frac{1}{\mu} e^{-\frac{x}{\mu}} dx dz \tag{10}$$

式中: T 为均匀背景中预先设置好的门限参数; $f_z(z)$ 通过下式求得:

$$f_z(z) = \int_0^z f_x(x) f_y(z-x) dx \tag{11}$$

式中: $f_x(x)$ 的强度参数为 μ' ; $f_y(z)$ 的强度参数为 μ ,因此得:

$$P_{fa} = \left[\frac{n}{\mu T + n} \right]^n \sum_{j=1}^{m-r} \frac{a_j}{\mu' T + c_j} \tag{12}$$

不失一般性,令 $\mu' = 1$ 则 $\mu = 1/\gamma$,因此式(12)可化简为:

$$P_{fa} = \left[\frac{n}{\frac{T}{\gamma} + n} \right]^n \sum_{j=1}^{m-r} \frac{a_j}{T + c_j} \tag{13}$$

文献[2]和文献[10]给出了前后沿滑窗长度 $m=n=16$,杂波强度比 $\gamma=15$ dB时,几种检测器各自的门限参数和虚警尖峰的大小,为了便于比较,表1给出了在同样条件下CM-CAM-CFAR检测器门限参数 T 和虚警尖峰随删除数目 r 变化情况。表2列出了文献[2]和文献[10]给的几种检测器各自参数在最优时的门限参数和虚警尖峰的大小。

表1 CMCAM-CFAR检测器虚警率 P_{fa} 上升的峰值随 r 变化表

Tab.1 The peak of false alarm for the CMCAM-CFAR detector with r

r	$T(P_{fa}=10^{-6})$	P_{fa} 上升的峰值
3	1.64	4.6510 E-6
4	2.79	1.1886 E-5
5	3.38	1.8930 E-5
6	4.11	3.2461 E-5
7	4.99	6.0632 E-5
8	6.04	1.2435 E-4
9	7.31	2.8046 E-4
10	8.82	6.9484 E-4

表2 几种检测器虚警率 P_{fa} 上升峰值的比较表

Tab.2 Comparison of peak of false alarm for the four CFAR algorithms

CFAR检测器	$T(P_{fa}=10^{-6})$	P_{fa} 上升的峰值
GOSGO-CFAR	10.71 ($k=12, l=4$)	1.2341 E-4
MOSTM-CFAR	8.88 ($k=12, T_1=2, T_2=2$)	2.9798 E-4
OS-CFAR	11.85 ($k=26$)	6.4938 E-4
GOSCA-CFAR	6.03 ($k=12, l=14$)	1.9309 E-3

对比表1和表2可看出CMCAM-CFAR检测器在 $r \leq 7$ 时它的虚警尖峰比表2中给出的几种检测器的虚警尖峰要低1-2个数量级,而且在 $7 < r \leq 10$ 时CMCAM-CFAR检测器的虚警尖峰也与表2中给出的几种检测器的基本相当。同OS-CFAR检测器相比,当 $r=3$ 时CMCAM-CFAR虚警尖峰比OS-CFAR虚警尖峰低2个数量级,当 $3 < r \leq 7$ 时CMCAM-CFAR虚警尖峰比OS-CFAR虚警尖峰低1个数量级,当 $7 < r \leq 9$ 时CMCAM-CFAR虚警尖峰比OS-CFAR虚警尖峰低,当 $r=10$ 时CMCAM-CFAR虚警尖峰略大于OS-CFAR虚警尖峰,由此可得在杂波边缘环境中当CMCAM-CFAR检测器删除数目较少时,其性能明显优于OS-CFAR检测器的性能。

3 结论

本文分析了CMCAM-CFAR检测器在非均匀背景下的性能,分析结果表明CMCAM-CFAR在杂波边缘环境中具有较强的虚警控制能力。文献[7]所作的分析表明,在均匀背景、多目标条件和杂波边缘环境

下 CMCAM—CFAR 的性能优于 OS—CFAR 的性能。CMCAM—CFAR 采用了自动筛选技术,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只有 OS 的一半,是一种比较容易实现的 CFAR 方案。

参考文献:

- [1] Finn H M, Johnson R S. Adaptive Detection Mode with Threshold Control as A Function of Spatially Sampled Clutter Level Estimates [J]. RCA Review, 1968, 29(3):414—464.
- [2] 何 友,关 键,彭应宁. 雷达自动检测与恒虚警处理[M]. 北京:清华大学出版社,1998.
HE You, GUAN Jian, PENG Yingning. Automatic Radar Detection and Constant False Alarm Rate[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998. (in Chinese)
- [3] Rohling H. Radar CFAR Thresholding in Clutter and Multiple Target Situation[J]. IEEE Trans on AES, 1983, 19(4): 608—621.
- [4] Gandhi P P, Kassam S A. Analysis of CFAR Processors in Nonhomogeneous Background[J]. IEEE Trans on AES, 1988, 24(4):427—445.
- [5] Nadav Levanon. Detection Loss Due to Interfering Targets in Ordered Statistics CFAR[J]. IEEE Trans on AES, 1988, 24(6):678—681.
- [6] 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.
TANG Jinghai, WANG Shengda, CHEN Guohua. A Mixed CFAR Method[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2001, 2(1):62—65. (in Chinese)
- [7] 马 健,王晟达,徐松涛,等. 一种新的基于删除平均和单元平均的恒虚警率检测器[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2003,4(1):26—29.
MA Jian, WANG Shengda, XU Songtao, et al. A New CFAR Detector Based on Censored Mean and Cell Average[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2003, 4(1):26—29. (in Chinese)
- [8] Richard J T, Dillard G M. Adaptive Detection Algorithm for Multiple Target Situation[J]. IEEE Trans on AES, 1977, 13(4):338—343.
- [9] HE You, MENG Xiangwei. Performance of A New Greatest of Selection CFAR Detector Based on Order Statistics and Censored Mean[C]//The Third International Conference on Signal Processing. Beijing: [s. n], 1996:565—567.
- [10] 孟祥伟,何 友. 一种新的基于有序统计和剔除平均的恒虚警检测器[J]. 现代雷达, 1996, 18(1):96—104.
MENG Xiangwei, HE You. A New CFAR Detector Based on Order Statistics and Trimmed Mean[J]. Modern Radar, 1996, 18(1):96—104. (in Chinese)

(编辑:田新华)

Performance Analysis of CMCAM CFAR

MA Jian^{1,2}, WANG Sheng-da², QIANG Yong³, XU Song-tao²

(1. College of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China; 2. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 3. Xi'an Research Institute of Electronics Engineering, Xi'an 710100, China)

Abstract: The performance analysis of CMCAM detector in clutter edges is carried out. Under Swerling II assumption, the analytic expression of the peak of false alarm rate at clutter edges is derived, and compared with that of OS CFAR detector. The analytic results show that the ability of CMCAM to control the rise of false alarm is more effective than that of OS. The peak of false alarm rate of CMCAM 1—2 order of magnitude lower than that of OS with r , and the peak of false alarm rate of CMCAM is also less than that of OS with r . With the results proposed by [7], the analytic results show that the detection performance of CMCAM is superior to that of OS in both homogeneous background and in non—homogeneous backgrounds. Because the automatic censoring technique is adopted in CMCAM detector, the anti—jamming capability is increased, and the parameter can be selected freely. In CMCAM detector the mean value of CM and CA local estimations is taken as the noise power estimation, so the sample sorting time of CMCAM is only half of that of OS. In a word, it is a easily realized CFAR scheme.

Key words :CMCAM ; CFAR ; peak of false alarm