

多目标环境下的雷达 CFAR 检测

王明宇¹, 袁汉雄²

(1. 空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800; 2. 93861 部队, 陕西 三原 713800)

摘要:提出了一种基于对参考单元进行比较筛选的雷达恒虚警(CFAR)检测方法,并对其在不同背景条件下参考单元的分布变化与检测性能进行了分析。结果表明,该方法在不降低均匀环境下检测性能的前提下,可以明显改善 CA 和 OS-CFAR 在多目标干扰环境下的检测性能。

关键词:CFAR 检测;比较筛选;多目标干扰

中图分类号:TN911 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2000)05-0057-04

雷达恒虚警(CFAR)检测的实际检测性能与其参考背景单元的分布有很大关系。当参考背景单元为均匀分布时,经典的单元平均(CA)CFAR 可以获得准最佳的检测性能^[1]。但在大多数的应用场合下,CFAR 参考单元窗中往往不可避免地会存在有多目标干扰,除了邻近目标外,同一目标由于距离/速度通道处理的重合也会表现出类似多目标的跨单元分布现象。在多目标干扰环境下,CA-CFAR 的检测性能会随着干扰点的增加而迅速下降。有序统计(OS)CFAR 检测是一类基于有序统计量的 CFAR 检测方法,它具有良好的抗脉冲干扰能力,因此在多目标干扰环境下相对均值类 CFAR 检测有一定优势。但 OS 类检测方法也存在两个共同的缺点:一是其在均匀环境下相对均值类 CFAR 都有不同程度的检测损失;二是都存在一个参考窗内干扰目标数与干扰杂波数的最大容许限,一旦实际环境超过这一容许限,其检测性能均严重下降。通常情况下最大容许限的数值较小,在距离-速度通道处理的重合度较大时,甚至不足以消除单个干扰目标的影响。

1 单元筛选 CFAR 原理

1.1 CA-CFAR 与 OS-CFAR 的基本原理

雷达 CFAR 检测的目的是使检测过程中的虚警概率保持在一个相对恒定水平,这就需要其检测门限与背景噪声和杂波的平均强度成正比。通常情况下,CFAR 检测的自适应门限等于背景噪声与杂波强度估计量 Z 与一个加权量 T 的乘积,其中加权量 T 是一个仅与恒虚警水平有关的量,而 Z 与具体的检测方式有关。根据 Z 的计算方式的不同,CFAR 检测分为单元平均(CA)CFAR 和有序统计(OS)CFAR 检测两种基本方式。

CA-CFAR 与 OS-CFAR 中的 Z 分别由以下两式确定

$$CA \cdot Z = \sum_{i=1}^N x_i \quad OS \cdot Z = x_k \quad (1)$$

式中 N 为参考窗的单元长度, x_i 为各单元的参考信号幅度, x_k 为各单元的参考信号按幅度由小到大排序后的第 k 个值。可以证明,当参考单元窗的单元数目足够多时, Z 是背景噪声与杂波强度的一个无偏或渐近无偏估计。假设目标服从 Swerling I 模型,背景为均匀的高斯杂波,且采用平方律检波,其虚警概率分别为^[2]

$$CA \cdot P_f = (1 + T)^{-N} \quad (2a)$$

$$OS \cdot P_f = \prod_{j=0}^{k-1} \frac{N - j}{N - j + T} \quad (2b)$$

式中 T 为门限加权系数,它由恒虚警率 P_{f0} 所唯一确定,上式中用 $T/(1+S)$ 取代 T 即为检测概率 P_d 。当参考窗内 r 个单元被幅度恒定的强目标干扰所占据时,CA 与 OS 的虚警概率分别为^[3]

$$P_f = (1 + T)^{-r} \left(1 + \frac{T}{1 + C} \right)^{r-N} \tag{3a}$$

$$P_f = T \sum_{i=k}^N \sum_{s=\max(0, i-r)}^{\min(i, N-r)} \binom{N-r}{s} \binom{r}{i-s} \sum_{j=0}^s \sum_{m=0}^{i-s} \frac{\binom{s}{j} \binom{i-s}{m} (-1)^{j+m}}{(N+T+j-r-s) + (m+r+s-i)/(1+C)} \tag{3b}$$

上式中用 $T/(1+S)$ 取代 T 即为检测概率 P_d , C 为干扰目标与背景噪声和杂波的相对强度。由于干扰目标使得噪声与杂波的估计值随干扰目标数目的增加而增大, 检测门限提高, 检测概率与虚警概率亦相应降低。因此, 对于存在多目标干扰的非均匀检测环境, CA-CFAR 的实际检测性能对于干扰目标的强度与个数都非常敏感。其它针对非均匀杂波环境而发展的各种改进均值类检测方法如最大选择(GO), 最小选择(SO), 加权单元平均(WCA)CFAR 等的实际检测性能改善也很有限。而 OS-CFAR 中 Z 等于参考单元窗信号幅度排序中的某一个序值, 由于干扰目标相对噪声与杂波的幅度较大, 排序后大多位于后面的位置, 当 $r < N-k$ 时, 干扰目标的存在一般不会影响到 Z 值的估计, 因而对其检测性能影响较小。但当 $r > N-k$ 时, Z 值的估计将会受到干扰目标的影响, 检测概率与虚警概率迅速降低。 $N-k$ 既是 OS-CFAR 检测的干扰数目最大允许限。降低 k 值可以提高这一最大允许限, 但受到参考窗长度的限制, 并且这时 Z 将变成背景噪声与杂波强度的一个有偏估计, 从而降低在均匀环境下的检测性能。如何提高干扰数目最大允许限是 OS-CFAR 检测的一个研究重点, 文献[1]中介绍了许多改进的 OS 类 CFAR 检测方法, 如删除均值(CMLD), 消减平均(TM), 有序统计最大选择(OSGO), 有序统计最小选择(OSSO)CFAR 等, 这些方法对检测性能的改善都很有有限。参照在某新型雷达中已成功应用的一种抗多目标干扰方法, 本文提出了一种基于单元筛选(CS)的恒虚警检测方法。

1.2 单元筛选 CFAR 原理

单元筛选基于以下假设: 参考窗中干扰目标的出现是随机且相互独立的, 并且其幅度远大于背景噪声分量。单元筛选的实现原理如图 1 所示。 N 个参考单元信号先经一长度为 N 的延迟单元进行循环移位, 由第 i 个单元信号 x_i 与第 $i-m$ 个单元信号 x_{i-m} 进行比较, 输出其中幅度较小的为筛选后的第 $i-m$ 个信号 x'_{i-m} 。通过这种参考单元的比较筛选处理, 可以去除大部分的较大幅度信号, 保留幅度较小的单元信号, 从而可以有效地滤除参考窗中的强干扰, 降低背景信号中的非均匀程度。经过这一预处理过程后的 N 个参考单元信号再按 CA 或 OS 进行下一步的门限运算。一个包含单元筛选的完整的 CFAR 处理过程如图 2 所示。

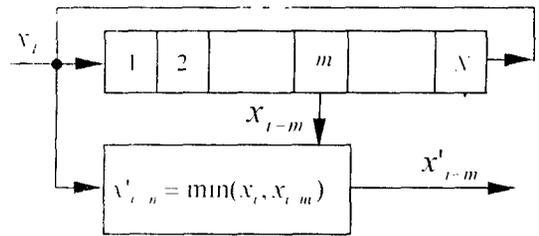


图 1 单元筛选的处理过程

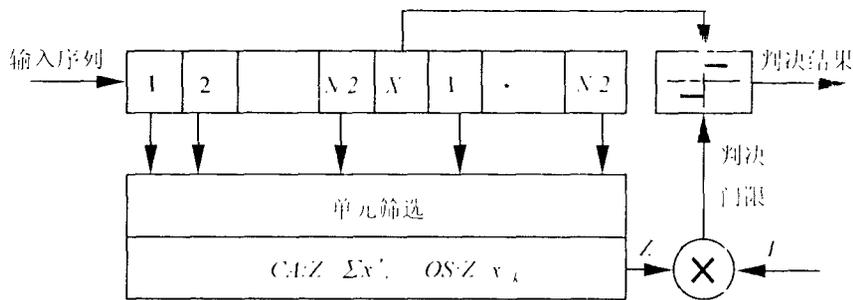


图 2 基于单元筛选的 CFAR 处理器

2 检测性能分析

2.1 单元筛选对信号分布的影响

首先考虑背景噪声为均匀高斯分布的情况。假设输入序列为一平方律检波器的输出, 则其幅度服从指数分布

$$f_x(x) = \frac{1}{2\sigma_n^2} \exp\left(-\frac{x}{2\sigma_n^2}\right) \quad x \geq 0 \tag{4}$$

式中 σ_n^2 为噪声的单边功率谱密度。经过单元筛选后,输出序列的 pdf 为

$$f_x(x) = 2f_x(x) \int_x^\infty f_x(a) da = \frac{1}{\sigma_n^2} \exp\left(-\frac{x}{\sigma_n^2}\right) \quad x \geq 0 \quad (5)$$

可以看出, $f_x(x)$ 仍然为指数分布,只是其均值变为原来的二分之一。如果 x 为瑞利分布,也可得到类似的结果。这表明当背景为均匀分布时,单元筛选不改变参考信号的分布规律,只改变其分布的参数。由于这种参数的改变是确定的,可以通过门限加权 T 的调整进行完全的补偿,因此均匀环境下基于单元筛选的 CA 或 OS CFAR 检测具有与一般 CFAR 检测完全相同的性能。

下面考虑非均匀环境。假设参考单元中存在多目标干扰,干扰幅度仅与信噪比有关,且以概率 P_i 在每个单元位置随机出现,则输入参考单元序列的信号幅度分布为

$$f(x) = \frac{1 - P_i}{2\sigma_n^2} \exp\left(-\frac{x}{2\sigma_n^2}\right) + \frac{P_i x}{\sigma_n^2} \exp\left(-\frac{A^2 + x^2}{2\sigma_n^2}\right) I_0\left(\frac{Ax}{\sigma_n^2}\right) \quad x \geq 0 \quad (6)$$

式中 A 为干扰幅度, $I_0(x)$ 为第一类零阶修正 Bessel 函数。

将(6)式代入(5)式可得单元筛选后的参考单元信号幅度分布。由于 Bessel 函数的存在,难以得到一个直观的 pdf 解析表达式,图 3 给出了 $f_x(x)$ 与 $f_x(x)$ 在 $P_i = 0.1, 0.3$ 时的分布曲线。当 $P_i = 0.1$ 时, $f_x(x)$ 已非常接近标准的瑞利分布; $P_i = 0.3$ 时虽还剩余部分干扰信号分布,但其分布强度较处理前已明显降低。

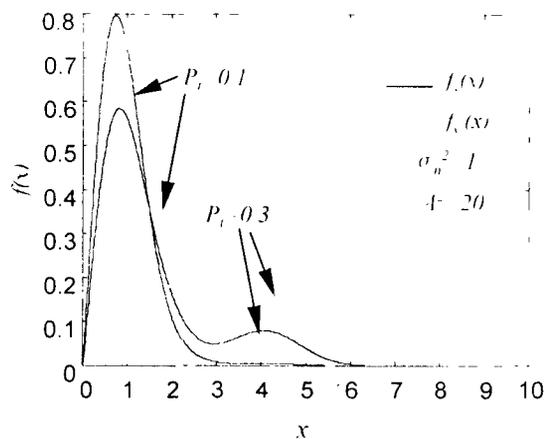


图 3 单元筛选对信号分布的影响

2.2 检测性能分析

当干扰目标的幅度恒定且远大于噪声时,单元筛选处理后参考窗内的剩余干扰目标个数近似为 $r_{cs} = \frac{r^2}{N}$ 。

利用(3)和上式,可以分别计算出 CA-CFAR、OS-CFAR、CSCA-CFAR 与 CSOS-CFAR 检测在多目标干扰环境 ($r > 0$) 下的虚警概率与检测概率,其相对均匀环境下 ($r = 0$) 的检测信噪比损失如表 1 所示。

表 1 多目标干扰环境下不同检测方式信噪比损失比较 ($N = 24, P_d = 0.5, P_{f0} = 10^{-4}$) dB

检测方式	干扰个数 r			
	2	4	6	8
CA-CFAR	5.5	8.0	9.7	10.8
OS-CFAR ($k = 20$)	1.1	2.8	8.2	10.9
CSCA-CFAR	0.7	2.3	4.6	6.5
CSOS-CFAR ($k = 20$)	0.0	0.3	0.8	1.6

当不采用 CS 时,CA-CFAR 的检测性能随 r 值的增加而迅速恶化,即使在仅有两个干扰时,其损失也已非常可观;采用 CS 后,检测性能对 r 值的敏感程度明显降低。OS-CFAR 的检测性能在 r 小于或等于 4 时优于 CA-CFAR,但当 r 大于 4 时,由于干扰个数超过了最大容许限,检测损失迅速增加,接近 CA-CFAR。采用 CS 后,CSOS-CFAR 的检测性能明显改善,其检测损失已非常小。

图 4、图 5 分别是以上四种检测器的虚警概率与检测概率随 r 的变化曲线,从这两组曲线中可以明显地看出 CS 对检测性能的改善能力以及 OS-CFAR 最大干扰数目容许限的变化。图 4 中采用 CS 后 CA-CFAR 与 OS-CFAR 的虚警保持能力明显增强;图 5 中 OS-CFAR 检测概率在 $r = 4$ 处有明显的下降,而对于 CSOS-CFAR 这一变化发生在 $r = 10$ 附近。

从以上的结果可以看出,CS 可以明显改善 CFAR 在多目标干扰环境下的检测性能。当采用 CSCA-CFAR 时,相对标准 CA-CFAR 一般有 5.0~6.0 dB 的信噪比改善;当采用 CSOS-CFAR 时,其信噪比改善随干扰数目的不同而有较大的变化,大约为 1.0~10.0 dB,大多情况下都优于 CSCA-CFAR。当干扰目标数较小时,采用 CSCA-CFAR 可以获得良好的检测稳定性;当干扰数较多时,可以采用 CSOS-CFAR 以进一步减少检测损失。

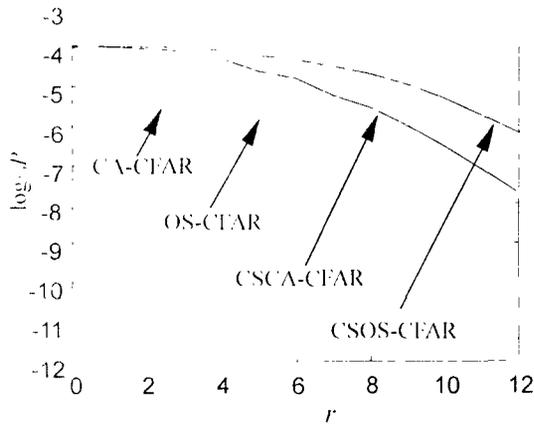


图4 不同检测器的虚警性能比较
($N=24, K=20, C=S=10$ dB)

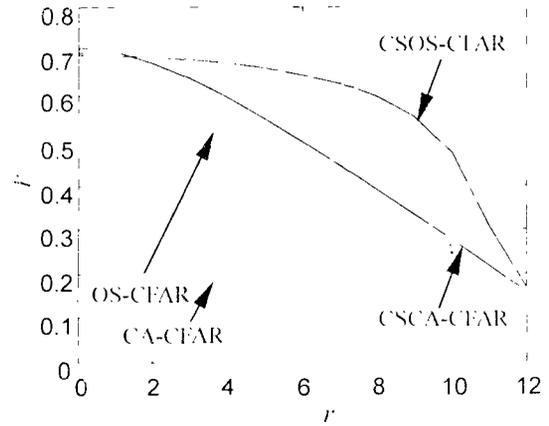


图5 不同检测器的检测性能比较
($P_f=10^{-4}, N=24, K=20, C=S=15$ dB)

3 结论

本文提出了一种通过对背景信号进行单元筛选(CS)预处理,提高CFAR检测性能的方法。分析表明,该方法可以有效地降低参考背景窗中的干扰目标出现频度,从而提高CFAR的检测性能与虚警控制能力。在均匀环境下,单元筛选不改变参考信号的分布规律,因而不会带来额外的性能损失;在多目标干扰非均匀环境下,单元筛选即使在存在严重的干扰时,也能提供良好的检测性能与虚警控制能力。与以往的方法相比,单元筛选具有更好的抗多目标干扰能力,而且工程实现简单,计算量小,如果采用并行处理,其附加的处理时延几乎可以忽略。

参考文献:

- [1] 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,1999.
- [2] Varshney P K. Distributed detection and Data Fusion[M]. New York. Heidelberg,Spinger-Verlag,1996.
- [3] Gandhi P P,Kassam S A. Analysis of CFAR processors in nonhomogeneous backgrounds[J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems,1988,24(7):424 - 445.
- [4] Uner M K,Varshney P K. Distributed CFAR detection in homogeneous and nonhomogeneous backgrounds [J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems,1996,32(1):84 - 97.

CFAR Detection Under Multi-target Environments

WANG Ming-yu¹, YUAN Han-xiong²

(1. Missile Institute, AFEU., Sanyuan 713800, China; 2. PAL. Unit 93861, Sanyuan 713800, China)

Abstract: A new CFAR detection method based on cell select (CS) is developed and its detection performance is analyzed under different environments. The results indicate that this technique can improve the performance of CA and OS-CFAR detection in multi-target interference environments without any performance loss in homogeneous environments.

Key words: CFAR detection; cell select; multi-target interference